

תכנון מערכת החשמל לאתר PV בשטחי קיבוץ "משמר הנגב" וחיבורו לרשת מתח גבוה

## Power System Design of PV Site at Kibutz "Mishmar HaNegev" With Its Connection to Medium Voltage Network

### פרויקט גמר הנדסי

מגישים :

• שם הסטודנט: עובידה אלמלך  
תעודת זהות: 325040806

• שם הסטודנט: עלאא גרה  
תעודת זהות: 211446463

### קבוצה: 22

בהנחיית

ד"ר אלברטו ברנשטיין

הוגש למחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה  
המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון  
באר שבע

## תקציר הפרויקט

התפתחות טכנולוגיות האנרגיה בשנים האחרונות מדגישה את החשיבות שבשילוב מקורות אנרגיה מתחדשים במערכות החשמל המודרניות. עלייה מתמשכת בצריכת החשמל, לצד מודעות גוברת להשפעות הסביבתיות של ייצור אנרגיה ממקורות מזהמים, מובילה לביקוש גדל לפתרונות המבוססים על אנרגיה נקייה. האנרגיה הסולארית, הנחשבת לאחד המקורות הזמינים והיעילים ביותר, מציעה חלופה אמינה למקורות המסורתיים, ובישראל – הודות לתנאי אקלים מיטביים – היא מהווה פוטנציאל משמעותי במיוחד.

מערכת פוטו-וולטאית (PV) מנצלת את קרינת השמש לצורך ייצור חשמל באמצעות תאים סמי-מוליכים. אף על פי שנצילותם מוגבלת מבחינה פיזיקלית, מערכות אלו מאפשרות ייצור אנרגיה בהיקפים גדולים, תוך שימוש בפאנלים סולאריים, ממירי DC/AC, לוחות חשמל, שנאים ומערכות הגנה מתקדמות. שילוב נכון של רכיבים אלו מאפשר אספקת אנרגיה יציבה, בטוחה ומתמשכת למתקן ולרשת החשמל הארצית.

פרויקט זה עוסק בתכנון הנדסי מלא של מערכת ייצור וחלוקת אנרגיה סולארית, כחלק מדרישות תואר ראשון בהנדסת חשמל (B.Sc.) מטרת התכנון היא לספק פתרון חשמלי המבוסס על מקור אנרגיה חלופי, להפחית את התלות בדלקים פוסיליים ולהציע מערכת ייעודית העומדת בדרישות בטיחות, תקינה ויעילות גבוהות. העבודה כוללת תכנון מיקום הפאנלים, בחירת מערך הממירים, תכנון מערכות השנאה, לוחות החשמל והגנות המתח הגבוה, וכן הגדרת חיבור המתקן לרשת חברת החשמל.

המערכת מתוכננת בהתאם לחוקי ותקנות החשמל בישראל, להנחיות מנהל החשמל ולמערך התקינה הנוגע למתקני PV. בתהליך מושם דגש על תפקוד בטוח של הרכיבים החשמליים, ניצול מיטבי של אנרגיית השמש, נגישות תחזוקתית גבוהה ועמידה בכל דרישות הבקרה וההגנה.

במהלך התכנון מיושמים עקרונות הנדסיים מרכזיים הכוללים:

1. יצירת מערכת חשמל הפועלת באופן יציב ובטוח בהתאם לסטנדרטים מקצועיים מחמירים.
2. מיקסום הספק הייצור באמצעות טכנולוגיות MPPT ושילוב תכנון חשמלי מדויק.
3. התאמה רגולטורית מלאה לתקנות הבטיחות והתקינה של מערכות פוטו-וולטאיות בישראל.
4. תכנון גישה ותחזוקה נוחה לכלל ציוד המתקן.
5. יישום מערכות הגנה מתקדמות ומנגנוני בקרה לשיפור אמינות המערכת.

פרויקט זה מציג תכנון הנדסי מקיף הכולל חישובי עומסים, זרמי קצר, מפלי מתח, בחירת כבלים ושנאים, תכנון הגנות והצגת סימולציות הנדסיות – ובכך מהווה בסיס מקצועי להקמת מערכת סולארית אמינה, בטוחה ויעילה.

| שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

## ABSTRACT

The growing demand for clean and sustainable energy solutions has positioned solar energy as a key element in the transition toward environmentally responsible power generation. Increasing global concerns regarding air pollution, greenhouse gas emissions, and the long-term impacts of climate change have accelerated the integration of renewable energy technologies into modern electrical systems. Due to its high solar radiation levels throughout the year, Israel presents an ideal environment for photovoltaic (PV) power generation, making solar energy a highly effective alternative to conventional fossil-fuel-based sources.

Photovoltaic systems convert sunlight into electrical energy using semiconductor-based solar cells. Although limited by intrinsic efficiency constraints, PV systems are capable of producing substantial power using relatively small installation areas. These systems typically consist of solar panels, DC/AC inverters, electrical switchboards, transformers, and advanced protection and control devices, all working together to ensure safe and stable energy production for on-site loads and the national grid.

This project presents a comprehensive engineering design of a solar-based power generation and distribution system, carried out as part of the requirements for the Bachelor of Science (B.Sc.) degree in Electrical Engineering. The project aims to design an electrical system that relies on a renewable energy source, reduces dependence on traditional fossil fuels, and meets high standards of safety, reliability, and efficiency. The work includes the selection and placement of PV panels, inverter configuration, low- and medium-voltage distribution design, transformer specification, and the definition of the connection point to the Israel Electric Corporation's distribution network.

The design process is conducted in accordance with Israeli electrical regulations, PV installation standards, and guidelines issued by the Ministry of Energy and the national electrical authority. Emphasis is placed on system reliability, optimal energy yield, ease of maintenance, and full compliance with protection and control requirements.

Several key engineering principles guide the project, including:

1. Ensuring safe and stable operation of all electrical components within the system.
2. Maximizing power output through MPPT technologies and accurate electrical design.
3. Meeting all regulatory, safety, and technical standards for PV installations in Israel.
4. Providing convenient access for maintenance and operational handling.

שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו

5. Implementing advanced protection, automation, and monitoring systems to enhance long-term reliability.

This project delivers a complete engineering solution including load calculations, short-circuit analysis, voltage-drop evaluations, transformer and cable selection, protection design, and simulation of system behavior—establishing a solid foundation for the implementation of a modern, efficient, and dependable photovoltaic installation.

## תוכן עניינים

<b>10</b>	<b>פרק 1 – מבוא ושלבי תכנון</b>	<b>10</b>
10	1.1 הקדמה	10
11	1.2 תיאור הבעיה ההנדסית	11
11	1.3 פתרון הבעיה ההנדסית	11
12	1.4 אפיוני המערכת	12
12	1.4.1 תיאור האתר	12
12	1.4.2 מפרט האתר	12
12	1.4.3 שלבי העבודה העקרוניים ומרכיבי התכנון	12
13	1.4.4 תוצר הפרויקט שיוגש	13
<b>13</b>	<b>פרק 2 – סקר ספרות</b>	<b>13</b>
13	2.1 קרינת השמש [1], [2]	13
14	2.1.1 השמש כמקור אנרגיה [1], [2]	14
14	2.1.2 התפלגות קרינת השמש [1], [2]	14
14	2.1.3 הגדרת זווית השמש [2], [4]	14
15	2.1.4 פיזור קרינת השמש והקרנה ישירה [2], [4]	15
16	2.2 פאנל סולארי – מבנה ומאפיינים חשמליים [3], [4], [8]	16
16	2.2.1 מבנה בסיסי של פאנל סולארי [3], [4]	16
17	2.2.2 פנל סולארי – מודל חשמלי ומעגל תמורה [3], [4], [8]	17
18	2.2.3 אופיין זרם-מתח של פנל סולארי [3], [4], [8]	18
19	2.2.4 אופייני I-V עבור מודולים בחיבור מקבילי וטורי [3], [4], [8]	19
21	2.2.5 יעילות של תאים סולאריים ומודולים [2], [3], [16]	21
23	2.2.6 קרינת השמש וטמפרטורה [2], [3], [16]	23
24	2.2.7 מעגל תמורה של פנל סולרי בחיבור לרשת [3], [4], [8], [12]	24
26	2.2.8 סטנדרת בדיקה STC – [6], [2], [7]	26
27	2.3 מהפכים (Inverters) במערכות פוטוולטאיות [9], [10], [11], [12]	27
28	2.3.1 מהפך DC/AC (Inverter) [9], [10], [11], [12]	28
29	2.3.2 אזור התקנת המהפך [11]	29
29	2.3.3 שיפור מקדם ההספק במתקן [13], [14]	29
30	2.3.4 כונון מתח ותדר של המהפך [12], [13], [19]	30
32	2.4 שנאים [1], [2], [4], [6]	32
32	2.4.1 עבודת שנאים במקביל	32
33	2.4.2 העמסת שנאים במקביל	33

33	2.5 מונים [11], [15]
33	2.6 בחירת מוליכים וכבלים [10]
34	2.7 עמידות הציוד במתחי יתר [10]
34	2.8 זרם קצר [3], [10]
35	2.9 מפל מתח [3], [10]
35	2.10 הגנות בלוחות חשמל [3], [10]
35	2.11 רשת ההולכה, ההשנאה והחלוקה [10], [11]
35	2.12 חדר מיתוג [10], [11]
35	2.13 תחנת טרנספורמציה פנימית (תט"פ) [10], [11]
36	2.14 הארקות [3], [10], [11]
36	2.15 התגוננות מפגיעות ברק [3], [10], [11]
36	2.16 מגני ברק [10], [11]
<b>37</b>	<b>פרק 3 - תכנון ושלבי ביצוע</b>
37	3.1 הצבת המודולים בשטח האתר
39	3.2 תצורת המערכת הסולארית
40	3.3 בחירת פרמטרים ותכנון המערכת הסולארית
40	3.3.1 בחירת מהפך
41	3.3.2 חלופות
43	3.3.3 חישוב מספר המהפכים במערכת, כמות מחרוזות ולוחות מאספים
44	3.3.4 בחירת מודולים סולאריים
45	3.3.5 חישוב מספר המודולים וחלוקתם למחרוזות
48	3.3.6 בחירת שנאים
51	3.4 חישוב הגנות ושטחי חתך של כבלים במתקן הסולארי
<b>61</b>	<b>פרק 4 - תכנון מערכות הולכה והגנה</b>
62	4.1 חישוב זרמי קצר
63	4.2 בחירת כבלים
65	4.3 מסדר מ"ג משני
68	4.4 מסדר מ"ג ראשי
70	4.5 שנאי מתח, שנאי זרם וממסרי הגנה
74	4.6 מקדם הספק ובקרת הספק ריאקטיבי
75	4.7 בחירת שנאי בית
76	4.8 לוח מתח נמוך – הזנת מתקן
<b>80</b>	<b>פרק 5 - הארקות והגנות מפני חשמול</b>
81	5.1 הארקות המודולים הסולאריים
82	5.2 הארקות מהפכים
82	5.3 הארקות שנאים, מבנים ולוחות חשמל
83	5.4 הגנה מפני מתחי יתר וברקים

שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |

83	5.5 מגני מתח יתר בצד המתח הנמוך
84	5.6 מגני מתח יתר בצד המתח הגבוה
85	5.7 משגוח בידוד
<b>86</b>	<b>פרק 6 - בדיקות המתקן</b>
86	6.1 בדיקה מוקדמת של מסמכים טכניים
86	6.2 בדיקת תכניות מאושרות לביצוע
86	6.3 בדיקות קבלה של המתקן
87	6.3.1 בדיקות כלליות
87	6.3.2 בדיקות מערכת ההארקה
87	6.3.3 בדיקות נקודת החיבור לרשת
87	6.3.4 בדיקות לוחות חשמל
87	6.3.5 בדיקות חדרי חשמל ומסדרי מתח גבוה
88	6.3.6 בדיקות שנאים
88	6.3.7 בדיקות רשת הכבלים התת־קרקעית
88	6.3.8 בדיקות מערכות ההגנה
<b>88</b>	<b>פרק 7 - תוצרי הפרויקט</b>
88	7.1 ספר הפרויקט
89	7.2 תכנון הנדסי של המתקן
89	7.3 שרטוטים הנדסיים
89	7.4 חישובים הנדסיים
90	7.5 מסמכים טכניים
90	7.6 קבצי הפרויקט
<b>91</b>	<b>פרק 8 – סיכום ומסקנות</b>
92	נספח A - מודולים סולאריים
92	נספח B - שנאים
94	נספח C - מהפכים
96	נספח D - סוללת קבלים
96	נספח E - נתיכי DC למערכת
97	נספח F - מסדר מתח גבוה משני Siemens 8DJH
97	נספח G - מנתק עומס לוח מאסף משני
98	נספח H - מסדר מתח גבוה משני
99	נספח I - מפסק ראשי ABB Tmax XT7S 1600A
99	נספח J - כבלים
100	נספח K - תכנית פריסת המודולים הפוטו־וולטאיים באתר
<b>101</b>	<b>רשימת מקורות</b>

## רשימת איורים

10	1.1 – שיעור החשמל המיוצר מאנרגיה מתחדשת	10
15	2.1 – הגדרת זוויות בטכנולוגיה סולארית	15
16	2.2 – מבנה של פאנל סולארי	16
17	2.3 – מעגל תמורה של תא סולארי	17
19	2.4 – אופיין מתחזרם (I-V) של מודול PV	19
20	2.5 – עקומת I-V עבור שלושה תאים מחוברים בטור	20
21	2.6 – עקומת I-V עבור שלושה תאים מחוברים במקביל	21
24	2.7 – מעגל תמורה של פאנל סולארי בחיבור לרשת	24
27	2.8 – ספקטרום קרינה	27
29	2.9 – בלוק דיאגרמה של מהפך PV עם MPPT	29
37	3.1 – שטח אתר ההתקנה	37
39	3.2 – המרחק המינימלי בין השורות	39
40	3.3 – אופן חיבור מערכת הייצור לתחמי"ש	40
41	3.4 – מהפך SMA Sunny Central 900CP XT	41
42	3.5 – מהפך יחיד במתקן	42
42	3.6 – סטרינג של מודולים	42
43	3.7 – שילוב של סטרינגים	43
45	3.8 – מודולים סולאריים מסוג SunPower SPR-X21	45
48	3.9 – אופן החיבור של המודולים הסולאריים במערכת	48
51	3.10 – דיאגרמת חיבור המערכת	51
53	3.11 – חיבור מחרוזת פאנלים סולאריים (PV) לבית נתיך	53
54	3.12 – מנתק בעומס מתוצרת ABB מדגם OTDC200	54
55	3.13 – מפסק תיבה יצוקה ABB Tmax XT7S 1600A	55
60	3.14 – תכנון ראשוני לאחר חישוב ההגנות	60
61	4.1 – מבנה רשת המתח הגבוה באתר וחיבור תחנות האזור למסדר הראשי	61
66	4.2 – מסדר מ"ג Siemens מסוג DJH8	66
66	4.3 – תרשים מסדר מ"ג בתצורת RRT	66
67	4.4 – מרכיבי מסדר המתח הגבוה	67
68	4.5 – תרשים תפעול מסדר המתח הגבוה	68
69	4.6 – מסדר מ"ג ראשי Siemens 8DJH במתח 22kV	69
69	4.7 – שרטוט חד־קווי של מסדר המתח הגבוה הראשי במתקן	69
70	4.8 – ממסר הגנה SIPROTEC 7SJ80	70
71	4.9 – עקומת ניתוק ממסר מתח יתר ותת־מתח בהתאם לדרישות חברת החשמל	71
73	4.10 – שנאי זרם Siemens 4MA7	73

73	איור 4.11 – שנאי מתח Siemens 4MR
75	איור 4.12 – חיבור סוללת קבלים לפס הצבירה במסדר המתח הגבוה הראשי
76	איור 4.13 – שנאי בית ABB בהספק 160kVA וביחס השנאה 22/0.4kV
76	איור 4.14 – נתוני לוח סיסטם T4P-H
78	איור 4.15 – טבלת מקדמי זרם הלם לפי IEC 61439-1/2
79	איור 4.16 – סימולציית ניתוק זרם הלם במפסק ABB XT3
79	איור 4.17 – בדיקת הגנה עורפית בין מפסק MCCB למא"זים
81	איור 5.1 – חיבור הארקה של מודול סולארי לקונסטרוקציית המתכת באמצעות קלמפ הארקה
82	איור 5.2 – שיטת הארקה מסוג TN-S עבור לוח המתח הנמוך ושנאי הבית
83	איור 5.3 – מיקום מגני מתח יתר במערכת פוטו-וולטאית בהתאם למרחקי הכבילה
84	איור 5.4 – מגן מתח יתר מסוג ABB OVR PV
84	איור 5.5 – מגן מתח יתר מתוצרת RAYCHEM מדגם RSTI-SA-05
85	איור 5.6 – משגוח בידוד ABB CM-IWN-DC
92	איור A.1 – מפרט מודול SunPower SPR-X21-470-COM
92	איור B.1 – תחנת השנאה SMA Transformer Compact Station
93	איור B.2 – נתוני שנאי SC1800
93	איור B.3 – נתוני שנאי SC800
94	איור C.1 – מהפך SMA Sunny Central 900CP XT
95	איור C.2 – נתונים טכניים של המהפך
96	איור D.1 – סוללת קבלים ונתונים טכניים
96	איור E.1 – נתיך ABB E9F PV 10A 1000VDC
97	איור F.1 – מסדר מתח גבוה Siemens 8DJH
97	איור G.1 – מנתק עומס ABB OTDC
98	איור G.2 – נתונים טכניים של מנתק ABB OTDC
98	איור H.1 – לוח מאסף ראשי DC
99	איור I.1 – מפסק ABB Tmax XT7S 1600A
99	איור J.1 – כבל PV1-F 1×6mm <sup>2</sup>
100	איור J.2 – כבל XLPE 12/20(24)kV

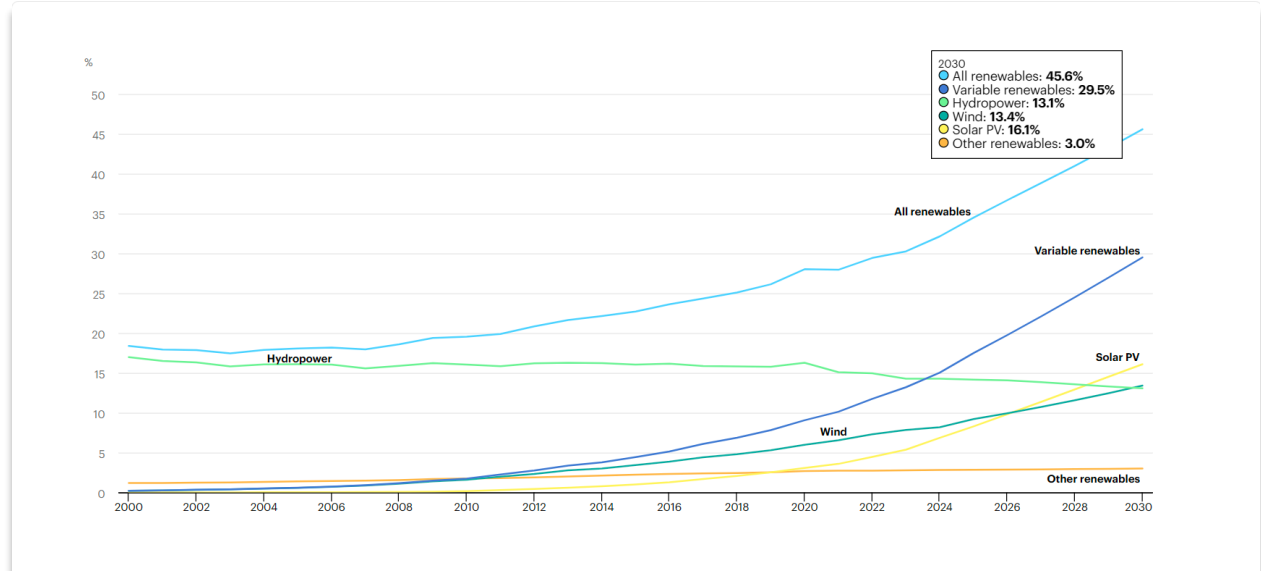
## רשימת טבלאות

30	טבלה 2.1 - תנאי ניתוק הממיר מהרשת
50	טבלה 3.1 - פרמטרי שנאי הייצור התלת ליפופי
50	טבלה 3.2 - פרמטרי שנאי הייצור התלת ליפופי
65	טבלה 4.1 - סיכום הכבלים שנבחרו במערכת המתח הגבוה
72	טבלה 4.2 - פונקציות ההגנה של ממסר ההגנה

## פרק 1 – מבוא ושלבי תכנון

### 1.1 הקדמה

העלייה המתמדת בביקוש לאנרגיה חשמלית, לצד הרצון לצמצם את התלות במשאבים מתכלים ומזהמים, מובילים בעשורים האחרונים להאצת המעבר למקורות אנרגיה מתחדשת. בין המקורות השונים, האנרגיה הסולארית מהווה פתרון מרכזי בייצור חשמל נקי, עקב זמינותה הגבוהה, יכולת ההפקה המשמעותית, והעלויות ההולכות ופוחות של טכנולוגיות פוטוולטאיות. מדינת ישראל, המאופיינת ברמות קרינה גבוהות במיוחד ברוב ימות השנה, מהווה סביבת התקנה אופטימלית למערכות סולאריות בהיקף גדול. בעקבות מגמת ההתפתחות, מערכות פוטוולטאיות משמשות כחלופה אמינה וגמישה למערכות ייצור חשמל מסורתיות. מערכות אלה משלבות פאנלים סולאריים, ממירי הספק, לוחות חשמל, שנאים ומערכות הגנה מתקדמות המבטיחות פעולה יציבה, בטוחה ויעילה לאורך זמן. שילוב טכנולוגיות אלו מאפשר הפחתת פליטות מזהמים ושילוב חכם של אנרגיה ירוקה ברשת החשמל הארצית. פרויקט זה עוסק בתכנון הנדסי מלא של מערכת לייצור וחלוקת חשמל סולארית בהספק גבוה, הממוקמת בשטח הצמוד לקיבוץ משמר הנגב. במסגרת העבודה יבוצע תכנון כולל של המערכת, החל מפריסת הפאנלים בשטח ועד חיבור המתקן לרשת ההולכה והחלוקה של חברת החשמל, הכולל חישובים הנדסיים, בחירת רכיבים, בדיקות בטיחות וסימולציות הנדסיות.



איור 1.1 - שיעור החשמל המיוצר מאנרגיה מתחדשת

## 1.2 תיאור הבעיה ההנדסית

האתגר ההנדסי העיקרי העומד בבסיס הפרויקט הוא יצירת מערכת סולארית רחבת-היקף שתעמוד בדרישות הייצור, הבטיחות, התקינה והאמינות של מערכת חשמל בהספק כולל של 9.6 מגה-וואט. המערכת נדרשת לפעול בתנאי סביבה חיצוניים, להתממשק עם רשת החשמל הארצית, לספק תפוקת אנרגיה אופטימלית, ולשמור על יציבות ובטיחות ברמה גבוהה. הבעיה כוללת התמודדות עם מספר גורמים משמעותיים:

- **תכנון פריסה פיזית** של מערך פאנלים על שטח רחב-היקף של כ-50 דונם.
- **התאמת הממירים והשנאים** להספקים גבוהים ועמידה בזרמי קצר.
- **שמירה על מפלי מתח בתחום התקני** לאורך הרשת הפנימית של המתקן.
- **תכנון הגנות מתקדמות** בהתאם לתקני מתח נמוך ומתח גבוה.
- **קביעת הארקות והגנות ברקים** המותאמות למתקן שטח נרחב.
- **עמידה בדרישות הרגולציה** של חוק החשמל ותיקני חברת החשמל.

המענה לבעיה מחייב שילוב יכולות תכנון רב-מערכתיות והסתמכות על ניתוחים הנדסיים מדויקים.

## 1.3 פתרון הבעיה ההנדסית

- פתרון הבעיה מבוסס על תכנון מערכת סולארית מלאה, הכוללת את הרכיבים והשילובים הבאים:
1. **קביעת תצורת מערך הפאנלים הסולאריים**, כולל זוויות התקנה, מרווחים, וחיבורי מחרוזות לקבלת הספק מיטבי.
  2. **בחירת מהפכים (Inverters) מתוצרת SMA**, בעלי מנגנון MPPT המותאם להפקת אנרגיה מרבית בתנאי קרינה משתנים.
  3. **תכנון מערכת המתח הנמוך**, כולל לוחות חשמל, מפסקים, הגנות, וחתכי כבלים בהתאם לזרמי העומס והקצר.
  4. **תכנון מערכת המתח הגבוה**, הכוללת שנאים, מסדרי מ"ג, הגנות ANSI, וחיבור לרשת 22 kV.
  5. **ביצוע חישובים הנדסיים**: זרמי קצר, מפלי מתח, בחירת חתכי כבלים, חישובי קבלים לשיפור מקדם הספק ועוד.
  6. **תכנון הארקות והגנות מפני ברקים**, כולל הארקות פאנלים, ציוד מתח גבוה ומתח נמוך.
  7. **סימולציות המערכת**, לאימות התכנון תחת תרחישי עומס שונים.
- הפתרון המוצע מאפשר יצירת מערכת יציבה, בטוחה ויעילה העומדת בדרישות שתוכננו.

## 1.4 אפיוני המערכת

### 1.4.1 תיאור האתר

קיבוץ משמר הנגב ממוקם בצפון הנגב, תחת המועצה האזורית בני שמעון. בסמוך לקיבוץ מתוכננת הקמת תחנת כוח סולארית בהיקף משמעותי, שתשתרע על שטח של כ-50 דונם. בהתאם להתייעצות עם גורמים מקצועיים, נדרש שטח ממוצע של כ-5 דונם לכל מגהוואט הספק, ולכן המתקן תוכנן להספק כולל של כ-9.6 מגהוואט.

האתר מאפשר:

- חשיפה גבוהה לקרינת שמש.
- פריסת פאנלים בהיקף רחב ללא הצללות משמעותיות.
- נגישות טובה לתחזוקה.
- חיבור פשוט יחסית לתשתיות מתח גבוה של חברת החשמל.

### 1.4.2 מפרט האתר

המערכת הסולארית באתר תכלול:

1. 11 תחנות ממירים (Inverter Stations)
2. חדר מיתוג של חברת החשמל.
3. מבנה בקרה ותפעול.
4. מסדר כניסה ראשי.
5. פאנלים פוטרוולטאיים מתוצרת Sun Power.
6. מהפכים מתוצרת SMA
7. שנאים מתוצרת SMA מותאמים למערכות PV

### 1.4.3 שלבי העבודה העקרוניים ומרכיבי התכנון

תכנון האתר משלב דיסציפלינות שונות בהנדסת חשמל ומבוצע לפי השלבים:

1. איסוף נתוני עומסים וצריכת חשמל באתר.
2. תכנון פריסת הפאנלים להשגת קליטה מרבית של קרינת השמש.
3. תכנון לוחות חשמל במתח נמוך ובמתח גבוה.
4. חישוב חתכי כבלים ובחירת הגנות מתאימות.
5. תכנון סוללות קבלים לשיפור מקדם ההספק לערך תקני של 0.92 ומעלה.
6. תכנון מתקן ההשנאה במתח גבוה, כולל:

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

- קביעת הספק השנאים
- בחירת כבלי חלוקה
- בחירת מסדר מ"ג
- הגדרת סוג החיבור לרשת 22 kV
- בחירת הגנות מ"ג
- ביצוע בדיקות ציוד מ"ג
- 7. חישובי זרמי קצר ומפלי מתח בהתאם לתקן.
- 8. תכנון הארקות והגנות מפני ברקים.
- 9. בחירת מהפכים לצורך המרת DC ל-AC.
- 10. ניתוח סלקטיביות בין כל מערכות ההגנה.

#### 1.4.4 תוצר הפרויקט שיוגש

במסגרת הפרויקט יוגשו :

1. תכנון מלא של מערכות החשמל בהתאם לדרישות החוק והתקינה.
2. תכנון פריסת המערך הסולארי בשטח האתר.
3. סכמה חד־קווית של מערכת החשמל.
4. בדיקת עמידות המערכת בפני זרמי קצר.
5. חישובי מפלי מתח.
6. בחירת כל הגנות החשמל הדרושות.
7. תכנון מערכת הארקות מלאה.
8. בחירת ציוד מתח גבוה לתחנת הטרנספורמציה הפנימית (תט"פ).
9. קביעת הספק וסוג השנאים, כולל בחינת ההגנות הרלוונטיות.

## פרק 2 – סקר ספרות

### 2.1 קרינת השמש [1],[2]

קרינת השמש מהווה את הבסיס לכל מערכת פוטו־וולטאית, שכן היא המקור הראשוני לאנרגיה הזמינה להמרה לחשמל. הבנת מאפייני הקרינה, התפלגותה, זוויות הפגיעה שלה וההבדל בין רכיבי הקרינה השונים, מאפשרת לבצע תכנון מדויק של מערך מודולים סולאריים ולהעריך את תפוקת האנרגיה הצפויה מהמתקן לאורך השנה.

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

### 2.1.1 השמש כמקור אנרגיה [1], [2]

מקור האנרגיה הסולארית הוא בתהליכי היתוך גרעיני המתרחשים בליבת השמש, שבהם אטומי מימן מתמזגים ליצירת הליום. בתהליך זה חלק קטן ממסת החומר מומר לאנרגיה על פי משוואת איינשטיין

$$E = mc^2$$

למרות שהשמש פולטת אנרגיה עצומה, רק חלק זעיר ממנה מגיע לכדור הארץ – כ־שתי מיליוניות מכלל הקרינה הנפלטת. עם זאת, כמות זו מספיקה כדי להוות מקור אנרגיה טבעי רב־עוצמה: ההערכות מצביעות על כך שכמות האנרגיה הסולארית הפוגעת בפני כדור הארץ בכל רגע נתון גדולה פי 10,000 מצריכת האנרגיה הכוללת של האנושות. למעשה, כ־0.01% בלבד מאור השמש המגיע לכדור הארץ יכול לכסות את כלל צרכי האנרגיה העולמיים.

נתונים אלו מדגישים את הפוטנציאל האדיר הגלום באנרגיה סולארית כפתרון מרכזי לאתגרי האנרגיה של העולם המודרני, במיוחד במדינות בעלות קרינת שמש גבוהה כדוגמת ישראל.

### 2.1.2 התפלגות קרינת השמש [1], [2]

עוצמת הקרינה הסולארית מחוץ לאטמוספירה משתנה בהתאם למרחק המשתנה בין כדור הארץ לשמש לאורך השנה. המרחק נע בין:

- $1.47 \times 10^8$  ק"מ

- $1.52 \times 10^8$  ק"מ

עקב שינוי זה, עוצמת הקרינה  $E_Q$  נעה בתחום:

- $1325 \text{ W/m}^2$  ועד  $1412 \text{ W/m}^2$

הערך הממוצע מוגדר כהקבוע הסולארי, ומשמש בסיס לחישובי אנרגיה סולארית:

$$E_Q = 1367 \text{ W/m}^2$$

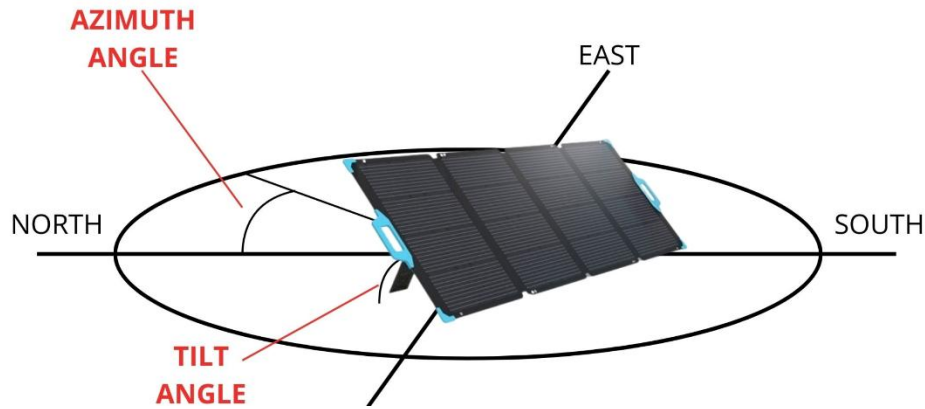
### 2.1.3 הגדרת זווית השמש [2], [4]

לצורך חישוב הקרינה הסולארית המגיעה למערכות פוטו־וולטאיות נדרש לתאר את מיקום השמש במרחב באמצעות שתי זוויות יסוד:

1. **גובה השמש** – (Solar Elevation Angle) הזווית בין קרני השמש לבין קו האופק.
2. **אזימוט השמש** – (Solar Azimuth Angle) הכיוון האופקי ממנו מגיעות קרני השמש ביחס לצפון.

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |

במערכות אנרגיה סולארית מוגדר הכיוון הדרומי כ- $\alpha = 0^\circ$ .  
 סטייה מזרחה ומערבה ניתנת בסימן חיובי, בעוד שסטייה לכיוון צפון ניתנת בסימן שלילי.  
 הגדרות אלו מאפשרות לחשב את הקרינה הפוטנציאלית המגיעה לפני שטח ה-PV ולבצע אופטימיזציה של  
 כיוון המודולים להשגת תפוקה מרבית.



איור 2.1 - הגדרת זוויות בטכנולוגיה סולארית

#### 2.1.4 פיזור קרינת השמש והקרנה ישירה [2], [4]

הקרינה הסולארית המגיעה לפני הקרקע מורכבת משני רכיבים:

1. **קרינה ישירה (Direct Radiation)** – קרינה המגיעה מהשמש בקו ישר ללא פיזור, ומהווה את עיקר האנרגיה הנקלטת עלידי מודולים סולאריים, בעיקר בימים בהירים.
  2. **קרינה מפוזרת (Diffuse Radiation)** – קרינה המתפזרת באטמוספירה עקב עננות, אדי מים וחלקיקי אבק, ומגיעה אל המשטח מכל הכיוונים.
- הקרינה הכוללת על משטח היא סכום שני הרכיבים:

$$G = B + D$$

כאשר:

$B$  – קרינה ישירה

$D$  – קרינה מפוזרת

## 2.2 פאנל סולארי – מבנה ומאפיינים חשמליים [3], [4], [8]

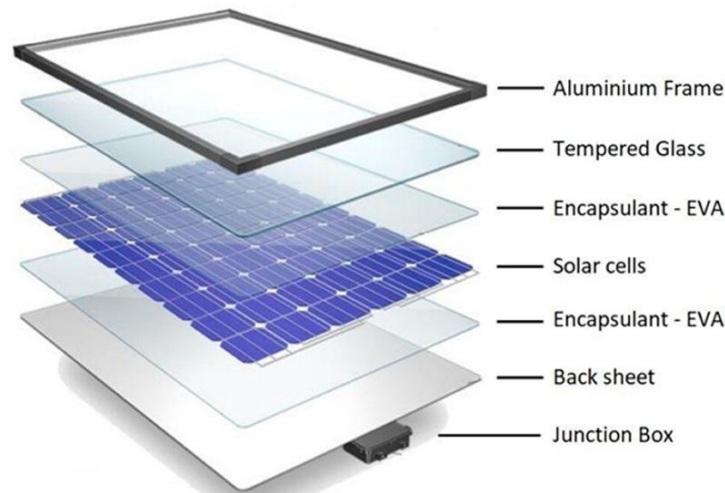
פאנל סולארי (מודול פוטוולטאי) הוא הרכיב המרכזי במערכת PV שתפקידו להמיר אנרגיית קרינה מהשמש לאנרגיה חשמלית בצורת זרם ישר (DC) לצורך תכנון הנדסי של מערכת סולארית נדרש להכיר את מבנה הפאנל, את המודל החשמלי השקול שלו, את עקומות הזרם-מתח, ואת ההשפעה של תנאי סביבה כגון קרינה וטמפרטורה על תפוקת המודול. בפרק זה יוצגו עקרונות הפעולה והמאפיינים המרכזיים של מודולים סולאריים, אשר משמשים בסיס לחישובי תכנון מערך המודולים, בחירת מהפכים וקביעת תנאי עבודה אופטימליים.

### 2.2.1 מבנה בסיסי של פאנל סולארי [3], [4]

בפרויקט זה נבחר להשתמש במודול סולארי מסוג מונוקריסטל (Monocrystalline Silicon) מודולים אלה מיוצרים מפרוסות דקות הנחתכות מגביש יחיד של סיליקון טהור, מה שמקנה להם מראה אופייני בצבע שחור כהה ואחיד.

היתרון המרכזי של תאים חד-גבישיים הוא יעילות אנרגטית גבוהה, המגיעה לרוב לערכים של 17%–20% וכן עמידות טובה לאורך זמן בתנאי חוץ משתנים. עם זאת, תהליך הייצור שלהם דורש חיתוך מדויק מתוך גביש יחיד, מה שמוביל לבזבז חומר גלם ולעלויות ייצור גבוהות יותר בהשוואה לטכנולוגיות אחרות כמו פוליקריסטל.

בשל יחס עלות-תפוקה גבוה, יציבות חשמלית ויעילות מרבית בתנאי קרינה טובים, סוג מודול זה מתאים במיוחד למתקנים סולאריים בהספק גדול — ולכן נבחר כפתרון הטכני בפרויקט הנוכחי.



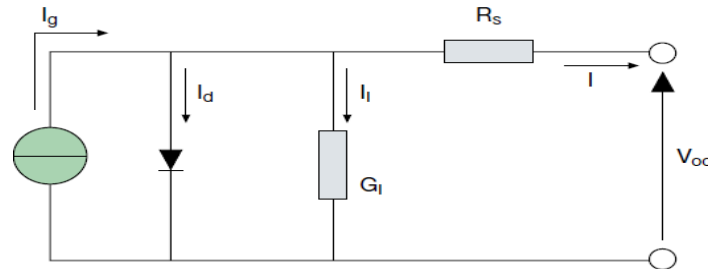
**איור 2.2 - מבנה של פנל סולארי**

**פנל סולארי בסיסי בנוי באופן הבא:**

- פאנל סולארי מורכב ממספר שכבות ורכיבים המשולבים ליצירת מודול יציב ועמיד:
- **מסגרת (Frame):** אלומיניום מחוזק להגנה מכנית ויציבות המבנה.
  - **זכוכית קדמית (Glass):** זכוכית מחוסמת בעלת שקיפות גבוהה להגנה מפני פגיעות סביבתיות.
  - **שכבת אטימה (Encapsulant – EVA):** שכבה שקופה המחברת ומגנה על התאים הסולאריים.
  - **תאים סולאריים (Solar Cells):** תאי סיליקון מונוקריסטלי הממירים את קרינת השמש לחשמל.
  - **כיסוי אחורי (Back Sheet):** שכבה אחורית לבידוד והגנה מפני לחות ופגיעות.
  - **קופסת חיבורים (Junction Box):** נקודת החיבור החשמלית של הפאנל הכוללת דיודות מעקף.

**2.2.2 פנל סולארי – מודל חשמלי ומעגל תמורה [3], [4], [8]**

הרכיב האחראי להפוך את אנרגיית השמש למתח וזרם חשמלי ישר DC. לניתוח התנהגות חשמלית של תא פוטו-וולטאי, מקובל לייצג אותו באמצעות מעגל תמורה שקול. מודל זה כולל מקור זרם פוטו-וולטאי המייצג את הזרם הנוצר ביחס ישר לקרינת השמש, דיודה המייצגת את מאפייני המוליך למחצה, התנגדות טורית  $R_s$  המבטאת הפסדי הולכה, ומוליך דליפה במקביל בעל מוליכות  $G_l$  (או התנגדות  $R_{sh}$ ).



**משוואות המודל החשמלי**

**איור 2.3 - מעגל תמורה של תא סולארי**

באמצעות חוק הזרמים בצומת מתקבל:

$$I = I_g - I_d - I_l$$

זרם הדיודה ניתן על-פי משוואת שוקלי:

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{AkT}} - 1 \right)$$

זרם הדליפה דרך המוליכות המקבילית:

$$I_l = G_l \cdot (V + IR_s)$$

לכן מתקבלת משוואת הזרם הכוללת של התא:

$$I = I_g - I_0 \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{AkT}} - 1 \right) - G_l(V + IR_s)$$

### מתח ריקם — $V_{OC}$ Open Circuit Voltage

במצב ללא עומס  $I = 0$ :

$$I_g - G_L V_{OC} = I_0 \left( e^{\frac{qV_{OC}}{AkT}} - 1 \right)$$

כאשר מתעלמים מהדליפה ומהפסדי הדיודה:

$$V_{OC} = \frac{AkT}{q} \ln \left( \frac{I_g}{I_0} + 1 \right)$$

### זרם קצר — $I_{SC}$ Short Circuit Current

כאשר  $V = 0$ :

$$I_{SC} = I(V = 0) = I_g$$

### 2.2.3 אופיין זרם-מתח של פנל סולארי [3], [4], [8]

התנהגות הפנל הסולארי מתוארת על-ידי עקומת זרם-מתח ( $I-V$ ), המבטאת את הקשר בין הזרם  $I$  שהמודול מספק לבין המתח  $V$  בקצותיו, עבור תנאי קרינה וטמפרטורה נתונים. הקשר המתמטי הכללי מתקבל ממשוואת מעגל התמורה:

$$I = I_g - I_0 \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{AkT}} - 1 \right) - G_L (V + IR_s)$$

בדרך מעשית משתמשים לרוב בעקומת  $I-V$  גרפית, ממנה מגדירים שלוש נקודות עיקריות:

#### • זרם קצר $I_{SC}$

נקודת העבודה כאשר קצות הפנל מקוצרים ( $V = 0$ ):

$$I_{SC} = I_g$$

זוהי הנקודה השמאלית בעקומה, בה הזרם מקסימלי והמתח אפסי.

#### • מתח ריקם $V_{OC}$

נקודת העבודה כאשר הפנל פתוח ללא עומס ( $I = 0$ ):

$$V_{OC} = \frac{AkT}{q} \ln \left( \frac{I_g}{I_0} + 1 \right)$$

זוהי הנקודה הימנית בעקומה, בה המתח מקסימלי והזרם אפסי.

• **נקודת הספק מירבי MPP**

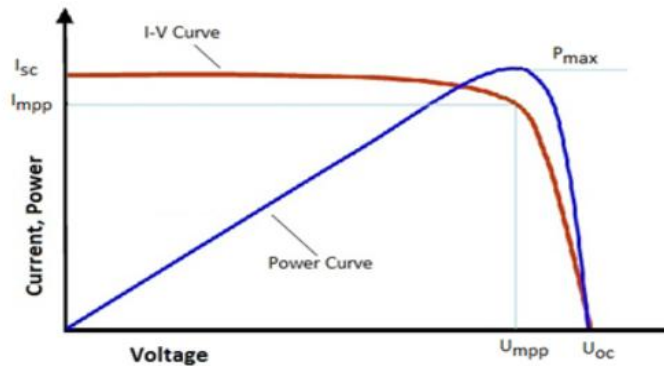
בין  $I_{SC}$  ל  $V_{OC}$  קיימת נקודה שבה ההספק מקסימלי. נקודה זו נקראת MPP-Maximum Power Point, ונקבעת על-ידי בקר MPPT בממיר.

נהוג להגדיר את **מקדם המילוי (Fill Factor – FF)**:

$$P_{MPP} = I_{MPP} \cdot V_{MPP}$$

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}}$$

ערך FF גבוה מעיד על עקומת I-V ריבועית יותר ועל איכות חשמלית טובה יותר של המודול. עקומת ה I-V, יחד עם ערכי  $I_{SC}$  ו  $V_{OC}$ , ו MPP-מהווה בסיס לתכנון מערכת ה PV-לבחירת ממירים מתאימים ולחישוב ההספק הצפוי במצבי עבודה שונים.



**איור 2.4 - אופיין מתח - זרם של מודול PV**

**2.2.4 אופייני I-V עבור מודולים בחיבור מקבילי וטורי [3], [4], [8]**

כאשר מחברים מספר מודולים סולאריים יחד, מתקבל שינוי בהתנהגות החשמלית הכוללת של המערכת. חיבור המודולים יכול להתבצע בשתי תצורות עיקריות חיבור טורי וחיבור מקביל. לכל תצורה השפעה שונה על אופיין ה I-V של המערכת.

| שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |

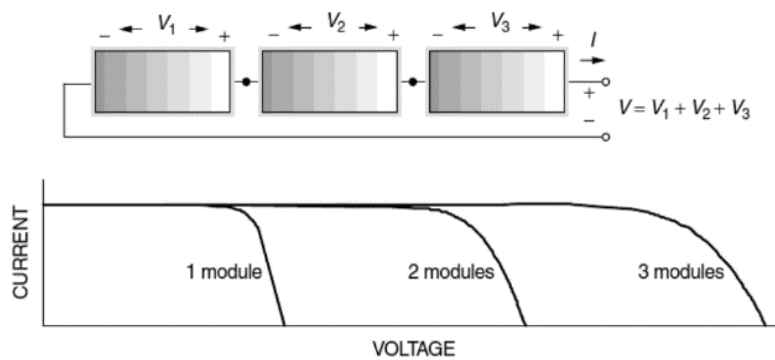
### חיבור טורי (Series Connection):

במערך טורי מחברים את היציאה החיובית של מודול אחד ליציאה השלילית של המודול הבא. במקרה זה:

$$V_{OC,series} = \sum V_{OC,i}$$

$$I_{SC,series} = I_{SC}$$

- כלומר — המתח גדל לינארית עם מספר המודולים, בעוד שהזרם נשאר כמעט ללא שינוי.
- מתאים להעלאת המתח להזנת ממיר DC-AC ולצמצום הפסדי הולכה בכבלים.
- מגבלה חשובה: הצללת מודול אחד ← ירידה בזרם כל השרשרת.



איור 2.5 - עקומת I-V עבור שלושה תאים מחוברים בטור

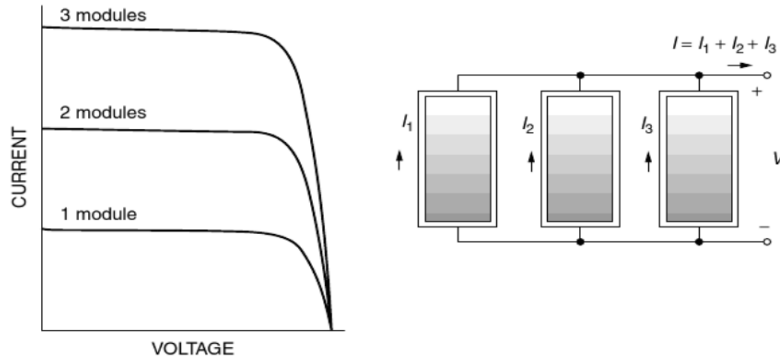
### חיבור מקבילי (Parallel Connection):

בחיבור מקבילי כל המודולים מחוברים לקווי הזנה משותפים (פלוס לפלוס, מינוס למינוס):

$$I_{SC,parallel} = \sum I_{SC,i}$$

$$V_{OC,parallel} = V_{OC}$$

- כלומר — הזרם גדל בהתאם למספר המודולים, אך המתח נשאר זהה למודול יחיד.
- מתאים להגדלת הזרם ולמתן עמידות טובה יותר בפני הצללות חלקיות.



**אוויר 2.6 - עקומת I-V עבור שלושה תאים מחוברים במקביל.**

**תרומת החיבור לעקומת I-V הכוללת**

- חיבור טורי ← העקומה נמתחת לכיוון ציר המתח
  - חיבור מקבילי ← העקומה נמתחת לכיוון ציר הזרם
- הספק כולל:

$$P_{total} = V_{total} \cdot I_{total}$$

לכן, תצורת חיבור נכונה מאפשרת אופטימיזציה של:

- התאמת מתח מערכת לדרישות הממיר
- זרמי הולכה סבירים בכבלים
- שמירת נקודת MPP אופטימלית

**2.2.5 יעילות של תאים סולאריים ומודולים [2], [3], [16]**

יעילות של תא פוטו-וולטאי מוגדרת כיחס בין ההספק החשמלי המופק לבין ההספק הסולארי המוקרן על שטח התא. יעילות זו מושפעת מאיכות החומר, משטח התא, מאפיינים פיזיקליים, טמפרטורה ותנאי תאורה.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{G \cdot A}$$

כאשר:

- $\eta$  – יעילות המודול
- $P_{out}$  – ההספק החשמלי המתקבל בנקודת MPP
- $P_{in}$  – ההספק המוקרן על שטח הפנל

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

- $G$  – הספק קרינה  $[\frac{W}{m^2}]$
- $A$  – שטח פעיל  $[m^2]$

### גורמים המשפיעים על היעילות

#### 1. טמפרטורה

עליית טמפרטורת התא גורמת לירידה במתח  $V_{OC}$ , ולכן לירידה ביעילות.

#### 2. סוג החומר ותהליך הייצור

- תאים מונוקריסטליים ← יעילות גבוהה (17%–22%)
- פוליקריסטליים ← יעילות בינונית (15%–18%)
- Thin-film ← יעילות נמוכה יותר (10%–13%)

#### 3. הצללות, לכלוך ואובדן אופטיקה

- ירידה משמעותית בתפוקה ← ירידה ב  $I_{SC}$

#### 4. הפסדי מערכת פנימיים

- הפסדים טוריים  $R_s$
- זרמי דליפה דרך  $G_l$

### מקדם מילוי (Fill Factor – FF)

יעילות התא תלויה גם באיכות העקומה I-V ולכן מוגדר:

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}}$$

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |

ערך FF גבוה מעיד על מודול איכותי עם הפסדים נמוכים.

### יעילות מערכתית (System Efficiency)

מלבד התא עצמו, קיימים הפסדים נוספים:

$$\eta_{system} = \eta_{module} \cdot \eta_{inverter} \cdot \eta_{cables} \cdot \eta_{other\ losses}$$

בפועל, היעילות הכוללת של מערכת PV מסחרית בישראל נעה לרוב סביב:

$$15\% - 18\%$$

### 2.2.6 קרינת השמש וטמפרטורה [2], [3], [16]

ביצועי המודול הפוטוולטאי תלויים באופן ישיר בשני פרמטרים סביבתיים מרכזיים עצמת הקרינה הסולארית וטמפרטורת התא.

#### השפעת הקרינה

עלייה בקרינת השמש  $G$  גורמת לעלייה כמעט ליניארית בזרם הקצר  $I_{SC}$ , ולכן בהספק המודול:

$$I_{SC} \propto G$$

המתח  $V_{OC}$  מושפע מהקרינה בצורה לוגריתמית בלבד ולכן השפעתו קטנה יותר. בימים בהירים ההספק גדל משמעותית לעומת תנאי מעונן.

#### השפעת טמפרטורה

הטמפרטורה משפיעה בעיקר על מתח הריקם  $V_{OC}$ . עליית טמפרטורה גורמת לירידה בריכוז הפוטנציאל הפוטוולטאי, ולכן:

$$\frac{dV_{OC}}{dT} < 0$$

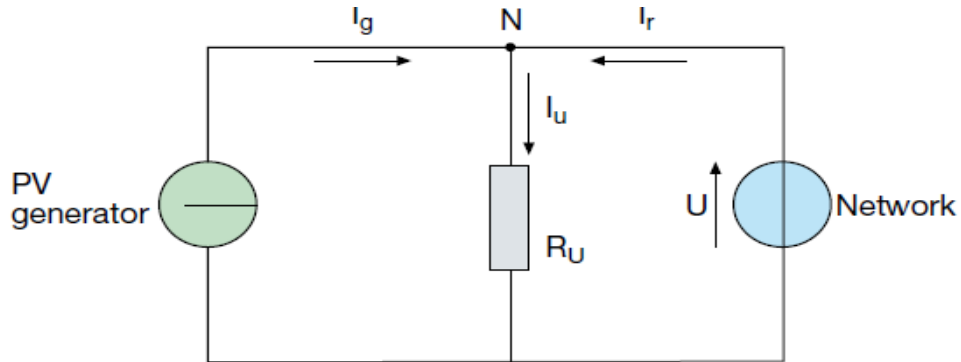
מקדם הטמפרטורה של ההספק המודול הוא לרוב:

$$1^\circ C \text{ לכל } -0.5\% \text{ עד } -0.3\%$$

| שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |

לכן, למרות שישראל נהנית מקרינה גבוהה הטמפרטורות הגבוהות פוגעות ביעילות.

**2.2.7 מעגל תמורה של פנל סולרי בחיבור לרשת [3], [4], [8], [12]**



איור 2.7 - מעגל תמורה של חיבור לרשת

- $I_g$  – הזרם מצד מחולל ה-PV-
- $I_r$  – הזרם מצד הרשת (Network)
- $I_u$  – הזרם דרך הנגד  $R_U$  כלפי מטה
- $U$  – מתח הרשת
- $N$  – נקודת הצומת העליונה

**משוואת הזרם בצומת N (KCL)**

בצומת N נפגשים שלושת הזרמים:

$$I_g = I_r + I_u$$

או בצורה אחרת:

$$I_r = I_g - I_u$$

זרם הגנרטור מתחלק לזרם שיוצא לרשת ולזרם שעובר דרך  $R_U$ .

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

**זרם דרך הנגד  $R_U$  לפי חוק אוהם**

מאחר שהמתח על הנגד הוא  $U$  :

$$I_u = \frac{U}{R_U}$$

**שילוב המשוואות**

מציבים את  $I_u$  במשוואת ה KCL :

$$I_r = I_g - \frac{U}{R_U}$$

**התנהגות זרמים והספקים במערכת PV מחוברת רשת**

אם  $I_G = 0$  כמו שקורה בשעות הלילה, הזרם שהרשת תספק יהיה :

$$I_R = \frac{U}{R_U}$$

כאשר הזרם הנוצר עלידי השדה הסולארי מנוצל עלידי הצרכן, הזרם המסופק עלידי הרשת יהיה שווה לאפס.

כאשר הבידוד עולה, אם הזרם הנוצר  $I_G$  גדל ביחס למה שנדרש עבור  $I_U$ , הזרם  $I_R$  הופך להיות שלילי כלומר אין זרם מהרשת אלא מוזרם אליה, חשמל מוזן חזרה לרשת.

**ביטויי הספקים במעגל**

$$P_U = U \cdot I_U = \frac{U^2}{R_U}$$

$$P_G = U \cdot I_G$$

$$P_R = U \cdot I_R$$

## משמעות פיזיקלית

- $P_U$  – ההספק המסופק לעומס/לצרכן
- $P_G$  – ההספק המיוצר על ידי השדה הסולארי
- $P_R$  –
- חיובי - המערכת **צורכת** חשמל מהרשת
- שלילי - המערכת **מספקת** חשמל לרשת

### 2.2.8 סטנדרט בדיקה STC – [7],[2],[6]

על מנת להשוות בצורה עקבית בין ביצועי מודולים סולאריים שונים, נקבעה בתעשייה הגדרה לתנאי בדיקה סטנדרטיים (Standard Test Conditions) STC. נתוני ההספק הנומינלי של מודול PV המופיעים בדפי הנתונים (Datasheet) נמדדים בהתאם לתנאים אלו.

#### תנאי STC מוגדרים כ:

- **עצמת קרינה:**

$$G = 1000 \frac{W}{m^2}$$

קרינה ישירה, גל קצר בגלים של AM1.5

- **טמפרטורת תא:**

$$T_{cell} = 25^\circ C$$

- **ספקטרום קרינה:**

AM1.5 – (Air Mass) מייצג תנאי שמש בשעת צהריים בזווית של  $48^\circ$

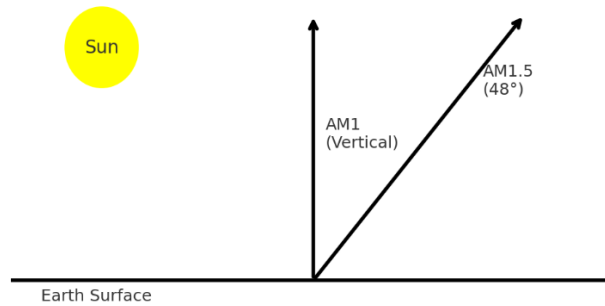
מסת האוויר (Air Mass) AM מציינת כמה פעמים עובי האוויר האנכי צריכה קרינת השמש לעבור באטמוספירת כדור הארץ עד להגעה לפני השטח. הערך AM מבטא את אורך מסלול הקרינה באטמוספירה ביחס למצב בו השמש ניצבת בדיוק מעל הראש (AM1).

לדוגמה:

ב-AM1.5 הקרינה עוברת דרך אטמוספירה עבה יותר פי 1.5 מאשר בזווית אנכית.

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

## Air Mass Concept: AM1 vs AM1.5



איור 2.8 - ספקטרום קרינה

### שימוש וחשיבות

- מאפשר השוואה אחידה בין מודולים של יצרנים שונים
- הספק המודול שמסומן כ- $P_{max}$  מתקבל אך ורק בתנאי STC
- בשטח, עקב טמפרטורות גבוהות והפסדים נוספים:

$$P_{real} < P_{STC}$$

לכן נתוני STC מתאימים לחישוב תאורטי.

### 2.3 מהפכים (Inverters) במערכות פוטוולטאיות [9], [10], [11], [12]

מהפך הוא רכיב אלקטרוני מרכזי במערכת PV שתפקידו להמיר את המתח הישר (DC) המתקבל מהפאנלים הסולאריים למתח חילופין (AC) המתאים להזנה לרשת החשמל. בנוסף להמרה, המהפך מבצע מעקב אחר נקודת ההספק המרבי (MPPT) מסנכרן את המתח והתדר לרשת (50Hz), ומספק הגנות תפעוליות כגון ניתוק בעת חריגות מתח/תדר ומניעת אייחבודדות (Anti-Islanding) מהפכים מודרניים מתאפיינים ביעילות גבוהה מאוד (כ-97%–99%) ומשפיעים באופן ישיר על תפוקת האנרגיה והאמינות של המתקן.

### 2.3.1 מהפך DC/AC (Inverter) [9], [10], [11], [12]

במערכות פוטו-וולטאיות המייצרות אנרגיה חשמלית מאור השמש, המתח המופק מהמודולים הסולאריים הינו ישר (DC). אולם, רשת החשמל ומרבית הצרכנים החשמליים פועלים באמצעות מתח חילופין (AC) בתדר ובמתח קבועים. על-כן, נדרש רכיב אלקטרוני המבצע המרה של האנרגיה המיוצרת מצורת DC לצורת AC – רכיב זה נקרא מהפך. הממיר הוא מרכיב קריטי במערכת PV והוא משפיע באופן ישיר על איכות האנרגיה ועל התפוקה הכוללת של המתקן. הוא משמש כליבה הטכנולוגית בין המודולים הסולאריים לבין הצרכנים ורשת החשמל, ועליו מוטלת האחריות לבצע מספר פעולות הנדסיות חשובות:

- **המרת DC ל- AC** תוך יצירת גל סינוסי נקי, תואם לתדר הרשת (50Hz)
- **סנכרון מלא עם הרשת** מבחינת תדר, מתח ופאזה
- **שמירה ושליטה על מקדם ההספק (Power Factor)** בהתאם לדרישות רגולטוריות
- **מניעת אי-התבודדות (Anti-Islanding)** ניתוק מיידי בעת נפילת רשת
- **בקרת בטיחות והגנה מפני זרמי קצר**, עומסים, חימום יתר ומתחי יתר
- **אופטימיזציית הפקת האנרגיה** באמצעות MPPT (Maximum Power Point Tracking)
- **ניטור ותקשורת עם מערכת בקרת התחנה או רשת SCADA**

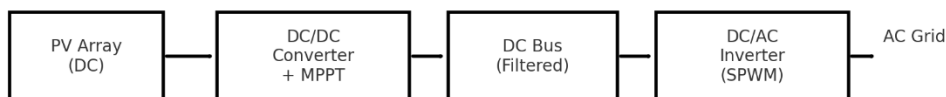
הודות להתקדמות טכנולוגית משמעותית בעשור האחרון, ממירים מודרניים מגיעים ליעילות המרה גבוהה מאוד, הנעה בין:

97% – 99%

ולכן, כל אחוז יעילות נוסף משפיע באופן מצטבר על תפוקת תחנה סולארית לאורך שנים. בנוסף, ממירים משמשים היום גם ככלי לשיפור יציבות הרשת. הם מסוגלים להזרים הספק ריאקטיבי ( $Q$ ), לשמור על רמות מתח תקינות ולהקטין עיוותי הרמוניות, וכך להפחית פגיעה באיכות החשמל. עם חדירה הולכת וגוברת של מתקני PV לרשת החלוקה, הממירים הופכים להיות שחקן פעיל בניהול משק החשמל.

בפרויקט הנוכחי נעשה שימוש בממירים חדישים מסוג **String Inverter** מתוצרת **SMA**, המתאימים במיוחד למתקנים מסחריים בהספק של מספר מגה-ואט, תוך מתן אמינות גבוהה ויכולת ניתור ובקרה מתקדמת.

Block Diagram - PV Inverter with MPPT (Grid Connected)



## איור 2.9 - בלוק דיאגרמה של מהפך PV עם MPPT

### 2.3.2 אזור התקנת המהפך [11]

בעת בחירת אתר ההתקנה, חשוב לוודא שהתנאים הסביבתיים שצוינו על ידי היצרן נשמרים (לחות וטמפרטורה). האתר האידיאלי להתקנת מהפכים הוא קריר ויבש, בתוך מבנה חסר אבק. רצוי להתקין את המהפך ליד המונה או בקרבת מקום. אם התנאים הסביבתיים מאפשרים זאת, ניתן להתקין את המהפך קרוב לתיבת החיבורים, פעולה זו מפחיתה את אורכו של כבל ה-DC הראשי ומורידה את עלויות ההתקנה. סורגי האווורור ומפזרי החום צריכים להיות חשופים כל הזמן על מנת להבטיח קירור אופטימלי. מאותה הסיבה, המכשירים לא צריכים להיות מותקנים אחד ליד השני, אם ניתן להימנע מזה. גם רעש המיוצר על ידי המהפך צריך להילקח בחשבון בעת בחירת אתר ההתקנה. היחידות צריכות להיות מוגנות מפני אדים אגרסיביים, אדי מים וחלקיקים עדינים. לדוגמה, באסמים או אורוות, אדי אמוניה יכולים להיווצר ולגרום נזק למהפך. מהפכים מרכזיים גדולים יותר מותקנים לעתים קרובות בארון מהפכים נפרד, יחד עם ציוד מדידה ומפסקי מגן. מהפכי סטרינג משמשים יותר ביישומים חיצוניים על גגות או במקום אחר מחוצה לו. להתקנים אלה יש הגנת IP 54 והם יכולים לעמוד בתנאי מזג אוויר חיצוניים. עם זאת, עדיין מומלץ שיהיו מוגנים מפני שמש ישירה וגשם על מנת להשפיע לחיוב על אורך חיי השירות שלהם. כמו כן, יש להבטיח נגישות במקרה של תקלה כדי לאפשר תיקונים למהפך.

### 2.3.3 שיפור מקדם ההספק במתקן [13], [14]

במערכת פוטוולטאית המחוברת לרשת, המהפכים אחראים לא רק להמרת האנרגיה מהצד ה-DC אל הרשת במתח AC, אלא גם לשליטה במקדם ההספק (Power Factor). המהפכים המודרניים פועלים כך שההספק המוזרם לרשת הינו **אקטיבי טהור**, כלומר:

$$\cos \varphi \approx 1$$

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |

כאשר אין דרישה להזרים הספק תגובתי  $Q$ .  
בהתאם לתקנות חברת החשמל בישראל, על המתקן לעמוד בדרישה:

$$\cos \varphi \geq 0.92$$

לשם כך, המהפך מסוגל לבצע ייצור או צריכה של הספק תגובתי לפי מצב הרשת, ומקדם ההספק ניתן לכוונון בתחום:

$$0.9 \leq \cos \varphi \leq \text{קיבולי } 0.9$$

כלומר: המהפך יכול לספק  $Q > 0$  (לרשת (קיבולי), או לקלוט  $Q < 0$  (מהרשת (השראי), ובכך לסייע בייצוב מתח הרשת והפחתת זרמי פסיעה.

#### 2.3.4 כונון מתח ותדר של המהפך [12], [13], [19]

תחומי הכיוונון של מערכות ההגנה בפני חריגות מתח ותדר יהיו כמפורט להלן:  
מערכת ההגנה בפני חריגות מתח תנתק את המהפך מרשת החשמל כאשר המתח בנקודת החיבור לרשת חורג מהגבולות המופיעים בטבלה, ותוך פרק הזמן הנקוב בטבלה שלהלן:

זמן מרבי עד לניתוק	מתח (V) בנקודת חיבור המתקן לרשת חברת החשמל (באחוזים מהמתח הנקוב של הרשת)
0.1 שנייה	$V < 50\%$
2 שניות	$50\% \leq V < 85\%$
פעולה רציפה	$85\% \leq V \leq 110\%$
2 שניות	$110\% < V < 135\%$
0.05 שנייה	$135\% \leq V$

#### **טבלה 2.1 - תנאי ניתוק הממיר מהרשת**

המתקן יתפקד ברציפות בתחום התדרים שבין 47 הרץ לבין 51.5 הרץ. מערכת ההגנה בפני חריגות תדר תנתק את המהפך מרשת החשמל כאשר התדר בנקודת החיבור לרשת:

- קטן מ-47 הרץ - בתוך פרק זמן של 0.2 שניות לפחות.
- גדול מ-51.5 הרץ - בתוך פרק זמן של 1 שנייה לפחות.

| שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

במתקנים פוטו ווטלאיים בינוניים המחוברים במתח גבוה – כל מתקן יצור יהיה בעל יכולת ויסות ראשוני של ההספק המיוצר בהתאם לתדר, ולצורך זה יצויד בווסת עומס/תדר או ווסת דומה המאפשר תגובה לשינוי התדר. ההספק המיוצר בהתאם לשינוי התדר יחושב יחסית להספק הזמין בהתאם לנוסחה הבאה:

$$\Delta P = -\frac{P_{available}}{R} \cdot \frac{f - 50.2 \text{ Hz}}{f_{base}}$$

**בתנאי שהתדר נמצא בין הגבולות  $50.2 \text{ Hz} < f < 51.5 \text{ Hz}$**

כוונן הספק בהתאם לשינוי בתדר הרשת

- תדר המערכת בפועל בתנאי שהוא בטווח בטוח:

$$50.2 \text{ Hz} < f < 51.5 \text{ Hz}$$

- תדר המערכת הנומינלי:

$$f_{base} = 50 \text{ Hz}$$

- ההספק הזמין של המתקן:

$$P_{available}$$

- קבוע רוויות (Droop):

$$R = 3\%$$

- שינוי בהספק הנדרש עקב שינוי בתדר בפועל:

$$\Delta P = P_{generated} - P_{available}$$

- ההספק המיוצר בהתאם לשינוי התדר בטווח הבטוח:

$$P_{generated} \text{ כאשר } 50.2 \text{ Hz} < f < 51.5 \text{ Hz}$$

כאשר התדר ברשת עולה מעל הערך הנומינלי, נדרש להפחית את ההספק המיוצר על-ידי המהפך, ולהפך — מנגנון זה נועד לשמור על יציבות הרשת ולמנוע חריגות תדר.

## 2.4 שנאים [1], [2], [4], [6]

שנאי הוא רכיב אלקטרומגנטי המעביר אנרגיה חשמלית בין שני מעגלים נפרדים באמצעות השראה מגנטית. תפקידו העיקרי הוא התאמת רמת המתח הנדרשת לצרכן או לרשת, תוך שמירה על בידוד חשמלי בין הצד הראשוני למשני. מכיוון שהאנרגיה החשמלית המיוצרת בתחנות הכוח מועברת למרחקים גדולים, מתח ההולכה חייב להיות גבוה לצורך צמצום הפסדים. לפני אספקת החשמל לצרכנים, המתח מונמד בהדרגה על ידי שנאים בשלבי חלוקה שונים. שני סוגי השנאים הנפוצים בתעשייה הם:

- שנאי שמן – סלילי השנאי טובלים בשמן, אשר משמש כמבודד ומקרר. מתאים במיוחד למתקני חוץ ולמתחים והספקים גבוהים.
  - שנאי יצוק (יבש) – ליפופים מצופים חומר בידוד מוצק (אפוקסי). רגיש ללחות ולכן מתאים בעיקר להתקנות פנים-מבנה.
- בפרויקט הנוכחי נבחר שנאי שמן, שכן המתקן פועל ברמות מתח גבוהות ובהספק משמעותי.

### 2.4.1 עבודת שנאים במקביל

- במערכות הספק גדולות נהוג לחבר שני שנאים או יותר במקביל לצורך הגדלת אמינות מערכת, המשכיות הזנה וגמישות תפעולית. על מנת ששנאים יעבדו במקביל בצורה יציבה, יש לעמוד בתנאים הבאים:
1. המתח הנקוב בראשוני ובמשני של כל השנאים חייב להיות זהה.
  2. קבוצת החיבורים (Vector Group) של כל השנאים חייבת להיות זהה, כדי למנוע הפרשי מופע בין המתח במשניים.
  3. יחס ההספקים הנומינליים חייב להיות קטן מ-3, כלומר:

$$\frac{S_{n1}}{S_{n2}} < 3$$

4. אחרת תיווצר חלוקה לא שוויונית של העומס.
  4. מתחי הקצר של השנאים צריכים להיות בתחום סטייה של  $\pm 10\%$  זה מזה, כדי למנוע זרמי טבעת וחימום יתר.
- כאשר התנאים הנ"ל מתקיימים, השנאים יכולים לחלוק בעומס בצורה אופטימלית ויציבה.

## 2.4.2 העמסת שנאים במקביל

כאשר מספר שנאים מחוברים במקביל לעומס אחד, כל שנאי יקבל חלק יחסי מההספק הכולל בהתאם למתח הקצר שלו. ככל שמתח הקצר של שנאי נמוך יותר, כך הוא יעביר חלק גדול יותר מהעומס. חלוקת ההספק בין השנאים מחושבת באופן הבא:

$$S_i = \frac{S_T}{\left(\frac{S_{n1}}{U_{k1}} + \frac{S_{n2}}{U_{k2}} + \dots + \frac{S_{nj}}{U_{kj}}\right)} \cdot \frac{S_{ni}}{U_{ki}}$$

כאשר:

$S_T$  – סכום ההספקים הנומינליים של כל השנאים המחוברים במקביל

$S_{ni}$  – ההספק הנומינלי של השנאי ה- $i$

$U_{ki}$  – מתח הקצר של השנאי ה- $i$ -באחוזים

באמצעות נוסחה זו ניתן להבטיח שההעמסה תתבצע בצורה מבוקרת ומאוזנת בין השנאים.

## 2.5 מונים [11], [15]

תפקיד מונה חשמל הוא למנות את החשמל המיוצר במערכת הסולארית ולספק את המידע לבעל המערכת. הוא יודע לאמוד את כמות החשמל המיוצר על ידי המערכת הסולארית ואת כמות החשמל שהוזרמה לרשת החשמל ועל כך מתוגמל בעל המערכת מחברת החשמל. לצורך התחשבות עם הלקוח, חברת החשמל מתקינה שני מונים:

1. מונה צריכה דו כיווני – יותקן במקום מונה הצריכה הקיים של הצרכן. מונה זה מונה במקביל הן את כמות החשמל הנצרכת מהרשת והן את כמות החשמל שעוברת לרשת.
2. מונה ייצור – יותקן בסמוך למונה הצריכה ובאופן כזה שיאפשר לחברת החשמל גישה שתאפשר לקרוא, לתפעל ולתחזק את המונה ללא הגבלה.

## 2.6 בחירת מוליכים וכבלים [10]

תכנון מוליכים וכבלים מהווה חלק חשוב בתכנון מתקן חשמלי. במתקן פוטו-וולטאי, הנתון בתנאי חוץ קשים של חשיפה לקרינת שמש, טמפרטורות גבוהות, גשמים, לחות ורוח, לבחירת כבלים נכונה חשיבות רבה במיוחד. יכולת העמסה של כבל מוגדרת ע"י הזרם המקסימלי אותו ניתן להזרים בכבל, מבלי לעבור את הטמפרטורות המותרות במרכיבי כבל (כבל עם בידוד XLPE – 90 מעלות, בידוד PVC – 70 מעלות, ועוד), לאורך חיי הכבל.

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

בעזרת הבנה טובה של האפשרויות שעומדות בפנינו, נוכל לבצע את ההחלטות הנכונות הנוגעות לתפעול, תחזוקה, שימור, חידוש או הרחבת רשת הכבלים בעתיד הכבלים בעתיד.

### 2.7 עמידות הציוד במתחי יתר [10]

מתח יתר הוא מתח העולה על 110% מהמתח הנומינלי של הרשת.  
ישנם שני סוגי מתחי יתר:

1. מתחי יתר פנימיים הנגרמים מתופעות מעבר עקב תקלות וקצרים לאדמה, מיתוג קווי הזנה או שנאים וניתוק עומסים גדולים. מתחים אלה הם בתדר הרשת.

2. מתחי יתר חיצוניים הנגרמים מפגיעות ברק ישירות, תקלות ברשתות מ"ג סמוכות, תקלות בציוד בקרת מתח, תופעות מעבר, קצרים לא סימטריים ועוד. מתחי יתר אלה אינם בתדר הרשת.

לקביעת עמידות הציוד במתחי יתר נערכות שתי בדיקות:

- בדיקת P.W.F. (Power Withstand Frequency). – נעשית ע"י הכנסת מתח יתר הגדול כפי 2 מהמתח הנומינלי, בתדר הרשת, במשך דקה אחת, בדיקה זו קובעת את עמידות הציוד בפני מתחי יתר פנימיים.
- בדיקת B.I.L. (Basic Insulation Level). – בדיקת דגם לפי התקן הבינלאומי IEC, מבוצעת ע"י הכנסת גל מתח הולם הגדול פי 5 מהמתח המרבי שמגיע לשיא תוך 1.2 מיקור שניות ודועך תוך 50 מיקור-שניות ל-50%.

### 2.8 זרם קצר [3], [10]

זרם קצר הוא זרם יתר הנוצר כתוצאה ממגע לא צפוי בין שניים או יותר מוליכים, בעלי פוטנציאל חשמלי שונה. המגע הלא צפוי עשוי להיווצר בגלל הרס הבידוד במכשיר, מגע מקרי בין שני גופים בעלי הפרש פוטנציאלים או חדירת חומר מוליך לטווח המבודד בין מוליכים. בגלל המגע, נוצר מעגל עם התנגדות נמוכה ביותר וזרם גבוה (הזרם כולו אל נקודת הקצר) בהרבה מהמתוכנן, מה שעלול לגרום לתופעות תרמיות ומכאניות כגון: התחממות יתר, שריפה, קריעה והתעוותות של חומרים, התחשמלות והתפוצצות. כמו כן, בזרם קצר נוצרת ירידת מתח, כיוון שהמתח בנק' הקצר הופך ל-0. גודלו של זרם הקצר תלוי בגודל ההספק של מקור הקצר, המרחק בין נק' ההזנה לבין נק' הקצר במתקן ובסוג הקצר.

לחישוב זרם הקצר 2 מטרות עיקריות:

- קביעת כושר הניתוק של מבטח המגן של מוליכי המעגל.
- קביעת עמידות דינמית של ציוד חשמלי.

### 2.9 מפל מתח [3], [10]

מפל המתח מתייחס לבזבזי המערכת בקווי הולכה. הוא מורכב ממפל מתח אקטיבי ומפל מתח ריאקטיבי. מפל מתח מקסימאלי במתקן נמדד בין לוח החשמל הראשי לבין הצרכן הרחוק ביותר של המעגל העמוס ביותר. מפל המתח המרבי המותר הוא עד 3% מהמתח הנומינאלי של הרשת.

### 2.10 הגנות בלוחות חשמל [3], [10]

לוחות חשמל מכילים סוגים שונים של הגנות שתפקידן לנתק את המעגל בו מתרחשת תקלה מזרם החשמל. ההגנות נועדו למנוע נזק לציוד המוזן מהלוח והתחשמלות של אדם המשתמש בציוד ע"י ניתוק מהיר ויעיל. ישנם מספר סוגים של הגנות, ולא כולן בהכרח נמצאות בכל לוח:

1. הגנה בפני קצר חשמלי – הגנה זו מבוצעת על ידי מבטחים מסוג נתיך או מפסק אוטומטי מגנטי תרמי (מאמ"ת). הגנה זו מכונה "הגנה מגנטית".
2. הגנה בפני עומס יתר – הגנה זו מבוצעת על ידי מבטחים מסוג מאמ"ת. הגנה זו מכונה "הגנה תרמית".
3. הגנה בפני התחשמלות – הגנה זו מבוצעת על ידי ממסר פחת.

### 2.11 רשת ההולכה, ההשנאה והחלוקה [10], [11]

קיימים שני סוגי קווי מתח עליון בארץ, קווי מתח על-עליון של 400 kV המקשרים בין ת"כ הגדולות לבין תחנות מיתוג, בהן רמת המתח יורדת ל- 161kV באמצעות השנאה, וקווי מתח עליון 161kV המקשרים את תחנות המיתוג ות"כ הבינוניות לתחנות משנה. בתחנות המשנה רמת המתח מורדת לרמה המתאימה לחלוקה לצרכנים (33/22/13 kV). בקצה רשת החלוקה נמצאים הצרכנים הפרטיים הצורכים (לאחר הורדת רמת מתח נוספת בהשנאה) מתח של 400 V.

### 2.12 חדר מיתוג [10], [11]

חדר זה נמצא ברשות חח"י והוא מופרד באופן פיזי מחדר מתח גבוה או מתחנת הטרנספורמציה הפנימית של הצרכן. בחדר המיתוג נמצאים ארון מדידה וארון פיקוד על ציוד המיתוג.

### 2.13 תחנת טרנספורמציה פנימית (תט"פ) [10], [11]

תט"פ משמשת להמרת האנרגיה החשמלית שבמתח גבוה לאנרגיה חשמלית במתח נמוך וחלוקתה למתקני הצרכנים. בתחנה מותקן ציוד מיתוג במתח גבוה ובמתח נמוך, שנאים, ציוד מדידה, אוטומציה ופיקוד, אשר מתחברים למעגלי המתח הגבוה של הרשת ולמעגלי המתח הנמוך אשר מזינים את הצרכנים.

#### 2.14 הארקות [3], [10], [11]

הארקה היא מערכת שנועדה להגן מפני הנזקים העלולים לקרות עקב תקלה או פגיעה אפשרית במערכת החשמל. הארקה נכונה, העומדת בדרישות תקנות החשמל היא תנאי הכרחי להפעלה בטיחותית של מתקני חשמל למתח גבוה ונמוך ועבור כל מכשיר חשמלי.

הארקה אינה משפיעה על ההתנגדויות במעגל, לא על התנגדות המגע ולא על התנגדות האדם, אך בעזרת שיטות מסוימות ניתן למנוע התחשמלות, או למזער את הנזק בזמן התחשמלות אם ע"י ניתוק מהיר של המקור המחשמל, או הקטנת מתח המגע וע"י כך להקטין את הזרם שעובר בגוף המתחשמל. בהתאם לנדרש בתקנות החשמל, יש להגן בפני חשמול על כל גופי המתכת במתקן ועל כל החלקים המתכתיים הקשורים לגופי מתכת, שאדם עלול לבוא עימם במגע.

#### 2.15 התגוננות מפגיעות ברק [3], [10], [11]

ברק הוא תופעת טבע חשמלית רבת עוצמה בה נפרק חשמל סטטי הנמצא בעניים. בשפה מקצועית ניתן להגדיר תופעה זו כקצר רגעי בו הזרם יכול להגיע עד כ-10,000 אמפר. המתח בין תחתית הענן, שם מתחיל הברק, לבין הקרקע נע בין 20 ל-100 מיליון וולט. פגיעת ברק שכזאת במתקן החשמלי עלולה לגרום להרס רב, לכן חשוב לבחור אמצעי הגנה מתאימים.

#### 2.16 מגני ברק [10], [11]

מגן ברק נועד להגן על ציוד חשמלי במתקני מ"ג בלי לגרום להפסקת חשמל ע"י הגבלת מתחי היתר של הברק והמיתוג לרמה נמוכה מסוימת. יש להתקין מגני ברקים בכל שנאי חיצוני, בכל תחנת משנה ובתחנות מ"ג פנימיות. בבחירת מגני ברק יש לעמוד בקריטריונים הבאים:

1. קביעת המתח הנומינלי שעל המגן לעמוד בו.
2. קביעת הזרם שעל המגן לעמוד בו.
3. קביעת מתח הפריצה ורמת מתח ההגנה (מתח שיורי) של המגן הברק.

## פרק 3 - תכנון ושלבי ביצוע

### 3.1 הצבת המודולים בשטח האתר

בפרויקט זה תוכננה חווה סולארית קרקעית בסמוך ליישוב משמר הנגב, אזור המאופיין בקרינת שמש גבוהה ותנאים סביבתיים מתאימים להקמת מתקן פוטו-וולטאי רחבי-היקף. המתקן מתוכנן לייצר הספק מותקן כולל של 9.6 MW, תוך ניצול מיטבי של השטח הזמין ועמידה בדרישות תקינה, בטיחות ויעילות תפעולית.



**איור 3.1 - שטח אתר ההתקנה**

לצורך הצבת המודולים הסולאריים בשטח נדרש לקבוע מרחק מינימלי בין שורות המודולים, על מנת למנוע הצללה הדדית העלולה לגרום לירידה בתפוקת האנרגיה ולפגיעה בנקודת העבודה האופטימלית של המערכת. מאחר ומדובר בשטח פתוח וללא אובייקטים חיצוניים העלולים לגרום להצללה, הדגש בתכנון הושם על מניעת הצללה הנגרמת בין שורות המודולים עצמן. בשלב הראשון נקבעה זווית ההטיה האופטימלית של המודולים ביחס למישור האופקי. עבור ישראל מקובל להשתמש בקירוב אמפירי הקושר בין זווית ההטיה לבין קו הרוחב של האתר. עבור אזור משמר הנגב, הממוקם בקו רוחב של כ- $31^{\circ}$  התקבלה זווית הטיה של:

$$\beta = 27^{\circ}$$

זווית זו נמצאת בטווח המקובל להתקנת מודולים סולאריים בישראל ( $10^{\circ}$ – $30^{\circ}$ ) ומאפשרת איזון בין תפוקת אנרגיה שנתית גבוהה לבין דרישות מכניות ותפעוליות. לצורך חישוב המרחק המינימלי בין שורות המודולים נבחן המצב הקיצוני ביותר במהלך השנה – היום הקצר ביותר (21 בדצמבר, ובטווח השעות שבהן השמש נמצאת בזווית הנמוכה ביותר ביחס לאופק. בתנאים אלו זווית פגיעת קרני השמש ביחס לקרקע באזור האתר היא בקירוב:

| שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

$$\alpha = 35.5^\circ$$

בפרויקט זה נבחרה קונסטרוקציה שבה כל שורה כוללת חמישה מודולים המותקנים במאונך. אורך מודול יחיד הוא, 0.993 m, ולכן אורך שורה אחת מתקבל כ:

$$L = 5 \cdot 0.993 = 5.958 \text{ m}$$

המרחק הגיאומטרי הדרוש למניעת הצללה בין השורות מחושב על־פי הקשר הטריגונומטרי הבא:

$$D = \frac{L \cdot \sin(180^\circ - \beta - \alpha)}{\sin(\alpha)}$$

הצבה של הנתונים המספריים נותנת:

$$D = \frac{5.958 \cdot \sin(180^\circ - 27^\circ - 35.5^\circ)}{\sin(35.5^\circ)}$$

$$D = \frac{5.958 \cdot \sin(117.5^\circ)}{\sin(35.5^\circ)} \approx 9.1 \text{ m}$$

בהמשך מחושב ההיטל האופקי של שורת המודולים על הקרקע:

$$A_{\text{panel}} = L \cdot \cos(\beta)$$

$$A_{\text{panel}} = 5.958 \cdot \cos(27^\circ) \approx 5.31 \text{ m}$$

לפיכך, המרחק הנקי המינימלי הנדרש בין שורות המודולים לצורך מניעת הצללה מתקבל כ-:

$$B = D - A_{\text{panel}}$$

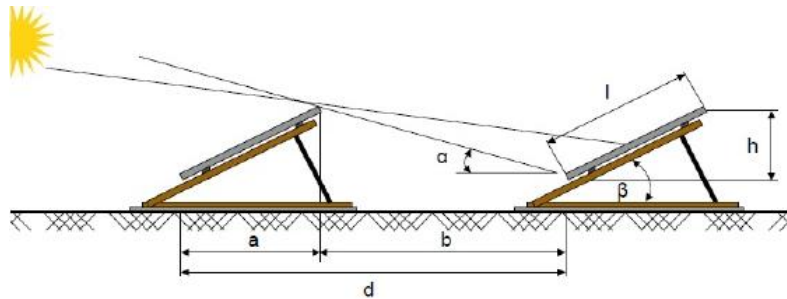
$$B = 9.1 - 5.31 = 3.79 \text{ m}$$

| שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
 פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

כלומר, המרחק המינימלי המומלץ בין שורות המודולים הוא בקירוב:

$$B \approx 3.8 \text{ m}$$

כמות הסטרינגים במערך נקבעה בשלב זה על בסיס חישוב תאורטי ראשוני, אשר אינו כולל אילוצים טופוגרפיים, גאולוגיים או הנדסיים ייחודיים לשטח. לפיכך, ערך זה עשוי להשתנות בשלב התכנון המפורט, לאחר ביצוע סיור שטח וקבלת כלל הנתונים הרלוונטיים. עם זאת, התכנון המוצג מהווה בסיס הנדסי סביר ואמין לקביעת סידור המודולים במתקן.



איור 3.2 - המרחק המינימלי בין השורות

### 3.2 תצורת המערכת הסולארית

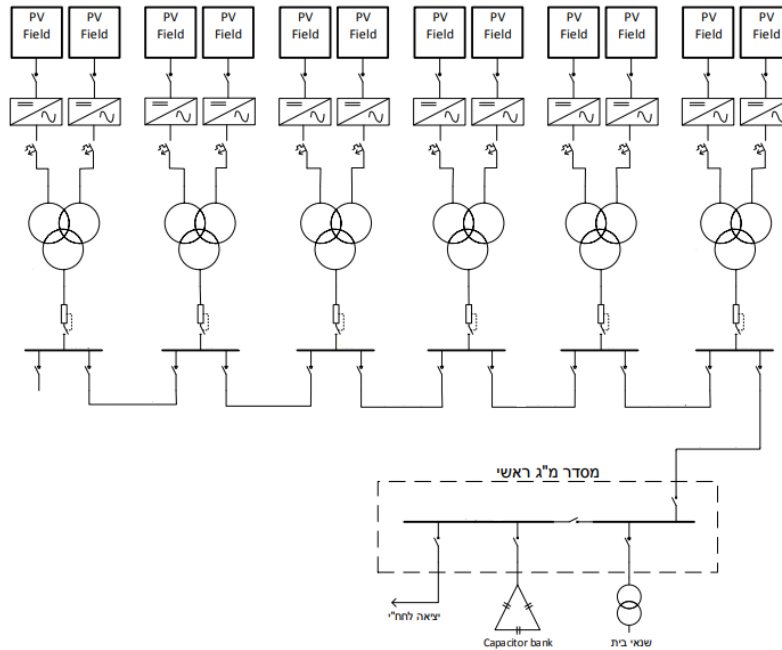
תצורת המערכת הסולארית בפרויקט זה מבוססת על חיבור מודולים פוטוולטאיים במערך משולב של חיבורים טוריים ומקביליים, במטרה להשיג את מתח זורם העבודה הנדרשים להזנת המהפכים בצורה מיטבית. חיבור טורי של מודולים מאפשר הגדלת המתח לרמות המתאימות לכניסת המהפך, בעוד שחיבור מקבילי מאפשר הגדלת הזרם הכולל והפחתת רגישות להצללות חלקיות.

מערכי המודולים מחוברים למהפכים (Inverters) אשר ממירים את המתח הישר (DC) המתקבל מהשדה הסולארי למתח חילופין (AC). במוצא המהפכים מתקבל מתח חילופין קבוע של 342 V בעוד שהזרם משתנה במהלך שעות היום בהתאם לעוצמת קרינת השמש ולתנאי הסביבה. מהפכים אלו כוללים מנגנון MPPT המאפשר הפקת הספק מרבי מהשדה הסולארי בכל רגע נתון.

מתח המוצא של המהפכים מוזן לשנאים תלת-ליפופיים מעלה, אשר מעלים את רמת המתח ממתח נמוך לרמת מתח בינוני של 22 kV, לצורך חיבור המתקן לרשת החלוקה. השנאים מחוברים ביניהם במקביל ומזינים מערכת הולכה פנימית במבנה של רשת רדיאלית, באמצעות לוחות משנה המחברים ללוח הראשי של המתקן.

שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה | פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו

רשת רדיאלית נבחרה כתצורת ההולכה הפנימית בשל יתרונה הכלכלי – עלויות הקמה נמוכות ופשטות תכנונית ותפעולית ביחס לרשתות טבעתיות או רשתות מזווגות. עם זאת, חסרונה העיקרי של רשת זו הוא אמינות נמוכה יחסית, מאחר ותקלה בנקודה אחת עלולה להשפיע על כלל הצרכנים במורד הרשת. למרות זאת, לאור שיקולים טכנו-כלכליים ובהתאם לאופי המתקן, נבחרה תצורה רדיאלית כפתרון המתאים ביותר לפרויקט הנוכחי.



**איור 3.3 - אופן חיבור מערכת הייצור לתחמי"ש**

### 3.3 בחירת פרמטרים ותכנון המערכת הסולארית

#### 3.3.1 בחירת מהפך

במסגרת תכנון המערכת הסולארית באתר נבחרו מהפכים מתוצרת חברת SMA, מדגם SunnyCentral 900CP XT, אשר מיועדים למתקנים סולאריים בהספקים גבוהים ומותאמים במיוחד לחיבור לרשת מתח גבוה.

מהפכים אלו מאופיינים בהספק נומינלי של 900 kVA בצד ה-AC, וביעילות המרה גבוהה במיוחד המגיעה לערך של כ-98.5%, נתון התורם באופן משמעותי להגדלת תפוקת האנרגיה הכוללת של המתקן לאורך זמן. בנוסף, המהפכים תומכים בטווח רחב של מתחי עבודה הן בצד ה-DC והן בצד ה-AC, דבר המאפשר גמישות תכנונית והתאמה מיטבית למערך המודולים הסולאריים.

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

בצד ה-DC, המהפך מאפשר קליטת מתח כניסה של עד 1000 V, נתון המאפשר חיבור מספר רב של מודולים בטור וצמצום זרמי העבודה והפסדי ההולכה. בצד ה-AC נבחר לעבוד במתח תלת־מופעי בטווח של 365 V עד 465 V, כאשר המתח הנומינלי של המהפך הוא 405 V, בהתאם לנתוני היצרן ולדרישות מערכת ההשנאה.

המהפכים כוללים בקרת MPPT (Maximum Power Point Tracking) מתקדמת, המאפשרת מעקב רציף אחר נקודת ההספק המרבי של מערך ה-PV והתאמת נקודת העבודה לשינויים בעוצמת הקרינה ובטמפרטורה. מנגנון זה מבטיח הפקת אנרגיה מיטבית לאורך כל שעות היום ובתנאי סביבה משתנים.

השיקול המרכזי בבחירת מהפכים מתוצרת SMA נובע מהמומחיות הגבוהה של החברה בפיתוח פתרונות טכנולוגיים למערכות פוטו־וולטאיות ביתיות, מסחריות ותעשייתיות, ומהאמינות הגבוהה של מוצריה. יתרון נוסף הוא יכולת ההתאמה המלאה בין המהפכים לבין ציוד ההשנאה והבקרה הנלווה, לרבות שנאים המיועדים במיוחד למערכות PV, דבר התורם לאינטגרציה מערכתית יעילה, בטוחה ואמינה.



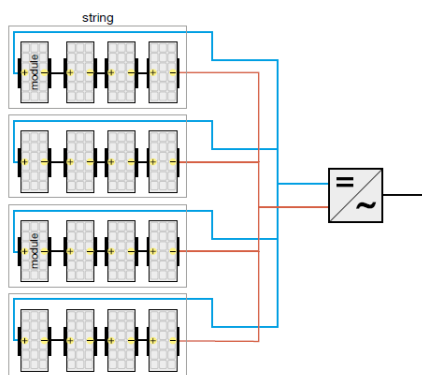
איור 3.4 - מהפך SunnyCentral 900CP XT-SMA

### **3.3.2 חלופות**

בשלב התכנון הראשוני של המערכת הסולארית נבחנות מספר חלופות לצורת ושיטת התקנת המהפכים במתקן, עוד בטרם בחירת דגם המהפך הספציפי. אופן שילוב המהפכים במערכת משפיע באופן ישיר על עלויות ההקמה, רמת התחזוקה, אמינות המתקן והיכולת התפעולית לאורך זמן.

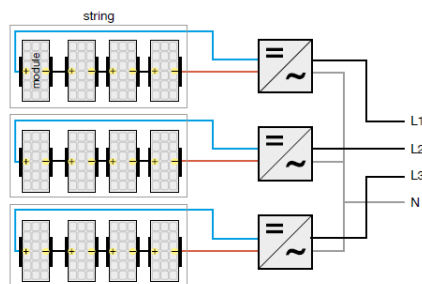
| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

החלופה הראשונה היא **Single Inverter Plant**, שבה מותקן מהפך יחיד המספק את כלל ההספק של המתקן. חלופה זו מאופיינת בעלות הקמה נמוכה יחסית, שכן נדרש מהפך אחד בלבד, וכן בתחזוקה פשוטה. עם זאת, חסרונה המרכזי הוא רמת אמינות נמוכה, מאחר ותקלה במהפך גורמת להשבתה מלאה של המתקן כולו.



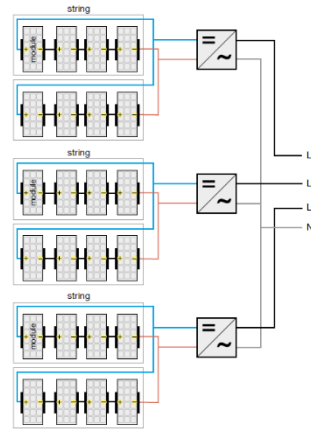
איור 3.5- מהפך יחיד במתקן

החלופה השנייה היא **Plant with one Inverter for each string**, שבה לכל סטרינג של מודולים מותקן מהפך ייעודי. תצורה זו מאפשרת בקרה גבוהה ויעילה על כל סטרינג בנפרד, ניצול מיטבי של ההספק והפחתת השפעת תקלות נקודתיות. עם זאת, מדובר בפתרון יקר במיוחד בשל הצורך במספר רב של מהפכים, תחזוקה מורכבת יותר ועלויות תפעול גבוהות, דבר ההופך אותו לפחות אטרקטיבי למתקנים בהספק גבוה.



איור 3.6- סטרינג של מודולים

החלופה השלישית היא **Multi Inverter Plant**, שבה מספר סטרינגים מחוברים יחד למערך אחד ומוזנים למהפך משותף. תצורה זו מהווה פתרון ביניים מאוזן בין שתי החלופות הקודמות. עלויות ההקמה נמוכות משמעותית בהשוואה לחלופה של מהפך לכל סטרינג, מאחר ומספר סטרינגים מחוברים במקביל לכל מהפך. בנוסף, רמת התחזוקה פשוטה יותר, ותקלה באחד המהפכים אינה גורמת להשבתה מלאה של המתקן אלא רק של חלק ממנו.



**איור 3.7 - שילוב של סטרינג**

בפרויקט הנוכחי נבחרה תצורת **Multi Inverter Plant**, משיקולי עלות-תועלת, אמינות תפעולית ותחזוקה. תצורה זו מאפשרת ניתוק חלקי של המתקן לצורכי תחזוקה או תיקון, תוך המשך הפעלה של יתר המערכת, ומהווה פתרון יעיל ומתאים למתקן סולארי בהספק של מספר מגהוואט.

### 3.3.3 חישוב מספר המהפכים במערכת, כמות מחרוזות ולוחות מאספים

בשלב זה של התכנון נדרש לקבוע את מספר המהפכים הדרוש למערכת הסולארית, בהתאם להספק הכולל של מערך המודולים ולהספק הכניסה הנומינלי של המהפך הנבחר. החישוב מתבצע על בסיס התאמה בין ההספק הפעיל המיוצר עלידי השדה הסולארי לבין ההספק הפעיל שהמהפכים מסוגלים לקלוט ולהמיר.

ההספק הפעיל בצד ה-AC של המהפך מחושב על-פי הקשר בין ההספק המדומה לבין מקדם ההספק:

$$P_{AC} = S_{AC} \cdot \cos \varphi$$

במהפכים שנבחרו בפרויקט זה מקדם ההספק הוא בקירוב יחידה, ולכן מתקבל:

$$P_{AC} = 900 \cdot 1 = 900 \text{ kW}$$

מספר המהפכים הנדרש למערכת מחושב כיחס בין ההספק הכולל של מערך ה-PV לבין הספק הכניסה של מהפך יחיד:

$$n_{inv} = \frac{P_{PV}}{P_{inv\_in}}$$

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |

הצבה של הערכים המספריים נותנת:

$$n_{inv} = \frac{9.6 \cdot 10^6}{900 \cdot 10^3} = 10.67 \approx 11$$

לפיכך, מספר המהפכים הנדרש למערכת הוא 11 מהפכים, כאשר כל מהפך מזין חלק יחסי מההספק הכולל של המתקן. קביעה זו מהווה בסיס להמשך תכנון המערכת, לרבות חלוקת המחרוזות (Strings) בחירת לוחות מאספים (Combiner Boxes) ותכנון מערכות ההגנה וההולכה בצד ה-DC וה-AC. כאשר:

- $P_{AC}$  – ההספק הפעיל בצד ה-AC של המהפך
- $S_{AC}$  – ההספק המדומה של המהפך
- $\cos \varphi$  – מקדם ההספק
- $P_{PV}$  – ההספק הכולל של מערך המודולים
- $P_{inv\_in}$  – הספק הכניסה הנומינלי של מהפך יחיד
- $n_{inv}$  – מספר המהפכים במערכת

### 3.3.4 בחירת מודולים סולאריים

במסגרת תכנון המערכת הסולארית נבחנה בחירת המודולים הפוטו-וולטאיים, המהווים את הרכיב המרכזי בהפקת האנרגיה החשמלית. לאחר השוואה בין מספר חלופות נבחרו שני מודולים סולאריים אופציונליים מתוצרת חברת SunPower, מדגמים SPR-X21-460 ו-SPR-X21-470, בעלי הספק מרבי של 460 ו-470 W בהתאמה.

מודולים אלו מבוססים על תאי סיליקון רב-גבישי (Polycrystalline Silicon), והם נפוצים בשימוש במתקנים סולאריים בארץ ובעולם, בעיקר בשל יחס טוב בין עלות לנצילות. שילוב מאפיינים אלו הופך אותם לפתרון מתאים למתקנים בהספק גבוה, שבהם נדרש איזון בין יעילות אנרגטית, אמינות ועלות כוללת של המערכת.

יתרונותיהם העיקריים של המודולים שנבחרו כוללים נצילות חשמלית טובה יחסית, אמינות גבוהה לאורך זמן וביצועים יציבים גם בתנאי הארה שאינם אופטימליים, כגון בשעות הבוקר המוקדמות, בשעות הערב ובימים מעוננים. בנוסף, המודולים מצופים בזכוכית מחוסמת בעובי מוגבר, המשפרת את עמידותם בתנאי מזג אוויר קשים, לרבות רוחות חזקות וברד.

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |

כמו כן, המודולים כוללים ציפוי אנטי־רפלקטיבי והידרופובי, המפחית החזר אור, משפר את קליטת הקרינה הסולארית ומקטין הצטברות אבק ולכלוך על פני המשטח. תכונות אלו תורמות לשמירה על תפוקת אנרגיה גבוהה ולצמצום צורכי התחזוקה של המתקן לאורך זמן.

לאור מכלול השיקולים ההנדסיים, הכלכליים והתפעוליים, מודולים אלו נבחרו כפתרון מתאים לשילוב במערכת הסולארית המתוכננת בפרויקט הנוכחי.



איור 3.8 - מודולים סולרים מסוג PR-X21

### 3.3.5 חישוב מספר המודולים וחלוקתם למחרוזות

בשדה הסולארי מתוכננת התקנת מודולים פוטו־וולטאיים משני דגמים. בפרק זה יוצג חישוב עבור מודול מדגם SPR-X21-470, כאשר ההספק הכולל הנדרש מכלל השדות הוא 9.6 MW. הספק המודול הנומינלי הוא:

$$P_{panel} = 470 \text{ W}$$

כדי לקבוע את מספר המודולים הנדרש, אין די בחלוקת ההספק הכולל בהספק המודול בלבד, משום שבמערכת קיימים הפסדים, ובראשם הפסדי המהפכים. בפרויקט זה נבחר מהפך בעל נצילות:

$$\eta = 0.985$$

ולכן יש לחשב תחילה את ההספק הכניסה בצד ה־DC הנדרש לכל מהפך.

#### **הספק DC הנדרש למהפך:**

| שם הסטודנטים על־א גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

$$P_{DC} = \frac{P_{AC}}{\eta} = \frac{900 \text{ kW}}{0.985} \approx 914 \text{ kW}$$

מכאן, מספר המודולים הדרוש לכל מהפך :

$$N_{module} = \frac{P_{DC}}{P_{panel}} = \frac{914000}{470} \approx 1945$$

כאשר :

$P_{DC}$  – הספק כניסה למהפך בצד DC

$P_{AC}$  – הספק מוצא מהפך בצד AC

$\eta$  – נצילות המהפך

$P_{panel}$  – הספק נומינלי של מודול

$N_{module}$  – מספר מודולים לכל מהפך

כפי שנקבע בפרק הקודם, מספר המהפכים במערכת הוא :

$$n_{inv} = 11$$

ולכן מספר המודולים הכולל באתר מוערך כ :

$$N_{tot} = N_{module} \cdot n_{inv} = 1945 \cdot 11 = 21395$$

כלומר, נדרשים כ- 21,395 מודולים בהספק 470 W לצורך עמידה בהספק המותקן של 9.6 MW

### קביעת מספר מודולים בטור (מחרוזת)

על פי דרישות המתח המקסימלי במערכת, מתח המחרוזות בצד DC חייב להיות נמוך מ- 1000 V, הן לפי מגבלת המהפך והן לפי דרישות תכנון המערכת.

מתח הריקם של מודול בודד לפי נתוני היצרן :

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

$$V_{OC,mod} = 91.5 \text{ V}$$

ולכן מספר המודולים המקסימלי האפשרי בחיבור טורי :

$$N_{series,max} = \frac{V_{DC,max}}{V_{OC,mod}} = \frac{1000}{91.5} \approx 11$$

בשל סטייה אפשרית במתח המודולים (כ-5% מעל ערך היצרן), נבחר מספר מודולים בטור עם מקדם ביטחון :

$$N_{series} = 10$$

### חלוקת המודולים למערכים וכניסות מהפך

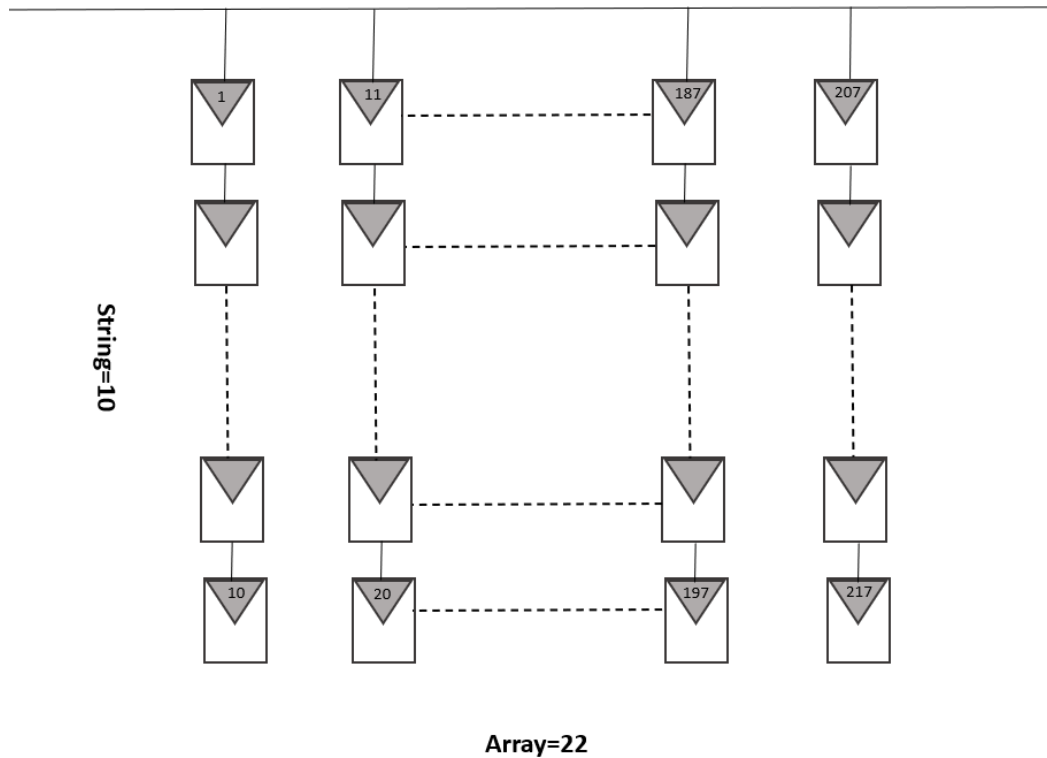
למהפך שנבחר קיימות 9 כניסות DC, ולכן מספר המודולים המחובר לכל כניסה (מהפך) הוא :

$$N_{array} = \frac{N_{module}}{9} = \frac{1945}{9} \approx 217$$

מספר המחרוזות בכל מערך (כאשר בכל מחרוזת 10 מודולים בטור) :

$$N_{strings} = \frac{N_{array}}{N_{series}} = \frac{217}{10} \approx 22$$

כלומר, לכל כניסה מהשדה הסולארי למהפך מתקבל סדר גודל של כ-22 מחרוזות, כאשר בכל מחרוזת 10 מודולים בטור.



**איור 3.9 - מציג את אופן החיבור של המודולים הסולאריים במערכת.**

### 3.3.6 בחירת שנאים

בשלב בחירת השנאים למתקן הפוטו־וולטאי יש להתחשב בדרישות ההספק והמתח של המערכת, בתנאי הסביבה באתר ההתקנה. האתר נמצא בסמוך לקיבוץ משמר הנגב באזור מדברי, המאופיין בטמפרטורות גבוהות, קרינת שמש חזקה ואבק. לכן, השנאים ימוקמו בתוך מבנה מוגן דמוי כלוב הכולל גג, אשר מספק הצללה ומאפשר אוורור טבעי באמצעות זרימת האוויר החיצוני ואת השנאי בתנאי עבודה בטוחים לאורך זמן.

השנאים שנבחרו בפרויקט הם שנאי שמן בעלי מיכל התפשטות, אשר מתאימים במיוחד להתקנות חוץ ולהספקים גבוהים. יתרונותיהם המרכזיים הם יכולת קירור גבוהה, אמינות טובה, ורמת רעש נמוכה יחסית. בנוסף, מאפייני המבנה האלקטרו־מגנטי של השנאי תורמים להקטנת השדות מחוץ למעטפת, דבר המשפר את רמת הבטיחות בסביבת הציד.

על פי מפרט המהפכים שנבחרו, ההספק הנקוב במוצא כל מהפך הוא :

$$S_{inv} = 900 \text{ kVA}$$

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

לכן, על מנת לאפשר חיבור של שני מהפכים לכל שנאי, נבחרו שנאים בעלי הספק נומינלי:

$$S_{tr} = 1800 \text{ kVA}$$

בהתאם לתצורת המתקן, נבחרו חמישה שנאים תלת-ליפופיים, כאשר לכל שנאי מחוברים שני מהפכים. בנוסף, לצורך חיבור מהפך בודד (במערך נפרד), נבחר שנאי נוסף בעל הספק נמוך יותר. השנאים שנבחרו בפרויקט הם:

- SMA Transformer Compact Station 1800SC
- SMA Transformer Compact Station 800SC

לשנאים יחס השנאה:

$$\frac{U_{HV}}{U_{LV}} = \frac{22 \text{ kV}}{0.342 \text{ kV}}$$

כאשר צד המתח הנמוך נבחר לפי מתח המוצא של המהפכים, והוגדר כ- $342\text{V}$  בהתאם לנתוני המערכת. צד המתח הגבוה של השנאים הוא  $22\text{kV}$ , בהתאם לרמת המתח של רשת החלוקה בנקודת החיבור של המתקן.

בנוסף, לפי נתוני היצרן, מתח הקצר של השנאים הוא:

$$e_k = 6.2\%$$

וקבוצת החיבורים מוגדרת כ:

$$Dy11y11$$

מפרטי השנאים המלאים והנתונים הטכניים המפורטים מופיעים בנספח A.

| שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |

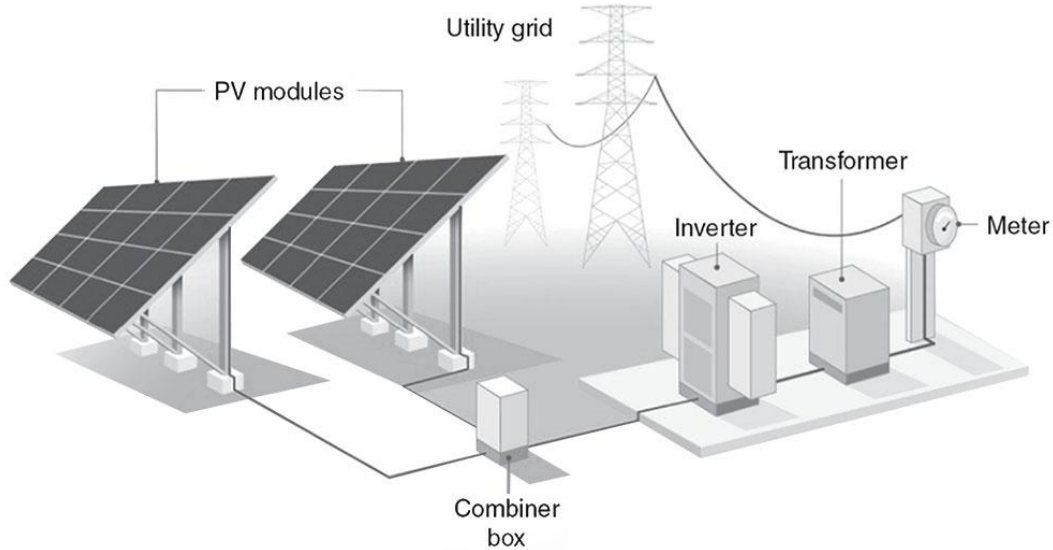
Transformer 1800SC			
סימון	יחידות	ערך	פרמטר
S	kVA	1800	הספק
$U_1$	kV	2x0.342	מתח נמוך
$U_2$	kV	22	מתח גבוה
$e_{kT}\%$	%	6.2	מתח קצר
-	-	Dy11y11	קבוצת חיבורים
-	-	TCS-1000-SC-ES	שיטת קירור

**טבלה 3.1 - פרמטרי שנאי הייצור התלת ליפופי**

SC800Transformer			
סימון	יחידות	ערך	פרמטר
S	kVA	800	הספק
$U_1$	kV	1x0.342	מתח נמוך
$U_2$	kV	22	מתח גבוה
$e_{kT}\%$	%	6.2	מתח קצר
-	-	Dy11y11	קבוצת חיבורים
-	-	TCS-1000-SC-ES	שיטת קירור

**טבלה 3.2 - פרמטרי שנאי הייצור התלת ליפופי**

המערכת תחולק לשישה אזורים, כאשר מערכי המודולים הסולאריים יתוכננו כך שכל אחד מהאזורים יספק הזנה מאוזנת לשש התחנות האזוריות. בכל תחנה אזורית יותקנו שני מהפכים, אשר יזינו שנאי תלת-ליפופי לצורך העלאת המתח והעברת ההספק להמשך המערכת. בהתאם לחישובים שבוצעו בסעיפים הקודמים, כל מהפך יוזן מכי-1953 מודולים סולאריים, המחולקים לתשעה מערכים. עבור כל מערך יתוכנן לוח מאסף DC משני, אשר ירכז את מערך ההגנות, החיבורים וההולכה של אותו מערך. בנוסף, בכל תחנה אזורית יותקן לוח מאסף DC ראשי, אשר ממנו ייצאו המוליכים אל כניסת המהפך. לצורך הדוגמה ההסבר מתייחס למהפך יחיד, אך בפועל בכל תחנה אזורית קיימים שני מהפכים ושנאי תלת-ליפופי, ולכן יותקנו שני לוחות מאסף DC ראשיים בכל תחנה אזורית.



**איור 3.10 - דיאגרמת חיבור**

עקב גודל המתקן מבחינת ההספק המותקן וגם מבחינת הפריסה הפיזית בשטח, מתקבלים מרחקים משמעותיים בין מערכי המודולים לבין התחנות האזוריות. לכן נבחר לחלק את מערכת האיסוף בצד ה־DC לשני שלבים:

- לוחות איסוף משניים ברמת המערך.
- לוח איסוף ראשי ברמת התחנה האזורית.

תצורה זו מצמצמת את אורכי הכבלים היוצאים מהמערכים, מרכזת את ההגנות והניתוקים בנקודות נגישות, ומשפרת את התפעוליות והתחזוקה של המתקן בזמן עבודה שוטפת וגם בעת טיפול בתקלות.

### 3.4 חישוב הגנות ושטחי חתך של כבלים במתקן הסולארי

בשלב זה נבחרו ההגנות עבור לוח מאסף DC משני (לוח איסוף ברמת מערך). לצורך הגנה על המערכת בצד ה־DC נבחר להשתמש בנתיך לכל מחרוזת ובמנתק עומס לכל מערך. כל נתיכי המחרוזות יחוברו במקביל, כאשר היציאות שלהם ייכנסו אל המנתק הראשי של המערך.

החישובים בפרק זה יתייחסו לצד החיובי של המערכת, כאשר אותם עקרונות ייושמו גם בצד השלילי.

## חישוב זרם נתיך לכל מחרוזת

זרם העבודה של כל מודול סולארי נתון כזרם נומינלי :

$$I_{PANEL} = 6.06A$$

זרם הקצר של כל מודול סולארי נתון כ :

$$I_{SC,PANEL} = 6.45A$$

מאחר ובחיבור טורי (String) הזרם זהה בכל המודולים, מתקבל כי זרם המחרוזת שווה לזרם של מודול יחיד :

$$I_{STRING} = I_{PANEL} = 6.06A$$

וכן זרם הקצר של המחרוזת :

$$I_{SC,STRING} = I_{SC,PANEL} = 6.45A$$

בהתאם לתקן IEC 60364, הזרם הנומינלי של נתיך המגן על מחרוזת צריך להיות גדול לפחות ב-25% מזרם הקצר של המחרוזת :

$$I_{FUSE} \geq 1.25 \cdot I_{SC,STRING}$$

ולכן :

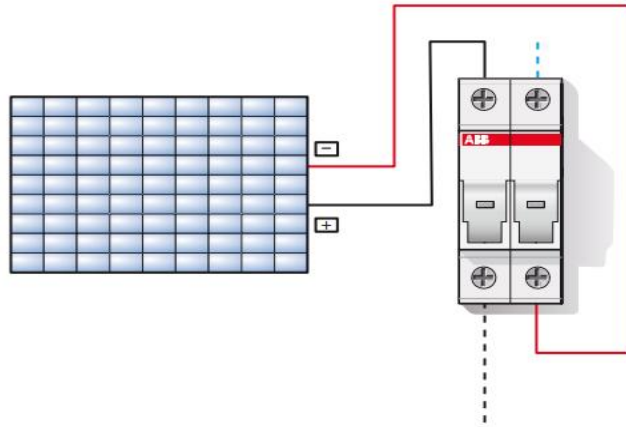
$$I_{FUSE} \geq 1.25 \cdot 6.45 = 8.06A$$

מכאן שנבחר נתיך סטנדרטי בערך הקרוב כלפי מעלה :

$$I_{FUSE} = 10A$$

נבחר להשתמש בבית נתיך ייעודי למערכות פוטו-וולטאיות מתוצרת ABB מדגם E90PV, בשילוב נתיך מסוג E9FPV, המתאים להגנת מחרוזות בצד ה-DC ומספק הגנה אמינה מפני זרמי קצר וזרמי יתר בהתאם לדרישות התקן.

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |



DC networks (1000 V DC series)

### איור 3.11 - חיבור מחרוזת פאנלים סולאריים (PV) לבית נתיך

#### בחירת מנתק בעומס DC לכל מערך בכניסה למהפך

בחירת מנתק בעומס (DC Load Break Switch) עבור כל מערך תבצע לפי הזרם הכולל של המחרוזת המחוברות במקביל במערך. זרם העבודה של מודול יחיד הוא:

$$I_{PANEL} = 6.06A$$

במערך קיימות 22 מחרוזות במקביל, ולכן הזרם המרבי במוצא המערך הוא:

$$I_{SW} = 22 \cdot I_{PANEL} = 22 \cdot 6.06 = 133.33A$$

לפי כלל תכנון מקובל, נבחר מנתק בעומס עם זרם נומינלי הגדול לפחות ב-25% מהזרם המחושב:

$$I_{SW,design} = 1.25 \cdot I_{SW} = 1.25 \cdot 133.33 = 166.66A$$

לכן נבחר דירוג סטנדרטי כלפי מעלה:

$$I_{CIRCUIT} = 200A$$

בהתאם לכך נבחר מנתק בעומס מתוצרת ABB מדגם ABB OTDC200 עד 200A, מותאם ל-DC

שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |



### איור 3.12 - מנתק בעומס מתוצרת ABB מדגם ABB OTDC200

**בחירת מפסק בין מוצא המהפך לשנאי (הגנה בפני קצר ועומס יתר)**

בין מוצא המהפך לשנאי נדרשת הגנה בפני זרמי קצר והעמסת יתר. בחירת המפסק תתבצע לפי נתוני המוצא של המהפך:

$$P_{OUT} = 900 \text{ kVA}$$

$$V_{OUT} = 405 \text{ V}$$

$$\cos \varphi = 1$$

זרם העבודה הנומינלי:

$$I_N = \frac{P_{OUT}}{\sqrt{3} \cdot V_{OUT} \cdot \cos \varphi} = \frac{900,000}{\sqrt{3} \cdot 405 \cdot 1} \approx 1283 \text{ A}$$

לכן נבחר מפסק תיבה יצוקה (MCCB) מתוצרת ABB מסדרת Tmax XT7S, עם זרם נקוב:

$$I_{CB} = 1600 \text{ A}$$

המפסק כולל הגנת עומס יתר והגנת קצר המתאימות להגנה על השנאי ועל הקו בין המהפך לשנאי. במידת הצורך ייבחר דגם XT7S בעל כושר ניתוק  $I_{cu}$  מתאים לרמת זרם הקצר באתר. חישוב זרם קצר בצד המשני של השנאי לאימות התאמת כושר הניתוק:

$$I_{K,rms} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_n} \cdot \frac{100}{U_{K\%}} = \frac{1800}{\sqrt{3} \cdot 0.405} \cdot \frac{100}{6} \approx 42.77 \text{ kA}$$

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
 פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

לפיכך, נבחר מפסק ABB Tmax XT7S 1600A עם כושר ניתוק נומינלי שאינו קטן מ  $42.77 kA$  במתח העבודה הרלוונטי.



**איור 3.13 - מפסק תיבה יצוקה ABB Tmax XT7S 1600A**

### בחירת מוליכים בין המודולים ללוח איסוף משני כבל - DC

במערכת קיימים שני סוגי כבלים – כבלי DC וכבלי AC. בכבלי ה-DC נדרש לעמוד במפל מתח של עד 1%. לעומת זאת, ברשת AC מפל המתח המותר עד הדקי הצרכן הוא עד 3%. כל מערך מודולים יזון ללוח איסוף DC משני ייעודי, אשר יותקן מתחת לקונסטרוקציית המודולים. הכבלים יותקנו בהתקנה חשופה מתחת למודולים באמצעות חבקים תקניים, ולכן מקדמי התיקון ייקבעו לפי טמפרטורת סביבה של כ- $40^{\circ}C$  ולפי צורת ההתקנה.

מקדמי תיקון:

$$K_1 = 0.90 \text{ (בידוד } 90^{\circ}C, \text{ טמפרטורת סביבה } 40^{\circ}C \text{)}$$

$$K_4 = 0.79 \text{ (התקנה בחבקים, עד 6 מוליכים יחד)}$$

### חישוב זרם התכנון לכבל לפי זרם קצר של מחרוזת

זרם קצר למחרוזת:

$$I_{SC,STRING} = 6.45A$$

זרם תכנון (עם מקדם 125%):

| שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |

$$I'_Z = 1.25 \cdot I_{SC,STRING} = 1.25 \cdot 6.45 = 8.0625A$$

זרם נדרש לאחר תיקון מקדמים :

$$I_Z = \frac{I'_Z}{K_1 \cdot K_4} = \frac{8.0625}{0.90 \cdot 0.79} = 11.33A$$

### בחירת שטח חתך הכבל

נבחר כבל DC חדיגידי בשטח חתך Nexans 1×6 mm<sup>2</sup> (Single Core), המתאים להתקנה חיצונית במערכות פוטו-וולטאיות בידוד 90°C בעל זרם מותר גבוה מהזרם המחושב, ולכן מספק מרווח תכנוני מתאים.

### בדיקת מפל מתח (DC)

נשתמש בנוסחה למפל מתח דוגידי ב- DC :

$$\Delta U = \frac{2 \cdot I \cdot L}{\gamma \cdot A}$$

כאשר :

$\Delta U$  – מפל מתח [V]

$I$  – הזרם במוליך [A] נשתמש ב  $I_Z = 11.33A$

$L$  – אורך כבל חדיכיווני [m] נבחר  $L = 60m$

$A$  – שטח חתך הכבל [mm<sup>2</sup>]

$\gamma$  – מוליכות נחושת :

$$\gamma_{Cu} = 57 \frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$$

הצבה :

$$\Delta U = \frac{2 \cdot 11.33 \cdot 60}{57 \cdot 6} = 3.98V$$

| שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

אחוז מפל מתח ביחס למתח המחרוזת 10 מודולים בטור  $V_{OC} = 91.5V$  :

$$U_{string} \approx 10 \cdot 91.5 = 915V$$

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_{string}} \cdot 100 = \frac{3.98}{915} \cdot 100 = 0.435\%$$

ולכן מתקיים :

$$\Delta U\% = 0.435\% < 1\%$$

#### בחירת מוליכים מלוחות האיסוף המשניים ועד לוח איסוף ראשי בתחנה האזורית (DC)

החיבור בין לוחות האיסוף המשניים לבין לוח האיסוף הראשי בתחנה האזורית יתבצע באמצעות כבלים חד-גידיים בהתקנה תת-קרקעית (בחפירה באדמה). בצד ה-DC נדרשים שני מוליכים לכל הזנה, מוליך חיובי (+) ומוליך שלילי (-). לצורך בחירת שטח החתך נלקחו בחשבון מקדמי תיקון בהתאם לטמפרטורת הקרקע ולצורת ההתקנה.

טמפרטורת קרקע אופיינית באזור היא  $30^{\circ}C$ ,  $35^{\circ}C$ – ולכן נבחר מקדם תיקון :

$$K_2 = 0.96$$

צורת ההתקנה היא הנחת צינורות צמודים ישירות באדמה, ולכן נבחר מקדם תיקון :

$$K_6 = 0.80$$

### חישוב זרם תכנון לבחירת הכבל

זרם קצר של מחרוזת אחת:

$$I_{SC,STRING} = 6.45A$$

במערך קיימות 22 מחרוזות במקביל, ולכן זרם קצר כולל למערך:

$$I_{SC,ARRAY} = 22 \cdot 6.45 = 141.9A$$

זרם תכנון (כולל מקדם 125%):

$$I'_Z = 1.25 \cdot I_{SC,ARRAY} = 1.25 \cdot 141.9 = 177.375A$$

זרם נדרש לאחר תיקון מקדמים:

$$I_Z = \frac{I'_Z}{K_2 \cdot K_6} = \frac{177.375}{0.96 \cdot 0.80} = 230.95A$$

### בחירת שטח חתך הכבל

נבחר כבל DC חד-גידדי מתוצרת Nexans, מוליך נחושת ובידוד XLPE, 90°C, בשטח חתך:

$$1 \times 95 \text{ m}^2$$

בחירה זו מספקת מרווח תכנוני בזרם וגם מאפשרת עמידה בדרישת מפל מתח של עד 1%.

### בדיקת מפל מתח בין לוח איסוף משני ללוח איסוף ראשי (DC)

זרם העבודה של המערך לפי זרם נומינלי של מודול 6.06A:  $I_{PANEL} = 6.06A$

$$I_{ARRAY} = 22 \cdot I_{PANEL} = 22 \cdot 6.06 = 133.32A$$

המרחק המרבי בין לוח איסוף משני לתחנה אזורית :

$$L = 150m = 0.15km$$

מתח נקוב של המערך 10 מודולים בטור  $V_{OC} = 91.5V$  :

$$U_n = 10 \cdot 91.5 = 915V$$

מוליכות נחושת לפי טמפרטורה נלקחה באמצעות התנגדות כבל. נתון עבור כבל  $50mm^2$  בטמפרטורה  $20^\circ C$  :

$$R_{20}(50) = 0.393 \Omega/km$$

חישוב התנגדות עבור  $95mm^2$  יחס הפוך לשטח חתך :

$$R_{20}(95) = R_{20}(50) \cdot \frac{50}{95} = 0.393 \cdot \frac{50}{95} = 0.2068 \Omega/km$$

תיקון לטמפרטורה  $30^\circ C$  עם  $\alpha = 0.0039$  ו-  $\Delta T = 10$  :

$$R_{30}(95) = R_{20}(95)(1 + \alpha \Delta T) = 0.2068(1 + 0.0039 \cdot 10) = 0.2149 \Omega/km$$

התנגדות כוללת למוליך אחד לאורך  $0.15km$  :

$$R_{total} = R_{30}(95) \cdot L = 0.2149 \cdot 0.15 = 0.0322 \Omega$$

ב- DC יש שני מוליכים (פלוס ומינוס), ולכן מפל המתח :

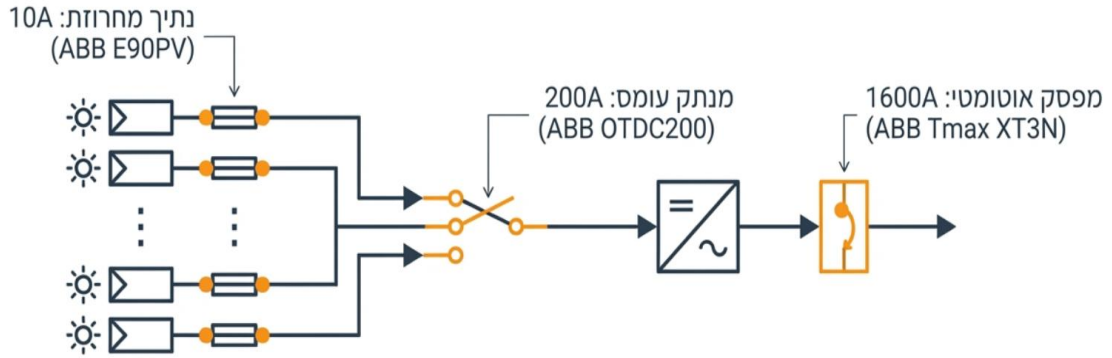
$$\Delta U = 2 \cdot I_{ARRAY} \cdot R_{total} = 2 \cdot 133.32 \cdot 0.0322 = 8.58V$$

אחוז מפל מתח :

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{8.58}{915} \cdot 100 = 0.94\%$$

ולכן מתקיים :

$$\Delta U\% = 0.94\% < 1\%$$

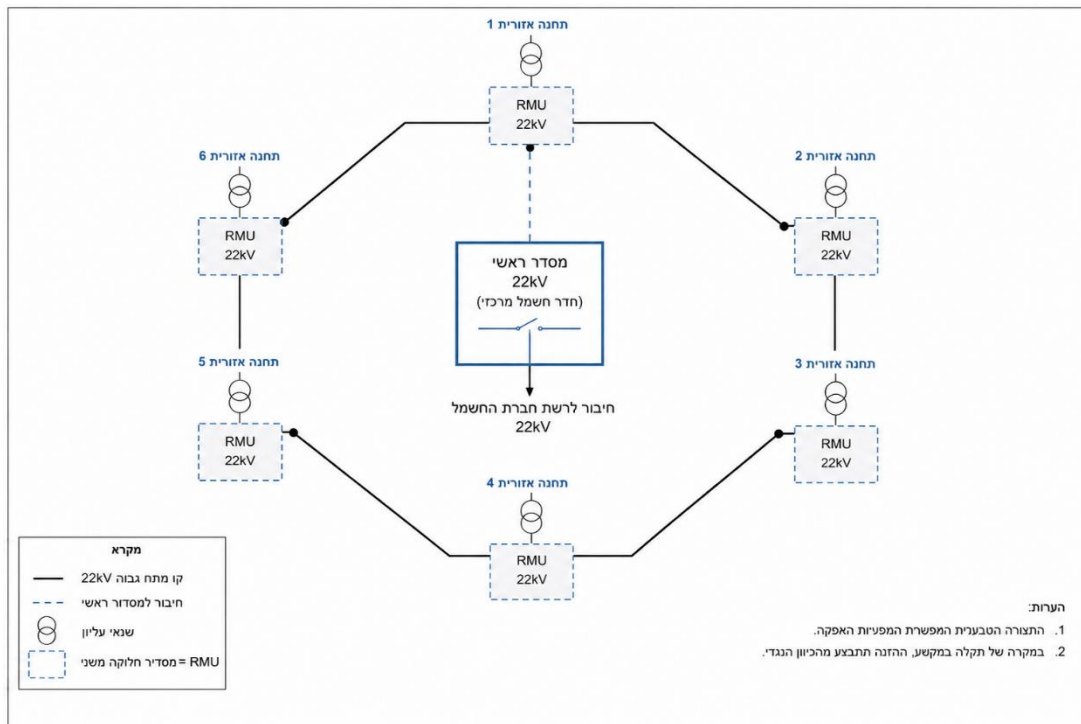


**איור 3.14** - סרטוט תכנון ראשוני לאחר חישוב הגנות

## פרק 4 - תכנון מערכות הולכה והגנה

חלק המתח הגבוה של המערכת מתחיל בצד הראשוני של השנאים ומסתיים בנקודת החיבור לרשת חברת החשמל במתח 22kV. מטרת מערכת המתח הגבוה היא להעביר את האנרגיה המיוצרת מהתחנות האזוריות אל נקודת החיבור לרשת, תוך שמירה על אמינות, בטיחות ויכולת תפעול ותחזוקה נוחה.

בפרויקט זה נבחרה תצורת חלוקה טבעתית (Ring Network) בין התחנות האזוריות. בכל תחנה אזורית יותקן מסדר מתח גבוה מסוג חלוקה משנית, כאשר כלל המסדרים יחוברו ביניהם במבנה טבעתי ויסתיימו במסדר מתח גבוה ראשי הממוקם בחדר החשמל המרכזי של המתקן. תצורה זו מאפשרת המשכיות אספקה גבוהה יותר, שכן במקרה של תקלה באחד המקטעים ניתן להזין את המערכת מהכיוון הנגדי של הטבעת. לפני בחירת ציוד המתח הגבוה וההגנות הנדרשות, יש לחשב את הזרמים האופייניים במערכת, ובפרט את זרמי הקצר המרביים הצפויים.



**איור 4.1 - מבנה רשת המתח הגבוה באתר וחיבור תחנות האזור למסדר המתח הגבוה הראשי**

### 4.1 חישוב זרמי קצר

זרם העבודה הנומינלי בצד המתח הגבוה של שנאי בהספק 1800kVA ובמתח נקוב של 22kV מחושב לפי :

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

הצבה :

$$I_n = \frac{1800}{\sqrt{3} \cdot 22} = 47.23A$$

לפיכך, הזרם הנומינלי של כל שנאי הוא :

$$I_n = 47.23A$$

בהינתן מתח קצר של :

$$U_k = 6\%$$

זרם הקצר הסימטרי בצד המתח הגבוה של השנאי יהיה :

$$I_{K,rms} = I_n \cdot \frac{100}{U_k}$$

הצבה :

$$I_{K,rms} = 47.23 \cdot \frac{100}{6} = 787.17A$$

כלומר :

$$I_{K,rms} = 0.787kA$$

במערכת מחוברים שישה שנאים במבנה טבעתי, ולכן זרם הקצר הכולל בפסי הצבירה של המתקן יחושב בקירוב כ :

$$I_{K,total} = I_{K,rms} \cdot 6$$

הצבה :

$$I_{K,total} = 0.787 \cdot 6 = 4.72kA$$

| שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
 פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

ולכן :

$$I_{K,total} = 4.72kA$$

#### זרם קצר מצד רשת חברת החשמל

המתקן מחובר לרשת חלוקה במתח 22kV לצורך התכנון נהוג להניח הספק קצר של :

$$S_{K,net} = 500MVA$$

ערך זה מייצג את רמת הקצר האופיינית ברשת חלוקה במתח 22kV.  
זרם הקצר המתקבל מהרשת מחושב לפי :

$$I_{K,net} = \frac{S_{K,net}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

הצבה :

$$I_{K,net} = \frac{500 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \times 10^3}$$

ומתקבל :

$$I_{K,net} = 13.12kA$$

ניתן לראות כי זרם הקצר המתקבל מרשת חברת החשמל גדול משמעותית מזרם הקצר המתקבל מהשנאים במתקן. לכן, בבחירת ציוד המתח הגבוה, מסדרי המיתוג וההגנות, יש להתבסס על זרם קצר מינימלי של 13.12kA לפחות, תוך שמירה על מקדם ביטחון מתאים בהתאם לדרישות התקן.

#### 4.2 בחירת כבלים

לצורך חיבור חלקי מערכת המתח הגבוה במתקן נבחרו כבלי מתח גבוה מתוצרת חברת **Synergy Cables** הישראלית. בחירת הכבלים בוצעה בהתאם לזרמי העבודה המחושבים, תנאי ההתקנה בשטח, מקדמי תיקון לטמפרטורת הקרקע ולצורת ההתקנה, וכן בהתאם לדרישות האמינות והבטיחות של מערכת החלוקה במתח 22kV.

במערכת תוכננו שלושה סוגי כבלים עיקריים :

1. כבלים בין השנאים למסדרי המתח הגבוה המשניים (RMU).
2. כבלים בין מסדרי המתח הגבוה בתחנות האזוריות .
3. כבלים בין המסדרים המשניים לבין מסדר המתח הגבוה הראשי בחדר החשמל המרכזי .

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

### כבלים בין השנאי למסדר מתח גבוה משני

זרם העבודה הנומינלי של שנאי בהספק 1800kVA ובמתח 22kV הינו :

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{1800}{\sqrt{3} \cdot 22} = 47.23A$$

לכן נבחר כבל אלומיניום מסוג :

**NA2XS(F)2Y 18/30kV – 1×95mm<sup>2</sup>**

כבל זה עומד בזרם העבודה הנדרש ומספק מקדם בטיחות מתאים להולכת הזרם בין השנאי למסדר החלוקה המשני.

### כבלים בין התחנות האזוריות

הכבלים בין התחנות האזוריות יותקנו בחפירה באדמה כאשר מספר כבלים מונחים בסמיכות זה לזה. בהתאם לתנאי ההתקנה נבחרו מקדמי התיקון הבאים :

$$K_T = 0.93$$

$$K_G = 0.65$$

הזרם המתמיד המתוקן יחושב לפי :

$$I_z = \frac{I_n}{K_T \cdot K_G}$$

$$I_z = \frac{52}{0.93 \cdot 0.65}$$

$$I_z \approx 86A$$

לפיכך נבחר כבל אלומיניום מסוג :

**NA2XS(F)2Y 18/30kV – 3×(1×120mm<sup>2</sup>)**

בחירה זו מספקת יכולת הולכת זרם מספקת, רזרבת זרם מתאימה ועמידות גבוהה לתנאי התקנה תת־קרקעיים.

### כבלים בין המסדרים המשניים למסדר הראשי

מאחר שהמערכת תוכננה בתצורת **Ring Network**, הכבלים המזינים את המסדר הראשי נושאים את סכום הזרמים המגיעים מהתחנות האזוריות. לאחר חישוב זרמי ההעמסה והתחשבות במקדמי התיקון, התקבל זרם תכן של :

$$I_z \approx 500A$$

לצורך הזנת המסדר הראשי נבחר כבל נחושת מסוג :

**N2XS(F)2Y 18/30kV – 3×(1×240mm<sup>2</sup>)**

כבל זה מספק יכולת הולכת זרם גבוהה, מפל מתח נמוך ואמינות גבוהה במערכת המתח הגבוה.

שטח חתך	סוג כבל	מקטע
1×95mm <sup>2</sup> Al	NA2XS(F)2Y 18/30kV	<b>שנאי RMU</b>
3×(1×120mm <sup>2</sup> ) Al	NA2XS(F)2Y 18/30kV	<b>בין תחנות אזוריות</b>
3×(1×240mm <sup>2</sup> ) Cu	N2XS(F)2Y 18/30kV	<b>מסדרים משניים</b>

**טבלה 4.1 - סיכום הכבלים שנבחרו במערכת המתח הגבוה**

הכבלים שנבחרו עומדים בדרישות ההעמסה, תנאי הסביבה ודרישות האמינות של מערכת החלוקה במתח גבוה, ומבטיחים הולכת הספק בטוחה ויעילה בין כלל חלקי המתקן.

#### 4.3 מסדר מ"ג משני

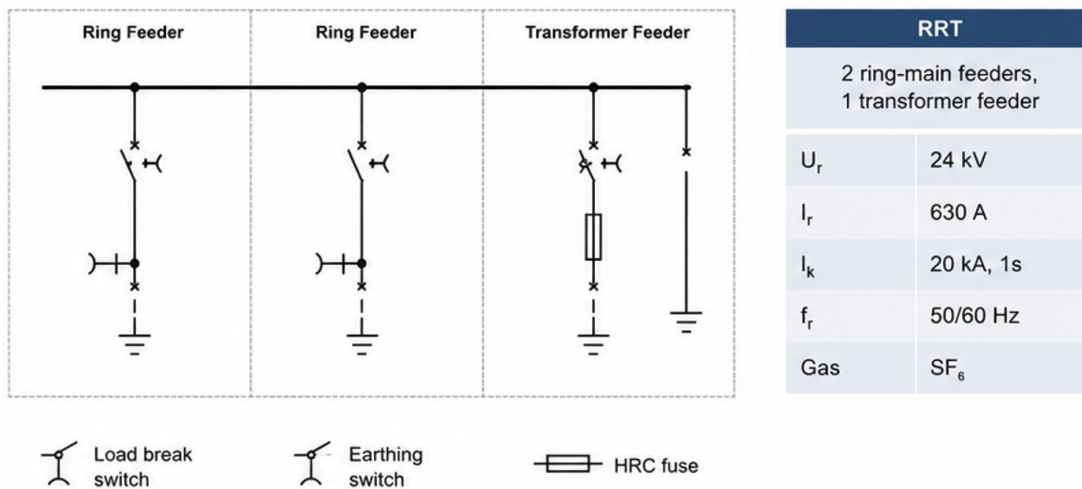
מסדר המתח הגבוה המשני ייבחר מסוג מסדר חלוקה משנית. מסדרים מסוג זה משמשים במערכות חלוקה במתח גבוה, ובדרך כלל מיוצרים כמסדרים סגורים מסוג Metal Enclosed בעלי בידוד גז. בפרויקט זה נבחר להשתמש במסדרי מתח גבוה של חברת Siemens, מדגם 8DJH Switchgear, בתצורת RMU – Ring Main Unit. מסדר זה מתאים לרשת חלוקה טבעתית במתח, 22kV והוא עושה שימוש בגז SF6 לצורך בידוד פנימי של רכיבי המיתוג.

מכיוון שנבחרה תצורת רשת טבעתית, בכל תחנה אזורית נדרש מסדר הכולל שני תאי קו טבעתיים ותא אחד להזנת שנאי. לכן נבחרה קונפיגורציית RRT, הכוללת: שני תאי Ring Main Feeders לחיבור המשך הטבעת, ותא Transformer Feeder להזנת השנאי המקומי.



**איור 4.2 - מסדר מ"ג Siemens מסוג DJH8**

בתאי הקו יותקנו מנתקי עומס, ואילו תא השנאי יכלול מנתק עומס בשילוב נתיך מתח גבוה מסוג HRC, לצורך הגנה על השנאי בפני זרמי קצר ועומסי יתר. המסדר שנבחר הוא בעל זרם נומינלי של 630A ויכולת עמידה בזרם קצר עד 20kA נתונים המתאימים לזרמי העבודה והקצר שחושבו בפרק הקודם.



**איור 4.3 - תרשים מסדר מ"ג בתצורת RRT**

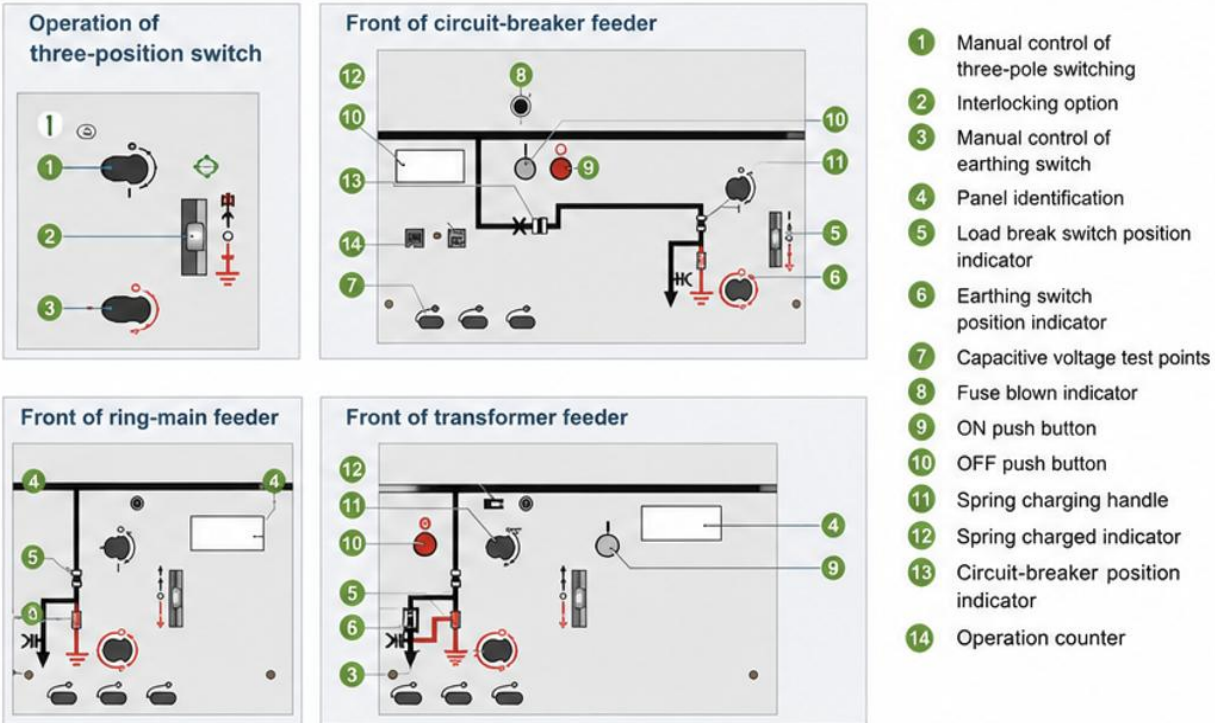
שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |

מרכיבי המסדר העיקריים כוללים פאנל שליטה, מנתקי עומס תלת-קוטביים, מנתקי הארקה, תא חיבור כבלים, פס הארקה, מנגנוני הפעלה, תא נתיכים, מערכת גילוי מתח קיבולית ומנגנוני נעילה ובטיחות. רכיבים אלו מאפשרים תפעול בטוח של המסדר, בידוד מקטעים בעת תקלה, והזנה המשכית של הרשת דרך מבנה הטבעת.



**איור 4.4 - מרכיבי מסדר המתח הגבוה**

תפעול המסדר מתבצע באמצעות מנגנוני הפעלה ידניים הכוללים הפעלה וניתוק של מנתק העומס, הפעלת מנתק הארקה, אינדיקציות מצב, שקעי בדיקת מתח, מנגנון נעילה, טעינת קפיץ ידנית וכפתורי הפעלה וניתוק. מבנה זה מאפשר תחזוקה בטוחה, זיהוי מצב הצידוד בצורה ברורה, והגנה על אנשי התחזוקה בזמן עבודה על מערכת המתח הגבוה.



איור 4.5 - תרשים תפעול מסדר המתח הגבוה

**4.4 מסדר מ"ג ראשי**

מסדר המתח הגבוה הראשי ימוקם בחדר החשמל המרכזי של המתקן וישמש כנקודת האיסוף המרכזית של כלל התחנות האזוריות לפני החיבור לרשת חברת החשמל במתח 22kV. המסדר יאפשר ביצוע פעולות מיתוג, הגנה, ניתוק ותחזוקה של המתקן בצורה בטוחה ואמינה, וכן ישמש כנקודת הממשק בין מערכת הייצור הפוטרוולטאית לבין רשת החלוקה.

לצורך הפרויקט נבחר מסדר מתח גבוה מתוצרת Siemens, מדגם 8DJH Gas Insulated Switchgear, המיועד למערכות חלוקה משנית במתח 22kV. המסדר מבוסס על בידוד גז SF<sub>6</sub> ומאופיין במבנה קומפקטי, אמינות גבוהה, דרישות תחזוקה נמוכות ועמידות בתנאי סביבה חיצוניים.

המסדר שנבחר בעל זרם נקוב של 630A ויכולת עמידה בזרם קצר עד 20kA למשך שנייה אחת, נתונים העונים על דרישות המתקן ועל זרמי הקצר שחושבו בפרק הקודם.



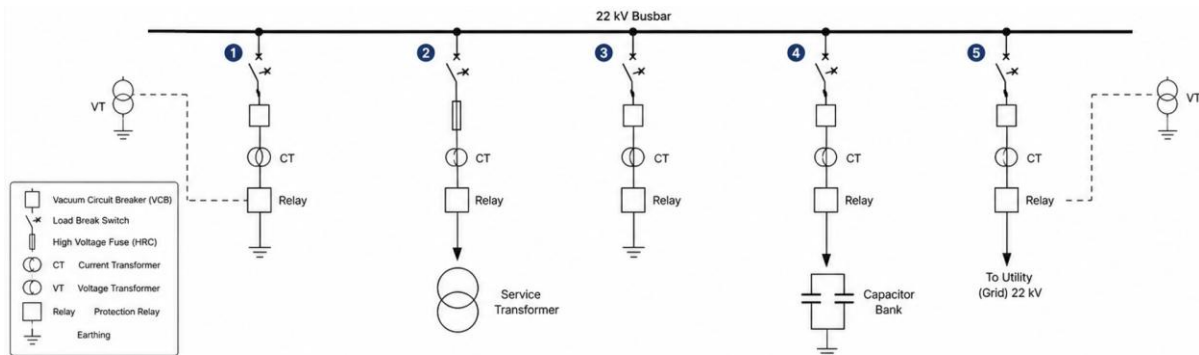
		(kV)				
		7.2	12	15	17.5	24
Rated voltage	kV	7.2	12	15	17.5	24
Rated frequency	Hz	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60
Rated short-duration power-frequency withstand voltage (1 min)	kV	20	28	36	38	50
Rated lightning impulse withstand voltage	kV	60	75	95	95	125
Rated peak withstand current	kA	63	63	63	63	50
Rated short-circuit making current	kA	63	63	63	63	50
Rated short-time withstand current 3 s	kA	20	20	20	20	20
Rated short-time withstand current 1 s	kA	25	25	25	25	20
Rated normal current of the busbar	A	630	630	630	630	630
Rated normal current of feeders	A	200/250/400/630 *				
Width (feeders)	mm	310/430/500 *				
Depth						
- without pressure relief duct	mm	775	775	775	775	775
- with pressure relief duct	mm	890	890	890	890	890
Height without LV compartment and pressure relief duct	mm	optionally 1040 / 1200 / 1400 / 1700				

### איור 4.6 - מסדר מ"ג ראשי Siemens 8DJH במתח 22kV

לצורך תפעול המתקן נבחרה תצורת מסדר הכוללת חמישה תאים :

1. **תא הזנה ראשי מהמתקן** – כולל מפסק ואקום (VCB), ממירי זרם (CT), ממסרי הגנה ומנתק תלת-קוטבי.
2. **תא יציאה לשנאי שירות (שנאי בית)** – כולל מנתק עומס ונתיכי מתח גבוה להגנת השנאי.
3. **תא מקשר (Bus Coupler)** – מאפשר גמישות תפעולית וביצוע פעולות תחזוקה וניתוק מקטעים בעת הצורך.
4. **תא יציאה להזנה פנימית במתקן** – כולל מפסק ואקום, ממירי זרם ומערכת הגנות.
5. **תא יציאה לרשת חברת החשמל** – כולל מפסק ואקום, ממירי זרם, ממירי מתח (VT) ומערכת הגנות לצורך סנכרון וחיבור לרשת.

מבנה זה מאפשר רמת אמינות גבוהה, גמישות תפעולית ויכולת ניתוק סלקטיבית במקרה של תקלה, תוך שמירה על המשך פעולת שאר חלקי המתקן ככל הניתן. בנוסף, שילוב ממירי זרם ומתח יחד עם ממסרי ההגנה מאפשר יישום פונקציות הגנה, מדידה ובקרה בהתאם לדרישות חברת החשמל ולתקני המתח הגבוה המקובלים.



### איור 4.7 - שרטוט חד קווי של מסדר המתח הגבוה הראשי במתקן.

שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה | פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו



#### 4.5 שנאי מתח, שנאי זרם וממסרי הגנה

מערכת ההגנה במתח גבוה מהווה חלק מרכזי בתכנון המתקן ותפקידה לזהות תקלות, לנתק את החלק הפגוע בזמן הקצר ביותר האפשרי ולמנוע נזק לציוד ולמערכת החשמל. לצורך כך נעשה שימוש בממסרי הגנה, שנאי זרם (CT) ושנאי מתח (VT), המאפשרים מדידה רציפה של גדלים חשמליים והפעלת פונקציות הגנה בהתאם לתנאי העבודה במערכת.

#### **ממסר הגנה**

מסדר המתח הגבוה הראשי מחויב בהתקנת ממסר הגנה העומד בדרישות חברת החשמל ובדרישות התקינה למתקני ייצור המחברים לרשת. ממסר ההגנה אחראי לנטר באופן רציף את זרמי ומתחי המערכת, לזהות מצבי תקלה ולשלוח פקודת ניתוק למפסק המתח הגבוה בעת הצורך. בפרויקט זה נבחר ממסר הגנה מתוצרת Siemens מדגם SIPROTEC Compact 7SJ80, המתאים למערכות חלוקה במתח גבוה ומאפשר שילוב מגוון רחב של פונקציות הגנה, מדידה ובקרה.



$I >$	50/51	Overcurrent protection Instantaneous / Time delayed
$I_0 >$	50N/51N	Earth-fault protection Instantaneous / Time delayed
$U > / U <$	27/59	Overvoltage / Undervoltage protection
$f > / f <$	81O/U	Frequency protection Over / Under
$I_0 \rightarrow$	67N	Directional earth-fault protection
	49	Temperature protection
$I_0 >$	50G	Earth-leakage protection
	25	Synchronism check

**איור 4.8 - ממסר הגנה SIPROTEC 7SJ80**

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

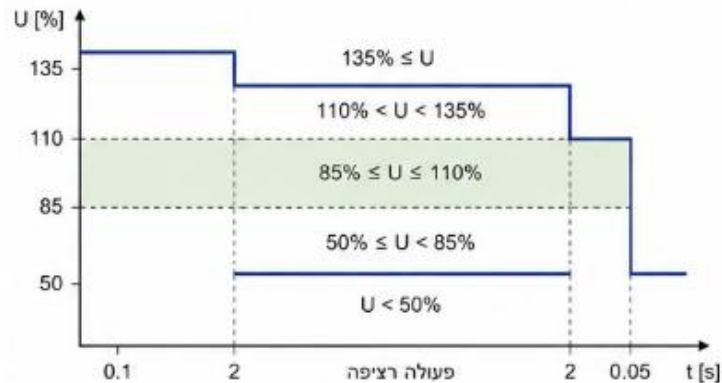
פונקציות ההגנה שנבחרו עבור המתקן מוצגות בטבלה הבאה :

פונקציית הגנה	ANSI
הגנת זרם יתר מיידיית ומושהית	50/51
הגנת זרם אפס מיידיית ומושהית	50N/51N
הגנת תת־מתח ויתר־מתח	27/59
הגנת תדר	81O/U
הגנת פחת כיוונית	67N
הגנת טמפרטורה	49
הגנת פחת	50G
בדיקת סנכרון	25

**טבלה 4.2 - פונקציות ההגנה של ממסר ההגנה**

הגנת זרם יתר מיושמת באמצעות מדידת זרמי הפאזות ופועלת במקרה של עומס יתר או קצר חשמלי. הגנת הפחת מיועדת לזיהוי תקלות אדמה ומבוססת על מדידת זרם האפס במערכת. בנוסף, ממסר ההגנה מבצע פיקוח על מתח ותדר הרשת ומנתק את המתקן במקרה של חריגה מהערכים המותרים על פי דרישות חברת החשמל.

המתקן יתפקד באופן רציף בתחום התדרים שבין 47Hz ל־ 51.5Hz במקרה של חריגה מהתחום המותר יופעלו פונקציות ההגנה המתאימות ויבוצע ניתוק של המתקן מהרשת בהתאם לזמני התגובה הנדרשים.



**איור 4.9 - עקומת ניתוק ממסר מתח יתר ותת־מתח בהתאם לדרישות חברת החשמל.**

### שנאי זרם (CT)

שנאי הזרם משמשים להקטנת הזרמים במערכת לערכים סטנדרטיים המתאימים לממסרי ההגנה ולמערכות המדידה. השנאים מותקנים בתאי המסדר ומחוברים בטור עם המוליכים הראשיים, כאשר הליפוף המשני מספק את אות המדידה לממסר ההגנה.

| שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

לצורך בחירת שנאי הזרם חושב תחילה עומס המעגל המשני הכולל את התנגדות המוליכים ואת עכבת הכניסה של ממסר ההגנה.

עבור מוליכים באורך 1.5m ובשטח חתך  $2.5\text{mm}^2$  מתקבל:

$$R_{20^\circ} = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{0.0175 \cdot 1.5}{2.5} \cdot 1.2 = 0.0126\Omega$$

תיקון לטמפרטורת עבודה של  $70^\circ\text{C}$ :

$$R_{70^\circ} = R_{20^\circ}(1 + \alpha\Delta T)$$

$$R_{70^\circ} = 0.0126(1 + 0.0039(70 - 20)) = 0.015\Omega$$

ולכן:

$$R_{tot} = R_{protection} + R_{70^\circ}$$

$$R_{tot} = 0.02 + 0.015 = 0.035\Omega$$

ההספק הנדרש משנאי הזרם הוא:

$$S_{CT} = R_{tot} \cdot I_n^2$$

$$S_{CT} = 0.035 \cdot 5^2 = 0.875\text{VA}$$

לפיכך נבחר שנאי זרם בעל הספק נקוב של 2.5VA.

זרם העבודה בצד המתח הגבוה הוא:

$$I_n = 47.23 \cdot 6 \approx 284\text{A}$$

זרם הקצר המרבי שחושב עבור המסדר:

$$I_k = 787.16 \cdot 6 \approx 4.73\text{kA}$$

בהתאם לכך נבחר שנאי זרם מתוצרת Siemens מדגם:

**4MA7 – 300/5A – 2.5VA – 5P10**

כלומר שנאי זרם בעל יחס המרה 300/5A, הספק 2.5VA ודרגת דיוק 5P10 המתאימה ליישומי הגנה.



<b>A</b>	300 / 5 A
	2.5 VA
	5P10
	50 / 60 Hz
	IEC 61869-2

**איור 4.10 -** שנאי זרם Siemens 4MA7

### שנאי מתח (VT)

שנאי המתח משמשים למדידת מתחי המערכת ולהזנת ממסרי ההגנה, ציוד המדידה ומערכות הבקרה. השנאי מותקן בתא היציאה לרשת חברת החשמל ומאפשר ניטור רציף של מתחי הרשת לצורך הפעלת פונקציות הגנה, מדידה וסנכרון.

בפרויקט זה נבחר שנאי מתח מתוצרת Siemens מדגם 4MR, בעל יחס המתחים:

$$22kV/\sqrt{3}: 110V/\sqrt{3}: 110V/3$$

שנאי זה מספק יציאות מדידה מתאימות למערכות ההגנה והבקרה, ומאפשר יישום מלא של פונקציות הגנת מתח, תדר וסנכרון הנדרשות לצורך חיבור המתקן לרשת החלוקה.



<b>kV</b>	22 kV / $\sqrt{3}$
<b>V</b>	110 V / $\sqrt{3}$
<b>V</b>	110 V / 3
	30 VA
	0.5
	50 / 60 Hz
	IEC 61869-3

**איור 4.11 -** שנאי מתח Siemens 4MR

שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה | פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |

#### 4.6 מקדם הספק ובקרת הספק ריאקטיבי

במערכות פוטו-וולטאיות מודרניות, שיפור מקדם ההספק מתבצע בעיקר באמצעות המהפכים עצמם. המהפכים שנבחרו בפרויקט מאפשרים עבודה במקדם הספק מתכוונן בתחום:

$$0.9_{Cap} \leq \cos\varphi \leq 0.9_{Ind}$$

כאשר במצב עבודה רגיל מוזרם לרשת הספק אקטיבי בלבד, כלומר:

$$\cos\varphi \approx 1$$

למרות יכולת זו, דרישות חברת החשמל למתקני ייצור במתח גבוה מחייבות בחלק מהמקרים התקנת אמצעים ייעודיים לפיצוי הספק ריאקטיבי ולשמירה על רמות מתח תקינות בנקודת החיבור לרשת.

#### **בקרת הספק ריאקטיבי**

חיבור תחנת כוח סולארית לרשת החלוקה משפיע על פרופיל המתחים לאורך קווי ההולכה ועל זרימת ההספק הריאקטיבי במערכת. לכן נדרש לבדוק את מגבלות ההספק הריאקטיבי המותרות עבור המתקן. ההספק הריאקטיבי המרבי מחושב לפי:

$$Q_{PV} \leq \frac{12.1 - 0.31 \cdot L \cdot P_{PV}}{2.3 + 0.37 \cdot L}$$

כאשר:

$$P_{PV} = 9.6MW$$

$$L = 10km$$

נציב:

$$Q_{PV} = \frac{12.1 - 0.31 \cdot 10 \cdot 9.6}{2.3 + 0.37 \cdot 10}$$

$$Q_{PV} = \frac{12.1 - 29.76}{6}$$

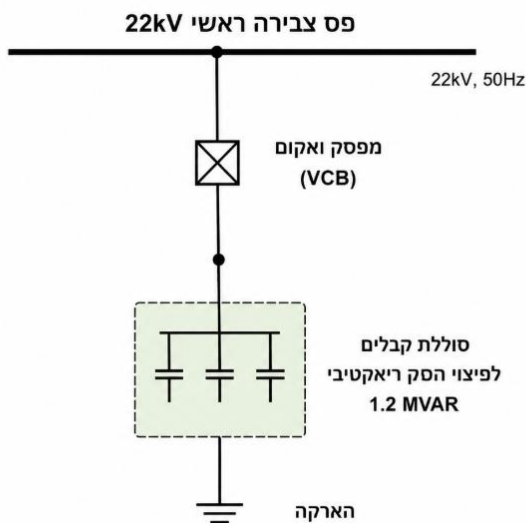
$$Q_{PV} = -2.94MVAR$$

מתוצאה זו מתקבל ערך שלילי, כלומר במצבי עבודה מסוימים המתקן עשוי להידרש לספוג הספק ריאקטיבי מהרשת לצורך שמירה על יציבות המתח ועמידה בדרישות החיבור. לצורך תמיכה במערכת ובשיפור מקדם ההספק נבחרה סוללת קבלים בהספק:

$$Q_C = 1.2MVAR$$

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

הסוללה תותקן במסדר המתח הגבוה הראשי ותאפשר פיצוי הספק ריאקטיבי בהתאם לצרכי הרשת ותנאי ההפעלה של המתקן.



#### איור 4.12 - חיבור סוללת הקבלים לפס הצבירה במסדר המתח הגבוה הראשי

בפועל, רוב דרישות ההספק הריאקטיבי מסופקות באמצעות המהפכים עצמם, וסוללת הקבלים מהווה אמצעי גיבוי ותמיכה ברשת בהתאם לדרישות חברת החשמל.

#### 4.7 בחירת שנאי בית

שנאי הבית מיועד לספק את צריכת החשמל העצמית של המתקן, לרבות מערכות הפיקוד והבקרה, מערכות התקשורת, התאורה, מערכות האבטחה ההיקפית, מערכות המיזוג וכן יתר צרכני המתח הנמוך הנדרשים להפעלה תקינה של התחנה הסולארית.

אספקת החשמל לצרכנים אלה תתבצע מרשת המתח הגבוה הפנימית של המתקן באמצעות שנאי שירות ייעודי, המחובר למסדר המתח הגבוה הראשי.

לצורך הפרויקט נבחר שנאי שמן מתוצרת ABB, בעל הספק נקוב של 160kVA ויחס השנאה:

$$22/0.4kV$$

בחירת ההספק בוצעה בהתאם לצריכת החשמל המשוערת של כלל מערכות העזר במתקן, תוך שמירה על רזרבת הספק לצורך הרחבות עתידיות וצרכנים נוספים.

השנאי ימוקם בסמוך לחדר המתח הגבוה הראשי, בתוך תא ייעודי נפרד, המאפשר גישה נוחה לתחזוקה, אורור תקין ועמידה בדרישות הבטיחות וההפרדה החשמלית המקובלות במתקני ייצור חשמל.



**איור 4.13 -** שנאי בית ABB בהספק 160kVA וביחס השנאה 22/0.4kV

**4.8 לוח מתח נמוך – הזנת מתקן**

מערכות העזר של המתקן, הכוללות תאורה, מיזוג, אבטחה היקפית, מערכות פיקוד ובקרה וציוד שירות נוסף, יוזנו מלוח מתח נמוך ראשי הממוקם בחדר ייעודי בסמוך לחדר החשמל המרכזי של המתקן. הלוח יוזן משנאי הבית שנבחר בסעיף הקודם, בעל הספק נקוב של 160kVA וביחס השנאה 22/0.4kV. מאחר שהשנאי ימוקם במרחק של כ-3 מטרים בלבד מהלוח, ניתן להתייחס להזנה כהזנה ישירה ולזניח את השפעת אורך הכבל על מפל המתח. הלוח יתוכנן וייבנה בהתאם לתקן IEC 61439-1/2. נבחר לוח מסוג T4P-H של חברת תמחש, לוח סיסטם עד 250A, להתקנה על קיר. הציוד בלוח יהיה מתוצרת ABB.

**מאפיינים טכניים של תא כניסה / יציאה**

T4P-M	T4P-H	T4P-K	T4P דגם
IEC 62208 ת"ח / IEC-61439-1,2 ת"ח			תקן
IK10	IK10	IK10	דרגת הגנה IK
IP31	IP42	IP55	דרגת הגנה IP
העמדה פנימית	העמדה פנימית	העמדה פנימית	תנאי העמדה
+35°C	+35°C	+35°C	טמפרטורה סיבכית ממוצעת 24 שעות
+40°C	+40°C	+40°C	ערך מידי של טמפרטורה סיבכית
-5°C	-5°C	-5°C	ערך מינימלי של טמפרטורה סיבכית
50% / 40°C	50% / 40°C	50% / 40°C	לחות יחסית רציפה
90% / 20°C	90% / 20°C	90% / 20°C	לחות יחסית לטווח קצר
<b>מאפיינים חשמליים</b>			
4kv	4kv	4kv	מתח שיא נקוב
III	III	III	קטגוריית מתח יתר
1/2/3	1/2/3	1/2/3	דרגת זיהום
50 Hz	50 Hz	50 Hz	תדר
300-690V	300-690V	300-690V	מתח הבדדה (Ui)
440 V AC	440 V AC	440 V AC	מתח עבודה (Ue)
<b>סביבת הרשי</b>			
250A	250A	250A	זרם נקוב
10kA	10kA	10kA	זרם קצר 1 sec (Icw)
17kA	17kA	17kA	זרם קצר שיא (IpK)



**איור 4.14 -** נתוני לוח סיסטם T4P-H

שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה | פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |

זרם העבודה הנקוב בצד המתח הנמוך של השנאי :

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}$$

$$I_n = \frac{160}{\sqrt{3} \cdot 0.4} = 230A$$

זרם הקצר בצד המתח הנמוך של השנאי, עבור מתח קצר של 6%  $U_k = 6\%$ , יחושב לפי :

$$I_K = \frac{I_n}{U_k}$$

$$I_K = \frac{230}{0.06} = 3835A$$

כלומר :

$$I_K = 3.835kA$$

#### חישוב זרם הלם

לפי תקן IEC 61439-1/2 זרם ההלם מחושב עלידי הכפלת זרם הקצר במקדם מתאים מתוך הטבלה. עבור זרם קצר של כ-  $3.85kA$ , מתקבל מקדם :

$$n = 1.5$$

ולכן :

$$I_{PK} = n \cdot I_K$$

$$I_{PK} = 1.5 \cdot 3.835 = 5.75kA$$

כלומר :

$$I_{PK} \approx 5.8kA$$

Table 7 - Values for the factor n <sup>a</sup> (9.3.3)		
r.m.s. value of short-circuit current kA	cos φ	n
I ≤ 5	0.7	1.5
5 < I ≤ 10	0.5	1.7
10 < I ≤ 20	0.3	2
20 < I ≤ 50	0.25	2.1
50 < I	0.2	2.2

a - Values of this table represent the majority of applications in special locations . For example in the vicinity of transformers or generators , lower values of power factor may be found , whereby the maximum prospective peak current may become the limiting value instead of the r.m.s. value of the short-circuit current .

איור 4.15 - טבלת מקדמי זרם הלם לפי IEC 61439-1/2

#### בחירת מפסק ראשי

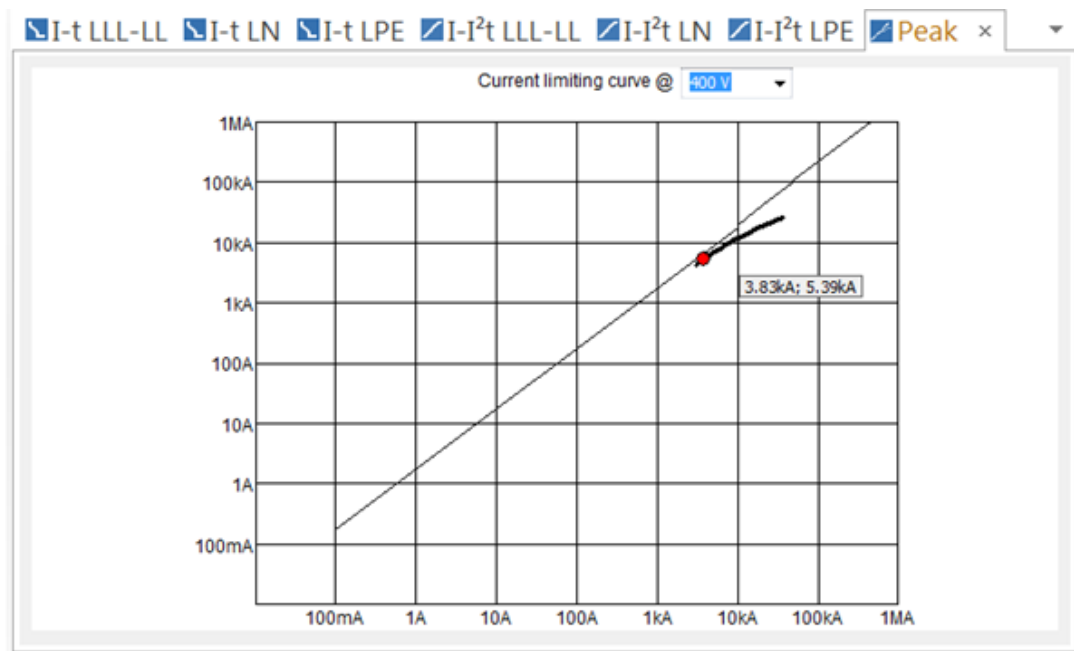
בהתאם לזרם העבודה המחושב של השנאי, נבחר מפסק ראשי מתוצרת **ABB** מדגם **Tmax XT3**, בעל זרם נקוב:

$$I_n = 250A$$

בחירת מפסק זה מתאימה לזרם העבודה של השנאי ומספקת הגנה בפני עומס יתר וזרמי קצר בלוח המתח הנמוך.

#### בדיקת עמידה בזרם הלם וסלקטיביות

באמצעות תוכנת **DOC – Curves** של **ABB** בוצעה בדיקה למפסק הנבחר, במטרה לוודא כי הוא מתאים לזרם הקצר הצפוי ולזרם ההלם המחושב.



**איור 4.16 - סימולציית ניתוק זרם בהלם במפסק ABB XT3**

כל מערכות העזר במתקן יוזנו דרך מא"זים מתאימים מסדרת S200 של ABB, בהתאם לזרמי העבודה של כל עומס. בנוסף, נבדקה התאמה והגנה עורפית בין המפסק הראשי מסוג MCCB לבין המא"זים downstream.

MCCB - S2.. Z @ 415 V																					
Char.	I <sub>cu</sub> [kA]	10	15	25	Supply s.	XT2		XT1 - XT2					XT1 - XT2 - XT3				XT3				
					Version	B, C, N, S, H, L, V															
					Release	TM															
					I <sub>n</sub> [A]	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250		
Load s.	Z	S200	S200M	S200P	±2	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	
		S200	S200M	S200P	3	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
		S200	S200M	S200P	4	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
		S200	S200M	S200P	6	5,5'	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	10,5	T	T	T	T	T	T	T
		S200	S200M	S200P	8			5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	10,5	T	T	T	T	T	T	T	
		S200	S200M	S200P	10			3'	3	3	3	4,5	8	8,5	17	T	T	T	T	T	
		S200	S200M	S200P	16					3'	3	4,5	5	7,5	12	20	T	T	T	T	
		S200	S200M	S200P	20					3'		3	5	6	10	15	T	T	T	T	
		S200	S200M	S200P	25							3'	5	6	10	15	T	T	T	T	
		S200	S200M-S200P	-	32							3'		6	7,5	12	T	T	T	T	
		S200	S200M-S200P	-	40									5,5'	7,5	12	T	T	T	T	
		S200	S200M-S200P	-	50									4'	5'	7,5	10,5	T	T	T	
		S200	S200M-S200P	-	63										5'	6'	10,5	T	T	T	
		-	-	-	80																
		-	-	-	100																
-	-	-	125																		

**איור 4.17 - בדיקת הגנה עורפית בין מפסק MCCB למא"זים**

שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה | פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו

## פרק 5 - הארקות והגנות מפני חשמול

מערכת ההארקה מהווה אחד מאמצעי הבטיחות החשובים ביותר בכל מתקן חשמלי, ותפקידה להגן על בני אדם, בעלי חיים וציוד חשמלי מפני סכנת התחשמלות, וכן לאפשר פעולה תקינה של מערכות ההגנה בעת תקלה. תכנון מערכת ההארקה במתקן סולארי בהספק גבוה מחייב עמידה בדרישות חוק החשמל, תקני IEC ודרישות חברת החשמל.

על פי תקנות החשמל, כל מתקן חשמלי חייב להיות מוגן מפני חשמול באמצעות אחד או יותר מאמצעי ההגנה המותרים בחוק:

1. איפוס (TN-S, TN-C-S)
2. הארקה הגנה (TT)
3. זינה צפה (IT)
4. הפרד מגן
5. מתח נמוך מאוד (SELV / PELV)
6. מפסק מגן (RCD)
7. בידוד מגן

כל הציוד החשמלי המותקן במתקן חייב להתאים לדרישות התקינה, לתנאי הסביבה ולערכים הנומינליים הנדרשים. בנוסף, קיימת חובה לחבר להארקה את כל חלקי המתכת הנגישים למגע אדם, ובכלל זה:

- מעטפות מתכת של ציוד חשמלי.
- שריון ומעטה מתכתי של כבלים.
- מבנים וקונסטרוקציות מתכתיות הנושאות ציוד חשמלי.
- רשתות וגדרות מתכת.
- חלקי מתכת בחדרי חשמל ובתאי חשמל, לרבות דלתות מתכת.
- מסגרות וקונסטרוקציות של מערכי המודולים הסולאריים.

בהתאם לתקנה 17 לתקנות החשמל – הארקות ואמצעי הגנה בפני חשמול במתח עד 1000V, כל מבנה בעל יסודות באדמה יחובר להארקת יסוד תקינית. במתקן המתוכנן תשולב מערכת הארקה אחודה אשר תחבר בין הארקת היסוד, רשת ההארקה של תחנות המשנה, מסדרי המתח הגבוה, השנאים, לוחות המתח הנמוך וקונסטרוקציות המודולים הסולאריים, במטרה ליצור מערכת שוות-פוטנציאל יעילה ובטוחה.

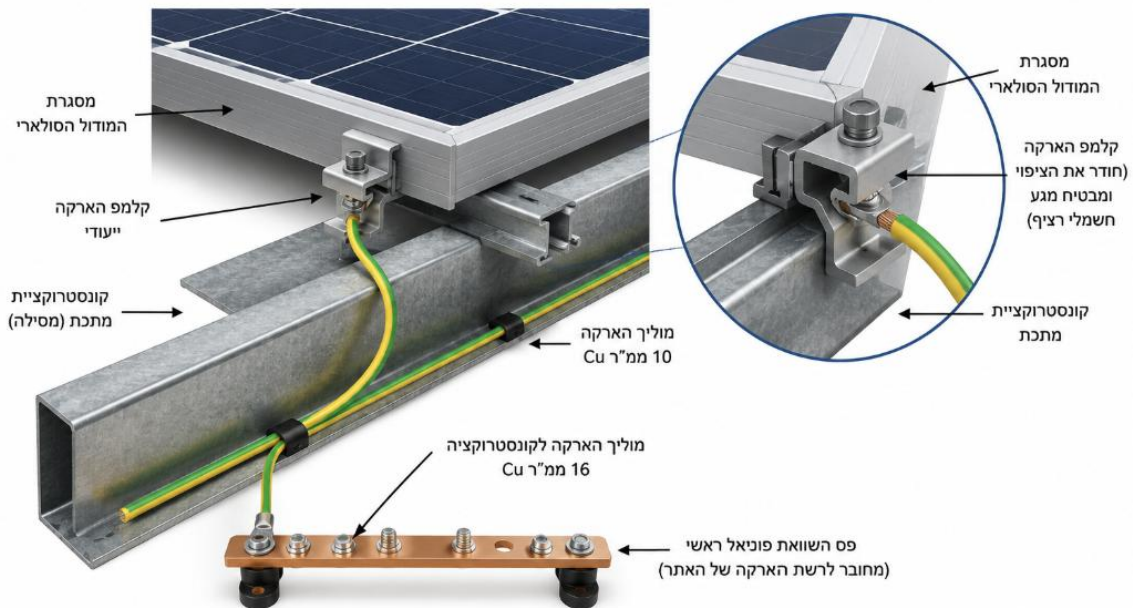
## 5.1 הארכת המודולים הסולאריים

המודולים הסולאריים שנבחרו בפרויקט הם בעלי מסגרת מתכתית ולכן נדרשת הארכת הגנה בהתאם לדרישות חוק החשמל והתקנים הרלוונטיים. מטרת ההארכה היא למנוע הופעת מתחי מגע מסוכנים על חלקי המתכת הנגישים במקרה של כשל בבידוד או תקלה חשמלית, ובכך להבטיח את בטיחות העובדים ואת תקינות פעולת מערכות ההגנה.

כל מודול יחובר להארכה באמצעות מוליך נחושת בעל שטח חתך של 10 ממ"ר, אשר יחובר למסגרת המתכת של המודול ולקונסטרוקציית המתכת הנושאת את המודולים. הקונסטרוקציה עצמה מוגדרת כחלק מתכתי המותר לשימוש כמוליך הארכה בהתאם לתקנה 27 לתקנות החשמל, ולכן ניתן להשתמש בה כחלק ממערכת ההארכה של השדה הסולארי.

החיבור בין מסגרת המודול לקונסטרוקציה יתבצע באמצעות **קלמפ הארכה ייעודי (Grounding Clamp)** המאפשר יצירת מגע חשמלי רציף ואמין בין חלקי המתכת. הקלמפ חודר את שכבת הציפוי או האנודיזציה של המסגרת והקונסטרוקציה, ובכך מבטיח רציפות חשמלית לאורך כל מערכת ההארכה. בנוסף, השימוש בקלמפ תקני מספק עמידות גבוהה בפני קורוזיה ותנאי סביבה חיצוניים לאורך חיי המתקן.

תכנון מערכת ההארכה יבוצע כך שפירוק או החלפה של מודול בודד לא יפגעו ברציפות ההארכה של יתר המודולים במערך. כל קונסטרוקציות המודולים יחוברו לפס השוואת הפוטנציאלים הראשי של המתקן באמצעות מוליך נחושת בעל שטח חתך של 16 ממ"ר, אשר יחובר בהמשך לרשת ההארכה הכללית של האתר.



**איור 5.1 - חיבור הארכה של מודול סולארי לקונסטרוקציית המתכת באמצעות קלמפ הארכה**

| שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

## 5.2 הארכת מהפכים

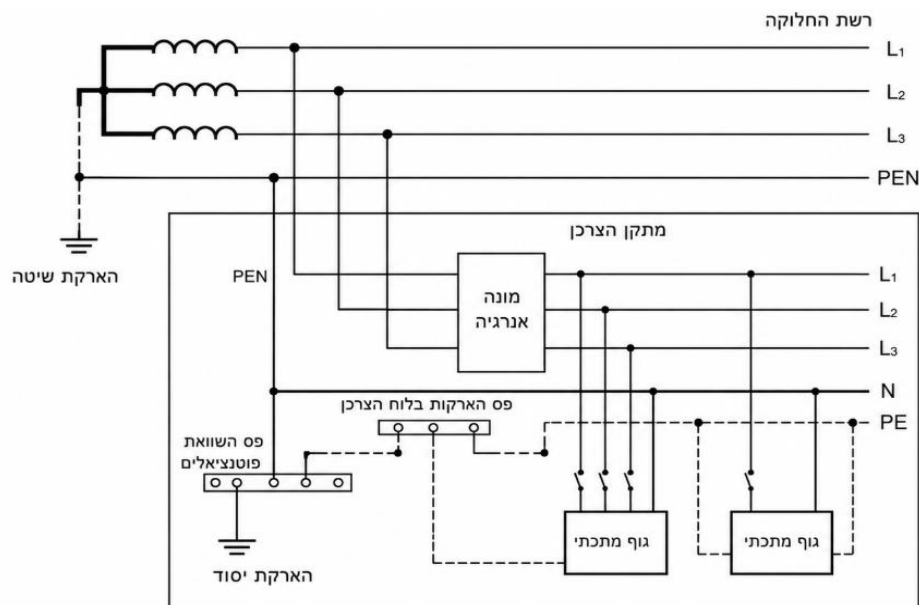
המהפכים מהווים את נקודת המעבר בין מערכת ה־DC של המודולים הסולאריים לבין מערכת ה־AC של המתקן, ולכן נדרש לחברם למערכת ההארקה של האתר. גוף המהפך יחובר אל פס השוואת הפוטנציאלים באמצעות מוליך הארקה ייעודי, בהתאם להוראות היצרן ולדרישות התקנים הרלוונטיים. כבל הזינה של המהפך יכול מוליך הארקה אשר יחובר למהדק ההארקה הייעודי של המהפך. חיבור זה מבטיח הגנה מפני מתחי מגע מסוכנים במקרה של תקלה בבידוד או מעבר זרם תקלה אל מעטפת המהפך.

## 5.3 הארכת שנאים, מבנים ולוחות חשמל

נקודת האפס (Neutral Point) של השנאים תוארק באמצעות הארכת שיטה ישירה לאדמה. מטרת הארקה זו היא ליצור נקודת ייחוס למערכת החשמל ולאפשר פעולה תקינה של מערכות ההגנה במקרה של קצר או תקלה לאדמה.

המבנה המרכזי של המתקן, בו מותקנים מסדרי המתח הגבוה, יחובר להארקת יסוד תקינה. כל חלקי המתכת במבנה, לרבות דלתות, מסגרות, פסי צבירה, ארונות חשמל וציוד עזר, יחוברו אל פס השוואת הפוטנציאלים הראשי של המבנה.

שנאי הבית, המשמש להזנת מערכות העזר של המתקן, יוארק באמצעות הארכת שיטה בנקודת האפס של השנאי. עבור לוח המתח הנמוך נבחרה שיטת הארקה מסוג TN-S, אשר במסגרתה מוליך האפס (N) ומוליך ההארקה (PE) מופרדים לכל אורך המערכת. בחירה זו עומדת בדרישות חוק החשמל ומתאימה למבנה הכולל הארכת יסוד תקינה.

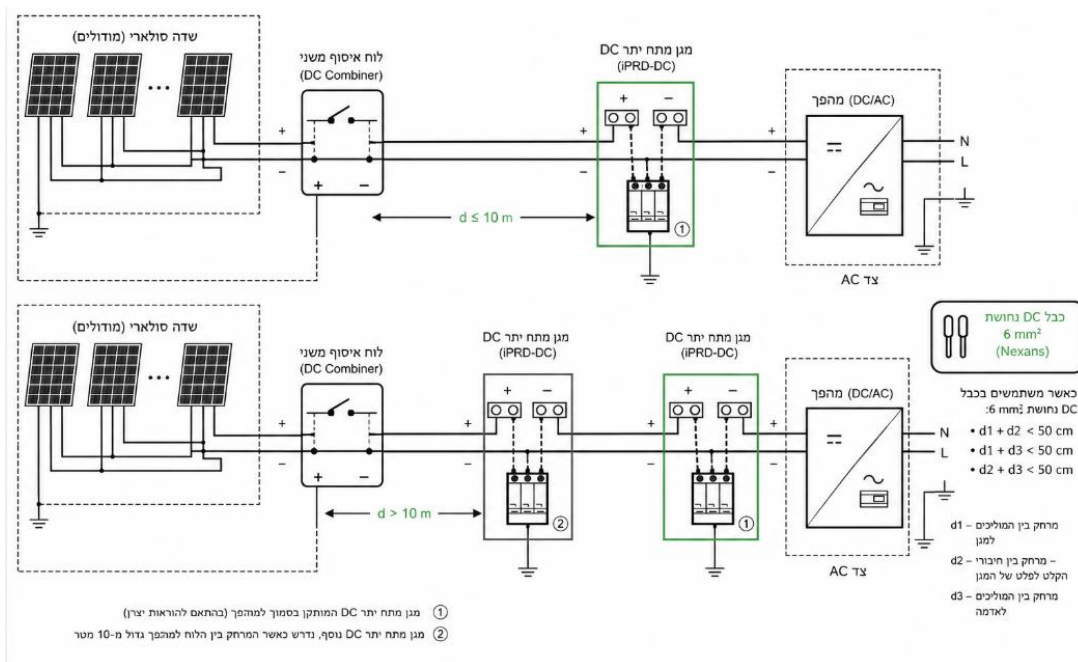


**איור 5.2 - שיטת הארקה מסוג TN-S עבור לוח המתח הנמוך ושנאי הבית**

## 5.4 הגנה מפני מתחי יתר וברקים

מתקן פוטו-וולטאי חשוף לפגיעות ברק ישירות ולמתחי יתר הנוצרים כתוצאה מפגיעות ברק סמוכות. פגיעות אלו עלולות לגרום לנזק לציוד החשמלי, לפגיעה בבידוד ואף להשבתת חלקים מהמתקן. בעת פגיעת ברק נוצר גל מתח קצר וגבוה המתפשט לאורך המוליכים ועלול להגיע לציוד רגיש כגון מהפכים, מערכות בקרה וציוד תקשורת. מטרת מערכת ההגנה מפני ברקים ומתחי יתר היא לנתב את אנרגיית הברק אל מערכת ההארקה ובכך למנוע נזק לציוד ולשמור על בטיחות המתקן. לצורך תכנון המערכת יישמרו הכללים הבאים:

1. התקנת מגני מתח יתר בכל רמות המתח במתקן AC, DC – ומתח גבוה.
2. התקנת קולטי ברקים במרחק של לפחות מטר אחד ממערכי המודולים.
3. התקנת אמצעי הגנה מתאימים בין מגן מתח היתר לבין הציוד המוגן.
4. הקטנת מתחי המגע והצעד בתחום המתקן לערכים המותרים בתקנים.
5. התקנת מגני מתח יתר בסמוך למהפכים בהתאם לאורך הכבלים המתברים בין המודולים למהפך.



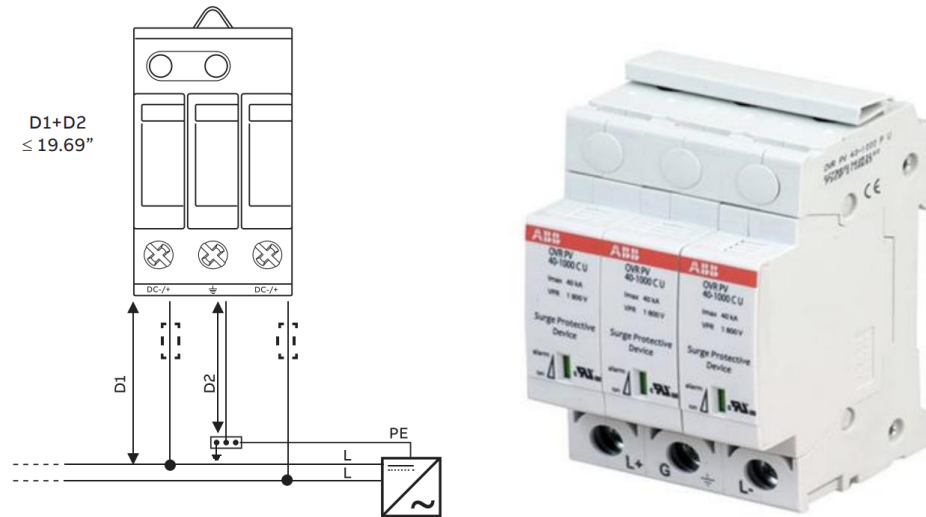
**איור 5.3 - מיקום מגני מתח יתר במערכת פוטו-וולטאית בהתאם למרחקי הכבלה**

## 5.5 מגני מתח יתר בצד המתח הנמוך

מגני מתח יתר יותקנו בלוחות האיסוף המשניים, בלוחות האיסוף הראשיים בתחנות האזוריות וכן בלוחות ה-AC ביציאת המהפכים. חיבור מגני המתח בצד ה-DC יתבצע בין המוליכים החיובי והשלילי לבין מערכת ההארקה.

| שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

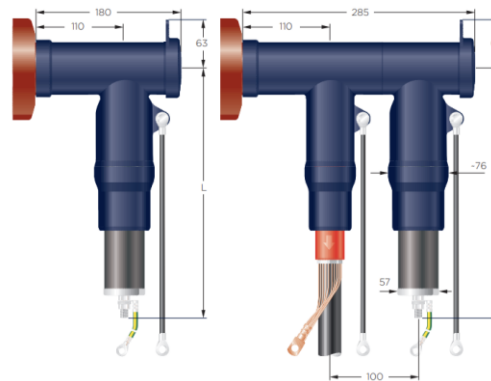
חיבור המגנים להארקה יתבצע באמצעות מוליך נחושת בשטח חתך של 16 מ"מ<sup>2</sup>, במטרה לאפשר פינוי מהיר ובטוח של זרמי הברק והמתחים המושרים אל האדמה.  
לצורך הפרויקט נבחר מגן מתח יתר מתוצרת ABB מדגם OVR PV, המיועד להגנה על מערכות פוטו-וולטאיות במתח ישר.



**איור 5.4 - מגן מתח יתר מסוג OVR PV מתוצרת ABB**

**5.6 מגני מתח יתר בצד המתח הגבוה**

במסדרי המתח הגבוה המשניים יותקנו מגני מתח יתר בתאי המקשרים, כך שכל תחנה אזורית תהיה מוגנת מפני חדירת מתחי יתר מרשת החלוקה הפנימית של המתקן.  
במסדר המתח הגבוה הראשי יותקנו מגני מתח יתר בתא הכניסה ובתא החיבור לרשת חברת החשמל, במטרה להגן על ציוד המיתוג, השנאים ומערכות ההגנה מפני נחשולי מתח המגיעים מרשת ההולכה.  
לצורך ההגנה נבחר מגן מתח יתר מתוצרת RAYCHEM מדגם RSTI-SA-05, המתאים למתח עבודה של 24kV ולזרם פריקה של 5kA.

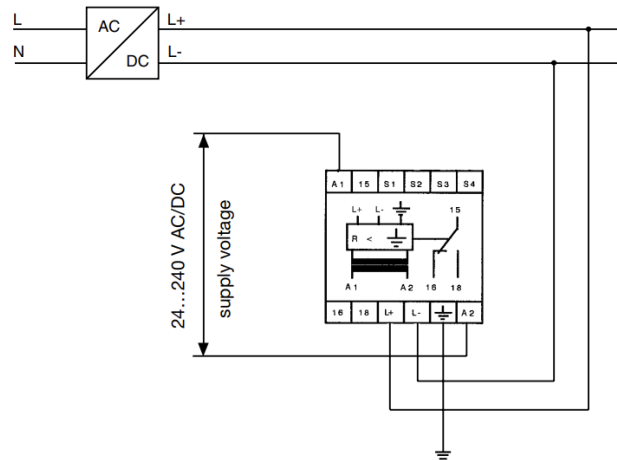


**איור 5.5 - מגן מתח יתר מתוצרת RAYCHEM מדגם RSTI-SA-05**

שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה | פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |

## 5.7 משגוח בידוד

המערכת שבין המודולים הסולאריים לבין המהפכים פועלת במתח ישר (DC) ומוגדרת כמערכת צפה, כלומר ללא נקודת אפס המחוברת לאדמה. במצב זה עלולה להתרחש פגיעה בבידוד מבלי שתתפתח זרימת זרם תקלה משמעותית שתגרום להפעלת אמצעי ההגנה הרגילים. לכן נדרש להתקין משגוח בידוד (Insulation Monitoring Device – IMD), שתפקידו לנטר באופן רציף את התנגדות הבידוד של המערכת ולהתריע במקרה של ירידה בערכי הבידוד מתחת לערך המותר. לצורך הפרויקט נבחר משגוח בידוד מתוצרת ABB מדגם CM-IWN-DC, המיועד למערכות מתח ישר. המשגוח יחובר למוליך החיובי, למוליך השלילי ולמערכת ההארקה, ויבצע ניטור רציף של מצב הבידוד במערכת.



**איור 5.6 - משגוח בידוד למערכות DC מדגם ABB CM-IWN-DC**

## פרק 6- בדיקות המתקן

בסיום הקמת המתקן ולפני חיבורו לרשת החשמל והפעלתו המסחרית, יש לבצע סדרת בדיקות שמטרתן לוודא את בטיחות המתקן, תקינותו ועמידתו בדרישות התקינה ודרישות חברת החשמל. הבדיקות יבוצעו על ידי בודק חשמל מוסמך המתאים לסוג המתקן ולרמת המתח שלו, כאשר במקרה זה נדרש בודק למתקני מתח גבוה. אישור החיבור הסופי לרשת יינתן על ידי חברת החשמל לאחר השלמת כלל הבדיקות בהצלחה. מטרת הבדיקות הן:

1. הבטחת בטיחות המשתמשים והעובדים במתקן .
2. אימות תקינות מערכת החשמל וציודה .
3. מניעת נזק לציוד בתנאי עבודה רגילים ובמצבי תקלה .
4. מניעת הפרעות או נזקים לרשת החשמל ולצרכנים אחרים המחוברים אליה .

### 6.1 בדיקה מוקדמת של מסמכים טכניים

בשלב הראשון תבוצע בדיקה של כלל המסמכים ההנדסיים הקשורים למתקן, לרבות:

- תכניות חשמל מאושרות .
- שרטוטים חד-קווים .
- תכניות פריסת ציוד .
- מפרטים טכניים של הציוד המותקן .
- מסמכי יצרן ותעודות בדיקה .

מטרת הבדיקה היא לוודא התאמה בין התכנון המאושר לבין הציוד שנבחר לביצוע.

### 6.2 בדיקת תכניות מאושרות לביצוע

בשלב זה ייבדקו המסמכים שהוגשו על ידי הקבלן או היזם ואושרו על ידי מהנדס החשמל האחראי, ובכללם:

- תכניות חדרי חשמל ומסדרי מתח גבוה .
- תכניות התקנת שנאים .
- תכניות הארקה .
- תכניות רשת הכבלים .
- תעודות בדיקה ונתוני יצרן של השנאים והציוד הראשי .

### 6.3 בדיקות קבלה של המתקן

בדיקות הקבלה יבוצעו סמוך ככל האפשר למועד חיבור המתקן לרשת החשמל.

### **6.3.1 בדיקות כלליות**

הבדיקות הכלליות יכללו:

- התאמת הביצוע לתכניות המאושרות.
- שימוש בציוד תקני ומאושר.
- ביצוע מדידות וכיולים נדרשים.
- קיום שילוט וציוד בטיחות כנדרש.

### **6.3.2 בדיקות מערכת ההארקה**

במסגרת בדיקות ההארקה ייבדקו:

- תקינות הארקות היסוד ואלקטרודות ההארקה.
- רציפות מוליכי ההארקה.
- הארקות אפס של השנאים.
- התנגדות מערכת ההארקה.
- חיבור כל חלקי המתכת לפס השוואת הפוטנציאלים.

### **6.3.3 בדיקות נקודת החיבור לרשת**

הבדיקות יכללו:

- תקינות ציוד המיתוג.
- בדיקת הכבלים והחיבורים.
- בדיקת מרחקי הבטיחות.
- התאמת הציוד לדרישות חברת החשמל.

### **6.3.4 בדיקות לוחות חשמל**

בלוחות החשמל ייבדקו:

- מרחקי בטיחות וגישה.
- התאמת המפסקים והנתיכים להספקים המתוכננים.
- תקינות אמצעי המיתוג.
- פעולת מגני מתח יתר.
- תקינות מנגנוני הנעילה וההבדדה.

### **6.3.5 בדיקות חדרי חשמל ומסדרי מתח גבוה**

הבדיקות יכללו:

- עמידה במרחקי הבטיחות הנדרשים.
- דרכי גישה ומילוט תקינות.
- אמצעי הפרדה ובטיחות.
- אמצעי אוורור.
- אמצעים למניעת חדירת מים.
- ציוד גילוי וכיבוי אש.

| שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

### **6.3.6 בדיקות שנאים**

לכל שנאי יבוצעו הבדיקות הבאות:

- התאמת השנאי לתעודות היצרן .
- בדיקת תקינות ההתקנה .
- בדיקת התנגדות בידוד הסלילים .
- בדיקת הארקה .
- בדיקת סימון וחיבורי הדקים .

### **6.3.7 בדיקות רשת הכבלים התת־קרקעית**

הבדיקות יכללו:

- התאמת שיטת ההתקנה לתקנות החשמל .
- אימות תוואי הכבלים וסימונם .
- בדיקות בידוד לכבלים .
- בדיקות רציפות מוליכים .
- בדיקת תקינות החיבורים והמופות .

### **6.3.8 בדיקות מערכות ההגנה**

בשלב זה ייבדקו כל מערכות ההגנה והבקרה של המתקן:

- בדיקת יחסי השנאה של שנאי זרם ושנאי מתח .
- כיול ממסרי ההגנה .
- בדיקת פעולת הגנות זרם יתר .
- בדיקת הגנות אדמה ופחת .
- בדיקת הגנות מתח ותדר .
- בדיקת פעולת ההגנות ביום החיבור לרשת חברת החשמל.

## **פרק 7 - תוצרי הפרויקט**

במסגרת הפרויקט הוכנו כלל המסמכים, החישובים והשרטוטים הנדרשים לצורך תכנון ראשוני של תחנת כוח פוטרוולטאית קרקעית בהספק מותקן של 9.6 MW המחוברת לרשת החלוקה במתח 22 kV. התוצרים העיקריים שהוכנו במסגרת העבודה הם:

### **7.1 ספר הפרויקט**

ספר הפרויקט כולל סקירה הנדסית מלאה של המתקן ושל הטכנולוגיות המשמשות בו, ובכלל זה:

- סקירת תחום האנרגיה הסולארית והמערכות הפוטרוולטאיות .
- ניתוח עקרונות הפעולה של מודולים סולאריים ומהפכים .
- סקירת ציוד המתח הגבוה והמתח הנמוך במתקן .
- סקר שוק ובחירת ציוד מתאים בהתאם לדרישות התכנון .

| שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

## 7.2 תכנון הנדסי של המתקן

בוצע תכנון מלא של מערכות המתקן, לרבות:

- מערך המודולים וסידורם בשטח האתר.
- קביעת זוויות הטיה ומרחקים למניעת הצללות.
- תכנון מחרוזות (Strings) ומערכי PV.
- תכנון מערך המהפכים DC/AC.
- בחירת שנאי עלייה 0.4/22kV.
- בחירת שנאי בית 22/0.4kV.
- תכנון מסדרי מתח גבוה אזוריים ומסדר מתח גבוה ראשי.
- תכנון מערך ההגנות במתח נמוך ובמתח גבוה.
- תכנון מערכת הכבילה והולכת האנרגיה.
- תכנון מערכת הארקות והגנה מפני חשמול.
- תכנון מערכת ההגנה מפני ברקים ומתחי יתר.

## 7.3 שרטוטים הנדסיים

במסגרת הפרויקט הוכנו שרטוטים הנדסיים הכוללים:

- שרטוט חד-קווי של המתקן.
- שרטוטי מסדרי מתח גבוה.
- שרטוטי הארקה.
- שרטוטי הגנות.
- תרשימי חיבור וסכמות חשמליות.
- תרשימי רשת חלוקה טבעתית (Ring Network).

## 7.4 חישובים הנדסיים

בוצעו חישובים עבור:

- הספקי המתקן.
- זרמי עבודה.
- זרמי קצר.
- מפלי מתח.
- בחירת כבלים.
- בחירת מפקים ונתיכים.
- בחירת שנאים.
- חישובי מקדם הספק.
- חישובי הארקה והגנות.

### 7.5 מסמכים טכניים

לצורך התכנון צורפו:

- דפי נתונים (Datasheets) של הציוד הנבחר.
- קטלוגים טכניים של יצרנים.
- תקנים רלוונטיים.
- מפרטים טכניים של רכיבי המערכת.

### 7.6 קבצי הפרויקט

תוצרי הפרויקט כוללים:

- ספר פרויקט מלא.
- שרטוטים הנדסיים.
- טבלאות חישוב.
- קטלוגים ודפי נתונים.
- קבצי מקור של השרטוטים והמסמכים.



## פרק 8 – סיכום ומסקנות

במסגרת פרויקט זה בוצע תכנון הנדסי מלא של תחנת כוח פוטו-וולטאית קרקעית בהספק מותקן של 9.6MW באזור משמר הנגב. העבודה כללה תכנון של כלל מערכות המתקן, החל ממערכי המודולים הסולאריים, דרך מערך המהפכים, השנאים, מסדרי המתח הגבוה והנמוך, מערכות ההגנה, ההארקה והכבילה, ועד לחיבור התחנה לרשת החשמל במתח 22kV.

במהלך הפרויקט נלמדו עקרונות הפעולה של מערכות פוטו-וולטאיות, השפעת הקרינה והטמפרטורה על ביצועי המודולים, תהליכי המרת אנרגיה באמצעות מהפכים, שיטות חיבור לרשת החשמל ודרישות התקינה והבטיחות הנהוגות בישראל. בנוסף, נרכש ידע מעשי בתכנון מערכות חשמל מורכבות, בבחירת ציוד הנדסי ובביצוע חישובים הנדרשים להקמת תחנת כוח סולארית בהספק גבוה.

אחת המסקנות המרכזיות מהפרויקט היא כי תכנון נכון של המערכת, החל מבחירת המודולים והממירים ועד לבחירת השנאים, הכבלים וההגנות, משפיע באופן ישיר על יעילות התחנה, אמינותה ועלויות ההקמה והתפעול שלה לאורך זמן. כמו כן, נמצא כי שילוב של שנאי תלת-ליפופי בהספק 1800kVA עבור זוג מהפכים מהווה פתרון יעיל מבחינה טכנית וכלכלית, תוך ניצול מיטבי של ציוד התחנה.

בתכנון רשת המתח הגבוה נבחרה תצורת Ring Network המחברת בין התחנות האזוריות לבין המסדר הראשי במתח 22kV. תצורה זו משפרת את אמינות המערכת ומאפשרת המשך הזנה גם במקרה של תקלה באחד ממקטעי הרשת, באמצעות ניתוק התקלה והזנה מהכיוון הנגדי.

בתחום ההגנות והבטיחות הודגשה חשיבות שילובם של ממסרי הגנה, שנאי זרם, שנאי מתח, מגיני מתח יתר, מערכות הארקה ומשגוחי בידוד, במטרה להבטיח הגנה על הציוד, שמירה על רציפות האספקה ובטיחות העובדים והציבור בהתאם לדרישות התקנים וחברת החשמל.

הפרויקט הדגיש גם את קצב ההתפתחות המהיר של תחום האנרגיה הסולארית. יצרנים מובילים כגון ABB, Siemens ו-SMA מציעים פתרונות מתקדמים המשלבים יעילות גבוהה, יכולות בקרה מתקדמות ושיפור מתמיד באמינות הציוד. התפתחויות אלו תורמות להוזלת עלויות הייצור ולהגדלת כדאיות ההשקעה במתקנים פוטו-וולטאיים.

לסיכום, הפרויקט העניק הבנה רחבה של תהליך תכנון תחנת כוח פוטו-וולטאית משלב הרעיון ועד לשלב התכנון ההנדסי המפורט. העבודה שילבה ידע תאורטי ומעשי מתחומי החשמל, האנרגיה וההגנות, והמחישה את האתגרים והפתרונות הכרוכים בהקמת מתקני ייצור חשמל מאנרגיה מתחדשת.

המלצה להמשך פיתוח המתקן היא שילוב מערכת אגירת אנרגיה (BESS), אשר תאפשר אגירת אנרגיה בשעות הייצור וניצולה בשעות הערב או בתקופות של ירידה בקרינה הסולארית. שילוב מערכת כזו צפוי לשפר את יציבות ההספק, להגדיל את גמישות התפעול של התחנה ולתרום להשתלבות טובה יותר של אנרגיה מתחדשת ברשת החשמל.

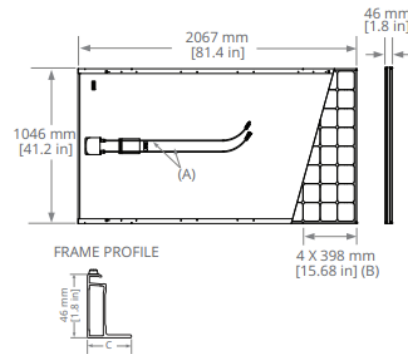
**נספח A - מודולים סולאריים**

**X-Series: X21-470-COM SunPower® Commercial DC Panel**

Electrical Data		
	SPR-X21-470-COM	SPR-X21-460-COM
Nominal Power (P <sub>nom</sub> ) <sup>7</sup>	470 W	460 W
Power Tolerance	+5/0%	+5/0%
Panel Efficiency	21.7%	21.3%
Rated Voltage (V <sub>mpp</sub> )	77.6 V	77.3 V
Rated Current (I <sub>mpp</sub> )	6.06 A	5.95 A
Open-Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )	91.5 V	90.5 V
Short-Circuit Current (I <sub>sc</sub> )	6.45 A	6.39 A
Max. System Voltage	1000 V UL & 1000 V IEC	
Maximum Series Fuse	15 A	
Power Temp Coef.	-0.29% / °C	
Voltage Temp Coef.	-223.2 mV / °C	
Current Temp Coef.	2.9 mA / °C	

Operating Condition And Mechanical Data	
Temperature	-40° F to +185° F (-40° C to +85° C)
Impact Resistance	1 inch (25 mm) diameter hail at 52 mph (23 m/s)
Appearance	Class A
Solar Cells	128 Monocrystalline Maxeon Gen III
Tempered Glass	High-transmission tempered anti-reflective
Junction Box	IP-65, 1230 mm cables / MC4 Compatible
Weight	56 lbs (25.4 kg)
Max. Load	Wind: 50 psf, 2400 Pa, 244 kg/m <sup>2</sup> front & back Snow: 112 psf, 5400 Pa, 550 kg/m <sup>2</sup> front
Frame	Class 2 silver anodized; stacking pins

Tests And Certifications	
Standard Tests <sup>8</sup>	UL1703 (Type 2 Fire Rating), IEC 61215, IEC 61730
Quality Management Certs	ISO 9001:2015, ISO 14001:2015
EHS Compliance	RoHS, OHSAS 18001:2007, lead free, Recycle Scheme, REACH SVHC-163
Sustainability	Cradle to Cradle Certified™ Silver. "Declare." listed.
Ammonia Test	IEC 62716
Desert Test	10.1109/PVSC.2013.6744437
Salt Spray Test	IEC 61701 (maximum severity)
PID Test	1000 V; IEC 62804, PVEL 600 hr duration
Available Listings	UL, TÜV, MCS, FSEC, CEC



(A) Cable Length: 1230 mm +/-10 mm  
(B) Stacking Pins  
(C) Long Side: 32 mm [1.3 in]  
Short Side: 22 mm [0.9 in]

**איור A.1 - מפרט חשמלי ונתונים מכניים ומידות של מודול SunPower SPR-X21-470-COM**

**נספח B - שנאים**

סוג: שנאי תלת-ליפופי ממולא שמן
הספק נומינלי: 1800 kVA
מתחים נומינליים: 22 / 0.34 / 0.34 kV
קבוצת וקטורים: Dyn11y11
קירור: ONAN



**איור B.1 - מפרט שנאי תלת-ליפופי.**

| שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |

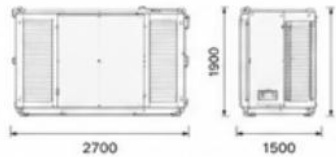


TRANSFORMER DATA	
Rated Power	1800 kVA
AC Voltage (HV/LV)	22 kV / 0.34 kV
Frequency	50 Hz
Transformer Type	Three Winding
Vector Group	Dyn11y11
Cooling	ONAN
Protection Class	IP54
Standard	IEC 60076

LOSSES (at 75 °C)	
No-load Losses	1.95 kW
Load Losses	15.6 kW
Total Losses	17.55 kW

DIMENSIONS (mm)	
Length	2700
Width	1500
Height	1900

WEIGHT	
Total Weight	3700 kg
Oil Weight	960 kg



EFFICIENCY (at 100% load)	
98.85 %	

### איור B.2 - נתוני שנאי SMA Sunny Central 1800SC

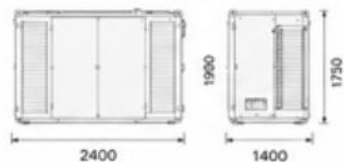


TRANSFORMER DATA	
Rated Power	800 kVA
AC Voltage (HV/LV)	22 kV / 0.34 kV
Frequency	50 Hz
Transformer Type	Three Winding
Vector Group	Dyn11y11
Cooling	ONAN
Protection Class	IP54
Standard	IEC 60076

LOSSES (at 75 °C)	
No-load Losses	0.95 kW
Load Losses	8.7 kW
Total Losses	9.65 kW

DIMENSIONS (mm)	
Length	2400
Width	1400
Height	1750

WEIGHT	
Total Weight	2300 kg
Oil Weight	600 kg



EFFICIENCY (at 100% load)	
98.90 %	

### איור B.3 - נתוני שנאי SMA Sunny Central 800SC

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
 | פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

SUNNY CENTRAL  
800CP XT / 850CP XT / 900CP XT



**Profitable**

- Up to 1 megawatt system power as standard
- Significantly reduced specific price thanks to increased power
- Maximum yields with low system costs

**Durable**

- Full nominal power in continuous operation at ambient temperatures up to 50 °C
- Optimized for extreme climatic conditions between -40 °C and 62 °C
- Active temperature management with OptiCool™

**Flexible**

- Wide DC input voltage range for flexible use of various module configurations
- Perfectly adjusted for the temperature-dependent behavior of PV arrays

**Versatile**

- All grid management functions are included, prepared for "Q at Night" including pure reactive power operation
- Customized computer platform for optimal monitoring and control of inverters

איור C.1 - מהפך SMA Sunny Central 900CP

שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה | פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו

Technical Data	Sunny Central 900CP XT
<b>Input (DC)</b>	
Max. DC power (at $\cos \phi = 1$ )	1010 kW
Max. input voltage	1000 V
$V_{mp\_max}$ at $I_{mp} < I_{oc\_max}$	596 V
MPP voltage range (at 25°C / at 50°C at 50 Hz) <sup>[1,2]</sup>	722 V to 850 V <sup>[1]</sup> / 656 V to 850 V <sup>[2]</sup>
MPP voltage range (at 25°C / at 50°C at 60 Hz) <sup>[1,2]</sup>	722 V to 850 V <sup>[1]</sup> / 656 V to 850 V <sup>[2]</sup>
Rated input voltage	722 V
Max. input current	1400 A
Max. DC short-circuit current	2500 A
Number of independent MPP inputs	1
Number of DC inputs	9
<b>Output (AC)</b>	
Rated power (at 25°C) / nominal AC power (at 50°C)	990 kVA / 900 kVA
Nominal AC voltage / nominal AC voltage range	405 V / 365 V to 465 V
AC power frequency / range	50 Hz, 60 Hz / 47 Hz to 63 Hz
Rated power frequency / rated grid voltage	50 Hz / 405 V
Max. output current / max. total harmonic distortion	1411 A / 0.03
Power factor at rated power / displacement power factor adjustable	1 / 0.9 leading to 0.9 lagging
Feed-in phases / connection phases	3 / 3
<b>Efficiency<sup>6</sup></b>	
Max. efficiency / European efficiency / CEC efficiency	98.6% / 98.4% / 98.5%
<b>Protective devices</b>	
Input-side disconnection device	Motor-driven load break switch
Output-side disconnection device	AC circuit breaker
DC overvoltage protection	Type I surge arrester
Lightning protection (according to IEC 62305-1)	Lightning Protection Level III
Stand-alone grid detection active / passive	● / -
Grid monitoring	●
Ground fault monitoring / remote-controlled ground fault monitoring	○ / ○
Insulation monitoring	○
Surge arrester for auxiliary power supply	●
Protection class (according to IEC 62109-1) / overvoltage category (according to IEC 60664-1)	I / III
<b>General data</b>	
Dimensions (W / H / D)	2562 / 2272 / 956 mm (101 / 89 / 38 inches)
Weight in kg	1900 kg / 4200 lb
Operating temperature range	-25°C to 62°C / -13°F to 144°F
Extended operating temperature range	○ [-40°C to 62°C / -40°F to 144°F]
Noise emission <sup>8</sup>	64 dB(A)
Max. self-consumption (operation) <sup>10</sup> / self-consumption (night)	1950 W / < 100 W
External auxiliary supply voltage	230 V / 400 V (3 / N / PE)
Cooling concept	OptiCool
Degree of protection: electronics / connection area (according to IEC 60529) / according to IEC 60721-3-4	IP54 / IP43 / 4C2, 4S2
Application in unprotected outdoor environments / indoor	● / ○
Maximum permissible value for relative humidity (non-condensing)	15% to 95%
Maximum operating altitude above MSL 2000 m / 4000 m	● / ○
Fresh air consumption (inverter)	3000 m <sup>3</sup> /h
<b>Features</b>	
DC connection / AC connection	Ring terminal lug / ring terminal lug
Display	HMI touch display
Communication / protocols	Ethernet, Modbus
DC current monitoring (Zone monitoring / String monitoring)	○ / ○
SC-COM / Plant monitoring	● / ○ (via Sunny Portal)
Color enclosure / door / base / roof	RAL 9016 / 9016 / 7004 / 7004
Guarantee: 5 / 10 / 15 / 20 years	● / ○ / ○ / ○
Configurable grid management functions	Power reduction, reactive power setpoint, dynamic grid support (e.g. IVRT)
Certificates and approvals (more available on request)	EN 61000-6-2, EN 61000-6-4, EMV-Konformität, CE-Konformität, BDEW-MSRL / FGW / TR8, Arrêté du 23/04/08, R.D. 1663 / 2000, R.D. 661 / 2007, P.O. 12.3 / IEEE 1547 <sup>7)</sup>
● Standard features ○ Optional features - Not available	SC 900CP.10
Type designation	

## איור C.2 - נתוני מהפך SMA Sunny Central 900CP

| שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
 פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

## נספח D - סוללת קבלים

### Capacitor Products and Applications

EX-7L/EX-7LI Capacitor

Application: Series compensation, Shunt compensation, harmonic filters



- Unit capacity 30kvar-1200kvar, rated voltage 1000V-2400V, 50/60Hz, internally fused or externally fused
- Low dielectric Losses, internally fused 0.15W/kvar, fuesless 0.08W/kvar
- Definite tank-rupture curve provides superior safety characteristic
- The best capacitor dielectric fluid Edisol®VN-patented by Cooper, Non-PCB, environmentally acceptable.
- Stable capacitance, extremely little change with temperature variation
- EX® mechanical connection system-patented by Cooper, fault current  $\geq 10kA$
- Special tube and string that patented by Cooper for explosion fuse and current limiting fuse
- CLEANBREAK® element fusing system for internally fused unit

סוללת קבלים במתח 22kV להספק ריאקטיבי של 1.2MVAR.  
המיועדת לשיפור מקדם ההספק במתקן.

### נתונים טכניים

ערך	פרמטר
עד 24 kV	מתח נקוב
50 Hz	תדר נקוב
1200 kVAR	הספק ריאקטיבי
180 A	זרם נקוב
65 kV	מתח עמידה בתדר תעשייתי (1 דקה)
עד 200 kV	מתח עמידה בפני דחף ברק (BIL)
-50°C / +55°C	סיווג אקלים
עד 1000 מטר מעל פני הים	גובה התקנה מקסימלי
AN (טבעי באוויר)	שיטת קירור
שמן מינרלי מתכלה (Edisol®)	סוג דיאלקטרי
חוץ	סוג התקנה
IEC, IEEE	תקנים
פיזוד פנימי מסוג CLEANBREAK®	מערכת הגנה פנימית
IP65	רמת הגנה

סוללת קבלים נבחרה בהספק ריאקטיבי כולל של 1.2MVAR.  
לחיבור במתח 22kV, לשיפור מקדם ההספק במתקן.

## איור D.1 - מפרט סוללת קבלים 1.2MVAR ונתונים חשמליים וזרמי עבודה

## נספח E - נתיכי DC למערכת

### ABB E 9F PV Cylindrical Fuses

For Photovoltaic Applications



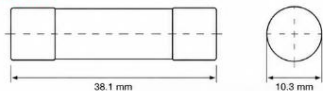
#### Description

E 9F PV cylindrical fuses are designed to protect photovoltaic (PV) systems from overcurrent conditions. With a high DC voltage rating up to 1000V and a wide current range from 1A to 30A, they are ideal for protection of PV strings, inverters and DC circuits.

#### Applications

- Photovoltaic string protection
- Inverters
- DC combiner boxes
- DC circuits up to 1000V DC

#### Dimensions



#### Technical Specifications

Rated Voltage (U <sub>L</sub> )	: 1000 V DC
Rated Current (I <sub>N</sub> )	: 1 ... 30 A
Breaking Capacity (I <sub>b</sub> )	: 50 kA
Utilization Category	: gPV
Operating Class	: gPV
Standard	: IEC 60269-6
Construction	: Cylindrical fuse link
Body Material	: Ceramic
End Caps Material	: Copper / Nickel plated
Weight	: 7 g
RoHS Compliant	: Yes

#### Catalog Numbers

Rated Current (A)	Type	ABB Code	Weight (g)	Packaging (pcs)
1	E 9F 1 PV	2CSM213455R1801	0.007	10
2	E 9F 2 PV	2CSM213465R1801	0.007	10
3	E 9F 3 PV	2CSM213475R1801	0.007	10
4	E 9F 4 PV	2CSM213485R1801	0.007	10
5	E 9F 5 PV	2CSM213495R1801	0.007	10
6	E 9F 6 PV	2CSM213505R1801	0.007	10
7	E 9F 7 PV	2CSM213515R1801	0.007	10
8	E 9F 8 PV	2CSM213525R1801	0.007	10
10	E 9F 10 PV	2CSM213535R1801	0.007	10
12	E 9F 12 PV	2CSM213545R1801	0.007	10
15	E 9F 15 PV	2CSM213555R1801	0.007	10
20	E 9F 20 PV	2CSM213565R1801	0.007	10
25	E 9F 25 PV	2CSM213575R1801	0.007	10
30	E 9F 30 PV	2CSM213585R1801	0.007	10

#### Time-Current Characteristic

gPV characteristic according to IEC 60269-6  
Typical pre-arcing time: 1 ms  
Total clearing time (at 10 x I<sub>N</sub>): < 10 ms

## איור E.1 - נתיך ונתונים טכניים של נתיך ABB E9F PV

| שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | | התשפ"ו |

## נספח F - מסדר מתח גבוה משני 8DJH Siemens

### SIEMENS

#### 8DJH – Compact Insulated Switchgear

##### General

8DJH type switchgear is a compact, gas-insulated metal-enclosed switchgear for secondary distribution up to 24 kV.  
It is used for receiving and distributing electrical energy in ring main and radial systems.



8DJH Compact, RRT block

Electrical data (maximum values)					
	kV	7.2	12	17.5	24
Rated voltage	kV	7.2	12	17.5	24
Rated frequency	Hz	50/60	50/60	50/60	50/60
Rated short-duration power-frequency withstand voltage	kV	20	28	38	50
Rated lightning impulse withstand voltage	kV	60	75	95	125
Rated peak withstand current	kA	63/65	63/65	63/65	50/55
Rated short-time withstand current 3 s	kA	20/21	20/21	20/21	20/21
Rated short-time withstand current 1 s	kA	25	25	25	20/21
Rated continuous current of the busbar	A	630	630	630	630
Rated continuous current of feeders	A	200/250/400	630		
Width (feeders)	mm	310/430/500			
Depth	mm				
– without pressure relief duct	mm	775	775	775	775
– with pressure relief duct	mm	890	890	890	890
Height without low-voltage compartment and pressure relief duct	mm	optionally 1040/1200/1400/1700			

Standards		
Switchgear		IEC 62271-1 IEC 62271-200
Switching devices	Circuit-breakers	IEC 62271-100
	Disconnectors and earthing switches	IEC 62271-102
	Switch-disconnectors	IEC 62271-103
	Switch-fuse combination	IEC 62271-105
Voltage detecting systems		IEC 62271-213
HV HRC fuses		IEC 60282
Surge arresters/surge limiters		IEC 60099
Degree of protection		IEC 60529
		IEC 62262
Insulation		IEC 60071
		IEC 61869-2
Instrument transformers	Current transformers	IEC 61869-3
	Voltage transformers	IEC 61869-6
	Low-power current transformers	IEC 61869-11
	Low-power voltage transformers	IEC 61869-11
SF <sub>6</sub>		IEC 60376
Installation		IEC 61936-1 / EN 50522
Environmental conditions		IEC 60721-3-3
Operation		EN 50110

Electrical data of the switchgear					
	kV	7.2	12	17.5	24
Rated voltage U <sub>i</sub>	kV	7.2	12	17.5	24
Rated insulation level					
– Power-frequency withstand voltage (phase-to-phase/phase-to-earth)	kV	20	28/42	38	50
– Lightning impulse withstand voltage (phase-to-phase/phase-to-earth)	kV	60	75	95	125
Rated frequency f <sub>r</sub>	Hz	50/60	50/60	50/60	50/60
Rated continuous current I <sub>c</sub>	A	630	630	630	630
Rated short-time withstand current I <sub>sc</sub> (3 s)	kA	20/21	20/21	20/21	20/21
Rated short-time withstand current I <sub>sc</sub> (1 s)	kA	25	25	25	20/21
Rated peak withstand current I <sub>p</sub>	kA	63	63	63	50/55
Degree of protection		IP65			
– Switchgear enclosure		IP3X / IP4X			
– Low-voltage compartment					
Internal arc classification (option)		IAC AFL/FLR			

Three-position switch-disconnector					
	kV	7.2	12	17.5	24
Rated voltage U <sub>i</sub>	kV	7.2	12	17.5	24
Rated continuous current I <sub>c</sub>	A	630	630	630	630
Rated short-circuit making current I <sub>sm</sub>	– 50 Hz	63	63	63	50/52.5
	– 60 Hz	65	65	65	52/55
Number of operating cycles, electrical		100			
Number of short-circuit making operations		5			
Mechanical endurance		M1			
Number of mechanical operating cycles		1000			

איור F.1 - מסדר מתח גבוה 8DJH Siemens בתצורת RRT ונתונים חשמליים ומידות המסדר

## נספח G - מנתק עומס לוח מאסף משני



איור G.1 - מנתקי עומס DC מסדרת ABB OTDC

ישם הסטודנטים על אלא גרה ו- עובידיה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה | פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |

Main technical specifications <sup>1)</sup>		OTDC100...250		OTDC250...800	
		OTDC100...250E	OTDC100...200U	OTDC315...800E	OTDC250...600U
Wiring configuration	Two-wire breaking	E types	U types	E types	U types
	Single-wire breaking		US types		US types
Reference Standard		IEC 60947-3		IEC 60947-3	
Nominal Current In (Amps)		100, 160, 200, 250	160, 200, 250	315, 400, 500, 630, 800	250, 320, 400, 600
Rated Insulation Voltage (Ui)	V	1000		1500	
Pollution degree 3					
Rated Impulse Voltage (Uimp)	kV	12		12	
Number of Poles		2...6		2...6	
Rated Thermal Current Ith (A)	in open air	100...250		315...800	
	in enclosure 40°C	100...250		315...800	
	in enclosure 60°C	100...200		315...680	
Utilization Category		DC-21B		DC-21B	
Rated Operational Current Ie (A) at 1000 V DC	1 circuit	100...250		315...800	
	2 circuits	100...250		315...500	
	3 circuits	-		315...500	
Rated Operational Current Ie of combined output (A) at 1000 V DC	2 input circuits,	-		315...500, 630...1000	
	1 output	-			
	3 input circuits,	-		315...500, 945...1500	
1 output	-				
Reference Standard		UL 98B		UL 98B	
Number of Poles		2...4		2...4	
Rated Current (A) at 1000 V DC	1 circuit	100...200		250...800	
	2 circuits	100...180		250...400	
Rated Current (A) at 1000 V DC	2 input circuits,	-		250...400, 500...800	
	1 output	-			
Ambient temperature	°C	-20...+50		-20...+50	
Short Circuit Rating	kA per input, 1000V	5		10	
	Protection Type	Circuit breaker		Circuit breaker	
Wire Size Range	MCM	#4-300		#2-600	

## איור G.2 - נתונים טכניים של מנתק ABB OTDC

## נספח H - מסדר מתח גבוה משני

### לוח מאסף ראשי DC



לוח מאסף ראשי C - Combiner Box  
ליאסף זרמי המחזורות הסולאריות והעברתם אל המפרק המרכזי

נתונים טכניים	
מבנה	התקנה
חיצונית / פנימית	עמידות לקרינת UV
כן	חומר
פוליאסטר מחוק מיברגלס	צבע
RAL 7035	מידות נמשקל
מידות (רוחב/גובה/עומק)	1440/1120/320 mm
משקל	100 kg
פורמטר כניסה	מתח DC מרבי (U DCmax)
עד 1100 V	מספר כניסות DC
16 עד	חיבור DC
כבל עם אום M10	גודל תוך
63A-250A	זרם כניסה DC
עד 140A	פורמטר יציאה
סוג הדק	מספר יציאות DC
M10/M12 כבל עם אום	זרם יציאה
2	חיבור האנודקה
עד יציאה (קרומון קצר עד 2x1000A)	תקנים
16mm <sup>2</sup> -120mm <sup>2</sup>	CE
Conform	דרגת בטיחות ותנאי סביבה
IP 44	דרגת איטומות לפי EN60529
-25°C עד +50°C	טמפרטורות סביבה מותרות
עד 90% 15%	לחות יחסית (ללא עיבוי)
עד 2,000 m	גובה מעל פני ים
Type 2	מאפיינים נוספים
	הגנה מפני נחשולי מתח
אופציות	
על הקיר / על רצפה (SKID)	התקנה
IP 54	דרגת איטומות לפי EN60529

## איור H.1 - לוח מאסף ראשי DC ונתונים טכניים של לוח המאסף הראשי

שם הסטודנטים עלאא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה | פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |

## נספח I - מפסק ראשי ABB Tmax XT7S 1600A

**איור 1.1 - ABB Tmax XT7S 1600A**



**איור 1.3 - פרטי ההגנה (יחידת שחרור Ekip M Dip I)**

סוג יחידת ההגנה	מדידת זרם ומתח
Ekip M Dip I	I, U, f, P, E
<b>הגנות</b>	
L הגנת עומס יתר (Long time)	0.4 – 1 x I <sub>n</sub>
S הגנת קצר זמן (Short time)	1.5 – 10 x I <sub>n</sub>
I הגנת קצר מיידי (Instantaneous)	2 – 15 x I <sub>n</sub>
G הגנת אדמה (Ground fault)	0.2 – 1 x I <sub>n</sub>
תקשורת	Modbus, Profibus, DeviceNet, IEC61850

**איור 1.2 - נתונים טכניים של מפסק ABB Tmax XT7S 1600A**

נתונים כלליים			
מתח נקוב	Ue (V)	690	
מתח ביודו נקוב	Ui (V)	800-1000	
יכולת עמידה בפולסים מתח	Uimp (kV)	8	
תדר	(Hz)	50-60	
קטבים		3-4	
ביודו		IEC 60947-2	

T7				Lu	Iu פרם קצר
8001000012501600					Iku יכולת חמרה של החסקה זרם קצר
V	L	H	S	(kA)	(AC)50-60Hz 380/415 V
150	120	70	50	(kA)	(AC)50-60Hz 690 V
60	50	42	30	(kA)	(DC) 250 V - 2 poles in series
				(kA)	(DC) 500 V - 2 poles in series
				(kA)	(DC) 750 V - 3 poles in series
100%	100%	100%	100%	Icu (%)	Icu 415V יכולות נתוספה החמרה של זרם קצר
330	264	154	105	(kA)	Icm 415V איא קצר נקב בורטר
8	8	10	15	(ms)	זמן פתיחה
				(kA)	יכולת עמידה בכפ וקצר I <sub>cs</sub> 1s (ערך) אפקטיבי
F - W					גריסה
F-EF-ES-FC CuAl-HR/VR				P פלנצאק	מתגרים
F-HR/VR-RS				F משקל	
210/280				(mm)W 3/4	מידות
154(manual)/178(motorizable)				(mm)D	
268				(mm)H	

### איור 1.1 - נתונים טכניים של מפסק ABB Tmax XT7S

## נספח J - כבלים

Find this product online at [www.eland.co.uk](http://www.eland.co.uk) | Electrical Cable | Rubber Flexible Cable

**Photovoltaic Solar Cable PV1-F**

Eland Product Group AES

**Application**  
TUV approved Solar cable, intended for the interconnection of the various elements of photovoltaic systems such as solar panel arrays. Suitable for fixed installations internal and external, within unprotected pipes, or in similar closed systems. The cable is ozone-resistant according to EN50396, UV-resistant according to UNE-HD 605-2008 (HD605/A1), and is tested for durability according to EN 60216. The cable is tested to last 25 years.

These cables are especially designed for use in photovoltaic applications. They provide the optimal cable connection between the solar cells and from the solar cells to the inverter or DC main cable. These cables are suitable for outdoor ground and roof mounted systems – though not suitable for direct laying under the earth. They are also suitable laying indoors and in feed pipe installation. Thanks to its halogen free, flame retardant and low smoke properties, these cables are also safe to care the health of inhabitants in case of fire.

**Standards**  
TUV Approval Nr. TÜV 2 PIG 1169/08.2007 Cold Resistant according to IEC/EN 60811-1-4  
(Sizes 2.5mm-35mm only) Low Smoke according to IEC/EN 61034  
Ozone Resistant according to EN 50396 Acid and Alkaline Resistant according to IEC/EN 60811-2-1  
Flame Retardant according to IEC/EN 60332-1-2 Low Consistency of gases according to EN 50267-2-2  
UV Resistant according to HD 605/A1 Weather Resistant according to HD 605/A1  
Halogen Free according to EN 50267-2-1, EN 60884-2 Low toxicity of gases according to EN 50267-2-1

**Technical Data**

<p><b>Conductor</b> Class 5 flexible tinned copper according to DIN VDE 0295, IEC/EN 60228</p> <p><b>Insulation</b> Halogen free cross-linked compound</p> <p><b>Sheath</b> Halogen free cross-linked compound</p> <p><b>Sheath Colour</b> Black, Red, Blue, Brown and Grey available on request.</p> <p><b>Voltage Rating</b> AC: 600/1000V DC: 900/1800V</p> <p><b>Temperature Rating</b> -40°C to +90°C</p>	<p><b>Minimum Bending Radius</b> Fixed: 4 x Overall Diameter Flexing: 5 x Overall Diameter</p> <p><b>Rated voltage U<sub>0</sub>/U<sub>i</sub></b> 0.6/1 kV AC - 0.9/1.8 kV DC</p> <p><b>Max. Voltage U<sub>max</sub></b> 1.8 kV DC (conductor/conductor, non earthed system, circuit not under load)</p> <p><b>Max. temperature at conductor</b> +120 °C (for 20000 h)</p> <p><b>Test voltage</b> 6.5 kV AC according to EN 50395</p>
--	--

**Dimensions**

Eland Part Number	No of Cores x Nominal Cross Sectional Area # x mm <sup>2</sup>	Nominal Overall Diameter mm	Nominal Weight kg/km
A6S10025	1 x 2.5	4.50	8.2100
A6S10040	1 x 4.0	5.20	5.0900
A6S10060	1 x 6.0	5.90	3.3900
A6S10100	1 x 10.0	6.90	1.9500
A6S10160	1 x 16.0	8.30	1.2400
A6S10250	1 x 25.0	9.70	0.7950
A6S10350	1 x 35.0	11.00	0.5650
A6S10500	1 x 50.0	13.20	0.3630
A6S10700	1 x 70.0	15.40	0.2770
A6S10900	1 x 95.0	17.40	0.2100
A6S11200	1 x 120.0	20.10	0.1640
A6S11500	1 x 150.0	22.50	0.1320
A6S11850	1 x 185.0	26.00	0.1080
A6S12400	1 x 240.0	26.80	0.0817

**Electrical Characteristics**

Nominal Cross Sectional Area mm <sup>2</sup>	Current Carrying Capacity in Air Amperes
2.5	41
4.0	55
6.0	70
10.0	98
16.0	132
25.0	176
35.0	218
50.0	276
70.0	347
95.0	416
120.0	488
150.0	566
185.0	644
240.0	775

Maximum conductor temperature: +120°C  
Maximum short circuit temperature: +200°C

**Conversion Factors**

Ambient Temperature °C	Conversion Factor
Up to 60	1.00
70	0.91
80	0.82
90	0.72
100	0.58
110	0.41

### איור J.1 - נתונים טכניים של כבל PV1-F

| שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה |  
פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |

**ELAND CABLES**

**N2XSXY XLPE PVC - 12/20 (24)kV Cable**

Click here for more information: [https://www.eland.com/Products/120KV\\_XLPE\\_PVC\\_12/20/24KV\\_Cable](https://www.eland.com/Products/120KV_XLPE_PVC_12/20/24KV_Cable)

ELAND Product Group: **A8X**

**APPLICATION**  
Medium voltage cables for distribution networks; also for connection to generator units and plant and process connection. To be laid directly in ground, outdoors, indoors and in cable ducts.

**CHARACTERISTICS**  
**Voltage Rating** Uo/U (Um)  
12/20 (24)kV  
**Temperature Rating**  
Maximum conductor operating temperature: 90°C  
Initial temperature at S.C.C for metallic screen: 80°C  
Maximum conductor temperature during S.C.C: 250°C  
**Minimum Bending Radius**  
15 x overall diameter

**STANDARDS**  
IEC 60502-2; IEC/EN 60228  
Flame Retardant according to IEC/EN 60332-1-2  
UV Resistant

**THE CABLE LAB®**  
AN ISO/IEC 17025 AND IECCE CBTL ACCREDITED FACILITY  
Our world-class testing facility assures the quality and compliance of this cable through a continuous and rigorous testing regime.

**SUSTAINABILITY COMMITMENT**  
We are on a journey to the Green.  
We are committed to near-zero emissions reductions and a net-zero target by the Science Based Targets initiative and we're a signatory to the United Nations Global Compact Sustainable Development Goals.  
Learn more about embedded carbon and our carbon emissions reduction action plan, our comprehensive recycling services, and other ESG activities for sustainable operations at: [www.eland.com/company/about-us/emp-sustainability](https://www.eland.com/company/about-us/emp-sustainability)

**REGULATORY COMPLIANCE**  
This cable meets the requirements of the Ruffe Directive 2015/86/EU and RoHS Directive EC 1907/2006. RoHS compliance has been tested and certified by the TUV SUD.

**CONSTRUCTION**  
**Conductor**  
Class 2 Stranded copper conductor  
**Conductor Screen**  
Semi-conductive material (Bonded Type)  
**Insulation**  
XLPE (Cross-Linked Polyethylene)  
**Insulation Screen**  
Semi-conductive material (Stripplable Type)  
**Screen**  
Copper wires with Open Helix Copper Tape Screen  
**Sheath**  
PVC (Polyvinyl Chloride)  
**Sheath Colour**  
● Red ● Black

## DIMENSIONS

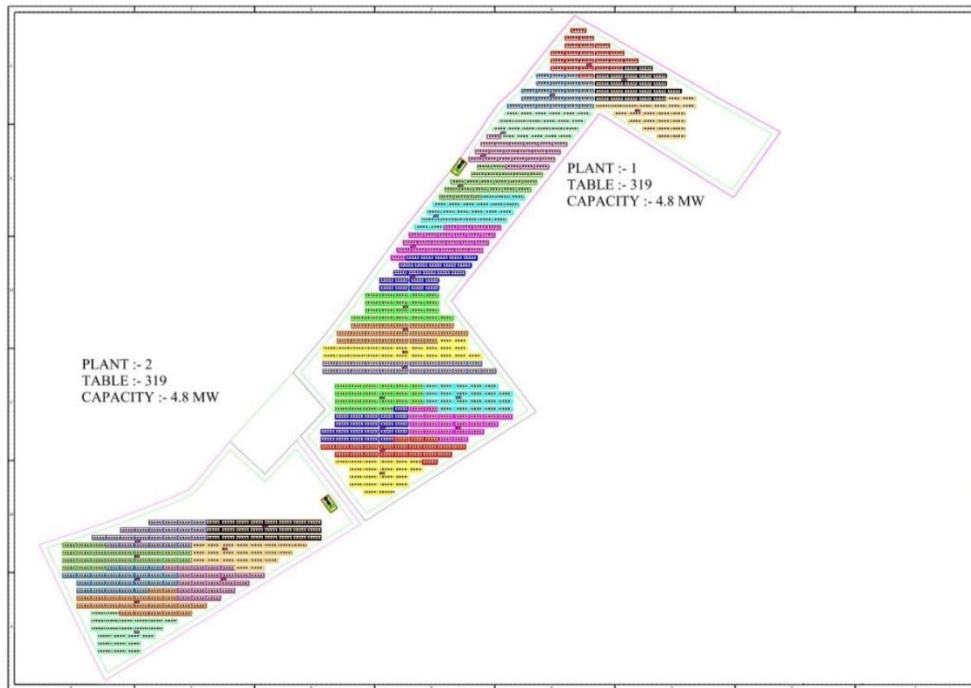
ELAND PART NO.	NO. OF CORES	NOMINAL CROSS SECTIONAL AREA mm <sup>2</sup>	NOMINAL SCREEN CROSS SECTIONAL AREA mm <sup>2</sup>	NOMINAL INSULATION THICKNESS mm	NOMINAL SHEATH THICKNESS mm	NOMINAL OVERALL DIAMETER mm	NOMINAL WEIGHT kg/km
ASX20KV1050	1	50	16	5.5	1.8	26	1056
ASX20KV1070	1	70	16	5.5	1.9	28	1301
ASX20KV1095	1	95	16	5.5	1.9	29.3	1567
ASX20KV1120	1	120	16	5.5	2	30.9	1840
ASX20KV1150	1	150	25	5.5	2	32.7	2221
ASX20KV1185	1	185	25	5.5	2.1	34.2	2572
ASX20KV1240	1	240	25	5.5	2.2	36.8	3182
ASX20KV1300	1	300	25	5.5	2.2	39.2	3764
ASX20KV1400	1	400	35	5.5	2.3	42.2	4715
ASX20KV1500	1	500	35	5.5	2.4	45.8	5748
ASX20KV1630	1	630	35	5.5	2.5	50.7	7215
ASX20KV1800	1	800	35	5.5	2.7	55.2	9072

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

NOMINAL CROSS SECTIONAL AREA mm <sup>2</sup>	MAXIMUM CONDUCTOR DC RESISTANCE AT 90°C Ω/Km	MAXIMUM CONDUCTOR DC RESISTANCE AT OPERATING TEMP AND 90°C Ω/Km	CAPACITANCE pF/Km	CHARGING CURRENT A/Km	DIELECTRIC LOSSES W/Km	REACTANCE AT 50 HZ Ω/km	CONDUCTOR S.C.C FOR 1 SEC KA	COPPER SCREEN S.C.C FOR 1 SEC KA	CURRENT RATING A	
									Laid in ground	Laid in free air
50	0.387	0.494	0.184	0.693	33.24	0.133	7.15	32	234	245
70	0.268	0.342	0.209	0.787	37.78	0.126	10.01	32	284	309
95	0.193	0.247	0.227	0.855	41.03	0.121	13.585	32	337	378
120	0.153	0.196	0.246	0.928	44.52	0.117	17.16	32	384	436
150	0.124	0.159	0.268	1.01	48.48	0.112	21.45	50	428	491
185	0.0991	0.128	0.288	1.087	52.18	0.109	26.455	50	483	567
240	0.0754	0.098	0.321	1.21	58.08	0.104	34.32	50	553	669
300	0.0601	0.078	0.353	1.333	63.97	0.101	42.9	50	621	772
400	0.047	0.062	0.388	1.465	70.33	0.097	57.2	7.1	697	883
500	0.0366	0.049	0.434	1.638	78.63	0.094	71.5	7.1	783	1019
630	0.0283	0.039	0.498	1.876	90.08	0.092	90.09	7.1	866	1153
800	0.0221	0.032	0.553	2.084	100.05	0.089	114.4	7.1	945	1299

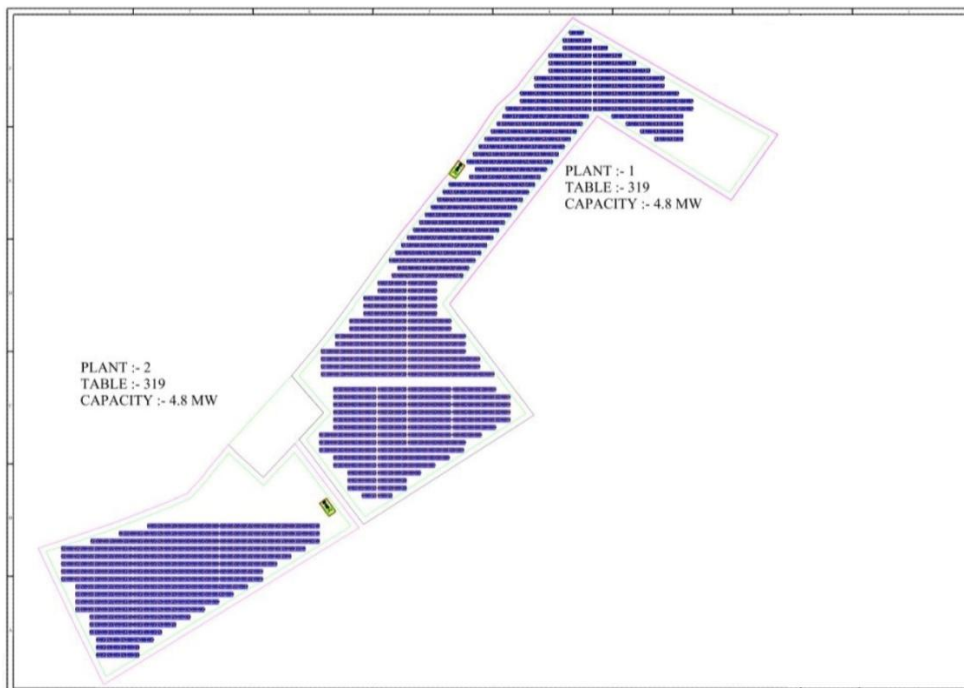
## איור J.2 - נתונים טכניים של כבל מתח גבוה XLPE 12/20(24)kV

## נספח K - תכנית פריסת המודולים הפוטוולטאיים באתר



## איור K.1 - תוכנית פריסת המודולים הסולאריים לפי אזורי ייצור

שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה | פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו |



איור K.2 - Layout כללי של השדה הפוטו-וולטאי באתר משמר הנגב

## רשימת מקורות

[1] חברת החשמל לישראל, אמות מידה לחיבור מתקנים לייצור חשמל מאנרגיה מתחדשת לרשת החלוקה, ירושלים.

[2] IEC 60364, *Electrical Installations for Buildings*, International Electrotechnical Commission.

[3] IEC 60947, *Low-Voltage Switchgear and Controlgear*, International Electrotechnical Commission.

[4] IEC 61439-1/2, *Low Voltage Switchgear and Controlgear Assemblies*, International Electrotechnical Commission.

[5] IEC 62271-200, *High Voltage Switchgear and Controlgear*, International Electrotechnical Commission.

[6] IEC 62109, *Safety of Power Converters for Use in Photovoltaic Power Systems*, International Electrotechnical Commission.

[7] IEC 61730, *Photovoltaic (PV) Module Safety Qualification*, International Electrotechnical Commission.

[8] IEC 61215, *Terrestrial Photovoltaic Modules – Design Qualification and Type Approval*, International Electrotechnical Commission.

[9] SunPower Corporation, *SPR-X21-470-COM Photovoltaic Module Datasheet*, SunPower, USA.

[10] SMA Solar Technology AG, *Sunny Central 900CP XT – Technical Documentation*, Germany.

שם הסטודנטים עלא גרה ו- עובידה אלמלך | המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה | פרויקט גמר הנדסי, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, באר שבע | התשפ"ו

- [11] SMA Solar Technology AG, *Transformer Compact Station 1800SC – Technical Documentation*, Germany.
- [12] ABB Ltd., *Tmax XT7S Molded Case Circuit Breaker – Technical Catalogue*, Switzerland.
- [13] ABB Ltd., *OTDC Load Break Switches – Technical Catalogue*, Switzerland.
- [14] ABB Ltd., *E9F PV Fuse Links – Technical Catalogue*, Switzerland.
- [15] ABB Ltd., *OVR PV Surge Protective Device – Technical Catalogue*, Switzerland.
- [16] ABB Ltd., *CM-IWN-DC Insulation Monitoring Device – Technical Catalogue*, Switzerland.
- [17] Siemens AG, *8DJH Medium Voltage Switchgear – Technical Catalogue*, Germany.
- [18] Siemens AG, *SIPROTEC 7SJ80 Protection Relay – Technical Catalogue*, Germany.
- [19] Siemens AG, *Current Transformers and Voltage Transformers – Technical Documentation*, Germany.
- [20] Raychem, *RSTI-SA-05 Surge Arrester – Technical Documentation*, TE Connectivity.
- [21] Eland Cables, *PV1-F Solar Cable Technical Datasheet*, United Kingdom.
- [22] XLPE Medium Voltage Cable 12/20(24)kV – Manufacturer Technical Datasheet.
- [23] Messenger, Roger & Ventre, Jerry, *Photovoltaic Systems Engineering*, CRC Press.
- [24] Patel, Mukund R., *Wind and Solar Power Systems*, CRC Press.
- [25] Villalva, Marcelo Gradella; Gazoli, Jonas Rafael; Filho, Ernesto Ruppert, *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*, IEEE Transactions on Power Electronics.
- [26] NREL – National Renewable Energy Laboratory, *Photovoltaic Performance and Solar Radiation Resources*.