

הגורמים הפעילים בבחירת מגן ברק ללוח חשמל ראשי או בודד

מאת: מייק (משה) גרין- יועץ עצמאי

מבוא:

דרישות השוק להספקת חשמל אמין ובאיכות גבוה גדלות כל שנה. יחד עם זאת, השימוש במיקרופרוססורים מתרחב עד כדי שקשה למצוא מכשיר או רכיב כל שהוא שלא נשלט על ידי שבב מזערי, והמזעור ממשיך עד כדי שפגיעת ברק במרחק של מאות מטרים מסוגלת לגרום נזק. כל זה דורש מתעשיית ההגנה מפני ברקים להמשיך ולפתח רכיבים ושיטות להגן לא רק על הרכיב ההולך וקטן אלא לשמור גם על אמינות ההספקה. הנושא של הגנות מפני מתח יתר מורכב, ואין אפשרות במאמר אחד לפרוס את כל התורה. מטרת מאמר זה לנתח את הגורמים הנלקחים בחשבון בבחירת הגנה ללוח הראשי או ללוח בודד.

הגדרת הבעיה:

פגיעת ברק גורם למתח יתר במתקן החשמלי על ידי שני מנגנונים פיזיקאליים עיקריים:

▪ השראה

▪ עלית פוטנציאל מקומי של אדמת המתקן ביחס לנקודת ההארקה של מוליכים הנכנסים למבנה.

קיימים גם מנגנונים נוספים אך אלה מחוץ לתחום עיסוק מאמר זה.

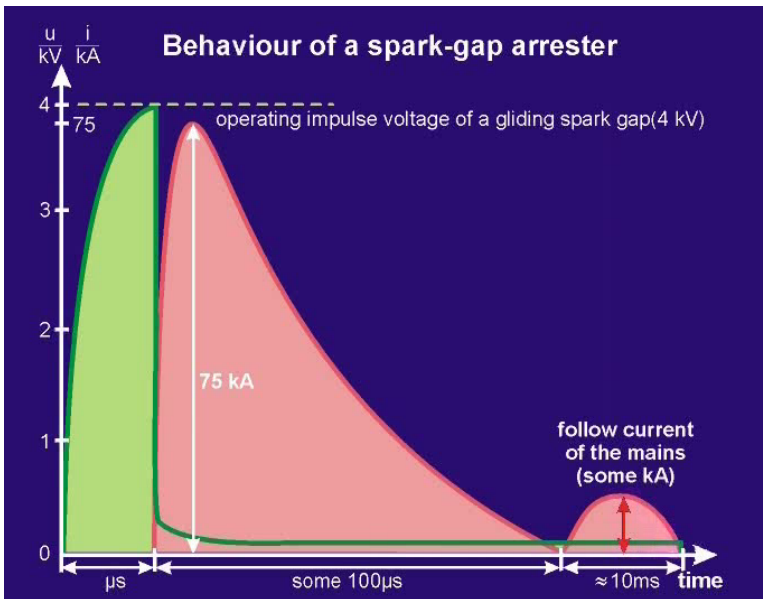
ההשראה המיוצרת על ידי זרימה חזקה של ברק לאדמה או על ידי ברק בין עננים המייצר מתח בכל גוף מתכתי. אפילו במרחק של 10km מושרה 20V בכל מטר חוט במתקן. במרחק של 1km מושרה 200V בכל מטר חוט, ובמרחק 100m מושרה 2kv בכל מטר חוט!¹ במרחקים קטנים יותר מגיעים למתח מושרה של כמה עשרות קילו-וולט.² פגיעה ישירה בתוך המבנה גורמת לעלית פוטנציאל של המתקן ביחס ישיר להתנגדות מסלול הזרם. אם ניקח כדוגמה ברק של 100kA ואמפדנס של 1 אום נגיע ל-100kV בין ההארקה בלוח והמוליכים המגיעים מבחוץ המיוחסים לאדמה בנקודת האיפוס של השנאי או הארקה השיטה. המרחקים בין מוליכי הפאזות והארקה המקומית בלוח המבנה מתוכננים עבור מתח נמוך, במתחים גבוהים כאלה תהיה פריצה, קשת ומעבר מטען של עשרות אמפר/שניה. עם אין למבנה מערכת כוללת אוויר והורדה מסודרת של הזרם לאדמה על ידי מערכת הארקה, אז הברק ירד במבנה עצמו, דרך הקירות ועמודים הבנויים ביטון מזוין. מסלול הברק במקרה זה בעל אמפדנס גבוה יותר ומכך המתח גבוה יותר.

לכן יש צורך להגן על כל לוח אשר מקבל כבל המגיע מבחוץ מפני פריצה של מאות קילו-וולט המכיל מטען בין 50-100 קולון³, ובלוחות אחרות (לוחות משנה) מפני עשרות קילו-וולטים המכיל מטען של 0.3 קולון⁴.

הסוגים העיקריים של הגנה

בכדי להנחית מטען חזק בלוח הקולט מוליך המגיע מבחוץ יש צורך לסמוך על הטכנולוגיה של SPARK-GAP. רכיב זה הנו זוג אלקטרודות מחוברות בין פאזה להארקה. בתנאים רגילים הרכיב מהווה נתק מוחלט. כאשר מתח בין פאזה לאדמה עולה על נקודת ההצתה של הרכיב, המתח פורץ את המרווח ומתחיל להוביל זרם בין האדמה למוליך הפאזה. זרימה זו ממשיכה עד לירידת המתח לאפס. הברק סגר את המעגל ונגמר תוך מספר מילי שניות בודדים, אך המעגל עוד סגור וסביר להניח שהמתח הסינוסואדלי של המתקן לא נמצא בדיוק באפס. לכן יתחיל לזרום זרם RMS של המתקן אל האדמה דרך הרכיב בעוצמה של זרם הקצר הצפוי של המתקן.

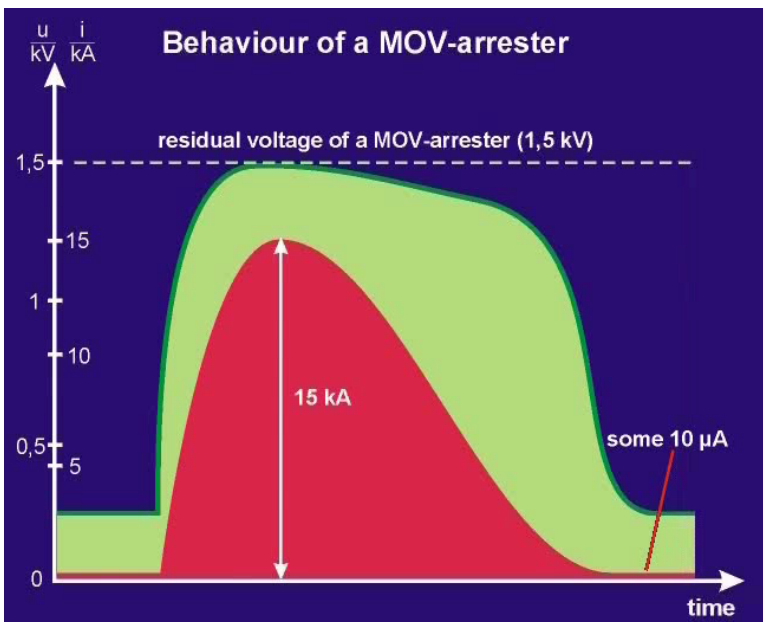
בלוחות המשנה, היכן שצפוי מתח יתר כתוצאה מהשראה, (או אולי מיתוג- אבל זה מחוץ לנושא המאמר), רגילים להרכיב רכיבים מבוססים על טכנולוגיה של METAL OXIDE VARISTOR. MOV מתנהג בצורה שונה מאשר ה- SPARKGAP. אין לוריסטור נקודת הצתה, אלא הרכיב תמיד במצב של זליגה. בתנאים



רגילים הזליגה נשארת בתחום המיקרו-אמפרים. איך שמתח היתר עולה מעל סף מסוים, הזליגה גדלה ביחס למתח ובכך נשמר מתח השירוי הנקוב על ידי זרימה חזקה יותר.

אנו רואים שה- SPARKGAP מתנהג כמו מפסק. הוא נמצא במצב תק עד לנקודה מסוימת ואז נסגר ונשאר סגור עד שנעלם המתח כליל. הוריסטור לעומת זאת מתנהג בצורה הרבה יותר ליניארית, איך שהמתח עולה ויורד גם כן עולה ויורד הזרם בכדי לווסת את המתח.

התנהגות הוריסטור מתאימה לשימוש בלוחות משנה היכן שמגינים מפני מתחי יתר כתוצאה מהשראה מברק הפוגע רחוק יחסית למבנה. ה"ליניאריות" שלו נותנת פתרון עבור מתחי יתר קטנים וגדולים ומאפשרת לשמור על מתח שירוי המקובל של 1.5kV בלוח המזין צרכנים לא תעשייתיים⁵. המתח המרבי של רכיב לשימוש זה הנו סביב ה 40kA בצורת גל של 8\20. הוריסטור לא מתאים לשימוש בלוח הראשי נגד



גל מתח יתר של 10\350 100kA כתוצאה מברק עקב גודלו הפיזי בעיקר. השימוש בטכנולוגיה של MOV בלוח הראשי ידרוש ממדים פיזיים גדולים. אפשר להתרשם עד כמה גדולים רכיבים כאלה על ידי מבט בקטלוג של ציוד אמריקאי המבוסס על טכנולוגיה זו. השימוש ב SPARKGAP דורש הרבה פחות מקום בלוח בכדי לפרוק מטען הרבה יותר גדול.

בחירת הרכיב ללוח הראשי\בודד

לאור האמור לעיל ברור שללוח הקולט

כבל המגיע מבחוץ מתקינים SPARKGAP. כאשר אנו הולכים לקטלוג לבחור רכיב מוצאים יותר ממוצר אחד. אותו יצרן משווק כמה סוגים של SPARKGAP וכולם מתאימים להשגת המטרה של הורדת 100kA 10\350 בלוח. היכולת הזאת הוא מערכתית. כלומר, פריקת מטען הברק מתבצעת על כל המוליכים הנכנסים ללוח מבחוץ. אם נכנס כבל של 4 גידים, אז מספיק להנחית 10\350 25kA על כל גיד. לעומת זאת, עם ההזנה על ידי שני גידים, כל גיד הנכנס זקוק לרכיב המסוגל להנחית זרם של 10\350 50kA. נתון חשוב ביותר הנו סוג מערכת ההארקה במתקן. אם קיימת הארקה יסודות וטבעת גישור, יכול להיות איפוס במקום ואז סוג

ההארקה הנו TNCS (Terra (and) Neutral (are) Common (then they are) Seperate). אם אין איפוס אז צורת ההארקה הנו מסוד TT (Terra Terra) כלומר הארקה של הארקה השיטה נפרדת מהארקה המתקן. חשוב לשים לב לעובדה שקיימים הרבה מאוד מתקנים חדשים בעלי הארקה יסודות אך ללא איפוס. הנתונים המשפיעים על בחירת הרכיב:

- זרם פריקה של הברק: I_{imp} (Lightning impulse current)
- מתח נומינלי: U_c (Rated voltage- max. continuous operating voltage)
- רמת המתח השיורי: U_p (Voltage protection level)
- עמידת הרכיב בפני זרם קצר: I_{sc} (Short-circuit withstand capability with max. backup fuse)
- היכולת הרכיב המגן להגביל זרם קצר rms של המערכת: I_f (Follow current extinguishing capability)
- סוג ההארקה של המתקן

זרם פריקה של הברק I_{imp}

זרם הפריקה המתאים להגנה מפני ברקים הנו $100kA$ $10\backslash350$. התקן VDE הגרמני מגדיר רכיבים אלה כסוג "B". סוג "C" הוא סוג הרכיבים המותקנים בלוחות המשניים- הוריסטורים. רכיב סוג "D" מותקנים בקרבת ציוד עדין ועיקר מטרתם להגן מפני מתחי יתר של מיתוגים. הנתון $10\backslash350$ הנו במיקרו-שניות ומתייחס לזמן העליה של גל הזרם לאמפליטודה מלאה תוך 10 מיקרו-שניות וזמן דעיכה למחצית האמפליטודה תוך 350 מיקרו-שניות. המטען הנפרק על ידי גל זה הנו 50 קולון. והאנרגיה הנו 5 מגהגיאול לאוהם⁷. ישנם רכיבים שמצוין עליהם הנתון של $100kA$ ללא צורת הגל ויש רכיבים בעלי נתונים של צורת הגל שונה (קטן בדרך כלל) $10\backslash350$. יש צורך להבחין גם בכמות הקטבים המצוינים על הרכיב. בכדי לבחור ברכיב בעל זרם פריקה נכון יש לחלק את כמות המוליכים הנכנסים ללוח לתוך $100kA$ ולבחור בהתאם. לדוגמה: עבור מתקן חד-פזי המקבל כבל של פעמיים 4 ממ"ר יש צורך לפרוק $50kA$ על כל קוטב.

מתח נומינלי U_c

מתח נומינלי נכון הנו מתח בין פאזה והארקה חוץ מאשר במקרים מיוחדים כמו במערכת זינה צפה $(I(solated)T(erra))$ לרב החברות בנוסף לרכיבים של 250 וולט יש גם רכיבים למתח של 440 וולט, אך אלה מתאימים לשימוש להגנה על מנועים גדולים בעלי מתח 660-690 וולט שלוב. כל לוח חשמל ראשי המקבל הזנה ב"מתח ארצנו" הרכיב הנכון עבורו יהיה בעל מתח נומינלי של 250 וולט. בחירה של רכיב בעל מתח נומינלי של 440 וולט פוגעת ביכולת המערכת לעמוד בפני ולכבות זרם קצר של המתקן RMS החוזר לאחור הברק.

רמת המתח השיורי U_p

רמת מתח השיורי הנו המתח הגבוה שצפוי בלוח בעת פגיעת ברק כתוצאה מהפעלת הרכיב. חשוב לבדוק את הגדרה המדויקת בשימוש היצרן בדיווחו על נתון חשוב זה, קיים שוני בין היצרנים בהגדרת הנתון. אין הכוונה למתח הצתה של SPARKGAP מפני שלאחר ההצתה קיימת אנרציה מסוימת, ולכן נקודת ההצתה אינה בהכרח המתח השיורי. המתח השיורי חייב להיות מתאים למגבלות של הצרכנים המחוברים ללוח. רכיבים מדור קודם היו בעלי מתח שיורי של 4kV. מתח ברמה זו מתאים ללוח חלוקה ללא צרכנים סופיים המזין לוחות משנה. בלוח המשנה מתקנים וריסטורים בעלי מתח שיורי של 1.5kV ובכך אנו מסיגים את מטרת ההגנה. שיטה זו מכונה "שיטת הקסקדה". היום קיימים רכיבים שמסוגלים להנחית ברק מלא של $100kA$ $10\backslash350$ ולהוריד את המתח השיורי לרמה של 1.5kV.

עמידת הרכיב מפני זרם קצר I_{sc}

כמו כל רכיב היושב בלוח וצפוי שיעבור בו זרם קצר, יש צורך להכיר ביכולת של SPARKGAP לעמוד בפני זרם קצר ללא שיגרם לו נזק. הרכיבים מותקנים בין פאזה והארקה, כאשר הרכיב מופעל זורם בו זרם RMS של המתקן יחד עם זרם הברק, וממשיך לזרום גם לאחר שהברק גמר לפרוק עד שהגל הסינוסואדאלי של המתח עובר דרך אפס. לכן יש צורך לבחור ברכיב העומד בזרם הקצר הצפוי של הלוח. אם זרם הקצר גבוה מהיכולת הכתובה בקטלוג של המוצר יש צורך להתייעץ בנציג החברה כיצד לנהוג.

יכולתו של הרכיב המגן להגביל זרם קצר rms של המערכת I_f

אופן הפעולה של SPARKGAP הוא כך שבעת הפעלתו זורם דרכו זרם הקצר המלא של המתקן לפרק זמן של עד חצי מחזור. בזמן זה סביר להניח שנתיד הראשי של הלוח יישרף. מצב זה לא רצוי. לרכיבים מודרניים יש יכולת מובנית להגביל זרם קצר של RMS. שימוש בנתון זה מבוסס על כמה נתונים שלא תמיד ברורים בקטלוג היצרן. את הנתון I_f יש לצרף לנתון של הנתיד המקסימלי המוגדר I_{sc} . לדוגמה: אם כתוב $I_{sc}=50kA$ ו $I_f=4kA$ עם נתיד עורפי של 160A, צריך להבין שבלוח בעל זרם קצר מחושב של 4kA עם מפסק ראשי של 160 אמפר, לא יישרף נתיד זה. אומנם נתיד קטן מ 160A עלול להישרף ונתיד של 160A בלוח בעל זרם קצר גדול מ 4kA גם הוא יישרף. נתונים של I_f הרכיב השתפרו עם השנים והיום ישנם רכיבים המסוגלים לדכא זרם קצר של עשרות קילו-אמפרים מבלי לשרוף נתיד אפילו של 40 אמפר. יש צורך לשים לב לנתונים הבאים:

- יכולת הרכיב לכבות או להגביל זרם קצר RMS.
- מהי האמפליטודה של זרם הקצר המוגבל, כלומר עד איזה נתיד יש אמינות הספקה ולא יופסק זרם החשמל בעת פגיעת ברק.
- איך מושפע גל המתח בעת הפעולה, האם הרכיב מסוגל "לגהץ" את זרם הקצר עד כדי כך שלא תורגש הפעלתו על ציוד רגיש במערכת.
- אומנם היום יש רכיבים המסוגלים לשמור על שלימות נתיד של 40A בזרם קצר של 50kA rms, אבל מחקרים הוכיחו שברק 10\350 מסוגל לשרוף נתיד של 250A.

הרבה יצרנים היום מצהירים על כך שאין צורך בנתיד להגן על הרכיב. אך הצהרה זו אינו ניתנת לשימוש ללא ההבהרות הנ"ל. יחד עם זאת יש צורך לזכור שיחד עם דרישות היצרן לנתיד עורפי (או לא), יש גם חוק החשמל הדורש נתיד על כל מקרה של הורדת חתך של מוליך. במקרה של לוחות גדולים, סביר להניח שמפסי צבירה יורדו מוליכים בחתך קטן מאשר המוליך המוגן על ידי המפסק הראשי.

סוג מערכת ההארקה של המתקן

במתקן מסוג TNCS בוחרים ברכיב המתאים לעמידה בין פאזה והארקה והמסוגל לפרוק את חלקו היחסי של זרם הברק כפי שהוסבר לעיל ובעל I_f גדול ככל שניתן. צורת ההתקנה פשוטה, כל רכיב המותקן בין פאזה והארקה כולל רכיב העומד בין אפס והארקה.

למערכת TT קיימת חשש שבמקרה של כשל של רכיב וקצר דרכו לאדמה לא יפעל הנתיד הראשי של המתקן להפסיק את הקצר עקב ערך נמוך של זרם הקצר⁸. לכן את שלושת הפאזות מחברים בכוכב ומעבירים לאפס. על ידי כך מוגדל זרם הקצר של הכשל (ללא תנאים של פגיעת ברק) כך שנתיד ראשי יופעל. את האפס מעבירים להארקה דרך SPARKGAP מיוחד בעל יכולת להוריד את כל זרם הברק 10\350 100kA אך ללא צורך להגביל I_f (הגבלת I_f נעשית על ידי הרכיבים על הפאזות בטור).

במאמר זה ראינו כיצד בוחרים רכיב הגנה מפני פגיעת ברק בלוח ראשי או לוח בודד. חשוב מאוד לזכור שההגנה רק מתחילה עם ההגנה בלוח הראשי. לוחות המשנה זקוקים להגנות שלהם להתמודד עם ברקים הפוגעים רחוק מהמתקן אך משרים מתח יתר מספיק לגרום נזק לציוד עדין בתוך המתקן. קיימים עוד הרבה נושאים חשובים שיש לקחת בחשבון בתכנון נכון של הגנה מפני ברקים. נושאים כמו תאום עכבות בין הרכיבים השונים, והתקנת הגנות מסוג D מפני מיתוג על מעגלים ארוכים. יש חשיבות עליונה להתקנה נכונה של כל הרכיבים הנ"ל, מיקומם בלוח ואורך המוליכים לדוגמא. לאחר שגמרנו לתכנן את הגנה על מערכת החשמל, נוכל להתחיל לתכנן את ההגנה על מערכות התקשורת השונות: טלפוניה, RF, מחשבים, מערכות פיקוד ובקרה ועוד.

- 1 Clark, O.; Gavender, R. : Lightning Protection for Microprocessor based Electronic Systems. Recond of Conference Papers Industrial Applications Society, 36th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference 11-13 Sept. 1989, San Diego, CA, USA
- 2 Hasse, Peter : Overvoltage Protection of Low Voltage Systems 2nd Edition IEE London UK pg.60
- 3 IEC 1024-1-1 First edition 1993-08 Part 1 General principles page 19 table 2
- 4 E DIN VDE 0675 Part 6/A1
- 5 IEC 60664-1: Insulation coordination for equipment within low-voltage systems. See overvoltage category I.
- 6 השיקולים לקביעה "עובדה" זאת מחוץ לתחום עיסוק של מאמר זה ומתבסס על תקנים שונים בתוקף היום באירופה ודרישת השוק הישראלי להגנה מפני נזקים הנגרמים על ידי ברקים
- 7 IEC 1024-1-1 First edition 1993-08 Part 1 General principles page 19 table 2
- 8 Hasse, Peter : Overvoltage Protection of Low Voltage Systems 2nd Edition IEE London UK pg.121