

נגה
ניהול
מערכת
החשמל



מערכת הולכת חשמל תת ימית

2024 – תמירון מדאר



מדוע יש צורך בקו הולכה תת - ימית?

העברת אנרגיה חשמלית באמצעות כבל מתח עליון / על עליון עשויה להיות מתאימה במסגרות עירוניות ופרבריות מאוכלסות בצפיפות, ליד שדות תעופה, או כאשר אין right-of-way עבור רשת הולכה עילית

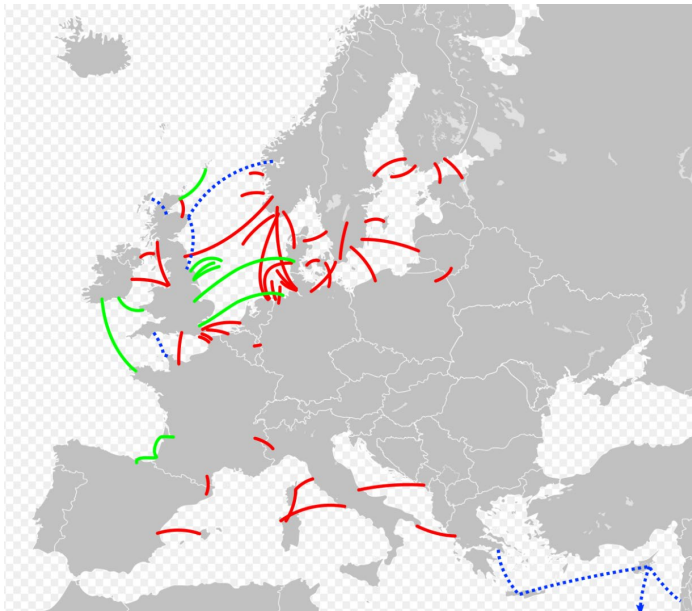


- העברת חשמל ממקורות אנרגיה, כולל תכניות אנרגיה מתחדשת בחו"ל
- חיבור בין רשתות הולכה חשמל אזוריות שונות כדי לאפשר סחר באנרגיה גלובלית

- אספקה לאזורים מרוחקים

- עם צמיחה של תכניות אנרגיה מתחדשת, מדינות רבות מכירות כיום את כבלי

הולכה תת ימי כתשתית קריטית



HVDC connections around Europe

In operation



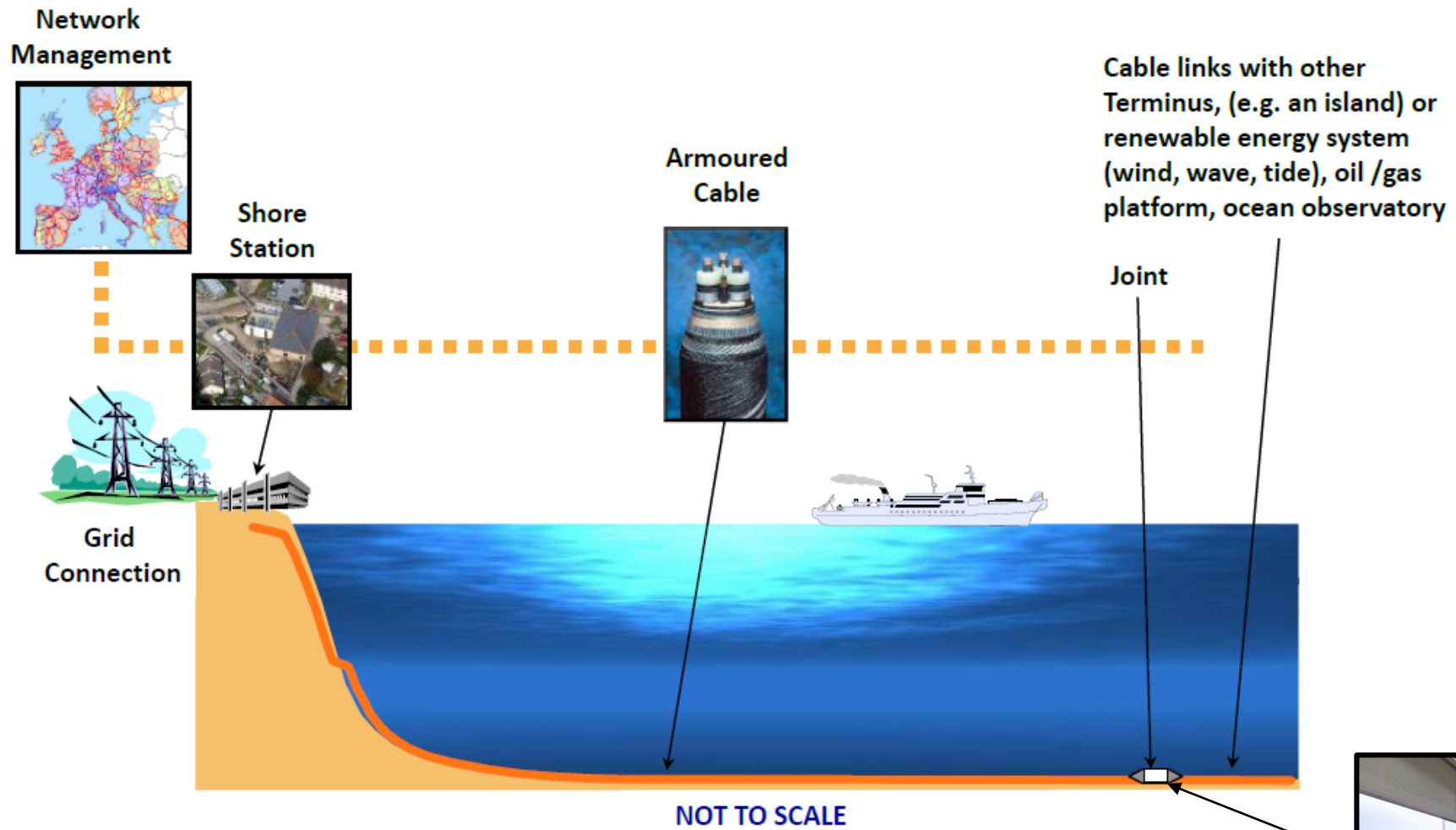
Under construction



Planned



מערכת כבל תת ימי אופיינית



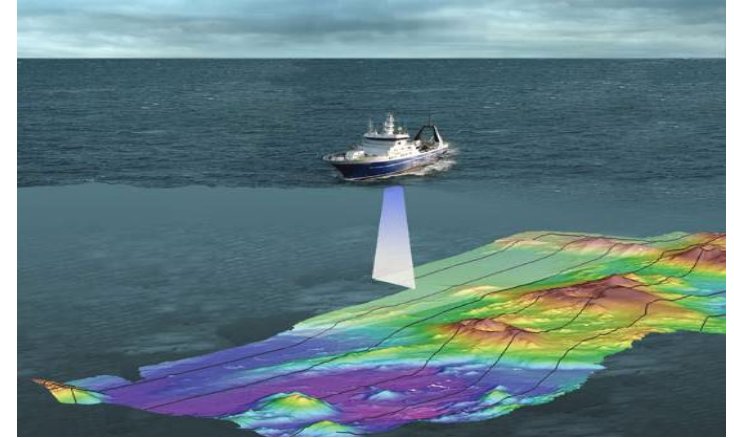
מרכיבים עיקריים בהטמנה

- כלי שייט להנחת הכבלים



Skagerrak (Nexans)

- אוניות לסקירת מסלולים



- רובוטים מטמינים



Nexans's CAPJET trenching system



Fugro's trenching system



Prysmian's hydroplow

- כלי שייט להטמנת הכבלים (לעיתים אותו הכלי שייט להנחה)

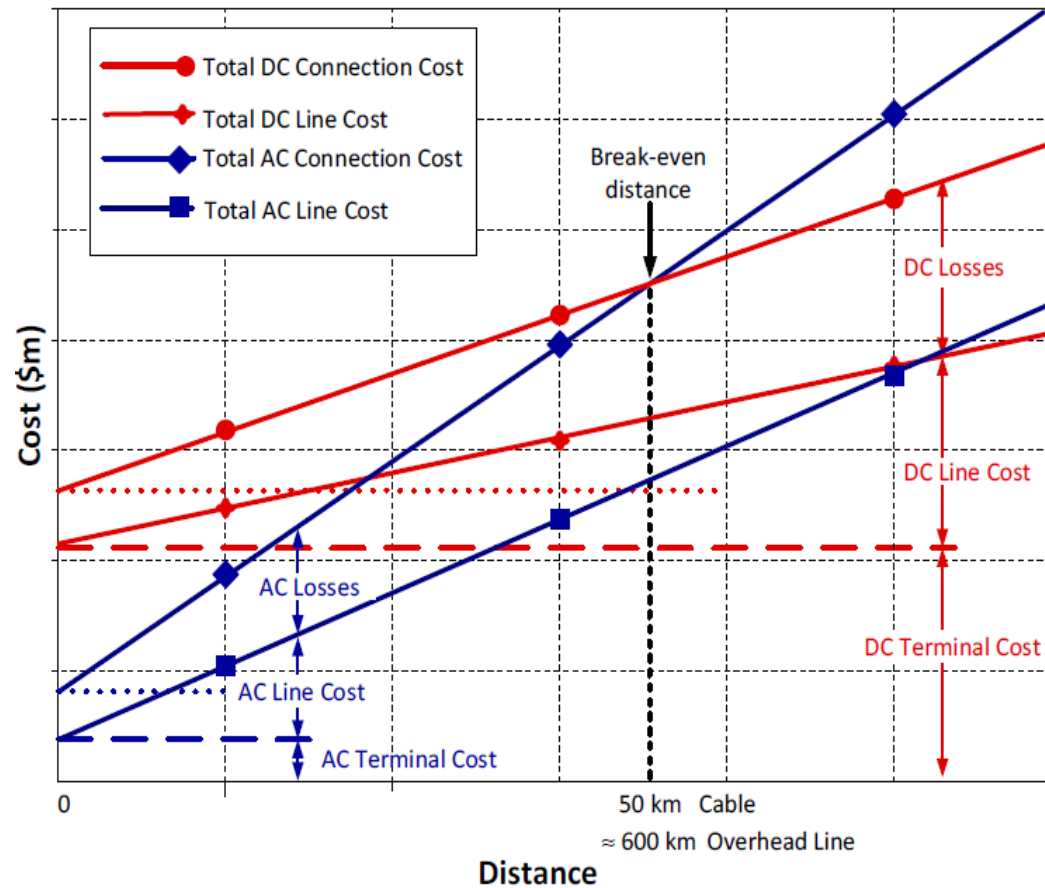


Giulio Verne (Prysmian)

ישנם שני סוגים בסיסיים של הולכה:

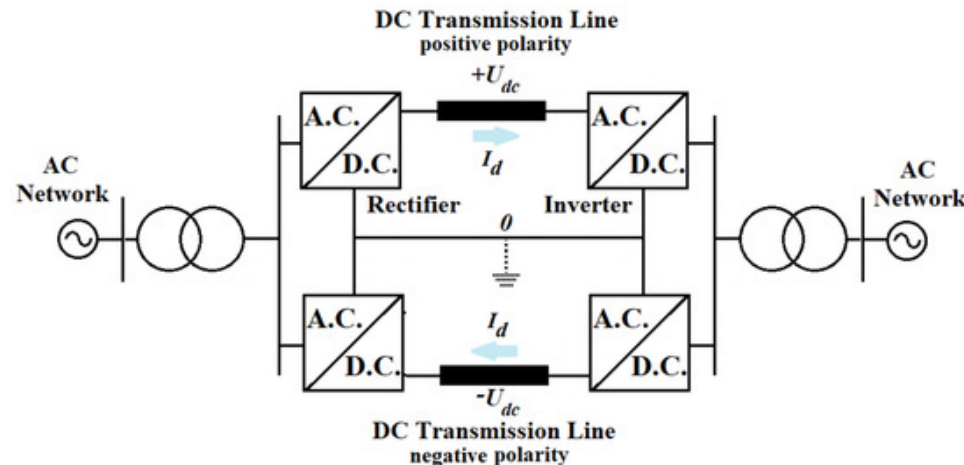
High Voltage Alternate Current - HVAC •

High Voltage Direct Current - HVDC •



ישנם שני סוגים בסיסיים של הולכה:

- **HVAC** - מוגבל על ידי מרחק ההולכה בגלל קיבוליות גבוהה, הזרם החילופין מועבר על ידי שלוש פאזות, כאשר בתחילתם ו/או סופם תחנת קליטה ביבשה כאשר הרכיבים העיקריים הם ריאקטורים, בכדי לקזז את קיבוליות הקו.
- **HVDC** - ההמרה בין AC ל-DC בתחילה ובסוף הקו, הזרם הישיר מועבר על ידי מוליך ראשוני ודורש מסלול החזרה המסופק בעיקר על ידי אלקטרודות (ומסה כללית של כדוה"א+הים) או כבלים, תלוי בשיטת המבנה של המערכת (mono-pole) או שני מוליכים ותוספת מסלול החזרה (bi-pole) וכו'.



- בנרמול לוחות הזמנים הריאליים לפרויקטים ימיים לגודל הפרויקט שלנו ובצורה כללית נע בין 8.5 ל- 13.5 שנים.
- עיקר הזמן הוא ייצור הכבל, ותחנות הקליטה וזאת משום "תור" ארוך בהזמנות.
- הזמנים נלקחו למרות כי ישנה אי וודאות סטטוטורית אשר תשפיע על לוחות הזמנים.

הנושא	משך זמן נדרש [שנים]
מחקר ואגירת ידע	1
אפיון פרויקט	1-2
תכנון ראשוני	2-3
סיום הליך סטטוטורי	*לוח זמנים מושפע ממשך הזמן של הליך סטטוטורי
כתיבת מפרטי רכש	2-3
תכנון מפורט	1-2
התקנה	1/2-1
בדיקות	1/2
הכנסה לניצול	1/2-1
סה"כ	בין 8.5 ל-13.5
*במקביל יש לקחת בחשבון הליכים סטטוטוריים	

מקרא:

400 kV

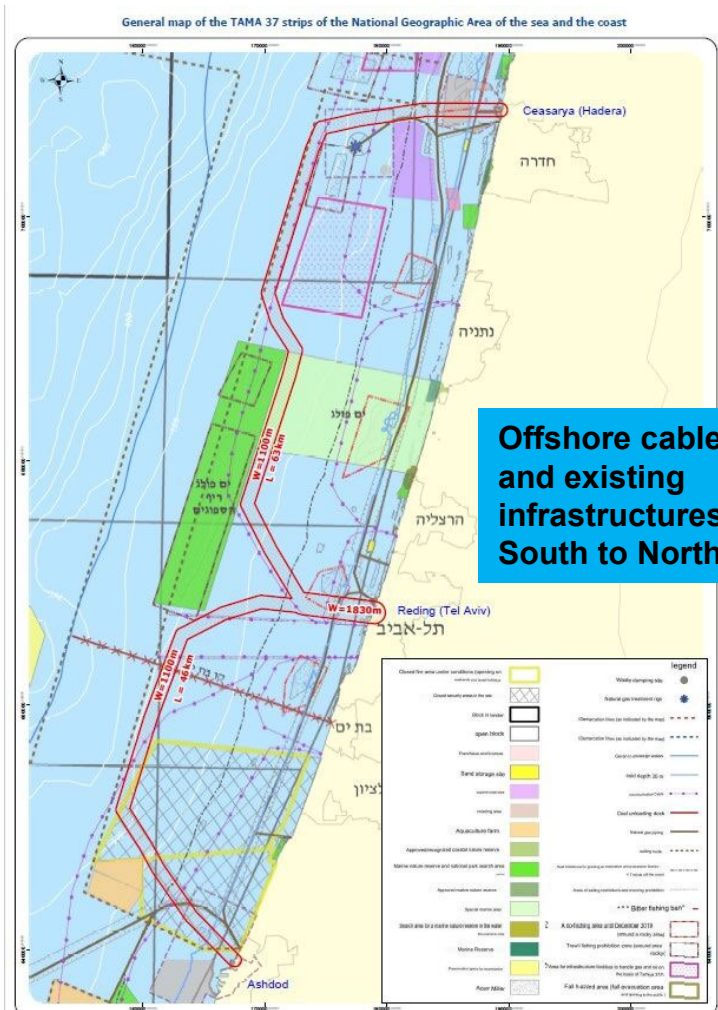
161 kV

מסלול אפשרי להולכה
 ימית עבור 2.7 GW

- נגה התבקשה ע"י רשות החשמל, לבחון פתרונות הולכה באמצעות כבלים תת-ימיים
- במטרה זו החלה NOGA לעבוד במקביל על הכנת דו"ח בנושא הולכה תת ימית, על מנת להכין תכנית לציר הולכה ימי לאורך חופה של מדינת ישראל עם מספר נקודות נחיתה



הנחות יסוד לפרויקט ההולכה

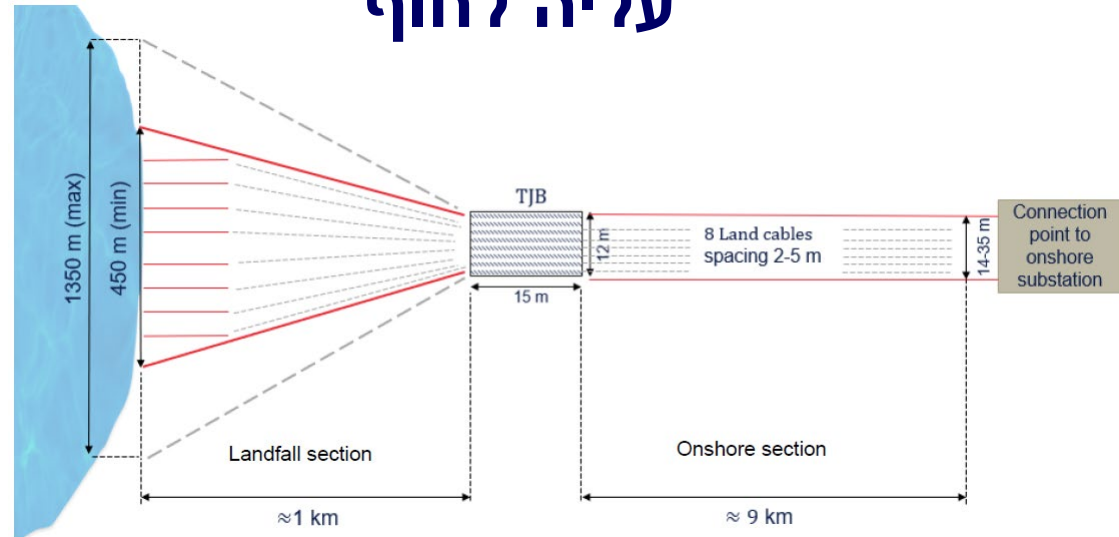


- יכולת הולכה של הקו תהיה שוות ערך ליכולת ההולכה של קווים יבשתיים עיליים של 400 kV משמע 2700 MVA
- קווי ההולכה יעמדו בקריטריונים N-1 ו- N-2 בתמיכת הקווים היבשתיים
- ינותחו אופציות של מערכות הולכה HVAC ו- HVDC
- תאופשר יכולת שליטה ובקרה על האנרגיה האקטיבית והריאקטיבית כך שתהיה האפשרות לשלוט על זרימות ההספק בין שלושת נקודות הנחיתה: צפון, מרכז ודרום

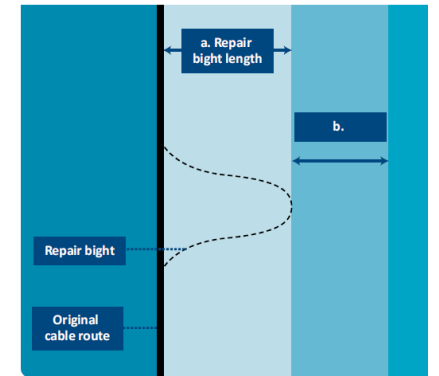
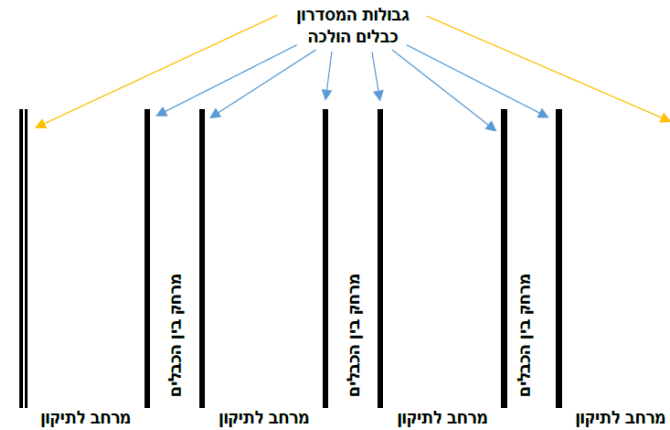
- שיטות הטמנה יבשתית ותת ימית
- רוחב מסדרון תת ימי
- עליות חוף
- תפיסת שטח של תחנות קליטה
- ציוד של תחנות קליטה
- כבלים
- אביזרי כבל
- RAM analysis
- Risk analysis
- ניתוח השפעות הדדיות

רוחב מסדרון ועליה לחוף

עליה לחוף



רוחב מסדרון



300 מטר עומק		70 מטר עומק		30 מטר עומק		שיטת ההולכה
Center כבלים 12HVAC כבלים 8HVDC	North – South כבלים 6HVAC כבלים 4HVDC	Center כבלים 12HVAC כבלים 8HVDC	North – South כבלים 6HVAC כבלים 4HVDC	Center כבלים 12HVAC כבלים 8HVDC	North - South כבלים 6HVAC כבלים 4HVDC	
מ 4850	מ 2750	מ 1630	מ 910	מ 1245	מ 690	HVAC repairable
מ 650	מ 350	מ 650	מ 350	מ 650	מ 350	HVAC non-repairable
מ 3450	מ 2050	מ 1150	מ 670	מ 875	מ 505	HVDC repairable
מ 450	מ 250	מ 450	מ 250	מ 450	מ 250	HVDC non-repairable

עלויות אופייניות ותפיסת שטח של התחנות

עבור הולכה ב- 400 ק"ו HVAC

רכיב	הספק	כמות	CAPEX [M€]
1 כבלים HVAC תת ימים		110 x 6 km	1500
2 כבלים HVAC ביבשה (הטמנה ישירה/מנהרה)		10 km	104 to 235
3 שנאי PST	מו"א 2700	1	35
4 Shunt ראקטור (חיבור צפון-מרכז)	מוא"ר בכל קצה של הכבל 300~	12	115
4 Shunt ראקטור (חיבור מרכז-דרום)	מוא"ר בכל קצה של הכבל 250~	12	96
5 GIS		24	173
סה"כ עלויות [M€]			1908~2154
סה"כ עלויות [M\$]			2073~2341*

עבור הולכה ב- ±500 ק"ו HVDC

רכיב	כמות	CAPEX [M€]
1 כבלים HVDC תת ימים	110 km	308
2 הטמנה תת ימית	110 km	123 to 228
3 כבלים HVAC ביבשה (הטמנה ישירה/מנהרה)	10 km	104 to 235
4 HVAC GIS	6	46
5 תחנות המרה	3	1200 to 1590
סה"כ עלויות [M€]		1781 to 2407
סה"כ עלויות [M\$]		1906 to 2575*

*על פי CIGRE 492, סטיית החישוב הכלכלי הינה "All the costs are assumed to have an accuracy of ± 30%"

תפיסת שטח אופיינית לתחנות הקצה

תפיסת שטח של תחנות קצה [sqm]	על פי דוגמאות של המסך
50000 to 70000	HVAC כולל שנאים, ריאקטורים, GIS, PST, STATCOM
55000 to 65000	HVDC כולל שנאים, ממירים VSC, GIS

RAM analysis – מתוך דו"ח DNV

RAM - של כבל מושפע מתכנון הכבל, תנאי ייצור, שיטת התקנה ותפעול, עבור EoL של 30 שנה והנחות היסוד הספציפיים של NOGA:

- Reliability: עבור HVDC, יהיו 4 כבלים כאשר האמינות יכולה להגיע ל- 99.3%.
עבור HVAC, ייווצרו 6 כבלים כאשר האמינות יכולה להגיע ל- 99.8%.

- Availability:

עבור HVAC - זמינות של 99% בשנה.

עבור HVDC - זמינות בשנת 2019: 97%
זמינות בשנת 2020: 92%

- Maintainability: נתונים סטטיסטיים מוכיחים כי כשלים פנימיים מהווים רק חלק מינורי מכל תקלות הכבלים התת ימים. הגורמים העיקריים לתקלות חיצוניות הם פעילויות דיג, עיגון וכריה.

DC ו- AC שדות עבור החשיפה גבול החשיפה עבור שדות AC ו- DC	כל החקיקה מבוססת על התקנות יבשתיות	EMF: חקיקה ותקנים ביבשה ובים
השדה החשמלי שמייצרים הכבלים הוא זניח מכיוון שיש להם מעטפות וסיכוכים מתכתיים, מצד שני, יש לבחון את השפעתם של שדה מגנטי	EMF ובעלי חיים והצומח תת ימיים	
מתחים וזרמים מושרים (כבלים AC)	הפרעה למתקנים קיימים	
הפרעות תרמיות הדדיות בין כבלים של מערכות שונות		
עבודות הטמנה, תחזוקה תיקון		
נגרמת על ידי נתיבי זרם משניים (זרם תועה) של זרם החוזר במע' מונופולריות או של זרם איזון במע' ביפולריות כאשר משתמשים באלקטרודות במקום DMR, המייצרים קורוזיה אלקטרו-אנודית לתשתיות סמוכות	קורוזיה למתקנים מתכתיים עקב זרם תועה בהולכה HVDC	
ישנן שתי טכניקות עיקריות למניעת קורוזיה של לתשתיות סמוכות: SACRIFICIAL ANODE - IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION -		

ICNIRP :International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

סיכום השוואת טכנולוגיות העברת אנרגיה:

נושא השוואה	HVAC	HVDC
מספר המוליכים	מערכת הולכה HVAC דורשת 6 כבלים 3C.	מערכת HVDC דורשת 4 כבלים 1C
שנאים	ב-HVAC, שנאי משמש לשינוי מתח. הצורך בשימוש בשנאים מקושר לרמת מתח ההולכה	שנאי HVAC משמש להתאמת מתח הרשת למתח הולכה DC. שנאים עבור מערכות מבוססות VSC דומים לאלה המשמשים את HVAC. עבור מערכות מבוססות LCC, לשנאים יש תיוכן מיוחד.
מיישרים וממירים	ב-HVAC לא נדרשים	מיישרים וממירים הם המרכיבים החיוניים של מערכת HVDC
מורכבות טרנספורמציה של מתח	HVAC כרוך בטרנספורמציה של מתח פשוטה	טרנספורמציה המתח מורכבת במקרה של HVDC.
התאמה למרחק	מערכות הולכה HVAC מתאימות למרחקים עד 600 ק"מ (קו הולכה עילי) או עד 120 ק"מ (הולכה בכבלים).	הולכה HVDC מתאימה להעברת אנרגיה במרחקים ארוכים, בדרך כלל יותר מ-600 ק"מ (קו עילי) או יותר מ-120 ק"מ (הולכה בכבלים).
קיזוז הספק ראקטיבי	בכבלים תת ימים HVAC, קיבולת העברת הזרם היא המגבלה העיקרית. הספק הולכה המרבי ומרחק ההולכה של הכבלים תת ימים מחושבים בהתחשבות באילווצים הכוללים מקדם הספק, הפסדים ועלות פיצוי ראקטיבי.	לא נדרש בהולכה HVDC
Skin effect	הזרם AC מייצר צפיפות זרם לא אחידה בשטח של המוליך (skin effect). כתוצאה מכך, מתרחשת הפחתה ביכולת ההולכה	ב-HVDC, צפיפות הזרם אחידה בשטח חתך של המוליך, אין skin effect ולכן, יכולת הולכה גדולה יותר ב-DC מאשר ב-AC עבור אותה שטח חתך של המוליך.
קוטר המוליך	HVAC דורש מוליך בקוטר גדול בגלל ה-skin effect.	HVDC דורש מוליך בקוטר קטן יחסית.
Right of way in landing points	נדרשת Right of way רחבה יותר עבור HVAC. Right of way היא רצועת היבשה הנדרשת להתקנת קווי הולכה	Right of way צרה יותר עבור HVDC.
רוחב מסדרון תת ימי	נדרש רוחב מסדרון עבור 6 כבלים	נדרש רוחב מסדרון עבור 4 כבלים
הולכה תת ימית	HVAC אינו מועדף להעברת הספק תת-ימי בגלל המגבלות במרחק ההולכה	עדיף להשתמש ב-HVDC להעברת הספק תת-ימי במרחקים גדולים
השפעות הדדיות	HVAC גורם ליותר השפעות הדדיות לתשתיות או לקווים השכנים, במיוחד קווי תקשורת.	HVDC גורם לפחות הפרעות לתשתיות או לקווים השכנים בעת שימוש בחזרה מתכתי
ציוד בנקודות חיבור	שנאים, שנאים PST, ראקטורים shunt o serial, FACTS, ציוד לתחמ"ש	שנאים, ממירים (VSC - LCC), מסננים הרמוניים, ציוד לתחמ"ש AC ו-DC
ציוד עבור הולכה תת ימית	כבלים, מופות תת ימיות, סופיות כבל	כבלים, מופות תת ימיות, סופיות כבל. טכנולוגיית שלטת בשדה החשמלי של אלמנטים אלה שונה מזו המשמשת ב-HVAC
שליטה בזרימת אנרגיה	השליטה בזרימת אנרגיה איטית. זה נעשה באמצעות PST	בקרת זרימת הספק מהירה ומדויקת מאוד. פונקציה זו זמינה במודולים של ממירים VSC
זרמי קצר	רמת זרם הקצר במערכת גבוהה. רמות זרמי הקצר של שתי רשתות מתווספות ומוגדלות לאחר החיבור	מערכת HVDC אינה תורמת (או עושה זאת באופן מינימלי) עם הזרם הקצר של מערכת HVAC
תנודות מתח	מתח בקו משתנה עם העומס	המתח בקו אינו משתנה עם העומס
עלויות	יותר חסכוני להעברת הספק למרחקים מתחת ל-Break – even point (מרחקים קטנים)	יותר חסכוני להעברת הספק למרחקים מעל Break – even point (מרחקים ארוכים)
Reliability	עבור HVAC, ייווצרו 6 כבלים כאשר האמינות יכולה להגיע ל-99.8%	עבור HVDC, יהיו 4 כבלים כאשר האמינות יכולה להגיע ל-99.3%
Availability	99%: HVAC	92%~97%: HVDC

תאים צבועים בירוק מעידים על יתרון

6	יתרון HVAC
10	יתרון HVDC

- שתי שיטות ההולכה בשלות טכנולוגית, הן בסוגי הכבלים והן בתחנות קליטה ב- HVAC או תחנות המרה HVDC , לכן, למרות ההשוואה אין המלצה חד משמעית על טכנולוגיה אלא הבחירה תהיה תלויה במאפיינים המסחריים בשיטות ההולכה הנדונות:
 - זמינות כבלים ואביזרי כבל
 - זמינות ציוד עבור תחנות קצה
 - זמינות אמצעי הטמנה
- המשך בחינת אמינות של תשתיות ההולכה המתבססת על הנחת כבלים תת ימיים כולל כל מרכיביה בהתאם לטכנולוגיה (HVDC HVAC) כמו כן, נדרש לבחון אמינות מערכת ההולכה כלל ארצית שכוללת מרכיבים תת ימיים.

תודה רבה

