

השפעת עקומת תילי קו מתח עליון על סיכוי פגיעת ברק

ד"ר שמואל אלוש

הקדמה

התקנת תילי הארקה בקווי מתח עליון נועדה להגן על קווים אלו מפני פגיעות ישירות של ברק בתילי הפזה. מיקום נכון של תילי הפאזות והארקה יצמצם משמעותית את סיכוי הפגיעה בתילי הפאזות אשר גורמים בדרך כלל להפרעה במערכת. לעומת זאת פגיעה בתיל הארקה יכולה לשמש כהגנה מפני פגיעה בקו החשמל, ובעצם משמשת ברוב המקרים כתחליף לתיל הפזה בנתיב ההתפרקות לאדמה. עקב חשיבות זו של מיקום תילי הארקה והפאזות, פותחו שיטות שונות לחישוב הגנה זו. פיתוחים משמעותיים נעשו החל משנות החמישים של המאה הקודמת, לצורך הגנה על קווי מתח עליון שהיו בתנופת בנייה מואצת, עקב התפתחות תעשיית החשמל בעולם.

סיכוי הפרת ההגנה SFP של תיל הארקה, ניתן לחישוב בהתאם לזווית ההגנה α שבין תיל הארקה לתיל הפאזה. Kostenco [1] מצא שאין להסתפק רק בזווית ההגנה אלא יש להתחשב גם בגובה h של העמוד, והציע את הנוסחה הבאה לחישוב סיכוי הפרת ההגנה:

$$\log_{10} SFP = \frac{\alpha \sqrt{h}}{90} - 4$$

שיטה לחישוב הגנה באמצעות מודל אלקטרו-גיאומטרי הוצגה ע"י Young [2] וחוקרים רבים נוספים. בהתאם למודל זה מחשבים את המרחק r_g של הצעד האחרון של פגיעת הברק אל האדמה, כמוראה בתרשים מס' 1, כתלות בזרם הברק I :

$$r_g = AI^b$$

כאשר A, b ערכים קבועים התלויים באובייקט. כמו כן מחשבים את המרחק r_c של הצעד האחרון של פגיעת הברק אל מוליך הפאזה ותיל הארקה:

$$r_c = \gamma AI^b$$

ערכו של γ תלוי בגובה התילים. בהתאם למרחקי המשיכה שמתקבלים משרטטים את הרדיוסים r_c סביב מוליך הפאזה ותיל הארקה וכן קו מקביל לקרקע במרחק r_g מהקרקע. D_c הוא הרוחב החשוף לפגיעת ברק, D_g הוא הרוחב הגנה של תיל הארקה. כך נקבל את תחום ההגנה של קו המתח עליון.

שעור הפרת ההגנה SFR (Shielding Failure Rate) לקו באורך L_{total} בשנה, מחושב לפי הנוסחה:

$$SFR = 2N_g L_{total} \int_{I_{min}}^{I_{max}} D_c(I) f(I) dI$$

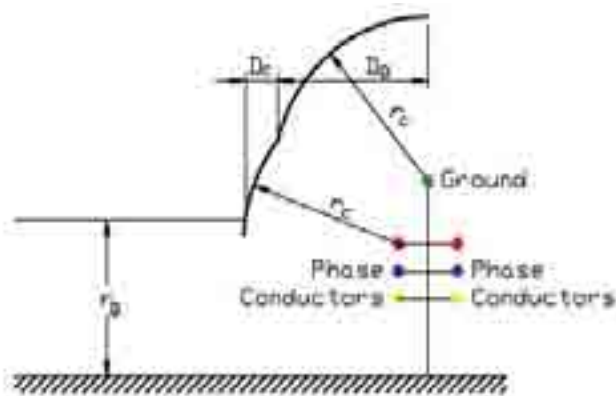


Figure 1 – Exposed distance in electro-geometric model

ובאופן דומה שעור פגיעות ברקים הצפוי בקו (פגיעה בתילי הארקה) בשנה:

$$N(G) = 2N_g L_{total} \int_{I_{min}}^{I_{max}} D_g(I) f(I) dI$$

כאשר N_g צפיפות הברקים ו- $f(I)$ פונקציית צפיפות ההסתברות של זרמי פריקת הברק.

הרחבה ושיפור של המודל לעיל נעשתה ע"י Whitehead [3] בהתבסס על מדידות רבות בקווי מתח עליון, וקביעת ערכים שונים למקדמים A, b בנוסחת הצעד האחרון. שיפורים והרחבות נוספים של המודל הגיאומטרי נעשו ע"י חוקרים רבים נוספים. במחקריהם צוינו ערכים שונים למקדמים, כאשר לגובהם של התילים יש השפעה על ערכי המקדמים וחוקרים רבים השתמשו בגבהים ממוצעים של התילים.

שיטה אחרת לחישוב סיכויי הפגיעה פותחה ע"י Braunstein [4]. מחשבים פוטנציאל סקלרי ווקטורי עקב המטען היורד ע"י משוואות מקסוול, וכך ניתן לקבל את ערכי השדה המושרה בכל נקודה במרחב. ברגע שהשדה המושרה גדול יותר מערך עוצמת השדה הקריטית של עצם כלשהו, מתחילה התפרקות משנה לכוון המוביל העולה מהמוביל היורד הממשיך את תנועתו בקו ישר. מבין כל המובילים העולים, זה שיפגוש ראשון את המוביל היורד יקבע את מקום הפגיעה משוער של הברק במערכת הנ"ל.

נציין שהתצורה של עקומת התילים בקו חשמל הינה פונקציה של מתיחת התילים, טמפרטורה, העומס החשמלי וחילת תילים המשתנים לאורכו של המפתח, בכל אורך החיים של הקו. בנוסף,

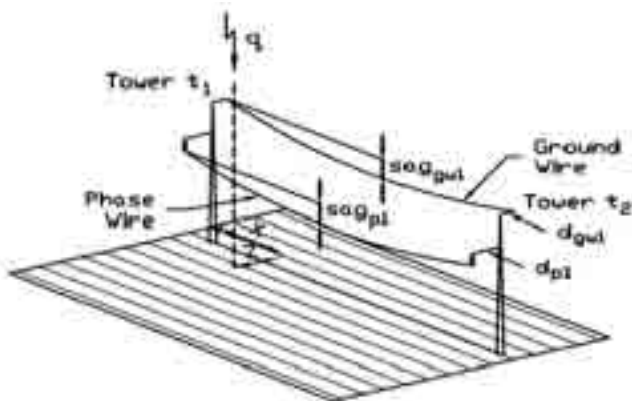


Figure 3 - Possible points that can be stricken by lightning (Only one phase wire and One ground wire)

נהוג להשתמש בחישובים אלו בפרמטר P (יחידות של מטר) במקום המתיחה σ (γ מציין את משקל התיל) המוגדר:

$$p = \frac{\sigma}{\gamma}$$

חישוב מיקום הפגיעה במפתח בין שני עמודים

מחשבים את השדה המושרה עקב המטען היורד q בכל נקודה במרחב. כאשר עוצמות השדה המושרה באובייקט כלשהו גדולה מערך העוצמת שדה הקריטית שלו, מתחילה התפרקות משנה לכוון המוביל העולה מהמוביל היורד. מתחילה "תחרות" בין המובילים העולים מכל האובייקטים הנ"ל, שהחלו בזמנים שונים ועליהם לעבור מרחקים שונים, מי יגיע קודם אל המוביל היורד לכיוונו. מבין כל המובילים העולים הן מהתילים, הן מהעמוד והן מהאדמה והן מכל עצם אחר הקיים למטה זה שיפגוש ראשון את המוביל היורד, יקבע את מקום הפגיעה המשוער של הברק במערכת הנ"ל.

בהתבסס על הרכיבים האופקי והאנכי כמוראה בתרשים מס' 4 נוכל לחשב את הגובה y'_{light_p1} , שבו יהיה גל הברק כאשר הלידר שבא ממנו ומתיל הפאזה p יפגשו.

$$y'_{light_p1} = y_{light_p1} - \frac{1}{2} \sqrt{(z-d_{p1})^2 + (y_{light_p1} - y_{p1} + sag(x,p)_{p1})^2}$$

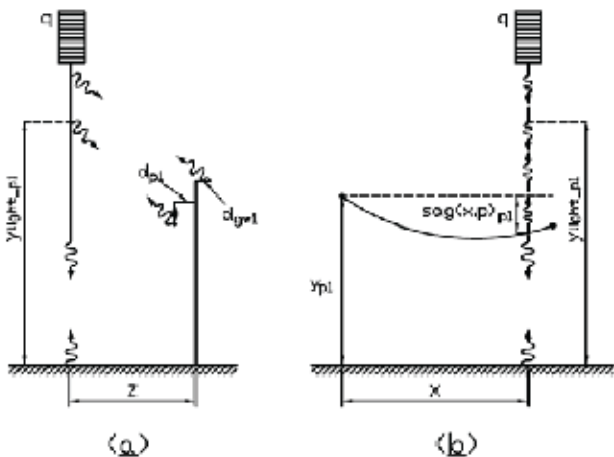


Figure 4 - Possible points that can be stricken by lightning and the distances from the leader for phase wire p1, (a) horizontal distances z, dp1 (b) vertical distances ylight_p1, yp1, sag(x,p)p1

ההשתנות בתילי הפזה העמוסים חשמלית אינה דומה להשתנות בתילי הארקה. למרות שהמודלים במחקרים לעיל נותנים דרך נוחה לחישוב סיכוי הפגיעה בקו, אין בהם נתונים כמותיים לגבי השפעת שינויי המתיחה והמתלה על תוצאות אלו. מטרת מחקר זה לקבוע את השפעת שינויי המתלה ועקומת התילים על שיעור הפרות ההגנה ושיעור הפגיעות בקו, ע"י פיתוח שיטה לביצוע חישובים אלו.

תיאור עקרוני של המודל [5,6]

העיקרון של המודל במחקר זה הינו בדיקת מצבים אפשריים של מתלה תילי הפזה ותיל הארקה, וחישוב שעורי הפגיעה במקרים אלו. ברור שבמידה ונרצה לחשב זאת בשיטות האמפיריות והאלקטרו-גיאומטריות, החישובים יהיו מורכבים מאחר ונצטרך לשרטט ולחשב מס' גדול מאוד של זוויות הגנה ועקומות גיאומטריות. במסגרת מחקר זה פותח מודל המתחשב בשינויי המתיחות והמתלה בהתבסס על שיטת Brunstein. תרשים זרימה של המודל מוצג בתרשים 2. בשיטה זו לא נקבעה נוסחה קבועה אלא מתבססים על חישוב מרחקים מהלידר היורד לכל נקודות פגיעה האפשריות וחישוב השדה החשמלי המושרה. אם כך נוכל להגדיר מרחקים למצבים אפשריים של תילי הפזה, הארקה והקרקע ולחשב את שדות אלו ואת סיכויי הפגיעה.

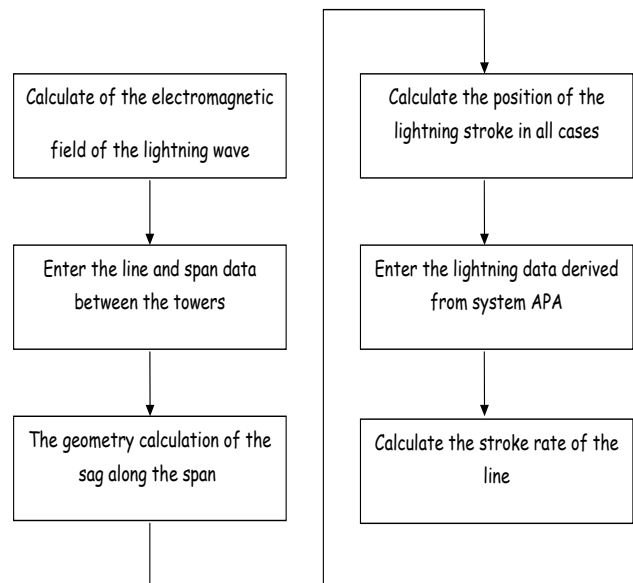


Figure 2 - Principle diagram of the proposed method

מפתח בין שני עמודים

בקו חשמל במתח עליון אנו דנים במס' אובייקטים כמוראה במפתח שבתרשים מס' 3: אדמה, תילי פאזה, תיל הארקה, ראש העמוד וכו'. הגבהים של האובייקטים הנ"ל הם ביחס למישור ייחוס H_{t1} שהוגדר כגובה הקרקע בעמוד t_1 .

המתלים sag_{gw} , sag_{p1} המוצגים בתרשים מוגדרים כמרחקים האנכים מנקודת החיבור בעמוד t_1 של תיל הפאזה p_1 ותיל הארקה gw בהתאמה. גודלם ניתן לחישוב באמצעות משוואת הקטנרי [7], כאשר ידועים נתוני המפתח, נתוני התילים וערכה של מתיחת התילים.

המתייחסת לדיווח פעילות ברקים בישראל כפי שנקלטו במערכת APA הפועלת בחברת החשמל. שיעורי הפגיעות חושבו ע"י שימוש בתוכנת מחשב שפותחה למטרה זו בסביבת Matlab. האינטגרציה נעשתה בכל המקרים בדרך נומרית, וכך נקבל את שיעור הפרת ההגנה ושיעור הפגיעות בקו.

סיכום התוצאות העיקריות

התוצאות מראות שלערכי המתחיה של התילים יש השפעה על שעורי הפרת ההגנה. השפעות אלו תלויות במתחיה של תילי הפזה ותילי הארקה וגם בסוג העמוד המתוכנן. הקטנת המתחיה של תיל הארקה ביחס למוליכי הפזה מגדילה את שיעור הפגיעות בפאזות במפתחים ארוכים, מאחר והשפעת המתחיה על המתלה גדולה במפתחים אלו. הגדלת המתחיה של תיל הארקה ביחס למוליכי הפזה יכולה להפחית את שיעורי הפגיעות, אך כפי שהתקבל בתוצאות ישנם מיקרים שתוספת זו של המתחיה איננה נדרשת.

כאשר קו נבנה עם שני תילי הארקה, אפשרי למקם את התילים כך ששיעור הפרת ההגנה ישאף לאפס. בחירת זווית הגנה קטנה מספיק תשפר את ההגנה של הקו. כפי שמפורט במחקר, לשני תילי הארקה יש יתרונות ושימושים נוספים שאינם קשורים להגנת הקו נגד ברקים כגון: תפעול ותחזוקה, פתרון אילוצי גובה וקרקה, תקשורת אופטית ועוד. עקב עלותו השולית של תיל הארקה השני ובהתחשב בשימושו ויתרוניתו הרבים הנוספים, מומלץ להגדיל שימוש בשני תילי הארקה בקווי מתח עליון.

לערכה של טמפרטורת התילים ישנה השפעה קטנה על שיעור תוצאות הפגיעה, בקווים עם תיל הארקה אחד. כאשר טמפרטורת תילי הפזה עולה עקב עומס חשמלי ישנה הקטנה בשיעור הפגיעות בתילי הפאזות. גודלה של השפעה זאת מותנה במתחיה של תיל הארקה ותילי הפזה ובמבנה העמוד. כאשר המתחיה של תיל הארקה גבוהה יותר השפעה זאת קטנה יותר.

כאשר תילי הקו מותקנים בו-זמנית אזי הקטנת המתחיה עקב הזחילה של תילי הפזה והארקה הינה בדרך כלל אחידה, אם כי יתכנו שינויים קטנים עקב ההבדל בחומרים של תילי הפאזה והארקה, ולפיכך לא יהיו שינויים משמעותיים בשיעור הפרת ההגנה עם הזמן. עם זאת כאשר מחליפים את תיל הארקה הישן לתיל חדש (בדרך כלל מחליפים תיל זה לתיל סיב אופטי), תיל הארקה יזחל יותר מתיל הפזה (תיל הפזה כמעט ולא יזחל יותר) ותהיה הגדלה מזערית עם הזמן של שיעור הפרת ההגנה עקב זחילת תיל הארקה.

לסיכום, המחקר הנוכחי מציג שיטה אנליטית לחישוב הגנת קו מתח עליון מפני פגיעות ברקים בהתחשב במתלה ובמתחיה של הקו. זה נעשה ע"י שימוש במשוואת עקומת תילי הפזה והארקה בכדי לדעת את מיקום התילים לאורך המפתח. בהתבסס על תיאוריה אלקטרומגנטית חושבו שיעורי הפרת ההגנה ושיעור הפגיעות בקו בהתאם למיקום התילים והמתחיה, והוצגו התוצאות העיקריות ומשמעותם.

הבעת תודה

תודתי נתונה לפרופ' אריה בראונשטיין וד"ר דוד אלמקיאס על הנחייתם המקצועית, המסורה והסיוע לכל אורך המחקר.

באופן דומה נחשב את הגבהים y'_{light_gr} , y'_{light_t1} , y'_{light_t2} , y'_{light_gw1} , y'_{light_gw2} , y'_{light_p2} , y'_{light_p3} לכלל העצמים האחרים. נקודת הפגיעה תהיה באובייקט שבו יתקבל ערך הגובה המקסימאלי מבין כל הגבהים, מאחר והוא יהיה הראשון שיפגוש את הלידר היורד.

חישוב שיעור הפגיעות בקו החשמל

כאשר אנו מכירים כעת אופן חישוב של פגיעת ברק עבור גל אקראי בנקודה אחת, נוכל לחשב את מקום הפגיעה של גל הברק לאורכו (ציר x) ולרוחבו (ציר z) של קו החשמל עבור כל ערך זרם I. נגדיר:

$$K(I,x,z)=1 \text{ if there is a stroke on the ground wire}$$

$$K(I,x,z)=0 \text{ if there is no a stroke on the ground wire}$$

$$K_{stroke}(I,x,z)=1 \text{ if there is a stroke on the phase conductor}$$

$K_{stroke}(I,x,z)=0$ if there is no stroke on the phase conductor
שטח החשוף לפגיעת ברק ושטח הרצועה המוגנת בקמ"ר, במפתח שבין שני עמודים עוקבים באורך L (ביחידות של ק"מ) עבור זרם I כלשהו יהיה בהתאמה:

$$S_{stroke}(I) = \int_0^L \int_{-0.5}^{0.5} K_{stroke}(I,x,z) dx dz$$

$$S(I) = \int_0^L \int_{-0.5}^{0.5} K(I,x,z) dx dz$$

המפתחים של קו החשמל הינם באורכים שונים וגובה התילים איננו אחיד ולפיכך נקבל שטחים שונים עבור כל מפתח בקו החשמל. כאשר ידועים N_g צפיפות הברקים לשנה באזור של הקו, ו-P(I) ההסתברות שזרם פריקת הברק יהיה שווה לזרם I, נוכל לחשב את שיעור הפרת ההגנה SFR(I) ושיעור הפגיעות בקו $N_{gw}(I)$ לשנה, לקו עם n מפתחים ועבור זרם I כלשהו:

$$SFR(I) = N_g P(I) \sum_{i=1}^n S_{stroke_i}(I)$$

$$N_{gw}(I) = N_g P(I) \sum_{i=1}^n S_i(I)$$

אם I_m ו- I_n הם הגבול התחתון והעליון בהתאמה של זרמי הברק אזי נקבל עבור כל הזרמים את שיעורי הפגיעה הבאים:

$$SFR = N_g \sum_{i=1}^n \int_{I_m}^{I_n} \int_0^{L_i} \int_{-0.5}^{0.5} P(I) K_{stroke_i}(I,x,z) dI dx dz$$

$$N_{gw} = N_g \sum_{i=1}^n \int_{I_m}^{I_n} \int_0^{L_i} \int_{-0.5}^{0.5} P(I) K_i(I,x,z) dI dx dz$$

המודל שפותח משתמש בנתונים של רשת החשמל קיימת במתח 110 ו-400 ק"ו בישראל ונעשה שימוש בפונקציית צפיפות הסתברות

ספרות

Alush, S., Braunstein, A., Elmakias, D.: 'Transmission line sag influence on lightning stroke probability', IET Gener. Transm. Distrib., 2012, Vol. 6, Iss. 10, pp. 1046–1052
 Kiessling, F., Nefzger, P., Nolasco, J.F., Kaintzyk, U.: 'Overhead 'power lines
 Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003

Kostenco, M.B.: 'Probability of lightning shielding failure of Elektrichestvo, 'transmission line, operation experiments and overview 1961, 4, pp. 20–26
 Young, F.S., Clayton, J.M., Hileman, A.R.: 'Shielding of transmission lines', AIEE Trans. Power Appl. Syst., 1963, PAS-82, pp. 132–154
 Armstrong, H.R., Whitehead, E.R.: 'Field and analytical studies of transmission line shielding', IEEE Trans. Power Appl. Syst., 1968, PAS-87, (1), pp. 270–281
 Braunstein, A.: 'Lightning strokes to power transmission lines and the shielding effect of ground wires', IEEE/PES Trans., 1970, 89, (8), pp. 1900–1909
 The influence of high voltage line configurations on' :Alush, S *Ph.D. Thesis, Tel- Aviv University*, 'lightning stroke probability 2012



ד"ר שמואל אלוש

מנהל מחלקת תכנון מתח עליון ועל במחוז הדרום של חברת החשמל בוגר אוניברסיטת בן-גוריון בהנדסת חשמל ומחשבים מוסמך במדעי ההנדסה ותואר שלישי בבית הספר להנדסת חשמל באוניברסיטת תל אביב