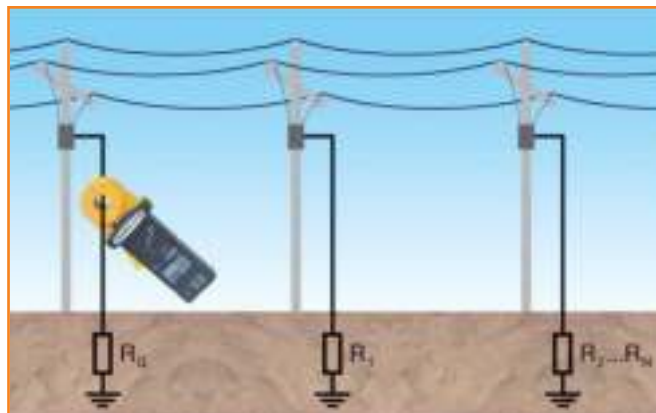




# תיל הארקה כחלק ממערכת הארקה של רשת מתח גבוה



נחיצותו של תיל הארקה ברשת מתח גבוה עילית היא סוגיה שנוגעת במעגלים נרחבים של העוסקים בתכנון, בביצוע, בהפעלה ובאחזקה של רשת מתח גבוה. לדוגמא, הקטנת ערכי התנגדות ההארקה של עמודי רשת מתח גבוה למסה הכללית של האדמה, אופן הביצוע של הארקה השיטה של שנאי חלוקה ברשת עילית, הקטנת מתח מגע ומתח צעד

חד-פאזי יכול לקרות במקומות שונים ברשת. לדוגמא, האבק הנצבר על גבי המבדדים בחודשי הקיץ, ביחד עם הלחות הקיימת בשעות הבוקר המוקדמות, יגרמו לזחילה על מבדד, וכך ייווצר קצר חד-פאזי לעמוד. לעומת זאת, פריצת מופה ברשת תת-קרקעית מתח גבוה תגרום לקצר חד-פאזי באמצע הרשת, ובזמן התקלה יזרום זרם תקלה דרך מקום הפגיעה. אם קצר חד-פאזי מתרחש על גבי העמוד, נוצרים מתחי מגע ומתחי צעד, אשר יכולים להיות מסוכנים לעובדי אורח או לצוותים מקצועיים הנמצאים במגע עם העמוד הפגוע או מצויים בקרבתו.

יש להבדיל בין המקרה שבו קיים קצר חד-פאזי לחלק מוארק, למשל פריצת בידוד בין כבל מתח גבוה לבין לוח מתח גבוה שמוארק במרכזיה, לבין מקרה שבו קצר קורה בין פאזה לבין חלק שאיננו מוארק. ברור כי ערכי זרמי הקצר בשני המקרים הם שונים. במקרה שיש קצר לחלק שאיננו מוארק, קיימת התנגדות משמעותית למעבר זרם בין הפאזה לבין המסה הכללית של האדמה, ולכן, זרם תקלה במקרה זה הוא קטן בהרבה מאשר במקרה הראשון. מנגד, ערכי מתחי המגע והצעד תלויים במכפלת זרם שזורם דרך מערכת הארקה במקום התקלה וההתנגדות של מערכת ההארקה כלפי המסה הכללית של האדמה. לכן, על מנת להבטיח בטיחות שימוש ברשת, יש להבטיח הן את הקטנת ערכי הזרם, והן את הקטנת התנגדות כלפי המסה הכללית של האדמה. שימוש בתיל הארקה ברשת מתח גבוה מבטיח את שני הדברים גם יחד.

הקשר של הגופים המתכתיים במתקני חשמל או חלקים מתכתיים של מכשור חשמלי עם המסה הכללית של האדמה

בזמן הפרעה ברשת ובזמן חיפוש מיקום ההפרעה, הקטנת זרמי קצר חד-פאזי לאדמה - כל אלה הם חלק מהנושאים שיש לדון בהם במסגרת סוגיית נחיצותו של תיל הארקה ברשת עילית מתח גבוה. בעבר היה היקף הרשת העילית מתח גבוה, ובמיוחד עמודי מתכת ברשת הנמצאים בקרבת ריכוזי אוכלוסייה, קטן בהרבה מאשר היום, והנחת העבודה הייתה, שגישה של אנשים לעמודי המתכת היא מוגבלת, ולפיכך ההסתברות לפגיעה אינה גדולה. לכן, משיקולים כלכליים לא בוצעה התקנת תיל הארקה, ולא הושם דגש חזק מספיק בקיומו של תיל הארקה ברשת עילית. בשל עובדה זו, כיום עדיין אפשר למצוא הרבה רשתות מתח גבוה עיליות שנבנו בעבר ללא תיל הארקה. בימינו המצב כבר השתנה לחלוטין, והדבר קורה בשל תהליך האורבניזציה בעשורים האחרונים. מטרת המאמר היא להצביע על חשיבותו ועל נחיצותו של תיל הארקה, ולהאיר את השפעתו על פרמטרים של הרשת. במסגרת המאמר נסקור את היתרונות הרבים של התקנת תיל הארקה, ונדגיש מספר חסרונות אשר יוצרת התקנתו של תיל הארקה ברשת עילית מתח גבוה.

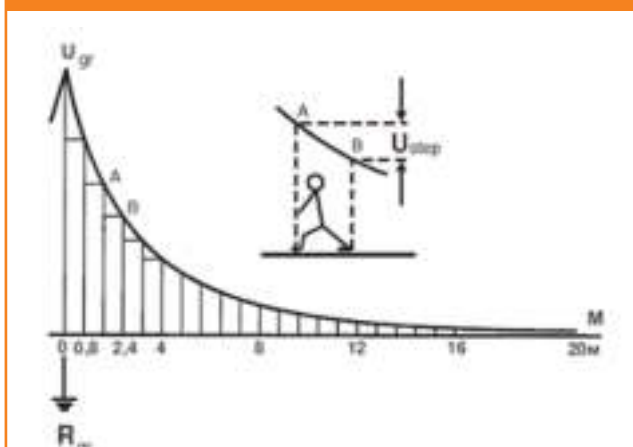
הרוב המכריע של רשתות החלוקה מתח גבוה בארץ בנוי מרשתות מתח גבוה ברמות מתח 22 או 33 ק"ו. ישנן רשתות חלוקה ברמת מתח 13 ק"ו, בעיקר בערים הגדולות. למשל, במתקני חברת "מקורות" נעשה שימוש ברשת מתח גבוה ברמת מתח 3.3 ק"ו. כמו כן, בתחנות כוח מהווה רשת חלוקה במתח 6.6 ק"ו רשת לשימוש עצמי בתחנה. במאמר אחד לא ניתן להתייחס לרשתות בכל המתחים, עקב השוני במאפיינים ובאופן ההפעלה של הרשתות השונות. לכן, במאמר זה נדון ברשתות עיליות ברמות מתח 22 ו-33 ק"ו, שהן הנפוצות ביותר בארץ.

## מתח צעד ומתח מגע

לעיתים מתרחשות ברשתות מתח גבוה הפרעות המשנות את המשטר התפעולי של הרשת, ובמקרים מסוימים משבשות את אספקת החשמל לצרכנים. תקלות כמו פריצות בידוד בין צד מתח גבוה ומתח נמוך בשנאי חלוקה, קריעת תיל פאזה של מתח גבוה, זחילה על גבי המבודדים, פגיעה של ציפורים, פריצת מופות בכבלי מתח גבוה, פגיעה ברשת תת-קרקעית עקב עבודות עפר ועוד, גורמות להיווצרות קצר חד-פאזי לאדמה ברשת מתח גבוה. בהתאם לסוג התקלה המתרחשת ברשת מתח גבוה, קצר

**קיום תיל הארקה ברשת מתח גבוה מקטין באופן משמעותי את הזרם הזורם דרך העמוד הפגוע (שבו אירע הקצר) בזמן התקלה**

איור 1: מתח צעד כתלות במרחק מאלקטרודת ההארקה



המחושמל. מתח זה נקרא מתח מגע, והוא תלוי בהתנגדות של לולאת התקלה הנוצרת בזמן הקצר. מתח המגע הוא חלק של המתח המתפתח בין הגוף המחושמל לבין הנקודה שבה נמצא האדם ביחס לגוף המחושמל, כמתואר באיור 2.

בישראל, מתח המגע המותר במיתקנים רגילים הוא 50 וולט, ובמיתקנים של סכנה מוגברת – 24 וולט בלבד.

## זרמי הקצר במשטרים שונים של נקודת האפס בשנאי בתחנת המשנה

על מנת להגן על האנשים ובעלי החיים הנמצאים בקרבת עמוד רשת עילית שבו אירע קצר חד-פאזי לגוף העמוד, יש צורך למנוע רמות מסוכנות של מתחי מגע או מתח צעד בקרבת העמוד, והדבר נעשה באמצעות הארקתו. בעמודי המתכת, רגל העמוד, אשר נמצאת כ-2.5 מטרים בתוך יסוד מבטון הנמצא באדמה, מהווה אלקטרודה טבעית. כמו כן, נהוג להאריק עמודים מבטון מזוין. במקרה זה, הזיון של העמוד הנמצא בתוך בטון וטמון באדמה מהווה אלקטרודה טבעית. את עמודי העץ הנמצאים בקווי מתח גבוה עיליים לא מאריקים. שימוש בעמודי עץ הולך ופוחת בשנים האחרונות, ולכן, לצורכי הניתוח כאן, נניח כי לא קיימים עמודי עץ בתוך קו מתח גבוה.

אם נתבונן במתח המתפתח על עמוד שבו אירע קצר חד-פאזי לגוף העמוד, נמצא כי ערכו תלוי בצורה ישירה במכפלה שבין זרם התקלה לבין התנגדות ההארקה של העמוד כלפי המסה הכללית של האדמה. מתח המתפתח על העמוד בזמן שדרוך זורם זרם התקלה מהווה מרכיב מכריע בערכי מתחי מגע ומתח צעד המתפתחים בעמוד זה.

ערכי זרם התקלה תלויים בתפעול נקודת האפס של השנאי בתחנת המשנה המזינה את רשת המתח הגבוה. רשתות שבהן נקודת האפס של השנאי המזין אותן מבודדת, מתאפיינות בערכים נמוכים של זרמי תקלה במקרים של קצר חד-פאזי לגוף העמוד. במקרה זה ניתן לומר, כי על מנת להגיע למתחי מגע ומתחי צעד קטנים, אפשר להסתפק בערכים גבוהים יחסית של הארקה של העמוד כלפי המסה הכללית של האדמה, בשל ערכי זרם התקלה הקטנים.

ערכי הקיבוליות של רשתות מתח גבוה עיליות משפיעים על ערכו של זרם התקלה, והם יכולים לנוע בגבולות של  $10 \text{ nF/km} \div 5$ . לדוגמא, ברשת עילית מתח גבוה 22 ק"ו באורך כולל של כ-100 קילומטרים (האורך הכולל של כל הקווים היוצאים מפס צבירה מסוים בתחנת המשנה) וקיבול ממוצע של כ- $7.5 \text{ nF/km}$ , יהיה זרם הקצר בעת קצר חד-פאזי לאדמה כמתואר במשוואה הבאה:

$$I_{sc} = 3U_{phw}C = 3 \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 7.5 \cdot 10^{-9} \approx 8.95 \text{ A}$$

לכן, בהתחשב במגבלת מתח מגע של 50 וולט, ערכי ההתנגדות של מיתקן ההארקה כלפי המסה הכללית של האדמה  $R_{gr}$  של העמוד לא יעלו על ערך של:

$$R_{gr} = \frac{50 \text{ V}}{8.95 \text{ A}} \approx 5.58 \Omega$$

על מנת להתגבר על הצתות חוזרות של קשת חשמלית הנוצרת במקום של קצר חד-פאזי לאדמה, מאריקים את נקודת האפס של השנאי בתחנות המשנה בעזרת סליל כיבוי. בזמן קצר חד-פאזי לאדמה במקום כלשהו ברשת יוצר סליל זה זרם השראתי השווה בגודלו לזרם קיבולי הנוצר בזמן הקצר. תהליך זה נקרא קיזוז של זרם קיבולי הנוצר בזמן הקצר על-ידי זרם השראתי הנוצר על ידי סליל הכיבוי. קיזוז מלא של זרם קיבולי ייתכן רק אם ערך ההשראות של סליל הכיבוי משתנה בהתאם להתקדמות הפיתוח של רשת החלוקה של המתח הגבוה. אולם, בקיזוז מלא של הזרמים הקיבוליים הנוצרים בזמן התקלה, מתקבלת תהודה

מבוצע בעזרת אלקטרודות ו/או מערך אלקטרודות מתכתיות המחוברות ביחד (במקביל). האלקטרודות נמצאות באדמה, ומספקות את המגע הגלוי לאדמה. החיבור בין האלקטרודות לבין החלקים המוארים נעשה על-ידי מוליכי הארקה. מערך אלקטרודות ביחד עם מוליכי הארקה מהווה מיתקן הארקה. אם דרך אלקטרודה בודדת בצורה של מוט להעביר זרם  $I_{sc}$ , ועל פני השטח אפשר לצייר קו אופקי בכיוון כלשהו מנקודה בה נכנסת האלקטרודה לאדמה, ובנוסף על הקו זה למדוד התפלגות מתחים ביחס לנקודה מרוחקת מאוד מהאלקטרודה, אזי צורת ההתפלגות היא כפי שמופיע באיור 1.

כמתואר באיור 1, בנקודות הנמצאות במרחק גדול מ-20 מטר מאלקטרודה, המתח ביחס הנקודה הרחוקה של האדמה הוא אפס. בספרות המקצועית נהוג לומר, כי הנקודות במרחק גדול מ-20 מטר מאלקטרודה נקראות נקודות של אפס פוטנציאל.

לכן, ניתן להגדיר כך רק נקודות המרוחקות מספיק ממיתקן ההארקה (בדוגמא של אלקטרודה בודדת, נקודה מרוחקת היא נקודה במרחק מעל ל-20 מטר). פוטנציאל הנקודות המרוחקות הללו ביחס לאדמה הוא כמעט אפסי. חשוב לציין, כי עבור מתקני הארקה מסובכים יותר (למשל, עבור מערך אלקטרודות או אלקטרודה אופקית), נקודות של אפס פוטנציאל יכולות להיות במרחק העולה על 20 מטר.

התנגדות של מיתקן הארקה כלפי המסה הכללית של האדמה  $R_{gr}$  מוגדרת כיחס בין ערך הפוטנציאל על גבי מיתקן ההארקה שנמדד ביחס לנקודות מרוחקות (נקודות אפס פוטנציאל) לבין זרם הזורם דרך מיתקן ההארקה, כמתואר במשוואה הבאה:

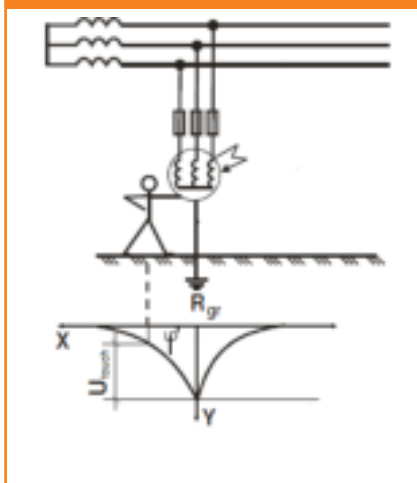
$$R_{gr} = \frac{U_{gr}}{I_{sc}}$$

כפי שניתן לראות באיור 1, בין כל שתי נקודות על פני האדמה בקרבת האלקטרודה שדרכה זורם זרם, ישנו הפרש פוטנציאלים. לכן, אדם הנמצא בקרבת האלקטרודה ועושה צעד נמצא תחת הפרש פוטנציאלים הנקרא מתח צעד,  $U_{step}$  וכך נוצר דרך גוף האדם זרם במסלול רגל-רגל. קל לראות, כי מתח צעד קטן עם התרחקות מהאלקטרודה. הסטטיסטיקה של מקרי התחשמלות אנשים מלמדת, כי לא שכיחים המקרים שאדם נפגע ממתח צעד, והדבר כנראה נובע מכך שננקטים אמצעים נגד פגיעות כאלו. לדוגמא, התחשמלות ממתחי צעד יכולה להתרחש בקרבת תיל פאזי קרוע הנמצא על האדמה, ולכן חשוב לגדר את האזור שבו נמצא תיל קרוע, ולמנוע גישה של אנשים ובעלי חיים לשטח המסוכן. עם זאת, אנשים אכן נפגעים לעיתים ממתחי צעד בזמן פגיעת ברק בעמודי חשמל. ברור כי מתחי צעד מסוכנים יותר עבור בעלי חיים,

שכן אורך צעד של סוס הוא גדול יותר מאשר אורך צעד של אדם. בספרות מקצועית מקובל להניח, כי אורך הצעד של אדם ממוצע הוא 80 סנטימטרים.

פרמטר נוסף אשר מאפיין רמת סכנת התחשמלות אשר קיימת בזמן קצר חד-פאזי לאדמה הוא המתח שאדם נחשף אליו בעת נגיעה בגוף

איור 2: מתח מגע



במעגל של התקלה. בזמן התהודה נוצר כ"מ (כוח אלקטרו מניע) בתדר הרשת, וכתוצאה מכך מתחיל לזרום דרך מקום התקלה זרם שיורי. ערך זרם זה תלוי בהפסדים אקטיביים במרכיבי הרשת (כגון, שנאים, תילים, סליל כיבוי וכדומה), בזרמים הנוצרים בשל הרמוניות גבוהות הקיימות ברשת, ובהפסדי הקורונה. ערכו של הזרם השיורי יכול להגיע ל-10% בערך מזרם סליל הכיבוי. לדוגמא, עבור סליל כיבוי בהספק של 2077 kVA, הנמצא בשימוש של חברת החשמל לרשתות מתח גבוה 22 ק"ו, ערכו של הזרם השיורי יהיה:

$$I_{add} = \frac{\sqrt{3} \cdot 2000 \cdot 0.1}{22} \approx 16.3A$$

כמו כן, בזמן התהודה יכולים להופיע מתחי יתר, הן על סליל הכיבוי והן על מרכיבי הרשת השונים. לכן, מכילים את ערך השראות של סליל הכיבוי כך שהזרם שמזרים הסליל יהיה גבוה ב-15% ÷ 10 מזרם קיבולי של הרשת. לפיכך, ברשת עילית מתח גבוה 22 ק"ו באורך כולל של כ-100 קילומטרים וקיבול ממוצע של כ-7.5 nF/km עם סליל כיבוי בהספק של 2077 kVA, זרם הקצר בעת קצר חד-פאזי לאדמה יהיה:

$$I_{sc} = 16.3A + 0.1 \cdot 8.95A \approx 17.2A$$

פיתוח רשתות מתח גבוה בשטחים אורבניים אינו מאפשר ברוב המקרים שימוש ברשתות עיליות. לכן, בשנים האחרונות נוספו לקווי החלוקה של רשתות מתח גבוה מאות קילומטרים של רשת מתח גבוה שהיא תת-קרקעית. ערכי הקיבוליות של כבלי מתח גבוה יכולים לנוע בגבולות של 250 nF/km ÷ 160. ערכי קיבוליות אלה אינם מאפשרים שימוש בסלילי הכיבוי לצורך קיזוז זרמים קיבוליים הנוצרים בזמן קצר חד-פאזי לאדמה ברשת, בשל ערכו הגבוה של הזרם הקיבולי. ברשתות המכילות כבלי מתח גבוה בכמות ניכרת משתמשים בהארקה של נקודת האפס של השנאי בתחנת המשנה ישירות לאדמה. החיסרון העיקרי של שיטה זו הוא זרמי קצר גדולים מאוד (אלפי אמפרים). בשל כך, נדרשת התנגדות נמוכה מאוד כלפי המסה הכללית של האדמה, הן בתחנות המשנה והן בעמודי מתח גבוה (או בתחנות טרנספורמציה פנימיות) המרכיבות את הרשת. לדוגמא, עבור זרמי קצר של  $I_{sc} = 10kA$  נדרשת התנגדות של כ-5 mΩ כלפי המסה הכללית של האדמה. ערך זה ניתן להשיג ערך זה של גבוה בעלי הארקה יסוד, כגון תחנות משנה, תחנות טרנספורמציה פנימיות וכדומה, אולם ברור כי לא ניתן להשיג ערך זה של התנגדות כלפי המסה הכללית של האדמה בעמודי מתח גבוה.

חיבור עכבה (לא מדובר בסליל כיבוי) בנקודת האפס של השנאי מאפשר להגביל את זרמי הקצר במקרה של קצר חד-פאזי לאדמה, בניגוד לחיבור נקודת האפס ישירות לאדמה. כמו כן, עכבה זו משמשת לפריקת הקיבוליות של הרשת כלפי האדמה, וכך מאפשרת, ברוב המקרים, לכבות את הקשת הנוצרת בזמן התקלה, ומבטלת את האפשרות של הצתת הקשת מחדש. העכבה יכולה להיות אקטיבית טהורה או ריאקטיבית השראית. מבחינה טכנית, עכבה ריאקטיבית עדיפה, מפני שאותה מגבלה של ערך זרם התקלה בזמן קצר חד-פאזי לאדמה ניתן להשיג באמצעות ערך עכבה ריאקטיבית קטן יותר מאשר באמצעות עכבה התנגדותית טהורה.

כפי שהוסבר לעיל, בחירת משטר נקודת האפס בתחנות המשנה משפיעה בצורה ישירה על אופן ביצוע ההארקה של מתקני מתח גבוה המוזנים מאותה תחנת משנה. הארקה ישירה של נקודת האפס, המאפשרת זרמי קצר גדולים לאדמה, דורשת ביצוע הארקות של מיתקני מתח גבוה עם ערך נמוך של ההתנגדות כלפי המסה הכללית של האדמה. לעומת זאת, נקודת אפס מבודדת או מוארקה דרך סליל כיבוי מאפשרת זרמי קצר קטנים יחסית, ולכן, ההתנגדות של מתקני מתח גבוה כלפי המסה הכללית של האדמה יכולה להיות גדולה יחסית. אולם, חשוב לזכור כי

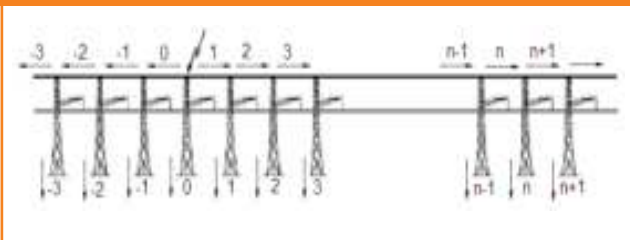
במשטרים אלה (נקודת אפס מבודדת או מוארקה דרך סליל כיבוי) ניתן להפעיל את הרשת ולספק חשמל לצרכנים משך זמן רב גם במסגרת משטר של קצר חד-פאזי לאדמה. לכן, מערכות הארקה ברשתות מתח גבוה אלה צריכות להיות בעלי עמידות תרמית גבוהה. ברשתות בהן נקודת האפס מוארקה דרך התנגדות (אוהמים או השראית), יש לבנות מערכות הארקה עם הערכים המתאימים לזרם הקצר שמתפתח בזמן קצר חד-פאזי לאדמה.

## ניתוח כללי של קצר חד-פאזי לאדמה

כאמור, ערכי התנגדות הארקה של מתקני מתח גבוה, ובמיוחד עמודי מתכת ברשתות עיליות של מתח גבוה, משפיעים על אופן עבודת הרשת במשטרים שונים של הארקה נקודת האפס של השנאי שממנו מוזנת הרשת בתחנת המשנה. ככלל, רוב זרם התקלה זורם לאדמה דרך העמוד שבו אירע הקצר. אולם, אם ברשת העילית קיים תיל הארקה המקשר בין כל העמודים, אזי זרם הקצר זורם לא רק דרך העמוד הפגוע, אלא גם מתחלק בין כל העמודים המקושרים ביניהם באמצעות תיל הארקה. לכן, תיל הארקה ממלא תפקיד חשוב ברשתות מתח גבוה עיליות. יש מקום לחדד את תפקידו של תיל הארקה בזמן קצר חד-פאזי לאדמה ברשת מתח גבוה. חשוב להבין איזה חלק של זרם התקלה זורם דרך העמוד הפגוע, ואיזה חלק מתפזר על גבי העמודים הסמוכים לו. כמו כן, חשוב להבין מהי התרומה של תיל הארקה לערך של ההתנגדות השקולה כלפי המסה הכללית של האדמה של כל העמודים ברשת גם יחד.

נניח כי בקו עילי מתח גבוה, שבו קיים תיל הארקה המחבר בין כל העמודים, אירע קצר חד-פאזי לאדמה בעמוד 0 (ראו איור 3). זרם התקלה מתפלג בצורה הבאה: החלק הראשון של הזרם יזרום דרך עמוד 0 לאדמה, ויחזור למקור ההזנה (תחנת המשנה) דרך האדמה. החלק השני של זרם התקלה יזרום דרך התיל הארקה עצמו, ויחזור למקור ההזנה דרך מערכת הארקה של תחנת המשנה (אם תיל הארקה מחובר למערכת הארקה של התחנה, או דרך האדמה - במקרה שתיל הארקה איננו מחובר למערכת הארקה של התחנה) והחלק השלישי של הזרם יחזור דרך

**איור 3: מסלול זרם תקלה בעת קצר חד-פאזי לאדמה בקו מתח גבוה עילי**



העמודים הסמוכים לאדמה ולמקור ההזנה (כמתואר באיור 3). לצורך פשטות הדיון, נניח כי ערכי ההתנגדות של כל העמודים ברשת העילית כלפי המסה הכללית של האדמה הם שווים:

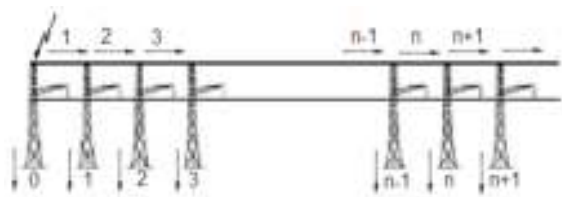
$$R_0 = R_1 = R_{-1} = R_2 = R_{-2} = \dots = R_n = R_{-n} = \dots = R$$

כמו כן, נניח כי ערכי ההתנגדות של כל קטעי תיל הארקה בין שני עמודים סמוכים ברשת הם שווים:

$$r_1 = r_{-1} = r_2 = r_{-2} = \dots = r_n = r_{-n} = \dots = r$$

זרם הזרם דרך העמוד ה-n לאדמה ניתן לייצג בצורה של  $I_n = Ae^{\alpha n}$ , כאשר  $A$  ו- $\alpha$  הם פרמטרים. ככל שמרחקים מהעמוד שבו אירע קצר חד-פאזי לאדמה, ערך הזרם שזורם דרך העמוד לאדמה פוחת בצורה אקספוננציאלית. כלומר, חלק של זרם התקלה יזרום דרך העמוד הפגוע, ושאר הזרם יתפזר בין כל

#### איור 4: התפלגות מסלול זרם התקלה בעת קצר חד-פאזי לאדמה בקצה של קו מתח גבוה עילי



נניח כי בקו מתח גבוה עילי, שבו קיים תיל הארקה המחובר בין כל העמודים, אירע קצר חד-פאזי לאדמה בעמוד האחרון, 0. זרם התקלה  $I_{sc}$  מתפלג כמתואר באיור 4.

ערכו של זרם התקלה הזורם דרך העמוד הפגוע נקבע על בסיס הפרמטרים הבאים: סך כל הזרם הקצר  $I_{sc}$ , ערכה של ההתנגדות של שדה אחד של תיל הארקה  $r$ , וערכה של ההתנגדות כלפי המסה הכללית של האדמה של עמוד ברשת  $R$ , כמתואר במשוואה הבאה.

$$I_0 = I_{sc} \frac{1}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{R}{r} + \frac{1}{4}}}$$

נסמן ב- $R_{total}$  את ערכה של ההתנגדות השקולה של כל קו המתח הגבוה כלפי המסה הכללית של האדמה, ביחס לזרם הקצר החד-פאזי לאדמה אשר מתפתח בקצה הקו. כלומר,  $R_{total}$  מייצג את הערך של מערכת ההארקה הכוללת יסודות של כל העמודים ותיל ההארקה אשר קושר את העמודים. לכן, מתוך המשוואה  $I_0 R = I_{sc} R_{total}$  מקבלים את הערך של ההתנגדות השקולה של כל קו המתח הגבוה כלפי המסה הכללית של האדמה:

$$R_{total} = \frac{R}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{R}{r} + \frac{1}{4}}}$$

הערכים של ההתנגדות השקולה כלפי המסה הכללית של האדמה עבור עמוד כלשהו בקו המתח הגבוה הכולל תיל הארקה מתוארים בטבלה 2.

#### טבלה 2: ערכי ההתנגדות השקולה של העמודים ותיל ההארקה כלפי המסה הכללית של האדמה (בעת תקלה בקצה הקו)

| התנגדות (Ω)<br>$R_{total}$ | חומר             | שטח החתך של תיל<br>ההארקה (ממ"ר) |
|----------------------------|------------------|----------------------------------|
| 1.159                      | אלומיניום-פלדה   | 50/8                             |
| 0.8569                     | אלומיניום-פלדה   | 95/15                            |
| 0.679                      | אלומיניום-פלדה   | 150/25                           |
| 1.576                      | נחושת            | 16                               |
| 1.091                      | נחושת            | 35                               |
| 0.790                      | נחושת            | 70                               |
| 0.667                      | נחושת            | 95                               |
| 0.479                      | נחושת            | 185                              |
| 0.417                      | נחושת            | 240                              |
| 1.069                      | סגסוגת אלומיניום | 70                               |
| 0.752                      | אלומיניום        | 120                              |
| 0.674                      | אלומיניום        | 150                              |
| 0.606                      | אלומיניום        | 185                              |

העמודים המקושרים באמצעות תיל הארקה בהתאם לפרמטר  $\alpha$ . לפיכך, חשיבותו של תיל הארקה היא בכך, שהוא משמש כמחלק זרם בזמן קצר חד-פאזי לאדמה, על-ידי חלוקת הזרם בין כל העמודים המקושרים על ידי התיל. לעומת זאת, במקרה שבו תיל הארקה אינו קיים, כל זרם התקלה יזרום דרך העמוד הפגוע. מכל האמור לעיל ניתן להסיק, כי תיל הארקה הוא חלק ממערכת ההארקה של עמודי רשת מתח גבוה, והוא מקטין את ההתנגדות כלפי המסה הכללית של האדמה של כל עמוד ועמוד ברשת.

בהתאם לנוהלי חברת החשמל, הערך המרבי של ההתנגדות כלפי המסה הכללית של האדמה של עמוד ברשת מתח גבוה הוא עד  $R = 20 \Omega$  עבור עמודים עם ציוד מתח גבוה, ועד  $R = 80 \Omega$  עבור עמודים ללא ציוד עליהם. בטבלה 1 מוצגים הערכים של פרמטר  $\alpha$  עבור כל התיילים שנמצאים בשימוש ברשתות מתח גבוה של חברת החשמל.

#### טבלה 1: ערכי פרמטר בהתאמה לשטח החתך ולסוג של תילי הארקה

| $\alpha$ | התנגדות<br>$\Omega/km$ | חומר             | שטח החתך של<br>תיל הארקה (ממ"ר) |
|----------|------------------------|------------------|---------------------------------|
| 0.029    | 0.594                  | אלומיניום-פלדה   | 50/8                            |
| 0.022    | 0.319                  | אלומיניום-פלדה   | 95/15                           |
| 0.017    | 0.194                  | אלומיניום-פלדה   | 150/25                          |
| 0.041    | 1.123                  | נחושת            | 16                              |
| 0.028    | 0.525                  | נחושת            | 35                              |
| 0.02     | 0.271                  | נחושת            | 70                              |
| 0.017    | 0.192                  | נחושת            | 95                              |
| 0.012    | 0.098                  | נחושת            | 185                             |
| 0.011    | 0.074                  | נחושת            | 240                             |
| 0.027    | 0.5026                 | סגסוגת אלומיניום | 70                              |
| 0.019    | 0.245                  | אלומיניום        | 120                             |
| 0.017    | 0.196                  | אלומיניום        | 150                             |
| 0.015    | 0.158                  | אלומיניום        | 185                             |

ניתן לראות, כי הפרמטר  $\alpha$  גדל עם ההתנגדות לקילומטר של תיל הארקה. לכן, באמצעות שימוש בתיל עם התנגדות גדולה יותר לקילומטר יתפזר זרם התקלה בין מספר קטן של העמודים הסמוכים, שכן ההתנגדות של קטעי תיל הארקה בין העמודים היא גדולה, והזרם יעדיף לזרום דרך העמודים הקרובים לאדמה. לעומת זאת, אם בוחרים תיל הארקה עם התנגדות קטנה לקילומטר, אזי זרם התקלה יתפזר בין כמות גדולה יותר של העמודים הסמוכים, ולכן, במקרה זה, דרך מקום התקלה יזרום זרם קטן יחסית.

#### קצר חד-פאזי לאדמה בסוף קו

לאחר הצגת הניתוח הכללי ניתן להבחין בין מספר מקרים של קצר חד-פאזי לאדמה אשר נבדלים ביניהם במיקום הקצר: בסוף קו מתח גבוה, בתחילתו ובאמצע. המקרים של קצר בסוף הקו ובתחילתו הם כמעט זהים. ההבדל היחיד הוא, שאם התקלה מתרחשת בתחילת הקו ותיל הארקה של הרשת מחובר למערכת הארקה של תחנת המשנה, אזי גם מערכת הארקה של התחנה משתתפת בחלוקה של זרם התקלה. כלומר, בזמן קצר חד-פאזי לאדמה יזרום חלק מזרם הקצר דרך מערכת ההארקה של תחנת המשנה. חשוב להבין, כי ערך ההתנגדות השקולה של מערכת הארקה בתחנת המשנה כלפי המסה הכללית של האדמה הוא הרבה יותר קטן מזה של העמודים ברשת מתח גבוה. לכן, במקרה של תקלה בתחילת הקו, חלק גדול מזרם הקצר יזרום דרך מערכת הארקה של תחנת המשנה.

מתוך טבלה מס' 3 ניתן לראות, כי ערכה של התנגדות השקולה כלפי המסה הכללית של האדמה עבור רשת מתח גבוה במקרה של התרחשות התקלה באמצע הקו, קטנה יותר מאשר אותה התנגדות כאשר התקלה מתרחשת בסוף הקו. הדבר נובע מכך שבמקרה של תקלה באמצע הקו, כמות העמודים הסמוכים גדולה פי שניים מזו כאשר התקלה מתרחשת בסוף הקו.

## סיכום

זרם קצר חד-פאזי לאדמה מתפלג בין העמוד שבו אירעה התקלה ובין העמודים הסמוכים לו ומחוברים אליו באמצעות תיל הארקה. בשל כך, ערכה של ההתנגדות השקולה כלפי המסה הכללית של האדמה עבור רשת מתח גבוה קטן משמעותית אם קיים תיל הארקה ברשת. כמו כן, מתוך המשוואות המתארות את  $R_{total}$  ניתן להסיק, כי הערך של ההתנגדות השקולה כלפי המסה הכללית של האדמה עבור רשת מתח גבוה תלוי מאוד ביחס שבין ערך ההתנגדות של תיל הארקה לבין ערך ההתנגדות העמוד כלפי המסה הכללית של האדמה ( $\frac{R}{r}$ ). ככל שהיחס קטן יותר, כך הערך של ההתנגדות השקולה כלפי המסה הכללית של האדמה עבור רשת מתח גבוה קטן יותר. ניתן להסביר זאת בכך, שהקטנת היחס  $\frac{R}{r}$  גורמת להתפזרות זרם התקלה ליותר עמודים סמוכים למיקום התקלה, וכך, דרך כל עמוד סמוך יזרום חלק קטן של זרם התקלה. ברור כי התרחשות של קצר חד-פאזי לאדמה באמצע הקו עדיפה מאשר בסופו, שכן כמות העמודים המשתתפים בפיזור זרם התקלה באמצע הקו גדולה פי שניים מכמות העמודים בסופו. לפיכך, קיום תיל הארקה ברשת מתח גבוה מקטין באופן משמעותי את הזרם הזורם דרך העמוד הפגוע (שבו אירע הקצר) בזמן התקלה, שכן כך ניתן להגיע לערכי מתחי מגע ומתחי צעד שאינם מסכנים את העוברים והשבים בסביבת העמוד. עם זאת, חשוב לציין כי מעצם קיומו של תיל הארקה עוברים חלקים מזרם התקלה לעמודים הסמוכים, בזמן שללא תיל זה כל התקלה מתרכזת בעמוד הפגוע.

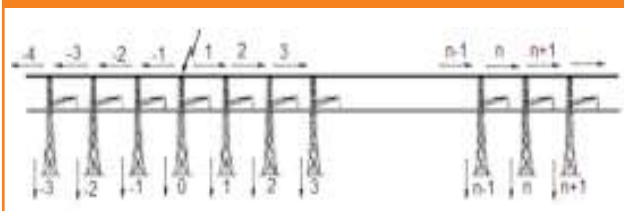
הקטנת הזרם הזורם דרך העמוד הפגוע בזמן קצר חד-פאזי לאדמה חשובה בהיבט נוסף. כאשר בעמוד קיים שנאי חלוקה שהארקת השיטה שלו מחוברת לעמוד, אזי הקטנת זרמי התקלה דרך העמוד מאפשרת להקטין את עליית פוטנציאל השיטה באותו שנאי חלוקה, וכך להקטין את הסבירות לגרימת נזק לצרכני מתח נמוך.

בהתאם לנוהלי חברת החשמל, ההתנגדות השקולה של מערכת ההארקה של רשת מתח גבוה כלפי המסה הכללית של האדמה חייבת להיות קטנה מ- $2\Omega$ . מתוך טבלה 2 ניתן לראות, כי הדבר מושג בקלות באמצעות שימוש בתיל הארקה.

## קצר חד-פאזי לאדמה באמצע הקו

לעיתים מתרחשת התקלה באחד העמודים הנמצאים בתוך הקו, ולא דווקא בעמודים הקיצוניים. במקרה זה, הניתוח שונה מעט מאשר במקרה הקודם, אולם העקרונות זהים לחלוטין.

### איור 5: התפלגות מסלול זרם התקלה בעת קצר חד-פאזי לאדמה במרכזו של קו מתח גבוה עילי



נניח כי בקו מתח גבוה עילי, שבו קיים תיל הארקה המחובר בין כל העמודים, אירע קצר חד-פאזי לאדמה בעמוד האחרון, 0. זרם התקלה  $I_{sc}$  מתפלג כמתואר באיור 5. לצורך הניתוח, נניח כי הצדדים (שמאל וימין) זהים מבחינת חישוב הזרמים השונים המתפתחים בזמן התקלה. הנחה זו סבירה בשל העובדה שאורכי קווי מתח גבוה נעים בין 10 ל-20 קילומטרים. ערכו של זרם התקלה הזורם דרך העמוד הפגוע נקבע במשוואה הבאה:

$$I_0 = I_{sc} \frac{1}{\sqrt{1 + 4 \frac{R}{r}}}$$

כמו כן, בדומה למקרה הקודם, ערכה של ההתנגדות השקולה כלפי המסה הכללית של האדמה עבור רשת מתח גבוה במקרה של התרחשות התקלה באמצע הקו הוא:

$$R_{total} = \frac{R}{\sqrt{1 + 4 \frac{R}{r}}}$$

בטבלה 3 מוצגים הערכים של ההתנגדות השקולה כלפי המסה הכללית של האדמה עבור כל קו המתח הגבוה הכולל תיל הארקה.

### טבלה 3: ערכי ההתנגדות השקולה של העמודים ותיל הארקה כלפי המסה הכללית של האדמה (בעת תקלה במרכז הקו)

| התנגדות ( $\Omega$ )<br>$R_{total}$ | חומר             | שטח החתך של תיל הארקה (ממ"ר) |
|-------------------------------------|------------------|------------------------------|
| 0.597                               | אלומיניום-פלדה   | 50/8                         |
| 0.437                               | אלומיניום-פלדה   | 95/15                        |
| 0.341                               | אלומיניום-פלדה   | 150/25                       |
| 0.820                               | נחושת            | 16                           |
| 0.561                               | נחושת            | 35                           |
| 0.403                               | נחושת            | 70                           |
| 0.339                               | נחושת            | 95                           |
| 0.242                               | נחושת            | 185                          |
| 0.211                               | נחושת            | 240                          |
| 0.549                               | סגסוגת אלומיניום | 70                           |
| 0.383                               | אלומיניום        | 120                          |
| 0.343                               | אלומיניום        | 150                          |
| 0.308                               | אלומיניום        | 185                          |