



מתחי יתר חולפים

מתחי יתר הם תופעות טבעיות הקיימות בכל רשתות החשמל ומיתקני החשמל, והם מתרחשים ברשת הציבורית או במיתקני לקוחות גם יחד. הם מתבטאים בעלויות מתח שגורמות לעיתים נזק לציוד חשמלי המחובר לרשת. הגישה החדשה לנושא זה מבדילה בין מתחי יתר "חולפים" לבין מתחי יתר "בתדר הרשת". מאמר זה הוא ראשון מבין שני מאמרים, והוא דן במתחי היתר החולפים. המאמר הבא ידון ב"מתחי יתר בתדר הרשת".

מתחי יתר חולפים (transients)

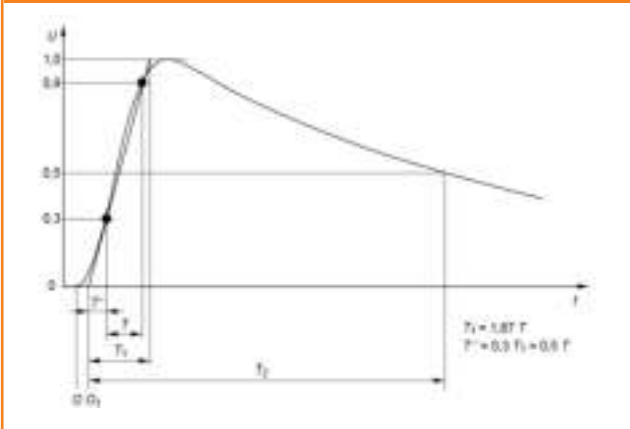
מתחי יתר חולפים הם נחשולי מתח שערכם עשרות ואף מאות קילו-וולט, משכם מיקרו-שניות, והם נגרמים לרוב עקב פעילות ברקים או מיתוג במערכת חשמל. משך עליית המתח של מתחי יתר חולפים הוא בין מספר מילישניות ומטה לבין חלקי מיקרו-שנייה. מסיבות פיסיקליות מובנות, מתחי יתר חולפים שמשכם ארוך יותר הם בדרך כלל בעלי אמפליטודה נמוכה יותר.

תכולת אנרגיה של מתחי יתר חולפים שונה משמעותית כתלות במקור. מתחי יתר שנובעים מברקים הם בעלי אמפליטודה גבוהה יותר, אך בעלי תכולת

אנרגיה נמוכה יותר, מזו של מתחי יתר שנובעים מפעולות מיתוג.

נהוג לסווג מתחי יתר חולפים בהתאם לגודל (אמפליטודה) ולמשך/תדר. בנוסף, ניתן להציג מאפיינים כדלקמן: תדר עיקרי של הגל, שיעור שינוי המתח (תלילות חזית גל המתח), ותכולת האנרגיה. שיטה מקובלת של הצגת צורת גל שלהם מוצגת באיור מס' 1.

איור 1: הצגה אופיינית של צורת הגל של מתחי יתר חולפים



מקור: תקן IEC TR 61000-2-14 Environment – Overvoltages on public electricity distribution networks

כמתואר באיור 1, הערכים החשובים הם זמן העלייה של חזית גל המתח – T_1 , וזמן עד מחצית הערך – T_2 . לדוגמה, ערכים אופייניים למתח יתר חולף שנגרם על-ידי ברקים הם 1.2 מיקרו-שנייה לזמן העלייה ו-50 מיקרו-שניות עבור זמן עד מחצית ערך (צורת גל 1.2/50).

מתחי יתר חולפים עשויים להיות תנודתיים או לא תנודתיים,

התגובה הדינמית של רשת למיתוגי עומסים, הן מתוכננים והן לא מתוכננים (תקלות ברשת), היא צבירה ושחרור של אנרגיה חשמלית. מעברי אנרגיה אלה גורמים התפשטות של מתחי יתר ברשת.

מתחי יתר, כשם כן הם, מתבטאים בעלויות מתח. מסווגים אותם על-פי מקור ההפרעה ומשך הזמן בו מתרחשת התופעה. בניגוד לעבר, כיום מבחינה הגישה המקובלת בין מתחי יתר חולפים (נוהגים לכנותם "נחשולי מתח"), לבין מתחי יתר בתדר הרשת. שניהם מתבטאים בעלויות במתח, אך יש שוני ביניהם בכל האמור במקור ההפרעה, בערכם (גודל), במשכם, ובשיטת ההתגוננות מפניהם.

סיווג מתחי יתר על-פי מקור ההפרעה

מתחי יתר חיצוניים נגרמים על-ידי אירועים שהם חיצוניים למיתקן, כגון פגיעות ברק או תקלות ברשתות הסמוכות ברמות מתח גבוהות. מתחי יתר אלה הם גלים רוכבים קצרים מאוד בעלי דעיכה משמעותית כתלות במרחק, כאשר חזית גל המתח הופכת תלולה פחות. בנוסף, קיימים מתחי יתר ארוכים יותר אשר נגרמים עקב ניתוק עומס, ניתוק אפס, תקלות בציוד בקרת מתח, והשפעה של גנרציה מבוזרת.

מתחי יתר פנימיים נגרמים כתוצאה מאירועים בתוך מיתקן הלקוח, כגון מיתוגים של עומסים לא לינאריים, קשת חשמלית, פעולת נתיך ועוד.

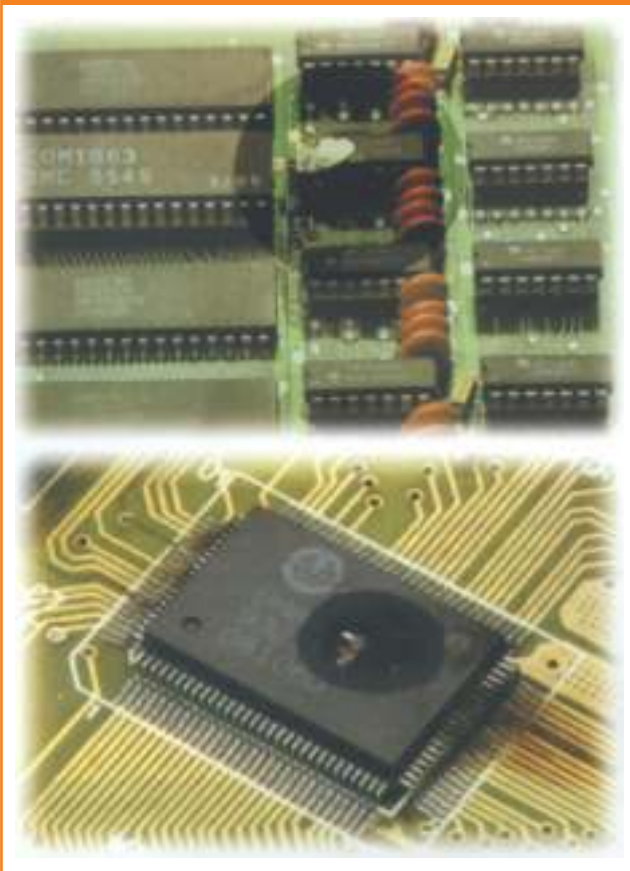
סיווג מתחי יתר על-פי משך ההפרעה

משך ההפרעה משליך באופן משמעותי על הנזק העלול להיגרם למיתקן כתוצאה ממתחי היתר. מסווגים את מתחי היתר על-פי משך ההפרעה לשלוש קבוצות: מתחי יתר קצרים מאוד או חולפים (Transient) – בהם נדון במאמר זה, וכן מתחי יתר בתדר הרשת (עליהם נדון במאמר הבא בהרחבה), אשר נחלקים למתחי יתר רגועים (swells), ומתחי יתר ארוכים.

מתחי יתר זמניים בתדר הרשת הם הפרעות שנמשכות מ-20 מילישניות עד 10 דקות, ערכם גבוה מ-110% מהמתח הנומינלי, והם נגרמים לרוב עקב פעולות מיתוג וניתוק עומס.

מתחי יתר ארוכים בתדר הרשת הם הפרעות אשר משכן מעל 10 דקות, ערכן גבוה מ-110% מהמתח הנומינלי, והן נגרמות כתוצאה מניתוק אפס ברשת מתח נמוך, פעילות לא תקינה של מערכות ויסות מתח אוטומטיות, אי-איוון מתחים, וגנרציה מבוזרת ברשתות חלוקה.

איור 3: דוגמא לפגיעות מנחשולי מתח בבידוד וברכיבים אלקטרוניים



של מתחי יתר: הצידוד צריך להיות מיוצר כך שיהיה מסוגל לתפקד כמתוכנן למרות מתחי היתר, בין אם באמצעות התכנון הפנימי שלו, ובין בעזרת אמצעי מיגון המסופקים למיתקן שהצידוד מהווה חלק ממנו. השפעה אפשרית של מתח יתר היא פגיעה בצידוד או במרכיביו או הרס שלהם. עם זאת, חסינות הצידוד מבחינת תאימות אלקטרומגנטית אמורה להבטיח תפעול תקין של הצידוד, דבר שכרוב המקרים ממילא ימנע גרימת נזק לצידוד.

דרכי התמודדות עם מתחי יתר חולפים

בבואנו לבחון הגנה מפני מתחי יתר יש צורך להביא בחשבון את העובדה, שרשת חלוקת חשמל אינה הדרך היחידה שבאמצעותה יכולים מתחי יתר להגיע למיתקנים ולצידוד המחוברים לרשתות אלה. ברק יכול להכות במיתקן עצמו ישירות, באדמה בסמוך למיתקן, או במיתקני תקשורת, מיתקני איתות, או מיתקנים אחרים המחוברים למיתקן או לצידוד. יתר על כן, מתחי יתר עלולים להתרחש דרך אינטראקציות בין ממשקים של מערכות אלה, עקב שינוי גדול באחד מפרמטרים ייחוס של ההארקה במהלך זרימת נחשול זרם, ועל-ידי צימוד השראתי או קיבולי קרוב למקום פגיעת ברק עקב שדות אלקטרומגנטיים גבוהים הנוצרים בשל זרם של ברק.

ההגנה ברשתות מושגת באמצעות התקנה של מגיני קו במקביל בין הקו לאדמה: במקרה של מתח יתר חולף יפרוק המגן אנרגיה עודפת לאדמה, ובכך יגביל מתח שיא לערך מקובל עבור הצידוד החשמלי המחובר לקו.

הגנה מפני נזקים של מתחי יתר חולפים הנגרמים כתוצאה מפעולות מיתוג מבוצעת לעיתים בנקודת המיתוג. לדוגמה, כדי למזער מתחי יתר חולפים במיתוג סוללות קבלים, סלילים, שנאים וקווי הולכה ארוכים, משתמשים בשיטות של מיתוג מבוקר.

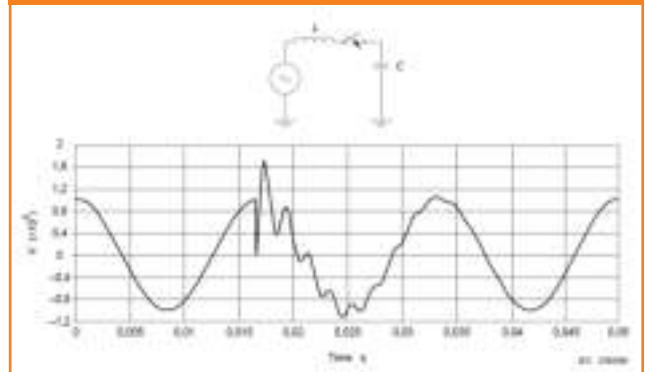
ובדרך כלל הם בעלי דעיכה מהירה, עם זמני עליית החזית הנמשכים בין פחות מ-1 מיקרו-שנייה לבין מספר מילישניות. הגודל, המשך, ותכולת האנרגיה של מתחי יתר חולפים משתנים כתלות במקור שלהם. בדרך כלל, לאלה שהם ממקור אטמוספרי יש אמפליטודה גבוהה יותר, ואלה שמקורם במיתוג הם ממושכים יותר ובעלי תכולת אנרגיה נמוכה יותר.

יתרה מזאת, מתחי יתר חולפים מתפשטים בצורה שונה בהתאם לשיעור העלייה (תלילות חזית) של צורת הגל. מתחי יתר קצרים ברשת חלוקה מתח נמוך בדרך כלל לא יהיו גבוהים מ-6 ק"ו ערך שיא, אך ערכים גבוהים יותר עלולים להתרחש באזורים מסוימים שבהם צפיפות הברקים גבוהה.

מקורות של מתחי יתר חולפים

מתחי יתר חולפים נגרמים על-ידי מספר גורמים, ובהם פגיעות של ברקים ישירות בהתקני הגנה חיצוניים (כולאי ברקים) הממוקמים על בניינים או על קווי הולכה; השראה חשמלית על מוליכים סמוכים שנגרמת על-ידי שדות אלקטרומגנטיים אשר נוצרו כתוצאה מפגיעות ברקים; או עקב מיתוגים של מיתקנים שונים ברשת, כגון שנאים, מנועים, עומסים השראתיים, וסוללות קבלים (לדוגמה, ראו איור 2).

איור 2: דוגמא אופיינית של מתחי יתר חולפים הנוצרים כתוצאה ממיתוג של סוללת קבלים



מקור: תקן IEC TR 61000-2-14 Environment – Overvoltages on public electricity distribution networks

נציין, שמתחי יתר חולפים נוצרים לא רק בקווי חלוקה לאספקת חשמל, אלא הם נפוצים בכל קו אשר עשוי ממוליכי מתכת, כמו קווי טלפון ותקשורת שונים, קווי פיקוד, וקווי העברת נתונים.

השפעות ונזקים עקב מתחי יתר חולפים

שימוש רחב בצידוד תעשייתי בעל רכיבים אלקטרוניים הופך את סוגיית מתחי היתר לבעלת חשיבות מרובה במיתקני חשמל. יכולתם של רכיבים אלה לעמוד במתחי יתר לעיתים נמוכה מזו של צידוד רגיל, ולכן חשוב להגן עליהם מפניהם.

הנזק ממתחי יתר לצידוד תלוי בגודל ובמשך של מתח יתר, ובחוסן של הצידוד הספציפי. הנזק מתבטא, במקרים הקלים, בירידה בתפעול תקין של הצידוד, ויכול להגיע, במקרים קיצוניים יותר, עד תקלה בצידוד או אף יציאתו מכלל פעולה. במקרים מסוימים הצידוד נהרס מייד, ובמקרים אחרים נפגע תפקודו באופן הדרגתי, ואף מתקצר משך החיים שלו (ראו לדוגמה איור 3).

כיוון שמתחי יתר ברשתות אספקת חשמל נובעים במידה רבה מתופעות טבע חיצוניות או מהמאפיינים העצמיים של הרשת במצב תפעול רגיל שלה, יכולת המניעה של מתחי יתר במקור היא מוגבלת למדי. לכן, אפשר להשיג תאימות אלקטרומגנטית (EMC) בעיקר באמצעות החסינות של הצידוד אשר נתון להשפעות

כאשר בוחנים את התקני ההגנה, חשוב להכיר את המשתנים הבאים:

In – זרם פריקה נקוב: ערך שיא של זרם בצורת גל $8/20 \mu s$ שמגן מסוגל לפרוק 15 פעם.

Uc – מתח רציף תפעולי מרבי: מתח שמעליו מופעל המגן.

Up – רמת מתח הגנה (בזרם נקוב In): מתח מרבי בין הדקי המגן כשהוא פעיל וכשדרכו זרם נקוב. רמת מתח הגנה נבחרת כך שהיא נמוכה מרמת עמידה במתחי יתר של המיתקן.

Iimp – זרם אימפולס: ערך שיא של זרם בצורת גל $10/350 \mu s$ שהמגן מסוגל לפרוק 5 פעמים (האופיין של מגנים Type 1).

Imax – זרם פריקה מרבי: ערך שיא של זרם בצורת גל $8/20 \mu s$ שהמגן מסוגל לפרוק פעם אחת (האופיין של מגנים Type 3).

Uoc – מתח מעגל פתוח המיושם תוך כדי בדיקות לפי Class III (Type 3).

איור 4: דוגמה של התקן הגנה בפני נחשולי מתח מטיפוס Type 2



התמונה באדיבות חברת שלמה כהנא

דרישות אופייניות בתקינה הרלבנטית

זרם פריקה נקוב (In) צריך להיות לא פחות מ-5 ק"א לכל סוגי הגנה.

ערך Iimp צריך להיות לפחות 12.5 ק"א לכל רמת הגנה [IEC 60364-5-534].

רמת מתח הגנה של המגנים (Up) צריכה להיות נמוכה מרמת מתח יתר של 2.5 ק"ו {IEC 60364-4-443 Category II} במקרה של הגנה על רכיבים אלקטרוניים רגישים, רמת מתח הגנה של המגנים צריכה להיות נמוכה מ-1.5 ק"ו.

מתח רציף תפעולי מרבי (Uc) עבור רשת 230/400 וולט צריך להיות נמוך מ-340 וולט.

זמן תגובה של מגנים מסוג Type 1 צריך להיות נמוך ממיקרו-שנייה אחת, ועבור מגנים מסוג Type 2 – נמוך מ-25 ננו-שניות.

סיכום

במאמר זה החגנו סוג אחד של מתחי יתר – מתחי יתר חולפים, אשר נגרמים לרוב כתוצאה מפגיעות ברקים ומפעולות מיתוג במערכת החשמל. כיום מבחינה הגישה המקובלת לנושא זה בין מתחי יתר חולפים לבין סוג נוסף של מתחי יתר – מתחי יתר בתדר הרשת (רגעיים וארוכים), אשר נגרמים בין היתר כתוצאה מאי-איזון ברשת, ניתוקי אפס ברשת מתח נמוך, ועוד. במאמר המשך, שיתפרסם בגיליון הבא, נתאר את מתחי היתר בתדר הרשת, מקורם, השפעותיהם, ודרכי ההתמודדות עימם.

כדי לעמוד במתחי יתר חולפים ברוב המוחלט של המקרים, צריכים מיתקני מתח נמוך ומכשירי חשמל להיות מתוכננים בהתאם לדרישות המופיעות בתקן הבינלאומי IEC 60664-1 (Insulation coordination for equipment within low-voltage systems - Part 1: Principles, requirements and tests).

התקני הגנה בפני נחשולי מתח (Surge Protective Devices)

התקנים אלו מיועדים להגביל מתחי יתר חולפים (נחשולי מתח) שמקורם באטמוספירה (ברקים). תפקידם להטות גלי זרם לאדמה, ובכך להגביל אמפליטודה של מתחי היתר לערכים שלא עשויים לגרום נזק למיתקן חשמלי וללוחות מיתוג ובקרה. הם מותקנים ברשתות אספקת חשמל, וכן ברשתות טלפון ותקשורת, פיקוד ובקרה, ומהווים אחד המרכיבים של מערכת הגנה של מיתקני חשמל.

למעשה, התקני הגנה בפני נחשולי מתח מותקנים בסמיכות לכניסה למיתקן חשמלי או בלוח הראשי של המיתקן. יחד עם זאת, עשויים להיות נחוצים התקני הגנה נוספים משניים – כדי להגן על ציוד רגיש, וכאשר המרחק בין התקן הגנה ראשי לבין לוח חלוקה משני עולה על 30 מטרים. התקני ההגנה המשניים צריכים להיות מותקנים בתיאום עם התקני ההגנה הראשיים, כפי שנקבע בתקנים הרלבנטיים המצוינים בהמשך.

תקן ישראלי ת"י 161643 חלק 11 – "התקני הגנה מפני נחשולי מתח וזרם המחוברים למערכת הספקת חשמל במתח נמוך: דרישות ביצועים ושיטות בדיקה" (המקביל והזהה לתקן IEC/EN 61643-11), הוא התקן שקובע אופייני ביצועים ושיטות תקניות לבדיקה ולדירוג של המגנים.

עקרונות ההתקנה של התקני הגנה בפני נחשולי מתח בבניינים נקבעו בתקנים הבאים:

IEC 60364-4-44 Electrical installations of buildings - Part 4-443 : Protection against over-voltages of atmospheric origin or due to switching

IEC 60364-5-53 Electrical installations of buildings - Part 5-534 : Devices for protection against over-voltages

קיימים שלושה סוגים של התקני הגנה בפני נחשולי מתח, המבחינים בין הגנה מפני פגיעת ברק ישירה ובין הגנה מפני פגיעת ברק לא ישירה, ואלה הם:

תקן	הגנה מפני פגיעת ברק ישירה	הגנה מפני פגיעת ברק לא ישירה
IEC 61643-1	בדיקת Class I	בדיקת Class II
EN/IEC 61643-11	Type 1	Type 2
צורת גל בדיקה	10/350	8/20

Type 1: מיועד לבניינים ולמיתקנים אשר מוגנים במערכת הגנה מברקים. התקנים אלה מספקים הגנה מפגיעות ברקים ישירות.

מגן Type 1 מאופיין בצורת גל זרם $10/350 \mu s$.

Type 2: סוג עיקרי של מגיני ברק המיועדים לכל מיתקני החשמל במתח נמוך. הם מותקנים בכל לוחות המיתוג, מונעים התפשטות מתחי יתר ממיתקני חשמל, ומגינים על העומסים.

מגן Type 2 מאופיין בצורת גל זרם $8/20 \mu s$.

Type 3: למגנים אלה יכולת פריקה נמוכה. לכן, חובה להתקין אותם כמגינים משלימים להתקני הגנה מטיפוס 1 ו-2 ובסמוך לעומסים רגישים. מגן Type 3 מאופיין בשילוב צורות גל מתח $1.2/20 \mu s$ וגל זרם $8/20 \mu s$.