

תופעת קורונה

Corona discharge

כתיבה ועריכה:
סגל אריאל

הגדרה

- **קורונה** – התפרקות חשמלית חלקית המתרחשת כשערך השדה החשמלי על פני מוליך עולה על סף מסוים.
- עם עליית המתח במוליך מעל לגבול מסוים, הנקרא המתח הקריטי, מתחוללות באויר שמסביב למוליך התפרקות חשמליות. התפרקות חשמליות אלו נגרמות ע"י השדה החשמלי שמסביב למוליך כאשר הוא עובר את גבול הפריצה של האויר.
- ערך קריטי של השדה החשמלי הגורם לפריצת האויר:

$$E_{CR} = 21 \text{ kV/cm}$$

קורונה



תופעת קורונה

אריאל סגל WWW.arielsegal.co.il

3

תופעת קורונה



תופעת קורונה

אריאל סגל WWW.arielsegal.co.il

4

מתח קריטי

- המתח הקריטי הגורם להופעת קורונה בתיילים ניתן לחישוב בעזרת נוסחת פיק (Peek).

$$U_{CR} = \sqrt{3} E_{CR} m_1 m_2 r \delta * \ln \left[\frac{D}{r} \right] \quad [kV]$$

U_{CR} – המתח הקריטי שבו מופיעה תופעת הקרינה.
 E_{CR} – עצמת שדה של גבול פריצת האויר 21kV/cm.
 m_1 – מקדם פני השטח של המוליך:

1 בתיילים חלקים.

0.88-0.98 בתיילים מחוספסים.

0.72 – בכבלים שזורים.

m_2 – מקדם לחות האויר:

1 עבור אויר יבש.

0.8 עבור אויר לח

r – רדיוס המוליך בס"מ.

D – מרחק ממוצע בין מוליכי המופע בס"מ

δ – מקדם לחץ האויר והטמפרטורה

צפיפות אויר יחסית.

מתח קריטי

- את המקדם δ ניתן לקבל מתוך הקשר:

$$\delta = \frac{3.92 * P}{273 + T}$$

לחץ Hg cm	גובה (מטר)
76.0	0
72.4	500
68.8	1000
65.5	1500

P – לחץ ברומטרי (cm Hg) – בגובה פני הים $P=76$ cm Hg.
 t – טמפרטורת האויר ($^{\circ}C$) – בדרך כלל $25^{\circ}C$.

- כשמציבים ערכים אלה בביטוי ל- δ מתקבל:

$$\delta = \frac{3.92 * P}{273 + T} = \frac{3.92 * 76}{273 + 25} = 0.9997 \approx 1$$

מתח קריטי

- נציב את ערך השדה הקריטי ואת δ בנוסחת פיק (Peek) ונקבל:

$$U_{CR} = 36.4 m_1 m_2 r' \ln \left[\frac{D}{r'} \right] \quad [kV]$$

U_{CR} – המתח הקריטי שבו מופיעה תופעת הקרינה.

m_1 – מקדם פני השטח של המוליך:

1 בתיילים חלקים.

0.88-0.98 בתיילים מחוספסים.

0.72 – בכבלים שזורים.

m_2 – מקדם לחות האויר:

1 עבור אויר יבש.

0.8 עבור אויר לח

r' – רדיוס המוליך בס"מ בהתחשב בשטף הפנימי.

D – מרחק ממוצע בין מוליכי המופע בס"מ

$$r' = e^{-1/4} \cdot r$$

דוגמא מספרית

- נתייחס לקו 400kV.

- מקרה 1: מעגלים שכל אחד מהמופעים עשוי ממוליך יחיד ששטח חתכו שווה ערך לחתך 3 המוליכים יחד. שטח חתך מוליך שווה ערך:

$$S = 3 * 620 = 1860 mm^2$$

$$r = \sqrt{\frac{S}{\Pi}} = \sqrt{\frac{1860}{\Pi}} = 24.3 mm = 2.43 cm$$

$$r' = e^{-1/4} \cdot r = 1.892 cm$$

$$U_{CR} = 36.4 m_1 m_2 r \ln \left[\frac{D}{r} \right] =$$

$$= 36.4 * 0.8 * 0.8 * 1.892 * \ln \left[\frac{400}{1.892} \right] = 236 kV$$

בדוגמא נלקחו הנתונים הבאים:

$m_1 = 0.8$ – מוליך שזור

$m_2 = 0.8$ – אויר לח

$D = 4m$ – מרחק בין תיילים

מסקנה: ערך המתח שהתקבל: 236kV נמוך ממתח המעגל. לפיכך יתרחשו הפסדים בשל קורונה.

חישוב מתח קורונה ברשת רבת מוליכים

- ברשת רבת מוליכים (2 או יותר) מוליכים לכל פאזה יחושב מתח קורונה על ידי שימוש בקשר:

$$U_{CR} = \sqrt{3} \cdot E_{CR} \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot (GMR) \cdot \delta * \ln\left(\frac{GMD}{GMR}\right) \quad [kV]$$

- GMR – רדיוס גיאומטרי ממוצע של קבוצת המוליכים במופע.
- GMD – מרחק גיאומטרי ממוצע בין מוליכי המופע.
- בדרך כלל נתחשב ב-GMD כמרחק בין מרכזי תיילי הפזות

$$GMR = \sqrt[n^2]{(D_{aa} \cdot D_{ab} \cdot D_{ac} \cdots D_{an}) \cdot (D_{ba} \cdot D_{bb} \cdot D_{bc} \cdots D_{bn}) \cdots (D_{na} \cdot D_{nb} \cdot D_{nc} \cdots D_{nn})}$$

$$GMD = \sqrt[mn]{(D_{aa'} \cdot D_{ab'} \cdot D_{ac'} \cdots D_{am'}) \cdot (D_{ba'} \cdot D_{bb'} \cdot D_{bc'} \cdots D_{bm'}) \cdots (D_{na'} \cdot D_{nb'} \cdot D_{nc'} \cdots D_{nm'})}$$

רדיוס אפקטיבי

- הרדיוס האפקטיבי של קבוצת מוליכים בקו מתח על ברשת 400kV בהנחה שהתיילים מסודרים בקודקודי משולש שווה צלעות יחושב לפיכך:

$$GMR_3 = \sqrt[3]{(D_{aa} \cdot D_{ab} \cdot D_{ac}) \cdot (D_{ba} \cdot D_{bb} \cdot D_{bc}) \cdot (D_{ca} \cdot D_{cb} \cdot D_{cc})}$$

$$GMR_3 = \sqrt[9]{(r' \cdot D_{ab}^2) \cdot (r' \cdot D_{bc}^2) \cdot (r' \cdot D_{ca}^2)}$$

$$GMR_3 = \sqrt[9]{r'^3 \cdot D_{ab}^6}$$

- עבור מרחק של 20 ס"מ בין מרכזי התיילים נקבל:

$$r = \sqrt{\frac{S}{\Pi}} = \sqrt{\frac{620}{\Pi}} = 14.05mm = 1.405cm$$

$$r' = e^{-1/4} \cdot r = 1.094cm$$

$$GMR_3 = \sqrt[9]{r'^3 \cdot D_{ab}^6} = \sqrt[9]{1.094^3 \cdot 20^6} = 7.6cm$$

דוגמא מספרית

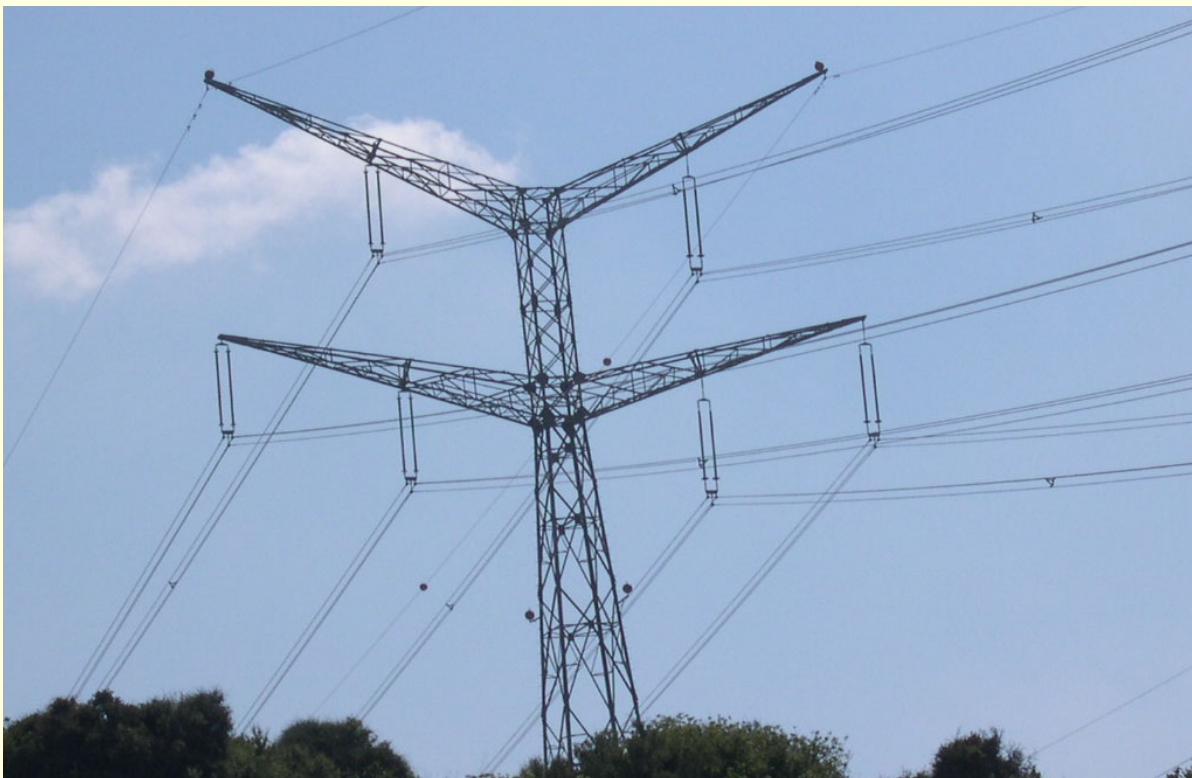
■ כשהמעגל מבוסס על 3 מוליכים המרוחקים זה מזה באמצעות מחברים. כשהמרחקים בין מרכזי התיילים הינו 20 ס"מ הרדיוס האפקטיבי הינו 7.6 ס"מ.

$$U_{CR} = 36.4m_1m_2r * \ln\left[\frac{D}{r'}\right] =$$
$$= 36.4 * 0.8 * 0.8 * 7.6 * \ln\left[\frac{400}{7.6}\right] = 700kV$$

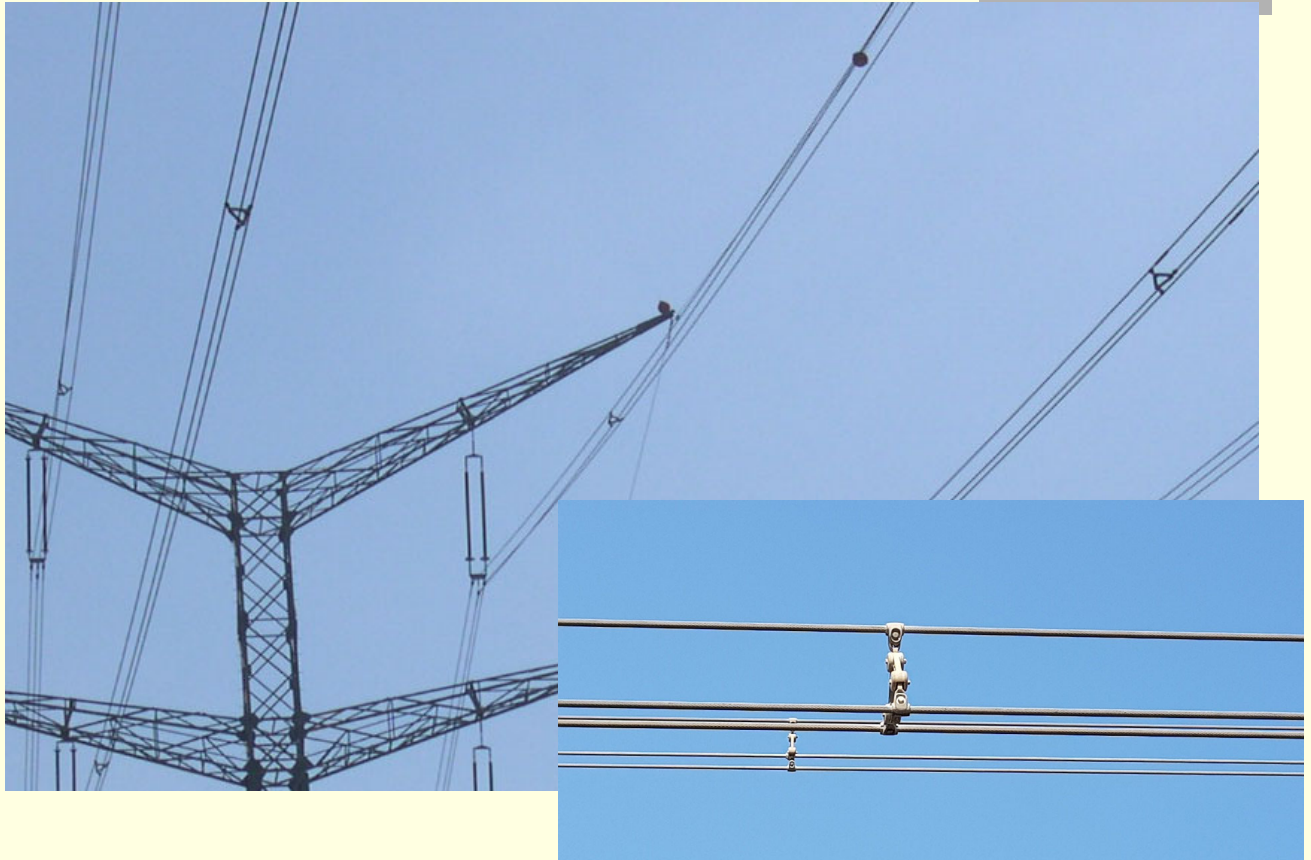
בדוגמא נלקחו הנתונים הבאים:
m₁=0.8 – מוליך שזור
m₂=0.8 – אויר לח
D=4m – מרחק בין תיילים

מסקנה: ערך המתח שהתקבל: 700kV גבוה משמעותית ממתח המעגל. לפיכך לא יתרחשו הפסדים בשל קורונה.

קו דו מעגלי 3 מוליכים בכל פאזה



קו דו מעגלי 3 מוליכים בכל פאזה



תופעת קורונה

WWW.arielsegal.co.il אריאל סגל

13

קו מתח על בארה"ב בעל 6 מוליכים לפאזה



רשת במתח 765kV במזרח וירג'יניה ואוהיו בארה"ב
קוטר המעגל המקיף 760 מ"מ. מרחק בין פאזות 14 מטר

תופעת קורונה

WWW.arielsegal.co.il אריאל סגל

14

קו מתח 500kV בגרמניה



תופעת קורונה

השפעת תופעת קורונה

תופעת קורונה בקווי חשמל גורמת למספר תופעות שליליות:

הפסדי אנרגיה. 🚫

קורוזיה של מוליכים ואביזרים מתכתיים ברשת. 🚫

הפרעות בשידורי רדיו וטלוויזיה. 🚫

הפרעות בתדרי השמע. 🚫

יצירת אוזון (אוזון הינו גז ממשפחת החמצן שנוצר כתוצאה מקרינה על סגולית או באמצעות התפרקויות חשמליות).

האוזון משפיע במידה רבה על התהוות הקורוזיה.

יצירת חומרים מעכלים כמו תחמוצת חנקן, (בנוכחות אדי מים) חומצה חנקנית 🚫



תופעת קורונה

הפסדי קורונה

הפסדי ההספק החשמלי הנגרמים כתוצאה מתופעת קורונה ניתנים לחישוב בעזרת נוסחת פיק (Peek).

$$P = \frac{344}{\delta} * f * \sqrt{\frac{r'}{D}} (U_n - U_{CR})^2 * 10^{-5} [kW / km]$$

P – הפסדי הספק בגין קורונה kW/km קו
 U_n – המתח הנקוב של הקו kV.
 f – תדירות הקו HZ.
 U_{CR} – מתח קריטי להופעת הפסדי קורונה

דוגמא לחישוב הפסדי קורונה

הפסדי קורונה בקו 400kV בעל מתח קריטי של 236kV שחושב קודם יהיו:


$$P = \frac{344}{\delta} * f * \sqrt{\frac{r'}{D}} (U_n - U_{CR})^2 * 10^{-5} [kW / km]$$

$$P = \frac{344}{1} * 50 * \sqrt{\frac{1.892}{400}} (400 - 236)^2 * 10^{-5} = 318.1 [kW / km]$$

הפסדים אלה נגרעים מהאנרגיה העוברת בקו לכל אורך חיי הקו בלא קשר לזרם.

הפסדי קורונה

הנוסחאות שתוארו נכונות עבור מוליכים הממוקמים בקודקודי משולש שווה צלעות.

כאשר המוליכים מסודרים במישור  המתח הקריטי בו מתרחשת תופעת קורונה, שונה בין המופעים. במופע האמצעי הוא קטן בכ- 40% ובמוליכים החיצוניים הוא גדול בכ- 6%, כלפי המתח הקריטי המחושב.

הקטנת הפסדי קורונה

בשלב התכנון:

- הגדלת מספר המוליכים ע"י שימוש במספר מוליכים במקביל (2 או 3 בכל מופע) במקרה זה הרדיוס היעיל שווה לרדיוס המעגל הנוצר ע"י המוליכים
- הגדלת קוטר המוליכים ע"י שימוש במוליכים חלולים.
- ציפוי המוליך בשכבה דקה של חומר מבודד.
- כיסוי המוליך בצינור מבודד.

הקטנת הפסדי קורונה

בשלב בניית הקו:

- יש למנוע כל פגיעה במוליכים, כדי למנוע הווצרות פגמים בפני המוליך. פגמים אלה גורמים לריכוזיות יתר של השדה החשמלי. מסיבה זו אין לגרור את התיילים על גבי הקרקע (בשל פציעות מאבנים) או סביבה אחרת שעשויה לפצוע את פני התיילים.
- יש להקפיד על שלמות מבדדים ושאר אביזרי חיבור.
- יש להקפיד על הידוק ברגים ולהמנע מהשארת קצוות מוליכים.

הקטנת הפסדי קורונה

בשלב תפעול הקו:

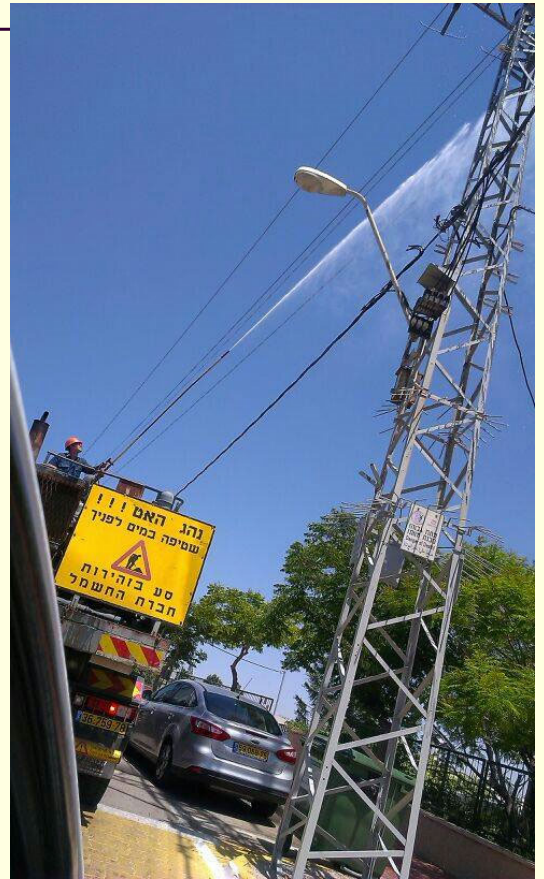
- מריחה תקופתית של האביזרים הרגישים לחלודה באמצעות משחת הולכה.
 - הקפדה על חיזוק והידוק ברגים.
 - שטיפה תקופתית של המבדדים בזרם מים מזוקקים כדי לנקותם מלכלוך שמצטבר עליהם.
- יש לבחון לפני ואחרי הפעלת הקו את מידת ההפרעות הקיימות לקליטת שידורי רדיו וטלוויזיה ולבדוק תקופתית את הקו בכדי לגלות ולתקן גורמי הפרעות.

שטיפת מבודדים בקוי 22kV



תופעת קורונה

WWW.arielsegal.co.il אריאל סגל



23

שטיפת מבודדים בקו 160kV

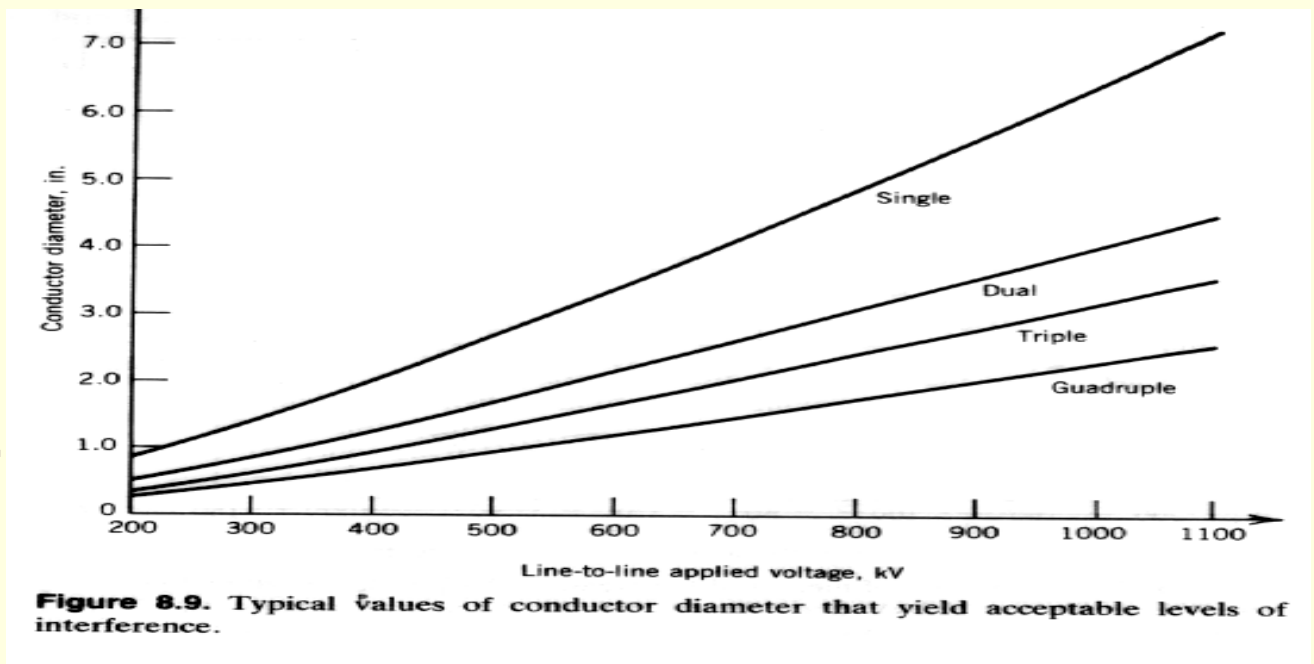


תופעת קורונה

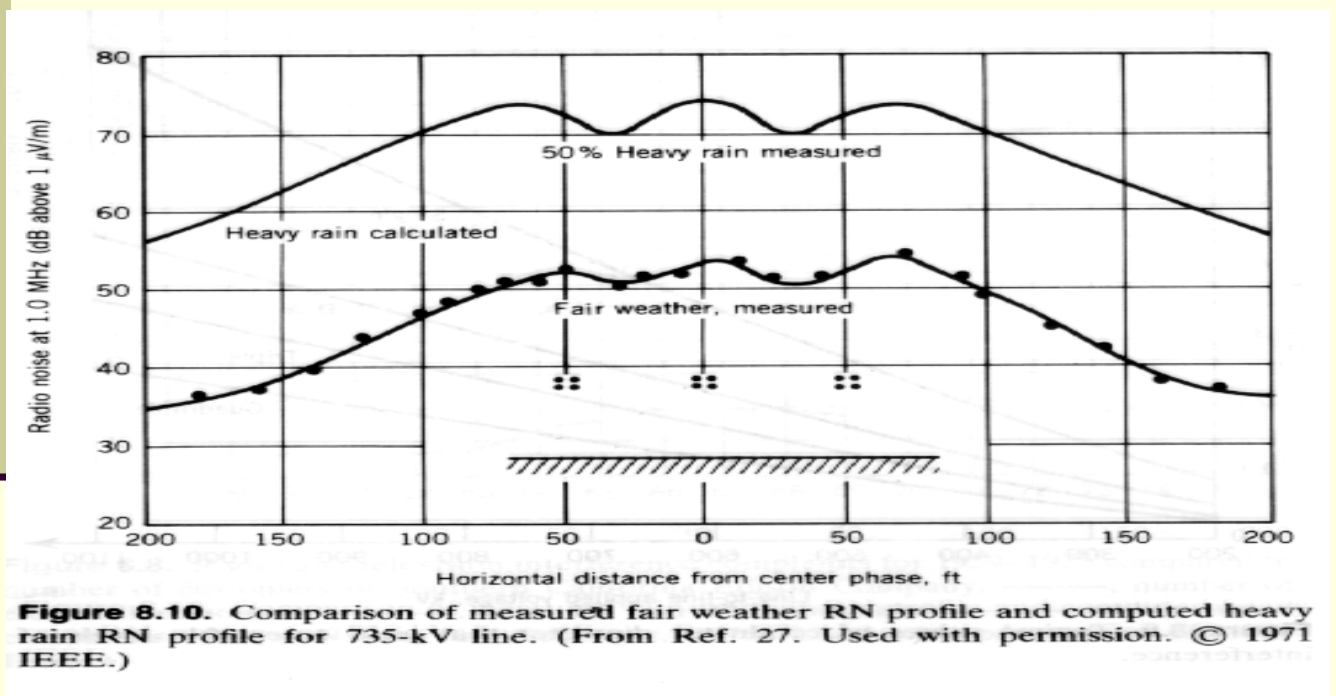
WWW.arielsegal.co.il אריאל סגל

24

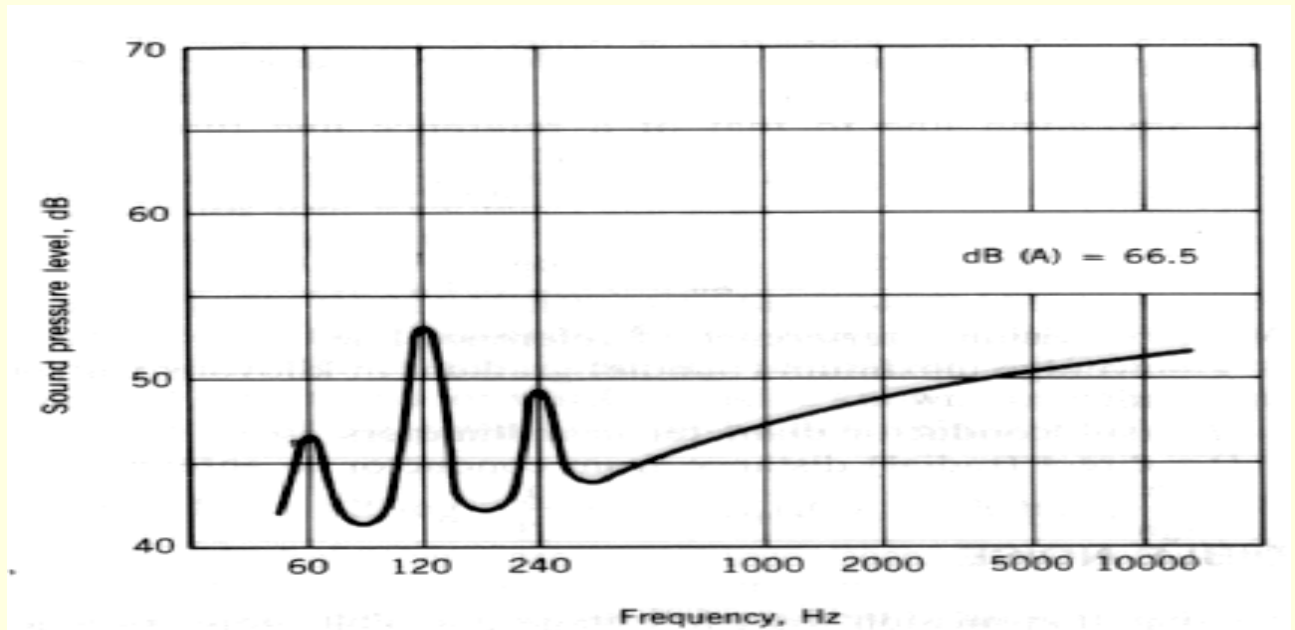
השפעת קוטר המוליך ומס' המוליכים לפאזה על הפרעות בתקשורת במתחי קו שונים



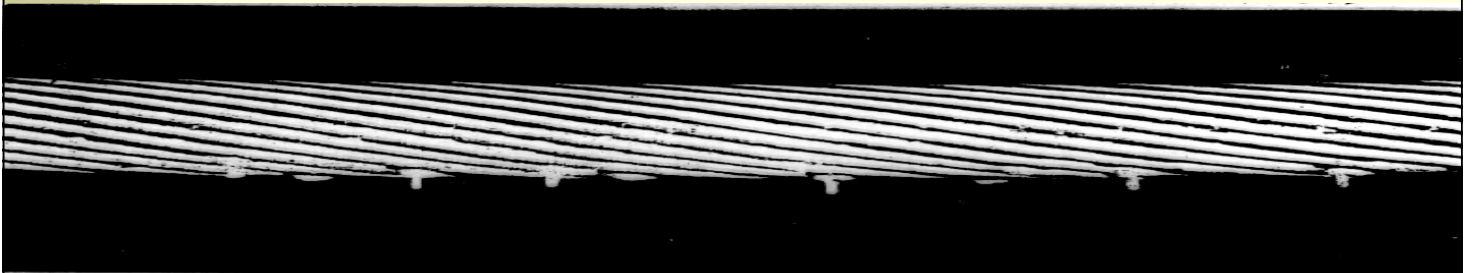
השפעת מזג האויר על הקורונה בקו מתח 735 ק"ו



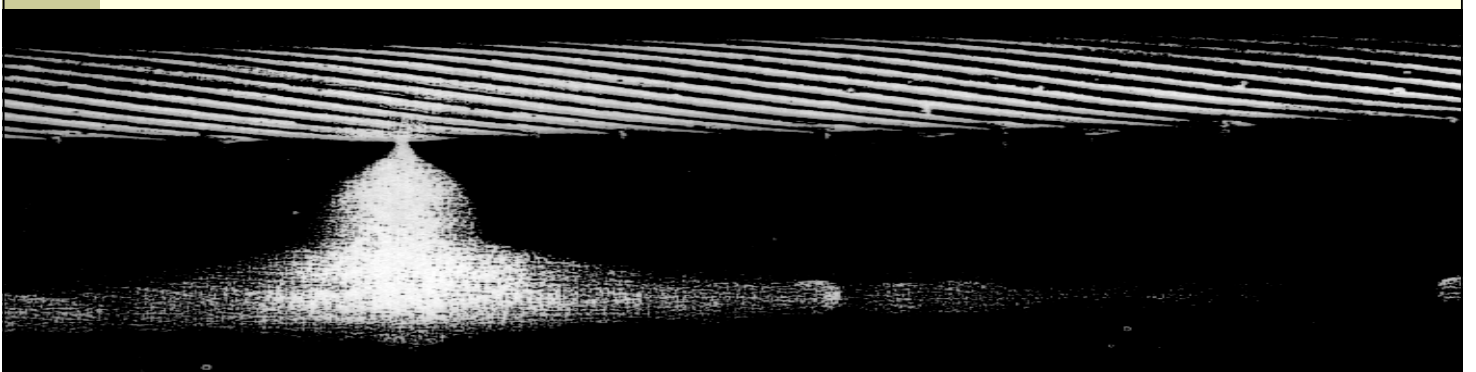
תדרי הפרעה של הקורונה



התפרקות קורונה עקב טיפות מים בתחתית המוליך שגורמות לאי אחידות על פני המוליך



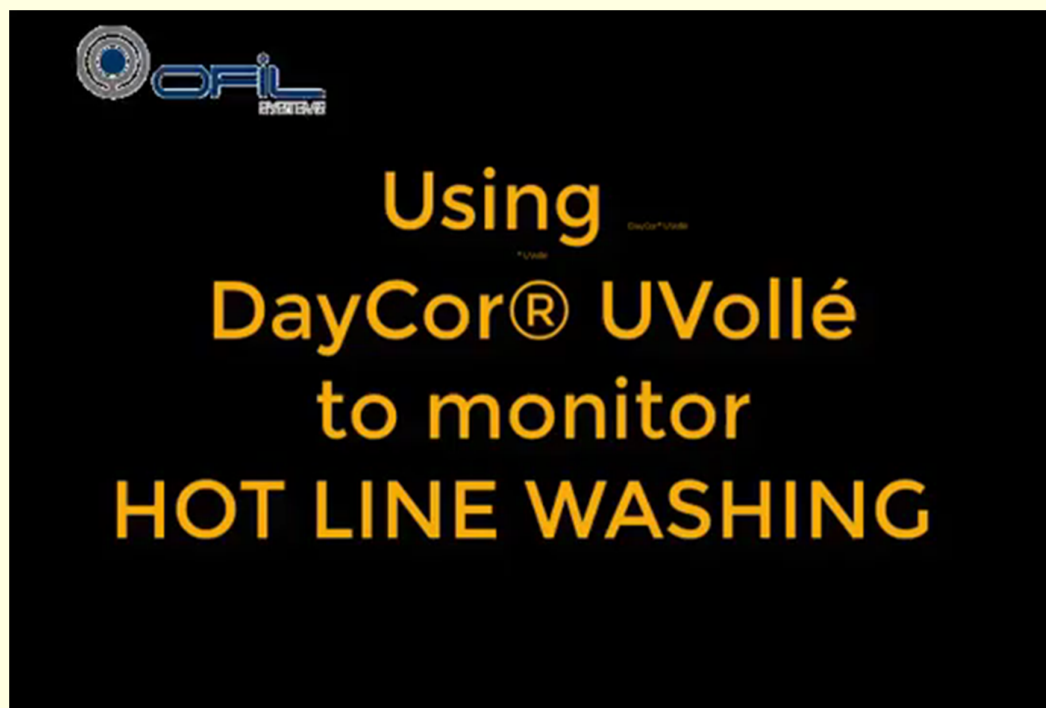
התפרקות קורונה עקב לכלוך שנדבק בתחתית המוליך שגורם להתפרקות חזקה



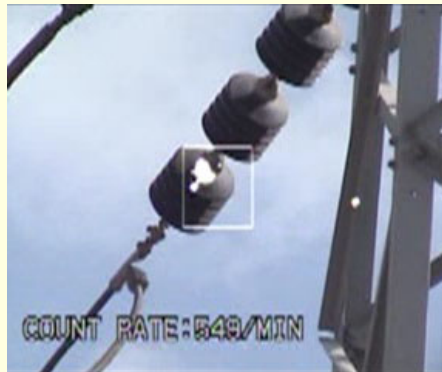
הפסדי קורונה בעין המצלמה



הפסדי קורונה בעין המצלמה



הפסדי קורונה בעין המצלמה

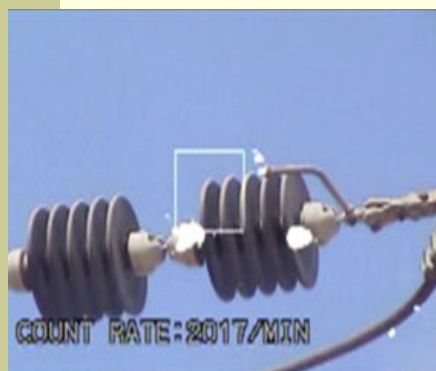


תופעת קורונה

WWW.arielsegal.co.il אריאל סגל

31

הפסדי קורונה בעין המצלמה



תופעת קורונה

WWW.arielsegal.co.il אריאל סגל

32

מצלמות קורונה

מצלמת קורונה משמשת לחישה וגילוי של תופעת הקורונה וקשת חשמלית (Arcing) על גבי רכיבים ברשת החשמל.



הטכנולוגיה מאפשרת :

- אזהרה מוקדמת על תקלות עתידות לבוא
- דיוק נקודתי באיתור מקור הקורונה
- ביצוע הבדיקה ללא שינויים בהרגלי העבודה

הבדיקה באמצעות מצלמת ה-UV חוסכת את ההוצאות הבלתי צפויות לפעולות תחזוקתיות לא מתוכננות וכשלים אפשריים.

הדמיה דו ערוצית

הצבעה מדויקת על מיקומה של הקורונה



מצב משולב

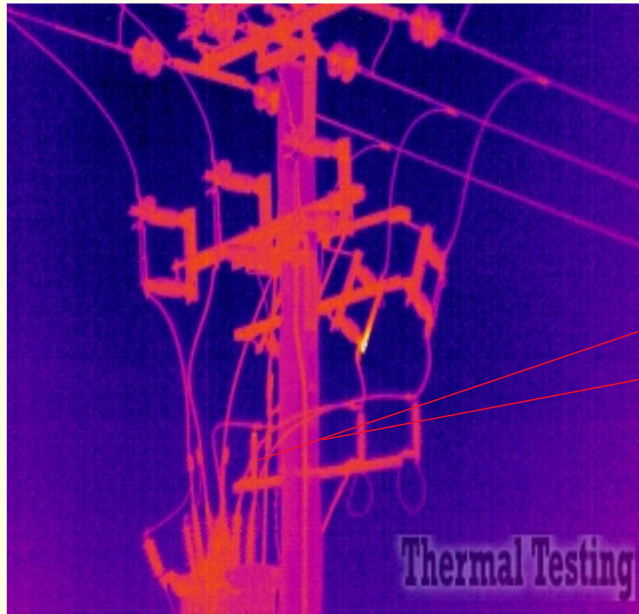


ערוץ הנראה

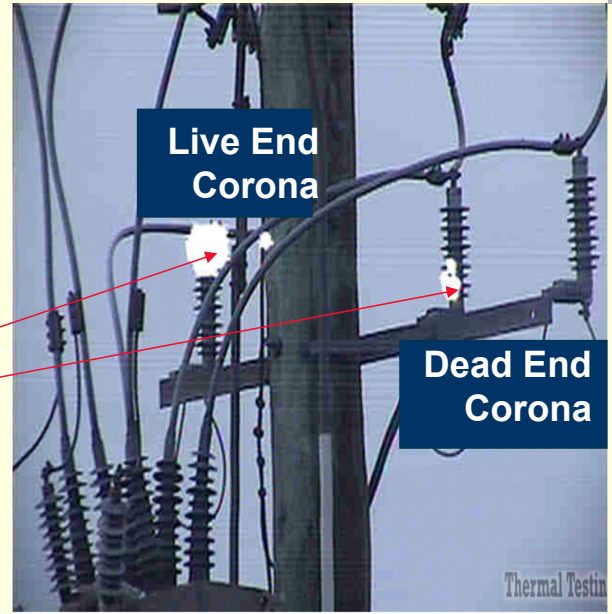


ערוץ האולטרא סגול

טכנולוגיות משלימות – IR & UV



מצלמת IR - ללא עדות לקורונה



מקורות קורונה בראי מצלמת הקורונה

טכנולוגיות משלימות – IR & UV

UV

סקירות קורונה מאתרות
תקלות בידוד,
תקלות הקשורות במתח.

טכנולוגיית אולטרה סגול
מזהה את מצב ה**בידוד** !

IR

סקירות אינפרא אדום
מאתרות נקודות חמות,
תקלות הקשורות בזרם.

טכנולוגיית אינפרא אדום
מזהה את מצבו של ה**מוליך** !

גילוי קורונה בשיטות אקוסטיות

https://www.linkedin.com/posts/joshua-simon-02182bB_4v-6600302082241191936-activity-900ii_118

