

חדירת מתקני ייצור מבוזרים DG לרשת מתח גבוה: השפעות תפעוליות ודרכי התמודדות

עבור כנס מהנדסי חשמל אילת 2017



מציג : עדי זדה

מטרה ויעדי העבודה

מטרה:

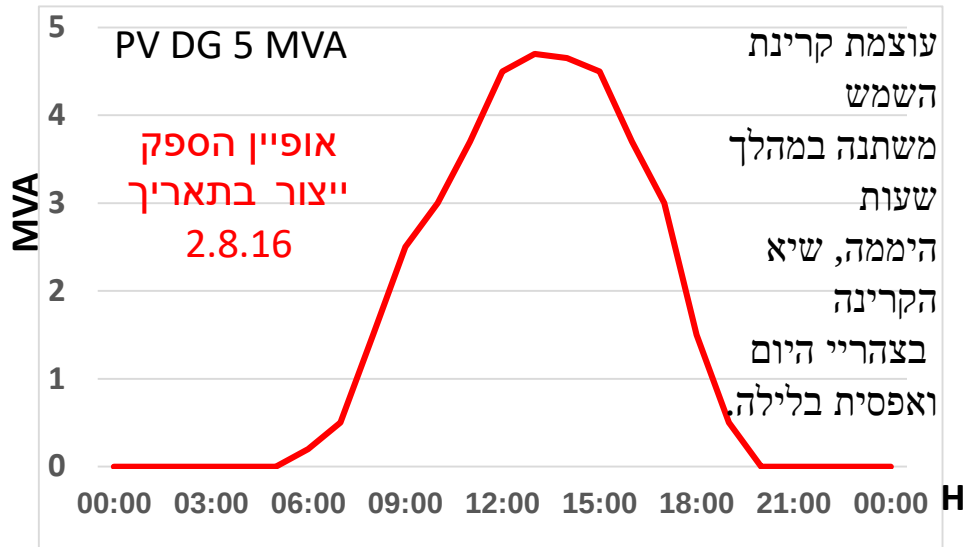
התמודדות עם חדירת מתקן ייצור Distributed Generation DG לרשת מתח גבוה, היוצרת השפעות שליליות הקשורות לפרמטרי איכות החשמל (מתן דגש על איכות המתח) ולאי יציבות מקור האנרגיה של מתקן ייצור מסוג אנרגיות מתחדשות (Non Dispatch).

יעדים:

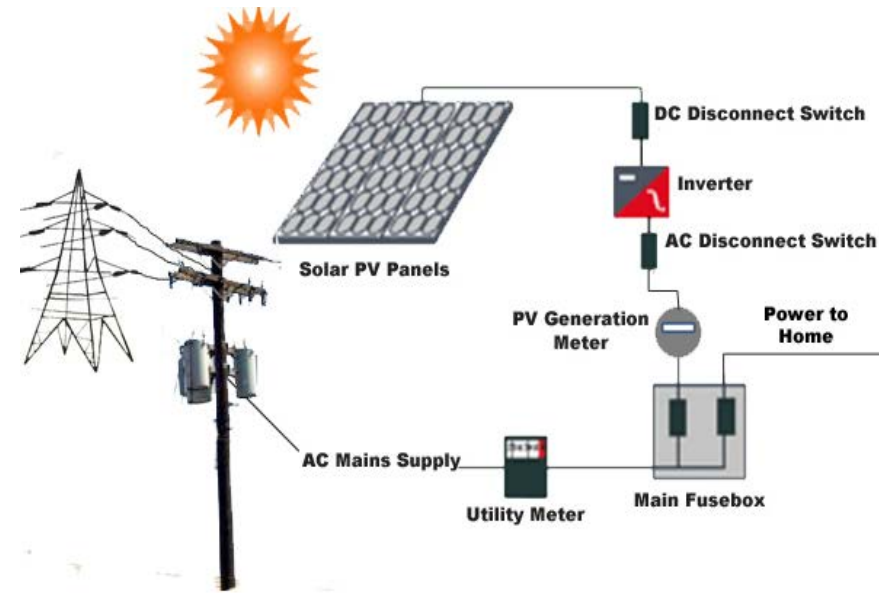
- הצגת טכנולוגיית מתקני הייצור DG השכיחים בארץ: פוטו-וולטאי, טורבינת רוח.
- הצגת רשת חלוקה מתח גבוה מסורתית ורשת חלוקה מתח גבוה אקטיבית.
- הצגת האמצעים להתמודדות עם ההשלכות התפעוליות הנגרמות בקו מתח גבוה עקב חדירת מתקן ייצור DG.
- אמצעים קונבנציונליים: א. הגדרת גורם הספק מתאים שבו יעבוד מתקן הייצור DG.
- ב. שימוש במשנה הדרגות בתחמ"ש.
- אמצעים המבוססים על טכנולוגיות מתקדמות: א. מערכת ה STATCOM.
- ב. משנה הדרגות האלקטרוני.
- ג. מערכת אגירת אנרגיה.

טכנולוגיה סולרית - מערכת פוטו-וולטאית

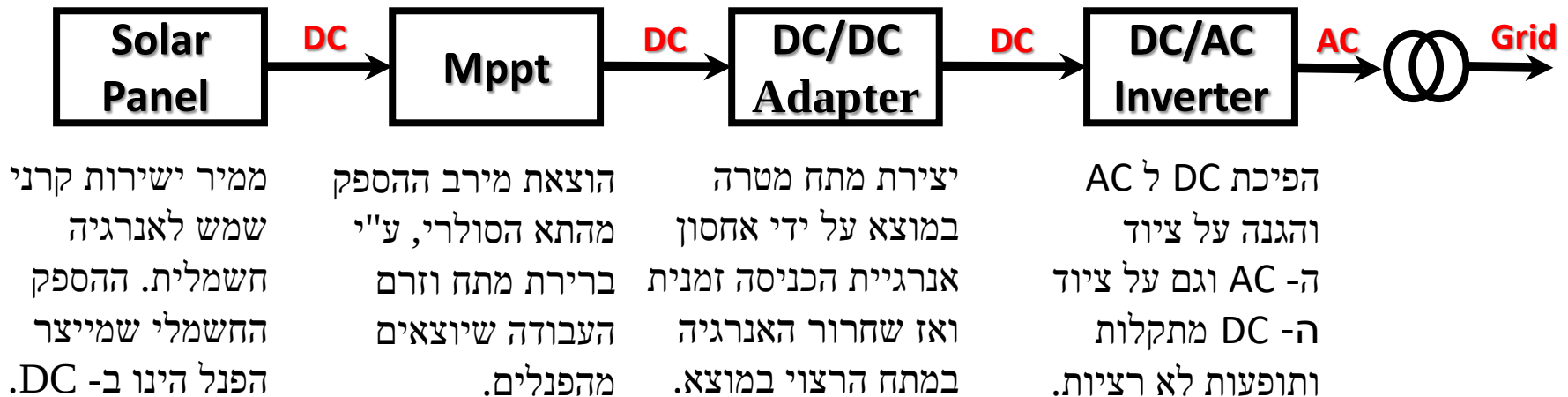
אופיין הספק ייצור



מבנה כללי

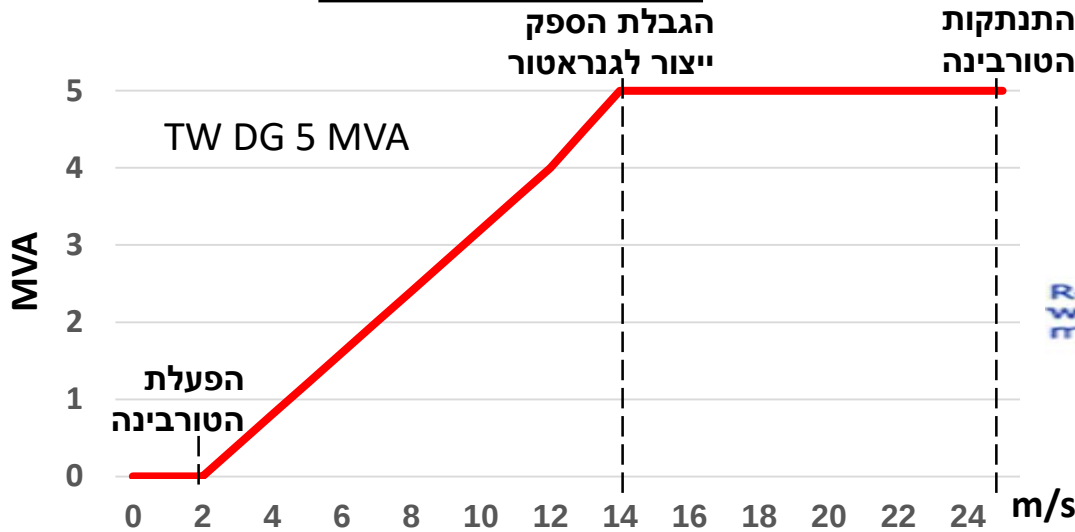


דיאגרמת בלוקים



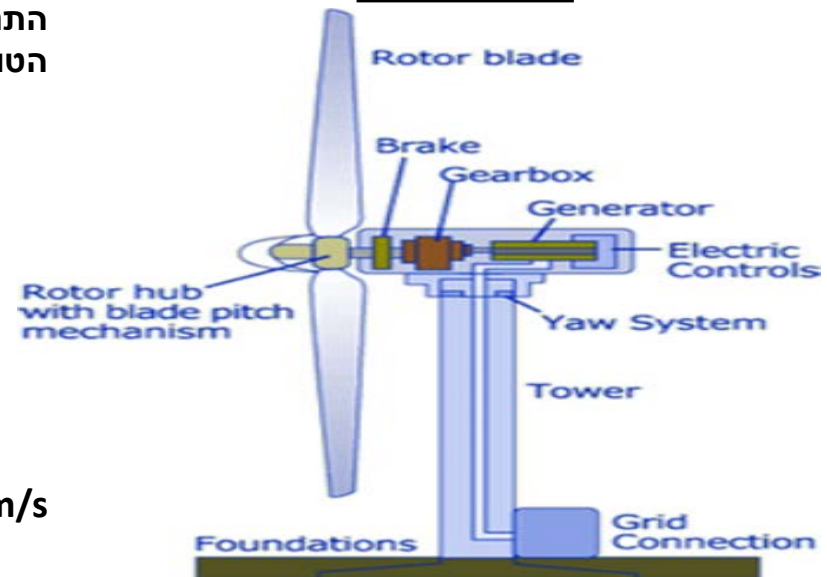
מערכת טורבינת רוח

אופייין הספק ייצור



עוצמת הרוח דינאמית מאוד ומשתנה בזמנים קצרים מאוד (שניות).

מבנה כללי



דיאגרמת בלוקים



הלהבים הופכים את האנרגיה של תנועת הרוח בקו ישר לתנועה סיבובית של המדחף.

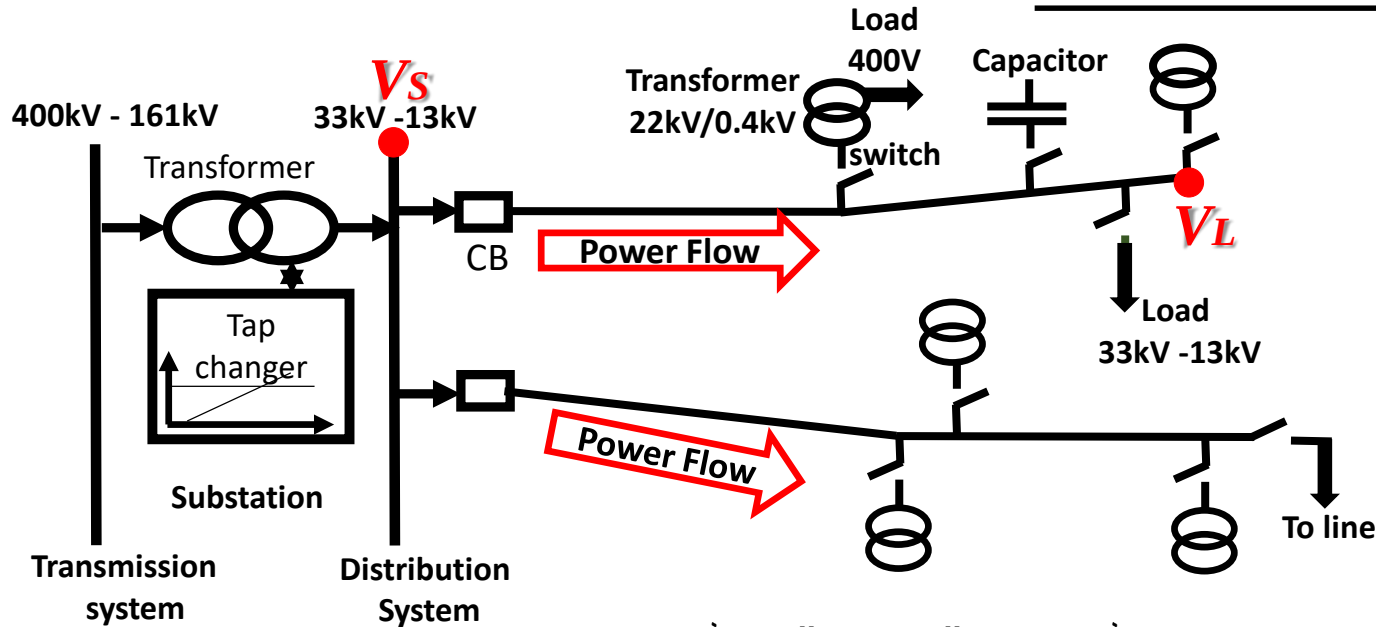
מאפשר לבצע שינוי ביחס התמסורת ובכך להקטין את גודל הגנרטור.

המרת התנועה המכנית לחשמל.

ממיר הבונה ערוץ DC לצורך בנק מצברים, סכמות בקרה וכן להפחתת זרמי הקצר.

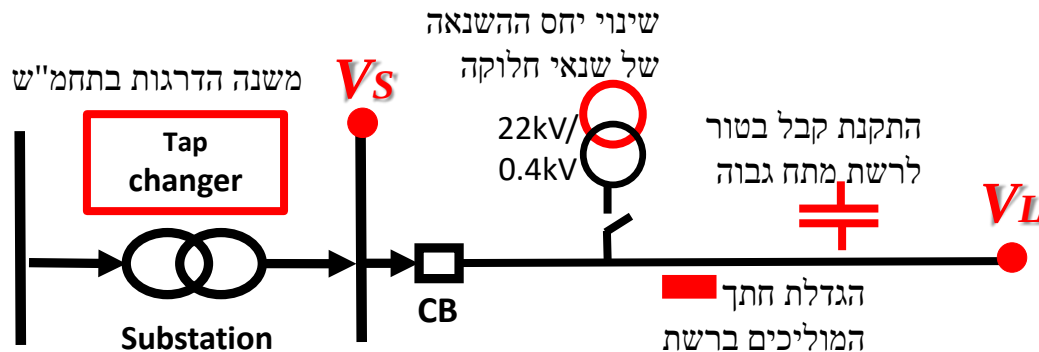
רשת חלוקה מתח גבוה מסורתית

סכמה חשמלית רשת מתח גבוה מסורתית



- זרימת האנרגיה בקו הינה בכיוון אחד מתחילת הקו בפ"צ בתחמ"ש אל קצה הקו.

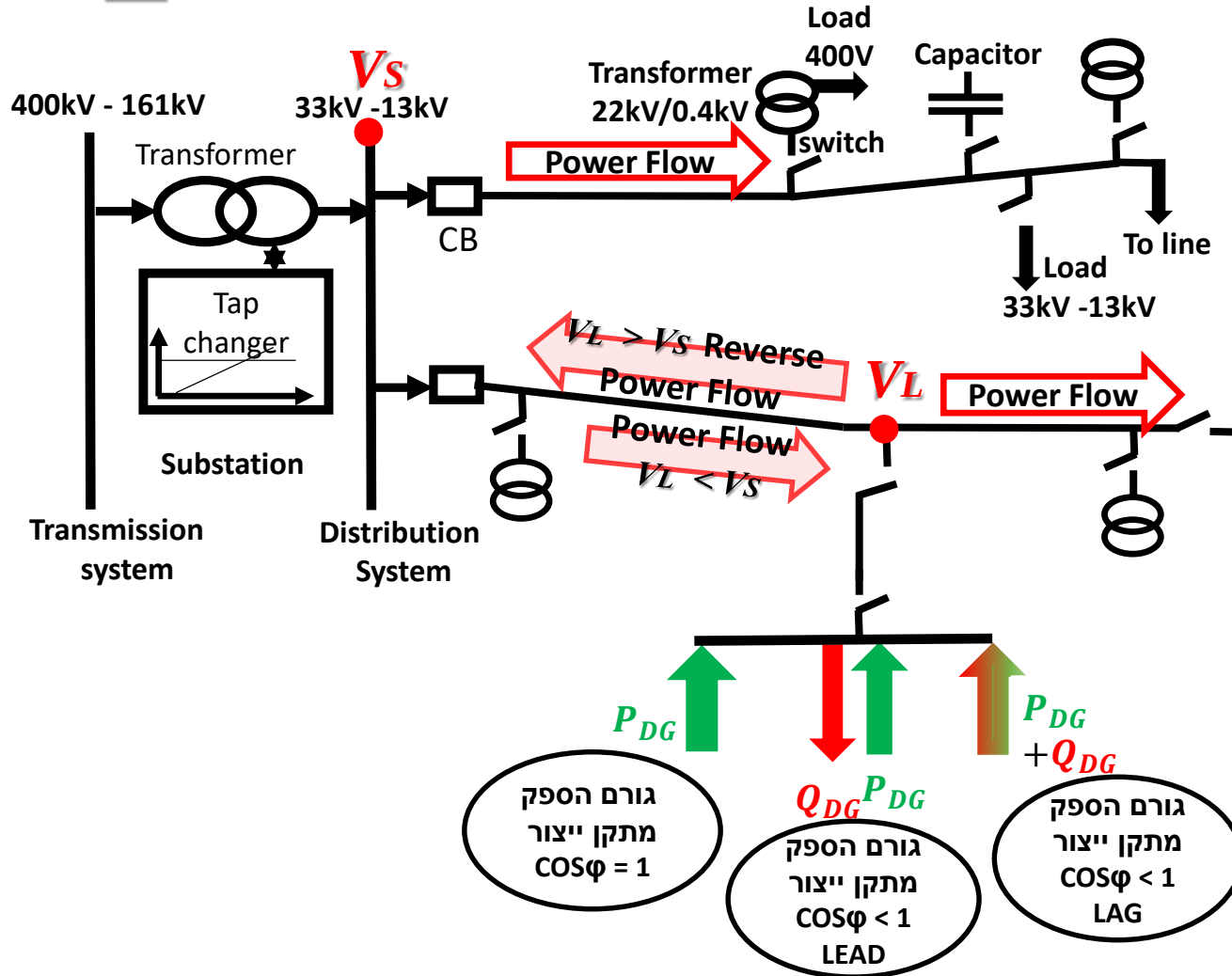
גורמים לשינוי מתח ברשת החלוקה והשיטות לויסות המתח



- קצרים ברשת (תוצאה מתקלות, ברקים וכו').
- שינויי מתח פתאומיים הנובעים מפעולות מיתוג.
- מפלי מתח הנובעים מחיבור עומסים למערכת.

רשת חלוקה מתח גבוה אקטיבית

סכמה רשת חלוקה מתח גבוה אקטיבית – 2 קונפיגורציות למעבר הספקים (תלוי ב- V_L)

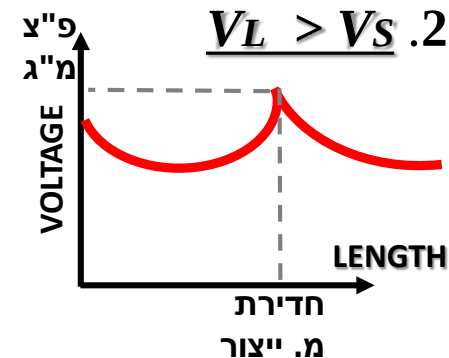
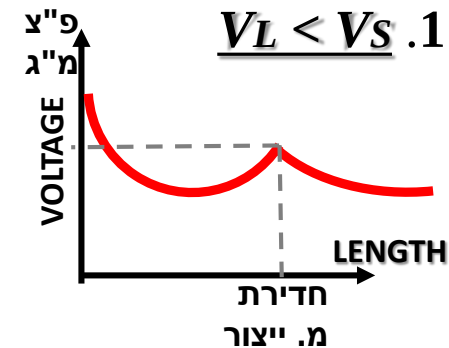


ΔV - הגדרת שינוי המתח

בנקודת החיבור המשותפת

$$\Delta V = V_L^{DG} - V_L^{no DG}$$

ΔV מינימלי ככל האפשר



- כיוון זרימת האנרגיה בקווים מתח גבוה תהייה תלויה בהיקף הייצור במתקן הייצור DG ובעומס של הצרכנות בקו באותו הזמן.

השפעת מתקן ייצור DG על רשת החלוקה

- מתקני ייצור מסוג אנרגיות מתחדשות כגון חוות רוח ושמשי גדולות מוגדרות כ-Non Dispatch, אי היכולת לקבוע מראש את הספק הייצור, אי היכולת לעקוב תמיד אחר הביקוש ואי היכולת לבצע בקרת שליטה על הספק הייצור.
- מתקן ייצור DG מתחבר לרשת מתח גבוה בד"כ לפי מיקומו הגאוגרפי. ברשת מתח גבוה שלא הייתה מתוכננת לקליטת מתקן ייצור DG הספק המתקן ייתכן ויגדיל את העומס העובר במקטעי הרשת מתח גבוה הסמוכים לו ובוודאי בנקודות החיבור לרשת (העמסת מוליכים, שנאים וציוד רשת אחר).
- ברשת מסורתית זרם התקלה זורם בכיוון אחד בלבד אולם בעת חיבור מתקן ייצור DG לרשת מתח גבוה מצב זה יכול להשתנות וזרם התקלה יכול לזרום בשני כיוונים. הפסקת שווא של קווים ונקודות מתות שאינן בטוחה ההגנות.
- פעולת הגנות תקינה נדרשת גם בצד מתקן הייצור DG ואלה צריכות להבטיח סלקטיביות, תגובה מהירה ורגישות.
- שילוב של מתקני ייצור DG לצד צרכנים בקו מתח גבוה מהווה יתרון בכך שאספקתם המקומית לצרכנים הנ"ל מקטינה את הזרם הנצרך בקו (ובכך מקטינה את האבודים הנלווים לו).

השפעת מתקן ייצור DG על איכות החשמל

השפעת מתקן הייצור על איכות החשמל בקו מתח גבוה נמדדת בשני נקודות קריטיות

- בנקודת החיבור המשותפת – המטרה לקבל את שינויי המתח הקטנים ביותר בהשוואה לרשת מתח גבוה ללא חיבור מתקן ייצור.
- בפס הצבירה שבתח"ש – עליית המתח בפס הצבירה עלולה להביא לעליית מתח בקווים נוספים המחוברים לאותו פס צבירה..

שלושת הסיבות העיקריות לשינויי המתח בנקודות החיבור המשותפת

- שינוי הספק המוצא של מתקן הייצור לרבות פעולות מיתוג בצד המתקן.
- תצורת הרשת הקיימת בנקודת החיבור המשותפת.
- מקדם הספק מתקן הייצור - ע"י בחירת מקדם הספק מתאים יהיה ניתן להקטין את שינויי המתח בנקודת החיבור המשותפת. לקבלת שינויי מתח הקטנים ביותר נדרוש לחבר מתקן ייצור בגורם הספק השראי כלומר המתקן מספק הספק אקטיבי לרשת וצורך הספק ריאקטיבי מהרשת.

- במערכת PV הגדרת גורם ההספק בו המתקן יעבוד נעשה בממיר DC/AC Inverter.

- במערכת TW הגדרת גורם ההספק בו המתקן יעבוד נעשה בגנראטור.

בקרת מתח באמצעות מערכת STATCOM

התקנת מפצה סטטי סינכרוני STATCOM - Static Compensator בצד מתקן הייצור

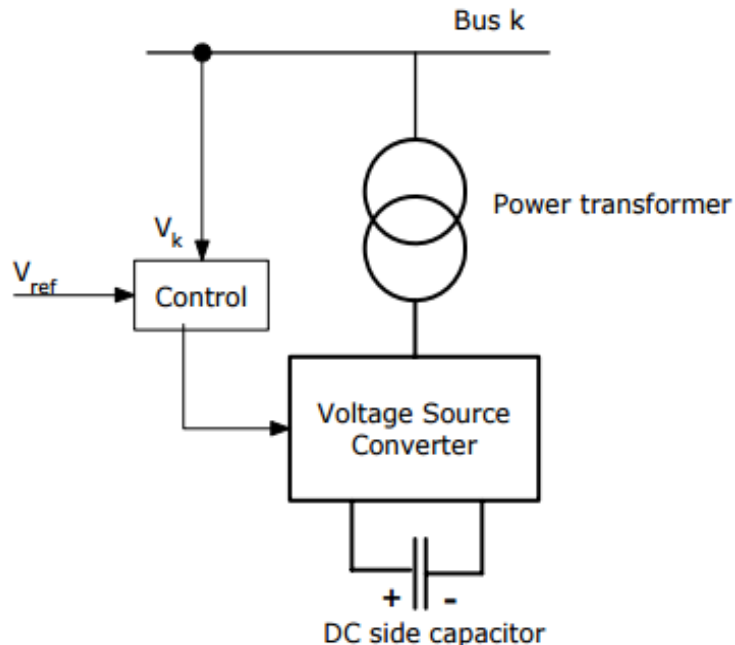


מטרת מערכת STATCOM:

שמירה על רמת מתח תקינה בנקודת החיבור המשותפת ע"י שליטה על ההספק הריאקטיבי בנקודת החיבור ברשת. מפצה סטטי סינכרוני מתנהג כקבל בעל ויסות רצוף של הקיבול ומתנהג כסליל בעל ויסות ריצוף של ההשראות ובעל תגובה מידית לאות הבקרה.

מבנה עיקרי מערכת STATCOM

- בקר VSC הבקר מתנהג כסליל או כקבל כתלות בזווית ההצתה.
- מקור האנרגיה של הבקר הוא קבל המייצר מתח DC בכניסה למערכת VSC הממירה מתח DC ל- AC של הרשת.
- יחידת מחשוב אשר דוגמת את המתח בנקודת החיבור המשותפת



בקרת מתח באמצעות מערכת STATCOM

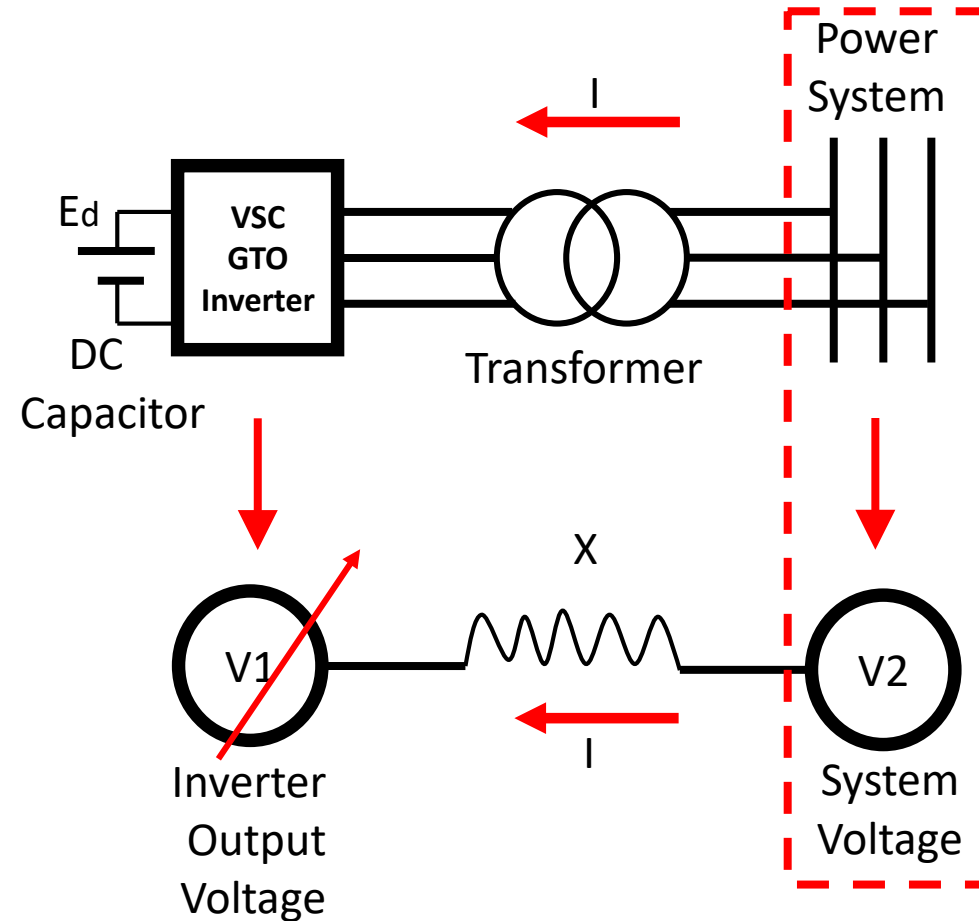
שיטת עבודת מערכת STATCOM

ההספק העובר מהמערכת לרשת יהיה כפונקציה של הפרש המתחים שבין מתח הרשת V_2 למתח המפצה V_1 .

• $V_1 = V_2$
המערכת לא בפעולה.

• $V_1 > V_2$
לצורך עליית המתח ברשת מתח גבוה בנקודת החיבור המשותפת המערכת מחזירה הספק ריאקטיבי לרשת.

• $V_1 < V_2$
לצורך הורדת המתח ברשת מתח גבוה בנקודת החיבור המשותפת המערכת צורכת הספק ריאקטיבי מהרשת.



מתקני יצור DG ומערכות לאגירת אנרגיה

התקנת מערכת אגירת אנרגיה בצד מתקן הייצור



מטרת מתקן אגירת אנרגיה

פתרון בעיית ה-Non Dispatch – אי היכולת לקבוע מראש את הספק מתקן הייצור (לבצע שליטה ובקרה על הייצור), אי היכולת לעקוב תמיד אחר הביקוש.

היתרונות העיקריים למערכת אגירת אנרגיה:

- העברת אנרגיה ממתקן הייצור לרשת החלוקה בצורה מבוקרת ובזמנים מוגדרים מראש (זמני שיא).
- העברת אנרגיה ממתקן הייצור לרשת החלוקה תוך שמירה על ספי הפרמטרים איכות החשמל.

2 סוגים עיקריים של מערכות אגירת אנרגיה

1. Short Term Variability

מערכות אגירת אנרגיה עבור השלמת אנרגיה ממתקן ייצור לטווח קצר מספר שעות בודדות ועד יממה. בדרך כלל נשתמש במערכות האגירה הנ"ל עבור שיפור איכות החשמל כתוצאה מתגובה מידית של המערכת.

- אגירת אנרגיה כימית – מצברים / מצברי זרימה
- אגירת אנרגיה חשמלית – קבל / סליל

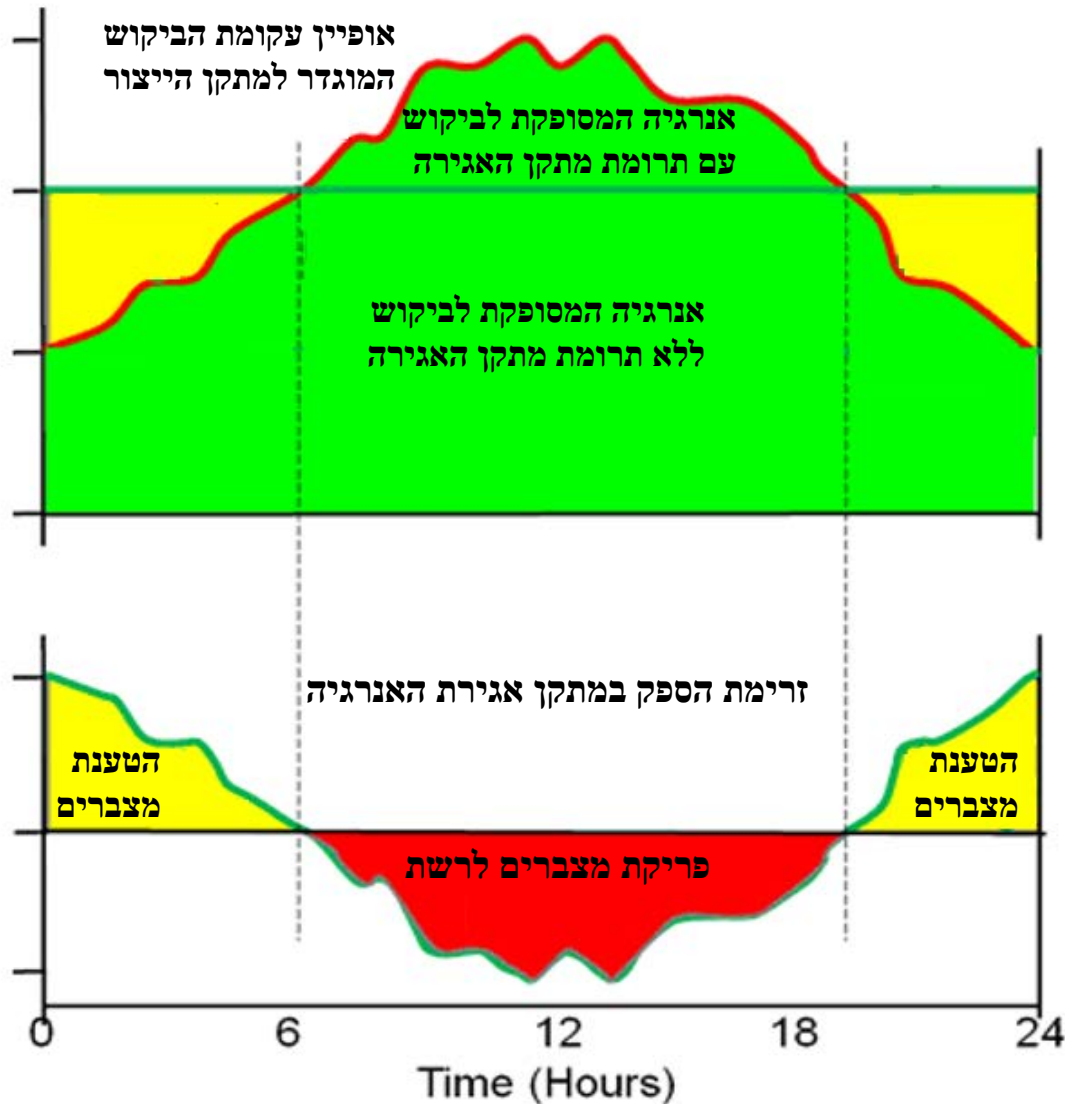
2. Long Term Variability

מערכות אגירת אנרגיה עבור השלמת אנרגיה ממתקן הייצור לטווח ארוך מיממה ועד מספר ימים.

- אגירת אנרגיה תרמית – אגירת אנרגיה בטמ"פ גבוהות ונמוכות
- אגירת אנרגיה מכנית – אנרגיה פוטנציאלית אגירה שאובה / אוויר דחוס

מתקני ייצור DG ומערכות לאגירת אנרגיה

- מתקני ייצור DG מסוג שמש ורוח במצב תפעולי בדרך כלל נדרשים לייצוב ושינוע של אנרגיה לטווח הקצר של מספר שעות. מערכות האגירה אשר מתאימות מבוססות על טעינה ופריקה: מצברים לסוגיהם, קבלי על, סלילי על וכו'.

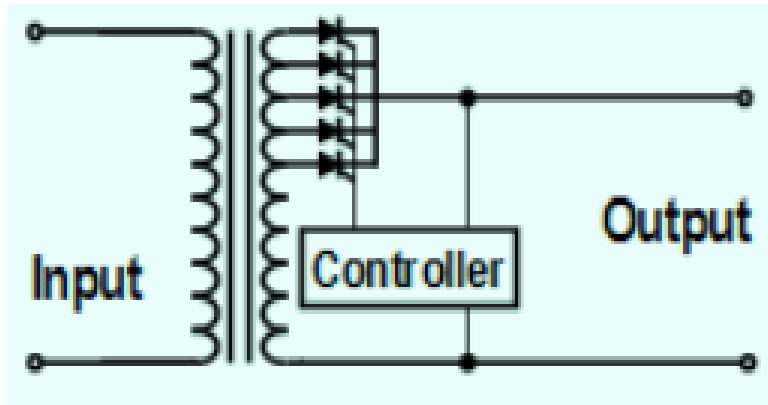


יתרונות אגירת אנרגיה כימית/חשמלית

1. אנרגיה כימית - מצברים / מצברי זרימה יכולת שליטה מלאה ומידית על הטענת ופריקת המצברים.
 - בתכנון יעיל ונכון ניתן לבחור גודל מצברים בהספק כזה שלא ידרוש עלויות גבוהות, אשר יוכל לאגור אנרגיה ממתקן הייצור במהלך שעות היממה ויזרים אותה לרשת בשעות שיא הביקוש.
2. אנרגיה חשמלית קבל / סליל
 - רכיב חשמלי האוגר אנרגיה ויכול לפרוק אותו בזמן נתון אחר. האנרגיה החשמלית נשארת חשמלית.

בקרת מתח באמצעות משנה דרגות אלקטרוני

התקנת משנה דרגות אלקטרוני בשנאי מעלה מתח של מתקן הייצור

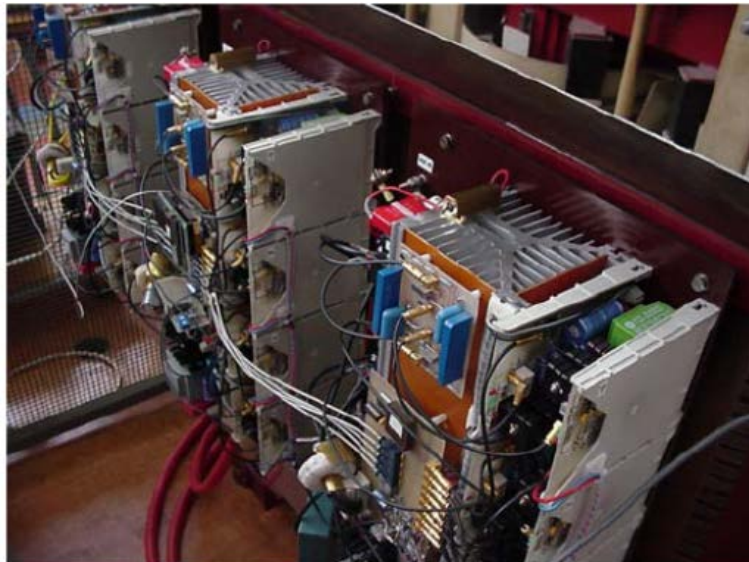


מטרת משנה הדרגות האלקטרוני

שמירה על רמת מתח תקינה בנקודת החיבור המשותפת ע"י שינוי יחס ההשנאה בצד המשני של השנאי. מעבר מהיר מאוד (פחות מחצי שניה) בין הדרגות השונות כדי לתת מענה לשינויי מתח מהירים בקו מתח גבוה.

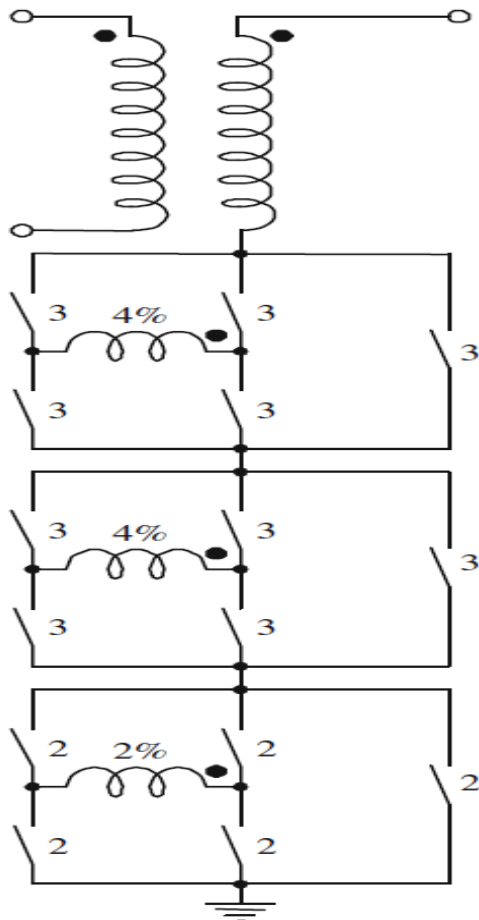
מבנה עיקרי של משנה הדרגות האלקטרוני

- מתגים מסוג Solid State Power Switch, כאשר אופן פעולתם מבצע מעבר בין הדרגות השונות כמעבר על פני אימפדנס רציף (Pass Impedance).
- אלגוריתם אשר דוגם את המתח במהירות רבה בנקודת החיבור המשותפת ומבצע ניתוח מהיר להפעלת המתגים.



Lay out of the solid state tap changer for a 500kVA transformer

בקרת מתח באמצעות משנה דרגות אלקטרוני



שיטת עבודת משנה הדרגות האלקטרוני:

הקונפיגורציה מאפשרת, בעזרת המתגים, "ללכוד" אימפדנס כחלק מכלל האימפדנס הרציף ואת אותו החלק "שלכדנו" לחבר בצדו המשני של השנאי בתחמ"ש לצורך ויסות המתח. לכל חלק אימפדנס ישנו גודל שונה כך שהמערכת יודעת להרכיב מכלל החלקים חלק כזה אשר יתאים לביצוע ויסות המתח הרצוי בצדו המשני של השנאי.

להעלאת מתח בצדו המשני של השנאי נוסיף ליפופים ולהפך. אין הגבלה במהירות הקפיצה בין הדרגות בניגוד למשנה דרגות קונבנציונלי (Passing Resistor).

יתרונות משנה הדרגות האלקטרוני

- תחזוקה נמוכה
- מהירות פעולה גבוהה
- קפיצה מעל דרגה
- רגולטור סטטי

סיכום

- סקרנו 3 מערכות המבוססות על טכנולוגיות מתקדמות להתמודדות עם ההשלכות התפעוליות השליליות הנגרמות מחדירת מתקן ייצור לרשת מתח גבוה.



- בשלב תכנון חיבור מתקן ייצור DG לרשת מתח גבוה מבוצע סקר היתכנות של חברת החשמל שבו נבדקת טכנולוגיית מתקן הייצור, הספקו והקו מתח גבוה אליו הוא יחובר לרבות נקודת החיבור המשותפת.
- בשנים האחרונות בעולם ישנה האצה בהקמת מתקני ייצור DG וחדירתם למערכת החלוקה, יש להתמיד בקריאת מאמרים חדשים בנושא שכן עבור כל מתקן ייצור DG מבוצע סקר היתכנות הסוקר את כל השפעות המתקן על הרשת מתח גבוה. ישנו הצורך להמשיך ולחקור על אמצעים טכנולוגיים מתקדמים חדשים אשר יכולים לשמור על ספי פרמטרי איכות החשמל ברשת החשמל בגבולות המותרים עקב חדירת מתקני ייצור.

תודה רבה

על

ההקשבה

המשך יום נעים

תודה רבה

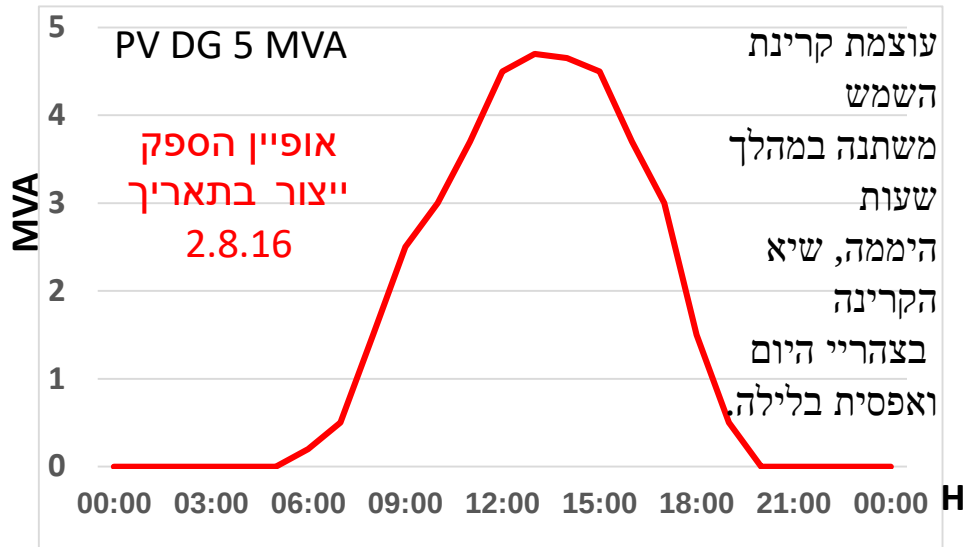
על

ההקשבה

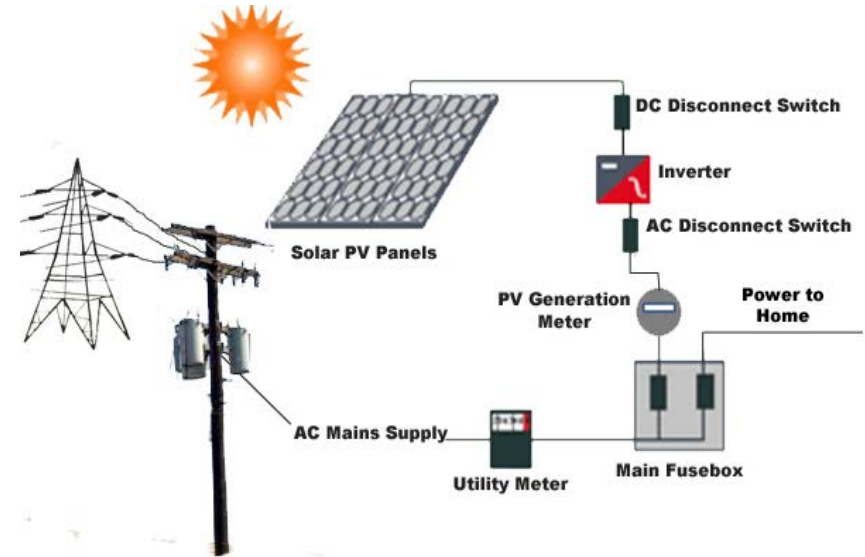
המשך יום נעים

מערכת פוטו-וולטאית

אופיין הספק ייצור



מבנה כללי



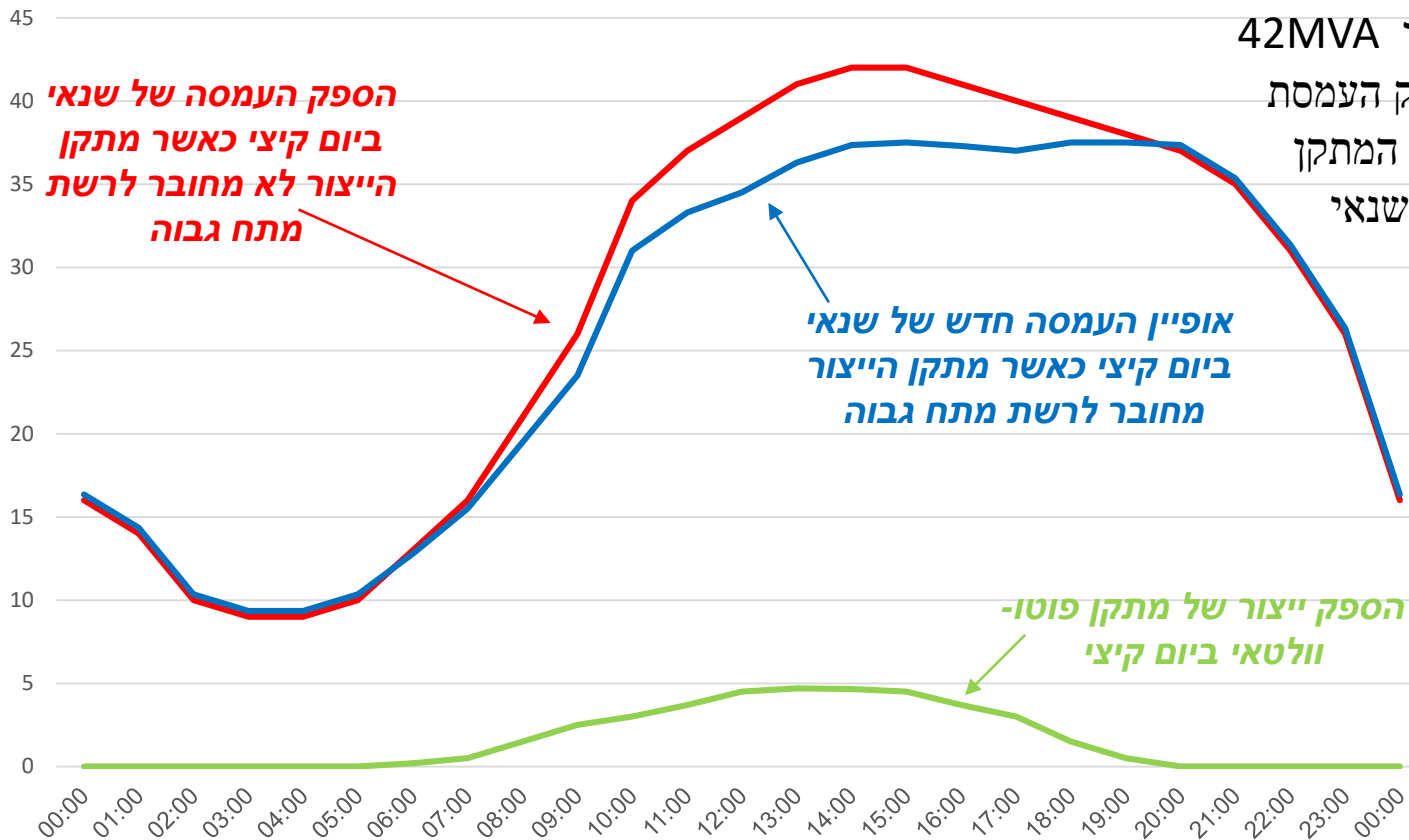
דיאגרמת בלוקים



מודל מתקן ייצור PV בשילוב מערכת אגירה אנרגיה

שנאי בתחמ"ש בעל הספק 45MVA המזין צרכנות מעורבת (ביתית, עסקית ותעשייה קלה).
מתקן ייצור PV בעל הספק 5MVA

1. מודל יום קיצי 2.8.16



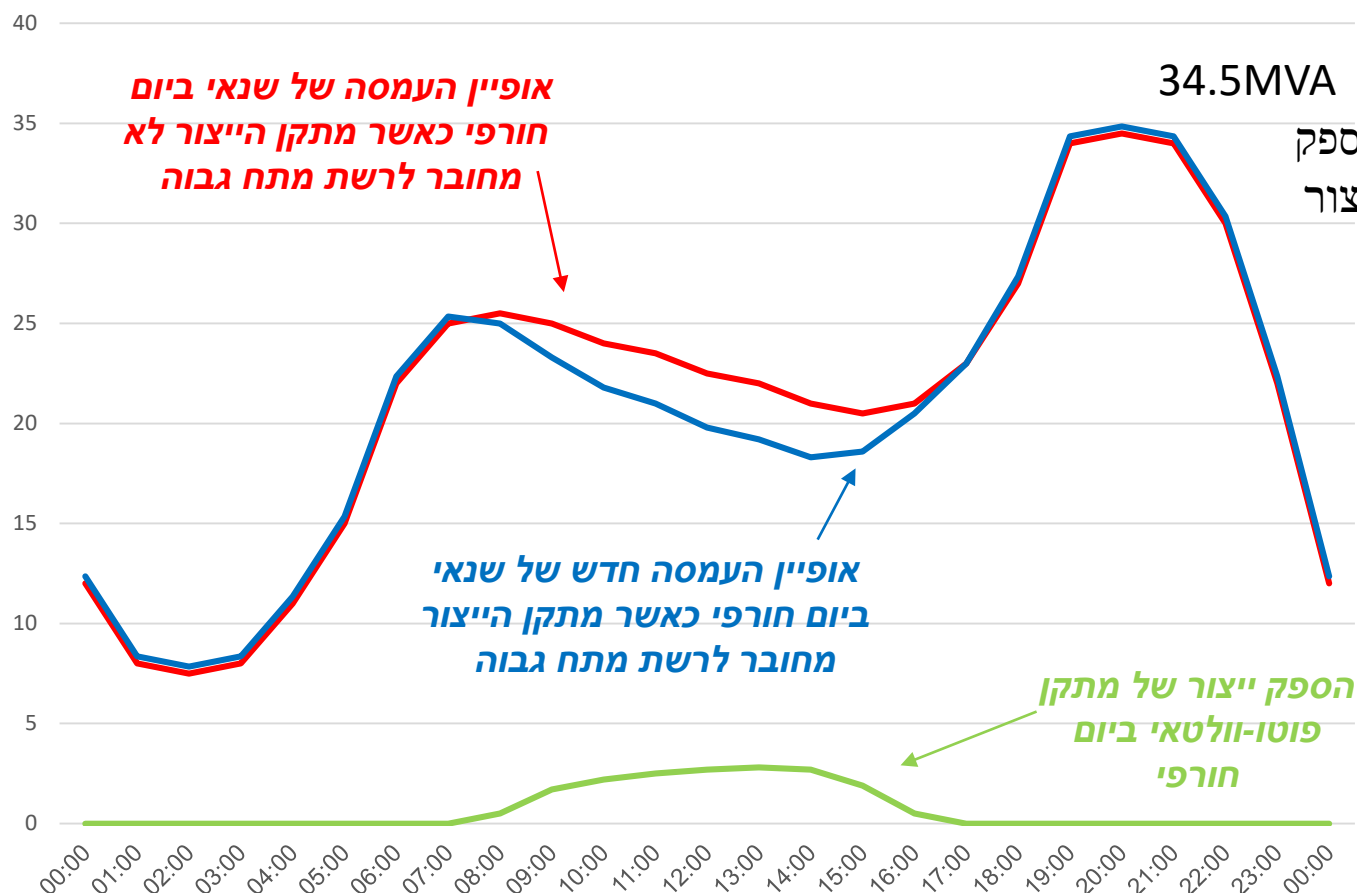
שיא הספק העמסת השנאי הינו 42MVA
קיימת התלכדות בין שיא הספק העמסת
השנאי ושיא הספק הייצור של המתקן
הפוטו-וולטאי. אפשר לחשב לשנאי
שיא הספק העמסה חדש הינו
37.5MVA, ניתן לומר
שהספק מתקן הייצור
קיזז כ- 4.5MVA
משיא הספק העמסת השנאי.

הספק העמסה של שנאי
ביום קיצי כאשר מתקן
הייצור לא מחובר לרשת
מתח גבוה

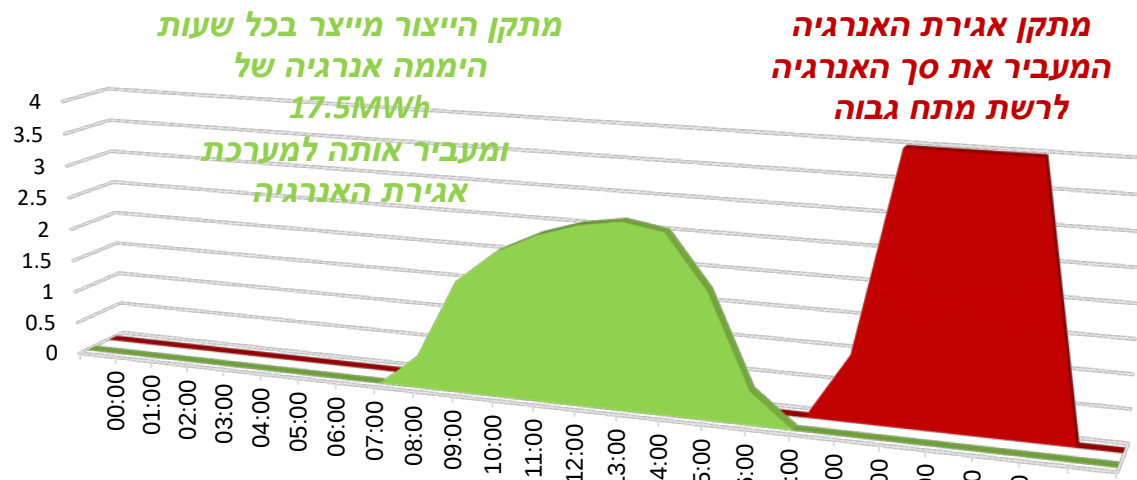
אופיין העמסה חדש של שנאי
ביום קיצי כאשר מתקן הייצור
מחובר לרשת מתח גבוה

הספק ייצור של מתקן פוטו-
וולטאי ביום קיצי

2. מודל יום חורפי 31.1.16

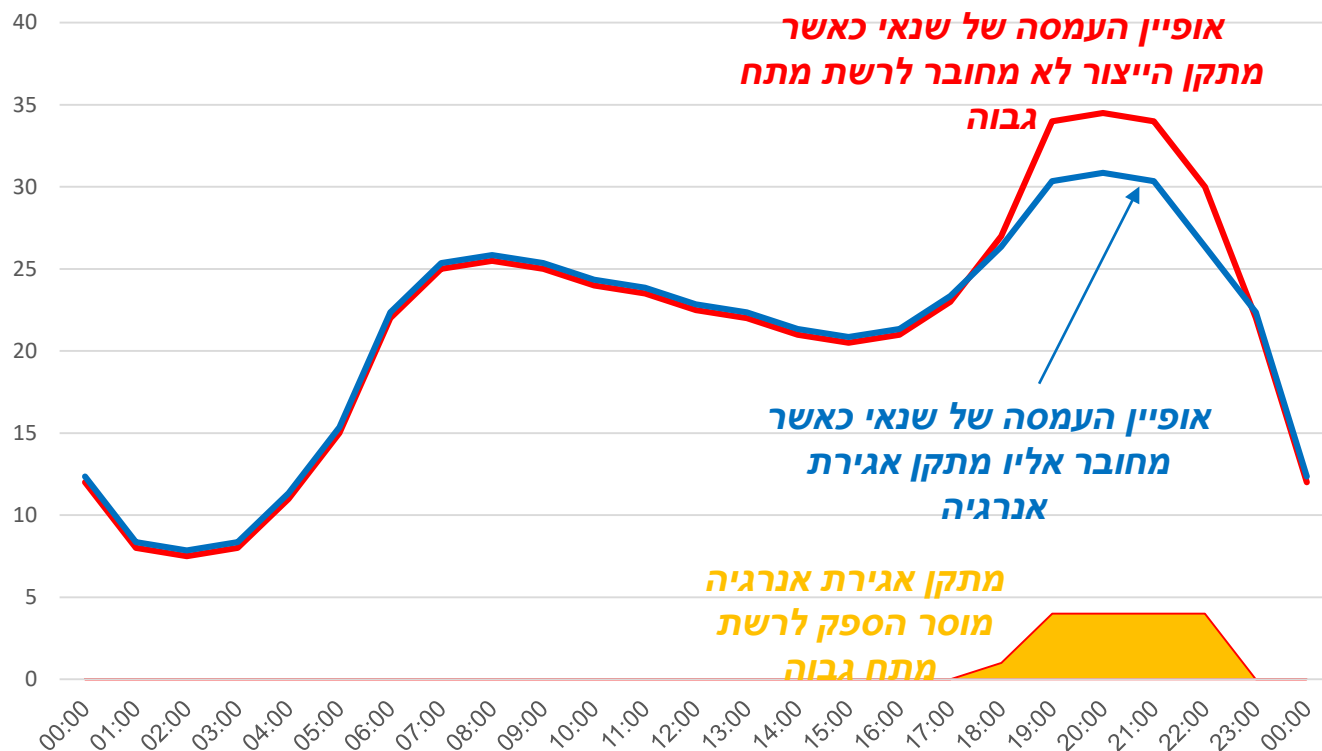


ישנו הצורך לביצוע אופטימיזציה נכונה להורדת שיא עקומת העמסה של השנאי ע"י מתקן אגירת אנרגיה המהווה הזזה מכוונת של תרומת אנרגיית מתקן הייצור בציר הזמן לפי דרישה.



חיבור מתקן אגירת אנרגיה למתקן הייצור המסוגל לאגור את כל האנרגיה בשעות היום כ-17.5MWh, ומעביר אותה לרשת מתח גבוה בזמן נתון מראש במשך מספר שעות סביב השעה 20:00 בצורה מבוקרת.

התלכדות שיא הספק העמסת השנאי והעברת האנרגיה ממתקן האגירה גרמה לירידת שיא הספק העמסת השנאי משיאו המקורי 34.5MVA ל-30.5MVA. ניתן לומר שהספק מתקן הייצור קיזז כ-4MVA משיא הספק העמסת השנאי



הקטנת הספק השנאי בתחמ"ש

- בשנאי ישנם הפסדים המורכבים מהפסדי ברזל והפסדי נחושת. הפסדי ברזל הם הפסדים קבועים ואילו הפסדי נחושת הם הפסדים משתנים לפי עומס השנאי.

$$\Delta P = \Delta P_{FE} + \Delta P_{CU}$$

$$\Delta P_{FE} = \text{const}$$

$$\Delta P_{CU} = K * S_L^2$$

- ככל שהעומס עולה בשנאי כך ההפסדים על השנאי עולים בהתאם. אם מקטינים את הזרימה דרך השנאי, ז"א מקטינים את העומס מהשנאי, אזי ההפסדים יקטנו ונצילות השנאי תעלה. בשילוב מערכות לאגירת אנרגיה בצורה נכונה ניתן להוריד את עומס השנאי ובכך להקטין את גודלו ואת ההפסדים שלו.

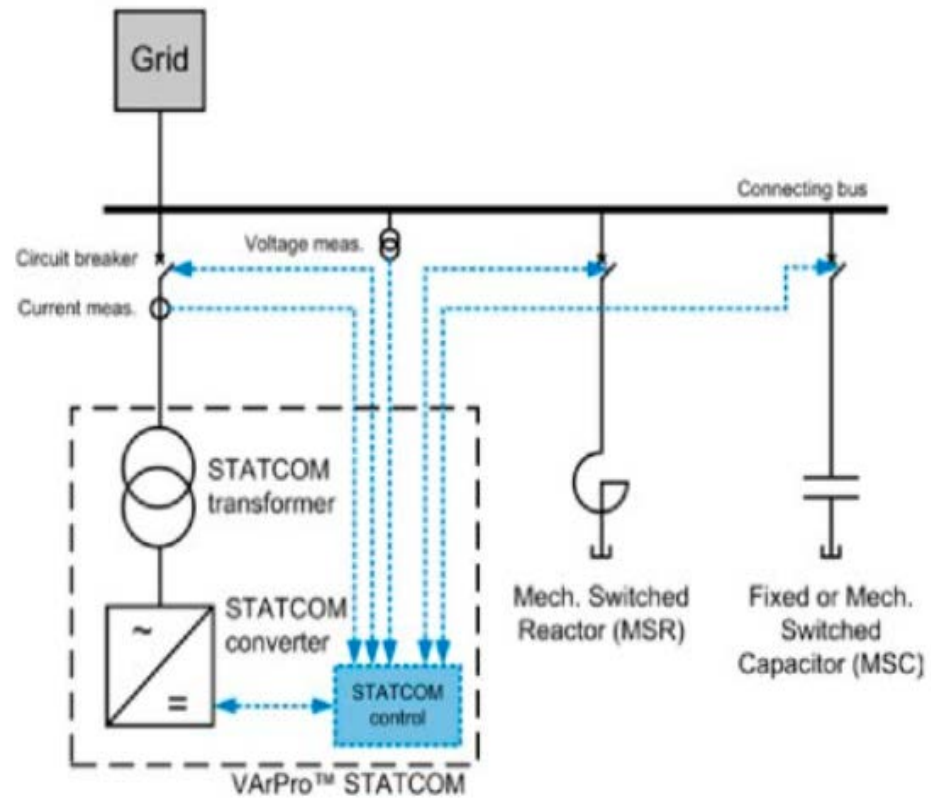
תודה רבה

על

ההקשבה

המשך יום נעים

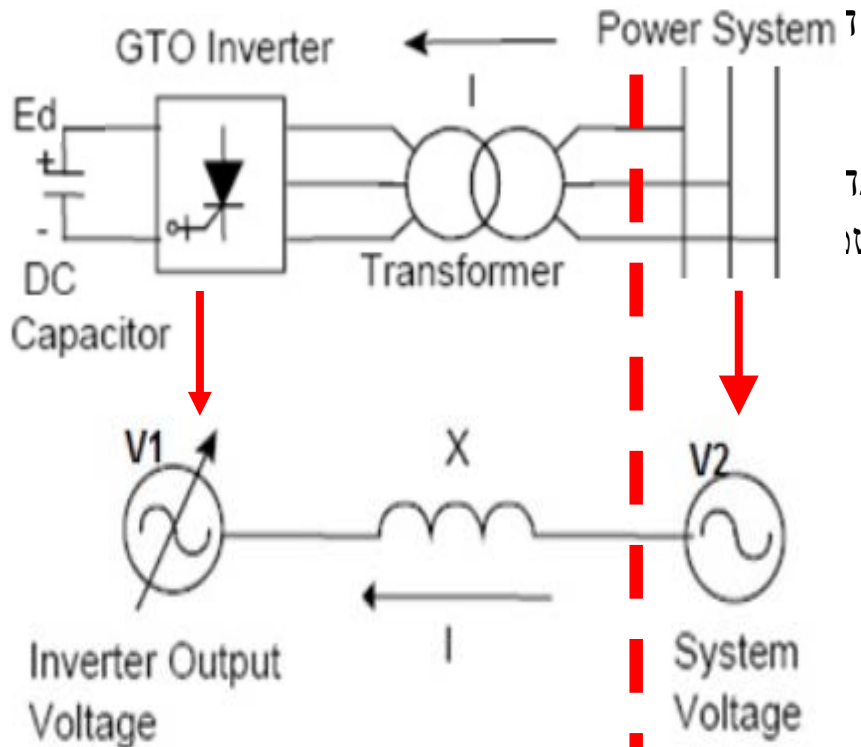
בקרת מתח באמצעות מערכת STATCOM



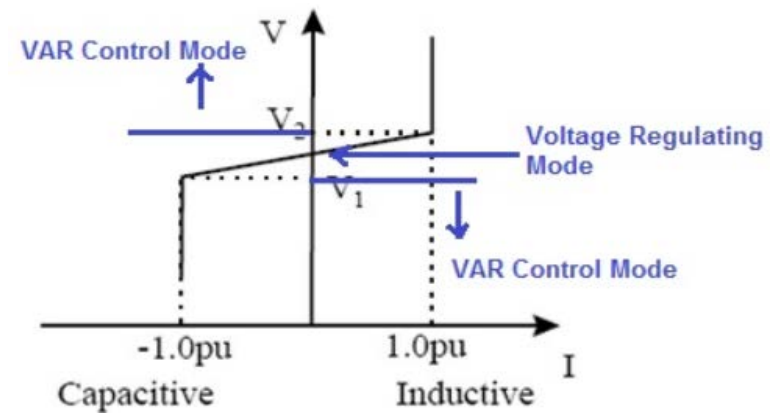


ΔV מינימלי ככל האפשר

$V_L^{no DG}$ – מתח בנקודה
המשותפת כשמתקן



V_L^{DG} – מתח
כש



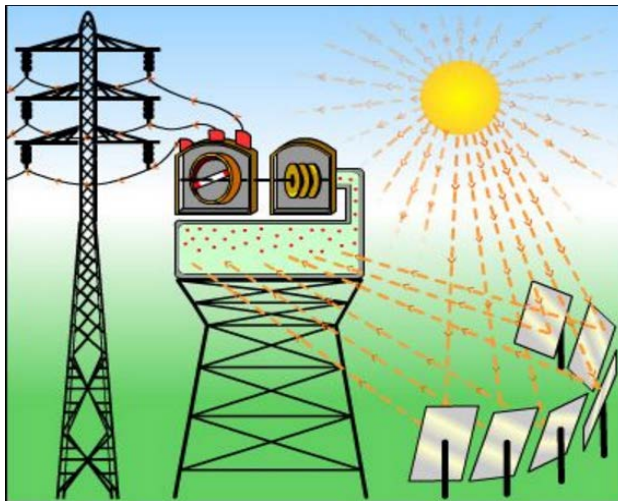
טכנולוגיה סולרית

מקור האנרגיה המופקת מהשמש הוא מקרינת השמש.

קרינה מפוזרת - Diffused
קרינה מוחזרת - Reflected
קרינה ישירה - Direct beam
קרינה נקלטת על משטח ב 3 סוגים:

מערכת תרמו-סולרית CSP

טכנולוגיה שמבוססת על קולטים תרמו-סולאריים אשר משולבים בעדשות או במראות המשמשות לריכוז קרינת השמש אל התא לצורך ייצור קיטור להנעת טורבינת ייצור חשמל. שיטה שמשת בעיקר לייצור חשמל בתחנות כוח פוטו-וולטאיות.

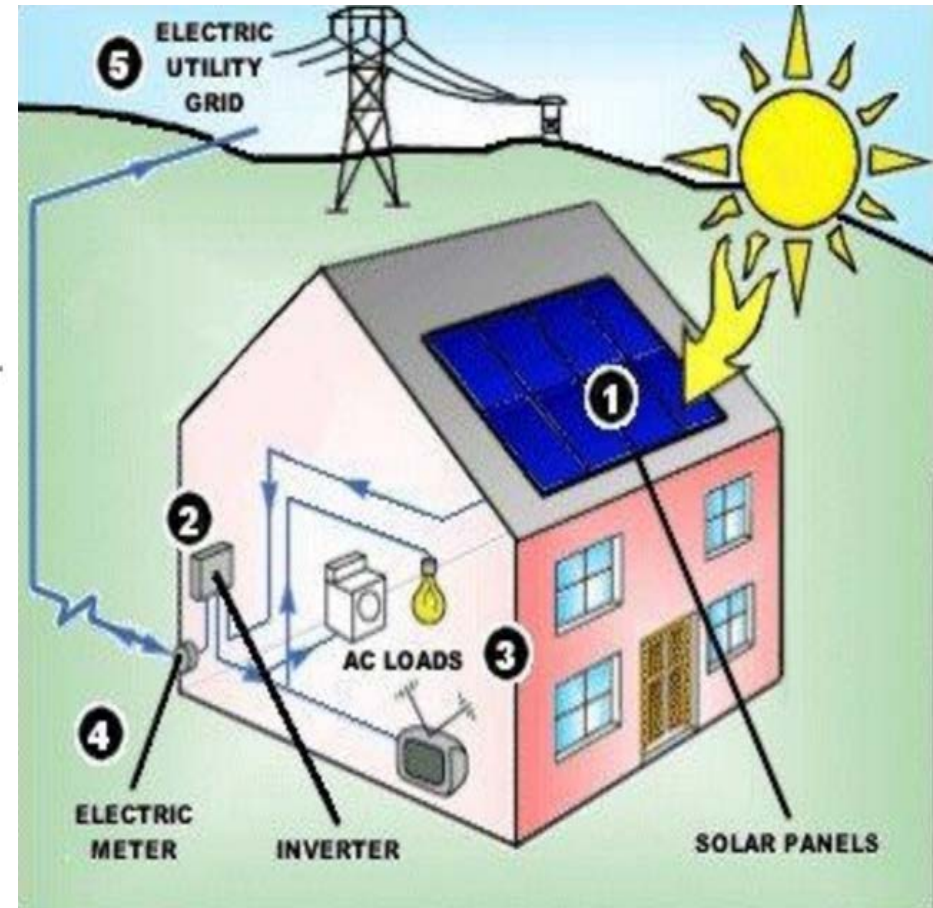
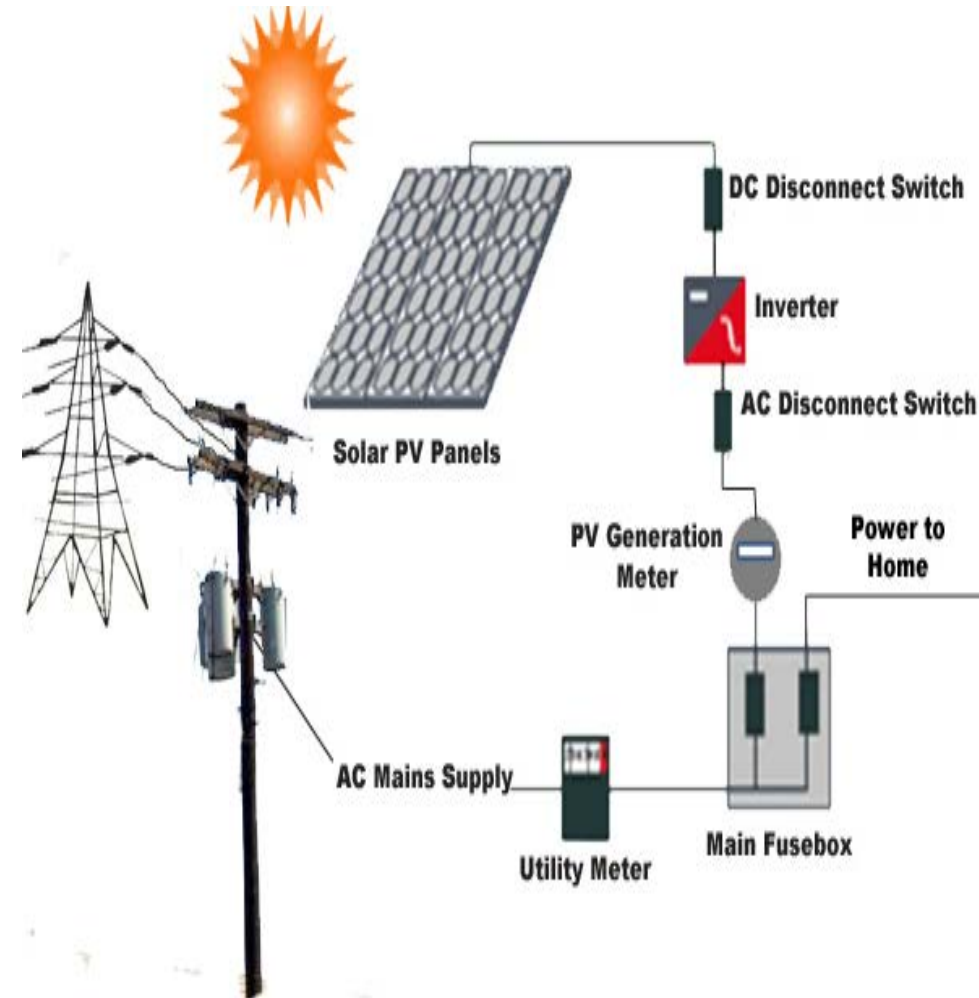


מערכת פוטו-וולטאית PV

טכנולוגיה שמבוססת על פאנלים ובהם תאים פוטו-וולטאיים הממירים באופן ישיר את האור (אנרגיית השמש) לאנרגיה חשמלית. שיטה שמשת בעיקר לייצור חשמל מקומי.



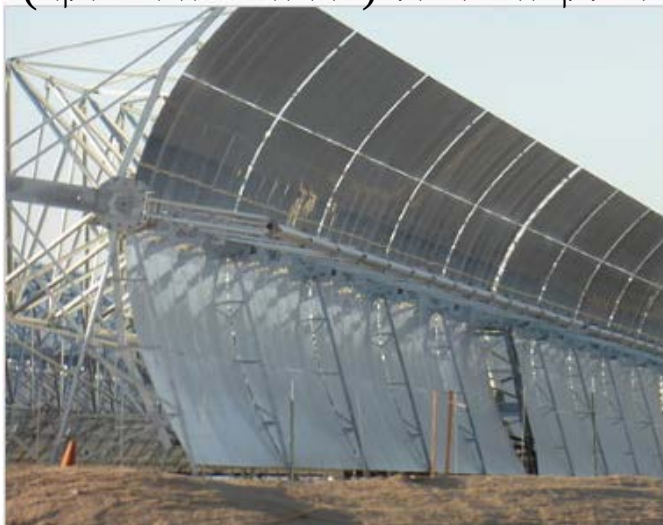
מבנה מערכת פוטו-וולטאית PV



סוגי מערכות תרמו-סולרית CSP

הטכנולוגיה התרמו-סולארית מיושמת כיום באמצעות ארבע שיטות עיקריות

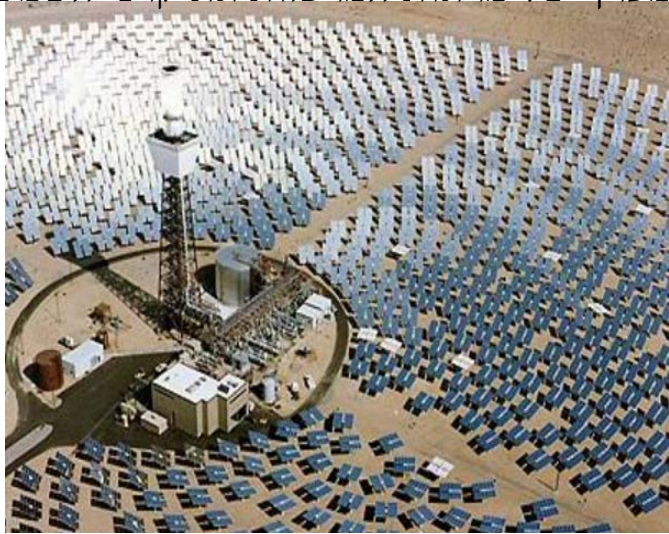
שוקת פרבולית Parabolic Trough
רפלקטור פרבולי (מראות בצורת שוקת)



LFR - Linear Fresnel Reflector
מערך של רפלקטורים סמוכים



מגדל שמש Central Receiver Solar Tower
מערך של מראות המרכזות את קרני השמש



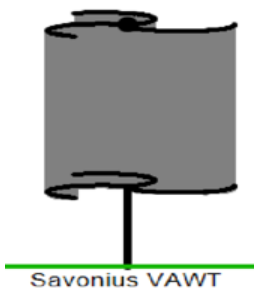
צלחת פרבולית Dish Parabolic
רפלקטור פרבולי בצורת צלחת



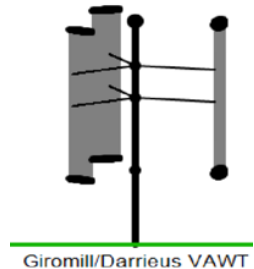
טכנולוגית רוח

אנרגיה המופקת מרוח מנצלת את התנועה בקו ישר של הרוח (אנרגיה קינטית) וממירה אותה לאנרגיה מכאנית ע"י סיבוב מערכת כנפיים. מהירות הרוח וכיוונה נקבעים ע"י שינוי בלחץ האוויר ובטמפ' שלו.

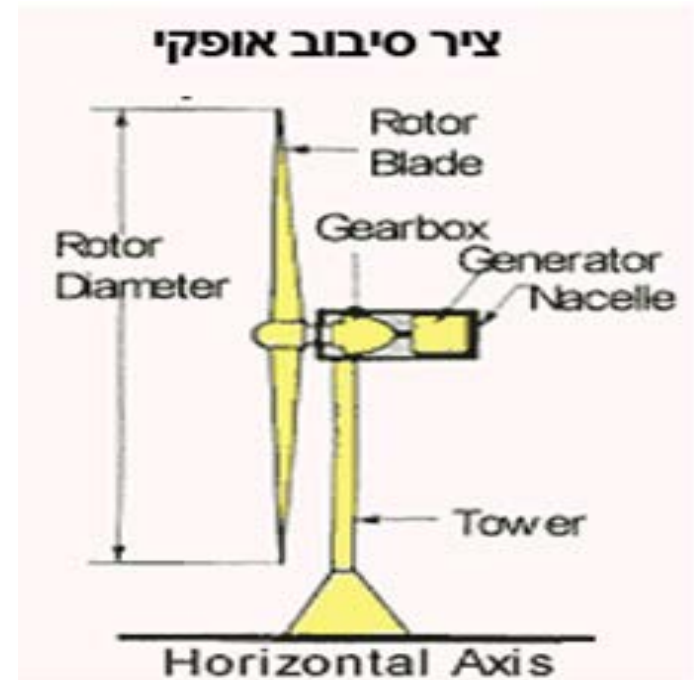
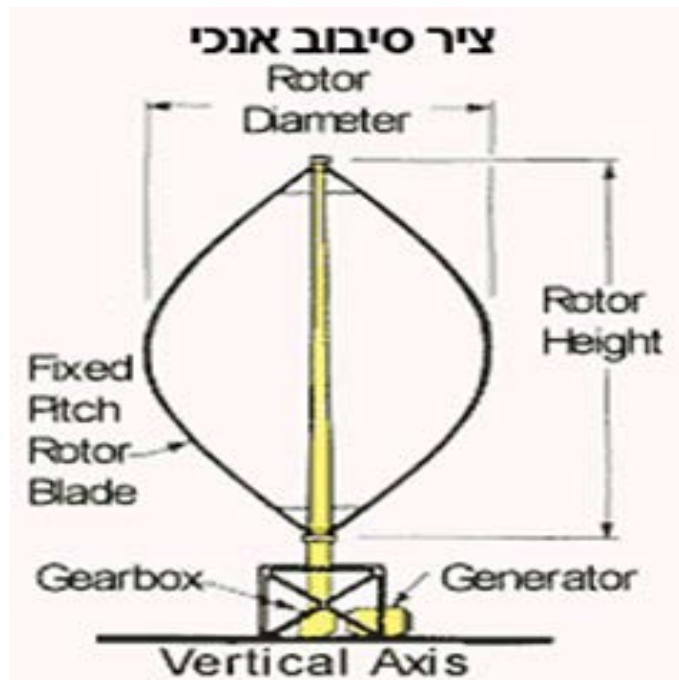
- ניתן לסווג את טורבינות הרוח בהתאם לאופן פעולת הרוטור: ציר סיבוב אופקי וציר סיבוב אנכי.



כוח הגרר



כוח העילוי

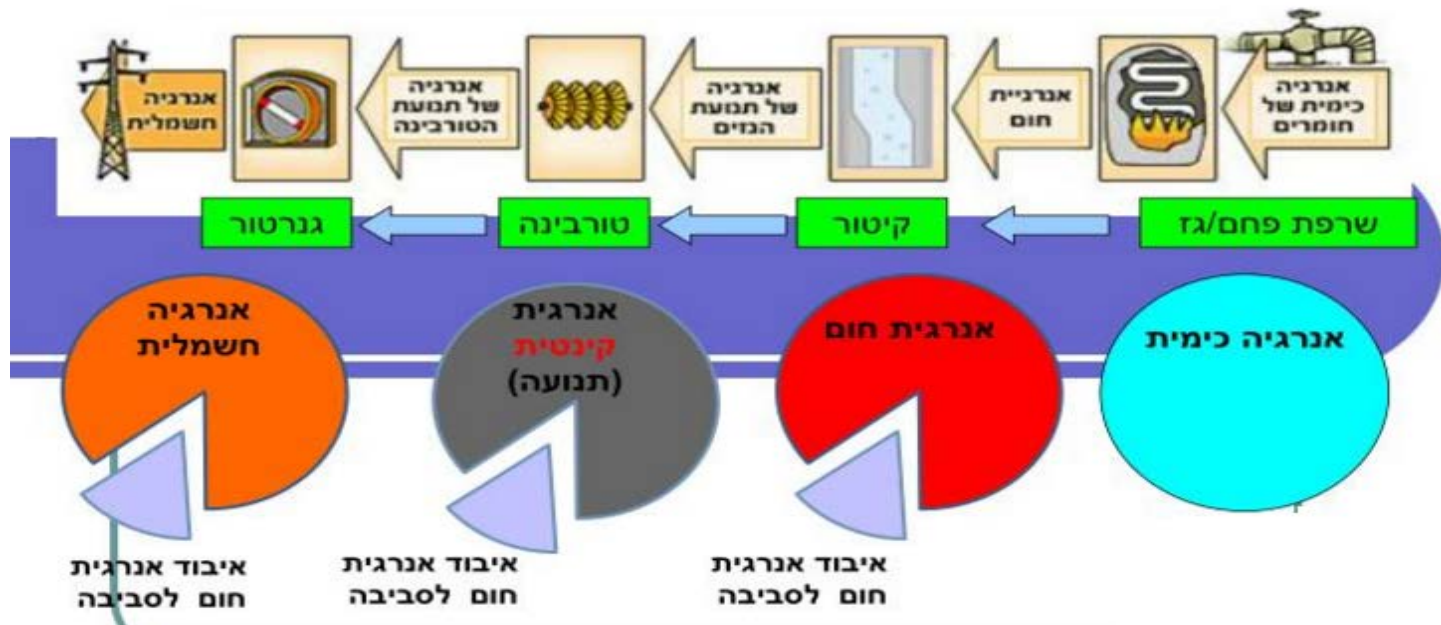


כוח העילוי

טכנולוגיה קונבנציונלית

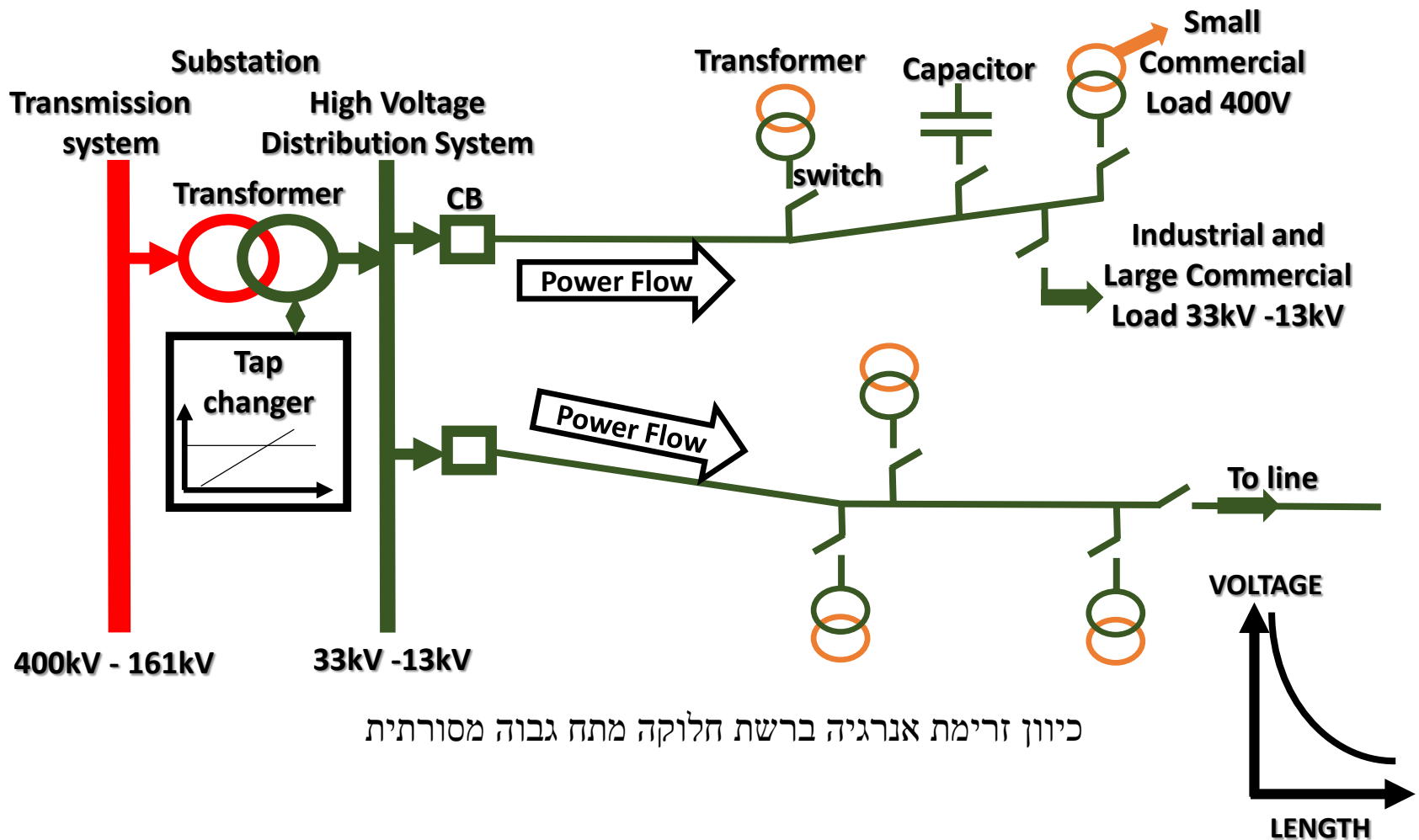
המרת אנרגיה תרמו דינאמית לאנרגיה חשמלית ע"י הגנראטור.

- הדלקים המסורתיים להפעלת גנרטורים הינם מסוג אנרגיה פוסילית הכוללת: סולר, מזוט גז ופחם.
- אנרגיה פוסילית מסוג גז, נפט ופחם – אלו הם משאבים מתכלים אשר כדור הארץ מייצר אותם במשך מיליוני שנים והעתודות שלהם מתמעטות במהרה.



תרשים זרימה להפקת חשמל בטכנולוגיה קונבנציונלית

רשת חלוקה מתח גבוה מסורתית



כיוון זרימת אנרגיה ברשת חלוקה מתח גבוה מסורתית

זרימת ההספק בקו הינה בכיוון אחד – מתחילת הקו בפ"צ בתחמ"ש אל קצה הקו. הזרם הגבוה ביותר יהיה בתחילת הקו וידעך לאורך הקו.

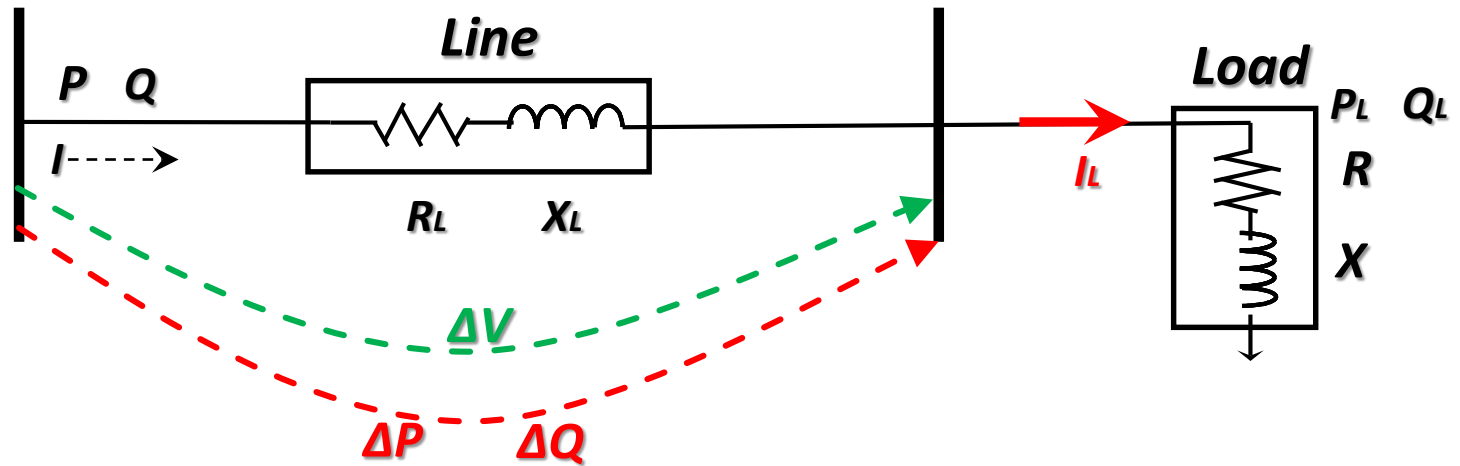
זרימת הספק בקו מתח גבוה רשת חלוקה מסורתית

מתח בפ.צ. בתחמ"ש

$$V_S = 22kV$$

מתח בסוף הקו

$$V_L = V_S - \Delta V$$



$$\Delta V = V_S - V_L$$

• הגדרת מפל המתח בקו מתח גבוה:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{V_S^2} * R_L$$

$$\Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{V_S^2} * X_L$$

• הגדרת איבודי הספק בקו מתח גבוה:

$$P_L = P - \Delta P$$

$$Q_L = Q - \Delta Q$$

• הגדרת הספק העומס:

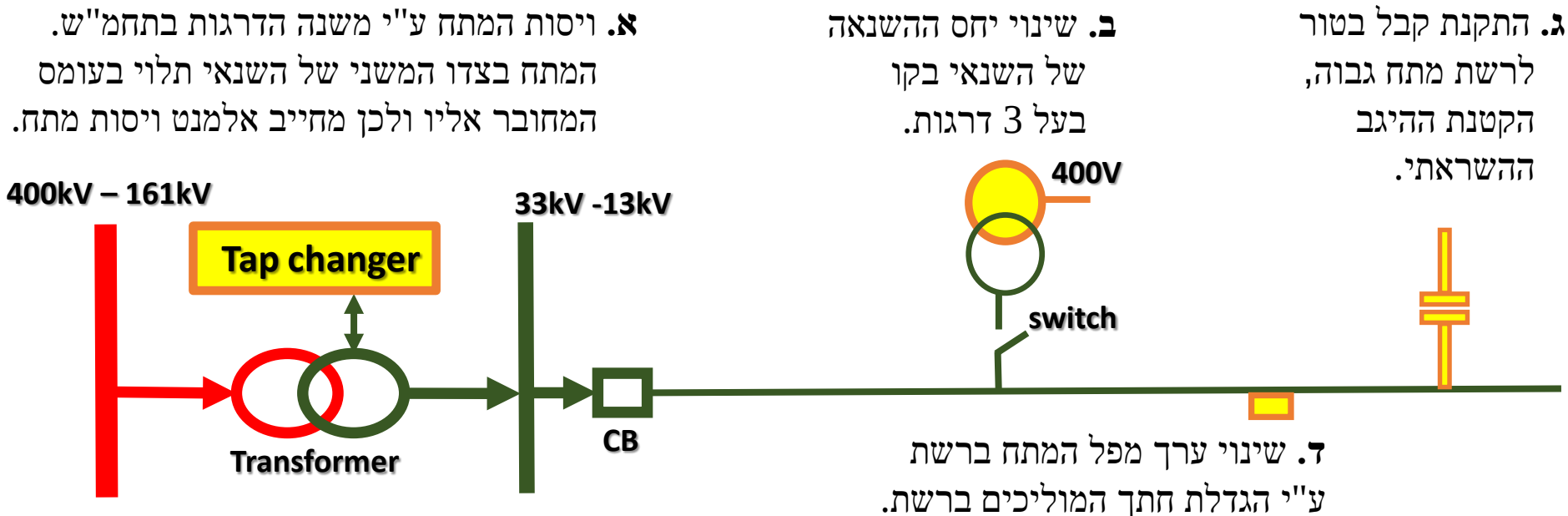
ויסות המתח ברשת חלוקה מתח גבוה

מפל המתח בקו מתח גבוה מתחילתו ועד סופו לא יעלה על ערך של כ 3%. $\Delta V < 3\%$

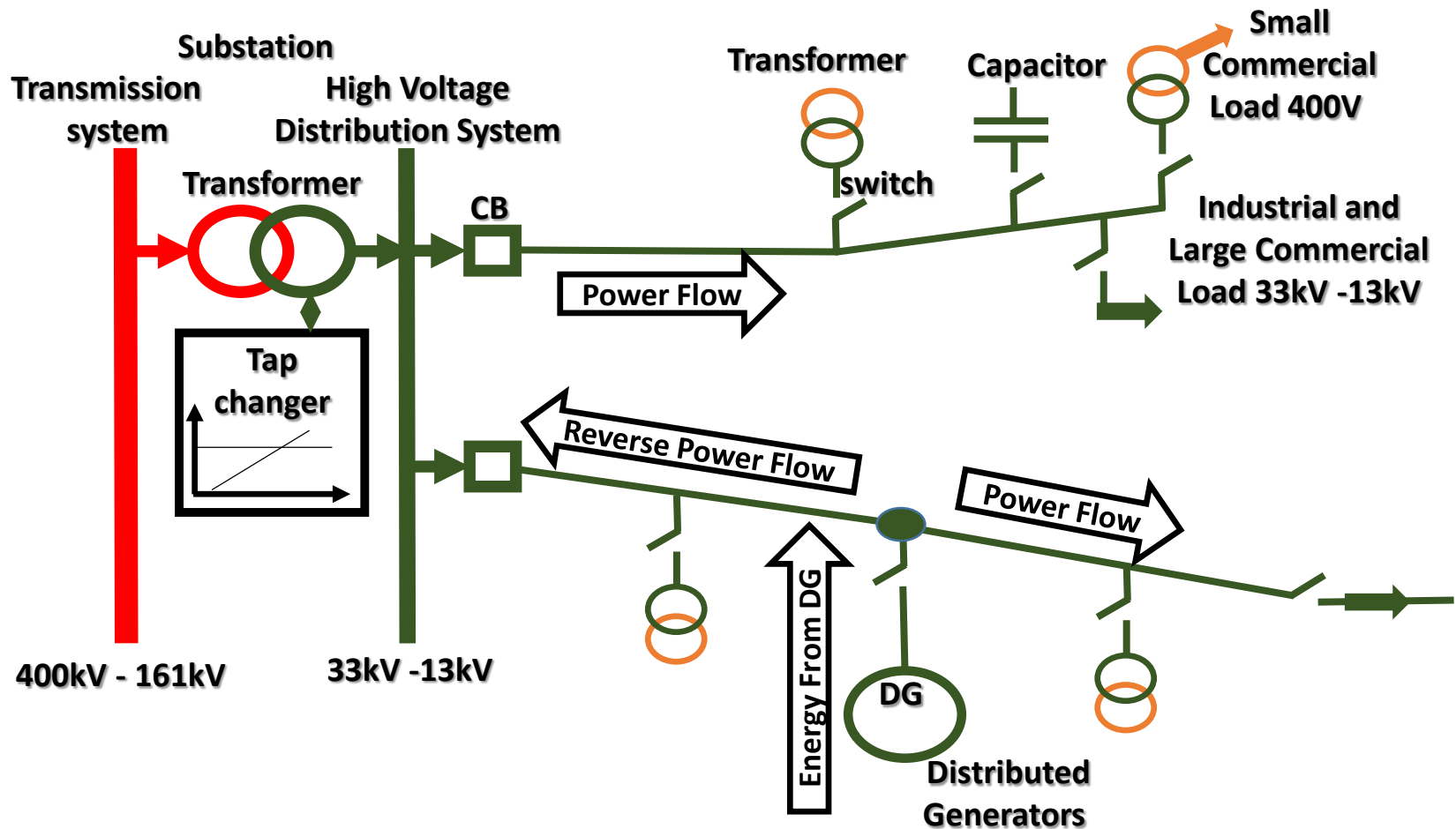
3 הגורמים המביאים לשינויים ולסטיות מהערכים הנומינליים של מתח ותדר ברשת והם:

- הפרעות ברשת כתוצאה מקצרים, ברקים וכו'.
- שינויי מתח פתאומיים הנובעים מפעולות מיתוג שונות של חברת חשמל או צרכני מתח גבוה.
- מפלי מתח הנובעים מחיבור עומסים למערכת.

4 שיטות עיקריות לוויסות המתח ברשת מתח גבוה

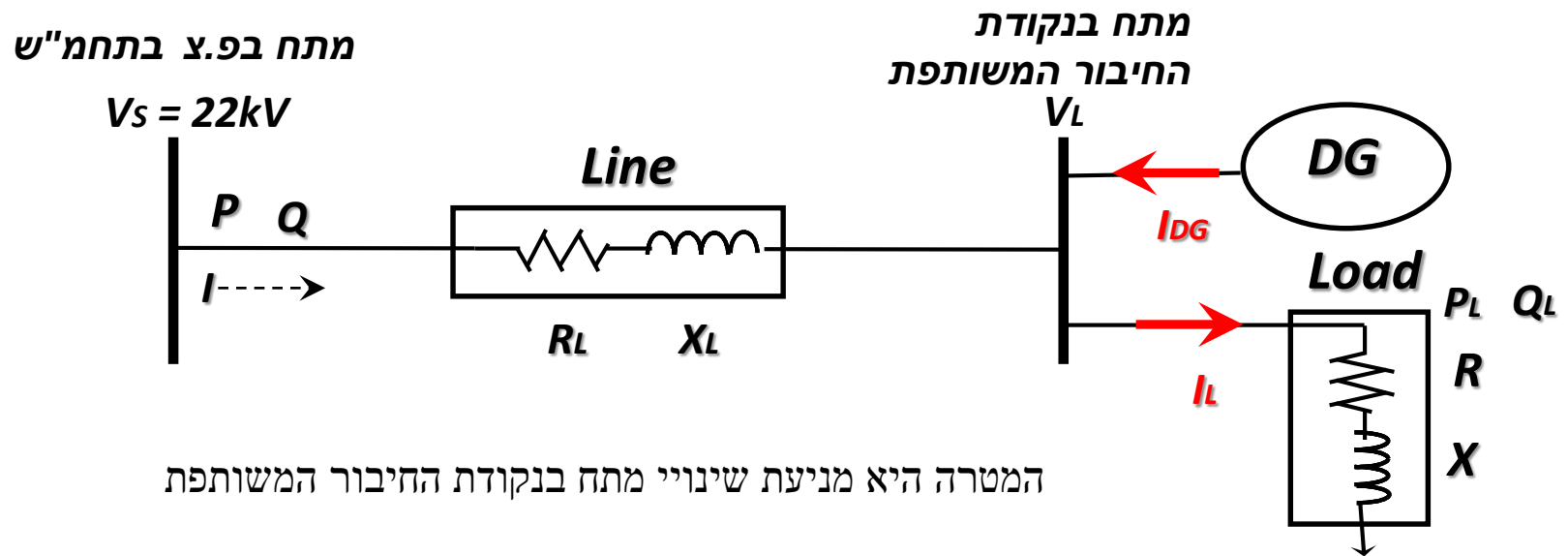


רשת חלוקה מתח גבוה אקטיבית



רשת חלוקה מתח גבוה עם קו בו חוזר DG כאשר כושר הייצור של ה-DG גדול מהביקוש בקו כיוון זרימת האנרגיה בקווים מתח גבוה תהייה תלויה בהיקף הייצור במתקן הייצור DG ובעומס של הצרכנות בקו באותו הזמן. המתח בנקודות מסוימות בקו יכול להיות גבוה מזה שבתחילת הקו, כאשר כושר הייצור של מתקן DG עולה על הביקוש והדבר מלווה במפל מתח הפוך.

זרימת הספק בקו מתח גבוה רשת חלוקה אקטיבית



• הגדרת נקודת החיבור המשותפת VL למתקן הייצור הפרטי ולעומס.

• $V_L^{no DG}$ – מתח בנקודת חיבור משותפת כשמתקן הייצור מנותק וישנו רק העומס בקו :

$$V_L^{no DG} = V_S - \frac{P \cdot R_L + Q \cdot X_L}{V_S}$$

• V_L^{DG} – מתח בנקודת חיבור משותפת כשמחובר מתקן ייצור לצד העומס בקו :

$$V_L^{DG} = \frac{R + jX}{2(R_L + X_L)} * (V_S + I_{DG} (R_L + X_L))$$

• הגדרת שינוי המתח בנקודת החיבור המשותפת $\Delta V = V_L^{DG} - V_L^{no DG}$

השפעת מתקן ייצור DG על רכיבי רשת החלוקה

ציוד רשת בקו מתח גבוה

- מתקן ייצור DG מתחבר לרשת מתח גבוה לפי מיקומו הגאוגרפי.
- הספק המתקן ייתכן ויגדיל את העומס העובר במקטעי הרשת מתח גבוה הסמוכים לו ובוודאי בנקודות החיבור לרשת.
- ברשת מתח גבוה שלא הייתה מתוכננת לקליטת DG, ייתכן גידול בזרמים המועברים ברשת אשר ישפיעו על העמסת המוליכים, שנאים וציוד רשת אחר וייתכן ויהיה הצורך בהשקעות נוספות לצורך שדרוג תשתית הרשת בקו מתח גבוה.

הגנות בקו מתח גבוה

- בתכנון הגנות יתרת זרם בקו, זרם התקלה זורם בכיוון אחד בלבד אולם בעת חיבור מתקן ייצור DG לרשת מתח גבוה מצב זה יכול להשתנות וזרם התקלה יכול לזרום בשני כיוונים.
- סוגיות שיכולות להתעורר בתחום הגנות הקווים מתייחסות להפסקת שווא של קווים ונקודות מתות שאינן בטווח ההגנות (ההגנה לא תזהה תקלה ברשת ולא תפעל).
- פעולת הגנות תקינה נדרשת גם בצד מתקן הייצור DG ואלה צריכות להבטיח סלקטיביות, תגובה מהירה ורגישות.
- מערכת ההגנות בצד מערכת החלוקה צריכות להיות מסונכרנות עם מערכת ההגנות בצד מתקן הייצור DG.

השפעת מתקן ייצור DG על איכות החשמל

השפעת מתקן הייצור על איכות החשמל בקו מתח גבוה נמדדת בשני נקודות קריטיות ברשת החלוקה

- **בנקודת החיבור המשותפת** – המטרה לקבל את שינויי המתח הקטנים ביותר בהשוואה לרשת מתח גבוה ללא חיבור מתקן ייצור.
- **בפס הצבירה שבתחמ"ש** – עליית המתח בפס הצבירה עלולה להביא לעליית מתח בקווים נוספים המחברים לקו.

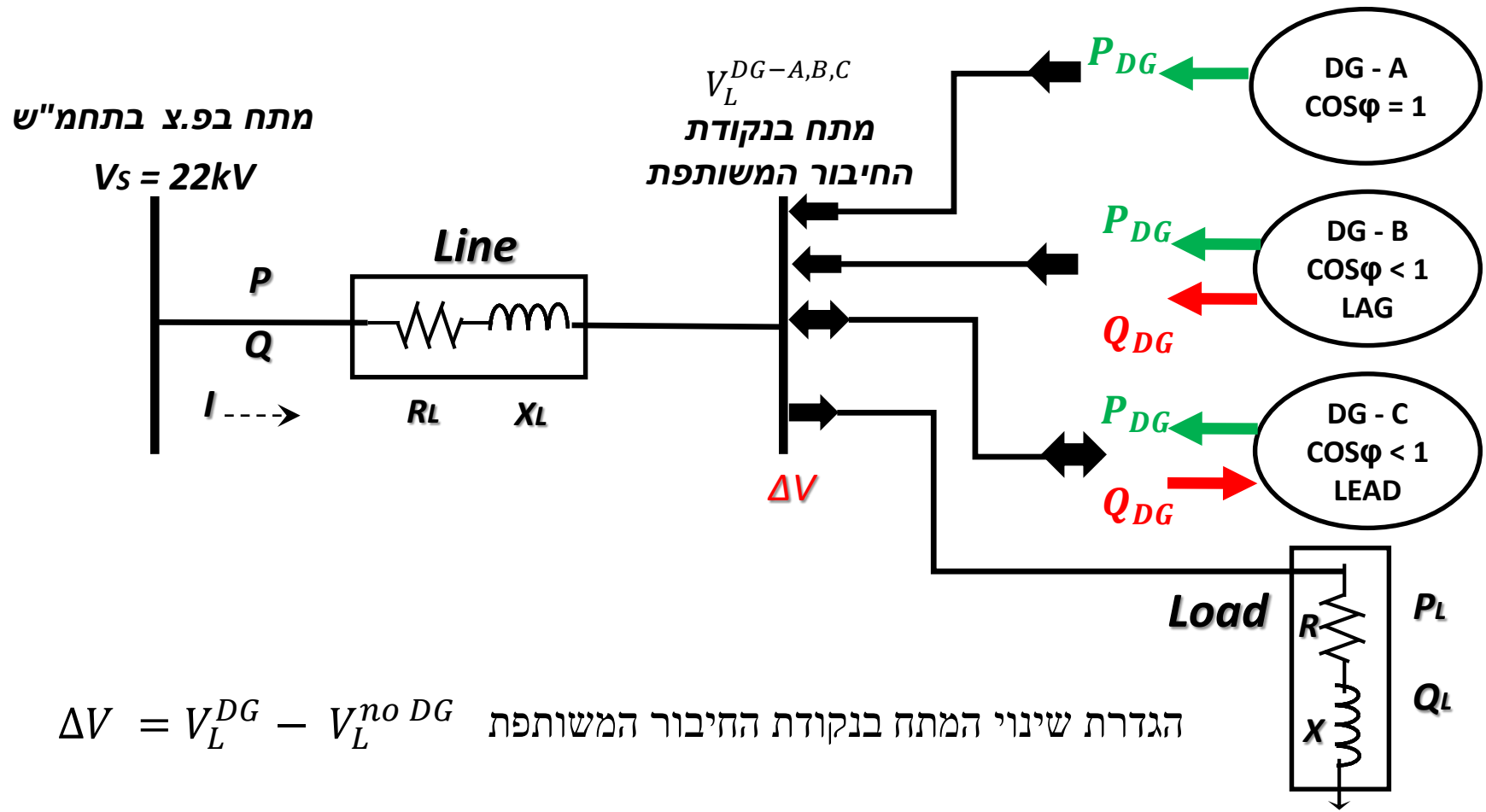
שלושת הסיבות העיקריות לשינויי המתח בנקודות החיבור המשותפת:

- שינוי הספק המוצא של מתקן הייצור לרבות פעולות מיתוג בצד המתקן
- מקדם הספק מתקן הייצור- ע"י בחירת מקדם הספק מתאים יהיה ניתן להקטין את שינויי המתח בנקודת החיבור המשותפת.
- תצורת הרשת הקיימת בנקודת החיבור המשותפת.

תצורות גורם הספק במתקן ייצור DG

3 תצורות גורם הספק בו יכול לעבוד מתקן ייצור DG

- בגורם הספק $\cos \varphi = 1$
- בגורם הספק קיבולי $\cos \varphi < 1$
- בגורם הספק השראי $\cos \varphi < 1$



בקרת מתח באמצעות גורם הספק במתקן ייצור DG

עבור מתקן ייצור DG – C

גורם הספק השראי $\cos \varphi < 1$

$$\Delta VC = \frac{P_{DG} * R_L - Q_{DG} * X_L}{V_L^2}$$

עבור מתקן ייצור DG – B

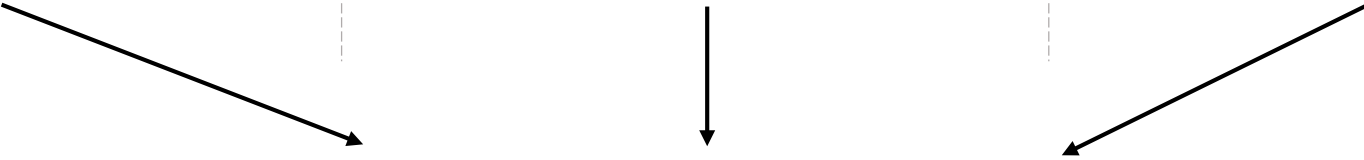
גורם הספק קיבולי $\cos \varphi < 1$

$$\Delta VB = \frac{P_{DG} * R_L + Q_{DG} * X_L}{V_L^2}$$

עבור מתקן ייצור DG – A

גורם הספק $\cos \varphi = 1$

$$\Delta VA = \frac{P_{DG} * R_L}{V_L^2}$$

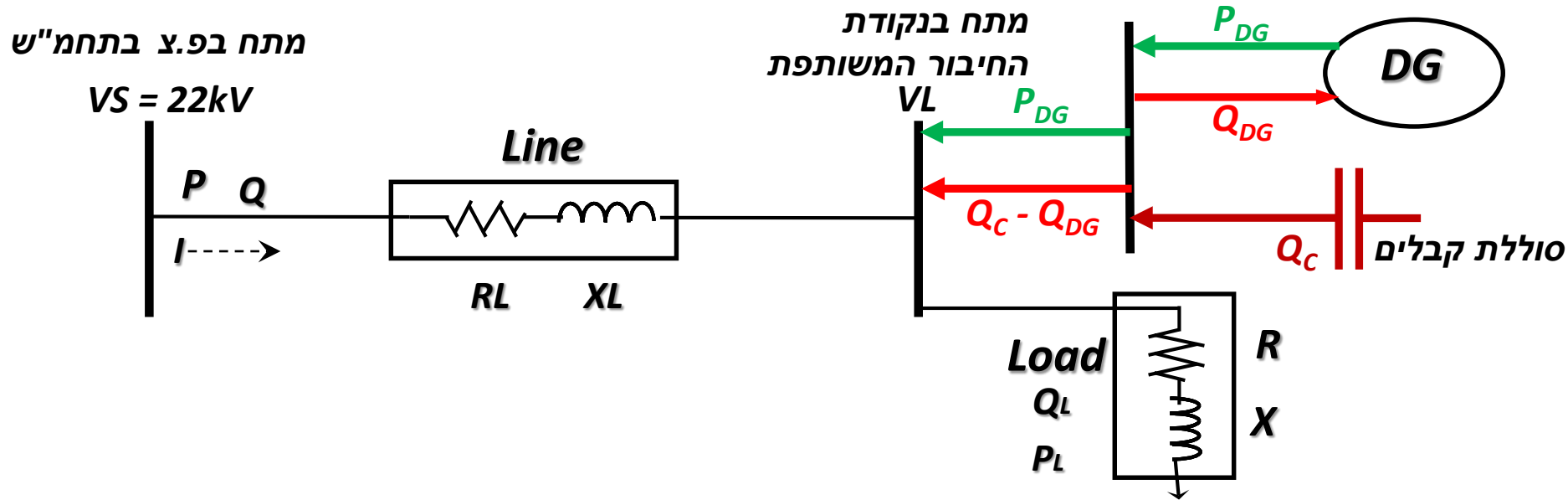

$$\Delta VB > \Delta VA > \Delta VC$$

מסקנה: מתקן ייצור DG המחובר לרשת מתח גבוה בגורם הספק השראי, יגרום לשינויי מתח קטנים בנקודת החיבור המשותפת.

- במתקן ייצור DG מסוג פוטו-וולטאי ניתן לקבוע את גורם ההספק בו המתקן יעבוד בממירים.
- במתקן ייצור DG מסוג טורבינת רוח ניתן לקבוע את גורם ההספק בו המתקן יעבוד בגנרטור.
- **הערה:** יש לציין שלא תמיד ניתן לקבוע את גורם ההספק של מתקן הייצור על סמך רכיביו בלבד ויהיה הצורך להיעזר במערכת נוספת להגעה לגורם ההספק הרצוי.

התקנת סוללת קבלים במתקן הייצור DG

במתקן ייצור העובד בגורם הספק השראי תותקן סוללת קבלים לקיזוז הספק ריאקטיבי הנצרך במתקן הייצור.



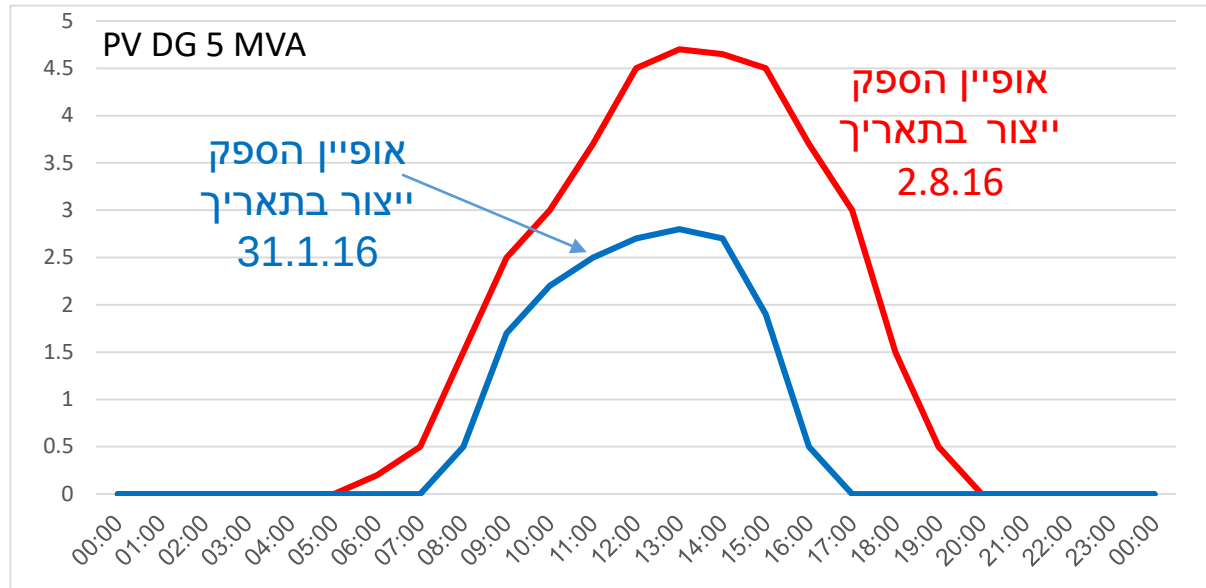
P_{DG} ההפסק הפעיל שחוזר לרשת מתח גבוה בנקודת החיבור המשותפת.

$Q_C - Q_{DG}$ הפרש ההספקים הריאקטיבים בין ההספק הריאקטיבי שסוללת הקבלים מייצרת

לבין ההספק הריאקטיבי הנצרך ע"י מתקן הייצור DG. הפרש זה מקטין את סה"כ

ההספק הריאקטיבי שחוזר לרשת מתח גבוה בנקודת החיבור.

בקרת מתח למתקן ייצור DG מסוג פוטו-וולטאי



- עוצמת קרינת השמש משתנה במהלך שעות היממה, שיא הקרינה בצהריי היום ואפסית בלילה.

- פרמטרי איכות החשמל שנבדקים: שינויי מתח אספקה שינויי מתח אספקה מהירים

בדיקת השפעת PV על רשת מ.ג. ב 2 נקודות קיצון

עומס מרבי בקו עם ייצור מינימלי של מתקן הייצור

$$P_{DG} = 0 \quad P_L \text{ ו- } Q_L \text{ גבוהים}$$

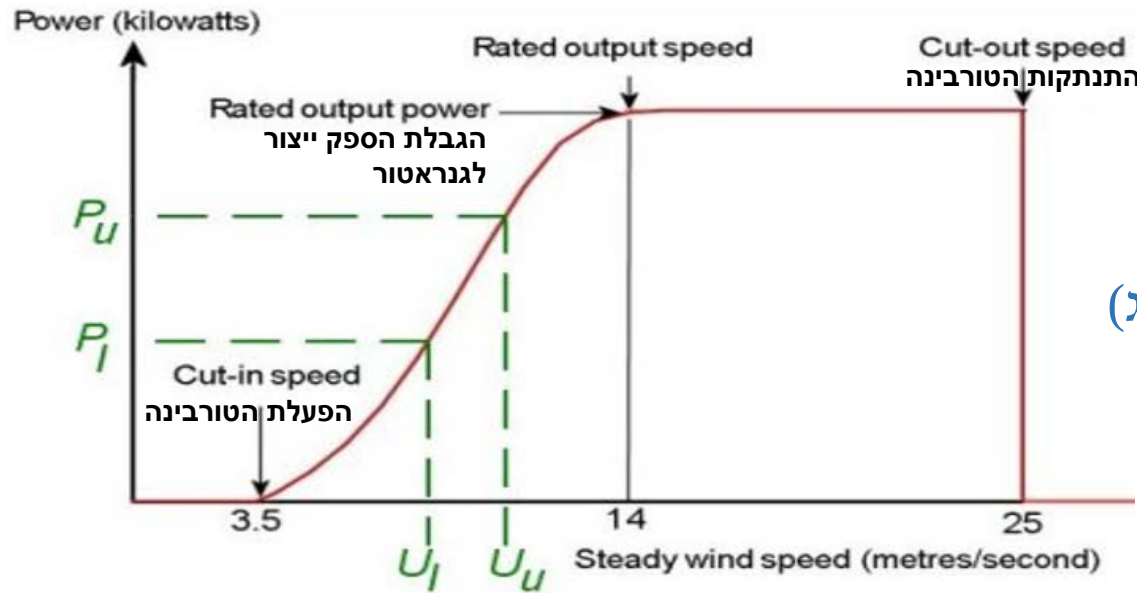
שינוי מתח בנקודת החיבור המשותפת מתבטא בירידת מתח מכיוון שהביקוש (הצריכה) האנרגיה בקו מצד העומס גבוה מאוד ביחס לאנרגיה בקו.

עומס מינימלי בקו עם ייצור מרבי של מתקן הייצור

$$P_{DG} \text{ מקסימלי} \quad P_L \text{ ו- } Q_L \text{ קטנים}$$

שינוי מתח בנקודת החיבור המשותפת מתבטא בעליית מתח מכיוון שהביקוש (הצריכה) האנרגיה בקו מצד העומס נמוך מאוד ביחס ליכולת הקו.

בקרת מתח למתקן ייצור DG מסוג טורבינת רוח



- עוצמת הרוח דינאמית מאוד ומשתנה בזמנים קצרים מאוד (שניות).

- פרמטרי איכות החשמל שנבדקים: ריצודים (במצב יציב ובפעולות מיתוג) שינויי מתח אספקה (בפעולות מיתוג)

$-P_{st}=10$ – עוצמת ריצוד עבור 10 דקות.

$-P_{lt}=0.25$ – עוצמת ריצוד עבור 120 דקות.

Switching

$$d_{max} = k_u(\Psi_k) * \frac{S_n}{S_k}$$

$k_u(\Psi_k)$ - מקדם שינוי המתח

$$P_{st} = 18N_{10}^{0.31} k_f(\Psi_k) * \frac{S_n}{S_k}$$

$$P_{lt} = 8N_{120}^{0.31} k_f(\Psi_k) * \frac{S_n}{S_k}$$

$k_f(\Psi_k)$ - מקדם הריצודים במיתוג

Steady state

$$P_{lt} = c(\Psi_k, v_a) * \frac{S_n}{S_k}$$

v_a - מהירות רוח שנתית.

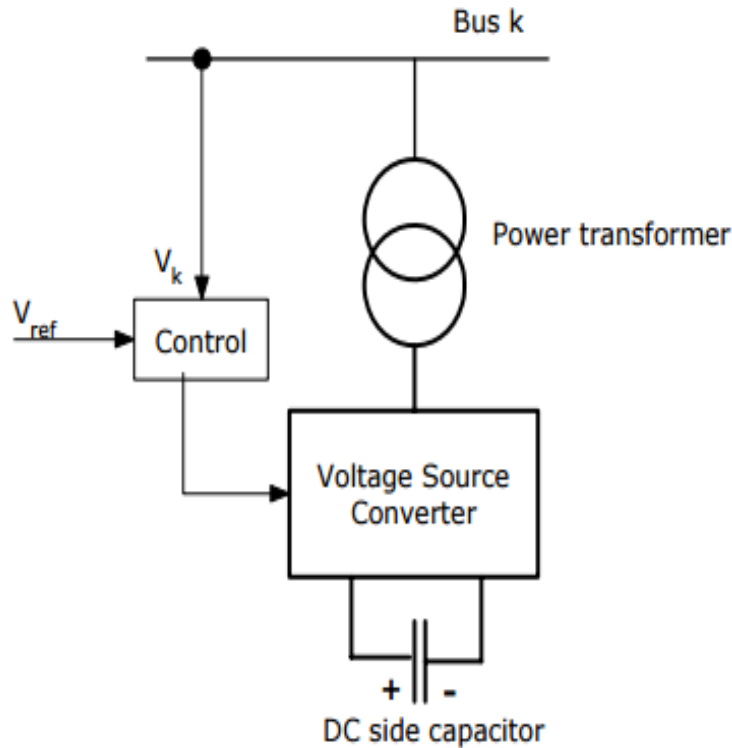
S_n - הספק נומינלי של טורבינת רוח אחת.

S_k - הספק הקצר של הרשת בנקודות חיבור הטורבינה.

$c(\Psi_k, v_a)$ - מקדם הריצוד המהווה פונקציה של מהירות הרוח הממוצעת וזווית אימפדנס הרשת.

בקרת מתח באמצעות מערכת STATCOM

התקנת מפצה סטטי סינכרוני STATCOM - Static Compensator בצד מתקן הייצור לפני השנאי .



מטרת מערכת STATCOM:

שליטה על יציבות מתח הרשת ע"י שליטה בהספק הריאקטיבי ברשת. הבקר מתנהג כסליל או כקבל כתלות בזווית ההצתה.

מפצה סטטי סינכרוני מתנהג כקבל בעל ויסות רצוף של הקיבול ומתנהג כסליל בעל ויסות ריצוף של ההשראות ובעל תגובה מידית לאות הבקרה.

מקור האנרגיה של הבקר הוא קבל מתח DC בכניסה למערכת SVC, הממירה מתח DC ל- AC של הרשת.

שיטת עבודת מערכת STATCOM

- לצורך עליית המתח ברשת מתח גבוה בנקודת החיבור המשותפת המערכת מחזירה הספק ריאקטיבי לרשת.
- לצורך הורדת המתח ברשת מתח גבוה בנקודת החיבור המשותפת המערכת צורכת הספק ריאקטיבי מהרשת.

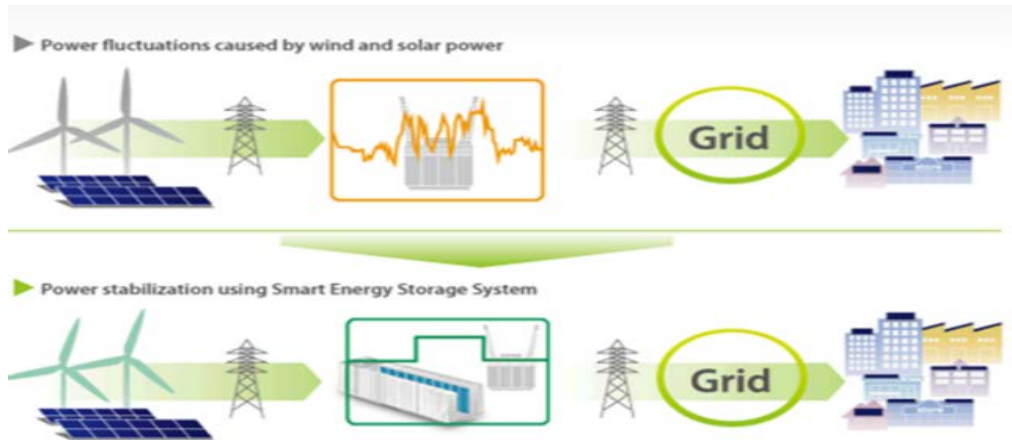
מתקני ייצור DG ומערכות לאגירת אנרגיה

מתקני ייצור מסוג אנרגיות מתחדשות כגון חוות רוח ושמש גדולות מוגדרות כ **Non Dispatch**.

• Non Dispatch

אי היכולת לקבוע מראש את הספק הייצור, אי היכולת לעקוב תמיד אחר הביקוש ואי היכולת לבצע בקרת שליטה על הספק הייצור.

• מערכת אגירת אנרגיה פותרת את בעיית ה Non Dispatch ומשפרת את איכות אספקת החשמל.



• יתרונות עיקריים למתקן אגירת אנרגיה

1. העברת אנרגיה בצורה מבוקרת ובזמנים מוגדרים מראש (זמני שיא).

2. העברת אנרגיה בצורה מבוקרת תוך שמירה על ספי הפרמטרים איכות החשמל.

1. Short Term Variability

מערכות אגירת אנרגיה עבור השלמת אנרגיה ממתקן ייצור לטווח קצר – מספר שעות בודדות ועד יממה. בדרך כלל מתקן ייצור DG ישתמש במערכות האגירה הנ"ל עבור שיפור איכות החשמל כתוצאה מתגובה מידית של המערכת.

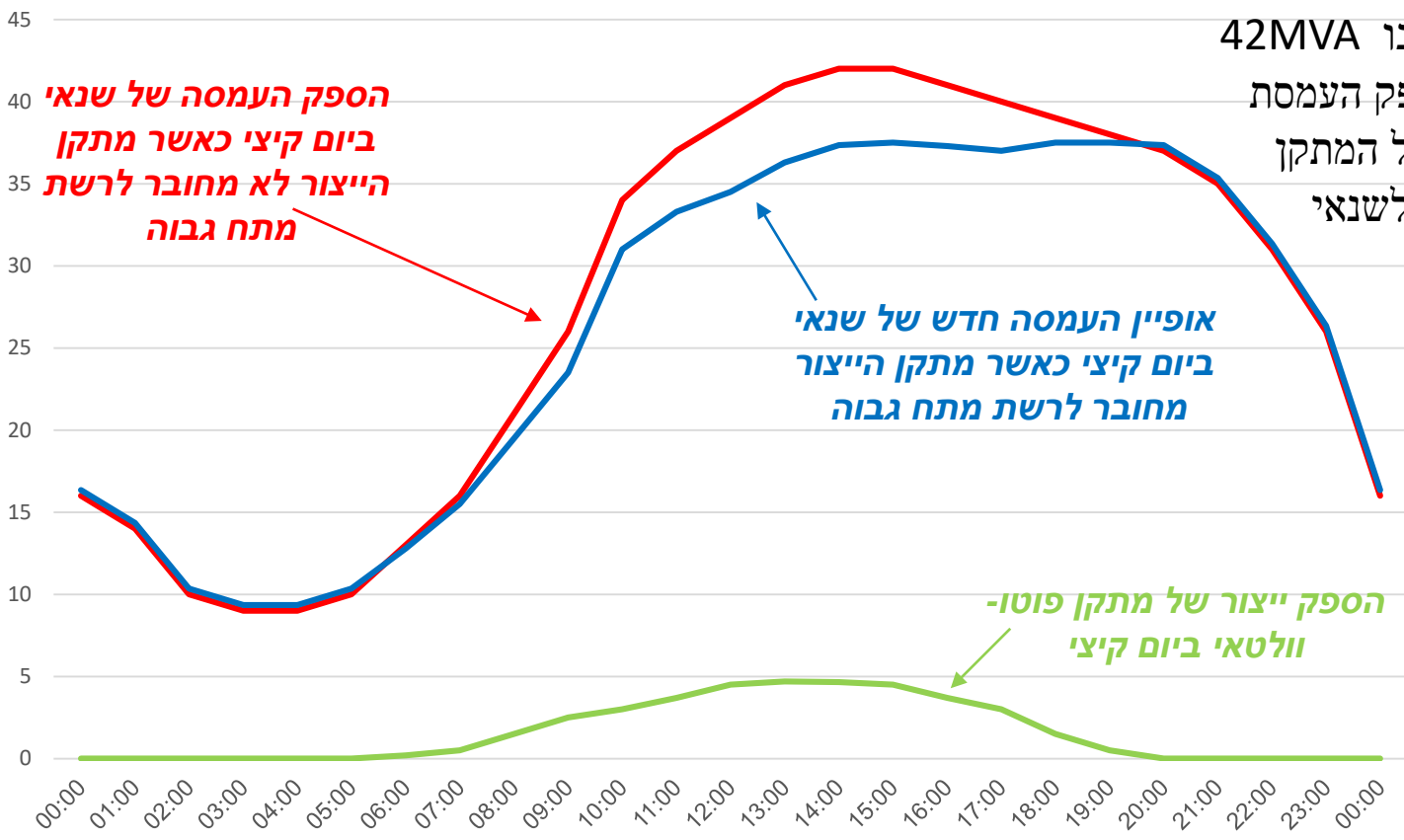
2. Long Term Variability

מערכות אגירת אנרגיה עבור השלמת אנרגיה ממתקן ייצור לטווח ארוך – מיממה ועד מספר ימים.

מודל מתקן ייצור PV בשילוב מערכת אגירה אנרגיה

שנאי בתחמ"ש בעל הספק 45MVA המזין צרכנות מעורבת (ביתית, עסקית ותעשייה קלה).
מתקן ייצור PV בעל הספק 5MVA

1. מודל יום קיצי 2.8.16

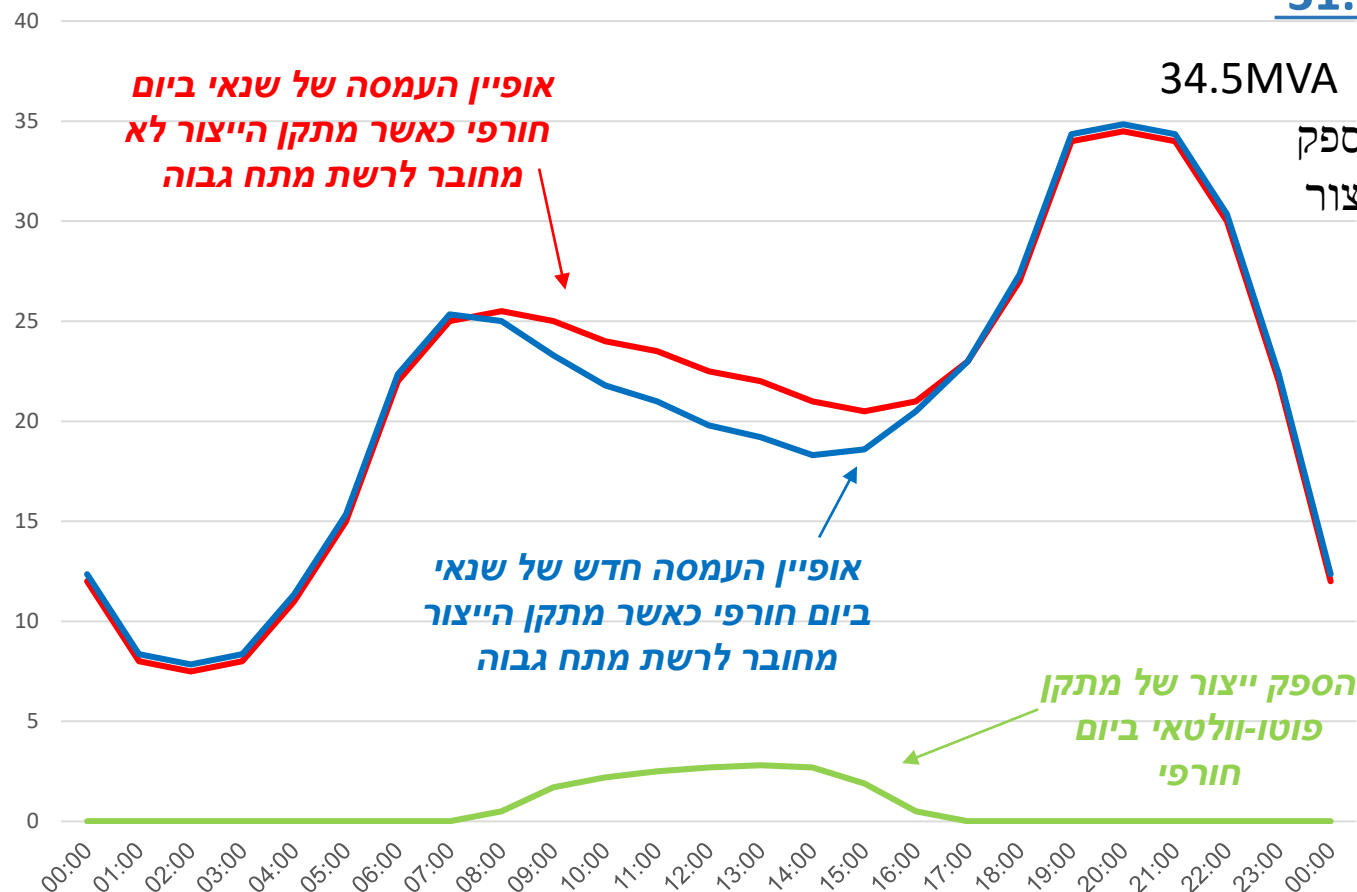


שיא הספק העמסת השנאי הינו 42MVA
קיימת התלכדות בין שיא הספק העמסת
השנאי ושיא הספק הייצור של המתקן
הפוטו-וולטאי. אפשר לחשב לשנאי
שיא הספק העמסה חדש הינו
37.5MVA, ניתן לומר
שהספק מתקן הייצור
קיזז כ- 4.5MVA
משיא הספק העמסת השנאי.

הספק ייצור של מתקן פוטו-וולטאי ביום קיצי

מודל מתקן ייצור PV בשילוב מערכת אגירה אנרגיה

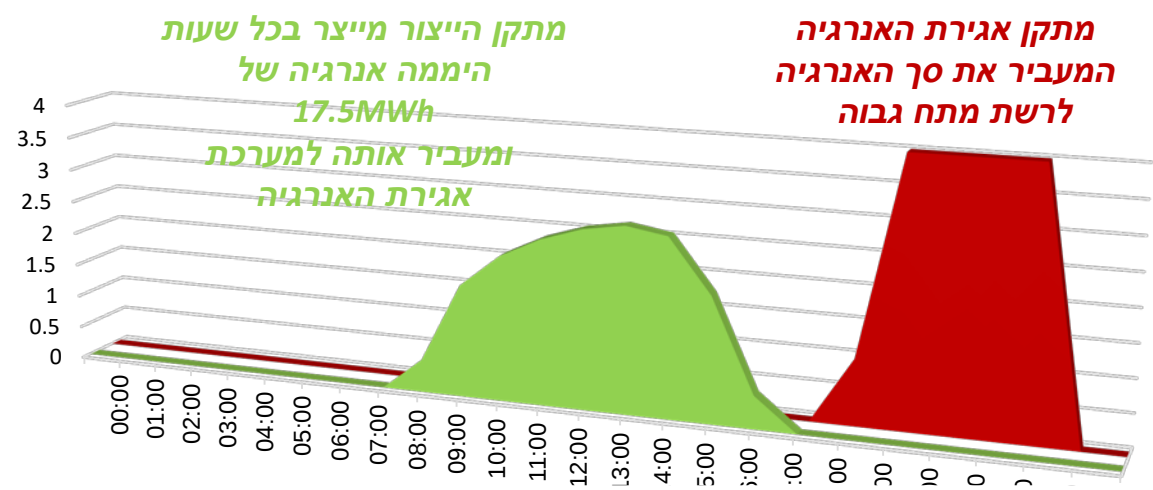
2. מודל יום חורפי 31.1.16



שיא הספק העמסת השנאי הינו 34.5MVA
לא קיימת התלכדות בין שיא הספק העמסת השנאי ושיא הספק הייצור של המתקן הפוטו-וולטאי.
שיא הספק העמסת השנאי לא ירד משיאו.

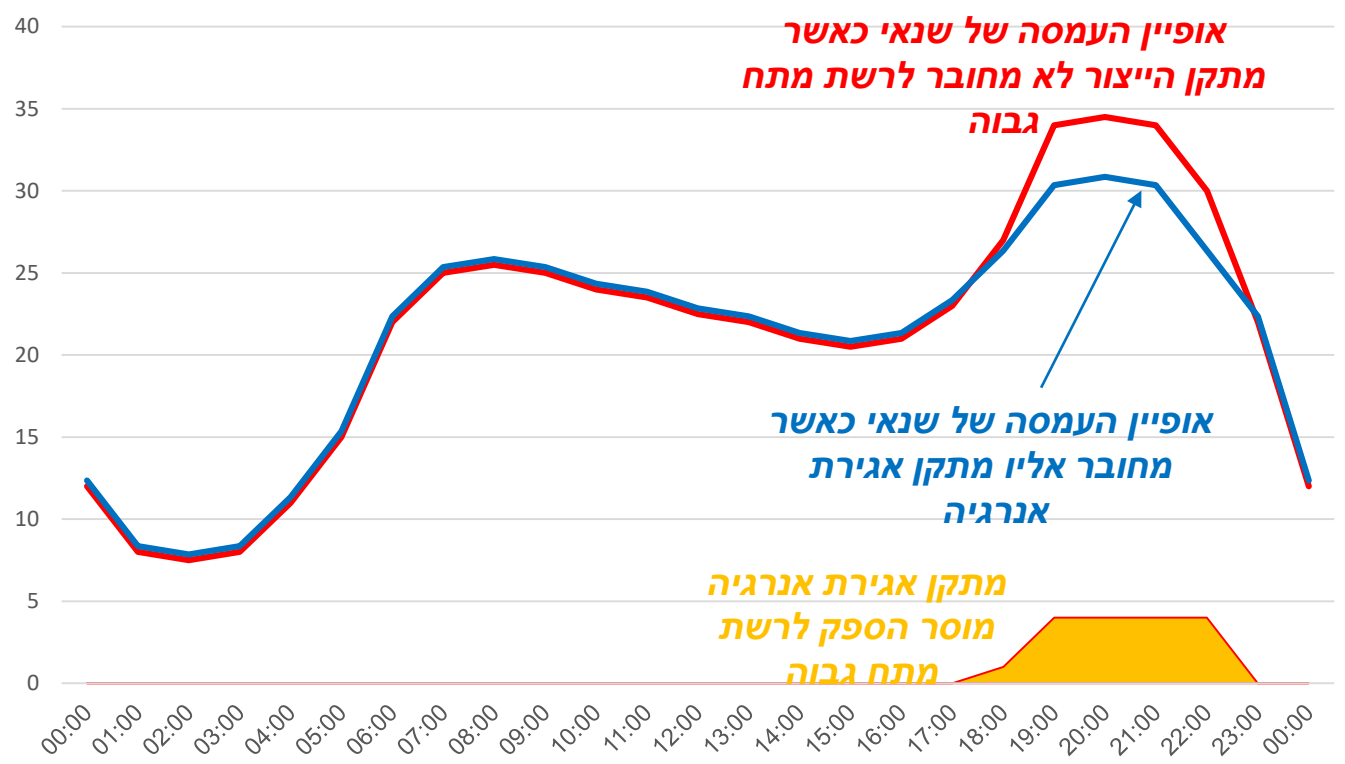
ישנו הצורך לביצוע אופטימיזציה נכונה להורדת שיא עקומת העמסה של השנאי ע"י מתקן אגירת אנרגיה המהווה הזזה מכוונת של תרומת אנרגיית מתקן הייצור בציר הזמן לפי דרישה.

מודל מתקן ייצור PV בשילוב מערכת אגירה אנרגיה



חיבור מתקן אגירת אנרגיה למתקן הייצור המסוגל לאגור את כל האנרגיה בשעות היום כ-17.5MWh, ומעביר אותה לרשת מתח גבוה בזמן נתון מראש במשך מספר שעות סביב השעה 20:00 בצורה מבוקרת.

התלכדות שיא הספק העמסת השנאי והעברת האנרגיה ממתקן האגירה גרמה לירידת שיא הספק העמסת השנאי משיאו המקורי 34.5MVA ל-30.5MVA. ניתן לומר שהספק מתקן הייצור קיזז כ-4MVA משיא הספק העמסת השנאי



מודל מתקן ייצור PV בשילוב מערכת אגירה אנרגיה

הקטנת הספק השנאי בתחמ"ש

- בשנאי ישנם הפסדים המורכבים מהפסדי ברזל והפסדי נחושת. הפסדי ברזל הם הפסדים קבועים ואילו הפסדי נחושת הם הפסדים משתנים לפי עומס השנאי.

$$\Delta P = \Delta P_{FE} + \Delta P_{CU}$$

$$\Delta P_{FE} = const$$

$$\Delta P_{CU} = K * S_L^2$$

- ככל שהעומס עולה בשנאי כך ההפסדים על השנאי עולים בהתאם. אם מקטינים את הזרימה דרך השנאי, ז"א מקטינים את העומס מהשנאי, אזי ההפסדים יקטנו ונצילות השנאי תעלה. בשילוב מערכות לאגירת אנרגיה בצורה נכונה ניתן להוריד את עומס השנאי ובכך להקטין את גודלו ואת ההפסדים שלו.

סיכום

- אני עובד בחברת חשמל מחוז דן במחלקת תפעול והשגחה, כחלק מתפקידי כמורשה בכיר האחראי על תפעול מערכת החלוקה: תכנון תיקון הפרעות ותקלות ברשת, ניתוח העברות אספקה ברשת עקב הפרעות ושמירה על פרמטרי איכות החשמל ברשת בגבולות המותרים, אני מרגיש שהפרויקט יכין את אנשי התפעול במחוז דן בתהליך קליטת מתקני ייצור DG.
- ישנו הצורך להמשיך ולחקור על אמצעים טכנולוגיים מתקדמים חדשים אשר יכולים לשמור על ספי פרמטרי איכות החשמל ברשת החשמל בגבולות המותרים עקב חזירת מתקני ייצור DG. (כדוגמת משנה הדרגות האלקטרוני).
- בשנים האחרונות בעולם ישנה האצה בהקמת מתקני ייצור DG וחזירתם למערכת החלוקה, יש להתמיד בקריאת מאמרים חדשים בנושא שכן עבור כל מתקן ייצור DG מבוצע סקר היתכנות הסוקר את כל השפעות המתקן על הרשת מתח גבוה.
- בשלב תכנון חיבור מתקן ייצור DG לרשת מתח גבוה מבוצע סקר היתכנות של חברת החשמל שבו נבדקת טכנולוגיית מתקן הייצור, הספקו והקו מתח גבוה אליו הוא יחובר לרבות נקודת החיבור המשותפת. בשלב זה כדאי להציע ליזם שילוב של מערכת אגירת אנרגיה בצד מתקן הייצור כחלק בלתי נפרד ממתקן הייצור ולבצע מודל מתאים כפי שהוכן בפרויקט.

תודה רבה

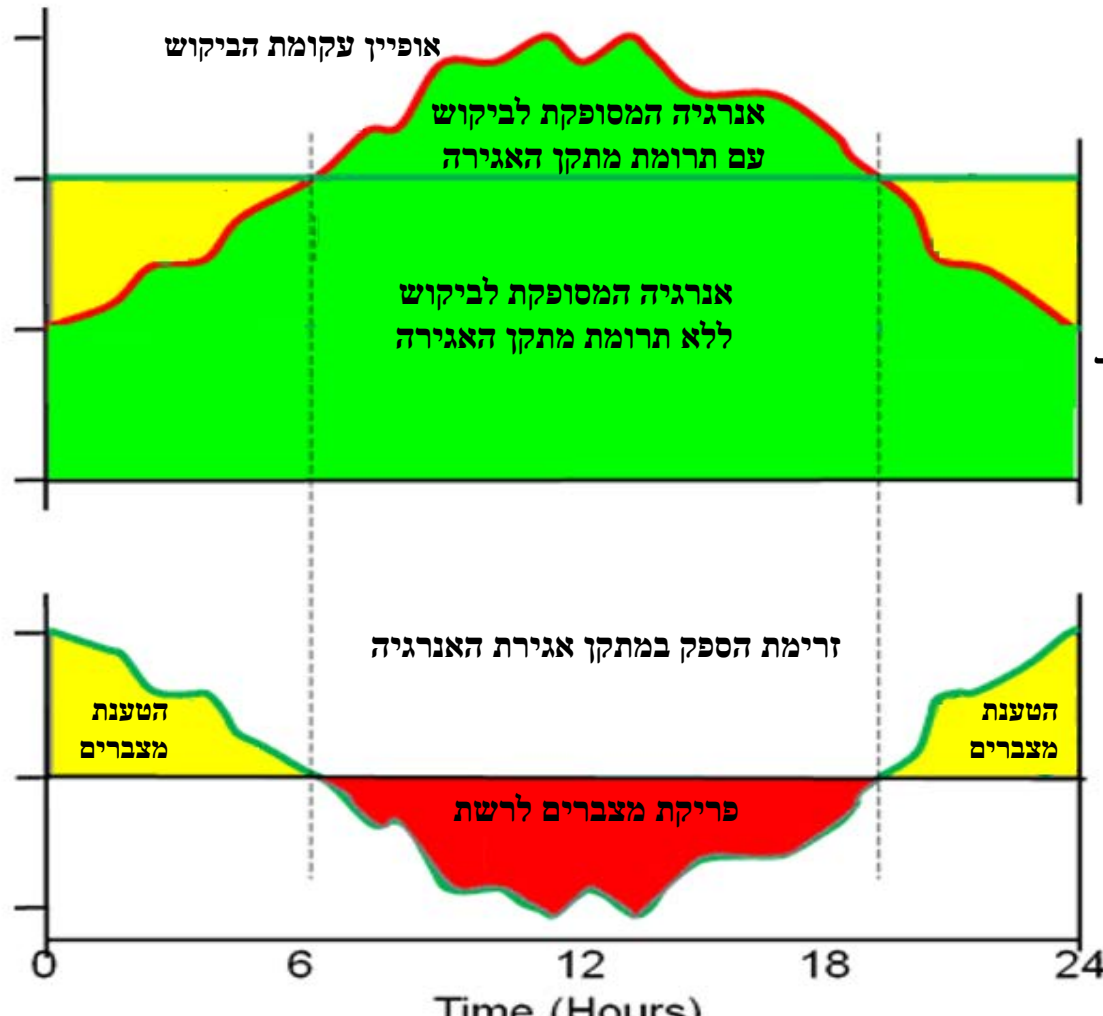
על

ההקשבה

המשך יום נעים

מתקן ייצור DG בשילוב מערכת אגירת אנרגיה

- מתקני ייצור DG מסוג שמש ורוח במצב תפעולי בדרך כלל נדרשים לייצוב ושינוע של אנרגיה לטווח הקצר של מספר שעות. מערכות האגירה אשר מתאימות מבוססות על טעינה ופריקה: מצברים לסוגיהם, קבלי על, סלילי על וכו'.

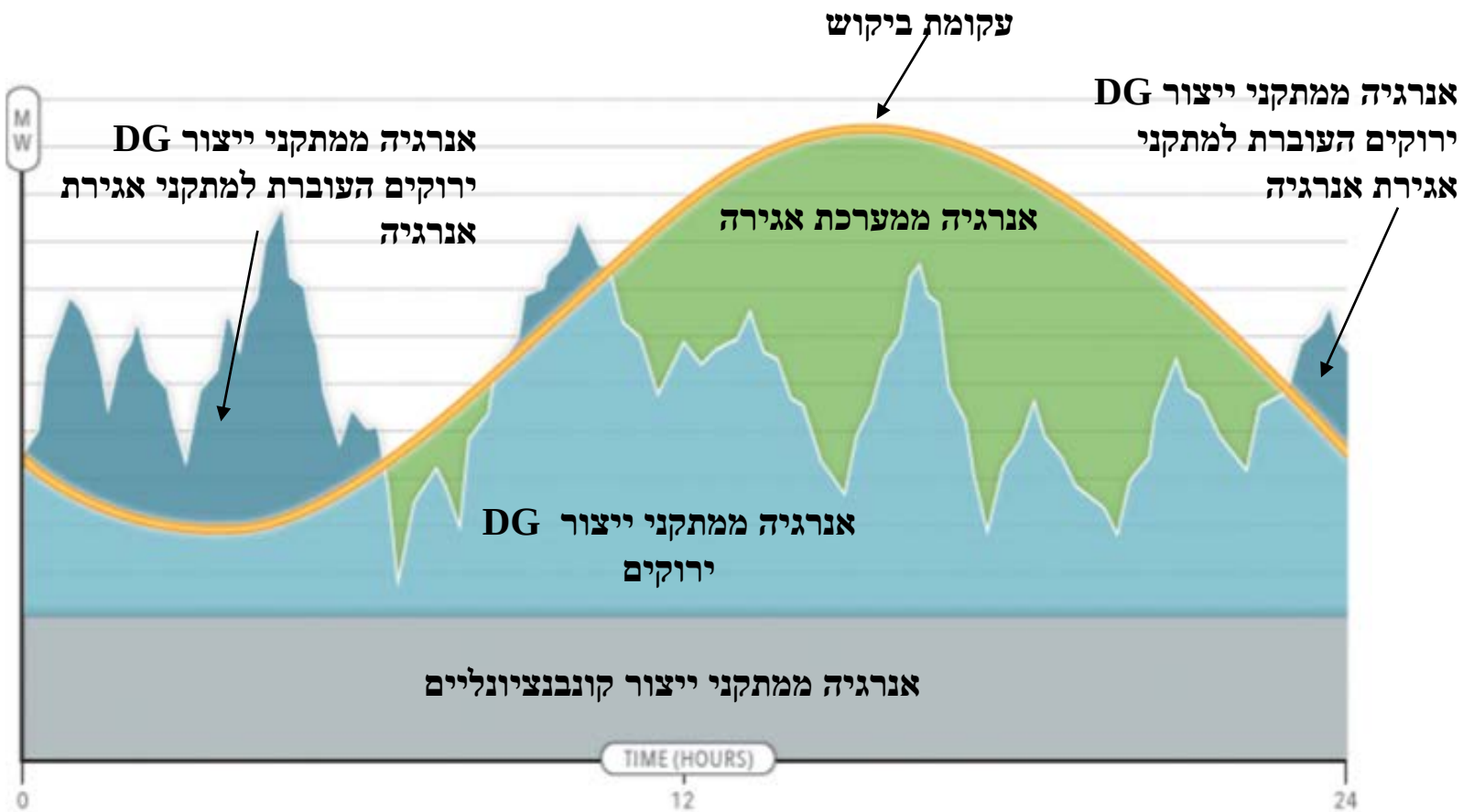


שני יתרונות עיקריים בשיטת אגירת אנרגיה מסוג טעינה ופריקה:

1. יכולת שליטה מלאה ומידית על הטענת ופריקת המצברים.
2. בתכנון יעיל ונכון ניתן לבחור גודל מצברים בהספק כזה שלא ידרוש עלויות גבוהות, אשר יוכל לאגור אנרגיה ממתקן הייצור במהלך שעות היממה ויזרים אותה לרשת בשעות שיא הביקוש.

מתקני ייצור DG ומערכות לאגירת אנרגיה

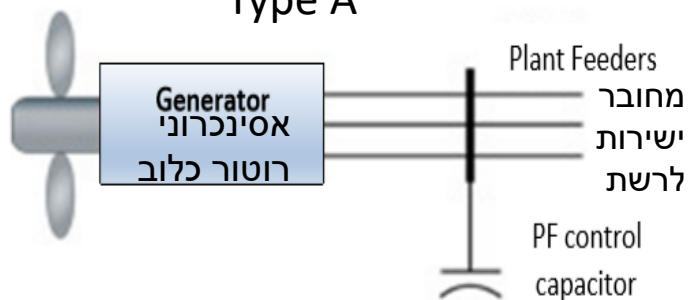
עקומת ביקוש ברשת מתח גבוה המורכבת משני סוגי אנרגיות קונבנציונלית ומתחדשת, כאשר למתקן הייצור DG מסוג אנרגיות מתחדשות קיימת מערכת אגירת אנרגיה.



סוגי טורבינות רוח

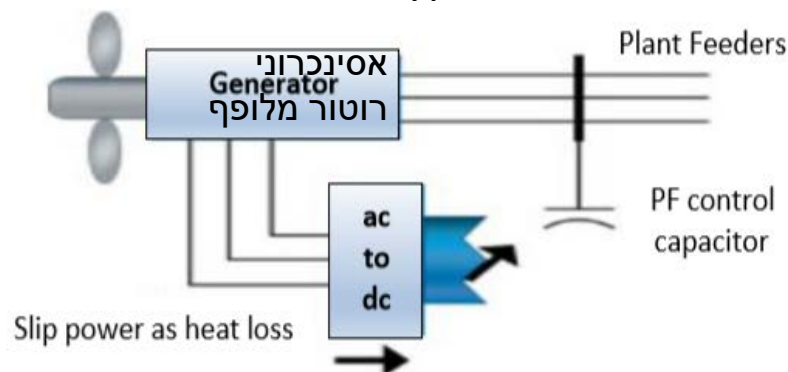
4 מודלים לחיבור טורבינת הרוח לרשת מתח גבוה

Type A



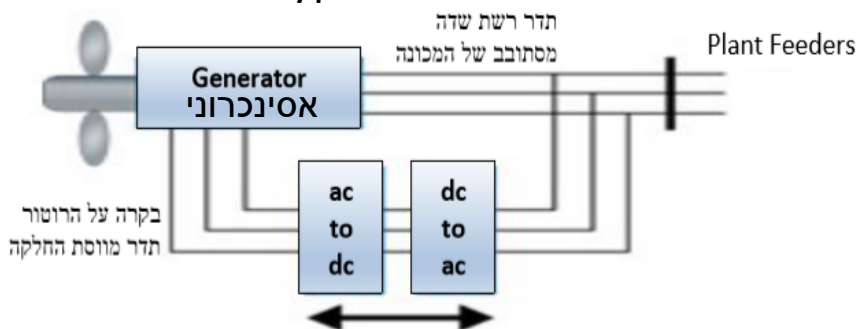
גנראטור מוציא מתח AC בתדר חופשי בהתאם למהירות הרוח.

Type B



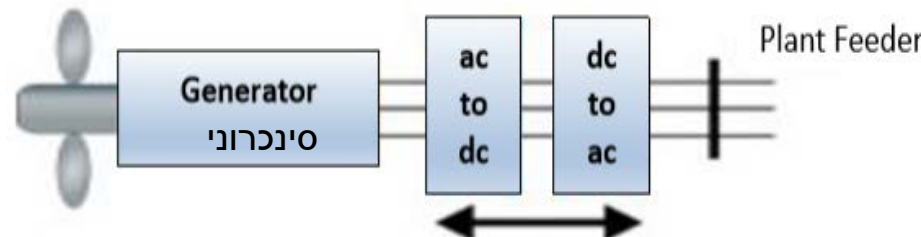
בקרה לרוטור בלבד ע"י התנג' משתנה.

Type C



בקרה אקטיבית בעזרת ממיר הספק לרוטור

Type D



ממיר הספק מלא, נצילות יורדת.

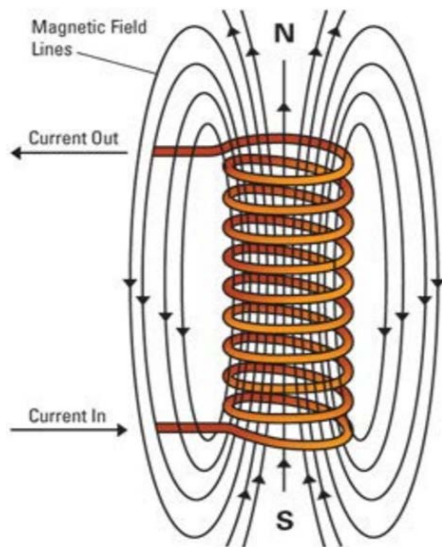
סוגי מתקני אגירת אנרגיה

1. Short Term Variability

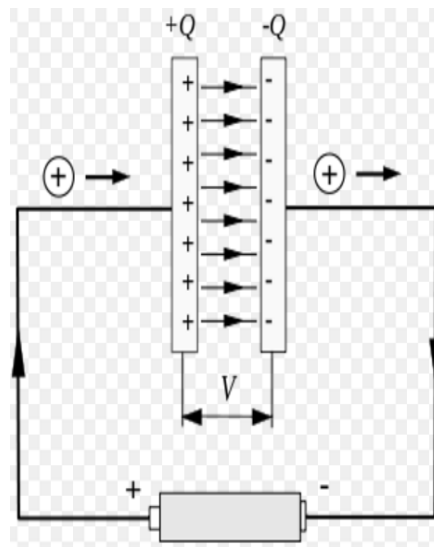
מערכות אגירת אנרגיה עבור השלמת אנרגיה ממתקן ייצור לטווח קצר – מספר שעות בודדות ועד יממה. בדרך כלל מתקן ייצור DG ישתמש במערכות האגירה הנ"ל עבור שיפור איכות החשמל כתוצאה מתגובה מידית של המערכת.

אנרגיה חשמלית קבל- אלקטרוסטטית / סליל – מגנטית

רכיב חשמלי האוגר אנרגיה ויכול לפרוק אותו בזמן נתון אחר. האנרגיה החשמלית נשארת חשמלית.



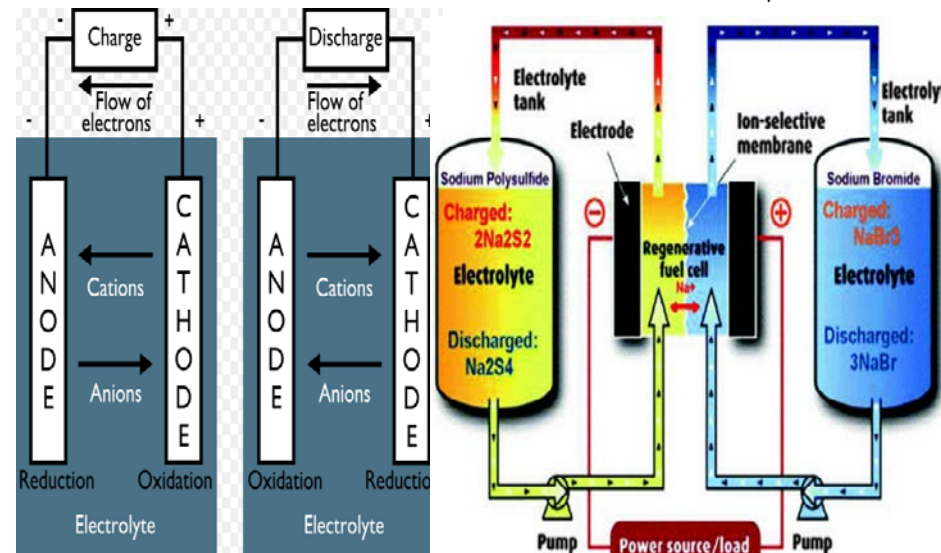
סליל



קבל

אנרגיה כימית מצברים / מצברי זרימה

מצבר רכיב חשמלי הבנוי מ 2 תאים התא האלקטרוכימי בו החשמל מופק והתא האלקטרוליטי בו האנרגיה הכימית נאגרת. מצבר זרימה אוגר אנרגיה בתמיסות אלקטרוליטיות מאפשר קיבולת אגירה יותר גדולה ממצבר רגיל.



מצבר רגיל

מצבר זרימה

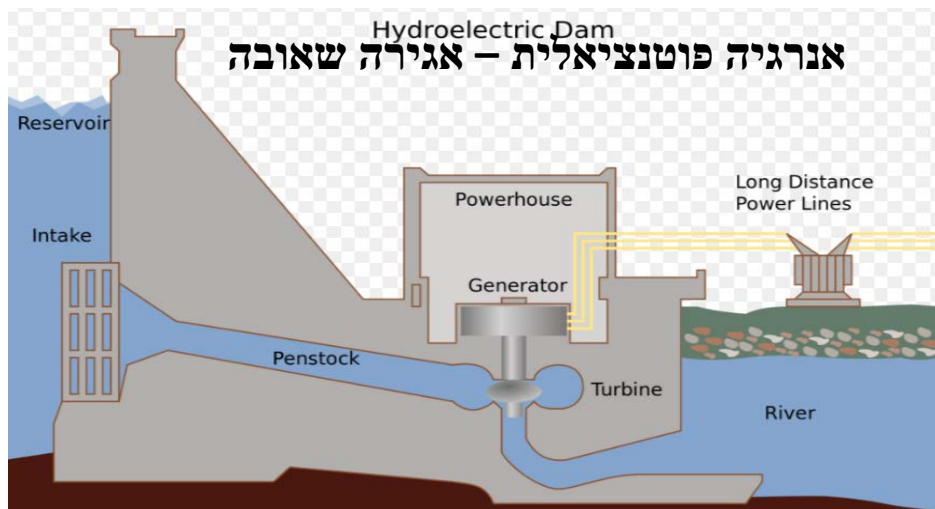
סוגי מתקני אגירת אנרגיה

2. Long Term Variability

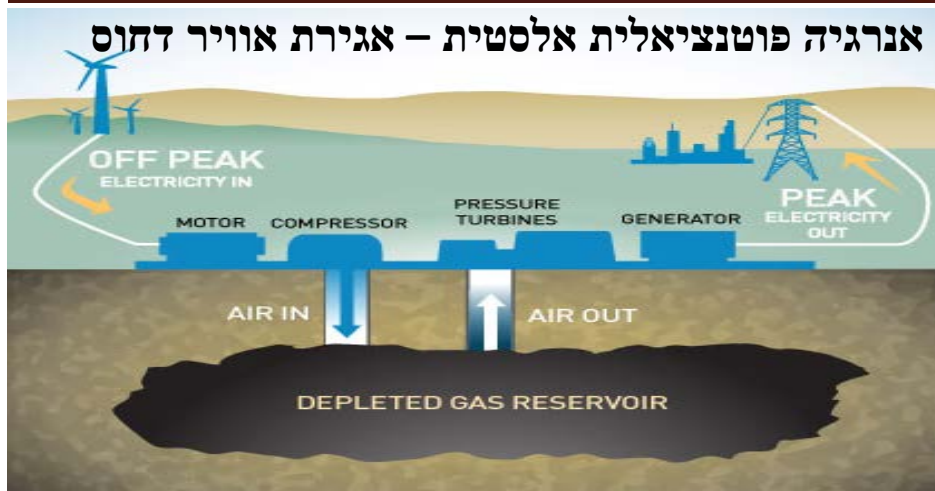
מערכות אגירת אנרגיה עבור השלמת ממתקן ייצור לטווח ארוך – מיממה ועד מספר ימים.

אנרגיה מכנית

אנרגיה פוטנציאלית – אגירה שאובה



אנרגיה פוטנציאלית אלסטית – אגירת אוויר דחוס



אנרגיה תרמית – אגירת אנרגיה בטמ"פ גבוהות ונמוכות

אגירת אנרגיה במיכל תרמי לשימוש בשלב מאוחר יותר. מיכל תרמי יכול לשמור על טמפרטורה גבוהה או נמוכה מטמפרטורת הסביבה.

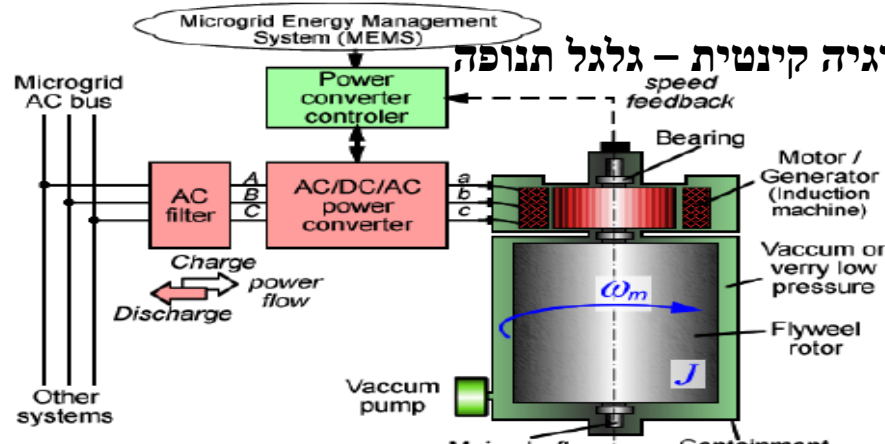
אגירת אנרגיה תרמית על בסיס חום של התכה.

אגירת אנרגיה תרמית עם טמפרטורה משתנה.

מאגרי חום על בסיס בטון

אגירת אנרגיה תרמית בטמ"פ נמוכה על בסיס מים מאגרי אנרגיה קריוגניים

אנרגיה קינטית – גלגל תנופה



תקציר

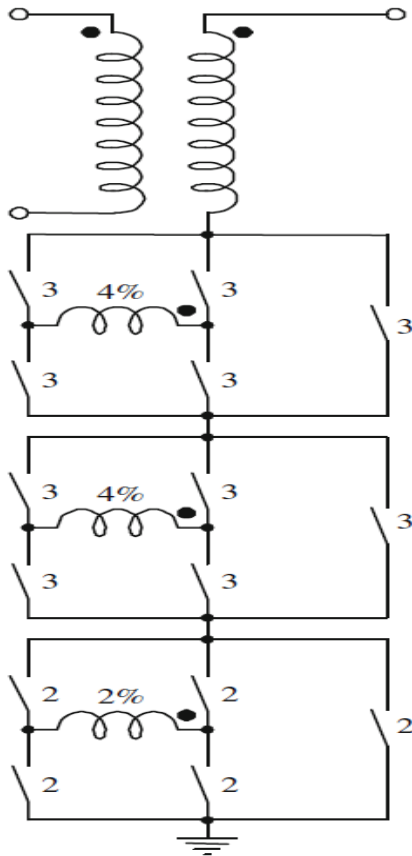
- הצגת מתקני הייצור DG השכיחים בארץ מסוג אנרגיות מתחדשות: פוטו-וולטאים וטורבינות רוח או מסוג מאנרגיות תרמו-דינאמיות.
- הצגת מבנה רשת החלוקה ללא מתקני ייצור DG ועם מתקני ייצור DG כאשר מבוצעת השוואה בין שני הסכמות התפעוליות.
- הצגת ההשפעות השליליות בעת חדירת מתקן ייצור DG על ציוד רשת החלוקה ועל פרמטרי איכות החשמל (מתן דגש על איכות המתח). הצגת דרכי התמודדות קונבנציונליים (אמצעים שקיימים כיום ברשת החלוקה ואמצעים הקיימים במתקן הייצור DG) ודרכי התמודדות המבוססים על טכנולוגיות מתקדמות.
- שילוב מתקן אגירת אנרגיה עם מתקן ייצור DG וביצוע מאזן אנרגטי לכדאיות חיבור מתקן ייצור DG דרך מתקן אגירת אנרגיה.

בקרת מתח באמצעות משנה דרגות אלקטרוני

התקנת משנה דרגות אלקטרוני לשנאי STEP UP של מתקן הייצור.

מטרת משנה הדרגות האלקטרוני:

שמירה על רמת מתח תקינה בנקודת החיבור המשותפת ע"י שינוי יחס ההשנאה בצד המשני של השנאי. מעבר מהיר מאוד (פחות מחצי שניה) בין הדרגות השונות כדי לתת מענה לשינויי מתח מהירים בקו מתח גבוה.



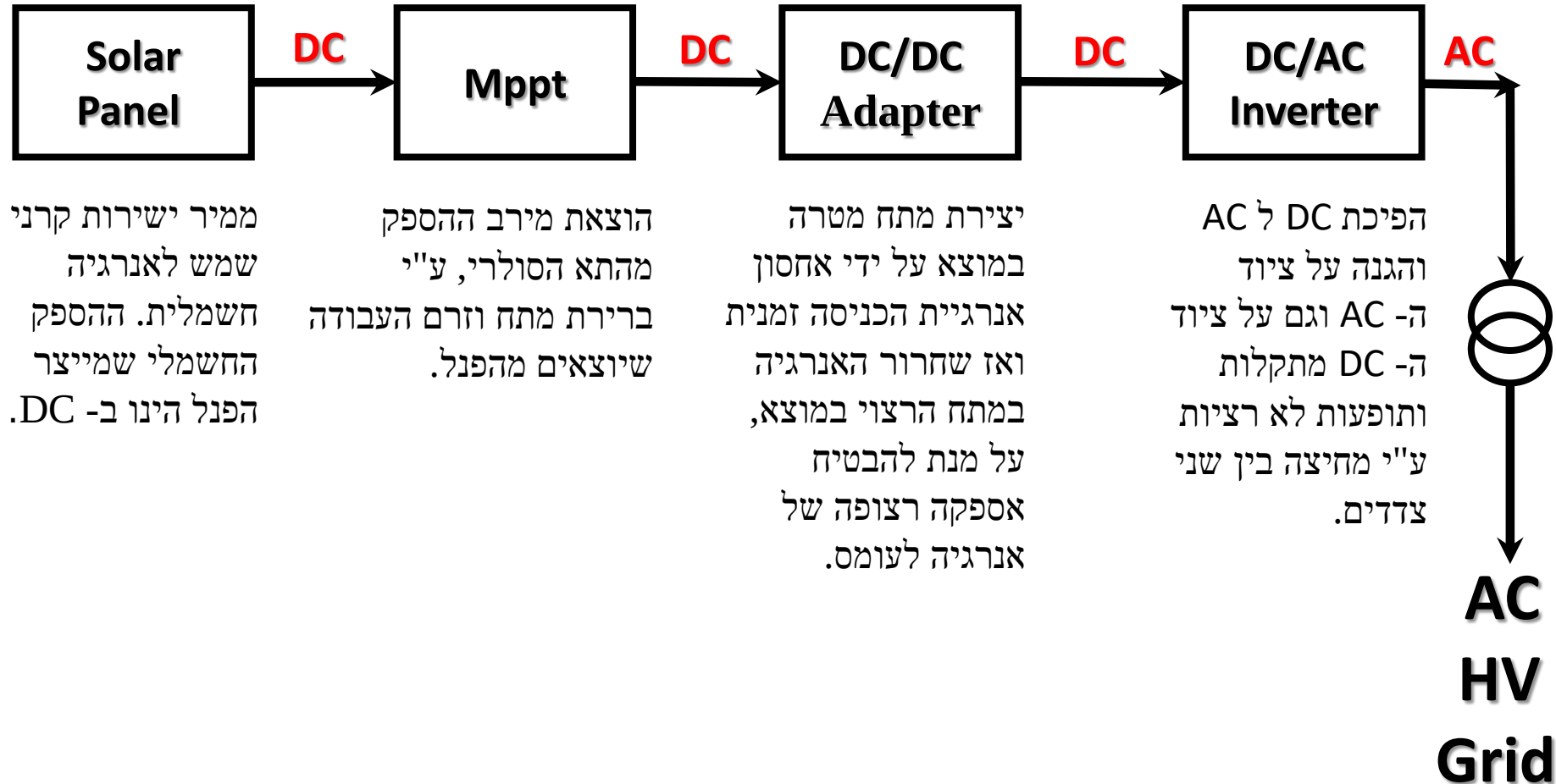
משנה הדרגות האלקטרוני מכיל מתגים מסוג Solid State Power Switch, המעבר בין הדרגות מתבצע כמעבר על פני אימפדנס רציף (Pass Impedance).

שיטת עבודת משנה הדרגות האלקטרוני:

הקונפיגורציה במשנה הדרגות האלקטרוני מאפשרת, בעזרת המתגים, "ללכוד" אימפדנס כחלק מכלל האימפדנס הרציף ואת אותו החלק "שלכדנו" לחבר לנקודת הכוכב בשנאי בתחמ"ש לצורך ויסות המתח.

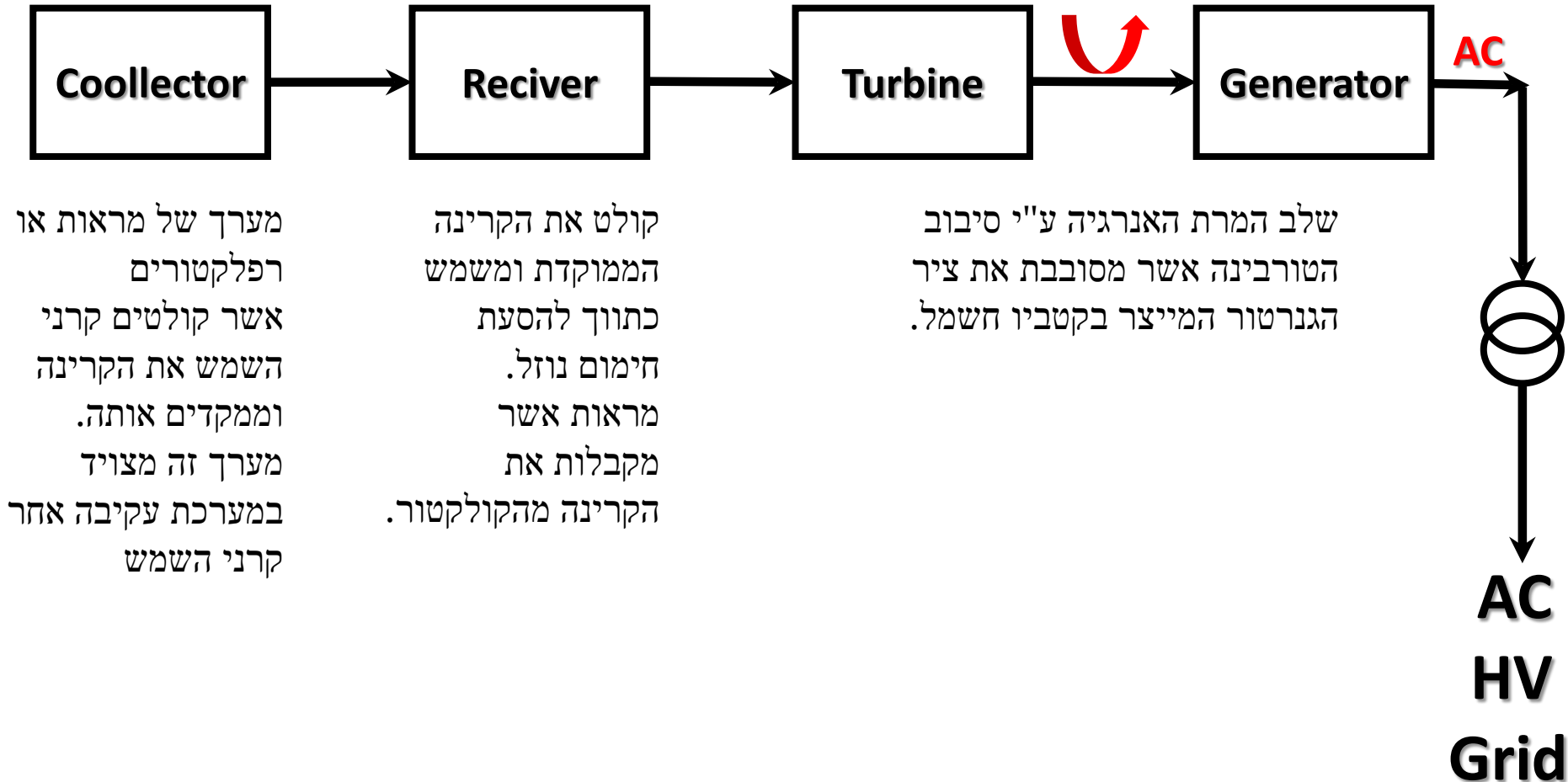
מבנה מערכת פוטו-וולטאית PV

Photo Voltaic Block Diagram



מבנה מערכת תרמו-סולרית CSP

Concentrating Solar Power Block Diagram



מבנה טורבינת רוח

Wind Turbine Block Diagram

