

בדיקת השלכות השימוש במגביל זרם בגנרטורים

אינג' קובי פרץ, דר' דוד אלמקיאס, אינג' שחף ויינזון – חברת יאני בע"מ

1. הקדמה

כתוצאה מפיתוח משק החשמל וחיבור מתקני ייצור אנרגיה לרשת החלוקה חלה עלייה מתמדת של זרם הקצר. הן ברשת ההולכה והן ברשת החלוקה. מגביל הזרם (Is-Limiter) מהווה אחד מהאמצעים להגבלת זרמי קצר במיוחד ברשתות ומתקני מתח גבוה. לאחרונה נבחנת האפשרות ליישום טכנולוגיה זו גם בגנרטורים.

על אף שמצויין כי מגביל הזרם מתוכנן כך שרמת מתחי היתר המתקבלים בזמן ניתוק הקצר הינם בתחום הערכים המותרים, ישנה חשיבות לבחינת הנושא בשילוב מגביל הזרם בגנרטור. הסיבה לכך כשורה לתגובת העוגן של הגנרטור שגורמת למתחי יתר גבוהים בזמן הפסקת הקצר. מתחי היתר המתקבלים בזמן פעולת מגביל הזרם הינם מתחי יתר הנובעים מפעולת המיתוג – switching overvoltages. מתחי היתר כוללים שני מרכיבים המרכיב בתדר הרשת או קרוב לתדר הרשת. ובקרב הגנרטור הוא יכול להגיע עד ל-1.5PU. ומרכיב בתדר גבוה יותר התלוי בהשראות וקיבול המערכת וערכם תלוי בפרמטרי הגנרטור ומגביל הזרם. במידת הצורך מתקנים מגני ברק וקבלים לריסון מתחי היתר הנובעים מפעולת מיתוג זו, סימולציה מאפשרת לבחון את דגם מגני הברק הנדרש ואת גודל הקבל במידת הצורך.

במאמר זה נציג את האתגרים שבניתוח עקרון פעולת מגביל הזרם באמצעות מודל המערכת ותוצאות הסימולציה לגבי מתחי היתר המקבלים, כתוצאה מפעולת ניתוק זרם הקצר בקרבת הגנרטור, ע"י מגביל הזרם.

לחישוב מתחי היתר ואמצעי ההגנה בפני מתח היתר נדרש לפתח מודל אנליטי לא פשוט של המערכת הכולל את מודל המרכיבים המעורבים בתהליך מודל הגנרטור, מודל מגביל הזרם ומודל מגני הברק.

חישוב מתחי היתר והזרמים השונים כתוצאה מתופעת המעבר, המתקבלת בעקבות ניתוק זרם הקצר ע"י מגביל הזרם, נעשה באמצעות תוכנת מחשב EMTP-RV-3.5 – תוכנה השימושית מאוד לביצוע סימולציות של תופעות מעבר במערכת הספק.

2. מגביל הזרם

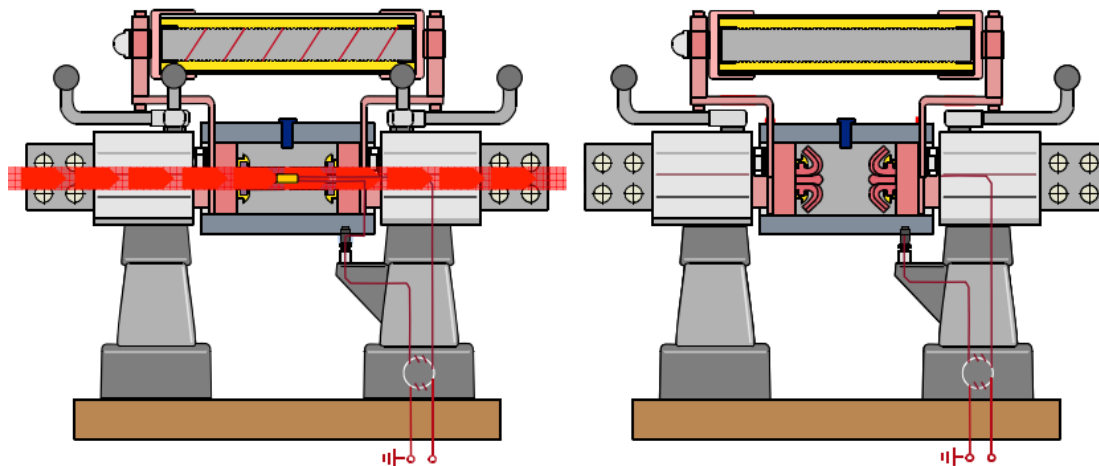
מאחר ואופייני מגביל הזרם ואופן פעולתו משפיעים מהותית על מתחי היתר, נתאר בהמשך את מרכיביו ואופן פעולתו.

מגביל הזרם כולל 3 יחידות, אחת לכל פאזה, כאשר כל יחידה מכילה: (ראה איור 1).

- נתיך HRC
- פס צבירה עם אלמנט נפיץ
- מערכת גילוי וזיהוי הקצר

לאחר זיהוי הקצר, ע"י מערכת הגילוי, נשלחת פקודה למערכת ההפסקה הגורמת לאלמנט הנפיץ לפעול מידית לאחר שזרם הקצר מגיע לערך מסוים. ברגע זה זרם הקצר זורם דרך הנתיך HRC. ולאחר זמן קצר הנתיך מנתק את זרם הקצר לפני שזרם הקצר מגיע לערכו המירבי. זמן פעולת הנתיך מורכב מזמן, היתוך האלמנט ומזמן הקשת.

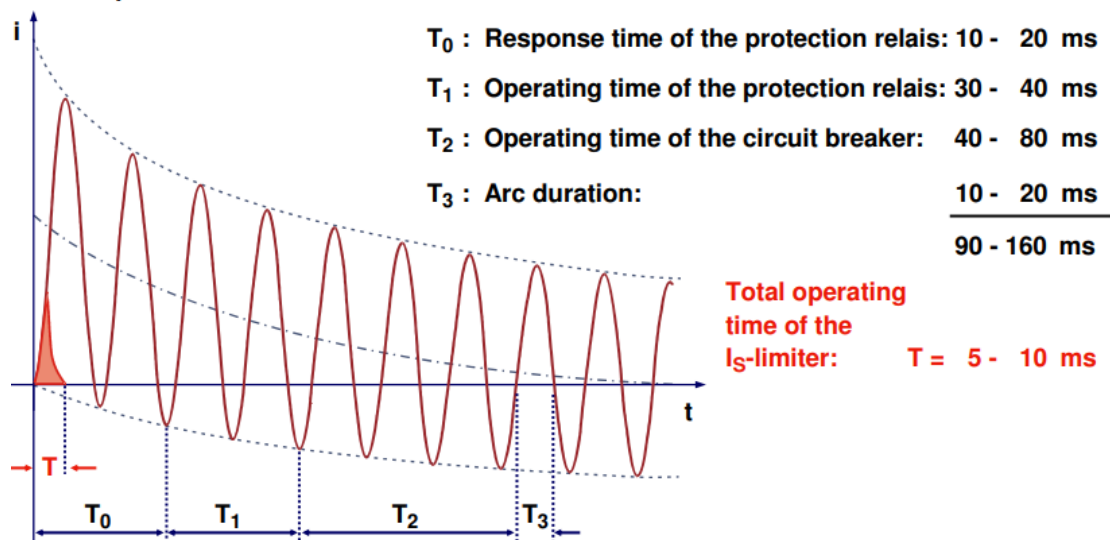
■ I_S -limiter insert holder and insert



איור מס' 1: מבנה עקרוני של מגביל הזרם

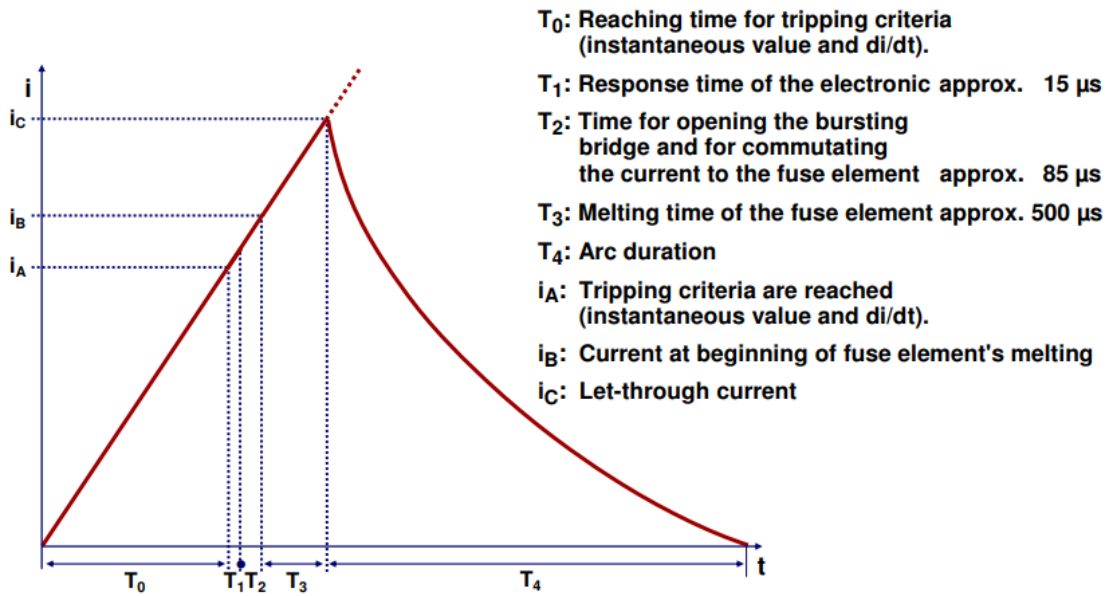
תאור עקרוני של הפסקת הזרם ע"י מגביל הזרם מתואר באיור מס' 2 [6]

Comparison: I_S -limiter – Circuit Breaker



איור מס' 2: הגבלת זרם הקצר ע"י מגביל הזרם [6]

Schedule for tripping

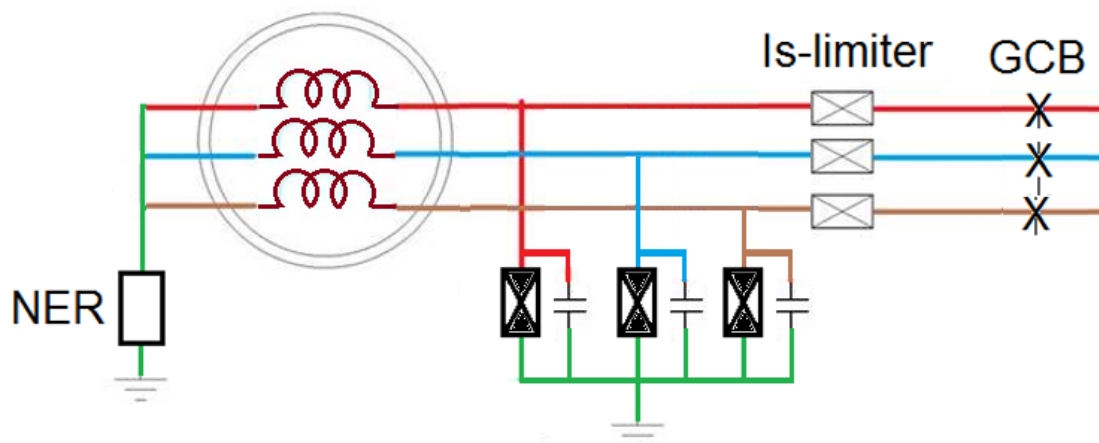


איור מס' 2: הגבלת זרם הקצר ע"י מגביל הזרם (המשך) [6]

הניתוק המהיר של הזרם יכול לגרום למתח יתר גבוהים במיוחד. רמת מתחי היתר תלויה בפרמטרים של המערכת ובפרמטרי מגביל הזרם אותם נציג בהמשך.

3. תאור המערכת

תאור המערכת שנבדקה באיור מס' 3.



איור מס' 3: תאור המערכת שנבדקה

המערכת כוללת את הגנרטור, מגביל הזרם, מגני ברק ומפסק הזרם (GCB).

4. מודל דינמי של המערכת

לצורך הרצת התוכנה יש לשלב את המודלים של מרכיבי המערכת בתוך התוכנה.

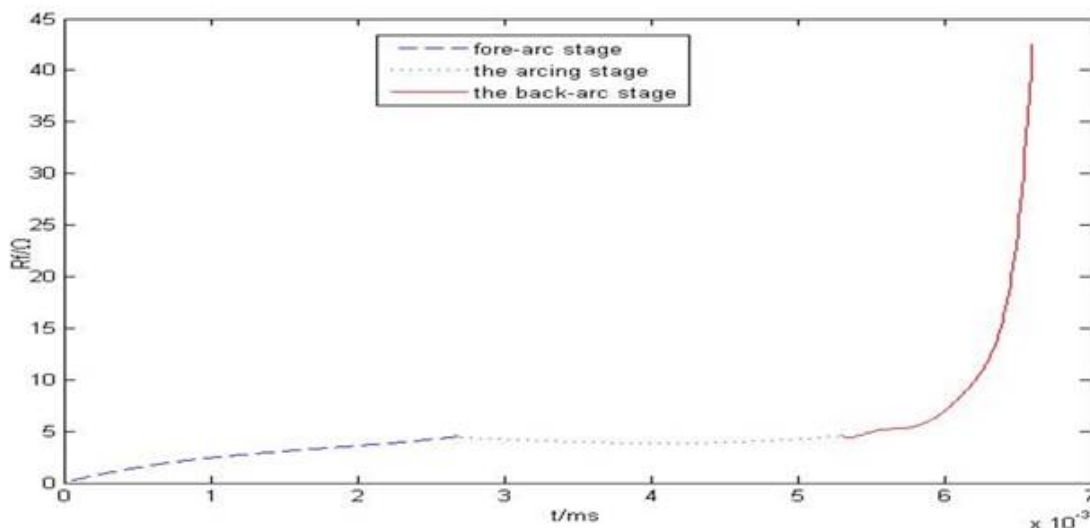
4.1 מודל הגנרטור

התוכנה כוללת בתוכה את מודל הגנרטור המתבסס בעיקר על אמפדנסי תת המעבר ואמפדנסי המעבר וקבועי הזמן השונים של הגנרטור. בנוסף שולבו במודל הגנרטור הקיבול העצמי של הליפופיים.

4.2 מודל מגביל הזרם

יחידת מגביל הזרם מורכבת מאלמנט מקבילי שמתנתק מידית עם זיהוי הקצר ונתיך HRC שמפסיק את זרם הקצר לפני שזרם הקצר מגיע לערכי המירבי. כאשר עפ"י הצהרת היצרן רמת מתחי היתר המתקבלת הינה על פי המלצות התקן IEC 60282. מודל מגביל הזרם, כולל:

- מתג אידאלי שנפתח, לאחר זמן הדרוש לגילוי הקצרים
 - נתיך המחובר במקביל למתג הנ"ל
- מודל הנתיך מבוסס על שינוי ההתנגדות עם הזמן מערך זניח לערך אין סופי – נתק. המעבר מההתנגדות אפס לנתק תלוי מאוד בפרמטרי הנתיך. המשפיעים על כיבוי הקשת. תאור עקרוני של אופיין הנתיך מתואר באיור 4 [1].

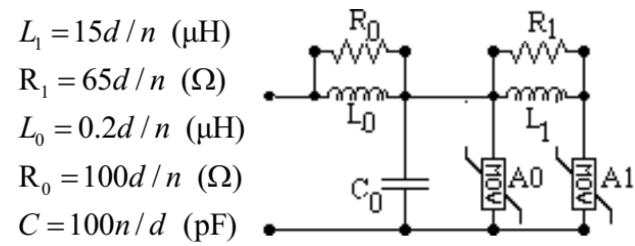


איור 4: התנגדות הנתיך כתלות בזמן

פרמטרי האופיין הנ"ל משפיעים משמעותית של רמת מתחי היתר. ולכן נעשתה בדיקת רגישות של רמת מתחי היתר לפרמטרי הנתיך.

4.3 מודל מגן הברק

מודל מגן הברק מבוסס על המלצות IEEE WORKING GROUP 3.4.11 בהתאם להמלצת IEEE המודל הדינמי של מגן הברק מתואר באיור 5:



איור 5: מודל מגן הברק

המודל כולל נגדים, קבל וסלילים שערךם תלוי במידות הגיאומטריות של מגן הברק:

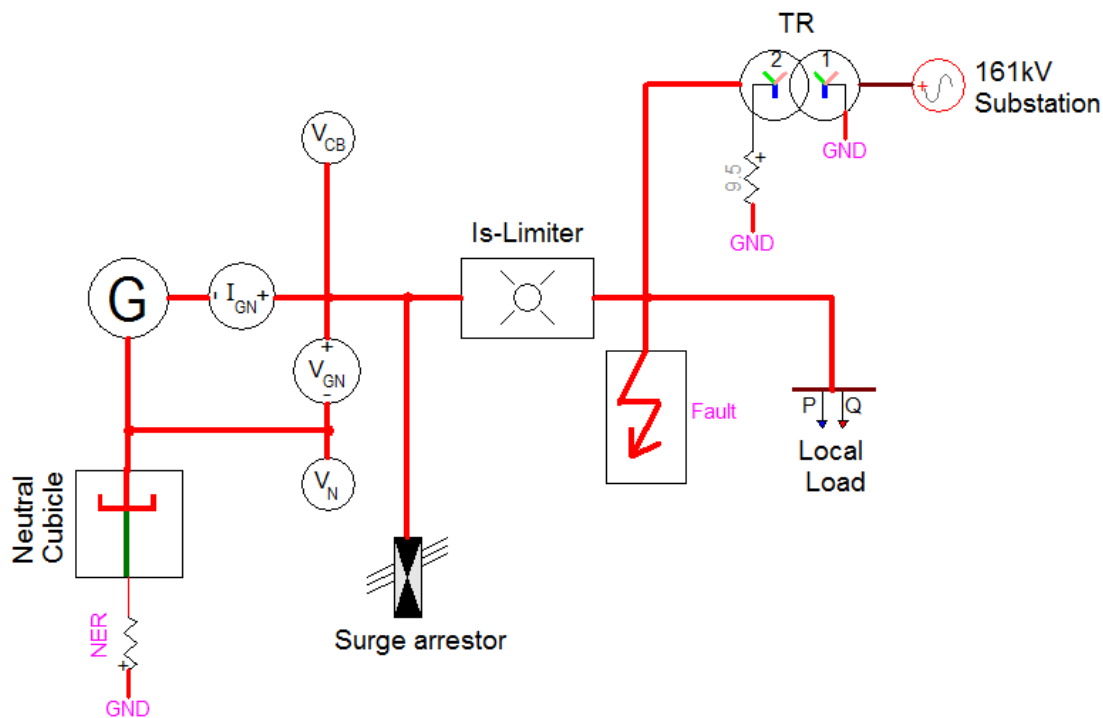
N – מספר יחידות ה-Zno במגן הברק

d – אורך מגן הברק במטרים

- שני אלמנטים לא לינאריים A₀, A₁ שאופיינם תלוי במתח הנקוב על מגן הברק

4.4 מודל המערכת ב-EMTP

מודל המערכת בתוכנת EMTP מתואר באיור 6



איור 6: מודל המערכת ב-EMTP

.5

התרחישים שנבחנו

בקרבת גנרטור, ישנה חשיבות מיוחדת לבחינת זרמי קצר אסימטרים בנוסף לזרם הקצר התלת פאזי. זרמי הקצר שנבחנו בפעולת מגביל הזרם הינם:

5.1 קצר תלת פאזי

5.2 קצר דו פאזי

5.3 קצר דו פאזי לאדמה

לצורך בחינתו השפעת מגביל הזרם חושבו מתחי היתר חבור שני תרחישים

- תרחיש 1 – חישוב מתחי היתר ללא מגני ברק המותקנים בהדקי הגנרטור.

- תרחיש 2 – חישוב מתחי היתר עם מגני ברק המותקנים בהדקי הגנרטור.

.6

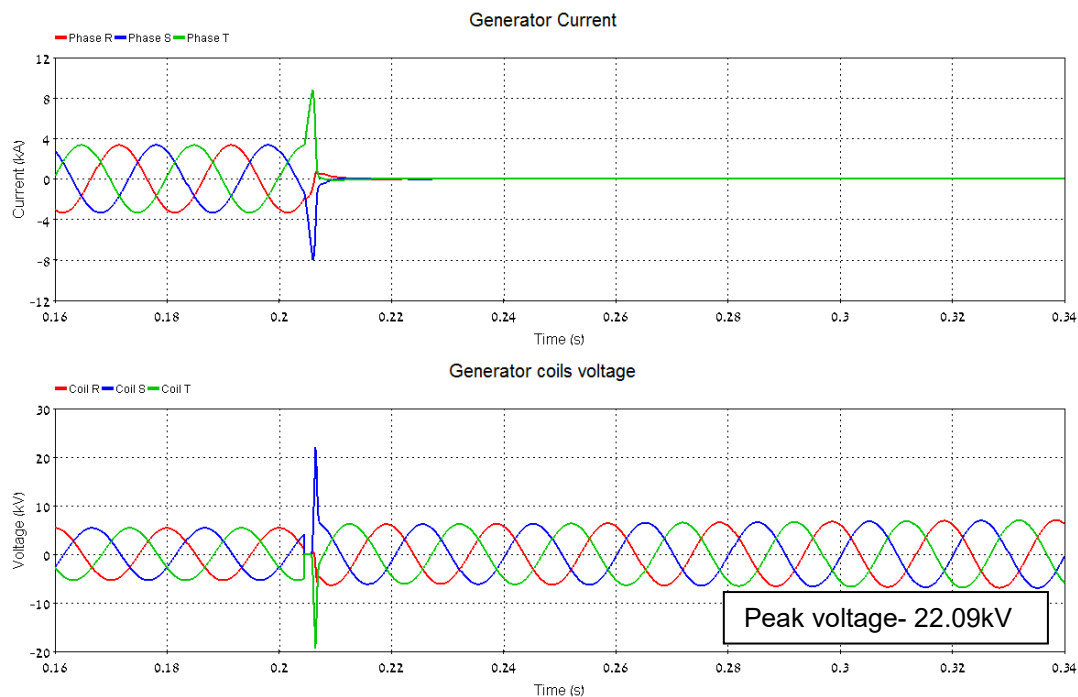
תוצאות הסימולציה

כאמור סימולצית מגביל הזרם נעשתה עבור קצר תלת פאזי ועבור קצר דו פאזי וקצר דו-פאזי לאדמה.

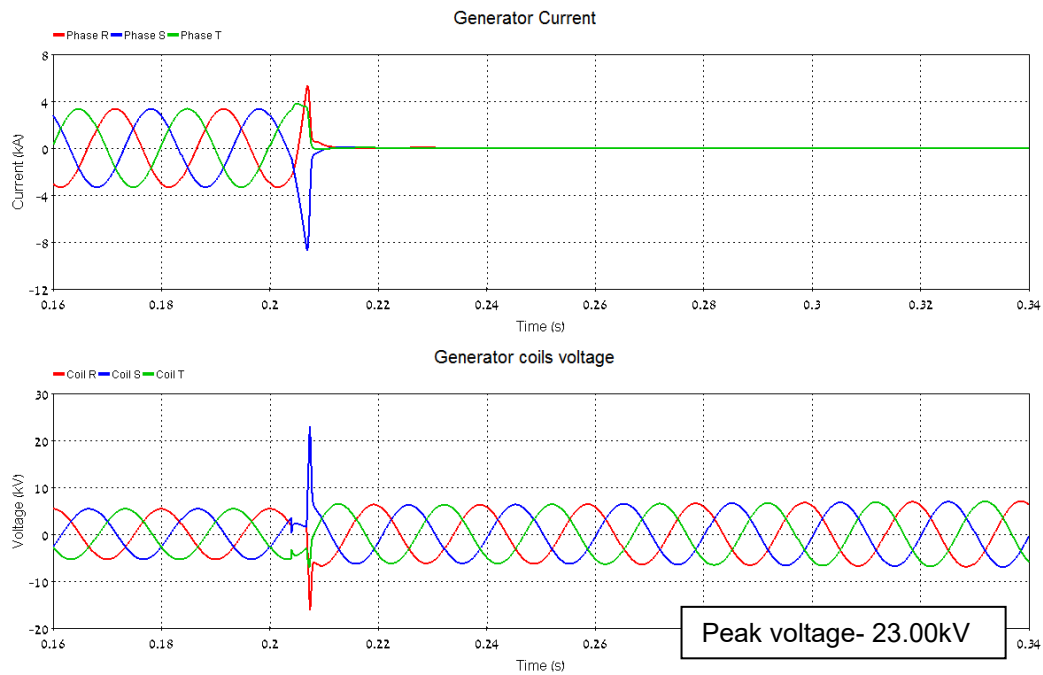
תוצאות הסימולציה כוללת את זרמי הגנרטור, מתח כלפי אדמה על הדקי הגנרטור ומתח בין הפאזות – בזמן תופעת המעבר.

באיור 5 – תוצאות הסימולציה לגבי קצר תלת פאזי - תרחיש 1

באיור 6 – תוצאות הסימולציה לגבי קצר דו פאזי לאדמה – תרחיש 2

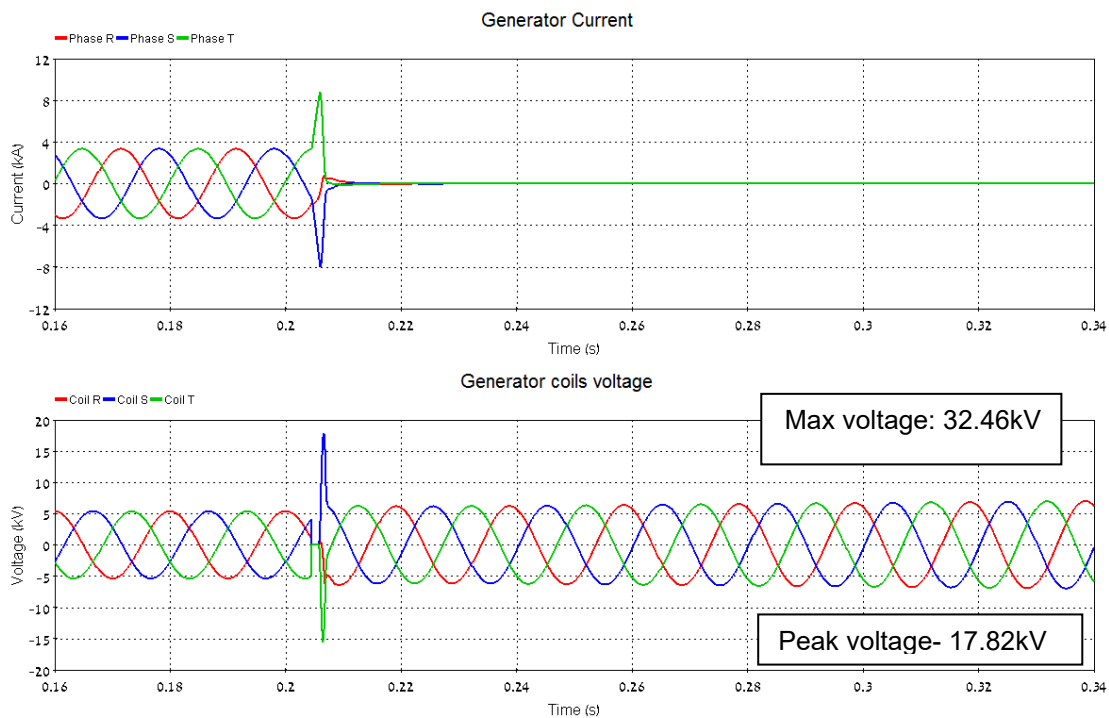


איור 5 – תוצאות הסימולציה לגבי פעולת מגביל הזרם בקצר תלת פאזי, תרחיש 1

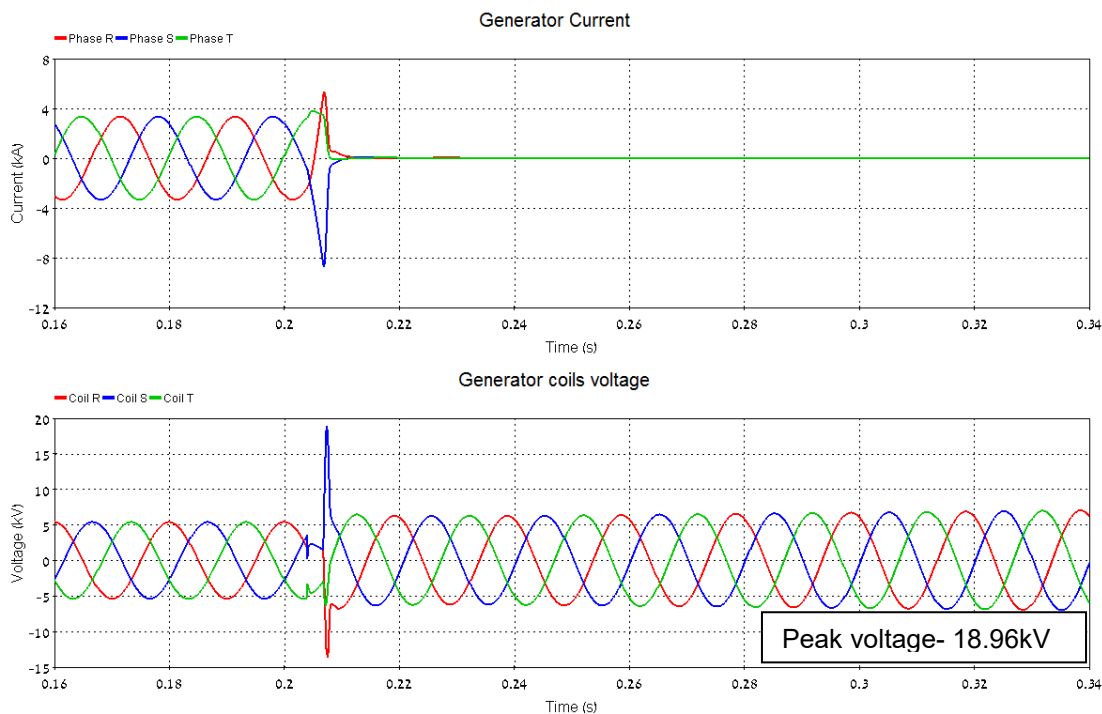


איור 6 – תוצאות הסימולציה לגבי קצר דו פאזי לאדמה – תרחיש 1

באופן דומה באיורים 7,8 מופיעות תוצאות הסימולציה לחב' תרחיש 2 עבור קצר תלת פאזי וקצר דו פאזי לאדמה כאשר מותקנים מגני ברק כמתואר באיור 3.

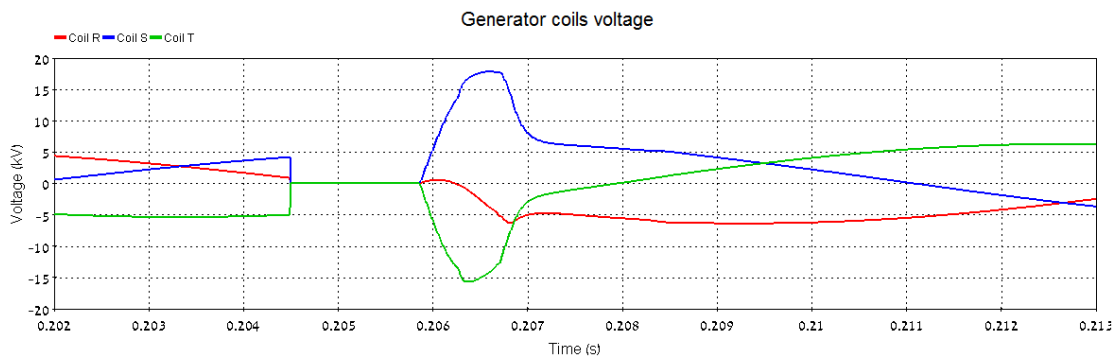


איור 7 – תוצאות הסימולציה לגבי קצר תלת פאזי – תרחיש 2



איור 8 – תוצאות הסימולציה לגבי קצר דו פאזי לאדמה – תרחיש 2

מתחי היתר המתקבלים נמשכים מילי שניות – כמתואר באיור 9. דבר המאפיין מתחי יתר כתוצאה מפעולת מיתוג



איור 9: מתחי-היתר המתקבלים בליפופי הגנרטור, בניתוק קצר תלת פאזי בתרחיש 2

סיכום ומסקנות

- 8.1 היישום של מגביל הזרם נפוץ ברשתות מ"ג ובמתקני מ"ג, לגבי ניתוק זרם קצר בקרבת גנרטור יש להתחשב בתופעות היחידיות הקשורות לגנרטור. ולחשב את רמת המתחים המתקבלים בזמן ניתוק זרם הקצר בקרבת הגנרטור.
- 8.2 במאמר זה מוצג מודל המאפשר ביצוע סימולציה לגבי תופעת המעבר המתקבלת כתוצאה מפעולת מגביל הזרם.
- 8.3 תוצאות הסימולציה תלויות משמעותית באופיין הנתיך החל מרגע תהליך ההיתוך ועד לכיבוי הקשת

8.4 רמת המתחים המתקבלת עשויה להיות חריגה מעל המותר ולפיכך יש צורך באמצעי הגנה להגבלת מתחי יתר אלה מגני ברק ו/או קבלים (surge capacitor). באמצעות בחירה נכונה של המתח השיווי של מגן הברק ניתן להגן על הגרטור כיאות.

8. רשימת מקורות

- [1] Z. Yang, H. Chen, Q. Jin, D. Zheng, T. Liu, W. Bu, "Dynamic Simulation of the Overvoltage for Fault Current Limiter" Faculty of Electrical Engineering, University of Wuhan, Hubei province, 430072, China
- [2] "Comparison of IEEE and Pinceti Models of Surge Arresters
- [3] S. Skuletic⁽¹⁾, V. Radulovic⁽¹⁾, " Possibility for Fast and Easy Calculations and Analysis of Switching Overvoltages", ⁽¹⁾Faculty of Electrical Engineering, Podgorica, Serbia and Montenegro
- [4] T. Tanaka^{*}, P. Halbach¹, K. Golde¹, V. Hinrichsen¹, K. Ermeler², J. Teichmann², " Switching Behaviour of Vacuum Interrupters under Practical System Conditions" ¹Technische Universitat Darmstadt, Germany, ²Siemens AG, Germany
- [5] H. Kawaguchi^{**}, T. Terao^{*}, T. Babasaki^{*}, Mikio Yamasaki^{**}, "Modeling of Fuses for DC Power Supply Systems Including Arcing Time Analysis"
- [6] V. Schmidt "CI-H6-High Short Circuit Current in Medium Voltage Application"p