

# אגירת אנרגיה



## מבוא לאגירת אנרגיה

- במעבר העולמי לאנרגיה מתחדשת, הפכה אגירת אנרגיה לאחד האתגרים המרכזיים בתחום.
- מקורות אנרגיה מתחדשים כמו שמש ורוח מאופיינים בתנודתיות טבעית - השמש אינה זורחת בלילה והרוח אינה נושבת באופן קבוע.
- יכולת אגירה יעילה של אנרגיה חשמלית מהווה את החוליה החסרה שתאפשר מעבר מלא לאנרגיה נקייה ובת-קיימא ולהשתמש באנרגיה זו כאשר האנרגיה נדרשת.

# מהי אגירת אנרגיה?

- בהליך אגירת אנרגיה, מתבצעת המרה של אנרגיה חשמלית לאנרגיה בצורות שונות, המאוחסנת במתקן האגירה. האנרגיה המאוחסנת במתקן האגירה הופכת בחזרה לאנרגיה חשמלית בעת הצורך. מה שמבחין בין מתקני אגירה שונים הוא אופן אגירת האנרגיה שאוחסנה ותכונותיה.
- ניתן למצא מתקני אגירה ברמות שונות:
  - מערכות ביתיות (בקיבול של מספר קילוואט-שעה)
  - מערכות מסחריות ותעשייתיות (עשרות עד מאות קילוואט-שעה)
  - מערכות קהילתיות ומיקרו-גרید (מאות קילוואט-שעה עד מגה-ואט-שעה)
  - מתקני אגירה בקנה מידה רחב (עשרות עד אלפי מגה-ואט-שעה)

## אגירת אנרגיה

### נושאים:

1. טכנולוגיות אגירת אנרגיה שלא באמצעות מצברים.
2. טכנולוגיות אגירת אנרגיה באמצעות מצברים.
3. הגדרת מושגים.
4. ארכיטקטורת מערכות ואגירה על פי גודלן.
5. חיבור מערכות אגירה למערכות סולאריות.
6. חיבור לרשת החשמל.
7. שיקולים בתכנון מערכת משולבת.
8. אתגרים והתמודדות עם בעיות נפוצות.
9. מקרי בוחן והתקנות מעשיות.

# טכנולוגית אגירת אנרגיה

## אגירה שאובה (Pumped Hydro Storage - PHS)

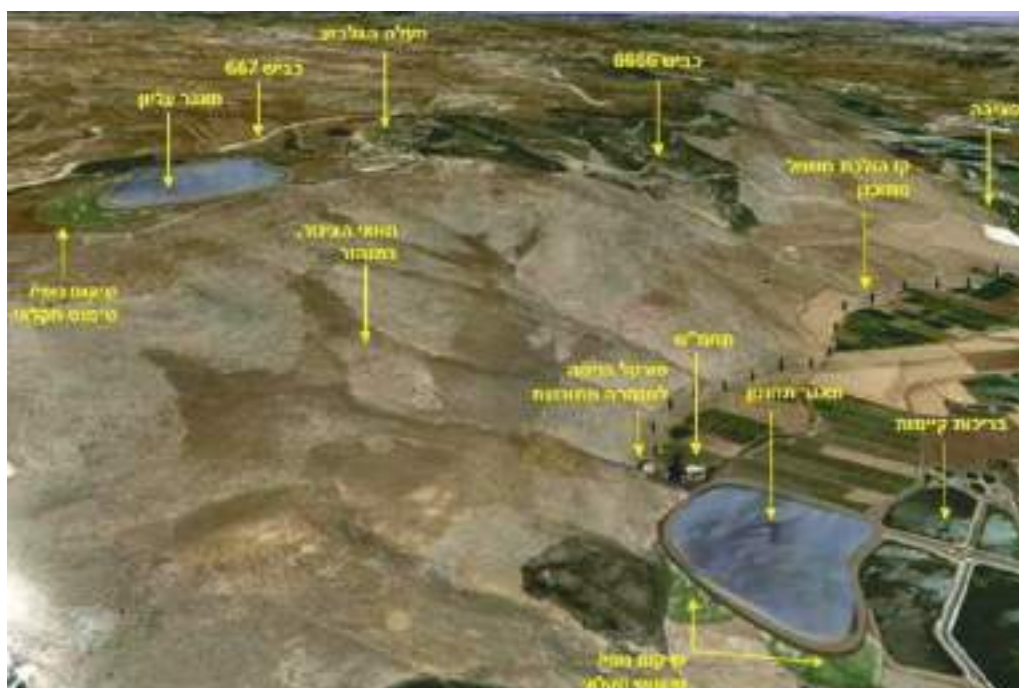
- **עיקרון פעולה:** שימוש בשני מאגרי מים בגבהים שונים. בעת עודף חשמל שואבים מים למאגר העליון, ובעת ביקוש - המים זורמים חזרה ומניעים טורבינה.

| תכונה     | פרטים                                                                                                                                        |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| נצילות    | 70–90%                                                                                                                                       |
| קיבול     | עד מאות GWh                                                                                                                                  |
| זמן פריקה | שעות עד ימים                                                                                                                                 |
| יתרונות   | טכנולוגיה ותיקה, עלות תפעול נמוכה, קיבול עצום, ניצול הפרשי תעריפים, אורך חיים ארוך מאוד (כ- 50 ויותר שנים) נצילות גבוהה, מהירות תגובה גבוהה, |
| חסרונות   | תלוית טופוגרפיה, דורשת מאגרי מים, השקעה התחלתית גבוהה, השפעה סביבתית גדולה, זמן בניה ארוך.                                                   |
| יישומים   | אגירה ארוכת טווח ברשתות לאומיות                                                                                                              |

## פרוייקט אגירה שאובה בגלבוע – נתונים עיקריים

- המתקן מכיל שני מאגרי מים בקיבול של כ-2.7 מיליון מ"ק כל אחד, אחד בראש ההר ושני למרגלותיו.
- סה"כ עבודות מנהור (אופקי ואנכי): כ- 6 קילומטר כולל מנהרות עזר לביצוע הפרש גבהים: 574 מטר.
- פיר אנכי: כ- 490 מ' וארובת בטיחות (surge) לספיגת לחצים של כ- 95 מ'
- גודל אולם הטורבינות 35x14x65 מטר (גובה שווה ערך לבניין דירות של כ- 10 קומות). ואולם שנאים קטן יותר במידות 25x14x50 מטר.
- האולמות ממוקמים במרחק 1200 מטר מפתח הכניסה, וכ- 300 מטר מתחת לפני ההר.
- הספק התחנה- 300 מגאוט המיוצרים ע"י 2 טורבינות בהספק של 150MW כל אחת, הטורבינות משמשות גם כמשאבות להעלאת המים מהמאגר התחתון לעליון.
- זרימת המים - 237,000 קוב מים בשעה.
- זמן יצור מרבי: 10 שעות.

## פרוייקט אגירה שאובה בגלבוע



# אגירה שאובה (Pumped Hydro Storage - PHS)

אתר אגירה שאובה כוכב הירדן 344MW ל- 8 שעות



## מתקני אגירה שאובה הגדולים בעולם

| שם המתקן                 | מיקום                      | הספק (מגוואט) | שעות פעולה בהספק מלא | פרטים נוספים                                                                                                    |
|--------------------------|----------------------------|---------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| תחנת אגירה שאובה פנינג   | מחוז פנינג, חוביי, סין     | 3,600         | 11                   | נפתחה בדצמבר 2024, תומכת במתקן אנרגיה מתחדשת של 10 גיגוואט, עלות 2.6 מיליארד דולר, 12 יחידות משאבה-טורבינה      |
| תחנת אגירה שאובה בת      | מחוז בת', וירג'יניה, ארה"ב | 3,003         | 10                   | נבנתה בין 1977-1985, שודרגה ב- 2004-2009, כוללת שני מאגרים עם הבדל גובה של 380 מטרים, בעלות 1.6 מיליארד דולר    |
| תחנת אגירה שאובה חוייז'ו | חוייז'ו, גואנגדונג, סין    | 2,448         | כ-16                 | פעילה מאז 2011, כוללת 8 יחידות משאבה-טורבינה, ממוקמת 420 מטרים מתחת לאדמה, יחידות ראשונות נכנסו לפעילות ב-2007. |

# מתקן אנגירה שאובה הגדול בארה"ב

ארה"ב: Bath County Pumped Storage Station

- הספק: 3,003 מגה-ואט ל-10 שעות - המתקן הגדול בארה"ב
- מטפל בעומסי שיא באזור החוף המזרחי



סגל אריאל [WWW.arielsegal.co.il](http://WWW.arielsegal.co.il)

מערכות אנגירת אנרגיה

11

## אנגירה באוויר דחוס (CAES - Compressed Air Energy Storage)

### עיקרון פעולה:

- דחיסה: כאשר יש עודף אנרגיה חשמלית (למשל, ממקורות מתחדשים כמו רוח או שמש).
- אחסון: האוויר הדחוס נשמר במיכלים או בחללים גיאולוגיים (כמו מערות מלח או מכרות נטושים) עד לשימוש. במהלך הדחיסה האוויר מתחמם.
- שחרור והפקת אנרגיה: כאשר יש ביקוש לחשמל, האוויר הדחוס משתחרר, מחומם (בדרך כלל באמצעות גז טבעי או חום מאוחסן), ומפעיל טורבינה שמייצרת חשמל.

### שחרור האוויר מלווה באחד מ-2 תהליכים:

- CAES תהליך דיאבטי (שימוש בדלק כדוגמת גז לחימום האוויר הדחוס להשלמת אנרגיה תרמית שאבדה). חסרונות: שימוש בדלק, נצילות נמוכה (כ- 40-50%).
- A-CAES (Adiabatic) החום שנוצר במהלך הדחיסה מאוחסן באמצעות חימום חומרים כמו מלח מותך או שמן תרמי ונעשה בו שימוש חוזר לחימום האוויר בעת השחרור.

סגל אריאל [WWW.arielsegal.co.il](http://WWW.arielsegal.co.il)

מערכות אנגירת אנרגיה

12

# אגירה באוויר דחוס (CAES - Compressed Air Energy Storage)

| תכונה     | פרטים                                                     |
|-----------|-----------------------------------------------------------|
| נצילות    | 40-50% ובשילוב חימום עד 70%.                              |
| קיבול     | עד מאות MWh                                               |
| זמן פריקה | שעות עד ימים                                              |
| יתרונות   | יכולת אגירה בקנה מידה גדול, זמן פריקה ארוך (שעות עד ימים) |
| חסרונות   | נצילות נמוכה, דורש חללים גאולוגיים מיוחדים                |
| יישומים   | אגירה ברשתות לאומיות                                      |

## דוגמאות לאגירה באוויר דחוס

### CAES Huntorf גרמניה:

- הראשון בעולם, הוקם ב-1978 הספק: 290 מגה-ואט.
- משתמש במערות מלח תת-קרקעיות.
- משמש לאיזון רשת החשמל ולתמיכה באנרגיה מתחדשת

### CAES McIntosh ארה"ב, (אלבמה):

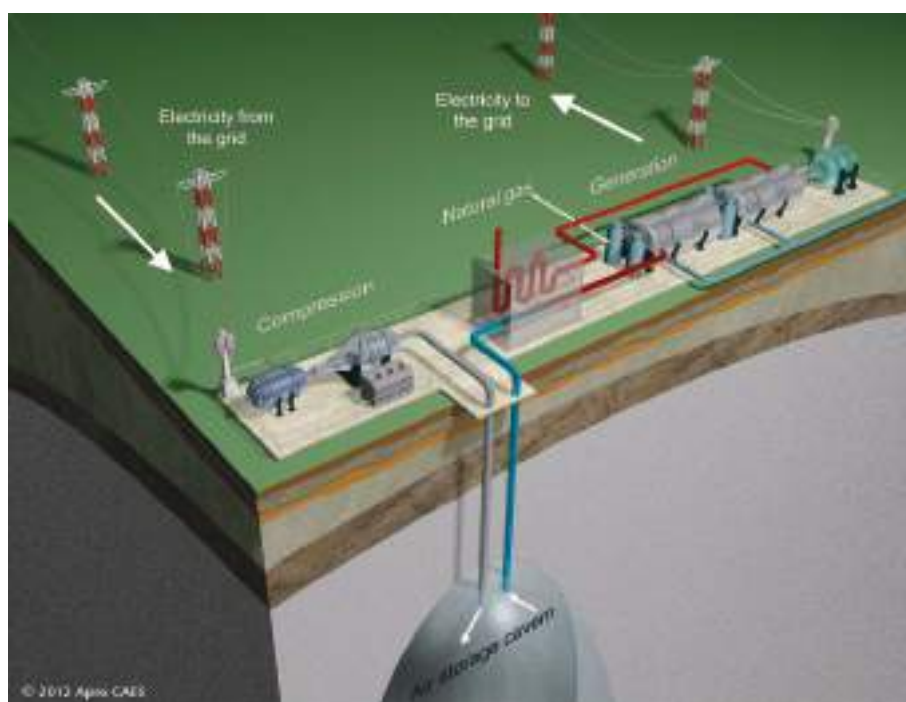
- הוקם בשנת 1991 על ידי חברת Alabama Electric Cooperative הספקו 110MW.
- משתמש במערות מלח ומשלב שימוש בגז טבעי לחימום האוויר במהלך השחרור
- נצילות משופרת על-ידי ניצול החום מתהליך הדחיסה.
- מתבצעים כעת פרויקטים במספר מדינות בטכנולוגיית A-CAES משופרת עם נצילות גבוהה יותר. בקנדה מפותח פרוייקט עם אחסון תת מימי.

## דוגמאות לאגירה באוויר דחוס

### ג'ינטאן (Jintan) סין.

- האתר הגדול בעולם לאגירה באוויר דחוס, ובנייתו מסתיימת השנה.
- הספק: שתי יחידות של 350MW כל אחת, קיבול אחסון: 2.8GWh. נפח אחסון: 1.2 מיליון מטר מעוקב של אוויר דחוס במערות מלח.
- משתמש בטכנולוגיית A-CAES (Advanced CAES) ללא דלק, עם אחסון ושימוש חוזר בחום הדחיסה, המאפשר אפס פליטות פחמן.
- יעילות המרה: מעל 60%, עם פוטנציאל להגיע עד 70%.
- מתוכנן לבצע כ-330 מחזורי טעינה-פריקה בשנה. משך פריקה: כ-4 שעות בהספק מלא. משמש לאיזון רשת החשמל ולתמיכה באנרגיה מתחדשת להתמודדות עם אי-היציבות של מקורות כמו רוח ושמש.

## עקרון פעולת מתקן אגירת אוויר דחוס



## מתקן אגירת אוויר דחוס בסין



סגל אריאל [www.arielsegal.co.il](http://www.arielsegal.co.il)

מערכות אגירת אנרגיה

17

## אגירה תרמית (Thermal Storage Power Plant)

### סוגים עיקריים:

- **מלח מותך (Molten Salt):** אגירת חום בטמפרטורה גבוהה במכלי מלח מותך נפוץ בתחנות סולאריות תרמיות.
- **אגירת חום תת-קרקעית:** שימוש במאגרים תת-קרקעיים לאגירת חום עונתית.
- **אגירה קריוגנית (Liquid Air Energy Storage):** קירור אוויר לנוזל בטמפרטורות נמוכות  $-196^{\circ}\text{C}$  חימום והתפשטות לייצור חשמל בעת הצורך

| תכונה   | פרטים                                                                                        |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| נצילות  | נצילות תרמית טובה מאוד נצילות מחזור כולל נמוכה ומגיע לכ-50%                                  |
| קיבול   | עד מאות MWh                                                                                  |
| יתרונות | יכולת אגירה בקנה מידה גדול, זמן פריקה ארוך (שעות עד ימים), אפשרות שילוב עם תהליכים תעשייתיים |
| חסרונות | נצילות נמוכה                                                                                 |
| יישומים | אגירה ברשתות לאומיות                                                                         |

סגל אריאל [www.arielsegal.co.il](http://www.arielsegal.co.il)

מערכות אגירת אנרגיה

18

## דוגמאות לאגירה תרמית

**תחנת אשלים (ישראל):** תחנה סולארית תרמית עם אגירת מלח מותך יכולת אגירה של כ-4.5 שעות פעולה בהספק מלא.

**Crescent Dunes (נבדה, ארה"ב):** תחנה סולארית תרמית 10 שעות אגירה באמצעות מלח מותך.

**Highview Power בריטניה:** מתקן אגירת אוויר נוזלי מסחרי הספק של 50 מגה-ואט / 250 מגה-ואט-שעה.

WWW.arielsegal.co.il גל אריאל

מערכות אגירת אנרגיה

19

## תחנת אשלים Plot A - נגב אנרגיה

תחנת כח תרמו סולארית בטכנולוגיה שנקראת שוקת פרבולית



WWW.arielsegal.co.il גל אריאל

מערכות אגירת אנרגיה

20

# אגירה מבוססת מימן

## עקרון פעולה:

- ייצור מימן באמצעות אלקטרוליזה (בתהליך פירוק מים) בזמן עודף אנרגיה.
- אחסון המימן בצורת גז דחוס, נוזל, או בתוך חומרים כימיים, עד לשימוש במכלים או במאגרים תת-קרקעיים.
- המרת המימן לחשמל בתאי דלק או שריפה ישירה

## יתרונות:

- אפשרות לאגירה עונתית וארוכת טווח.
- גמישות בשימוש (חשמל, תחבורה, תעשייה)
- אפס פליטות (מלבד מים) בנקודת השימוש

## חסרונות:

- נצילות מחזור נמוכה יחסית (30-45%)
- אתגרים באחסון ושינוע
- עלויות גבוהות של תשתיות וציוד (בינתיים)

# שיטות הפקת מימן

## אלקטרוליזה של מים:

- החשמל מפרק מים למימן וחמצן באמצעות אלקטרוליזר. החשמל לתהליך ממקורות מתחדשים (רוח, שמש, הידרו), המימן נקרא מימן ירוק (Green Hydrogen) היתרון שהתהליך אינו מלווה בפליטות פחמן. החסרון תהליך יקר ועתיר אנרגיה (כ-50-60 קוט"ש לק"ג מימן).

## רפורמינג של גז טבעי (Steam Methane Reforming - SMR):

- תהליך זה הינו הנפוץ ביותר ובאמצעותו מופק כ-95% מייצור המימן העולמי. גז טבעי (מתאן  $CH_4$ ) מגיב עם קיטור בטמפרטורות גבוהות ( $700-1,000^{\circ}C$ ) לייצור מימן ופחמן דו-חמצני ( $CO_2$ ) התוצר: מימן אפור (ללא לכידה של הפחמן) או מימן כחול (בלכידה של  $CO_2$ ). יתרון: זול ונפוץ. חסרון: פליטות פחמן גבוהות (אלא אם משתמשים ב-CCS).

## שיטות נוספות להפקת מימן

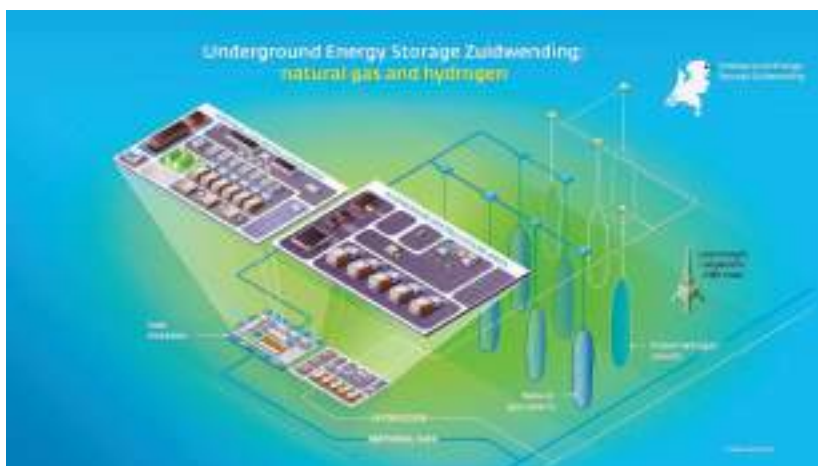
- **גיזוז פחם (Coal Gasification):** פחם מחומם בנוכחות חמצן וקיטור ליצירת תערובת של  $H_2$  ו- $CO$ . המימן מופרד מהתערובת בתהליכים נוספים.
- **פירוליזה של מתאן (Methane Pyrolysis):** מתאן מפורק בטמפרטורות גבוהות (מעל  $1000^{\circ}C$ ) למימן ופחמן מוצק (במקום  $CO_2$ ).
- **תהליכים תרמו-כימיים (Thermochemical Processes):** שימוש בחום (למשל, מאנרגיה גרעינית או סולארית) לפירוק מים למימן וחמצן דרך מחזורי כימיים (כגון מחזור גופרית-יוד).

## פרוייקטי אגירה במימן

- אירופה היא מובילה עולמית בייצור ושימוש במימן לאגירת אנרגיה, בעיקר כחלק ממעבר לאנרגיה מתחדשת.
- בגרמניה קיימים מפעלים לייצור מימן באמצעות **אלקטרוליזה** המופעלת על ידי אנרגיית רוח וشمש, במיוחד בצפון גרמניה, שם יש פארקי רוח גדולים.
- בהולנד באזור רוטרדם יש פיתוח של מרכזי מימן המשלבים SMR עם לכידת פחמן (מימן כחול) ואלקטרוליזה.
- בדנמרק משתמשים באנרגיית רוח לייצור מימן ירוק באמצעות אלקטרוליזה. המימן מאוחסן במערות מלח או מוזרם לרשתות גז טבעי.

## פרוייקטי אגירה במימן

- בפרוייקט Hystock בהולנד מופעל מתקן לייצור מימן ירוק באמצעות אלקטרוליזה בהספק של 1MW. החשמל למתקן מסופק מפאנלים סולאריים ומרוח. הפרוייקט מתמקד באחסון מימן במערות מלח תת-קרקעיות בזאודוונדינג ובתכנון 4 מערות מלח לאחסון מימן, עם קיבול כוללת של 20,000 Ton מימן.
- קיים גם פרוייקט בישראל לאגירת מימן שמופק מחשמל מפנלים סולאריים בערבה



## גלגלי תנופה (Flywheels)

### עקרון פעולה:

- אגירת אנרגיה קינטית בגלגל מסתובב במהירות גבוהה.
- פריקת אנרגיה על-ידי האטת הגלגל והפעלת גנרטור.

### יתרונות:

- זמן תגובה מהיר מאוד (אלפיות שנייה)
- יכולת מחזור אגירה-פריקה גבוהה מאוד (100,000+ מחזורים)
- אורך חיים ארוך (15-20 שנים)
- עבודה בטמפרטורות קיצוניות.
- זמן טעינה מהיר (כרבע שעה).
- נצילות גבוהה 90%.

### חסרונות:

- קיבול אגירה מוגבל (דקות עד שעות)
- איבוד אנרגיה בחיכוך
- עלות התקנה גבוהה

# גלגלי תנופה (Flywheels)

אתרים בולטים

| שם המתקן                                  | מיקום                     | הספק (MW) | קיבול אנרגיה (MWh) | משך אגירה (Min) | פרטים נוספים                                                   |
|-------------------------------------------|---------------------------|-----------|--------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------|
| תחנת אגירת אנרגיה גלגלי תנופה דינגלון     | צ'אנגזי, שנסי, סין        | 30        | 5                  | 10              | כוללת 120 יחידות בהנעה מגנטית, החלה לפעול ב-2024, לוויסות תדר. |
| תחנת אגירת אנרגיה גלגלי תנופה ביקון פאואר | סטפנטאון, ניו יורק, ארה"ב | 20        | 5                  | 15              | כוללת 200 גלגלי תנופה מפחמן, כל אחד עם 25kWh, לוויסות רשת.     |

## מבוא - אגירת אנרגיה באמצעות מצברים

מערכות אגירת אנרגיה באמצעות סוללות הפכו לרכיב מרכזי במעבר העולמי לאנרגיה מתחדשת. היכולת לאגור אנרגיה בזמני עודף ולספק אותה בזמני ביקוש מהווה פתרון לאופיין המשתנה של מערכות ייצור אנרגיה מתחדשת, כגון מערכות סולאריות. מערכות אלו כשהן משולבות עם חיבור לרשת החשמל מקנות פתרון המשלב את היתרונות של ייצור אנרגיה מקומי, אגירה, וגיבוי לרשת החשמל הארצית. אגירת אנרגיה מחייבת אמצעי אגירה, על פי רוב מצברים.

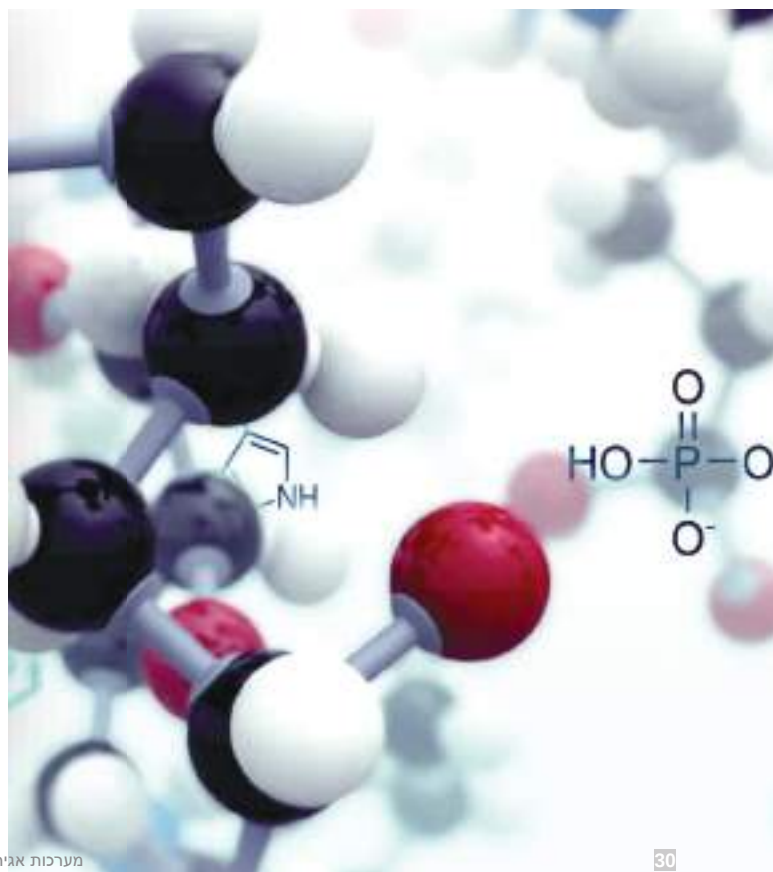
# תפקידן של מערכות אגירת אנרגיה במשק החשמל המודרני

מערכות אגירת אנרגיה באמצעות סוללות ממלאות מספר תפקידים קריטיים במשק החשמל:

- איזון בין ייצור לצריכה - אגירת עודפי אנרגיה בשעות שפל ושחרורם בשעות שיא.
- שילוב אנרגיות מתחדשות - התמודדות עם תנודתיות הייצור ממקורות מתחדשים.
- שיפור אמינות הרשת - מענה מהיר לשינויים בביקוש ובהיצע.
- ייצוב תדר ומתח - שמירה על איכות החשמל ברשת.
- דחיית השקעות בתשתית - צמצום הצורך בהרחבת קווי הולכה וחלוקה.
- חיסכון כלכלי - ניצול הבדלי מחירים בין שעות שונות (ארביטראז')

## סוגי מצברים נפוצים במערכות אגירת אנרגיה

- מצברי ליתיום-יון
- מצברי עופרת-חומצה
- מצברי זרימה (Flow Batteries)
- מצברי נתרן-גופרית (NaS)
- מצברי ליתיום-פולימר (LiPo).
- מצברי ניקל
- מצברי ניקל מתכת הידריד (NiMH)
- מצברי ניקל אבץ



## מצברי ליתיום-יון (Li-ion)

- תהליך בסיסי: מבוסס על תנועת יוני ליתיום בין האנודה לקתודה.
- מבנה: האנודה (בד"כ גרפיט), הקתודה תחמוצות מתכת כמו  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiFePO}_4$ , NMC, ואלקטרוליט. לאגירת אנרגיה משתמשים בעיקר ב-  $\text{LiFePO}_4$ , או בקיצור LFP.
- מנגנון: בזמן פריקה, יוני ליתיום נעים מהאנודה לקתודה. בטעינה, הם נעים בכיוון ההפוך.
- צפיפות אנרגיה: 100-240 Wh/kg תלויה בטכנולוגיה (נפחית 250-700Wh/Liter)
- יעילות מחזור: 90-95%
- שיעור פריקה עצמית: 2-3% בחודש
- טמפרטורת עבודה: 20°C עד 60°C
- אורך חיים: 2,000-5,000 מחזורי טעינה-פריקה
- DoD Depth of Discharge (עומק פריקה) מומלץ: 80-90%
- חסרונות: עלות גבוהה יחסית, סיכוני בטיחות (סכנת התלקחות), דרישות קירור.

| טכנולוגיה         | חומרים מרכיבים                  |
|-------------------|---------------------------------|
| NMC               | ליתיום, ניקל, מנגן, קובלט, חמצן |
| $\text{LiFePO}_4$ | ליתיום, ברזל, זרחן, חמצן        |
| $\text{LiCoO}_2$  | ליתיום, קובלט, חמצן             |

## מצברי ליתיום-יון (Li-ion)

| סוג סוללה                    | מחזורי חיים | מתח עבודה | צפיפות אנרגיה (Wh/kg) | מומלץ למערכות אגירה | סיכון להתלקחות תרמית | מחיר והערות                                                                  | פרטים נוספים                                                            |
|------------------------------|-------------|-----------|-----------------------|---------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| ליתיום ברזל פוספט (LFP)      | 2,000-7,000 | 3.2V      | 90-177                | כן                  | נמוך, הבטוחה ביותר   | זולה, שימוש בברזל (משאב ירוק), עלות ייצור נמוכה                              | כבדה, מתאימה למקומות גדולים, צפוי שכל מערכות אגירה סטציונריות יעברו לזה |
| ליתיום ניקל מנגן קובלט (NMC) | 1,000-2,000 | 3.7V      | 150-220               | פחות                | בטיחות בינונית       | יקרה, תלויה בקובלט וניקל, נזק סביבתי, חשש ממחסור, מתאימה למחשבים ניידים ורכב | צפיפות אנרגיה גבוהה, מספר מחזורי חיים קטן יותר מ-LFP                    |
| ליתיום קובלט חמצן (LCO)      | 500-1,000   | 3.7V      | 150-240               | לא                  | יציבות תרמית נמוכה   | לא מתאימה לעומס גבוה, משמשת במחשבים ניידים, סמארטפונים                       | לא מתאימה למערכות אגירה בשל חיי מחזור קצרים ויציבות נמוכה               |
| ליתיום טיטנט חמצן (LTO)      | עד 10,000   | 2.4V      | 50-80                 | פחות                | זיהום נמוך           | יקרה, צפיפות אנרגיה נמוכה                                                    | טעינה מהירה, פחות מזהמת, לא כלכלית למערכות אגירה                        |

# מצברי Lithium Iron Phosphate (LiFePO<sub>4</sub> / LFP)

זמני טעינה:

| קצב טעינה | זמן לטעינה 80% | זמן לטעינה מלאה | השפעה על אורך חיים |
|-----------|----------------|-----------------|--------------------|
| 0.2C      | 4 שעות         | 5 שעות          | מינימלית           |
| 0.5C      | 100 דקות       | 150 דקות        | נמוכה              |
| 1C        | 45 דקות        | 80 דקות         | בינונית            |
| 2C        | 25 דקות        | 45 דקות         | משמעותית           |
| 3C        | 15 דקות        | 30 דקות         | גבוהה              |

יכולות פריקה טיפוסיות:

| קצב פריקה | קיבולת זמינה | זמן פריקה | שימושים מומלצים |
|-----------|--------------|-----------|-----------------|
| 0.2C      | 100%         | 5 שעות    | אגירת אנרגיה    |
| 1C        | 95-98%       | 1 שעה     | שימוש רגיל      |
| 3C        | 90-95%       | 20 דקות   | עומסים גבוהים   |
| 5C        | 85-90%       | 12 דקות   | עומסים גבוהים   |
| 10C       | 80-85%       | 6 דקות    | האצה/זינוק      |

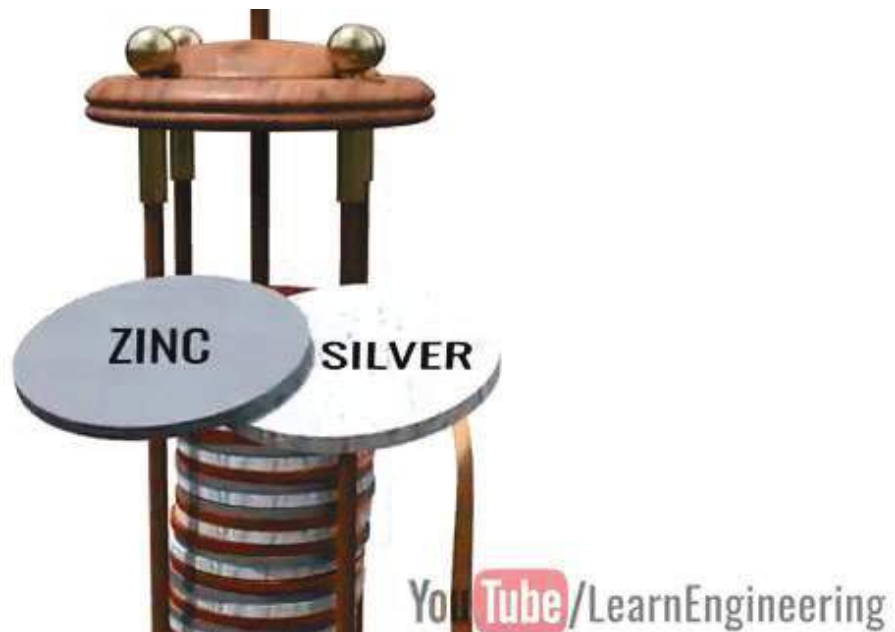
קצב C (C rate) הינו מדד לקצב שבו הסוללה מתרוקנת ביחס לקיבול המקסימלי שלה. קצב 1C משמעותו שזרם הפריקה יפרוק את כל הסוללה תוך שעה. לדוגמה סוללה עם קיבול של 100kWh קצב C ששווה ל-1 משמעותו שניתן לפרוק בהספק של 100kW שעה שלמה.

## מצברי LFP - השוואת חיי מחזור בקצבי פריקה שונים

| קצב פריקה (C-rate) | חיי מחזור (מחזורים עד 80% קיבול) | תנאים נוספים                                                                      |
|--------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 0.2C-0.3C          | 2,500-9,000                      | תנאים אופטימליים, טמפרטורה נמוכה                                                  |
| 0.5C               | ~2,000-5,000                     | תנאים סטנדרטיים                                                                   |
| 0.8C               | ~1,000 (ירידה של 52.9% מ-0.5C)   | בטמפרטורה 25°C, לפי מחקר מ-2024                                                   |
| 1C ומעלה           | ~300-1000                        | תנאי טמפרטורה גבוהה, פריקה עמוקה, או סוללות באיכות יצור נמוכה יגיעו ל-300 מחזורים |

פריקה מהירה יותר (קצב פריקה גבוה מ-0.2C) גורמת לירידה משמעותית במספר מחזורי הטעינה-פריקה. לפיכך, במערכות אגירה מומלץ להשתמש בקצבי פריקה נמוכים יותר כדי למקסם את חיי הסוללה, תוך התחשבות בגורמים נוספים כמו טמפרטורה ועומק הפריקה.

## עיקרון פעולת מצברי ליתיום-יון (Li-ion)



## אתרי אגירה בטכנולוגית מצברי ליתיום-יון (Li-ion)

### Edwards & Sanborn Solar-plus-Storage Project - קליפורניה, ארה"ב

קיבול: 3,287 MWh הספק: 875MW

מאפיינים: 1.9 מיליון פאנלים סולאריים עם מעל 120,000 סוללות ליתיום-יון, ומהווה את מערכת האגירה הגדולה בעולם כיום.



### Moss Landing Energy Storage Facility - קליפורניה, ארה"ב

• קיבול: 3,000MWh הספק: 750MW

מאפיינים: המערכת מבוססת על סוללות ליתיום-יון ומספקת גיבוי לרשת החשמל של קליפורניה.

### Coalburn & Devilla Battery Projects - סקוטלנד, בריטניה

קיבול משולב של האתרים: 3,000MWh הספק משולב: 1,500MW

מאפיינים: סוללות ליתיום-יון מסוג ליתיום-ברזל-פוספט  $\text{LiFePO}_4$ . כל מתקן יכולת כ-450 מכולות סוללה מדגם SolBank 3.0 של חברת e-STORAGE בקיבול 1GWh (האתר בבניה)

## מצברי עופרת-חומצה מתקדמים (Advanced Lead-Acid)

- מצברי עופרת-חומצה מתקדמים הם גרסאות משופרות של מצברי עופרת-חומצה מסורתיים. הם פותחו כדי לענות על דרישות מודרניות של יעילות, עמידות, ויישומים מגוונים, כמו כלי רכב חשמליים, מערכות אנרגיה מתחדשת, ומערכות גיבוי.
- הם כוללים טכנולוגיות כמו VRLA (Valve-Regulated Lead-Acid) או חידושים כמו מצברי Enhanced Flooded Batteries (EFB) וטכנולוגיות היברידיות המשלבות תוספות פחמן או תכנון אלקטרודות משופר.
- תהליך בסיסי: תגובה הפיכה בין עופרת, תחמוצת עופרת וחומצה גופרתית.
- מבנה: אנודה מעופרת ספוגית, קתודה מתחמוצת עופרת, ואלקטרוליט מחומצה גופרתית.
- מנגנון: בפריקה, העופרת והתחמוצת הופכות לסולפט עופרת. בטעינה, התהליך מתהפך.
- שילוב טכנולוגית VRLA, שימוש בג'ל סמיך, או הוספת פחמן לאלקטרודות, או שימוש בחומרים מתקדמים, או עיצוב אלקטרודות דקות יותר וציפויים מיוחדים מאפשרים לקבל מצברי עופרת חומצה משופרים.

## מצברי עופרת-חומצה מתקדמים (Advanced Lead-Acid)

| מאפיין                  | מצברי עופרת-חומצה מתקדמים                                         | מצברי עופרת-חומצה רגילים                  |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| מבנה                    | אטום (VRLA), מחצלות זכוכית (AGM) או ג'ל, EFB                      | מוצף, אלקטרוליט נוזלי חופשי               |
| מנגנון פריקה וטעינה     | פריקה וטעינה משופרים עם תוספות פחמן, עמידות לפריקה עמוקה          | פריקה וטעינה בסיסית, רגישים לפריקה עמוקה  |
| צפיפות אנרגיה           | 30-50 Wh/kg                                                       | 30-40 Wh/kg                               |
| יעילות מחזור            | 80-90%                                                            | 85-95%                                    |
| DOD (עומק פריקה)        | עד 80% בדגמים מתקדמים                                             | עד 50-60%                                 |
| שיעור פריקה עצמית       | 2-3% לחודש                                                        | 5-10% לחודש                               |
| טווח טמפרטורות עבודה    | עמיד יותר לטמפ' קיצונית 20°C עד 50°C                              | רגישים יותר לטמפ' קיצונית, 10°C עד 40°C   |
| מספר מחזורי טעינה-פריקה | 500-2000 מחזורים (VRLA/EFB), תלוי בטכנולוגיה                      | 200-500 מחזורים, תלוי בתחזוקה             |
| תחזוקה                  | ללא תחזוקה (VRLA), מינימלית (EFB)                                 | דורשת בדיקה והוספת מים מזוקקים            |
| מיחזור                  | 95-99%                                                            | 95-99%                                    |
| מחירים                  | 100-200 דולר לקוט"ש, גבוהים יותר                                  | 50-100 דולר לקוט"ש, נמוכים יותר           |
| התקנה בתנחות שונות      | גבוהה (ניתן להתקנה בכל זווית ב-VRLA)                              | מוגבלת, חייבים בהתקנה זקופה               |
| בטיחות                  | גבוהה, פליטת גזים מינימלית, ללא דליפות (VRLA)                     | נמוכה יותר, פליטת גזים (מימן) וסכנת דליפה |
| התנגדות פנימית          | גבוהה יותר (במיוחד ב-AGM/Gel), משתפרת עם תוספות פחמן              | נמוכה יותר, יעילות גבוהה בזרמים גבוהים    |
| התאמה למערכות אגירה     | מתאימים מאוד (אנרגיה מתחדשת, UPS, מיקרו-רשתות), במיוחד VRLA ו-EFB | מתאימים פחות, בעיקר ליישומים בסיסיים      |

## מצברי עופרת-חומצה מתקדמים (Advanced Lead-Acid)

- חסרונות: צפיפות אנרגיה נמוכה, אורך חיים מוגבל (500-2,000 מחזורים), יעילות נמוכה יחסית.
- שימושים: מערכות קטנות, גיבוי, יישומים בהם העלות היא שיקול מרכזי.
- זולים משמעותית ביחס למצברי ליתיום יון.



## אתרי אגירת אנרגיה באמצעות מצברי עופרת חומצה

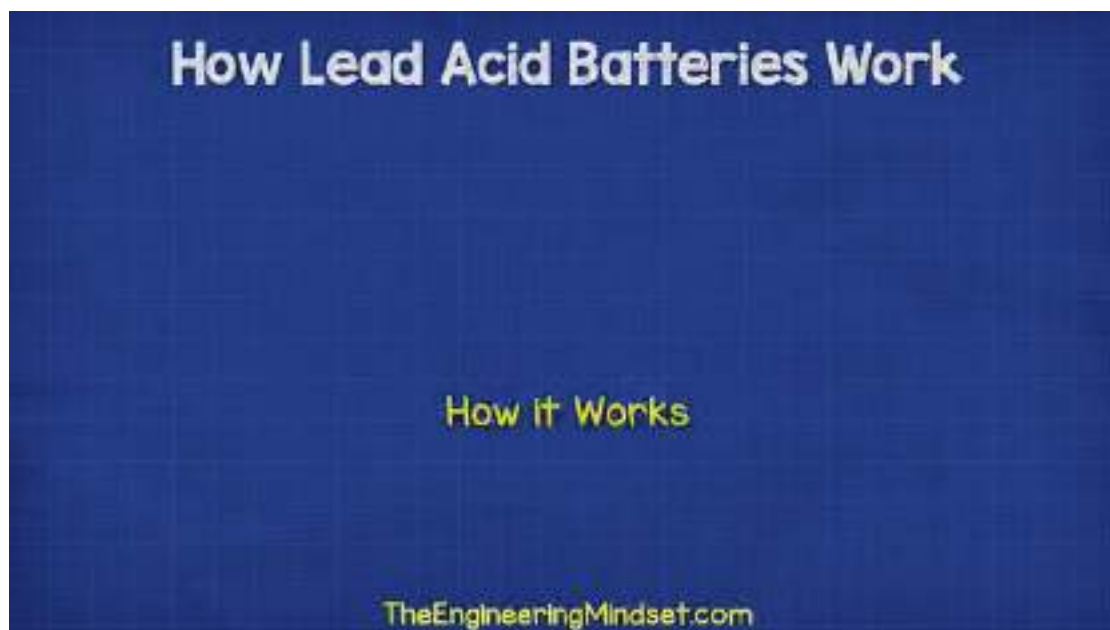
**אתר Shoto סין** קיבול: 150MWh / 100MW במצברי עופרת-פחמן (PbC) מתקדמים מאפיינים: המערכת כוללת 9,600 מצברים עם מחזור חיים של כ-4,000 מחזורים בעומק פריקה של 70%. מצברי PbC משלבים אלקטרודות פחמן, שמאפשרות שיפור בקצב טעינה-פריקה, עמידות בטמפרטורות נמוכות וביצועים משופרים לאורך זמן.

**פרויקט – Notrees טקסס, ארה"ב** קיבול ראשוני: 24MWh / 36MW במצברי עופרת-חומצה מתקדמים (שהוחלפו ב-2015 בליתיום-יון) פרוייקט אגירה משולב בטורבינות רוח.

**פרויקט – Goldsmith טקסס, ארה"ב** הספק: 32 מגה-וואט במצברי עופרת-חומצה מתקדמים. המערכת שימשה לאיזון עומסים ברשת החשמל והייתה מהגדולות מסוגה בעולם בעת הקמתה.



## סוללות עופרת חומצה



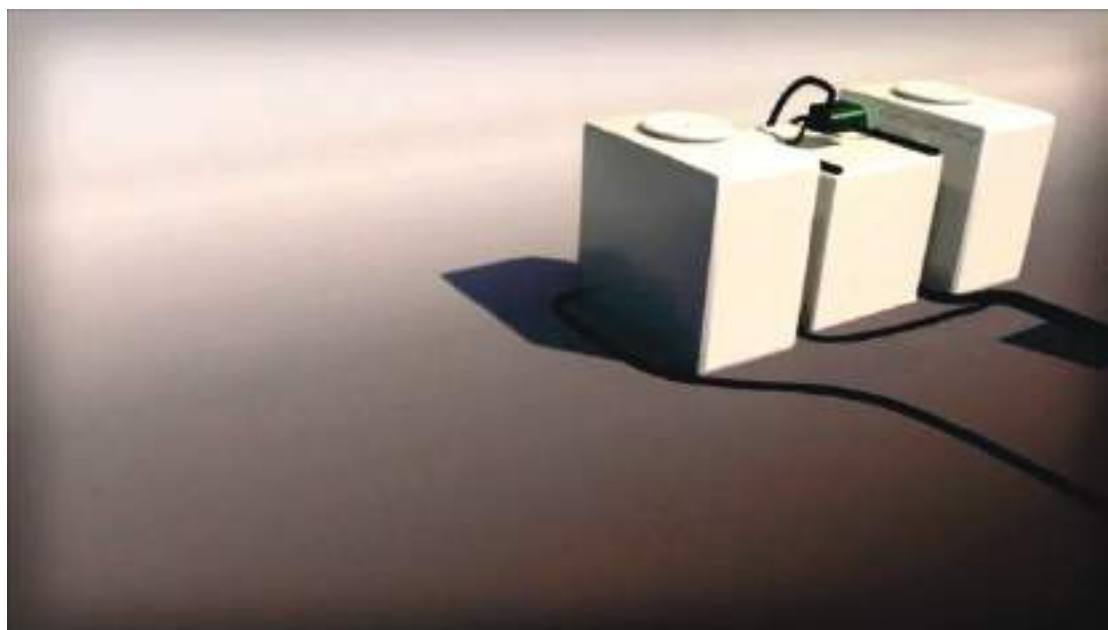
## מצברי זרימה (Flow Batteries)

- מצברי זרימה הם סוג של סוללות נטענות המשתמשות בשני אלקטרוליטים נוזליים המאוחסנים במכלים נפרדים, והם זורמים דרך תא אלקטרוכימי כדי לייצר או לאגור אנרגיה. המבנה הבסיסי כולל:
- **המכלים:** שני מכלים נפרדים, כל אחד מכיל אלקטרוליט נוזלי (בדרך כלל תמיסות מימיות או אורגניות) עם חומרים פעילים שונים (למשל, ונדיום, ברזל, או אבץ). האלקטרוליטים מחולקים לאנודה (אלקטרוליט שלילי) וקתודה (אלקטרוליט חיובי).
- **תא אלקטרוכימי:** מורכב משתי אלקטרודות (אנודה וקתודה), בדרך כלל עשויות מפחמן או חומרים מוליכים אחרים. ממברנה (לרוב ממברנת החלפת יונים) מפרידה בין האלקטרוליטים, ומאפשרת מעבר של יונים תוך מניעת ערבוב התמיסות.
- **משאבות וצנרת:** משאבות מזרימות את האלקטרוליטים מהמכלים אל התא האלקטרוכימי ובחזרה באמצעות צנרת

## מצברי זרימה (Flow Batteries)

- סוגים עיקריים: ונדיום רדוקס (VRFB), אבץ ברום, אבץ-ברזל.
- בעת טעינה: נקלטים אלקטרונים באנודה ויוצאים מהקתודה.
- בעת פריקה: משתחררים אלקטרונים מהאנודה ונקלטים על ידי הקתודה.
- הממברנה מאפשרת מעבר של יונים (למשל  $H^+$  או  $Cl^-$ ) בין האלקטרוליטים כדי לשמור על איזון חשמלי, תוך מניעת ערבוב ישיר של התמיסות.
- יתרונות: אורך חיים ארוך מאוד (+20,000 מחזורים ועד 20 שנה), קיבול ניתנת להרחבה בקלות, פריקה מלאה ללא נזק, פריקה עצמית אפסית, בטיחות גבוהה.
- חסרונות: צפיפות אנרגיה נמוכה ( $60-80Wh/kg$ ), עלות גבוהה, מורכבות מכנית, יעילות מחזור 65-75%, 100% DOD, עלות נמוכה, חומרי גלם זמינים.
- שימושים: מתקנים נייחים גדולים, אגירה לטווח ארוך.

## מצברי זרימה



## מצברי זרימה בהשוואה למצברי ליתיום-יון

| מאפיין               | מצברי זרימה                                                                | מצברי ליתיום-יון                                                                            |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| מבנה                 | שני אלקטרוליטים נוזליים במיכלים נפרדים, זורמים דרך תא אלקטרוכימי עם ממברנה | אלקטרודות מוצקות (לרוב גרפיט לאנודה, תחמוצות מתכת לקתודה) ואלקטרוליט נוזלי או מוצק בתא סגור |
| מנגנון פעולה         | תגובות חמצון-חיזור באלקטרוליטים הנוזליים, זרימת יונים דרך ממברנה           | תגובות חמצון-חיזור בתוך האלקטרודות המוצקות, מעבר יוני ליתיום דרך אלקטרוליט                  |
| צפיפות אנרגיה        | 10-40 וואט-שעה/ק"ג, 20-70 וואט-שעה/ליטר                                    | 100-200 וואט-שעה/ק"ג, 200-400 וואט-שעה/ליטר                                                 |
| יעילות מחזור         | 75-85%                                                                     | 90-95%                                                                                      |
| עומק פריקה - DOD     | עד 100% ללא פגיעה בחיי המצבר                                               | עד 80-100% (LFP עד 100%)                                                                    |
| שיעור פריקה עצמית    | כמעט אפסי (תלוי באחסון האלקטרוליט)                                         | 1-3% לחודש                                                                                  |
| טווח טמפרטורות עבודה | יציבים בטווח 0 עד 50°C ללא צורך בניהול תרמי                                | 20°C עד 60°C אבל נדרש ניהול תרמי קפדני מעל 45°C בשל ירידה משמעותית בביצועים וסיכונים        |
| מחזורי טעינה-פריקה   | 10,000-20,000 מחזורים, כמעט ללא ירידה                                      | 1000-5000 מחזורים (LFP עד 7000)                                                             |
| תחזוקה               | דורשים תחזוקה של משאבות, צנרת, ואלקטרוליטים                                | מינימלית, נדרש BMS למניעת טעינת יתר                                                         |
| מיחזור               | 90-95%, אלקטרוליטים ניתנים לשימוש חוזר                                     | 70-80%, תהליך מורכב יותר בשל מתכות כבדות                                                    |
| מחירים               | 300-500 דולר לקוט"ש (זולים יותר בקיבול גדול)                               | 400-600 דולר לקוט"ש                                                                         |
| התקנה בתנחות שונות   | מוגבלת, דורשים מיכלים גדולים וצנרת                                         | גבוהה, מבנה קומפקטי מאפשר התקנה גמישה                                                       |
| בטיחות               | גבוהה מאוד, ללא סיכון להתלקחות או פיצוץ                                    | גבוהה ב-LFP סיכון להתחממות יתר ב-NMC/NCA                                                    |
| התנגדות פנימית       | גבוהה יותר, מגבילה קצב טעינה/פריקה                                         | נמוכה, מאפשרת טעינה ופריקה מהירה                                                            |
| התאמה למערכות אגירה  | מתאימים מאוד לאגירה בקנה מידה גדול                                         | מתאימים מאוד, במיוחד ליישומים ניידים וקומפקטיים                                             |

## אתרי אגירת אנרגיה גדולים המשתמשים במצברי זרימה

- תחנת Dalian בסין (200MW/800MWh)
- מתקן Minami Hayakita ביפן (15 מגה-וואט)
- פרויקט Xinhua Ushi בסין (175MW/700MWh)
- פרויקט אגירת האנרגיה בלופנבורג – שווייץ מתוכנן לקיבול של 500MWh (בבניה)

Xinhua Ushi בסין



Dalian בסין



## מצברי נתרן גופרית (NaS)

**תהליך בסיסי:** תגובה אלקטרוכימית בין נתרן וגופרית.

**מבנה:** אנודה מנתרן מותך, קתודה מגופרית מותכת, ואלקטרוליט קרמי מבטא-אלומינה (אלומיניום אוקסיד עם תוספת נתרן)

**מנגנון:** תגובות אלקטרוכימיות בין נתרן נעים (באנודה) וגופרית (בקתודה) כאשר בטא-אלומינה משמשת כממברנה מוליכת יוני נתרן.

צפיפות אנרגיה: 100-240Wh/kg

יעילות מחזור: 80-90%

שיעור פריקה עצמית: כמעט אפס

טמפרטורת עבודה: 300°C-350°C (טווח זה נחוץ כדי לשמור על הנתרן והגופרית במצב מותך ועל הבטא-אלומינה כמוליך יוני יעיל. טמפרטורות נמוכות יותר עלולות לגרום להתמצקות החומרים ולהפחתת הביצועים).

אורך חיים: 2,500-4,500 מחזורים

DoD מומלץ: עד 100%

ייחודיות: דורש חימום קבוע לשמירה על טמפרטורת העבודה

## אתרים בהם מותקנים מצברי נתרן גופרית (NaS)

**מתקן Rokkasho, יפן:** הספק: 34MW/245MWh. פותח ע"י NGK Insulator, משלב חוות רוח גדולה

**מתקן Abu Dhabi, איחוד האמירויות:** הספק: 8MW/48MWh, גם הוא פותח ע"י NGK Insulators, אחד ממתקני NaS הגדולים בעולם

**אייטלי, איטליה:** הספק: 12MW/35MWh משמש לשיפור אמינות הרשת באזור מבודד.



## מצברי ליתיום-פולימר (LiPo)

כימיה מבוססת ליתיום: דומה לסוללות ליתיום-יון אך עם אלקטרוליט גמיש או ג'ל פולימרי. במקום אלקטרוליט נוזלי (כמו בסוללות ליתיום-יון רגילות), סוללות LiPo משתמשות באלקטרוליט שהוא ג'ל פולימרי או אלקטרוליט מוצק למחצה, או מוצק.

יתרונות של אלקטרוליט פולימרי (בהשוואה לנוזלי):

- ✓ ללא דליפה – אין נוזל שעלול לדלוף ולגרום לקצר פנימי.
- ✓ גמישות בצורת הסוללה – אפשר לייצר סוללות דקות וקלות יותר.
- ✓ משקל נמוך יותר – אין צורך במבנה קשיח למניעת דליפות.
- ✓ פחות רגישות להתפוצצות – אם כי עדיין יש סכנת התחממות והתלקחות.

חסרונות:

- ✗ מוליכות יונית נמוכה יותר – יעילות פחותה בהשוואה לסוללות ליתיום-יון רגילות.
- ✗ רגישות לטמפרטורות קיצוניות – ביצועים נפגעים בקור או חום קיצוני.
- ✗ התנפחות עם הזמן – במיוחד אם לא נטענות נכון או נפרקות יתר על המידה.

## מצברי ליתיום-פולימר (LiPo)

יתרונות מצברי LiPo:

- ✓ צפיפות אנרגיה גבוהה מאוד ביחס למשקל 150-250Wh/kg.
- ✓ יעילות מחזור: 90-95% :
- ✓ שיעור פריקה עצמית 2-5% בחודש
- ✓ גמישות בעיצוב (ניתן לייצרן בצורות שונות, אידיאליות ליישומים קומפקטיים כמו רחפנים, סמארטפונים ורכבים חשמליים).
- ✓ יכולת פריקה גבוהה: מסוגלות לספק זרמים גבוהים מאוד, דבר המועיל ליישומים הדורשים הספק מיידי.

חסרונות מצברי LiPo:

- ✗ עלות גבוהה,
- ✗ רגישות לטעינת יתר, או לירידת מתח מתחת למינימום,
- ✗ רגישות יתר לטמפרטורה ולתנאי טעינה/פריקה לא נכונים – טעינת יתר או פריקת יתר עלולות לגרום להתחממות יתר ואף להתלקחות,
- ✗ משך חיים קצר יחסית – מספר מחזורי טעינה ופריקה מוגבל ( 500-1000 מחזורים).

# מצברי ליתיום-פולימר (LiPo)

## שימושים:

למרות יתרונותיהן, סוללות LiPo אינן אידיאליות לאגירת אנרגיה בקנה מידה גדול:

**1. בטיחות ועמידות** – רגישות לחימום, טעינת יתר או חדירה פיזית עלולה לגרום לפיצוץ או שריפה.

**2. משך חיים מוגבל** – מספר מחזורי הטעינה והפריקה קצר יותר בהשוואה לטכנולוגיות כמו (LiFePO<sub>4</sub> ליתיום-ברזל-פוספט).

**3. נפיצות ותחזוקה מסובכת** – דורשות ניהול קפדני של מתח, זרם וטמפרטורה.

במתקני אגירת אנרגיה גדולים (כגון רשתות חשמל או חוות סולאריות), לרוב משתמשים בסוללות LiFePO<sub>4</sub> או בטכנולוגיות אחרות כמו נתרן-גופרית (NaS) או סוללות עופרת-חומצה משופרות.

**במצברי ליתיום פולימר משתמשים רק במתקנים קטנים ובינוניים שדורשים ביצועים גבוהים.**

## אתרים בהם מותקנים מצברי ליתיום-פולימר (LiPo)

**מערכות אגירה ביתיות:** מוצרים כמו Tesla Powerwall, מערכות אגירה ביתיות מתוצרת LG, Sonnen.

**יישומים מסחריים קטנים עד בינוניים:** מערכות גיבוי למרכזי נתונים, מתקני אגירה למבנים מסחריים.

**רכבים חשמליים ויישומי תחבורה:** רכבי Tesla ורכבים חשמליים אחרים, מערכות תחבורה ציבורית חשמלית



## מצברי ניקל-מתכת הידריד (NiMH)

**תהליך בסיסי:** תגובה בין מימן (מאוחסן בסגסוגת מתכתית) וניקל אוקסי-הידרוקסיד.

**מבנה:** אלקטרודה חיובית: עשויה מניקל אוקסי-הידרוקסיד ( $\text{NiOOH}$ ).

**אלקטרודה שלילית:** עשויה ממתכת סופגת מימן, לרוב תערובת של מתכות כמו ניקל, טיטניום, זירקוניום ומתכות המסוגלות לאחסן מימן כמתכת הידריד.

**אלקטרוליט:** בדרך"כ הידרוקסיד האשלגן ( $\text{KOH}$ ) שמעביר יוני הידרוקסיד בין האלקטרודות.

**מנגנון:** הטעינה מבוססת על ספיגת מימן באלקטרודה השלילית ובפריקה, המימן משתחרר מהסגסוגת, יוצר יוני  $\text{OH}^-$  שמגיבים עם הניקל.



אוקסי-הידרוקסיד - תרכובת כימית הכוללת חמצן, מימן ומתכת, בדרך כלל בצורה  $\text{MOOH}$ , שבה M הוא מתכת אלקלי - מלח בסיסי של מתכת אלקלית ויוצר  $\text{pH} > 7$ .

סגל אריאל [WWW.arielsegal.co.il](http://WWW.arielsegal.co.il)

מערכות אגירת אנרגיה

53

## מצברי ניקל-מתכת הידריד (NiMH)

צפיפות אנרגיה: 100-150Wh/kg

יעילות מחזור: 70-80%

שיעור פריקה עצמית: 20-30% בחודש

טמפרטורת עבודה: 20°C עד 50°C.

אורך חיים: 500-2,000 מחזורים

DoD מומלץ: עד 100%

ייחודיות: בטיחות גבוהה, אין צורך במערכות ניהול מורכבות.

שימושים: מכשירים ניידים, כלי רכב חשמליים היברידיים (טויוטה פריוס) ומערכות אגירת אנרגיה

סגל אריאל [WWW.arielsegal.co.il](http://WWW.arielsegal.co.il)

מערכות אגירת אנרגיה

54

## אתרים בהם מותקנים מצברי ניקל-מתכת הידריד (NiMH)

מערכת אגירה Graciosa פורטוגל, מערכת היברידית באי הפורטוגלי שמשלבת אנרגיה סולארית ואנרגיית רוח.

מתקנים תעשייתיים ביפן פרויקטים של חברת Kawasaki לאגירת אנרגיה, יישומי ייצוב רשת בקנה מידה בינוני.

יישומים ברכבים היברידיים, Toyota Prius בדגמים המוקדמים, מערכות רכב היברידיות אחרות.



סגל אריאל [WWW.arielsegal.co.il](http://WWW.arielsegal.co.il)

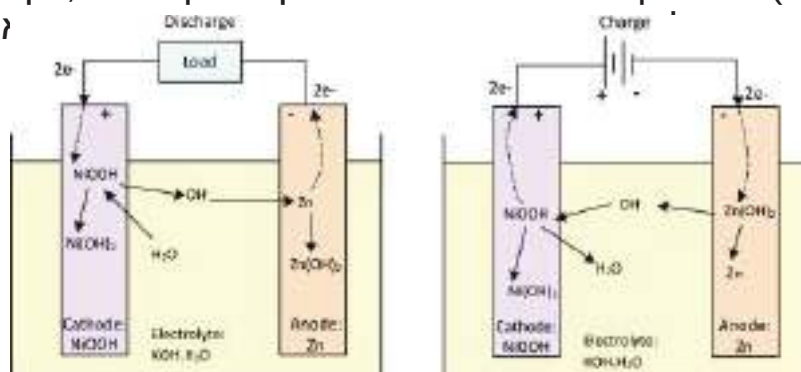
מערכות אגירת אנרגיה

55

## מצברי ניקל-אבץ (NiZn)



- אנודה: אבץ (Zn) שמשמש כחומר פעיל שמשחרר אלקטרונים בתגובה הכימית.
- קתודה: תחמוצת ניקל (NiOOH) שמקבלת אלקטרונים במהלך הפריקה.
- אלקטרוליט: תמיסת אשלגן הידרוקסידי (KOH) שמאפשרת מעבר יונים בין האלקטרודות.
- מפריד: (Separator) חומר נקבובי המונע מגע ישיר בין האלקטרודות, אך מאפשר מעבר יונים. לרוב י



סגל אריאל [WWW.arielsegal.co.il](http://WWW.arielsegal.co.il)

מערכות אגירת אנרגיה

56

## מצברי ניקל-אבץ (NiZn)

- מתח נומינלי: כ-1.6 וולט לתא,
- צפיפות אנרגיה: בטווח של 60-100 Wh/kg.
- צפיפות הספק: גבוהה של 150-300W/kg והתאמה ליישומים הדורשים פריקה מהירה.
- טווח טמפרטורות פעולה:  $-20^{\circ}\text{C}$  עד  $60^{\circ}\text{C}$ , עם ירידה ביעילות בטמפרטורות קיצוניות.
- חיי מחזור: 300-600 מחזורי טעינה-פריקה, תלוי בעומק הפריקה (DoD) ותנאי השימוש.
- בטיחות: נחשבות בטוחות יחסית בשל היעדר חומרים רעילים כמו קדמיום ובעלות סיכון נמוך להתלקחות.
- יישומים: סוללות לשימוש ביתי, מערכות אל-פסק, יישומים הדורשים מחזורי טעינה מהירים, מערכות אגירה ביתיות.

## השוואת תכונות

| פרמטר               | עופרת-חומצה                   | ליתיום-יון                                  | ניקל-מטאל הידריד (NiMH)         | ניקל-אבץ (NiZn)                 |
|---------------------|-------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| צפיפות אנרגיה Wh/kg | 30-50                         | 150-250                                     | 60-120                          | 60-100                          |
| צפיפות הספק W/kg    | 100-200                       | 250-2000                                    | 200-1000                        | 150-300                         |
| מחזורי חיים         | 300-1000                      | 1000-5000                                   | 500-1000                        | 300-600                         |
| יעילות מחזור (%)    | 70-85                         | 95-99                                       | 80-90                           | 80-90                           |
| עלות יחסית          | נמוכה (זולה ביותר)            | גבוהה                                       | בינונית                         | בינונית                         |
| בטיחות              | בטוחה, אך דליפת חומצה אפשרית  | סיכון להתלקחות, דורשת BMS                   | בטוחה, סיכונים מינימליים        | בטוחה, ללא חומרים רעילים        |
| השפעה סביבתית       | גבוהה (עופרת רעילה)           | בינונית (מיחזור מורכב)                      | נמוכה (ללא חומרים רעילים)       | נמוכה (חומרים ניתנים למיחזור)   |
| יישומים עיקריים     | התנעת רכבים, אגירה נייחת, UPS | מכשירים ניידים, רכבים חשמליים, אגירת אנרגיה | רכבים היברידיים, מכשירים ניידים | כלי עבודה, אגירת אנרגיה, אל פסק |

# עיקרון פעולה כללי של מערכות אגירה מבוססות סוללות

- מערכות אגירת אנרגיה מבוססות סוללות פועלות על בסיס המרה של אנרגיה חשמלית לאנרגיה כימית ואחסנתה, ולאחר מכן המרה חזרה לאנרגיה חשמלית לפי הצורך. התהליך כולל את השלבים הבאים:
- טעינה: כאשר יש עודף אנרגיה (למשל, מפאנלים סולאריים או רשת החשמל), החשמל מוזרם לסוללות, שם הוא מומר לאנרגיה כימית באמצעות תגובות אלקטרוכימיות. לדוגמה, בסוללות ליתיום-יון, יוני ליתיום נעים מהאלקטרודה החיובית לשלילית דרך אלקטרוליט.
- אחסון: האנרגיה הכימית נשמרת בסוללות עד שיש צורך בשחרורה. סוללות ליתיום-יון הן הנפוצות ביותר בשל צפיפות האנרגיה הגבוהה שלהן, יעילותן וחיי השירות הארוכים שלהן.
- פריקה: כאשר יש ביקוש לחשמל (למשל, בשעות שיא או בהפסקת חשמל), האנרגיה הכימית מומרת בחזרה לחשמל. יוני הליתיום נעים בחזרה לאלקטרודה החיובית, ומייצרים זרם חשמלי.

## מושגים בסיסיים

- **מערכת אגירה באמצעות סוללות** – מיתקן הכולל סוללות, מערכת טעינה, מערכת בקרה, ממירים והציוד הנלווה אליהם, אשר אוגר אנרגיה לצריכה עצמית ו/או לצרכי הזרמתה לרשת החשמל;
- **הספק נקוב – Rated Power** - הספק הטעינה/הפריקה המרבי [kW, MW] (שווה ערך לספיקה בצינור מילוי למיכל)
- **קיבול אנרגיה – Energy capacity** - יכולת אגירת אנרגיה מרבית [kWh, MWh] (שווה ערך לנפח מיכל).
- **Battery Energy Storage System - BESS** - מערכת אגירת אנרגיה באמצעות סוללות.
- **State of Charge – SoC** - מדד לרמת הטעינה של סוללה. כמה אנרגיה נותרה בסוללה ביחס לכמה היא יכולה להכיל במקסימום, מתואר על פי רוב כאחוז.

## מושגים בסיסיים

- **Battery Management System - BMS** - "מערכת ניהול סוללות" - מערכת המנטרת ומבקרת את מצב הסוללות, כולל טמפרטורה, מתח וזרם, כדי להבטיח בטיחות ואורך חיים אופטימלי.
- **Depth of Discharge - DOD** - "עומק פריקה" - מונח המתאר את אחוז הקיבול בפריקה.
- **Backup User Interface - BUI** - ממשק הקישור בין הסוללות לממיר. הממשק מאפשר שליטה על זרימת האנרגיה, תקלות, או תפקוד המערכת במצב "אי" כשהרשת מושבתת.
- **ערכ C – Capacity rate** - הוא מדד לקצב הטעינה והפריקה של סוללה. הוא מוגדר כיחס בין זרם הטעינה או הפריקה לקיבול הסוללה באמפר-שעות.

ערך  $C=1$  פירושו שהסוללה יכולה להיטען או להיפרק בזרם ששווה לקיבול שלה בשעה אחת. ככל שערך C גבוה יותר הסוללה יכולה להיטען או להיפרק מהר יותר. לדוגמה, סוללה בעלת קיבול של 10kWh וערך 2C יכולה להיטען או להיפרק בקצב של 20kW. בכלי רכב משתמשים בסוללות בעלות 6C ויותר במערכות אגירה משתמשים בסוללות בעלות 0.2C עד 1C.

## מושגים בסיסיים

- **Module Battery Management Unit – MBMU** - "יחידת ניהול סוללות מודולרית" - יחידה המנהלת מודול סוללות בודד בתוך מערכת סוללות גדולה יותר.
- **Power Conversion System - PCS** – ממיר – מערכת שממירה זרם ישר לחילופין או להפך.
- **Energy Manage System - EMS** – מערכת ניהול אנרגיה - מערכת המנטרת ובקרת את זרימת האנרגיה בתוך מערכת אגירת אנרגיה.
- **Cell State Control - CSC** - בקרה על מצב התאים הבודדים בתוך סוללת אגירה. מערכת ניהול הסוללות (BMS) משתמשת ב-CSC דרך ה-MBMU כדי לנטר ולבקר פרמטרים כמו מתח, טמפרטורה וזרם של כל תא בנפרד כדי להבטיח פעולה בטוחה ויעילה של הסוללה, ולמנוע נזק לתאים בודדים.

## מרכיבי מערכת אגירה

- **Battery Cells**: תאים בודדים, לרוב ליתיום-יון, המאורגנים במודולים ומארזים.
- **Battery Management System (BMS)**: מערכת ויסות טעינה/פריקה, מונעת טעינת יתר, מאזנת תאים, ומפקחת על טמפרטורה.
- **Inverter/Converter (PCS)**: ממיר מתח DC/AC דו כווני לפי הצורך.
- **Energy Management System (EMS)**: שולט על כלל פעולת המערכת ברמת תוכנה, כולל אסטרטגיות פעולה.
- **Cooling & Safety Systems**: מערכת קירור וניהול תרמי,
- **מערכות בטיחות**: גילוי אש, מערכות כיבוי, ניתוק בחירום.
- **מערכות תקשורת ובקרה**: חיבור המערכת לממשקי ניהול חיצוניים, כגון אפליקציות או מרכזי בקרה. המערך מאפשר גם ניטור מרחוק, עדכוני קושחה ותחזוקה חזויה.
- **תשתית חשמלית ומכנית**: ארונות חשמל ומגשים לכבלים. מערכות הארקה, מבנים או מכולות לאחסון המערכת (במערכות גדולות).

## חלוקת מערכות אגירה לפי הספקים ויישומים



- מחלקים את מערכות האגירה ל-3 סוגים עקרוניים:
1. **מערכות קטנות (Residential)** עד 10 קילוואט קיבול אנרגיה: בדרך כלל 5-20kWh
- יישומים:**
- גיבוי חשמל ביתי בזמן הפסקות חשמל.
  - אחסון אנרגיה מפאנלים סולאריים לשימוש עצמי.
  - הפחתת עלויות חשמל על ידי שימוש באנרגיה האגורה בשעות שיא.

## חלוקת מערכות אגירה לפי הספקים ויישומים

### 2. מערכות בינוניות (Commercial/Industrial)

הספק: 10 קילוואט עד 630kW.

קיבול אנרגיה: בדרך כלל מאות kWh.

#### יישומים:

- הפחתת ביקוש שיא (Peak Shaving) להפחתת עלויות חשמל.
- תגובה לביקוש (Demand Response) לתמיכה ברשת בזמני עומס.
- מיקרו-רשתות (Microgrids) לאספקת חשמל עצמאית במתקנים מסחריים.
- תמיכה בתחנות טעינה לרכבים חשמליים.



## חלוקת מערכות אגירה לפי הספקים ויישומים

### 3. מערכות גדולות (Utility)

הספק: עשרות עד מאות MW.

קיבול אנרגיה: בדרך כלל עשרות MWh.

#### יישומים:

- ייצוב רשת החשמל (Grid Stabilization) על ידי ויסות תדר ומתח.
- שילוב של אנרגיה מתחדשת בכמות גדולה.
- אספקת אנרגיה בזמני שיא ותמיכה בהתאוששות מהפסקות חשמל (עלטה).



## צימוד DC (DC Coupling)

- הסוללות מחוברות ישירות לצד ה-DC של מערכת ייצור האנרגיה (לפאנלים סולאריים) לפני המרה ל-AC.
- הפאנלים הסולאריים מייצרים מתח DC שמועבר דרך בקר טעינה MPPT (Maximum Power Point Tracking) או ממיר DC-DC.

### יתרונות:

- יעילות גבוהה: הפחתת מספר ההמרות (רק המרה אחת מ-DC ל-AC)
- עלות נמוכה יותר: פחות ממירים ורכיבים.
- שימוש בממיר היברידי שמשלב ייצור ואגירה בצורה יעילה, במיוחד במערכות סולאריות.

### חסרונות:

- טעינת הסוללות תלויה במערכת הייצור (לא ניתן לטעון מהרשת ללא ממיר נוסף).
- מורכבות תכנון: נדרשת התאמת מתחים בין הסוללות, הייצור והממיר.

## צימוד AC (AC Coupling)

- הסוללות מחוברות לצד AC של המערכת, לאחר שהאנרגיה מהייצור כבר הומרה ל-AC.
- הפאנלים הסולאריים מחוברים לממיר DC ל-AC. הסוללות מחוברות לממיר דו-כיווני נפרד שממיר AC ל-DC לטעינה ו-DC ל-AC לפריקה. שני הממירים (של הייצור ושל האגירה) מחוברים לפס משותף, שמתחבר לרשת דרך שנאי.

### יתרונות:

- גמישות גבוהה: אפשרות טעינה מהרשת או ממקורות ייצור שונים.
- מודולריות: ניתן בנקל להוסיף אגירה למערכות קיימות ללא שינוי תשתית.
- התאמה למערכות מורכבות המכילות מספר מקורות ייצור.

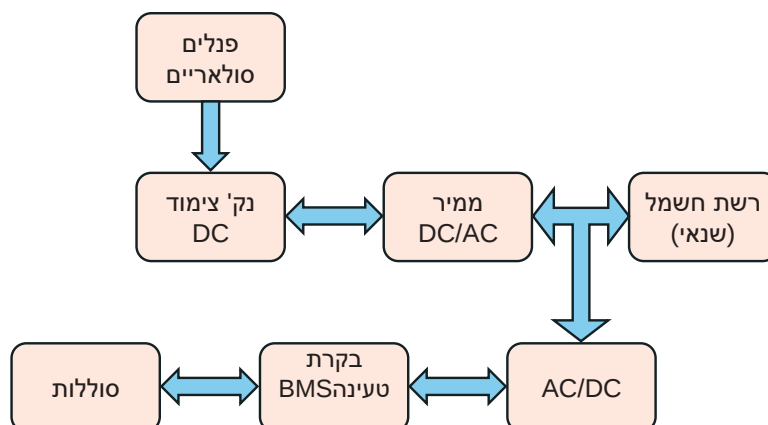
### חסרונות:

- יעילות נמוכה יותר: נדרשות המרות מרובות (DC ל-AC, AC ל-DC, DC ל-AC).
- עלויות גבוהות יותר: נדרשים ממירים נוספים ותשתית מורכבת.

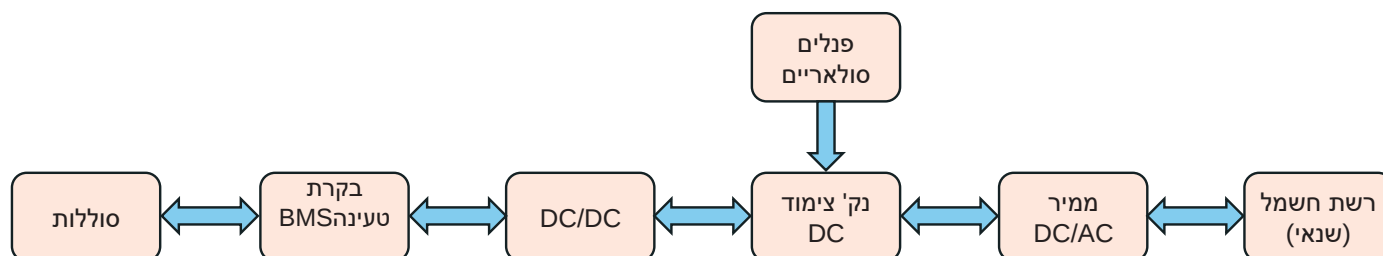
## צימוד AC מול צימוד DC

| פרמטר           | צימוד AC (AC-Coupled)                                                                                | צימוד DC (DC-Coupled)                                                                         |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| מבנה מערכת      | הסוללה מחוברת לזרם חילופין (AC) דרך ממיר נפרד מהפאנלים. ההמרה ל- AC וההמרה לאגירה עם ממירים עצמאיים. | מערכת הסוללה מחוברת ישירות לזרם הישר (לפני הממיר) הסוללה והפאנלים חולקים את אותו ממיר.        |
| יעילות המרה     | מעט פחות יעילה – נדרשת המרה נוספת (DC → AC → AC → DC).                                               | גבוהה יותר, פחות המרות אנרגיה (DC → DC → AC)                                                  |
| גמישות ושדרוגים | גמישה – קל להוסיף סוללות למערכת קיימת (PV קיימת או רשת).                                             | פחות גמישה – דורשת תכנון מראש (קשה יותר להוסיף סוללות למערכת קיימת).                          |
| שימושים עיקריים | מערכות קיימות (Retrofit) שדרוג מתקנים סולאריים קיימים.                                               | מערכות חדשות שמיועדות מהתחלה לכלול אגירה. אידאליים באזורים מרוחקים מהגרید או מערכות Off-Grid. |
| עלות כללית      | יקרה יותר – דורשת ממיר נפרד לסוללה. או ממיר הבריד                                                    | המערכת לרוב זולה יותר אם מתוכננת מראש. פחות ציוד.                                             |
| אמינות ואחזקה   | תחזוקה מעט מורכבת יותר, אך מאפשרת יותר גמישות.                                                       | פחות מורכב – פחות רכיבים.                                                                     |

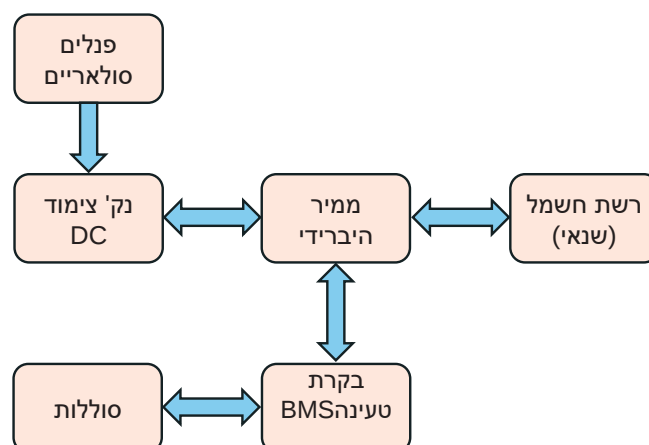
## מערכות טעינה בצימוד AC (2 ממירים נפרדים)



## מערכות טעינה בצימוד DC



## מערכת טעינה באמצעות ממיר היברידי



## מערכות אגירה קטנות וביתיות

2 טופולוגיות נפוצות:

1. ממיר דו-כיווני מבוסס גשר H (H-Bridge) שמתאים למערכות פשוטות עם סוללות במתח קבוע יחסית (מערכות עם מערכת יצוב BMS).
  2. ממיר דו שלבי שכולל ממיר DC-DC עם שנאי בתדר גבוה, משולב עם ממיר DC-AC.
  3. ממיר היברידי שמנהל במקביל אנרגיה מהסוללות, מפאנלים סולאריים ומהרשת. כולל בדרך כלל בקר MPPT
- המערכת מאפשרת זרימת אנרגיה ל-2 כוונים: פריקה (Discharge) מהסוללה לרשת או לעומסים על ידי המרה מ-DC ל-AC וטעינה (Charge) מהרשת לסוללה על ידי המרת AC ל-DC.

### רכיבים עיקריים

- טרנזיסטורי IGBT או MOSFET שמבוססים בדרך כלל על סיליקון קרביד - SiC ליעילות גבוהה.
- קבלים וסלילים לסינון ושליטה בזרם.
- שנאי בתדר גבוה (בממירים מבודדים).
- מערכת בקרה דיגיטלית.

## מערכות אגירה קטנות וביתיות – שלבי פעולה

### שלב הישור:

**מטרה:** המרת מתח חילופין מהרשת למתח ישר מתאים לטעינת הסוללה על פי רוב 48V.

### תהליך:

- **קליטת מתח AC:** מתח הרשת מוזן לממיר דו-כיווני, בדרך כלל באמצעות טופולוגיית H-Bridge או ממיר Boost עם תיקון מקדם הספק.
- **מיתוג ב-PWM:** הטרנזיסטורים מופעלים באמצעות אותות PWM בתדר (20-100kHz). ה-PWM שולט על זרם הכניסה כך שיהיה בסנכרון עם מתח הרשת, מה שמבטיח מקדם הספק קרוב ל-1 ומפחית הרמוניות.
- סליל במעגל מגביל את שינויי הזרם המהירים והקבלים מסננים את התדר גבוה של ה-PWM ומייצרים מתח DC חלק.
- **התאמת מתח:** במערכות עם סוללות במתח משתנה, מתבצע שלב DC-DC נוסף (למשל, ממיר Buck או Boost) להתאמת מתח ה-DC לרמת מתח הסוללה.
- **בקרה:** מסוג (DSP - Digital Signal Processor) לניטור מתח וזרם הרשת, מתח הסוללה וזרם הטעינה והתאמת ה-Duty Cycle של ה-PWM במטרה לשמור על טעינה יעילה ובטוחה, תוך עמידה בתקני רשת (IEEE 1547).

# מערכות אגירה קטנות וביתיות – שלבי פעולה

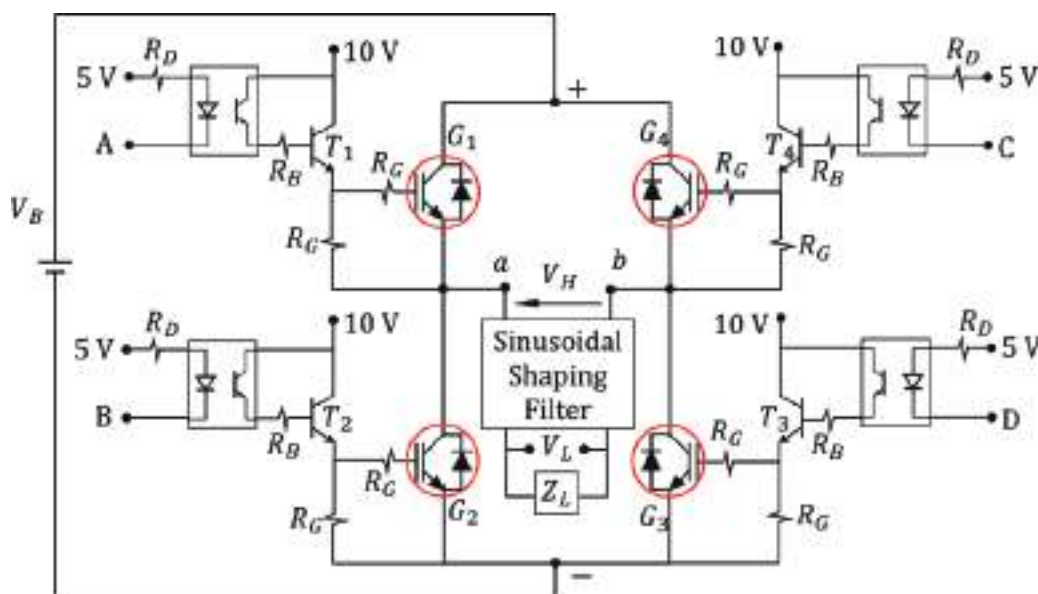
## שלב הישור:

בתהליך היישור AC ל- DC משתמשים באותה מערכת שמשמשת גם להמרת DC ל- AC ובשני המצבים ב-PWM.

השימוש ב- PWM מקנה מספר יתרונות:

1. ויסות מתח בנצילות גבוהה.
2. שליטה בצורת גל הזרם הנכנס, להפחתת עיוותים הרמוניים (THD) ושיפור מקדם ההספק.
3. PWM מאפשר שליטה על כיוון זרימת האנרגיה.
4. PWM מספק יכולת תגובה מהירה לשינויים בעומס או בדרישות מתח.

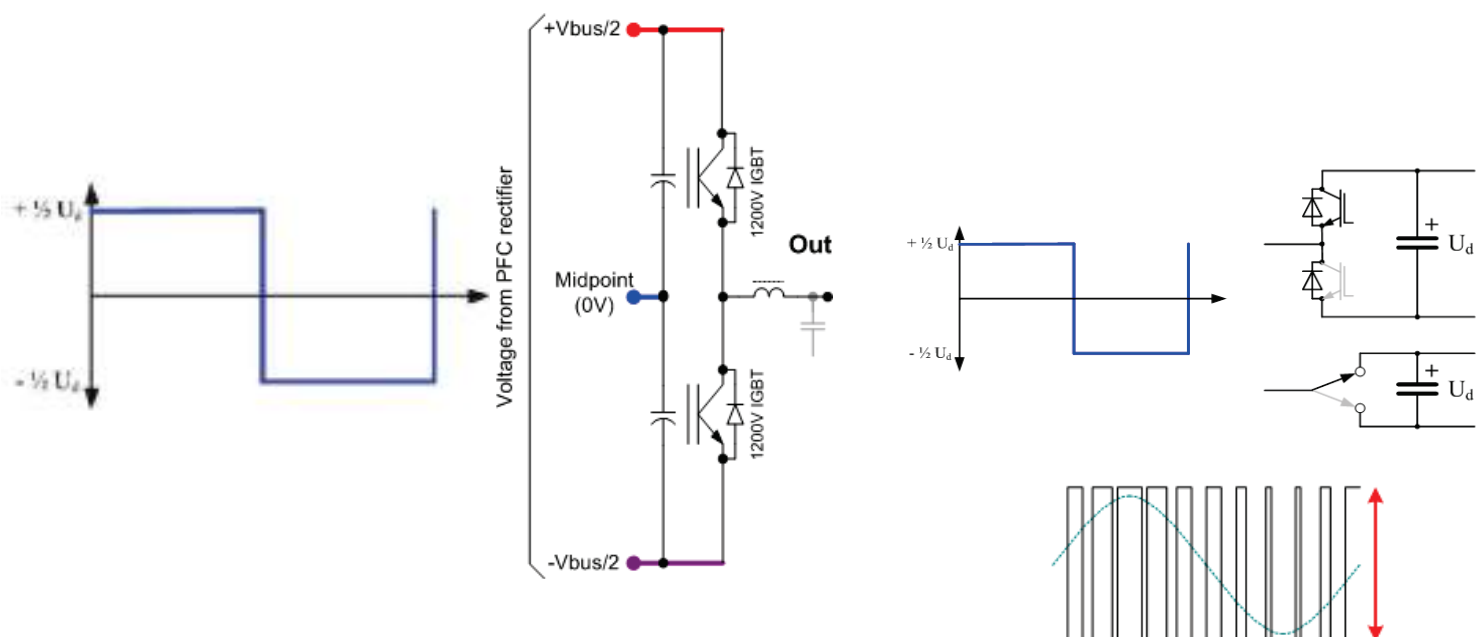
## IGBT H Bridge



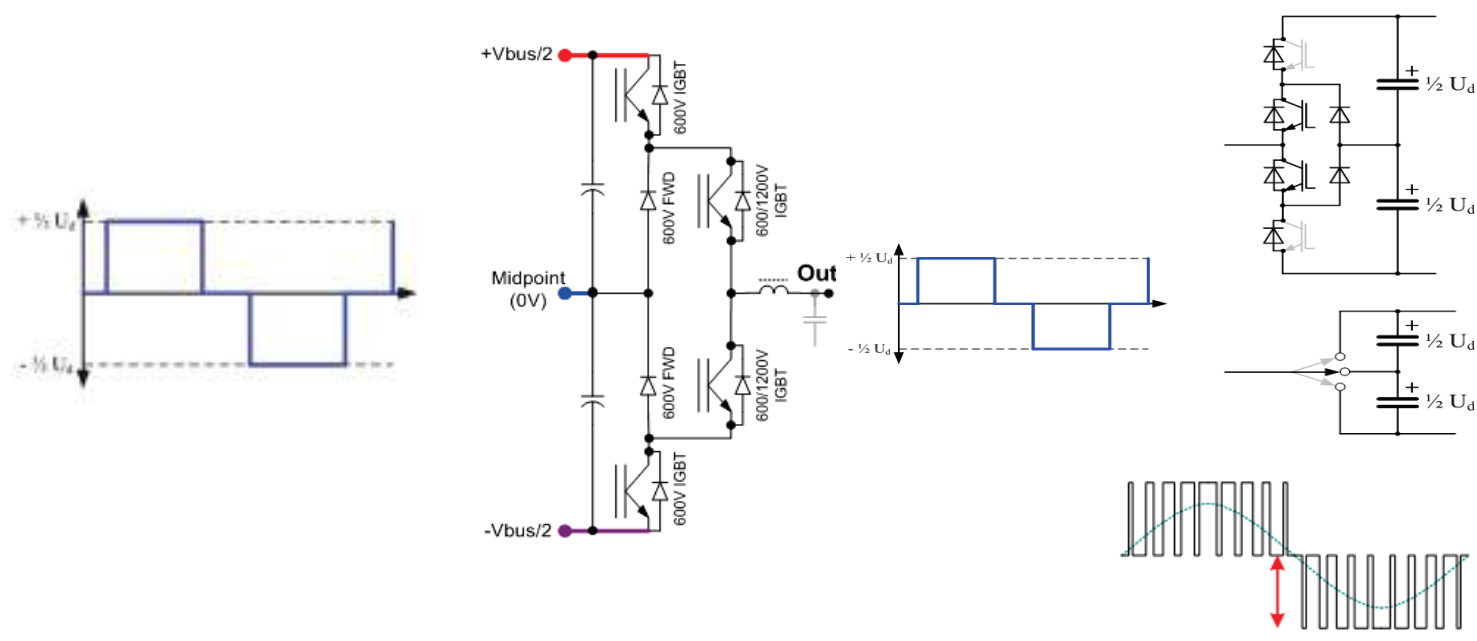
# מערכות אגירה קטנות וביתיות – הפיכת DC-AC

1. **קליטת המתח הישר:** המערכת מקבלת מתח ישר מהסוללה או ממקור אנרגיה אחר, כמו פאנלים סולאריים. במערכות ביתיות קטנות, מתח ה-DC נע בין 48V-400V תלוי בסוג הסוללה (סוללות ליתיום-יון ב- 400V נפוצות במערכות מודרניות).
2. **המרה:** ההמרה מתבצעת באמצעות ממיר חד פאזי במערכות קטנות, או תלת-פאזי המורכב מגשר בעל ששה טרנזיסטורים. לרוב משתמשים ב-IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors) בהספקים גבוהים, או ב-MOSFETs במערכות תלת פאזיות ביתיות, הגשר כולל שלוש "רגליים" כשכל רגל שייכת לפאזה אחת.
3. **שליטה על הטרנזיסטורים:** הטרנזיסטורים מופעלים באופן מבוקר באמצעות אפנון רוחב דופק (Pulse Width Modulation - PWM).
4. **סינון:** המתח עובר דרך מסנן סליל קבל ערך אופייני למערכות ביתיות,  $L=500\mu H$ ,  $C=10\mu F$ .
5. **חיבור וסינכרון לרשת:** במערכות מחוברות לרשת (Grid-Tied), מסנכרנת מערכת הבקרה את הגל המופק למתח ותדר הרשת, תוך שימוש בטכניקות כמו Phase-Locked Loop (PLL).

## המרת מתח ישר למתח חילופין ב-2 רמות בשיטת PWM

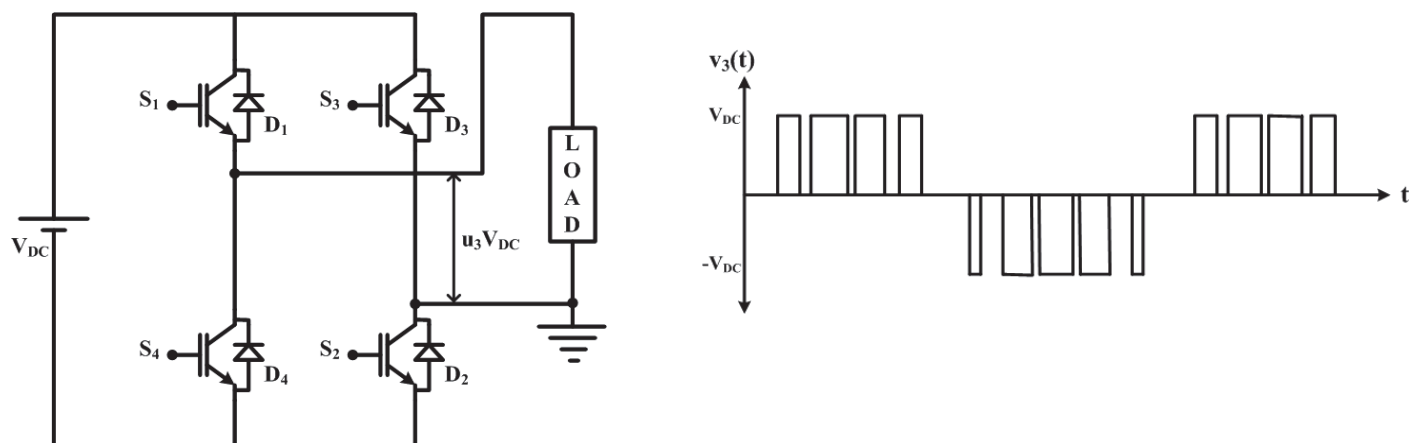


## המרת מתח ישר למתח חילופין ב-3 רמות בשיטת PWM

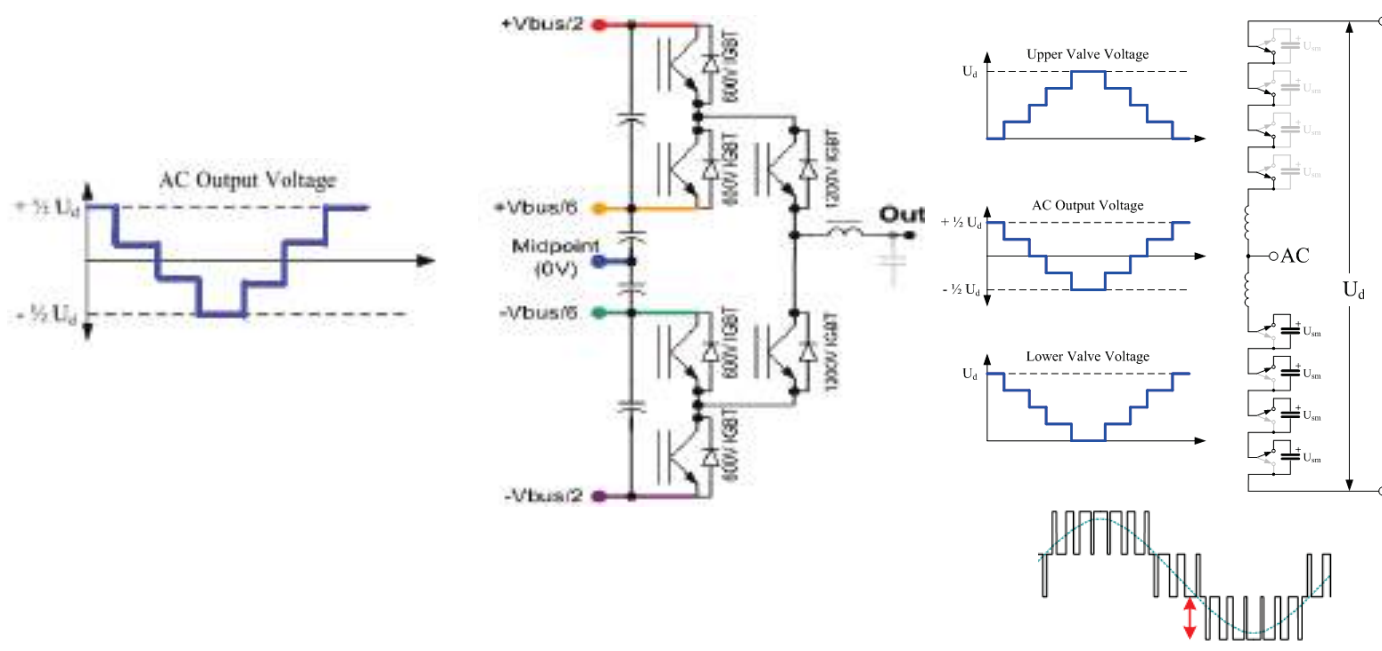


## המרת מתח ישר למתח חילופין ב-3 רמות בשיטת PWM

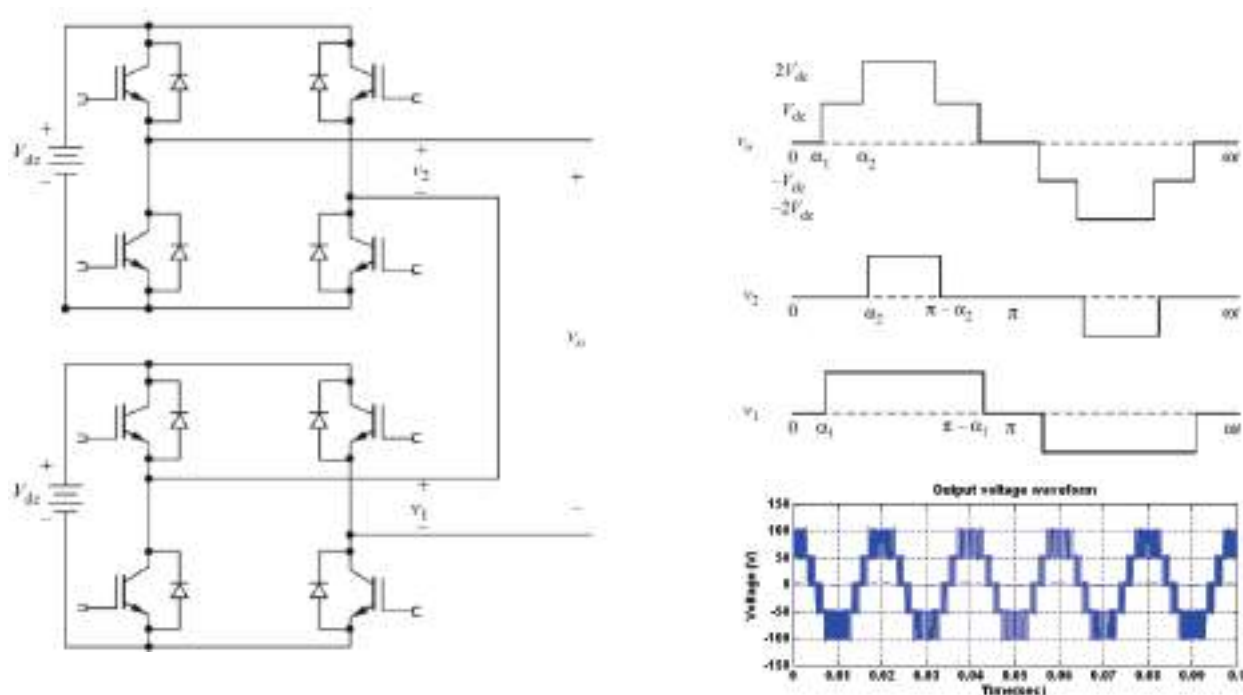
H Bridge



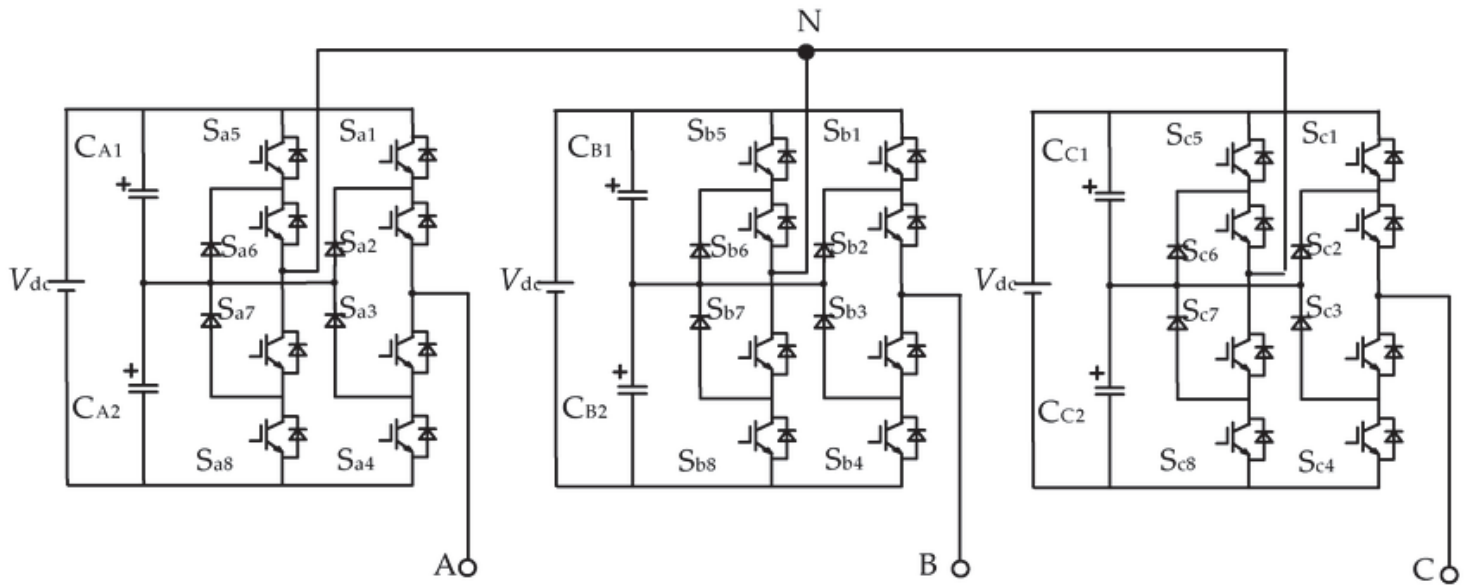
## המרת מתח ישר למתח חילופין ב-4 רמות בשיטת PWM



## המרת מתח ישר למתח חילופין ב-9 רמות בשיטת PWM



## ממיר תלת פאזי בעל 5 רמות



חלוקת המתח מתבצעת על ידי קבלים

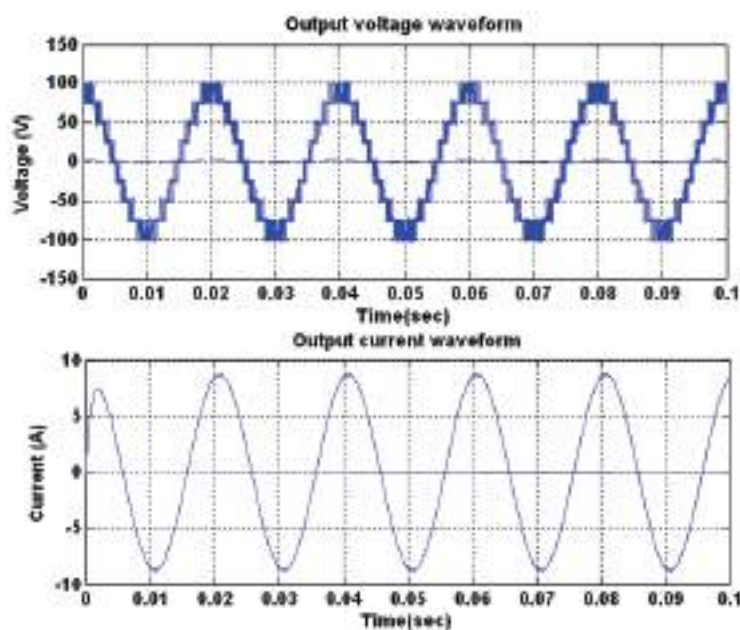
[https://www.youtube.com/watch?v=vaVnNqIMibU&ab\\_channel=OzanKeysan](https://www.youtube.com/watch?v=vaVnNqIMibU&ab_channel=OzanKeysan)

סגל אריאל WWW.arielsegal.co.il

מערכות אגירת אנרגיה

83

## המרת מתח ישר למתח חילופין ב-9 רמות בשיטת PWM



מתח יציאת הממיר  
תדר המיתוג 3kHz

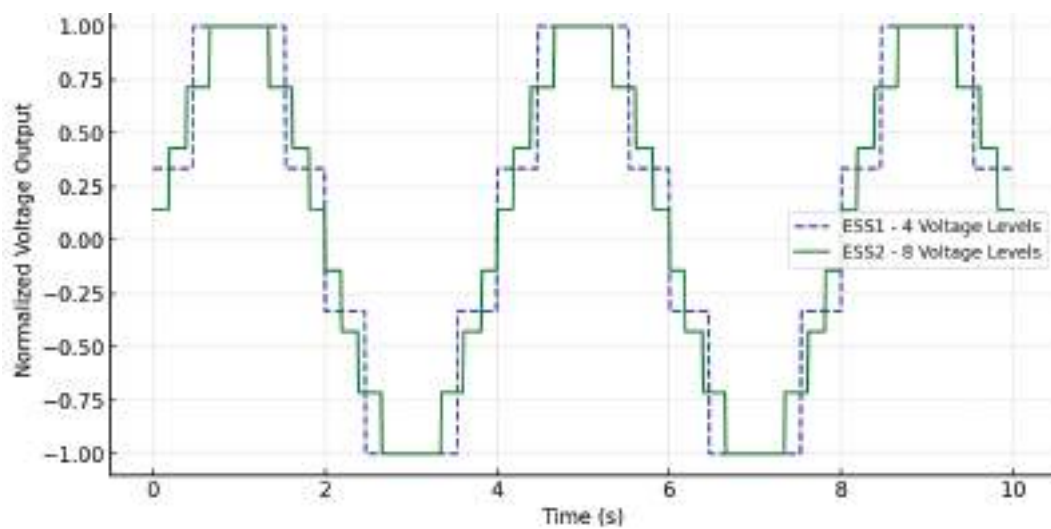
זרם יציאת הממיר  
לאחר סינון

סגל אריאל WWW.arielsegal.co.il

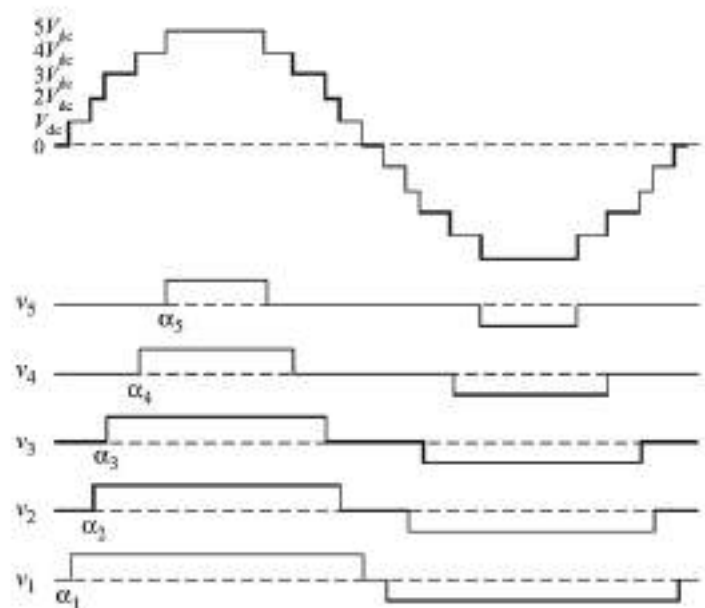
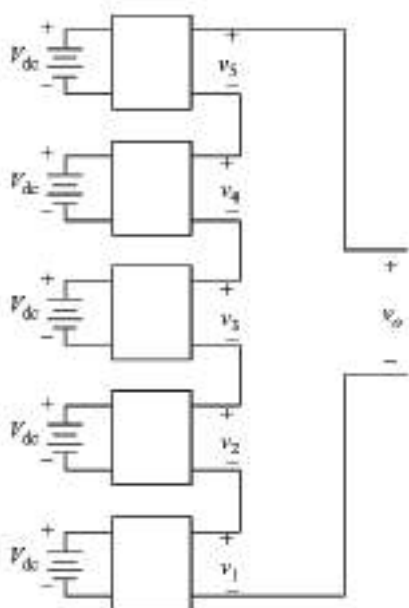
מערכות אגירת אנרגיה

84

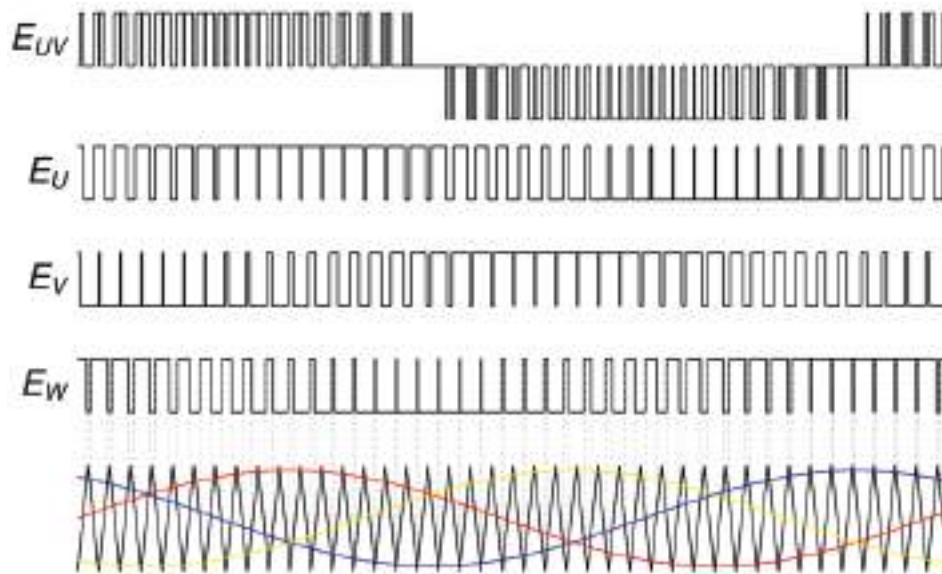
## המרה ממתח ישר לחילופין בממיר מדרגות



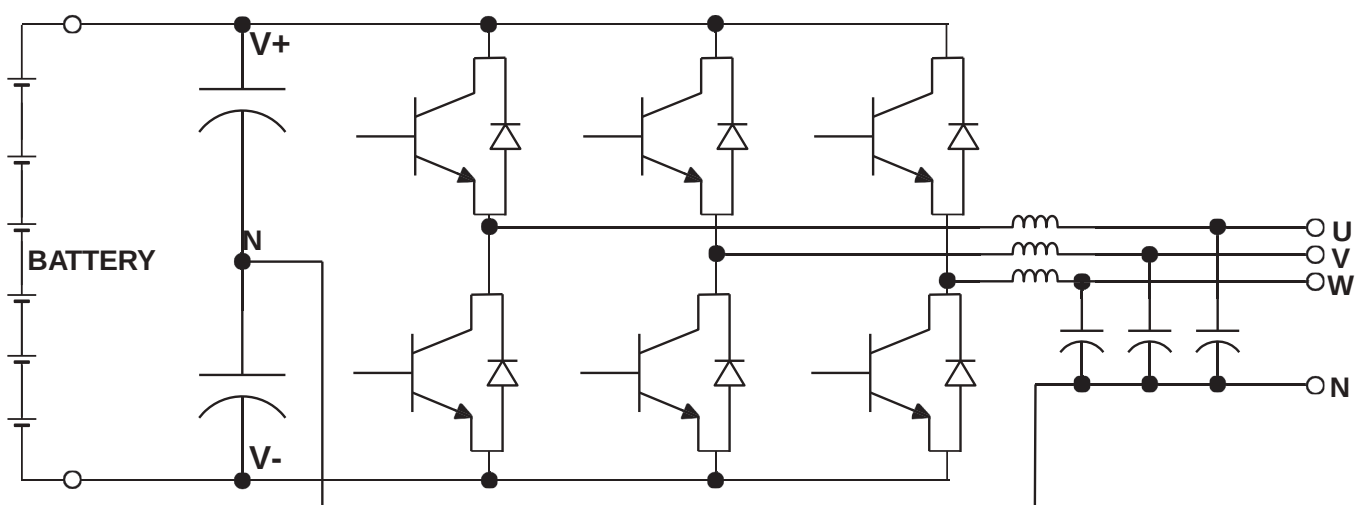
## ממיר 11 רמות



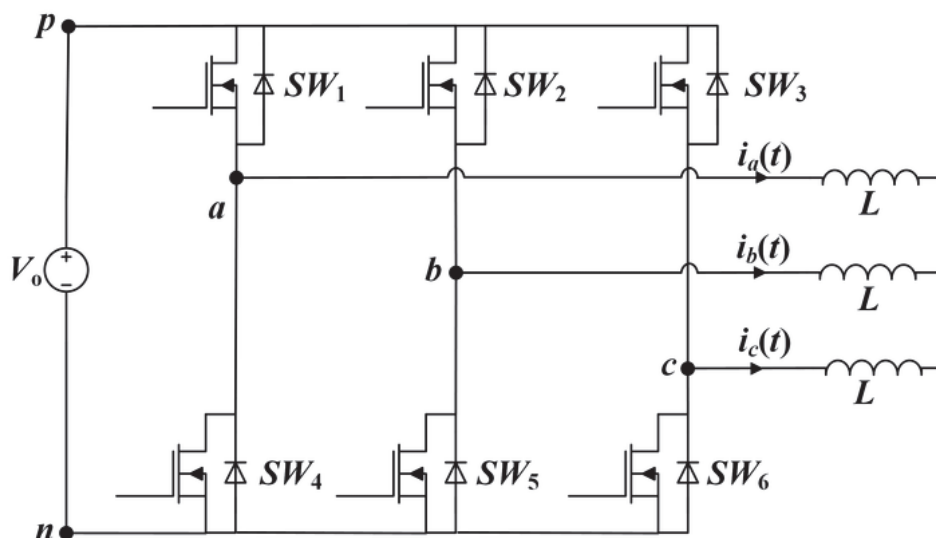
## המרה תלת פאזית 3 רמות



## ממיר תלת פאזי דו כווני IGBT



## ממיר תלת פאזי דו כווני MOSFET



## מערכות אגירה ברמה בינונית (מסחרית/קהילתית)

### רכיבים עיקריים:

- מערך סוללות: בקיבול של מאות kWh ועד מספר MWh (משולב לעיתים עם מערכות סולאריות).
- ממירים תלת-פאזיים (היברידיים) דו כוונים – (bi-directional) שמאפשרים טעינה ופריקה בהספקים של בין 50kW ל-630kW. מכילים IGBTs או SiC MOSFETs למיתוג בתדרים גבוהים.
- משרנים וקבלים לסינון.
- אפשרות פעולה במצבי **grid-forming** או **grid-following** לפי הצורך.
- מערכת ניהול אנרגיה (EMS) שמבצעת אופטימיזציה של זרימת האנרגיה. ניתנת לחיבור למרכז שליטה או לרשת מקומית/עירונית, תומכת ב־ **Demand Response** והפעלה לפי תעריפים.
- מערכות קירור אקטיביות לשמירה על טמפרטורת פעולה אופטימלית (קירור אוויר או לעיתים במים).

## מערכות אגירה בינוניות (10-630 קילוואט)

### מערך המרת האנרגיה:

ממירים תלת-פאזיים מבוססי גשר תלת-פאזי (Three-Phase Bridge) או ממירים מודולריים רב שלביים מתקדמים (Modular Multilevel Converters - MMC).

### ממיר גשר:

הממיר מורכב משישה טרנזיסטורים שמתפקדים כמתגים (בדרך כלל IGBT או MOSFET) המסודרים בגשר תלת-פאזי, בעל שלושה זרועות ושני טרנזיסטורים בכל זרוע.

בעת המרת DC ל-AC נשלטים הטרנזיסטורים באמצעות PWM ליצירת מתח AC תלת-פאזי סינוסואידלי המותאם לרשת (תדר ומתח).

בהמרת AC ל-DC לטעינת הסוללות, משתמשים בדiodות או בשליטה פעילה על המתגים באמצעות PWM או טכנולוגיות מתקדמות אחרות שמשתמשות במודלים מתמטיים שונים בהתאם לצרכים.

בקרה: מערכת הבקרה מתאמת את זרימת ההספק, שומרת על יציבות הרשת ומגנה על המערכת מפני תקלות כמו זרם יתר.

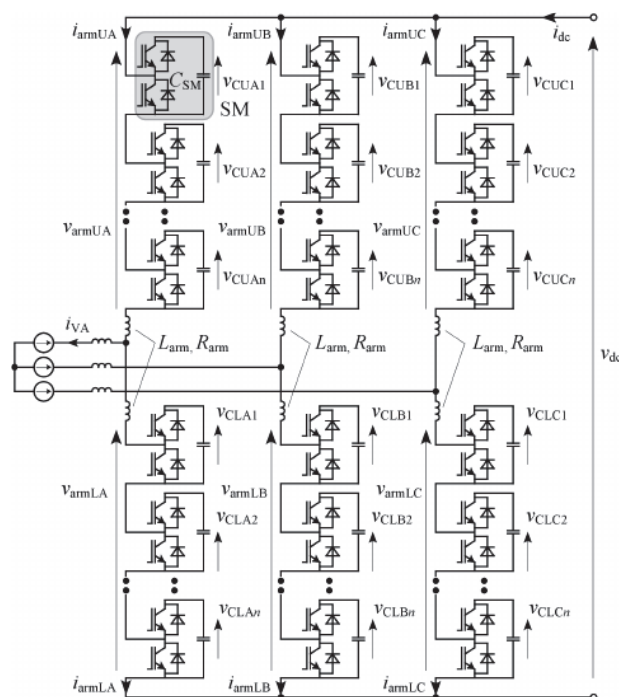
## מערכות אגירה בינוניות (10-630 קילוואט)

### ממיר רב-שלבי מתקדם – MMC - (Modular Multilevel Converters)

מייצר גל מתח עם רמות רבות (עשרות עד מאות) באמצעות תת-מודולים המחוברים בטור. הממיר משתמש בטופולוגיות כמו MMC או Cascaded H-Bridge (CHB). גל המתח קרוב מאוד לסינוסי, ולכן דורש סינון מינימלי, ומתאים למתחים והספקים גבוהים. תדרי מיתוג נמוכים יותר (2-10 קילו-הרץ), מפחיתים את הפסדי המיתוג.



## מערכות אגירה בינוניות (10-630 קילוואט)



## מערכות אגירה בינוניות (10-630 קילוואט)

**עיקרון פעולה:** המרת אנרגיה דו-כיוונית בין סוללות במתח של 400-1000V למתח חילופין תלת-פאזי 400V, 50HZ.

המרת DC-DC להתאמת מתח הסוללה למתח הנדרש.  
בקרה מתקדמת לשמירה על יציבות מתח ותדר הרשת ותיקון מקדם הספק.

- **טכנולוגיה:** שימוש ב- IGBTs מסוג SiC או GaN (Gallium Nitride) להפחתת הפסדים.
- **תדרי מיתוג:** 10-50 קילו-הרץ, תלוי בטכנולוגיה (SiC מאפשר תדרים גבוהים יותר).
- **בקרה:** אלגוריתמים מתקדמים כמו Space Vector PWM (SVPWM) או בקרת Droop כלומר תרומת הספק (P ו-Q) בהתאם לקיבול הממיר ולמקדמי ה- Droop.
- **שיטת מיתוג:** טכניקה מתקדמת של PWM המיועדת לממירים **תלת-פאזיים** (כגון גשר תלת-פאזי) ליצירת גלי מתח AC סינוסיים עם יעילות גבוהה והרמוניות נמוכות, תוך שימוש בייצוג וקטורי של מתחי הפאזות.

# טכניקות אפנון רוחב פולס PWM

| קריטריון            | PWM                                                    | SPWM                                           | SVPWM                                                  |
|---------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| הגדרה               | טכניקה כללית לשליטה על הספק באמצעות פולסים משתני רוחב. | תת-קטגוריה של PWM ליצירת גל סינוסי AC          | תת-קטגוריה מתקדמת של PWM ליצירת גל סינוסי תלת-פאזי.    |
| אות רפרנס           | כל סוג של אות (מלבני, משונן, סינוסי וכו').             | אות סינוסי בתדר נמוך (למשל, 50Hz)              | וקטור מסתובב המייצג גל סינוסי תלת-פאזי.                |
| תוצאת הפולסים       | גל מתח שרירותי, תלוי ברפרנס (לא בהכרח סינוסי).         | גל מתח שמסונן לסינוס חד-פאזי או תלת-פאזי.      | גל מתח תלת-פאזי סינוסי עם הרמוניות נמוכות.             |
| יישום               | DC-DC, בקרת מהירות מנועים, תאורה, ממירי AC כלליים.     | ממירי DC-AC חד-פאזיים או תלת-פאזיים (H-Bridge) | ממירי DC-AC תלת-פאזיים (גשר תלת-פאזי MMC)              |
| סינון               | דורש סינון משמעותי, תלוי בגל הרצוי.                    | דורש סינון מותאם לסינוס, עם הרמוניות בינוניות. | דורש סינון מינימלי, הרמוניות נמוכות מאוד.              |
| יעילות              | משתנה, תלוי ביישום.                                    | גבוהה, אך מוגבלת על ידי ניצול מתח DC.          | גבוהה מאוד, ממקסמת ניצול מתח DC (עד 15% יותר).         |
| שימוש במערכות אגירה | DC-DC, ישור (AC ל-DC)                                  | DC-AC חד-פאזי (H-Bridge) במערכות קטנות.        | DC-AC תלת-פאזי (גשר תלת-פאזי, מערכות בינוניות-גדולות). |

סגל אריאל [WWW.arielsegal.co.il](http://WWW.arielsegal.co.il)

מערכות אגירת אנרגיה

95

## המרת מתח ישר למתח חילופין סינוסואידלי

המרת המתח הישר למתח חילופין מתבצעת באמצעות 2 טכנולוגיות עיקריות:

### א. ממיר מדרגות (Step Wave Inverter)

- משתמש ברמות מתח שונות (Multilevel Inverter) שמכיל לדוגמה 5 או 7 רמות.
- הממיר יוצר גל דמוי סינוס ע"י צירוף מדרגות של מתחים חיוביים ושלייליים.
- נדרש מסנן LC להחלקת הגל.

### ב. PWM + PLL

- שיטה זו נפוצה יותר במתקנים מודרניים.
- השיטה מבוססת על יצירת גל מלבני בעל רוחב משתנה PWM (Pulse Width Modulation) כך שאחרי סינון מתקבל סינוס.
- PLL (Phase Locked Loop) עוקב אחרי הפאזה, המתח והתדר של הרשת מתאים את אות הבקרה של ה-PWM כדי להתאים את הפאזה ורמת המתח והתדר במוצא ולסנכרנם לגל הסינוס של הרשת.

סגל אריאל [WWW.arielsegal.co.il](http://WWW.arielsegal.co.il)

מערכות אגירת אנרגיה

96

# מערכות אגירה ברמה בינונית (מסחרית/קהילתית)

## יתרונות:

- ניהול עומסי שיא (peak shaving) להפחתת עלויות הקמת תחנות כוח וטיפול בעומסי שיא.
- גיבוי ממושך למתקנים קריטיים ביחס למערכות אל-פסק.
- יכולת לספק שירותי רשת (grid services) כמו ייצוב תדר, ויסות מתח, חיתוך שיאי ביקוש, טעינה בשעות השפל ופריקה בשעות השיא, ייצוב הרשת כשהיא מוזנת מאנרגיות מתחדשות, תמיכה באמינות הרשת על ידי תגובה מהירה לשינויי מתח או שינויי תדר, התנעה באפיסת מתח ועוד.

## יישומים נפוצים:

- מוסדות חינוך, בתי חולים, מגדלים מסחריים, מרכזים לוגיסטיים, קיבוצים.
- תחנות טעינה לרכב חשמלי עם אגירה.
- גיבוי למערכות קריטיות ומתקני תקשורת.

## מחירים

- מחיר מערכת אגירת אנרגיה בינונית נע בטווח מחירים של 250–450 דולר לקוט"ש כולל ממירים ובקרה.
- מערכת בקיבול של כ- 500kWh תעלה אם כך כ-125,000 דולר עד 225,000 דולר, תלוי ביצרן ובדרישות התקנה.



## מערכות אגירה גדולות שמחוברות למתח גבוה

### רכיבים עיקריים:

- תאי סוללה (לרוב ליתיום-יון, זרימה, או נתרן-גופרית) המחוברים בטור ובמקביל להשגת קיבול ומתח נדרשים. מאורגנים בארונות, או בתוך מכולות, או במבנים ייעודיים.
- ממירים תלת-פאזיים שמבצעים המרת מתח DC למתח AC תלת-פאזי וממירי DC-DC לטעינת מערך הסוללות.
- חיבור לרשת באמצעות שנאים להעלאת המתח לרמה המתאימה. מרבית הממירים הגדולים מוציאים מתח של 690V.
- מערכות קירור וניהול תרמי שכוללות מזגנים, מאווררים או קירור נוזלי לשמירה על טמפרטורת הסוללות.
- מערכות בקרה וניהול שכוללות מערכת ניהול סוללות (BMS) ומערכת ניהול אנרגיה.
- תשתית חיבור: לוחות חשמל מתח ישר ומתח חילופין, מפסקים והגנות.
- מכולות או מבנים שמשמשים כמארז לסוללות, לממירים ולציוד הנלווה וכד'

## מערכות אגירה גדולות שמחוברות למתח גבוה

### נקודות נוספות:

- מערך הסוללות: בקיבול של 10MWh ויותר.
- במרבית המקרים שילוב עם מערך פנלים סולאריים בהספק של מספר MW.
- מערכת תקשורת ובקרה לניטור וניהול מרחוק.
- במקרים רבים שימוש ב-Skid – ים שמכילים מערך של ממיר, שנאי, לוח מתח גבוה ולוח ראשי מהפנלים וחיבור לאגירה.
- צימוד DC בשילוב עם מערכת סולארית כשהחיבור לסוללות מתבצע לפני הממיר, או צימוד AC שבו מותקנים ממירים מזרם חילופין לישר.

## דוגמה למתח גבוה



## דוגמה לממיר במתקן גדול (SMA SCS 3600UP)



- ממיר DC-AC שפועל כגשר בין מקורות DC כמו סוללות ופנלים סולאריים לרשת זרם חילופין. תהליך ההמרה כולל מספר שלבים עיקריים:
- הממיר מקבל מתח DC בטווח 800-1500V מסוללות המבוקרות על ידי מערכת BMS או ממירי DC-DC או PV.
- הספק עד 3.6MW
- מתח יציאה 400-690V.
- נצילות המרה עד 99%.
- קירור נוזלי ומארז IP65 (התאמה להתקנה חיצונית).
- עמידה בתקנים כמו IEC 62109 ו-IEEE 1547.
- הגנת Anti islanding.

## ממירים גדולים נוספים

- Tesla Powerpack Inverter בהספק 3.5MW.
- ABB PCS120 ESS Inverter בהספק עד 4.8MW.
- GE Renewable Energy Brilliance Inverter בהספק עד 3.8MW.
- Huawei SUN2000-100KTL-M2 בהספק 3.6MW.
- Siemens Sinamics PCS7 בהספק עד 5MW.
- Sungrow SC4000UD-20 בהספק 4MW.
- Power Electronics Freesun HEC V1500 בהספק נקוב של 3.8MW.



סגל אריאל [www.arielsegal.co.il](http://www.arielsegal.co.il)

103

## השוואת תכונות ממירים

| מאפיין                     | SMA SCS 3600 UP | Sungrow SC4000UD-20 | Power Electronics Freesun HEC V1500 | ABB PCS120 ESS  |
|----------------------------|-----------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------|
| הספק נקוב                  | 3.6 מגה-וואט    | 4 מגה-וואט          | 3.8 מגה-וואט                        | 4.8 מגה-וואט    |
| טווח מתח DC                | 800-1500V       | 800-1500V           | 950-1500V                           | 600-1500V       |
| מתח AC                     | 400-690V        | 690V                | 600-690V                            | 400-690V        |
| יעילות                     | 99%             | 99%                 | 98.8%                               | 98.9%           |
| קירור                      | נוזלי           | נוזלי               | נוזלי                               | נוזלי           |
| מארז                       | IP65            | IP65                | IP54 אופציה ל-IP65                  | IP65            |
| משקל                       | ~3.5 טון        | ~3.5 טון            | ~4 טון                              | ~4.2 טון        |
| זרימה דו-כיוונית           | כן              | כן                  | כן                                  | כן              |
| בקרת קצב שינוי (Ramp Rate) | כן              | כן                  | כן                                  | כן              |
| שירותי רשת                 | כן              | כן                  | כן                                  | כן              |
| תמיכה בסביבות נפיצות       | מוגבלת          | מוגבלת              | מוגבלת                              | כן (ATEX/IECEX) |
| עלות יחסית                 | גבוהה           | תחרותית             | בינונית                             | גבוהה           |

סגל אריאל [www.arielsegal.co.il](http://www.arielsegal.co.il)

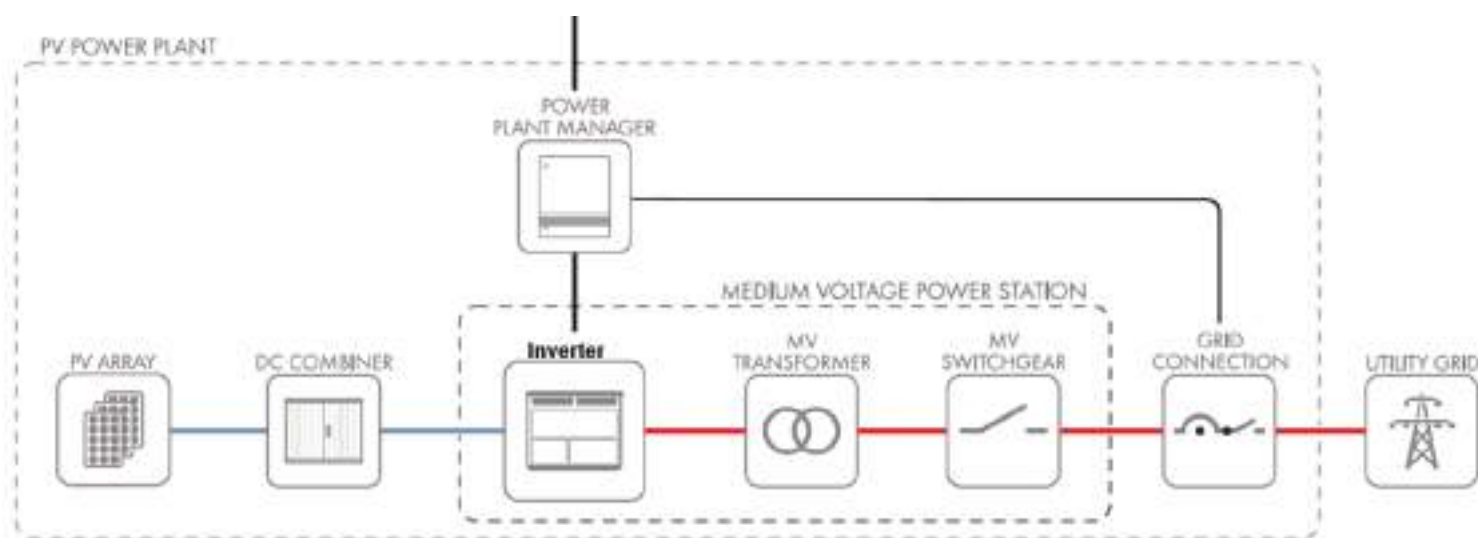
מערכות אגירת אנרגיה

104

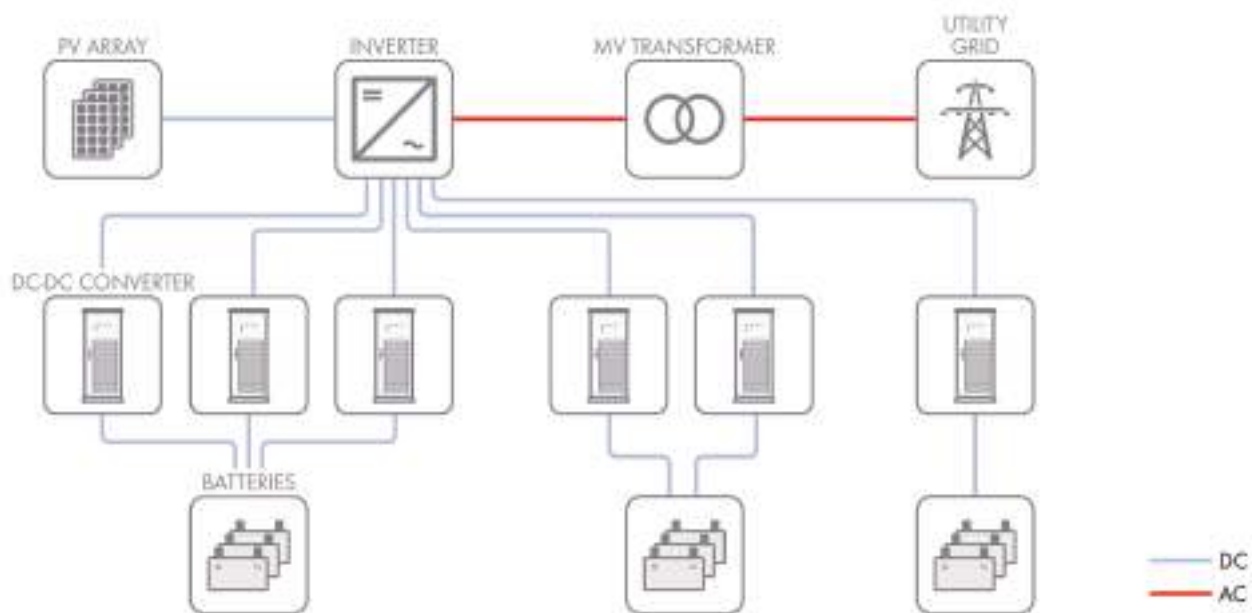
## תכונות משותפות של הממירים

- מיתוג: IGBTs או SiC MOSFETs בתצורת גשר H תלת-פאזי או ממיר רב שלבי.
- סינון: מסנני LCL להפחתת THD לערך קטן מ-3%.
- קירור: קירור נוזלי עם מחלפי חום.
- בקרה: מערכות מבוססות DSP/PLC עם ממשק SCADA, תמיכה ברשתות Modbus, CAN, ו-Ethernet.
- הגנות: מפסקים אוטומטיים לזרמי קצר גדולים והגנות anti-Islanding.

## מערך ציוד באתר סולארי שמחובר למתח גבוה



## מערך ציוד באתר סולארי שמשלב אגירה

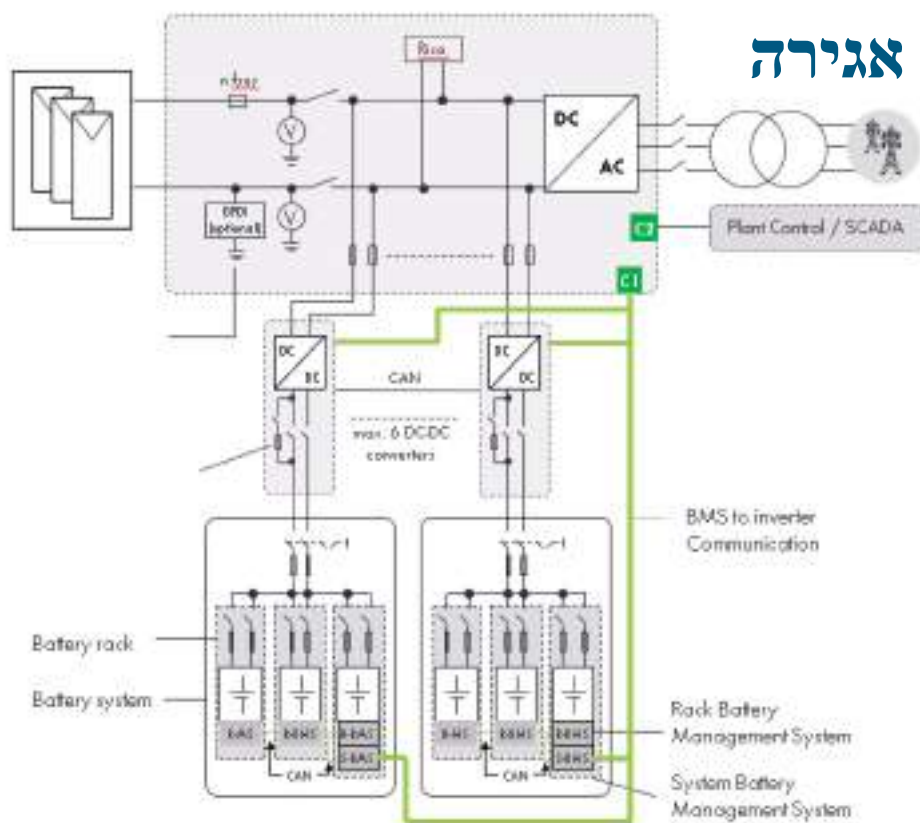


סגל אריאל [WWW.arielsegal.co.il](http://WWW.arielsegal.co.il)

מערכות אגירת אנרגיה

107

# מערך סולארי המשלב אגירה בצימוד DC

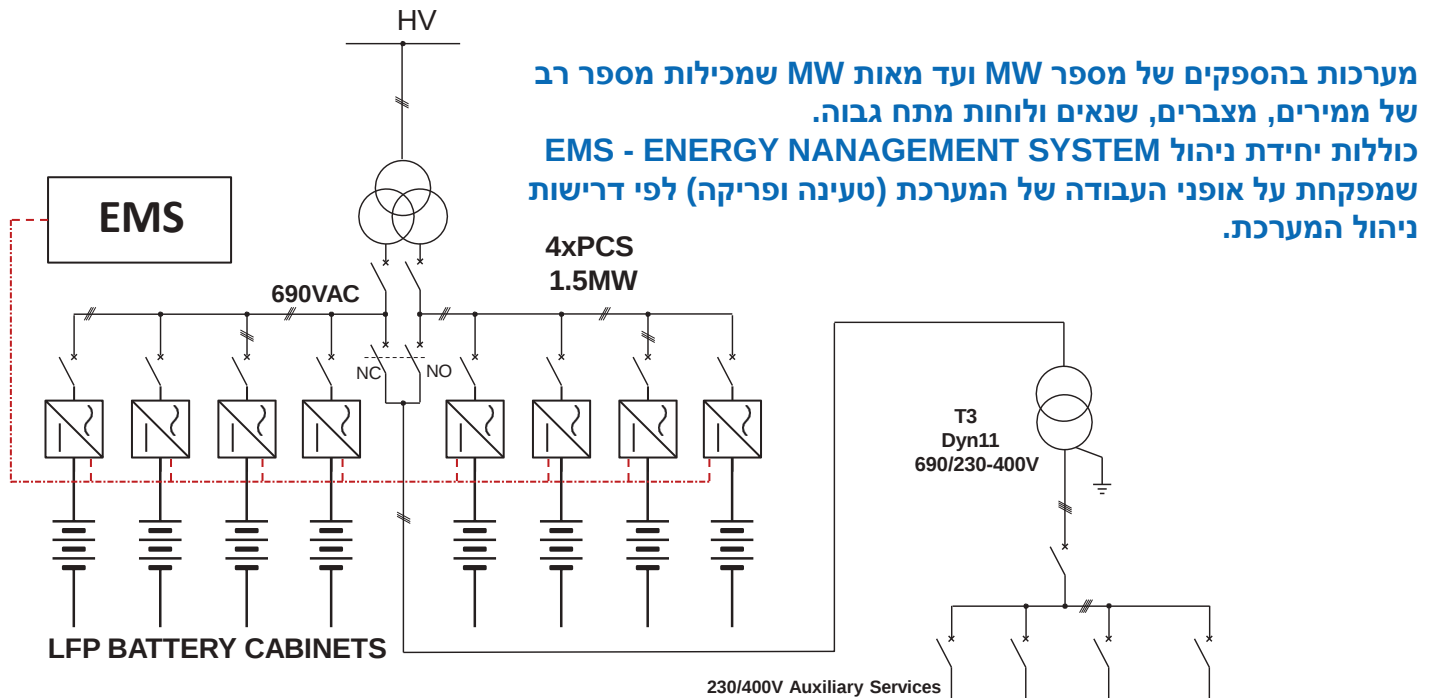


סגל אריאל [WWW.arielsegal.co.il](http://WWW.arielsegal.co.il)

מערכות אגירת אנרגיה

108

## דוגמה למערכת אגירת אנרגיה גדולה



סגל אריאל WWW.arielsegal.co.il

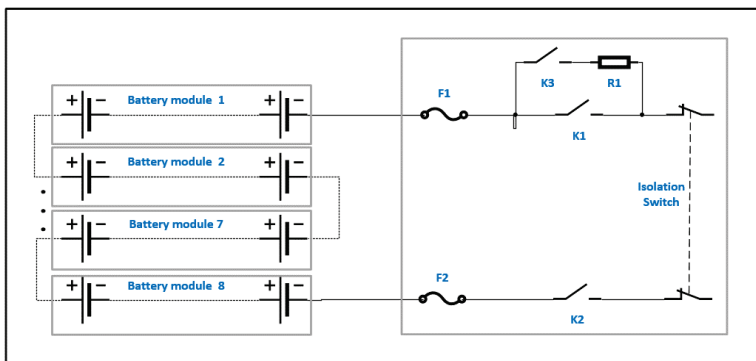
מערכות אגירת אנרגיה

109

## מערך סוללות לדוגמה – מארז בודד

מערך סוללה מדגם EnerOne+ מתוצרת CATL

- כל מארז מכיל 8 מודולי סוללה בחיבור טורי, כל מודול סוללה מורכב מ-52 תאי סוללה בחיבור טורי, כך שכל מארז מכיל סה"כ 416 תאי סוללה (306Ah/3.2V)
- המארז מקורר נוזלים



$$U = 416 \cdot 3.2V = 1331.2V \text{ המתח של כל מארז:}$$

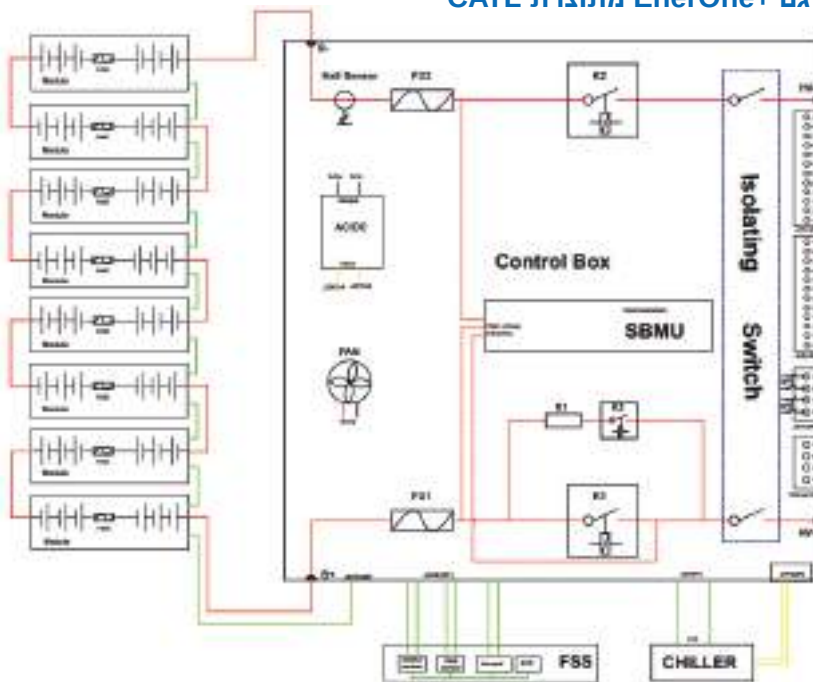
סגל אריאל WWW.arielsegal.co.il

מערכות אגירת אנרגיה

110

# מערך סוללות לדוגמה – מארז בודד

מערך סוללה מדגם EnerOne+ מתוצרת CATL



חיבור חשמלי  
תקשורת  
מיזוג

| No. | Item                   | Specification                    |
|-----|------------------------|----------------------------------|
| 1   | Configuration          | 1P416S                           |
| 2   | Weight                 | 3650±100kg                       |
| 3   | Dimension              | 2348mm(H)*1390mm(W)* 1344.1mm(D) |
| 4   | Nominal Capacity (kWh) | 407.34kWh                        |
| 5   | Voltage Range (Vdc)    | 1040~1500Vdc                     |
| 6   | Nominal Voltage        | 1331.2 Vdc                       |

סגל אריאל WWW.arielsegal.co.il

מערכות אגירת אנרגיה

111

## המרת DC-DC במערכות אגירה

- ממירי DC-DC הם רכיבים קריטיים במערכות אגירת אנרגיה, במיוחד במתקנים בקנה מידה גדול כמו מערכות סולאריות משולבות אגירה. הם מתאמים מתחים בין מקורות DC שונים כגון: פאנלים סולאריים, סוללות, או אלקטרוליזרים (מערכות יצור מימן ירוק).
- תפקידם להתאים את מתח הפאנלים הסולאריים, או הסוללות למתח הדרוש לממיר המרכזי או למערכת האגירה.
- הממירים מאפשרים טעינה ופריקה של הסוללות, תוך ניהול זרימת האנרגיה בין הפאנלים, הסוללות, והרשת.
- במתקנים בהם יש פנלים סולאריים מכילים הממירים טכנולוגיות כמו MPPT (Maximum Power Point Tracking) כדי למקסם את האנרגיה המופקת מהפאנלים הסולאריים.
- תמיכה בפונקציות כמו: Clipping Recapture (אגירת אנרגיה שנגזמת עקב מגבלות ממיר), Low Voltage Harvesting (מניעת בזבז אנרגיה במתחים נמוכים), ו-Ramp Rate Control (בקרת קצב שינוי ההספק המסופק לרשת למניעת אי יציבות).

סגל אריאל WWW.arielsegal.co.il

מערכות אגירת אנרגיה

112

# ממיר DC-DC וסוללות אגירה



ממיר DC-DC שמחובר  
ל-6 יחידות אגירה

## רכיבים עיקריים בממירי DC-DC

### יחידות המיתוג (Power Stage):

- טרנזיסטורים: מסוג MOSFET או IGBT בעלי מתח חסימה גבוה (למשל 1,700V) למיתוג בתדר גבוה (בדרך כלל 10-50kHz)
- טופולוגיות נפוצות כוללות Buck (להורדת מתח), Boost (להעלאת מתח), או Buck-Boost (פעולה לשני הכיוונים).
- אפשרויות נוספות הן שימוש בטופולוגיות כמו Dual Active Bridge (DAB) (שימוש בשנאי מבדל בתדר גבוה להעלאת או הורדת מתח), או Modular Multilevel Converter (MMC) לתמיכה בזרימה דו-כיוונית ויעילות גבוהה.
- רכיבים נוספים: סלילים וקבלים לסינון וייצוב מתח, מעגלי בקרה לניהול האנרגיה ו-MPPT ומערכות קירור.

## ממיר DC-DC מתוצרת SMA דגם DPS-500



- SMA DPS-500 הוא ממיר DC-DC דו-כיווני המיועד למערכות סולאריות ואגירה בקנה מידה גדול.
- הספק נקוב: 500kW.
- טווח מתח כניסה/יציאה: 500-1500VDC. מתאים למערכות PV ואגירה.
- יעילות: ממוצעת של כ-98.2%, הודות למיתוג רך וטופולוגיה מתקדמת.
- מצבי פעולה: תמיכה במצבי מתח, זרם, והספק, עם מעבר דינמי.
- יכולת הרחבה: עד 6 יחידות במקביל, ליצירת מערכות של עד 3MW.
- תקנים: עמידה ב- IEC 62109, UL 1741, ו-EMI/EMC.
- יישומים: Clipping Recapture, Low Voltage Harvesting, Ramp Time Shifting ו- Rate.
- קירור: מערכת קירור אוויר.
- תכונות מתקדמות: MPPT מובנה, תמיכה בזרימה דו-כיוונית.

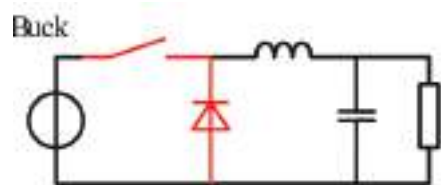
## בחירת ממיר DC-DC

- כשהמתח הנקוב של המערך הוא 1,331 וולט והקיבול הוא 407.3kWh, ו- C-Rate = 0.2 הרי שזרם הטעינה או הפריקה יהיה:

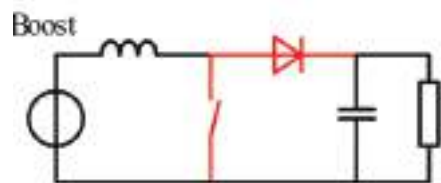
$$I = \frac{Stoered Rnergy \cdot 0.2}{U_n} = \frac{407.2 \cdot 0.2}{1,331} = 61.2A$$

- לכל יחידת המרה DC-DC בעלת הספק מרבי של 600kW במתח של 1,200V ניתן לחבר 6 עד 7 יחידות סוללות. ערך זה מכתוב גם את שטח חתך הכבלים לחיבור ליחידות האגירה ולממיר.
- בבחירת שטח חתך הכבלים יש להתחשב באפשרות של צורך דחוף באנרגיה חשמלית ופריקה מהירה יותר מ-0.2C.

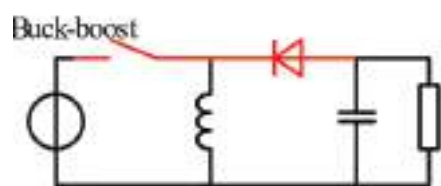
## טופולוגיות המרת DC-DC במערכות אגירה



- ממיר Buck (מוריד מתח): כשהטרנזיסטור IGBT סגור, אנרגיה נאגרת בסליל ומועברת לעומס. כשפתוח, הסליל ממשיך לספק אנרגיה דרך הדיודה.



- ממיר Boost (מעלה מתח): כשהטרנזיסטור סגור, אנרגיה נאגרת בסליל. כשנפתח, האנרגיה מתווספת למתח המקור ויוצרת מתח גבוה יותר.



- ממיר Buck-Boost: מאפשר שילוב של העלאה והורדת מתח, חיוני עבור טווח מתחי סוללה רחבים.
- ממירים מבודדים: משתמשים בשנאי בתדר גבוה לבידוד גליוני ושינוי יחס המתח.

## מערך סוללות לדוגמה – מארז בודד

מערך מדגם SunGrow PowerTitan 2.0 מתוצרת

- קיבול של כל יחידה בסיסית: 2.14MWh.
- מבנה היררכי: תאים בודדים: סוללות מסוג LFP (ליתיום-ברזל-פוספט) עם מתח של כ- 3.2V לתא
- 16 תאים בטור בכל מודול סוללה (מתח מודול ~51.2V)
- המודולים מחוברים במחרוזת של 20 עד 22 מודולים במחרוזת ויוצרים מתח של 1050-1150V.
- בארון סוללה יש 4 מחרוזות מקבילות סה"כ 1,280-1,408 תאים בארון סוללה מלא.
- קיבול תא בודד: 280-300Ah
- מערכת קירור מבוססת נוזל

לא קיימת סטנדרטיזציה של מבנה מערכי הסוללות של יצרנים שונים והמבנה של כל מארז נגזר מהיישום מהקיבול והמתח.

## המרה DC-AC דו כוונת

ממירים דו-כיווניים במערכות אגירה מבוססים על גשר תלת-פאזי ופועלים בשני מצבים: יישור מ-AC ל-DC (Rectification) והפיכה מ-DC ל-AC (Inversion).

שיטות הבקרה העיקריות כוללות:

- Pulse Width Modulation (PWM): שליטה על הטרנזיסטורים (IGBT/MOSFET) באמצעות אותות מיתוג בתדר גבוה (2-20kHz) עם רוחב פולס משתנה.
- יתרונות: יצירת מתח חילופין סינוסואידלי עם עיוות הרמוני (THD) נמוך שליטה מדויקת על זרם ומתח.
- חסרונות: הפסדי מיתוג בתדר גבוה.
- הפסדי המיתוג מתרחשים כאשר הטרנזיסטור עובר בין מצבי ההפעלה שלו, והם מורכבים משני סוגים עיקריים: הפסדי הפעלה מתרחשים כאשר הטרנזיסטור עובר ממצב כבוי למצב מוליך וכאשר הטרנזיסטור עובר ממצב מוליך לכבוי. במערכות גדולות עם זרמים ומתחים גבוהים, ההפסדים יכולים להגיע לעשרות עד מאות וואטים לכל טרנזיסטור.

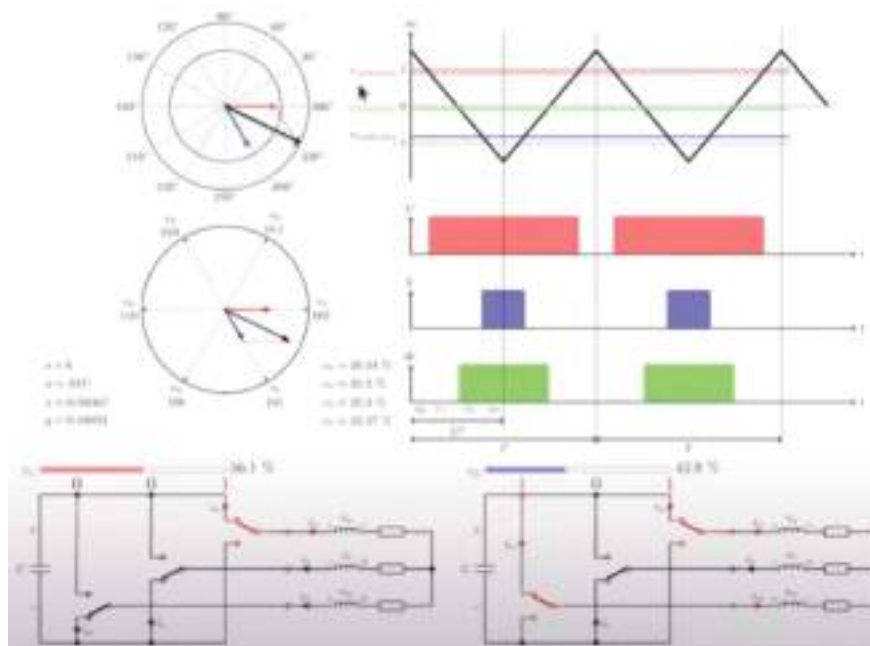
## המרה DC-AC דו כוונת

### Space Vector Modulation (SVM):

- עקרון: משתמש במרחב וקטורי לבחירת מצבי מיתוג שמקרבים את המתח הרצוי.
- יתרונות: נצילות גבוהה יותר מ-PWM (בעד 15%), הפחתת עיוותים במתח ובזרם, התאמה מדויקת של מתח ותדר, ניצול טוב יותר של מתח DC.
- חסרונות: דורש חישובים מתמטיים מורכבים בזמן אמת, מה שדורש מעבדים חזקים. מימוש מורכב יותר של מערכות הבקרה, טעויות בחישוב זווית או זמני מיתוג עלולות לגרום לעיוותים.
- בממיר תלת-פאזי יש שישה טרנזיסטורים, לפיכך ישנם שמונה מצבי מיתוג אפשריים: שישה מצבים V1 עד V6 בהם הטרנזיסטורים פעילים ושנים V0, V7 בהם כולם מופסקים. בהתאם לכך מופעלים הטרנזיסטורים לפי רצף המיתוג שנקבע, תוך שימוש בטבלת מיתוג מוגדרת מראש.

# המרה DC-AC זו כוונת

:Space Vector Modulation (SVM)



# המרה DC-AC זו כוונת

:Model Predictive Control (MPC)

- עקרון: שימוש במודל מתמטי של המערכת (ממיר, סוללות, רשת) כדי לחזות את התנהגותה בעתיד ולבחור את מצב המיתוג האופטימלי.
- יתרונות: שליטה מדויקת על זרמים, הספקים ומתחים. שילוב של מספר יעדי בקרה (זרם, הספק, הפסדים) בפונקציית העלות. התמודדות טובה עם מערכות לא ליניאריות ודינמיות. מזעור סטיות עתידיות על ידי חיזוי התנהגות המערכת.
- חסרונות: מורכבות חישובית גבוהה שדורשת מעבדים חזקים ומהירים. נדרש מודל מדויק של המערכת, שגיאות במודל עלולות לפגוע בביצועים, שינויים בפרמטרים (כגון השראות או התנגדות) עלולים להשפיע על הדיוק.
- יישומים: למערכות אגירה מורכבות עם דרישות דינמיות גבוהות (למשל, תגובה מהירה לשינויי תדר), מערכות היברידיות המשלבות סוללות, אנרגיה מתחדשת ורשת, יישומים תעשייתיים הדורשים בקרה מדויקת על הספקים פעילים וריאקטיביים.

## המרה DC-AC דו כוונת

### Direct Power Control (DPC):

- עקרון: טכניקה לשליטה ישירה על ההספק הפעיל (P) והריאקטיבי (Q) של הממיר, על ידי בחירת מצבי מיתוג בהתאם להספק הרצוי ביחס למדוד, תוך שימוש בטבלאות מיתוג מוגדרות מראש.
- יתרונות: אין צורך בלולאות זרם או חישובים מורכבים של וקטורי מתח. התאמה ליישומים הדורשים שינויים מהירים בהספק. רגישות פחותה לשינויים בפרמטרים של המערכת בהשוואה ל-MPC. והתאמה למערכות עם חומרה פשוטה יותר.
- חסרונות: תדר מיתוג משתנה עלול לגרום לאדווה גבוהה בזרם ובהספק, דיוק מופחת בהפחתת THD בהשוואה ל-SVM או PWM, התאמה פחותה למערכות עם דרישות בקרה מרובות.
- יישומים: מערכות אגירה עם דרישות תגובה מהירה (למשל, תיקון תדר). מערכות מחוברות רשת עם דרישה לשליטה בהספק ריאקטיבי. יישומים תעשייתיים פשוטים יותר שבהם עלות החומרה היא שיקול מרכזי.

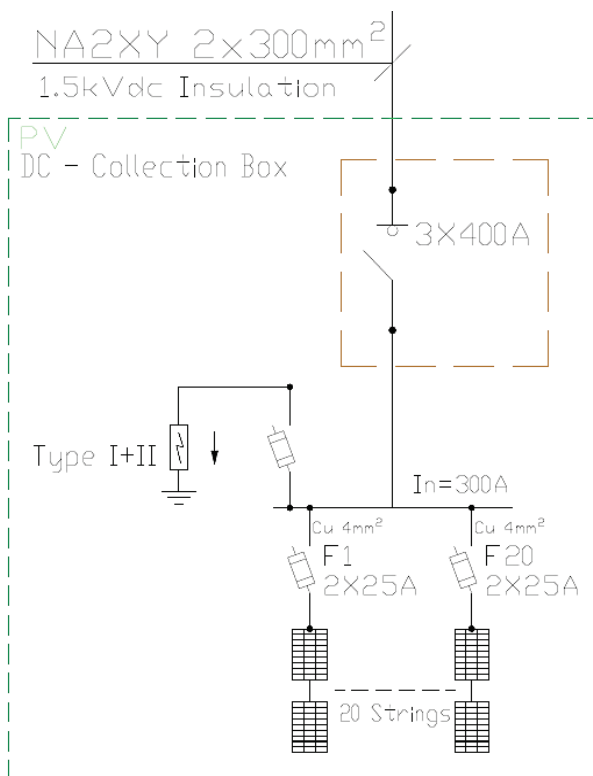
## המרה DC-AC דו כוונת

| מאפיין          | SVM                       | MPC                     | DPC                                 |
|-----------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| מורכבות חישובית | בינונית                   | גבוהה                   | נמוכה                               |
| דיוק            | גבוה                      | גבוה מאוד               | בינוני                              |
| אדווה/עיוותים   | נמוך                      | נמוך                    | גבוה                                |
| תגובה דינמית    | בינונית                   | גבוהה                   | גבוהה מאוד                          |
| תלות במודל      | נמוכה                     | גבוהה                   | נמוכה                               |
| יישומים         | מערכות מחוברות רשת, אגירה | מערכות מורכבות, דינמיות | מערכות פשוטות בהן נדרשת תגובה מהירה |

## השוואה בין סוגי טכנולוגיות המרה

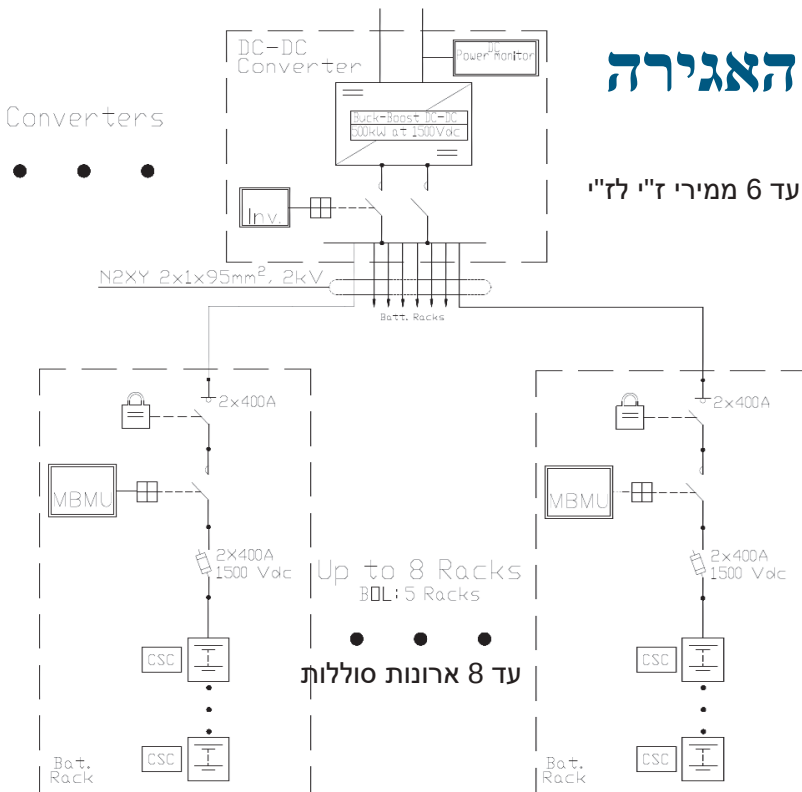
| סוג מערכות                 | ממיר PWM                                      | ממיר מדרגות פשוט                                                | ממיר רב-שלבי מתקדם (MMC/CHB)              |
|----------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| קטנות (עד 10 קילוואט)      | נפוץ (H-Bridge עם SPWM פשוט וחסכוני).         | משמש לעיתים (כשנדרשת עלות נמוכה ואיכות גל סבירה).               | לא נפוץ (מורכב ויקר מדי).                 |
| בינוניות (עד 630 קילוואט)  | נפוץ (גשר תלת-פאזי עם SVPWM יעיל ותואם רשת).  | משמש לעיתים (במיוחד ביישומים פשוטים עם דרישות הרמוניות נמוכות). | משמש ביישומים מתקדמים ותעשייתיים          |
| גדולות (מעל ל-630 קילוואט) | פחות נפוץ (מוגבל בשל הרמוניות ודרישות סינור). | לא נפוץ (לא מתאים למתחים והספקים גבוהים).                       | נפוץ לעומסים גבוהים לקבלת איכות גל מעולה. |

## המערכת הסולארית



## מערכת האגירה

עד 6 ממירי ז"י לז"י



## שיקולים בתכנון מערכת משולבת

- יכולת הרחבה עתידית (Scalability). תכנון בגישה מודולרית, המאפשרת הוספת תאים, מודולים, או מכולות שלמות בהתאם לצרכים.
- אופטימיזציה כלכלית – יחס עלות-תועלת לאורך מחזור החיים. שיקולים של מספר מחזורי טעינה ופריקה, תחזוקה מזערית, שקלול של עלויות שטח, מיקום, אפשרויות חיבור למערכות סולאריות, ניצול אופטימלי וכד'.
- Redundancy - יתירות לשם אמינות תפעולית (למניעת נקודת כשל בודדת), גיבויים.
- שילוב תוכנת EMS – לניהול חכם של אנרגיה לפי תרחישים ותעריפים, חיזוי והחלטות בזמן אמת, ניהול האגירה לפי תחזיות מזג אוויר ודפוסים היסטוריים.
- התאמת פרופיל האגירה לפרופיל הייצור והצריכה, ניתוח עומסים יומי ושבועי, קביעת רמת אנרגיה אגורה שתתאים למרבית המקרים אך גם תיתן גיבוי חירום.

## אתגרים והתמודדות עם בעיות

| אתגר                         | הסבר                                                                                                                                                  | דרכי התמודדות                                                                                                                 |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| הזדקנות סוללות (Degradation) | קיבול הסוללה יורד עם הזמן, בעקבות תהליכים כימיים פנימיים.                                                                                             | בחירת סוללות עם מספר רב של מחזורי חיים (LFP, NMC), ניהול תרמי אופטימלי, והגבלת עומק פריקה (DoD) לאזור 80% לשיפור אורך החיים.  |
| חימום יתר (Thermal Runaway)  | תהליך בלתי הפיך של עליית טמפרטורה פנימית שעלול להוביל לשריפה.                                                                                         | התקנת BMS מתקדם עם ניטור בזמן אמת, מערכות קירור אקטיביות, חיישני טמפרטורה וסידור הסוללות באופן שתתאפשר זרימת אוויר בין התאים. |
| כשל בממיר (Inverter Failure) | תקלה בממיר משביתה את היכולת לפרוק/לטעון אנרגיה.                                                                                                       | יתירות (Redundancy) בממירים (N+1), בקרה על זרמים ורמות עומס, תכנון לפי רמות זרם שיא ולא ממוצע.                                |
| איבוד סנכרון עם הרשת         | בעת חיבור מחדש אחרי הפסקת חשמל, יש להיזהר מסנכרון לקוי שיכול לגרום לנזק לרכיבים או לאספקה לא יציבה. לעתים נוצר איבוד בשל קפיצות פתאומיות במתח וברקים. | ממיר עם יכולת סנכרון אוטומטי (PLL) בקרת אפס מעבר (Zero Crossing), המתנה עד ייצוב תדר ומתח לפני חיבור מחדש.                    |

## אתגרים והתמודדות עם בעיות

| אתגר                        | הסבר                                                                                                       | דרכי התמודדות                                                                                                                      |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| פרופיל טעינה/פריקה לא מתאים | חוסר התאמה בין מועדי ייצור סולארי לבין צריכת האנרגיה בפועל מוביל לניצול חלקי או לא יעיל.                   | שימוש במערכת EMS חכמה שיוודעת לחזות צריכה וייצור, ניתוח עומסים, פרופיל עומס חשמלי, ניתוב אופטימלי של האנרגיה בהתאם למחירים ולצרכים |
| תקשורת לקויה בין רכיבים     | BMS, EMS התקשורת בין הממירים ורכיבי מדידה – עלולה לגרום לפעולה שגויה ולפגיעה ביכולת ניהול האנרגיה.         | שימוש בפרוטוקולי תקשורת פתוחים ותקניי (MODBUS, CAN), חיבור לרשת מקומית אמינה (LAN) עם גיבוי, מערכות ניטור והתראות בזמן אמת.        |
| רגולציה וחיבור לרשת         | תהליך החיבור לרשת החשמל המקומית, עשוי לכלול דרישות רגולטוריות מחמירות, ולפעמים מגבלות על הזרמה חוזרת לרשת. | תכנון בתאום הרגולטור המקומי, שימוש בממירים בתקני (UL 1741, IEC62933), תכנון הספק מותאם כדי להימנע מהצורך באישורים מורכבים.         |
| תחזוקה וזמינות חלקים        | זמינות חלקי חילוף, בקרים וסוללות מהווה אתגר בשוק משתנה ומתחדש.                                             | בחירת ספקים מוכרים ובעלי שירות לטווח ארוך, חוזי שירות עם זמינות חלקים, מערכות עם גישה מרחוק לאבחון תקלות מראש.                     |

## אתגרים והתמודדות עם בעיות

| אתגר                                  | הסבר                                                                                                                      | דרכי התמודדות                                                                                                      |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| עלויות בלתי צפויות                    | עלויות תפעול, תחזוקה, כשלים בלתי צפויים, חוסר התאמה בין ציוד מתוצרת יצרנים שונים וחיבור לרשת עשויות לחרוג מהתכנון המקורי. | חישובי TCO (Total Cost of Ownership) מלאים מראש, הערכת רזרבות תקציב, סימולציות תרחישים כלכליים לפי שינויי תעריפים. |
| תקלות בשל מזג אוויר, חדירת בעלי חיים. | חדירת מים, או חדירת בעלי חיים לתוך הציוד עלולים לגרום לכשלים ואף השבתה של חלקים ניכרים במתקן                              | אטימה מחדירת מים ומחדירת בעלי חיים, מלכודות וכד'                                                                   |