



The Iby and Aladar Fleischman
Faculty of Engineering
Tel Aviv University

הפקולטה להנדסה
ע"ש איבי ואלדר פליישר
אוניברסיטת תל אביב



אופטימיזציה של אלמנטים ברשת חשמל חכמה

פרויקט מס' 19-1-1-1951

דו"ח סיכום

מבצעים:

305002115

תומר שפר

308552967

עדי פולק

מנחים:

אוניברסיטת ת"א

ד"ר יובל בק

מקום ביצוע הפרויקט:

אוניברסיטת תל אביב

רשימת איורים

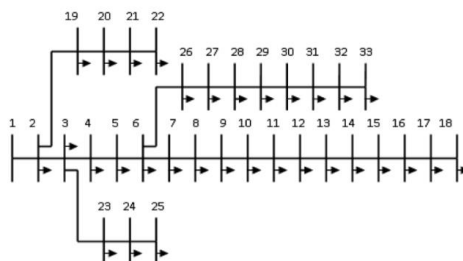
3	איור 1: דוגמה למבנה רשת חשמל רדיאלית.....
4	איור 2: דיאגרמת בלוקים – אלגוריתם Backward-Forward.....
7	איור 3 : מבנה רשת חשמל רדיאלית.....
8	איור 4: ענף ברשת רדיאלית.....
8	איור 5: מספור ענפי הרשת.....
10	איור 6: דיאגרמת בלוקים לאלגוריתם Brute-Force.....
14	איור 7: תוצאות עבר - Feeder H.....
14	איור 8: תוצאות עבר - Feeder F.....
15	איור 9: שחזור תוצאות עבר – פידר H.....
15	איור 10: השגיאה כתלות בקונפיגורציית הקבלים – פידר H.....
16	איור 11: שחזור תוצאות עבר – פידר F.....
16	איור 12: השגיאה כתלות בקונפיגורציית הקבלים – פידר F.....
17	איור 13 : פידר H לפני פיצוי.....
18	איור 14: פרופיל מתחי הרשת בפידר H לאחר פיצוי בשתי השיטות.....
18	איור 15: מיפוי חיבורי קבלים – פידר H.....
19	איור 16: פידר F לפני פיצוי.....
19	איור 17 : פרופיל מתחי הרשת בפידר F לאחר פיצוי בשתי השיטות.....
20	איור 18 : מיפוי חיבורי קבלים – פידר F.....
20	איור 19: רשת אמיתית בעלת 15 צמתים לפני פיצוי.....
21	איור 20 : רשת אמיתית בעלת 15 צמתים לאחר פיצוי.....
21	איור 21: מיפוי חיבורי קבלים – רשת אמיתית.....

רשימת טבלאות

12	טבלה 1 : דוגמה למיפוי חיבורי קבלים.....
18	טבלה 2 : השוואת RMSE בין שתי שיטות הפיצוי - פידר H.....
19	טבלה 3 : השוואת RMSE בין שתי שיטות הפיצוי - פידר F.....
21	טבלה 4: השוואת RMSE בין שתי שיטות הפיצוי – רשת אמיתית.....

תקציר

הפרויקט עוסק בניתוח רשתות חלוקת חשמל רדיאליות וביצוע אופטימיזציה של מתחי הצמתים שברשת:



איור 1: דוגמה למבנה רשת חשמל רדיאלית

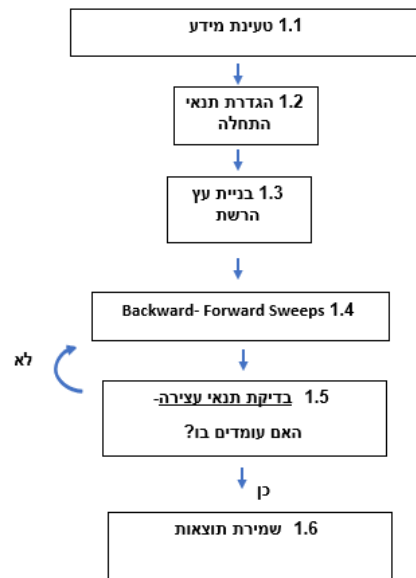
באיור לעיל מוצג מבנה לדוגמה של רשת חשמל רדיאלית. צומת מספר 1 מייצג את מקור הכח של הרשת (מכונה Feeder) ויתר הצמתים הממוספרים הם הצרכנים של הרשת, כאשר לכל צומת\צרכן כזה יש אימפדנס שקול.

השליטה במתחי הרשת מתבצעת באמצעות חיבור קבלים הפרוסים לאורך הרשת (לרוב לא נמצאים בכל אחד מהצמתים) במקביל לעומסי הצמתים. האופטימיזציה מוגדרת ע"י פונקציית מחיר של המתחים בצמתי הרשת ביחס למתח רצוי, והיא נקבעת ע"י הקונפיגורציה שמביאה למינימום את פונקציית המחיר שהגדרנו. היא מתבססת על חישוב מתחים וזרמים בצמתי וענפי הרשת באופן איטרטיבי. מטרת הפרויקט היא פיתוח שיטת אופטימיזציה חכמה ויעילה לרשתות חשמל רדיאליות בהתאם לפונקציות מחיר שנגדיר.

את הפרויקט כתבנו ב- *MATLAB* תוך שימוש בכלי ה- *Power Flow*. כלי זה פותר את משוואות רשת החשמל באופן נומרי לאור הקושי הטמון בפתרון אוסף גדול של משוואות לא ליניאריות באופן אנליטי. חישוב מתחי וזרמי הרשת נעשה לפי אלגוריתם Backward-Forward¹ שמומש מבעוד מועד. לאחר קביעת תנאי התחלה לכלל מתחי וזרמי הרשת, התוכנה עוברת על מבנה הרשת מצמתי הקצה של הרשת (העלים של העץ) אל ה- Feeder (שורש העץ) לצורך חישוב הזרמים ברשת, מעבר נוסף מה- Feeder אל עבר צמתי הקצה לצורך חישוב מתחי הרשת, וכך באופן איטרטיבי עד קיום תנאי עצירה - התכנסות נתוני הרשת או מספר איטרציות מקסימלי מותר. האלגוריתם שומר את הקונפיגורציה אשר מניבה את התוצאות האופטימליות.

¹ ראה הפניה למאמר בסעיף מקורות

דיאגרמת בלוקים של האלגוריתם:



איור 2: דיאגרמת בלוקים – אלגוריתם Backward-Forward

מטרת הפרויקט היא פיתוח שיטת אופטימיזציה חכמה ויעילה לרשתות חשמל רדיאליות בהתאם לפונקציות מחיר שנגדיר. כפי שתיארנו, בפרויקט זה עבדנו על אלגוריתם שמנתח את נתוני רשתות החשמל קיימות וקובע מהי קונפיגורציית חיבורי הקבלים ברשת כך שמתחי הרשת הם אופטימליים ביחס לפונקציית המחיר.

כיום, השיטה שבה מתבצע יישור של מתחי הרשת מתבססת על חישוב מתחי הצמתים באמצעים נומריים (או מדידת מתח ישירה באם זה מתאפשר), איתור צמתים בהם חושב או נמדד מתח החורג מטווח המתחים שהוגדר מראש (יכול להיות נמוך או גבוה מהטווח המותר), ולבסוף חיבור קבל במקביל לאימפדנס הכולל של אותם צמתים, וזאת בתנאי שאכן קיים קבל באותם צמתים.

המוטיבציה מאחורי הפרויקט היא ניצול כלל האלמנטים הנשלטים ברשת, ולא רק אלו המצויים בצמתים שבהם המתח חורג מטווח המתחים המותר, וזאת כדי להשיג תוצאות טובות יותר של אופטימיזציית המתחים ברשת. ככל שהאופטימיזציה תהיה טובה יותר הרשת תתפקד בצורה טובה יותר, תנצל בצורה טובה יותר את ההספק שהיא צורכת ותמנע ככל הנראה בזבז אנרגיה.

הפתרון שהתחלנו לחקור הוא מימוש אלגוריתם Brute-Force אשר יבדוק את כל קונפיגורציות הקבלים האפשריות, ועבור כל קונפיגורציית חיבורים יפתור את משוואות הרשת באופן נומרי בעזרת Backward-Forward. הקונפיגורציה שתבחר היא זו שתביא למינימום את פונקציית המחיר שאותה נציג בהמשך.

בשנים האחרונות קיימת התפתחות בתחום רשתות החשמל כך שמתחילים להכניס טכנולוגיות מדידה ועיבוד נתונים. יכולת התקשורת ועיבוד הנתונים ברשתות חשמל יצרה תחום חדש הנקרא "רשתות חשמל חכמות". בעזרת עיבוד מדידות ונתונים אודות הרשת ניתן לשפר את הרשתות חשמל הקיימות ובנוסף ניתן להוסיף לרשתות האלו תכונות חדשות שלא היו קיימות עד היום.

כחלק מהכלים להגיע להחלטות חכמות ברשת, ה- Power Flow הוא כלי מרכזי בניתוח רשתות וביצירת מערכות שליטה ובקרה על רשתות חשמל. ה- Power Flow הוא כלי לפתרון נומרי של רשתות חשמל (כפי שצינו בתקציר – ברשתות מורכבות בעלות צמתים רבים נקבל אוסף גדול של משוואות לא ליניאריות שפתרון באופן אנליטי הוא סבוך מאוד ולעיתים אף לא אפשרי), והוא מספק את הנתונים החשמליים בכל צומת וענף ברשת בהינתן העומסים בקצוות.

במקומות רבים ישנן רשתות חשמל סימטריות להן יש לא מעט פתרונות של PF לפתרון הרשת. היום קיים יותר עניין בפינוח כלי שליטה ובקרה לרשתות חלוקה ובמדינות שונות מה שמאפיין רשתות אלו הוא היותן קודם כל רדיאליות ושנית במקרים רבים לא מאוזנות. בפרויקט זה בנינו כלי לרשתות רדיאליות מאוזנות כגון רשתות הקיימות במדינת ישראל ואירופה.

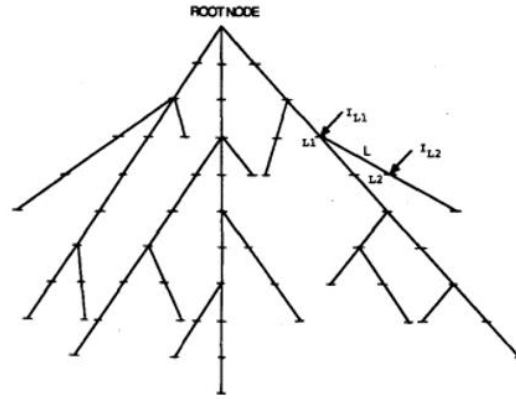
בנינו כלי אופטימלי לטיפול ברשתות חלוקה לא מאוזנות. הכלי מבוסס על מודול קיים של Flow Power הממומש ב- MATLAB. שיטת ניתוח הנתונים היא "Backward- Forward" שבו נחשב את המתחים והזרמים מהקודקוד עד העלים ואז מהעלים עד הקודקוד עד שהמתחים והזרמים יתכנסו.

האלגוריתם שבנינו משתמש במודול ה- Power Flow בבדי להגיע לאופטימיזציה שהגדרנו ע"י פונקציית המחיר. פונקציית המטרה שבחרנו היא שמירה על מתח נומינלי לאורך כל הרשת על ידי שימוש בווריאציה של קבלים לאורך רשת החלוקה. את הקבלים ניתן לחבר או לנתק במקביל לאימפדנס של אותו צומת (bus) כך שהעומס באותו צומת משתנה וכך גם ה- Power Factor. במקרים בהם חיבור הקבלים לא יספיק להבאת המתח לטווח המתחים הרצוי, יעשה שימוש בשינוי יחס ההשנאה ב- Feeder – שינוי מספר הליפופים של הסלילים (מכניזם זה נקרא OLTC – On-Load Tap Changer). זוהי פעולה "אלימה" שעלולה להסב נזק לצרכני הרשת בשל עליות מתח גבוהות בזמן קצר מאוד, לכן נשתמש בה רק בלית ברירה.

הרשת מניבה מספר רב של משוואות לא ליניאריות ואנחנו בחרנו לפתור אותם בשיטת ה- Backward-Forward (מצורף הסבר בהמשך) אך יש לציין שקיימות עוד מספר שיטות נומריות כגון שיטת "GAUSS – SEIDEL" אשר פותרת את משוואות העץ באיטרציות ומתכנסת כתלות בניחושים ההתחלתיים. בנוסף, קיימת שיטת "NEWTON RAPHSON", בשיטה זו מחפשים את הערכים הנכונים באמצעות ניחוש ראשוני ומציאת ההפרשים מהניחוש. בשיטת "NEWTON RAPHSON" השתמשו בתעשייה זמן רב (מעל 20 שנים) אך מחקרים חשפו את החסרונות של השיטה שעובדת כשורה ברשתות פשוטות אך ברשתות עם נתונים בעייתיים או בניחוש התחלתי לא מתאים יתכן כי שיטה זאת לא תתכנס. בנוסף, מחקרים שנערכו בשיטת "GAUSS – SEIDEL" מצאו כי האלגוריתם לא אפקטיבי ברשתות חשמל גדולות.

מבנה הרשת

אנו מניחים כי הרשת היא בעלת מבנה רדיאלי. במינוח מתורת הגרפים, רשת החשמל מהווה עץ – כלומר גרף קשיר ללא מעגלים. לעץ קיים שורש שבו מצוי ה- Feeder שהוא מקור ההספק של הרשת, קודקודים פנימיים ועלים שבהם מצויים צרכני הרשת.



איור 3: מבנה רשת חשמל רדיאלית

באיור לעיל ניתן לראות את שורש העץ (Root Node) - זהו מקור ההספק (Feeder) לרשת החשמל. כל צומת בעץ מייצג נקודת הורדה לעומס (bus) והענפים המחוברים בין הצמתים הם כבלי החשמל המחוברים בין הצמתים.

לחישוב המתחים והזרמים בצמתי הרשת (ראה דיאגרמת בלוקים של האלגוריתם באיור 2). שלבי האלגוריתם: (1) **הגדרת תנאי התחלה ועצירה** – בשלב זה מגדירים מהם המתחים והזרמים ההתחלתיים בכל אחד מהצמתים והענפים ברשת. כמו כן מוגדרים תנאי העצירה של האלגוריתם על מנת להגביל את כמות האיטרציות. הגדרות אלה כוללות את מספר האיטרציות המקסימלי שנרצה שהאלגוריתם ירוץ והגדרת התכנסות - ההפרש המקסימלי עבור P ו-Q (הספק ממשי וריאקטיבי) בין האיטרציות. קיום תנאי עצירה אחד מבין השניים יביא לעצירת האלגוריתם.

(2) **Backward Sweep** – ריצה מהעלים התחתונים לכיוון הקודקוד הראשי (Backward) ועדכון הזרמים בכל הענפים לפי KCL^2 :

$$J_L[k] = -I_{L_2}[k] + \sum \text{Currents emanating from node } L_2, L \in \{1, 2, \dots, b\} \quad (1)$$

כאשר:

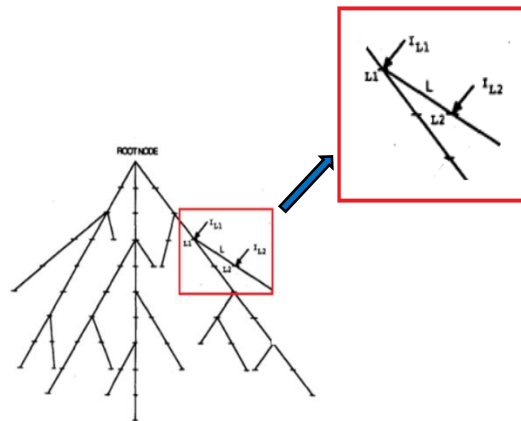
$J_L[k]$ - הזרם בענף L באיטרציה ה-k של ריצת האלגוריתם.

$I_{L_2}[k]$ - זרם העומס בצומת L2 באיטרציה ה-k של ריצת האלגוריתם.

b - מספר הענפים הכולל בעץ

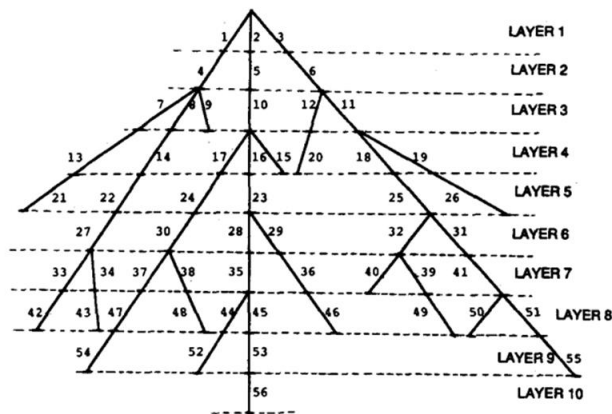
² Kirchhoff's current law

הענף המדובר הוא:



איור 4: ענף ברשת דיאלית

מספור הענפים ושכבות הרשת נעשים בצורה הבאה:



איור 5: מספור ענפי הרשת

(3) **Forward Sweep** – ריצה משורש העץ לכיוון העלים התחתונים (Forward) ועדכון מתחים בכל צומת

לפי המשוואה:

$$V_{L2}[k] = V_{L1}[k] - Z_L J_L[k - 1] \quad , L \in \{1, 2, \dots, b\} \quad (2)$$

כאשר:

$V_{L1}[k], V_{L2}[k]$ – המתחים בצמתים L_1, L_2 באיטרציה ה- k , בהתאמה

$J_L[k]$ – הזרם בענף L באיטרציה ה- k

Z_L – האימפדנס הטורי של הענף L

b – מספר הענפים הכולל בעץ

(4) בדיקת תנאי עצירה - תנאי העצירה שאנו מגדירים הוא הפרש ההספק הממשי והריאקטיבי בין שתי

איטרציות עוקבות (במקרה בו האלגוריתם מצליח להתכנס) ומספר איטרציות מקסימלי:

$$A: \Delta P_L \triangleq P_L[k] - P_L[k-1] \leq \varepsilon_P \quad (3)$$

$$B: \Delta Q_L \triangleq Q_L[k] - Q_L[k-1] \leq \varepsilon_Q \quad (4)$$

$$C: k = \text{max iterations allowed} \quad (5)$$

כאשר:

$\Delta P_L, \Delta Q_L$ - הפרש הספק ריאקטיבי\אקטיבי בין איטרציות, בהתאמה

$\varepsilon_P, \varepsilon_Q$ - הסף המוגדר להתכנסות הספק ריאקטיבי\אקטיבי, בהתאמה

k - מספר האיטרציה

תנאי העצירה מתקיים כאשר A וגם B מתקיימים או C מתקיים:

$$STOP = (A \wedge B) \vee C$$

אם תנאי העצירה מתקיים אז סיימנו ונמשיך לשלב הבא, ואם לא - נשוב לבצע איטרציה נוספת של

Backward – Forward (1).

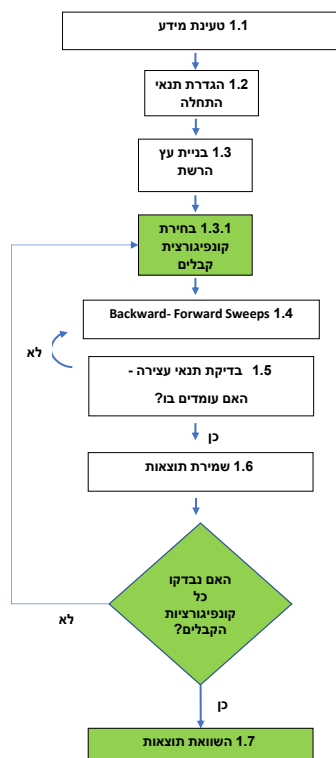
3 מימוש

לאור אופי הפרויקט שמטרתו הייתה לבחון שיטה לאופטימיזציה של רשת חשמל, המימוש הוא למעשה סימולציית *MATLAB*, לכן אין הפרדה בין פרקי הסימולציה והמימוש כפי שתואר בתבנית של ספר הפרויקט.

אלגוריתם אופטימיזציה Brute Force

האופטימיזציה אותה אנו שואפים לבצע היא ייצוב מתחי הצמתים שברשת כך שפונקציית מחיר אותה אנו מגדירים מראש תובא למינימום. ייצוב המתחים מתבצע בעזרת חיבור או ניתוק קבלים בצמתי הרשת כפי שהסברנו בתקציר.

כשלב ראשון, כתבנו ומימשנו אלגוריתם שעובד בשיטת Brute-Force. אלגוריתם זה בודק את כל קונפיגורציות הקבלים האפשריות ובודק את פונקציית המטרה עבור כל קונפיגורציה. דיאגרמת הבלוקים המעודכנת נראית כך:



איור 6: דיאגרמת בלוקים לאלגוריתם Brute-Force

בשלב 1.1 בדיאגרמת הבלוקים נטענים נתוני הרשת, ביניהם גם הצמתים בהם מצויים קבלים וערכי הקבלים. כל קבל ניתן לחיבור או ניתוק בהתאם להחלטתנו. בהתאם לקונפיגורציה מתעדכנים ההספקים הריאקטיביים בכל הצמתים.

עבור קבל בצומת L העדכון יעשה בצורה הבאה:

$$Q_{L,new} = Q_{L,old} - Q_{cap_L} \quad (6)$$

כאשר:

$Q_{L,new}$ – ההספק הריאקטיבי המעודכן בצומת L
 $Q_{L,old}$ – ההספק הריאקטיבי בצומת L טרם חיבור הקבל
 Q_{cap_L} – ההספק הריאקטיבי של הקבל בצומת L

עבור N קבלים נריך $Backward - Forward$ עבור כל הקונפיגורציות האפשריות לחיבור\ניתוק של קבל, כלומר $2^N - 1$ פעמים (כאשר השמטנו את המצב ההתחלתי שבו אין אף קבל מחובר).

פונקציית המחיר

הגדרנו את פונקציית המחיר להיות שורש השגיאה הריבועית הממוצעת ($RMSE$) ביחס למתח של 1 Volt pu :

$$J^k = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{V}_i^k - 1)^2}, \quad k \in \{1, \dots, M\} \quad (7)$$

k – מספר סידורי של קונפיגורציות הקבלים
 M – מספר קונפיגורציות הקבלים הקיימות
 \hat{V}_i^k – המתח בצומת i עבור קונפיגורציות קבלים k (ערך מוחלט של המתח ביחידות pu)
 N – מספר הצמתים הכולל ברשת

הקונפיגורציה T הנבחרת היא זו שתביא למינימום את פונקציית המחיר:

$$T = \underset{k \in \{1, \dots, M\}}{\operatorname{argmin}} J^k \quad (8)$$

בחירה זו נובעת מהרצון "ליישר" את פרופיל המתחים ברשת לפי מתח האספקה ב – *Feeder*.
 קונפיגורציות הקבלים ממספרות באופן הבא (למשל עבור 3 קבלים, כאשר '0' – מנותק, '1' – מחובר) :

Configuration #	Cap #1	Cap #2	Cap #3
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1

טבלה 1 : דוגמה למיפוי חיבורי קבלים

סה"כ שלבי אלגוריתם *Brute Force* :

- 1) טעינת מידע – ראשית נתוני רשת החשמל נטענים ועוברים ניתוח ראשוני. נתוני רשת החשמל כוללים את ההספק הכולל שמספק ה *Feeder*, העומס בכל bus, מקורות הספק בצמתים (באם קיימים) ואימפדנסים טוריים של ענפי הרשת. כלל הנתונים (מתחים, זרמים והספקים) מנורמלים ליחידות pu^3 ע"פ נתוני ה *Feeder* וזאת על מנת להקל על החישובים.
- 2) הגדרת תנאי התחלה – שלב זה מגדיר לאלגוריתם ה *Backward – Forward* את תנאי העצירה, ההגבלות והמתחים ההתחלתיים בכל צומת. הגדרות אלה כוללות את מספר האיטרציות המקסימלי שנרצה שהאלגוריתם ירוץ, ההפרש המקסימלי עבור Q ו P (הפסק ממשי וריאקטיבי) בין האיטרציות.
- 3) בניית עץ הרשת – אנו משתמשים באלגוריתם קיים שמייצר את ה"עץ" של הרשת. אלגוריתם זה ממספר את צמתי וענפי הרשת, ובמקרה הצורך "פורם לופים" (loops). לופ הוא מצב בו קיימים שני ענפים או יותר המתחברים לאותו צומת ויוצרים מעגל פנימי בתוך העץ. אלגוריתם *Backward-Forward* מניח כי העץ של הרשת "פרום", ועל כן יש צורך לפצל את הענפים ולהביא את הרשת למצב עץ כפי שהצגנו לעיל.

Per Unit3 – מתבצע נרמול של נתוני הרשת – ההספק הכולל (אקטיבי וריאקטיבי), מתח, זרם הכניסה לרשת והאימפדנסים (נתוני Base) על מנת להקל על החישובים

(4) בחירת קונפיגורצית קבלים – עדכון מצב החיבורים ע"פ טבלת הקונפיגורציות (ראה דוגמה - טבלה 1).

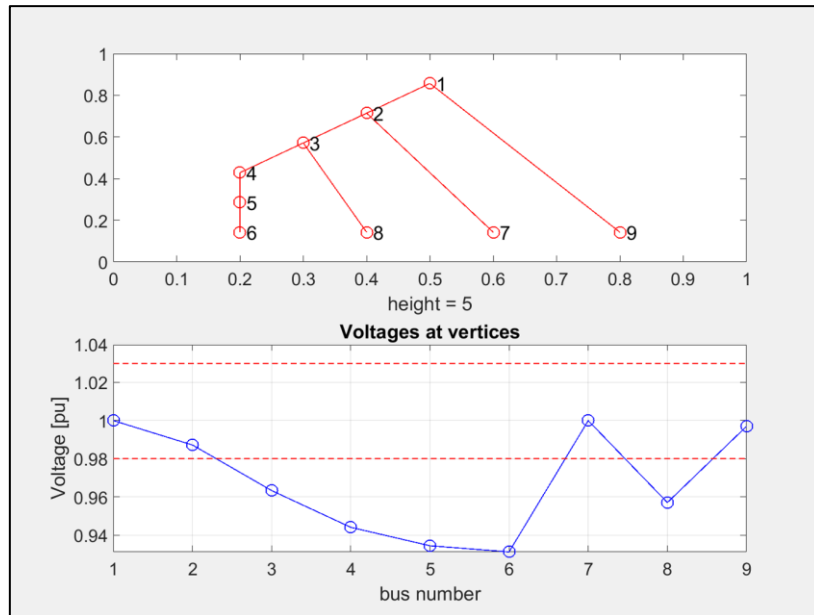
a. Backward-Forward Sweeps – הרצת אלגוריתם Backward-Forward לאחר עדכון הספקים ריאקטיביים בהתאם לקונפיגורציית הקבלים שנבחרה: ריצה "אחורה" לעדכון זרמים וריצה "קדימה" לעדכון מתחים.

b. בדיקת קיום תנאי עצירה – זהו תנאי העצירה של Backward-Forward (ראה פירוט ברקע התיאורטי) – מושפע ממספר האיטרציות המקסימלי המותר ומהתכנסות ההספקים.

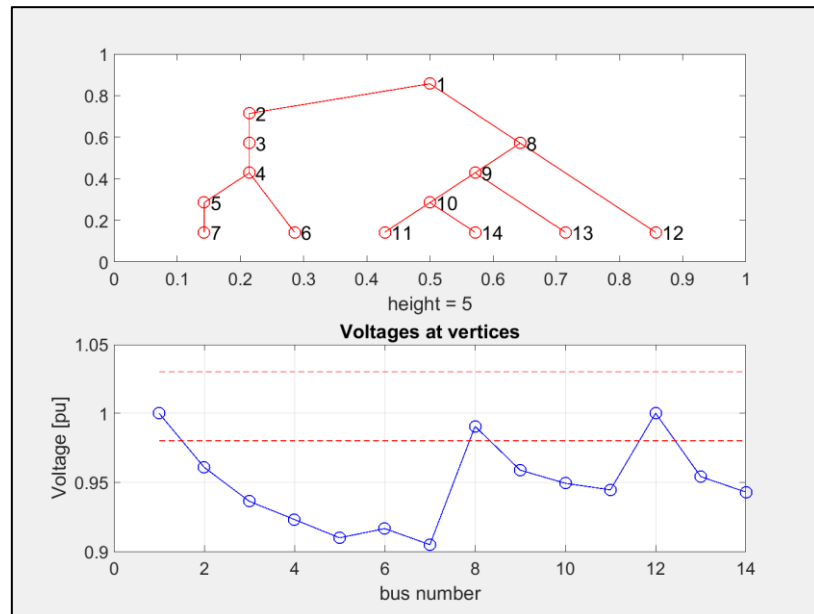
c. חישוב ושמירת תוצאות – חישוב RMSE לפי פונקציית המחיר, שמירת קונפיגורציית החיבורים (מיפוי חיבורים) את התוצאות שהתקבלו ונדפיס גרף של מתחים לאורך העץ ושל מבנה העץ עצמו.

(5) השוואת תוצאות ובחירת קונפיגורציה – הקונפיגורציה הנבחרת היא זו שהביאה ל – RMSE מינימלי.

בשלב הראשון ניסינו לשחזר תוצאות עבור שתי רשתות חשמל בהן מספר מצומצם יחסית של צמתים. תוצאות העבר שהתקבלו:



איור 7: תוצאות עבר - Feeder H

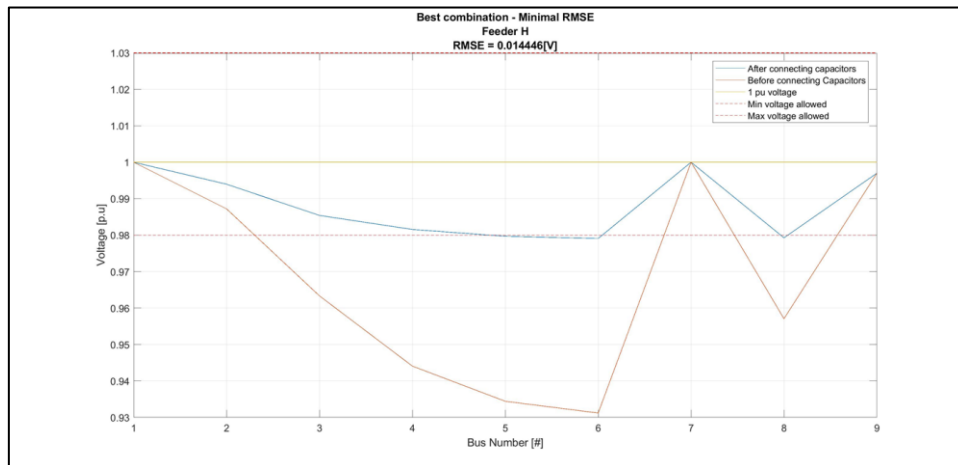


איור 8: תוצאות עבר - Feeder F

בגרף העליון של כל איור ניתן לראות את מבנה הרשתות (מבנה עץ), ובגרף התחתון את מדידת המתחים בכל אחד מהצמתים (bus). ברשת H ישנם 9 צמתי וברשת F ישנם 14 צמתים. בגרפים התחתונים מסומנים גם קווים מרוסקים אופקיים – אלו החסמים העליון והתחתון שהטלנו על המתחים בכל הצמתים. במקרה הזה תחום המתחים המותר שהגדרנו הוא Volt pu $[0.98, 1.03]$. מאחר ומתחי הצמתים חורגים מהחסמים שהגדרנו, הופעל אלגוריתם חיבור הקבלים במטרה להביא את מתחי הצמתים אל גבולות אלה.

תוצאות ריצת האלגוריתמים *Backward – Forward* ואופטימיזציית הקבלים (בשיטה המקובלת)

עבור הרשת H :

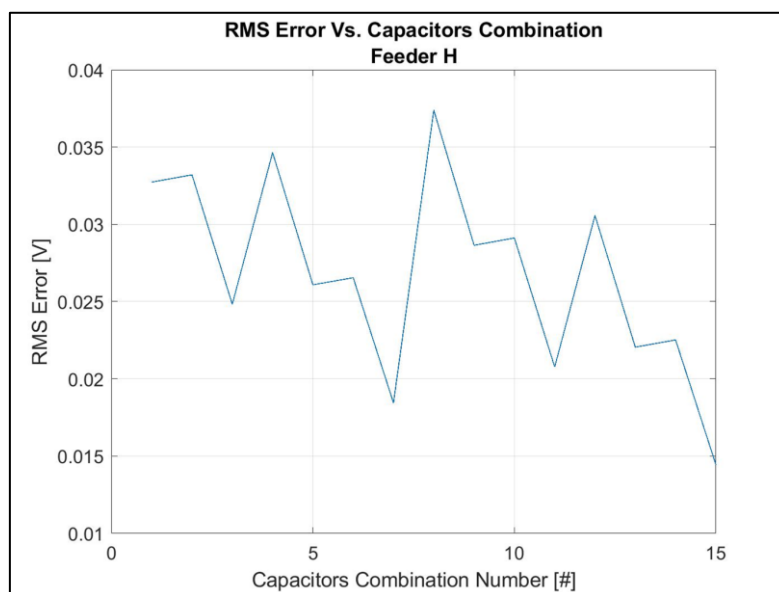


איור 9: שחזור תוצאות עבר – פידר H

כפי שניתן לראות שחזרנו את תוצאות העבר בהצלחה – מתחי הרשת לפני האופטימיזציה זהים. בגרף לעיל מוצג גם גרף המתחים לאחר אופטימיזציה שבה חיברנו קבלים רק בצמתים בהם המתח חרג מהטווח המותר (השיטה הננקטת כיום). ניתן לראות כי הצלחנו להביא את רוב צמתי הרשת לטווח המתחים הדרוש. ישנם שלושה צמתים בהם המתח נמוך מהגבול התחתון שהוגדר, אך הסטייה קטנה מאוד. במקרה זה הקונפיגורציה T היא זו שבה כל הקבלים האפשריים מחוברים. השגיאה שהתקבלה היא $RMSE = 0.014 Vpu$ וזמן החישוב היה 0.88 שניות.

נדגיש כי זמן החישוב הוא פרמטר חשוב באלגוריתם זה – מאחר והאלגוריתם עובד בשיטת *Brute – Force*, כלומר בודק את כל האפשרויות הקיימות, הוא יהיה יעיל רק ברשתות קטנות יחסית בעלות מספר קבלים קטן. זמן החישוב יעלה באופן אקספוננציאלי עבור כל קבל נוסף.

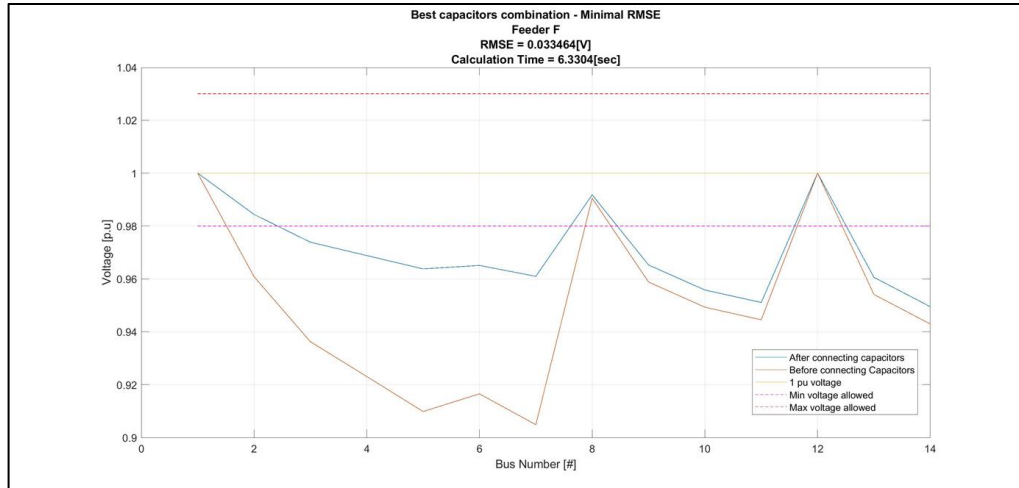
בגרף הבא ניתן לראות את השגיאה עבור כל אחת מהקונפיגורציות:



איור 10: השגיאה בתלות בקונפיגורציית הקבלים – פידר H

מספר הקומבינציה (הציר האופקי בגרף) שקול לייצוג הבינארי של קומבינציית הקבלים, לכן המספר 15 שקול למספר הבינארי '1111' (סה"כ ישנם 4 קבלים). מכאן נסיק כי השגיאה המינימלית מתקבלת כאשר כל הקבלים מחוברים.

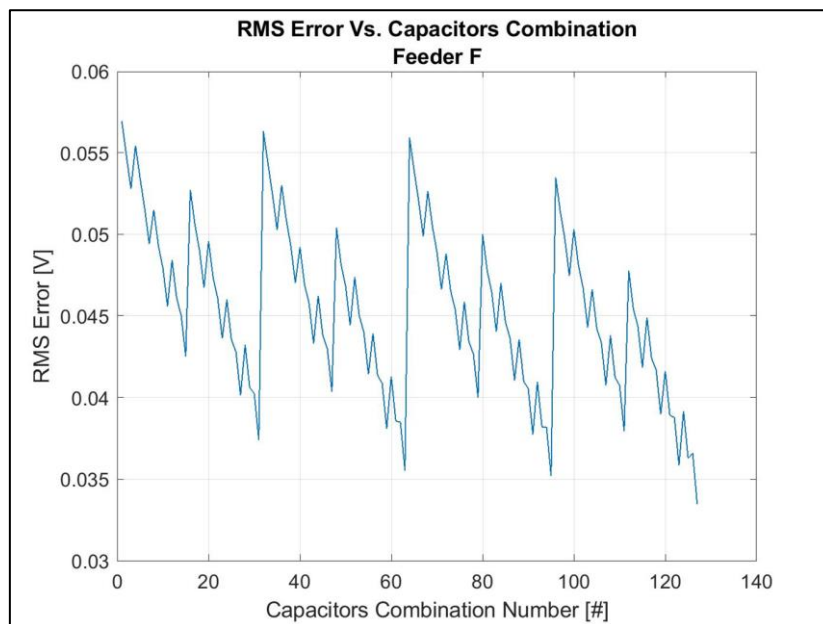
עבור הרשת F התקבלו התוצאות הבאות:



איור 11: שחזור תוצאות עבר – פידר F

גם במקרה זה ניתן לראות ששחזרנו את תוצאות העבר בהצלחה – מתחי הרשת לפני האופטימיזציה זהים. גם במקרה זה הקונפיגורציה T היא זו שבה כל הקבלים האפשריים מחוברים. השגיאה שהתקבלה היא $RMSE = 0.033 \text{ Vpu}$ וזמן החישוב 6.33 שניות. ניתן לראות כי במקרה זה לא הצלחנו להביא את מתחי הצמתים אל תחום המתחים הרצוי, אך כן הצלחנו לשפר אותם וניתן לראות בבירור כי השגיאה כפי הוגדרה – קטנה.

בגרף הבא ניתן לראות את השגיאה עבור כל אחת מהקונפיגורציות:

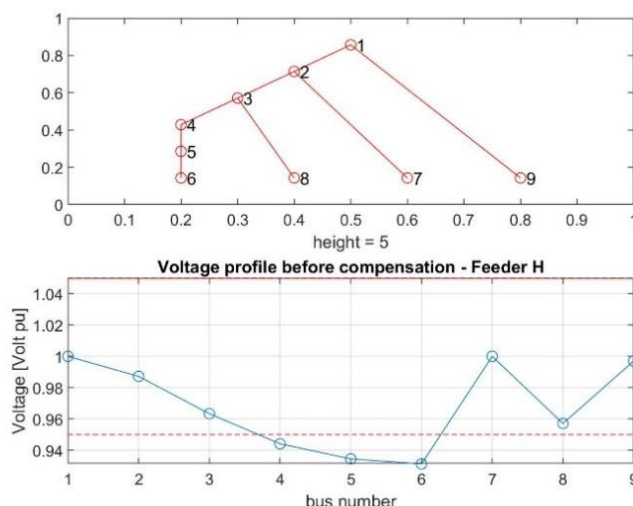


איור 12: השגיאה כתלות בקונפיגורציית הקבלים – פידר F

לאחר ששיחזרנו בהצלחה את תוצאות העבר פנינו לבדיקת האופטימיזציה והשוואת השיטה הקיימת היום בתעשייה לבדיקה בשיטת *Brute – Force* את כלל הקונפיגורציות האפשריות.

:Feeder H

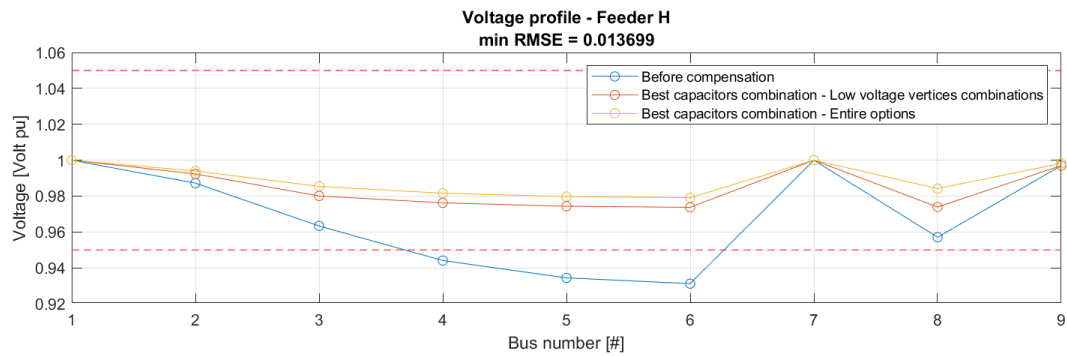
כזכור בפידר זה קיימים 9 צמתים. טווח המתחים המותר בכל צומת ברשת הוגדר להיות $[0.95, 1.05]$ Volt pu. לאחר הפעלת אלגוריתם Backward-Forward קיבלנו את הגרף הבא המציג את מבנה הרשת ואת מתחי הצמתים (בערך מוחלט):



איור 13 : פידר H לפני פיצוי

מהגרף לעיל עולה כי בצמתים 4,5,6 המתח קטן ממתח הסף המינימלי שהגדרנו, כאשר קיימים קבלים בצמתים 4,5,6,8,9. בצמתים 1,7 מצוי גנרטור אשר כופה מתח של 1 Volt pu. כעת ביצענו השוואה בין שתי השיטות הבאות:

- שיטת הפיצוי הקיימת כיום – חיבור קבלים במקביל לאימפדנס הכולל בצומת בו נמדד מתח מחוץ לטווח המתחים המותר, כך שה- *RMSE* מ- 1 Volt pu (השגיאה) יקטן
- השיטה אותה אנו בודקים (*Brute Force*) – מציאת קומבינציית חיבורי הקבלים אשר תביא למינימום את המרחק הריבועי מ- 1 Volt pu **מבין כל הקבלים הזמינים ברשת**



איור 14: פרופיל מתחי הרשת בפידר H לאחר פיצוי בשתי השיטות

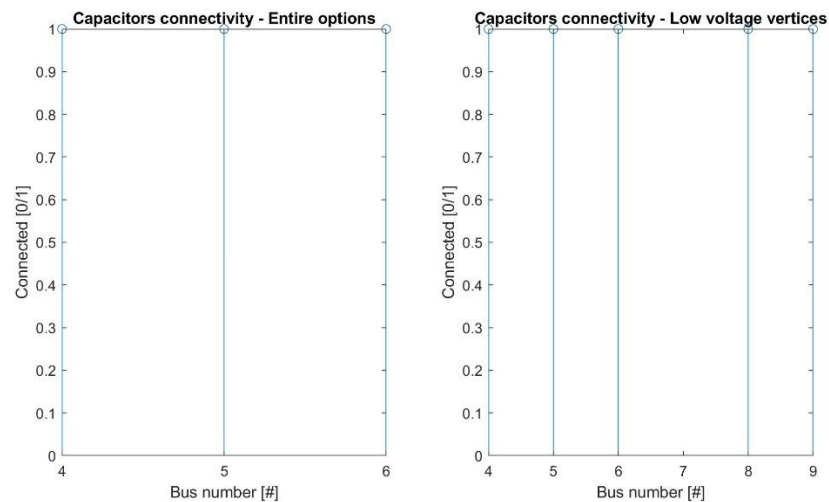
כפי שניתן לראות, שתי השיטות הביאו להקטנת ה- $RMSE$, עם יתרון לשיטת *Brute Force*:

<i>Compensation method</i>	<i>used in industry</i>	<i>Brute Force</i>
$RMSE$ [Volt pu]	0.018	0.014

טבלה 2: השוואת $RMSE$ בין שתי שיטות הפיצוי - פידר H

קיבלנו שגיאה קטנה בכ-22% מהשיטה הקיימת.

מיפוי חיבורי הקבלים:

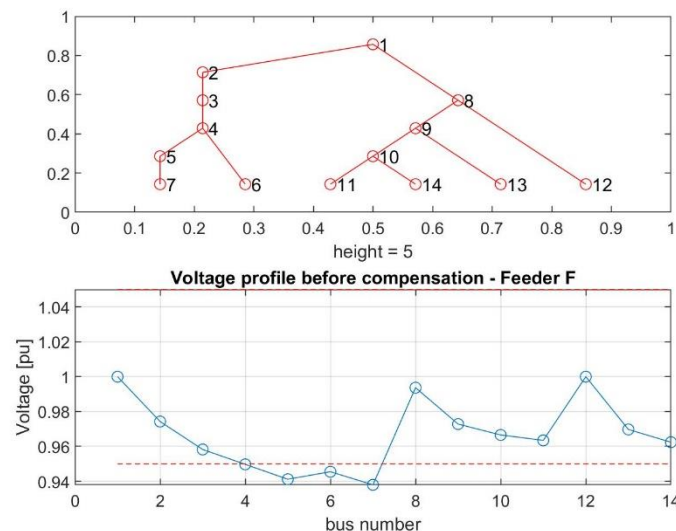


איור 15: מיפוי חיבורי קבלים – פידר H

נשים לב כי קיבלנו שחיבור כל הקבלים הזמינים הניב את פרופיל המתח האידיאלי (שגיאה מינימלית ממתח של 1 Volt pu בכל אחד מהצמתים ברשת).

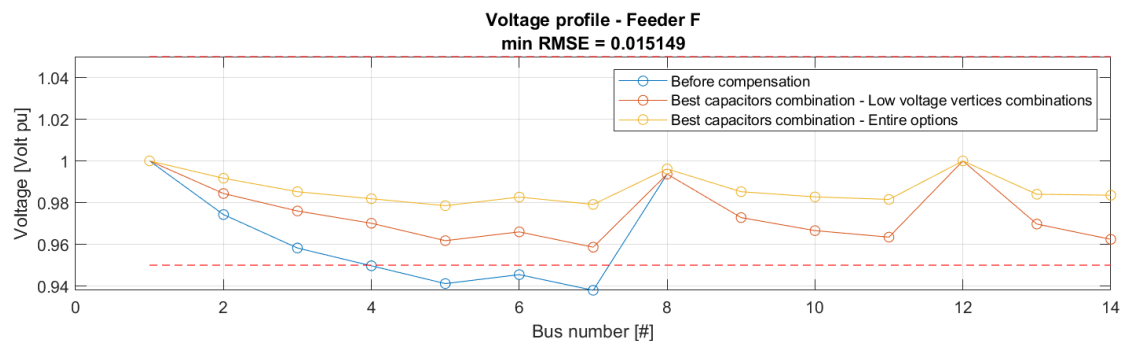
:Feeder F

כזכור בפידר זה קיימים 14 צמתים, וכמו בפידר H גם כאן הגדרנו את טווח המתחים המותר בכל צומת ברשת להיות $Volt\ pu$ [0.95,1.05]. לאחר הפעלת אלגוריתם Backward-Forward קיבלנו את הגרף הבא המציג את מבנה הרשת ואת מתחי הצמתים (בערך מוחלט):



איור 16: פידר F לפני פיצוי

מהגרף לעיל עולה כי בצמתים 4,5,6,7 המתח קטן ממתח הסף המינימלי שהגדרנו, כאשר קיימים קבלים בצמתים 2,3,6,7,11,13,14. בצמתים 1,12 מצינו גנרטור אשר כופה מתח של $Volt\ pu$ 1. לאחר חיבור קבלים בשתי השיטות קיבלנו את פרופיל המתחים הבא:



איור 17 : פרופיל מתחי הרשת בפידר F לאחר פיצוי בשתי השיטות

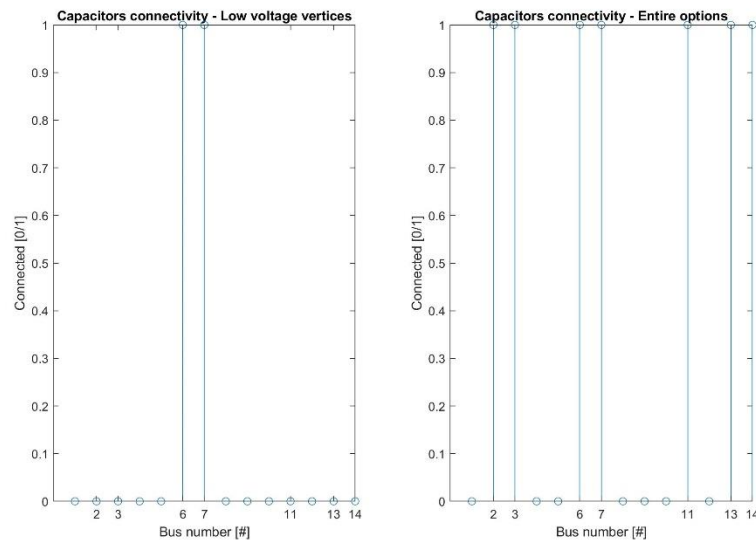
גם במקרה זה ניתן לראות שיטת ה- *Brute Force* הניבה שיפור ניכר יותר:

Compensation method	used in industry	Brute Force
RMSE [Volt pu]	0.029	0.015

טבלה 3 : השוואת RMSE בין שתי שיטות הפיצוי - פידר F

קיבלנו שגיאה קטנה בכ-50% (!) מהשיטה הקיימת.

מיפוי חיבורי הקבלים:



איור 18 : מיפוי חיבורי קבלים – פידר F

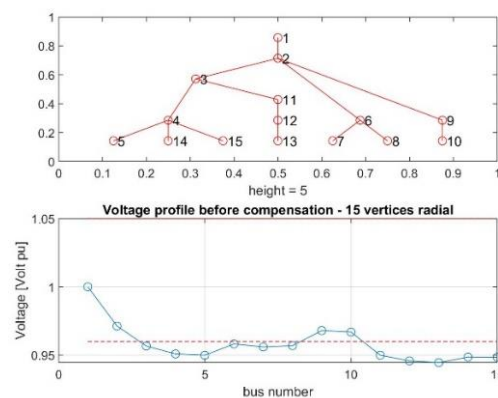
גם במקרה זה קיבלנו כי חיבור כלל הקבלים הזמינים הניב את השגיאה המינימלית (בגרף לעיל מסומנים על הציר האופקי רק מספרי הצמתים בהם ישנו קבל).

לאחר שבדקנו את הביצועים על פידרים לדוגמה (H,F) בדקנו את הביצועים על רשת חשמל אמיתית אשר הניבו את התוצאות הבאות:

Case 15 – Radial

הרשת שבדקנו היא רשת חשמל רדיאלית בעלת 15 צמתים. ברשת זו הנחנו כי קיימים קבלים של 100 MVA בכל אחד מהצמתים (לא היו בידינו נתונים אודות הקבלים).

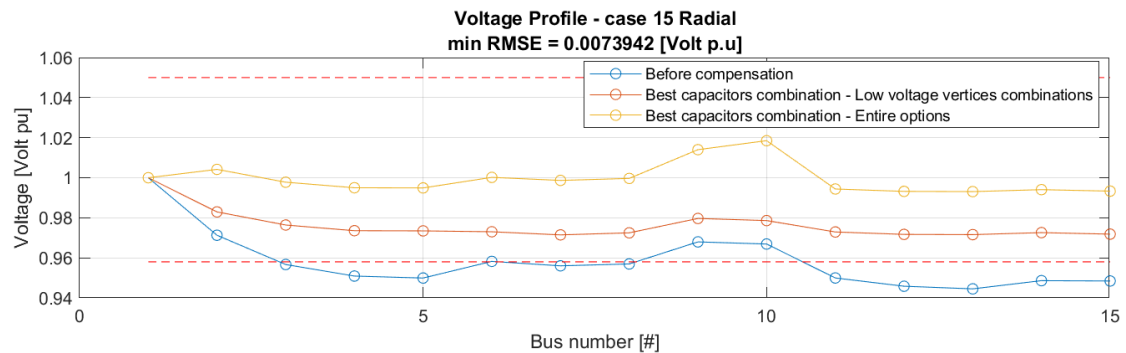
מבנה הרשת ופרופיל המתחים לפני הפיצוי נראה כך:



איור 19: רשת אמיתית בעלת 15 צמתים לפני פיצוי

ניתן לראות בגרף לעיל כי ב-11 צמתים נמדד מתח נמוך מהסף.

לאור העובדה שהרצת Brute Force על 2^{15} קומבינציות (עבור 15 צמתים בכל אחד מהם זמין קבל) היא משימה לא יעילה או ישימה, ולאור התוצאות שהתקבלו ברשתות החשמל לדוגמה (בהן חיבור כל הקבלים הניב את השגיאה המינימלית), ראשית חיברנו את כל הקבלים בצמתים בהם נמדד מתח נמוך מהסף התחתון, ואת אלגוריתם ה *Brute Force* הרצנו על הצמתים בהם המתח היה בטווח המתחים המותר. בכך צמצמנו את מספר הקומבינציות הנבדק מ- 2^{15} ל- 2^5 קומבינציות. התוצאות שהתקבלו מוצגות בגרף הבא:



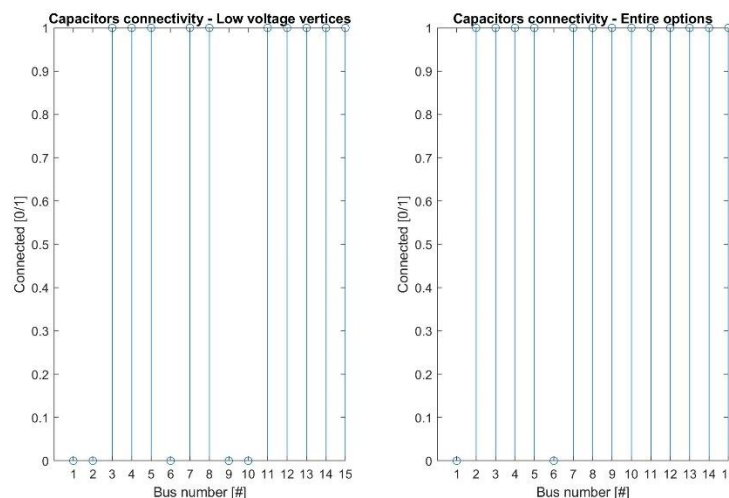
איור 20 : רשת אמיתית בעלת 15 צמתים לאחר פיצוי

ניתן לראות שגם במקרה זה הצלחנו להשיג תוצאות טובות משמעותית בשיטת *Brute Force* מאשר בשיטה שבה נעשה שימוש כיום. השגיאות שהתקבלו בשתי השיטות:

<i>Compensation method</i>	<i>used in industry</i>	<i>Brute Force</i>
<i>RMSE [Volt pu]</i>	0.025	0.008

טבלה 4: השוואת RMSE בין שתי שיטות הפיצוי – רשת אמיתית

השגיאה שהגשנו קטנה כמעט פי 3. נתבונן במיפוי חיבורי הקבלים:



איור 21: מיפוי חיבורי קבלים – רשת אמיתית

נשים לב כי בקומבינציה שהביאה למינימום את השגיאה לא כל הקבלים מחוברים.

מטרת הפרויקט הייתה לבדוק ביצועים לשיטת אופטימיזציה חדשה לרשת חשמל רדיאלית לא מאוזנת. השיטה אותה בדקנו היא שיטת *Brute Force* שביסודה בודקת את כל האפשרויות הקיימות לחיבור קבלי פיצוי לאורך הרשת. ראינו כי שימוש בשיטת *Brute Force* לרוב הביא לתוצאות טובות יותר מאשר שיטת הפיצוי שבה משתמשים כיום (ביחס לפונקציית המחיר שהגדרנו – שגיאה ריבועית ממוצעת מינימלית).

יתרון מובהק של שיטת *Brute Force* הוא בדיקת כל התרחישים האפשריים לחיבור וניתוק קבלים ברשת, כלומר בכל מקרה נגיע לקונפיגורציה האידאלית ולא נפספס תרחיש שבו קיימת קונפיגורציה עדיפה. כמו כן, מאחר והניתוח לא מתבצע Online, זמן הריצה של האלגוריתם לא מהווה מגבלה מובהקת. יחד עם זאת, שיטה זו די מסורבלת מאחר וכל צומת ברשת מכפיל את מספר הקונפיגורציות האפשריות ולכן זמן הריצה של האלגוריתם גדל באופן אקספוננציאלי. ברשתות גדולות לא ניתן יהיה להשתמש בשיטה זו לאור מגבלות זיכרון (לא ניתן להריץ מספר כה רב של קונפיגורציות). דבר נוסף שמעניין לבדוק הוא אופטימיזציה בשיטת *Brute Force* ביחס לפונקציות מחיר אחרות, לדוגמה הפרש מתחים בערך מוחלט, הספק ריאקטיבי מקסימלי רצוי ברשת ועוד.

בפרויקט זה האלמנט הנשלט היחיד שבדקנו היה קבלים שחיבורם במקביל לאימפדנס בכל צומת הוריד את צריכת ההספק הריאקטיבי ושיפר את נצילות הרשת. ניתן להוסיף אלמנטים נשלטים נוספים לרשת, לדוגמה תאים סולריים שיוכלו לחסוך אנרגיה המסופקת לרשת ע"י ה- Feeder. בהוספת תאים סולריים יש להתחשב בשעות זריחת השמש ושקיעתה, מאחר ובשעות הזריחה ניתן לאגור אנרגיה שנוכל לנצל בשעות הלילה. שינוי זה יתרום גם לשימוש באנרגיה ירוקה, ישליך על אלמנטים רבים בתחום הסביבה ויתכן שישפיע רבות על העלות הכוללת של הרשת, בין אם בתוספת מחיר לקניית הציוד המתאים או חסכון על האנרגיה ה"חינמית" שניתנת לנו מהשמש.

מקורות

ספר

- [1] H. Saadat, "Power System Analysis", WCB/McGraw-Hill, 1999.

מאמר

- [2] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, P. X. Luo, "A COMPENSATION-BASED POWER FLOW METHOD FOR WEAKLY MESHED DISTRIBUTION AND TRANSMISSION NETWORKS", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, May 1988.