

מדידת התנגדות הבידוד

תפקודה התקין של מערכת חשמלית, החל ממתקני ייצור וחלוקת החשמל, דרך מתקני צריכת החשמל ועד לציוד החשמלי המחובר במתקני החשמל, תלוי באיכות הבידוד החשמלי שלהם. בכדי לשפר את אמינות וזמינות הציוד החשמלי יש לשאוף שבידוד המערכת יהיה הטוב ביותר שניתן להשגה. מאמר זה מתאר את עיקרי המידע לגבי מדידת התנגדות הבידוד. השיטות והאמצעים לבדיקת תקינות ואיכות הבידוד, יובאו במאמר נפרד.

חובת הבדיקה

בתקנות החשמל (התקנת מוליכים), התש"ל 1970 בתקנה 57, מפורטים ומוגדרים ערכי הבידוד המיזעריים המותרים למתקנים, תוך התייחסות למתקנים חדשים (בהם נדרשות בדיקות לפני חיבור לרשת) ולמתקנים קיימים (בהם נדרשות בדיקות תקופתיות).

"שיעורי התנגדות בידוד המוליכים במתקן מתח נמוך:

(א) שיעור התנגדות הבידוד שבין שני מוליכים במעגל חשמלי אחד במתח נמוך שמתחם לאדמה אינו עולה על 250 וולט, ובין מוליך המעגל לבין גוף מוארק לא יפחת מהנתונים הבאים לפי סוג הבדיקה:

(1) מ-1.5 מגאום, כאשר הבדיקה היא בדיקת הפעלה;

(2) מ-0.25 מגאום, כאשר הבדיקה היא תקופתית;

(3) שיעור התנגדות הבידוד בין המוליכים הכלולים במכשיר יהיה בהתאם לתקן של המכשיר האמור.

(ב) בדיקת שיעורי ההתנגדות של הבידוד תיעשה במכשיר מדידה שמתחו הנומינלי אינו עולה על 500 וולט בזרם ישר."

בתקנות החשמל (התקנת מוליכים), קיים הבדל בין מתקן חדש לבין מתקן קיים. דרישות הבידוד ממתקן חדש הן הרבה יותר מחמירות מאשר במתקן קיים, בו קיימת לרוב ירידה הדרגתית ברמת הבידוד עם הזמן, כפי שמוסבר בהמשך המאמר.

הגורמים המשפיעים על התנגדות הבידוד

התנגדות הבידוד מושפעת ממספר גורמים כגון: לחות, לכלוך, שמנים, פגיעות מכניות, תנאי מזג האוויר ועוד. לעיתים קרובות יש שילוב של מספר גורמים המביאים לירידה בהתנגדות הבידוד.

הגורם המשמעותי ביותר המשפיע על ההתנגדות הבידוד הוא ספיגת לחות. ככל שנספגת יותר לחות - התנגדות הבידוד יורדת. הצטברות לכלוך על פני הבידוד היא סיבה נוספת הפוגעת קשות ברמת הבידוד. חלק מהגורמים המשפיעים על התנגדות הבידוד אינם קבועים, וניתן להשיג שיפור ברמת הבידוד על ידי ניקוי וייבוש הבידוד. בטבלה 1 מוצגת דוגמה של התנגדות הבידוד שנפגע על ידי לחות, בעת תהליך של ייבוש:

טבלה 1: השפעת הייבוש על התנגדות הבידוד	
משך הזמן הנדרש לייבוש, בשעות	התנגדות הבידוד, ב-MΩ
0	0.1
1	1.1
1	6
2	26
3	36
4	40

נתן ליברמן - מהנדס חשמל, סגן מנהל מח' תפעול, אחזקה וציוד לרשת, הרשת הארצית אגף השינוק, חברת החשמל

מעקב אחר מצב הבידוד

ציוד חשמלי נתון מטבעו למצב של שחיקה ובלאי, דבר המביא במשך הזמן לירידה ברמת הבידוד. מסיבה זאת חשוב לבצע בדיקות תקופתיות לבדיקת רמת התנגדות הבידוד על מנת לשמור על רמת הבידוד הנדרשת. למשל, במנועים חשמליים, איסוף תוצאות המדידות של התנגדות הבידוד תעזור בקביעת הנקודה הקריטית של מצב הבידוד ולנקיטת הצעדים המתבקשים לשיפור מצב הבידוד בעוד מועד. כאשר קיים המידע הנ"ל, ניתן לקבוע תוכנית אחזקה מונעת, שמטרתה למנוע תקלות והפסדים כלכליים, כמו כן, שמירה על בטיחות ואמינות המתקן החשמלי.

מרכיבי זרם למדידת הבידוד

מדידת התנגדות הבידוד נעשית במתח גבוה (בדרך כלל 500-1000 וולט) בזרם ישר (DC). עקב ההתנגדות הגבוהה של הבידוד, זרם נמוך במעגל הבדיקה דרך הבידוד ועל פני הבידוד.

מכיוון שהתנגדות הבידוד מושפעת מהטמפרטורה ומרמת הלחות בחומר, הערך הנכון יכול להיות גבוה או נמוך יותר מהנמדד. לפיכך, יש להשוות את תוצאות המדידה עם ערכים שנמדדו בעבר. ההתנגדות הנמדדת, היא תוצאה של חלוקת מתח הבדיקה בזרם

הכולל, כפי שמוצג בנוסחה:

$$R = \frac{U}{I}$$

כאשר:

R - התנגדות הבידוד (ב-GΩ, MΩ). (Gigaohm, Megaohm)
U - מתח הבדיקה
I - זרם

הזרם הכולל (Total Current) - (I) שזורם במהלך המדידה מורכב משלושה מרכיבים:

1. זרם טעינה קיבולי.
2. זרם ספיגה.
3. זרם הזרם דרך הבידוד ו/או זרם זליגה.

זרם טעינה קיבולי (Capacitance Charging Current)

זרם זה גבוה בתחילת הבדיקה ויורד במהירות עם טעינת הבידוד עד למתח הבדיקה (תוך מספר שניות).

משך הופעת זרם הטעינה הקיבולי תלוי במידות ובקיבוליות הציוד הנבדק. ככל שהקיבוליות גדולה יותר, ייקח זמן רב יותר להטעינו (למשל כבלי כוח ארוכים, או כבלי תקשורת).

זרם ספיגה (Absorption Current)

גם זרם זה גבוה בתחילת הבדיקה ויורד עם הזמן, אך הוא הרבה יותר איטי מזרם טעינה קיבולי.

משך הופעת זרם זה תלוי בסוג החומר המבדד, בטמפרטורה, בלחות וכד'.

עם הערך הנמדד, הוא "אין סוף" (Infinity), יש לבדוק את נכונות החיבורים על ידי קיצור פתילי הבדיקה. התוצאה שצריכה להתקבל קרובה לאפס.

השפעת קיבוליות המעגל (Effect of Capacitance)

מספר רב של חלקי ציוד המיועד לבדיקה הם בעלי קיבוליות מסוימת. בעת הפעלת מתח הבדיקה, תטען קודם כל קיבוליות, ולכן הזרם ההתחלתי הוא ברובו זרם טעינה קיבולי. מחוג או קריאה דיגיטלית ישאפו בתחילת הבדיקה לאפס ויגדלו עם טעינת המעגל. דבר הפוך יתרחש בסיום הבדיקה ופריקת הקיבוליות של המעגל.

ההשפעה של הקיבוליות מאובחנת במיוחד בגנרטורים גדולים, בכבלי כוח ארוכים ובכבלי תקשורת. השפעה זו אינה משמעותית כאשר ערך הקיבוליות פחות מ- $0.01\mu F$. כאשר בודקים מעגלים בעלי קיבוליות גבוהה, טעינת המעגל נמשכת מספר שניות, אך זרם הספיגה (Absorption Current) יכול להופיע לאחר מספר דקות ולפעמים לאחר מספר שעות, דהיינו צריך לחלוף זמן ניכר לפני קבלת קריאה יציבה.

שימוש בהדק מגן (Guard Terminal-G)

ניתן לחלק את זרם מדידת הבידוד לשני מרכיבים:

- הזרם הזורם דרך חומר מבדד.
- הזרם הזורם על פני השטח החיצוני של הבידוד כאשר זיהום ולחות מצטברים עליו.

המרכיב הראשון מצביע על מצב הבידוד וערכו, אותו אנו מעונינים למדוד. המרכיב השני תלוי ברמת הזיהום שעל פני הבידוד. שימוש במהדק המגן (Guard Terminal-G) מאפשר להסיר את השפעת זליגת הזרם שעל פני הבידוד, כך שהערך הנמדד יהיה מדויק יותר וכמעט שלא יושפע מזליגה שעל פני הבידוד.

באיור מס' 3 מתוארים זרמי זליגה בכבל.

באיור מס' 4 מתוארת צורת חיבור המכשיר

כדי לקבל קריאה מדויקת, ערך R_{s1} חייב להיות גדול יותר פי-100 מההתנגדות הפנימית של המכשיר R' וערך R_{s2} גבוה מ- $1M\Omega$. כאשר נדרשת מדידה מדויקת במיוחד של התנגדות הבידוד, יש למדוד כל מרכיב בנפרד ולחשב את התנגדות הבידוד.

באופן דומה ניתן למדוד את התנגדות הבידוד בין סלילי השנאי (בין הדקי המתח הגבוה להדקי המתח הנמוך) תוך הסרת השפעת הזליגה לאדמה (על ידי חיבור הדק המגן לאדמה).



איור 1: המרכיבים של זרם הבדיקה

זרם הזורם דרך הבידוד /או זרם זליגה (Conduction or Leakage Current)

ניתן לחלק זרם זה לשני תת מרכיבים:

- זרם הזורם דרך החומר המבדד.
- זרם הזורם על פני השטח החיצוני של החומר המבדד.

זרם זה מתייצב תוך פרק זמן קצר ביותר (פחות משניה).

את הזרם הכולל (Total Current) - ניתן למדוד במיקרו אמפרים (μA) או על ידי שימוש במכשיר למדידת התנגדות הבידוד. הערך מתורגם ליחידות מדידת התנגדות - $M\Omega$ או $G\Omega$.

באיור מס' 1 מתוארים המרכיבים של זרם הבדיקה.

לאחר הבדיקה, האנרגיה שנצורה על ידי זרם הטעינה (Capacitance Charging Current) וזרם הספיגה (Absorption Current) שנצבר בציוד הנבדק, חייבת להיות מפורקת על מנת להבטיח רמת בטיחות נאותה.

פריקת אנרגיה זו נעשית על ידי הארקה או קיצור של המעגל הנבדק, באמצעות מעגל פנימי של המכשיר שמבצע את פעולת קיצור המעגל הנבדק באופן אוטומטי עם סיום הבדיקה.

אופן הביצוע של מדידת התנגדות הבידוד

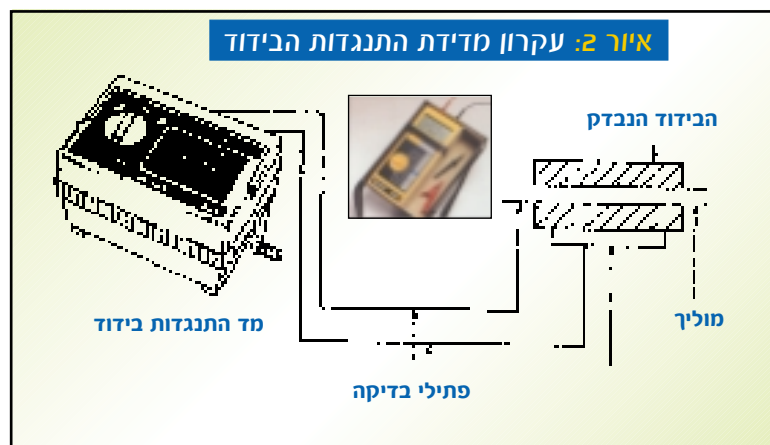
באיור מס' 2 מתואר עקרון של מדידת התנגדות הבידוד. במכשיר למדידת התנגדות הבידוד מותקן מחולל, אשר מייצר מתח גבוה בזרם ישר (DC). עקב התנגדות הבידוד, שאינה אינסופית, זרם זורם נמוך במעגל הבדיקה דרך הבידוד ועל פני הבידוד.

המכשיר בנוי כך שהזרם הנמדד מוצג בתצוגת המכשיר ביחידות מדידת התנגדות - $M\Omega$.

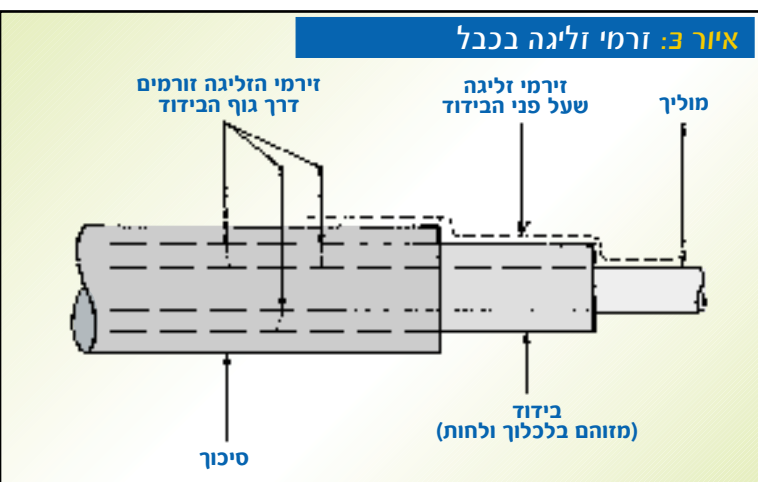
בדרך כלל הסקלה היא לא ליניארית, ומראה ערכים מ-0 (אפס) עד "אין סוף" (∞ - Infinity).

הקריאה "אין סוף" (∞) פירושה שההתנגדות גבוהה מידי כדי לאפשר את המדידה באמצעות המכשיר המסוים.

ההתנגדות הנמדדת לא יכולה אף פעם להגיע לרמה של "אין סוף". אם ניקח מכשיר בעל תחום מדידה גדול יותר נקבל ערך מדויק ביחידות $M\Omega$ או $G\Omega$.



איור 2: עקרון מדידת התנגדות הבידוד



איור 3: זרמי זליגה בכבל

הפעלת מד התנגדות הבידוד

לאחר חיבור גששי החיבור יש להעביר את בורר המצבים במכשיר למתח הבדיקה המתאים.

לאחר התייצבות המחוג בסקלה אנלוגית או הספרתית בתצוגה דיגיטלית מקבלים את הערך הנמדד.

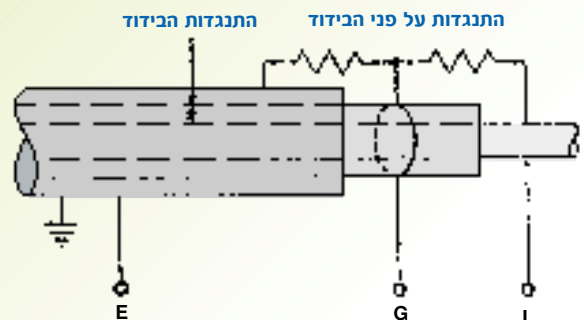
אמצעי זהירות ובטיחות שיש לנקוט במהלך ביצוע המדידה

במהלך המדידה יש להקפיד על העקרונות הבאים:

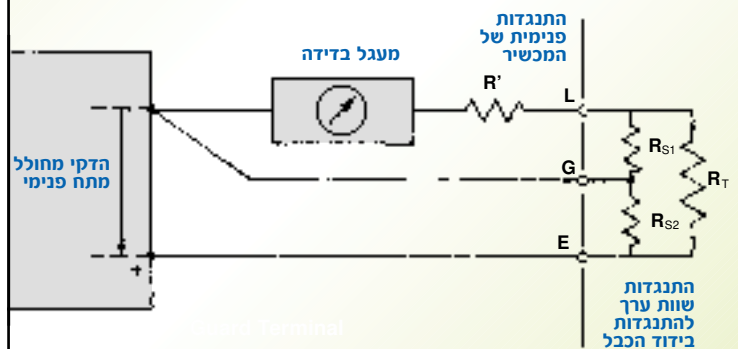
- שימוש במד התנגדות הבידוד יעשה רק בידי אדם מיומן. יש להקפיד על הפעלת המכשיר בהתאם להוראות היצרן ולנקוט בכל אמצעי הזהירות והבטיחות הנדרשים.
- מדידת התנגדות הבידוד ובדיקת הרציפות, מתבצעת אך ורק כאשר הציוד או המעגל יהיו מנותקים ממתח. מעגלים מסוימים יכולים לאגור אנרגיה לאחר הפסקת הזרם, ולכן יש לוודא שהמעגלים נפרקו.
- אין לסמוך על מצב המפסקים - יש לוודא העדר מתח באמצעות בוחני מתח.
- לאחר סיום הבדיקה יש לוודא פירוק הקיבוליות במעגל הנבדק. מתח המעגל חייב להיות מתחת לרמה של 50 וולט.
- אין להשתמש במד התנגדות הבידוד בסביבה נפיצה או דליקה.
- כאשר מדידה מתבצעת בקרבת מתקנים שנמצאים תחת מתח, יש להקפיד על מרחקי בטיחות מרכיבים חיים.
- פתילי הבדיקה וגששי החיבור חייבים לענות לכל הדרישות של תקן IEC-1010.
- יש לוודא איזה ציוד ואילו מעגלים חשמליים נכללים במעגל הבדיקה. ■

איור 4: סכמה חשמלית של חיבור מכשיר מדידת התנגדות הבידוד עם מהדק מגן GUARD TERMINAL

א. צורת החיבור



ב. תרשים חשמלי



מקרא:

- R_T - התנגדות הבידוד הנמדד
- R_{S1} R_{S2} - התנגדות שעל פני הבידוד
- R' - התנגדות פנימית של המכשיר