

אוניברסיטת בר אילן



Bar-Ilan University

תהליך המעבר בין מצבי מגנטיזציה

בהתקן מגביל-זרם-קצר השראותי לא ליניארי

Mechanism of transition between magnetization states
in Inductive Nonlinear Fault-Current-Limiter

יעקב ניקולשין

עבודה זו מוגשת כחלק מהדרישות לשם קבלת תואר מוסמך במחלקה לפיסיקה של
אוניברסיטת בר-אילן

עבודה זו נעשתה בהדרכתו של

פרופ' יוסף ישורון

המחלקה לפיסיקה

אוניברסיטת בר-אילן

תודות

אני רוצה להודות מקרב לב לפרופ' יוסי ישורון על זה שהאמין ותמך בי לאורך כל הדרך, על האפשרות להשתלב בקבוצת המחקר במעבדה ולהיחשף לעולם המחקר, על ההדרכה והסיוע במהלך העבודה.

תודה לד"ר שוקי וולפוס על שליווה אותי מהיום הראשון, על היחס האוהב, על תמיכתו ויצירת סביבת עבודה נעימה ופורייה, על תרומתו האישית והמקצועית, על הנכונות לסייע בכל שאלה, על הדיונים המעניינים, ועל כך שלימד אותי לא לפחד לחדש. המון תודה לד"ר אלכס פרידמן על שלימד אותי אין ספור דברים חדשים והיה ליצידי בכל עת, על שלוש שנים של עבודה המשותפת ועל הידע שהעניק במהלכן ועל העזרה הבלתי פוסקת בכל התחומים.

ברצוני להודות לחברי המעבדה: ד"ר פאינה קופנסקי, מנחם כץ, ודניאל לוי על תמיכתם.

עבודה זו בוצעה במרכז למוליכות-על שבמחלקה לפיזיקה באוניברסיטת בר-אילן, ועל כן ברצוני להודות לראש המחלקה פרופ' ריצ'ארד ברקוביץ', סגן ראש המחלקה ד"ר יוסי בן ציון, פרופ' אבנר שאולוב ולצוות מזכירות המחלקה: רחל רוטברג ושרה ביאלקוביץ'.

תודה למשפחתי היקרה שתמכה ועזרה ועודדה אותי לגדול ולא לעצור.

מחקר זה ממומן בחלקו על ידי משרד האנרגיה והמייים.

תוכן עניינים

1	תקציר	
3	פתח דבר	
6	מבוא	1
6	רקע כללי	1.1
12	טכנולוגיות FCL קיימות	1.2
12	FCL התנגדותי	1.2.1
13	FCL השראותי	1.2.2
15	Open Core FCL	1.2.3
16	פקטור דה-מגנטיזציה (DEMAGNETIZATION FACTOR)	1.3
20	השראות INDUCTANCE	1.4
22	פקטור דה-מגנטיזציה שימושי	1.5
24	מטרת המחקר	2
26	התקן FCL חד-פאזי ראשון	3
33	מודל FCL משופר בהספק של 120kVA	3.1
38	אורך אפקטיבי של הליבה	4
46	דגם מעבדה – השראות לא ליניארית	5
48	אפיון המגנטיזציה בליבה	5.1
52	תוצאות סימולציות	5.1.1
54	מדידות של FCL ברשת החשמל	5.2
55	Nominal regime	5.2.1
56	Fault Regime	5.2.2
58	חישוב השראות ופתרון אנליטי	6
60	פתרון המשוואה	6.1
61	Nominal and overload regimes	6.1.1
63	Fault regime	6.1.2
66	Fault regime in 400V grid	6.1.3
69	התפלגות לוקאלית של הפרמטרים המגנטיים	7
75	סיכום	8

תקציר

בעיית זרמי הקצר ברשתות הולכה והשנאה במתח גבוה ובינוני הופכת להיות משמעותית מאד ככל שהדרישה וכושר ייצור החשמל עולים בעולם וככל שנדרשים חיבור מקורות אנרגיות מתחדשות אל הרשת. התקן מגביל זרם קצר (FCL) המבוסס על ליבות מגנטיות ברוויה הוא אחד המועמדים המבטיחים להציע פתרון טכנולוגי לבעיית זרמי הקצר.

ה-FCL הוא מערכת מגנטית מורכבת מאד. באופן בסיסי ההתקן הינו סופרפוזיציה של שני מעגלים מגנטיים החולקים ליבה מגנטית משותפת. מעגל אחד הוא מעגל מגנטי סגור DC אשר תפקידו להכניס את הליבה לרוויה. המעגל השני הוא מעגל מגנטי פתוח AC והוא מחובר בטור לרשת. החיבור בין השטפים של שני המעגלים קובע בכל רגע ורגע את מצב הליבה, השדות הפנימיים בה, הפרמביליות וההשראות הכוללת של ההתקן. התוצאה היא מערכת מגנטית לא לינארית, אי-הומוגנית עם צימוד אלקטרומגנטי בין המעגלים.

בעבודה זו ניתחנו לעומק את הדינמיקה של המעבר בין המצב המגנטי הרווי לבלתי רווי בליבה כפונקציה של המקום והזמן. הראנו כי התפשטות האזור הבלתי רווי היא מן המרכז לקצוות והצענו להסתכל על "אורך ליבה אפקטיבי" תלוי זרם המתאר את הנפח הבלתי רווי התורם לפרמביליות ולהשראות. הגדרנו "פקטור דה-מגנטיזציה חדש" באמצעותו ניתן, לראשונה, לחשב את הפרמביליות בליבה כתלות במקום ובזמן ומתוך כך לחשב גם את השראות הסלילים, הפרמטר הקריטי לפעולת ה-FCL. הצענו גם שיטה למדידת ההשראות הלא לינארית $L(I)$ וקיבלנו התאמה מצוינת בין ההשראות שחושבה לבין זו שנמדדה.

ההשראות הלא לינארית אפשרה בפעם הראשונה לפתור באופן נומרי את המשוואה הדיפרנציאלית המתארת את רשת החשמל עם ה-FCL ללא צורך בסימולציות FEM טרנזיאנטיות לכל נקודת עבודה. הפתרונות שקיבלנו מתארות באופן מלא את פונקציות הגל של המתח והזרם ב-FCL והתקבלה התאמה מעולה איכותית וכמותית בין צורת הגל הללו לאלו שנמדדו.

הבנת הדינמיקה של השינויים המגנטיים בליבה יחד עם השיטות החדשות שהוצעו בעבודה זאת מהווים קפיצת מדרגה בכלים לניתוח ותכנון התקני FCL עתידיים, תוך חיסכון זמן ומשאבים רבים ומציעים את הטכנולוגיה צעד משמעותי קדימה בדרך למימוש מוצלח שלה ופתרון בעיית זרמי הקצר.

פתח דבר

עבודה זו עוסקת בדינמיקה של השינויים המגנטיים במערכת מגנטית מורכבת לא ליניארית כתלות בשדה מגנטי החיצוני. המערכת שנבחרה לצורך ביצוע מחקר זה היא התקן מגביל זרם קצר (FCL) המבוסס על ליבות מגנטיות ברוויה. בחירה זו נעשתה משני טעמים עיקריים:

1. התקן ה-FCL הוא בעל חשיבות יישומית עצומה בהיותו טכנולוגיה המאפשרת את צירופן של טכנולוגיות ייצור חשמל באנרגיות מתחדשות אל רשתות החשמל הקיימות, את חיבורן של תחנות כח חדשות אל רשתות קיימות ואת חיבורם של מקטעי רשת נפרדים במקביל לצורך שיפור איכות ויעילות הרשת. למעשה, בעיית זרמי הקצר ברשתות חשמל היא אחת הבעיות המרכזיות הניצבות בפני משקי האנרגיה בעולם בדרך למימוש חזון "הרשתות החכמות" העתידי (smart grids). עבודה אינטנסיבית נעשית בעולם לפיתוח מגביל זרם קצר מסוג זה כאשר כל העבודות הידועות אינן יודעות לתאר את התהליכים הדינמיים המתרחשים בעת המעברים בליבה בין המצב הרווי לבלתי רווי. לפיכך, הבנה כזאת תיתן יתרון משמעותי וכלים ייחודיים לתכנון ופיתוח התקנים משופרים. בהמשך נתאר את הטכנולוגיה ואת הידע הנמצא בשימוש בתחום.

2. מעבר לאתגר ההנדסי שמציב פיתוח ה-FCL עם ליבות מגנטיות ברוויה, הבעיה היא בעיה פיסיקלית סבוכה ומורכבת. בעקרון, הבעיה הפיסיקלית מתארת ליבה מגנטית עליה מורכבים בסופרפוזיציה שני מעגלים מגנטיים: מעגל מגנטי סגור DC ומעגל מגנטי פתוח AC. המקורות לשטף המגנטי במעגלים הללו הם סלילי DC ו-AC בהתאמה ומכיוון שהליבה משותפת לשני המעגלים, הרי שהסלילים מצומדים ביניהם באופן משתנה בתלות במצב הליבה. סך השטף המגנטי בנקודה כלשהיא בליבה תלוי במרחק מכל סליל ובזרם שבהם. מכיוון שכך, האינדוקציה המגנטית בליבה משתנה במקום ובזמן. מכיוון שהסלילים סופיים באורכם וחלקים מסוימים בליבה נמצאים ברוויה בעוד חלקים אחרים אינם ברוויה והתמונה המגנטית היא דינמית, לא ניתן למעשה להשתמש בחישובי דה-מגנטיזציה והשראות

מקובלים כדי לקבוע את מצב השטף בסליל ואת קצב השינוי שלו. באופן מעשי, התקן ה-FCL יכול להיראות כמערך סלילים על ליבה מגנטית בעלת "אורך משתנה בזמן" והוא, איפוא, דוגמא מצוינת לבעיה מגנטית לא-ליניארית, אי-הומוגנית ומצומדת התלויה בזמן.

הרוב המכריע של האפליקציות המגנטיות הדינמיות "בורחות" מאיזור העבודה הלא ליניארי. כך למשל, בשנאים, ריאקטורים, או רמקולים למיניהם, האיזור הלא ליניארי ממש לא רצוי ומשבש את פעולת ההתקן התקינה. בשנאים וריאקטורים, הכניסה לאיזור הלא ליניארי משמעה פגיעה בצימוד המגנטי, בריחת שטף והרמוניות גבוהות וברמקולים פירוש הדבר עיוות של הקול (distortion). לפיכך, מרבית המידע ההנדסי העוסק בתכנון התקנים מגנטיים מקובלים מתייחס בעיקרו לתחום הפעולה הליניארי ובאמצעים לשפר את הליניאריות של ההתקן. אין פלא, איפוא, שטכנולוגיה חדשה כמו ה-FCL חסרה את ההבנה הפיסיקלית של המתרחש באיזורים הלא ליניאריים של המערכת. התכונות של המערכות הראשונות היו ערים להבדלים המהותיים שבין ה-FCL לאפליקציות מגנטיות אחרות אך בהעדר כלים והבנה עמוקה של הבעיה, נסמכו על פתרונות של ביצועי ההתקן בנקודות קצה בודדות.

עבודת מחקר זו נכנסת לראשונה לעובי הקורה של הבעיה המגנטית הסבוכה. מאמץ רב הושקע בחיפוש אלטרנטיבה לחישובי דה-מגנטיזציה במקום בו אורך החומר המגנטי תלוי בזרם ומשתנה כל העת. גם חישובי השראות לסליל קצר כאשר הליפופים בסליל "רואים" כל אחד ליבה שונה נזקקו להבנה בסיסית חדשה. כפי שנתאר בהמשך, עבודות סימולציה טרנזיאנטיות אינטנסיביות, חשפו את המתרחש בתוך הליבה ואפשרו לנו לבוא עם רעיונות חדשים לשיפור ה-FCL. על סמך התמונה הדינמית שנצטיירה יכולנו, בפעם הראשונה, להגדיר "אורך חומר אפקטיבי" אשר בעזרתו עברנו לחשב מקדם דה-מגנטיזציה תלוי במקום ובזמן והשראות סליל התלויה בזרם. הרעיונות החדשים הללו שימשו אותנו כדי לנבא את התנהגות המערכת בכל מקום על פני הליבה, בכל זמן ולכל זרם. ניבויים אלו אומתו במדידות בהתקנים מעבדתיים שתוכננו ונבנו במסגרת עבודת מחקר זו.

מעבר לעניין המדעי בעבודה, למחקר זה חשיבות יישומית רבה. התוצאות שהתקבלו בעבודה זו מאפשרות למעשה לתאר באופן מלא את ההתנהגות של כל תצורת FCL מתוכננת, בכל זרם ובכל

רשת חשמלית, טרם בניית ההתקן. השיטות וההבנה שפותחו כאן חוסכות זמן פיתוח ומשאבים יקרים ויובילו להאצת הפיתוח של התקנים עתידיים.

העבודה מאורגנת כלהלן:

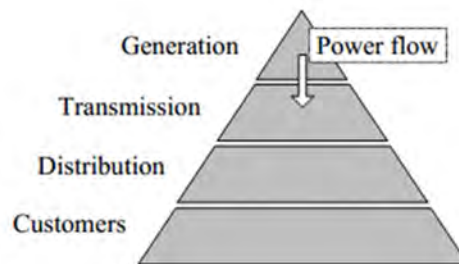
בפרק המבוא נתאר את טכנולוגית הגבלת זרמי הקצר ואת הנחיצות שבה. נמשיך ונתאר את הפתרונות השונים עליהם עובדים בעולם ואת הפתרון למגביל זרם קצר השראותי שפותח במעבדה ומוגן בפטנטים. נמשיך ונתאר את הבעיה הפיסיקלית העומדת בפני העוסקים ב-FCL השראותי ובפרט נעמיק בתפישה של מקדם הדה-מגנטיזציה, בפרמביליות ובהשראות במקרה בו המערכת לא ליניארית ואי-הומוגנית.

בפרקים הבאים נתאר את המצבים המגנטיים הדינמיים בליבה בהתקנים שונים שפותחו במעבדה. נתחיל בהתקן חד-פאזי שנבדק גם בחברת החשמל ונמשיך במודל חד-פאזי משופר ומוקטן שנבנה במסגרת עבודה זו לבדיקת המסקנות אליהן הגענו בסימולציות של התקני FCL. נתאר מדידות שבוצעו על המודל הזה במשטרי עבודה שונים כמו גם סימולציות מהן ניתן ללמוד על פרמטרים מגנטיים ועל ביצועי ההתקן כולו. נסיים בהרחבת הסימולציות לתיאור תלת-מימדי של ההתפלגות של הפרמטרים המגנטיים העיקריים בליבה.

1 מבוא

1.1 רקע כללי

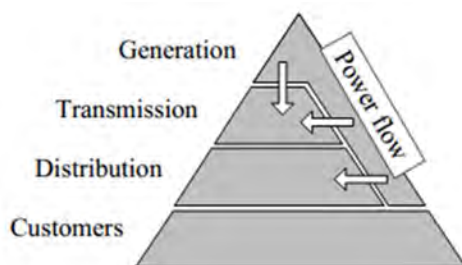
רשת החשמל היא מערכת מורכבת ובה רכיבים ומעגלים רבים המיועדים לייצור, העברה, השנאה וחלוקה של אנרגיה חשמלית¹. המצאת המערכת הרב-פאזית במתח חילופין, AC, על ידי ניקולה טסלה במאה 19 איפשרה לייצר ולהעביר אנרגיה חשמלית למרחקים גדולים. מערכות חשמל AC הפכו להיות הבסיס להתפתחות בעולם המודרני וכיום מערכות אלו מספקות אנרגיה לצרכנים בכל העולם. מערכות ההספק המודרניות מורכבות ממספר קטן יחסית של גנרטורים שמייצרים ומפיצים אנרגיה לכמות גדולה של צרכנים דרך רשתות מתח גבוה (HV) בינוני (MV) ומתח נמוך (LV)². מערך רשת כזה נקרא אנכי. (איור 1-1).



איור 1-1. ארגון אנכי של רשת החשמל (לקוח ממקור [8]).

הגידול באוכלוסיית העולם העושה שימוש בחשמל, ההתפתחות הטכנולוגית בתחום המחשוב והאלקטרוניקה וכמות מכשירי החשמל השונים ההולכת וגדלה מעלים את צריכת האנרגיה החשמלית כל שנה³. יותר ויותר אנרגיה חשמלית נדרשת במקומות ציבוריים, במפעלי ייצור שונים ובבתי אב. בנוסף, הכניסה הצפויה של מכוניות חשמליות לשימוש רחב תעלה את צריכת החשמל באופן קיצוני. למרבה הצער, רשתות החשמל אינן ערוכות כיום לגידול הצפוי. אחת מהבעיות הנלוות לגידול בייצור ובצריכה היא בעיית זרמי הקצר ברשת. בעיה זו היא הנושא המרכזי של עבודה זו. נרחיב עליה בהמשך.

כל מרכיביה של מערכת החשמל חייבים לעמוד בעומסים הקיימים ועתידים לבוא. לכן צריך להגדיל את יכולות הייצור, ההולכה וההפצה של מערכות קיימות. את כושר הייצור ניתן להגדיל על ידי התקנה של גנרטורים מרכזיים נוספים לצד מקורות אנרגיה מתחדשת. מחקרים מראים שמקורות אנרגיה כמו טורבינות רוח, אנרגיה סולרית וגאותרמית יהוו חלק ניכר מכלל ייצור אנרגיה חשמלית כבר בעתיד הקרוב. כבר ב-2010 עמדה ההפקה מטורבינות רוח באירופה בלבד על 84GW (5.3% מסה"כ צריכת החשמל באירופה - היעד לשנת 2020 הינו להגיע לייצור של 20%). חוות רוח או שמש יכולה להימצא בכל מקום ומשם היא מתחברת לרשת הכללית. מקורות אנרגיה מתחדשים יכולים להתחבר בכל שלב של זרימת ההספק, בדרך כלל לרשת המתח הבינוני. במקרים כאלו יקראו מקורות אלו בשם: Distributed Generators (DG). ההספק הנדרש על ידי צרכנים מגיע לא רק מהגנרטור המרכזי אלא גם מ-DG שנמצא באותה רמת מתח עם הצרכן. כתוצאה מכך סידור מערכת החשמל הכללית הופך מאנכי להיות אופקי איור 2-1.

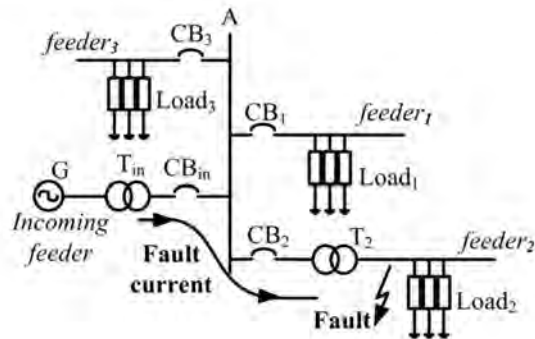


איור 2-1. ארגון אופקי של רשת החשמל (לקוח ממקור [8]).

להגדלת כושר הייצור יש שתי השלכות עיקריות על רשתות הולכה וחלוקה:

1. סיכון של עומס יתר במצב יציב – ההספק המיוצר ומועבר דרך הרשת יכול לעלות על יכולת העמידה של הציוד הקיים, כמו קווי תמסורת ושנאים.
2. זרמי קצר גבוהים – הגדלת הייצור והאנרגיה ברשת משמעותה שבעת קצר אנרגיה גבוהה יותר זורמת אל נקודת הקצר. בפועל פירוש הדבר שזרמי הקצר ברשת עשויים לגדול מעל לכושר הניתוק של המפסקים הקיימים.

יכולת העמידה של רשתות ההולכה והחלוקה חייבת לגדול ביחד עם הגדלת היצור והגדלת האנרגיה העוברת במצב נומינלי⁴. נדרשת התקנה של שנאים חדשים וקווי תמסורת שמסוגלים לעמוד בעומסים ובזרמי קצר החדשים. כמו כן, אפשר להקטין את האימפדנס האפקטיבי של הרשת וכך להעביר כמות גדולה יותר של אנרגיה חשמלית. אולם, הקטנת אימפדנס הרשת מגדילה את זרם הקצר שעלול לגרום נזק לציוד הקיים. בהקשר זה נציין כי החימום ברכיבים חשמליים, כמו גם הכוחות המכניים בהם, פרופורציוניים לריבוע הזרם ולכן זרמי הקצר עלולים לגרום לנזקים בלתי הפיכים (שריפה או פיצוץ) לרכיבי הרשת. לאור זאת, יש חשיבות עצומה להגנה של כל מרכיבי הרשת מפני זרמי קצר. קצרים ברשת החשמל הם בלתי נמנעים, הם יכול להיגרם מברקים, עץ שנפל או תקלה טכנית אחרת. האזור שגרם לקצר חייב להינתק משאר הרשת מהר ככל האפשר. זרמי קצר, אפילו באחד הענפים (איור 3-1), יכולים לגרום לחוסר יציבות לגנרטורים ולמערכת כולה אם לא נותקו בזמן. אי-יציבות של הגנרטור, עלולה לגרום לו נזק ולפיכך עלולה להוביל לניתוק הגנרטור. בחיבור מסורתי, כשגנרטור אחד מזין הרבה עומסים, ניתוק גנרטור ישאיר הרבה צרכנים בלי חשמל, גם את אלה שלא גרמו לקצר מלכתחילה. נקודה נוספת היא שקצר באחד הענפים גורם לירידת מתח בכל הענף. לפיכך, ניתוק מהיר של ענף שגרם לקצר חייב להתבצע על מנת להחזיר את רמת המתח הנומינלי ולשמור על תקינות שאר הרשת.



איור 3-1. תרשים של ענפים (feeders) של רשת החשמל. קצר באחד הענפים גורם לנפילת מתח בשאר הענפים ויכול לגרום לחוסר יציבות של הגנרטור G (לקוח ממקור [8]).

מספר שיטות לזיהוי זרמי קצר ומיקומם נמצאות בשימוש⁵. לכולן יש מטרה אחת: להבדיל בין מצב עבודה תקין לבין אירוע קצר. ברגע שזוהה זרם קצר, המפסק, (Circuit Breaker) CB,

שנמצא בענף המקוצר (ראה איור 1-3) מקבל פקודה לפתוח מעגל. מערכת ממסרים ומפסקים בנויה בצורה כזאת שתמיד האזור המינימלי האפשרי יתנתק מהרשת הכללית (איור 1-4). במקרים שהמפסק לא מצליח לנתק את הזרם, האפשרות היחידה היא לפוצץ את הקו. הגנה כזאת נקראת I_s limiter⁶. מכיוון ש CB הוא בפועל ההגנה הרגנרטיבית היחידה מפני זרם קצר יש חשיבות קריטית שהוא יתפקד גם כאשר זרם הקצר גבוה במיוחד.

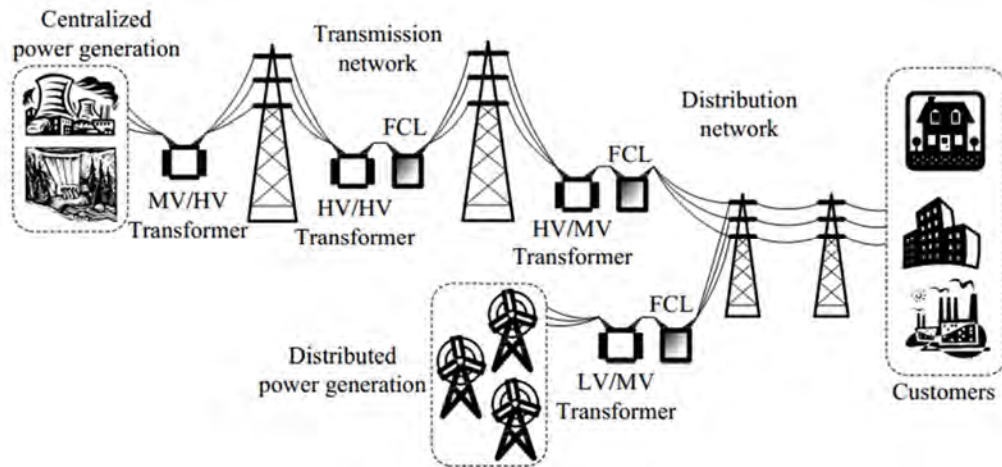
כושר הניתוק של מערכת CB עבור רשת מתח בינוני MV חייב לגדול בהתאם לזרמי הקצר הגבוהים. כיום, יכולת הניתוק המקסימלית עומדת על 80kA בגלל הגבלה פיזיקלית של החומר הדיאלקטרי (בדרך כלל Sulfur hexafluoride) המשמש לחנק הקשת בזמן הניתוק⁷. נכון להיום כבר נרשמו בעולם זרמי קצר בגובה של 70kA והם עולים בקביעות ויגיעו למקסימום יכולת הניתוק כבר בעתיד המאד קרוב. הגדלת כושר הניתוק מגדילה איתה את ההתקנים ויקרה בצורה לא מקובלת וחשוב מכל, לא מטפלת בשורש הבעיה. זרמי הקצר רק ימשיכו לגדול ובאופן בלתי נמנע יגיעו לקצה היכולת גם בגבולות החדשים שיושגו. אי לכך, לצד הפסקת זרם קצר על ידי CB עובדים גם על אמצעים להקטנתו בדרכים הבאות:

- פיצול הרשת – חלוקת הרשת לתת-רשתות מונעת מחלק אחד של הרשת לתרום לזרם הקצר בחלק השכן. הבעיה בפתרון זה שהוא מקטין את כמות גנרטורים הזמינים לעומסים גבוהים במצב הנומינלי והוא מנוגד למגמת העלייה של העומס והשאיפה לנצל הספק מענפים שכנים בעת צורך. יתר-על-כן, החזון העתידי של משק האנרגיה הגלובלי הוא לחבר את כל הרשתות בעולם ביניהן כך שבעת שבנקודה אחת הצריכה מינמלית (לילה) ההספק המיוצר יעבור אל נקודה אחרת בה הצריכה מקסימלית (יום).
- הגדלת אימפדנס הרשת – התקנת שנאים עם השראות גדולה יותר או הכנסת ריאקטורים מגדילים את אימפדנס הרשת גם בזמן קצר ובכך מקטינים את זרם הקצר בענף. מנגד, הדבר משפיע על יציבות המערכת בגלל שזמן ניקוי הקצר הנדרש על ידי הגנרטור קצר יותר. כמו-כן, בדרך זו מפל מתח המתפתח על השנאי או הריאקטור גדל וגורם להפסדים נוספים. בנוסף, עלות החלפת שנאים ברשת גבוהה במיוחד.

- שימוש בנתיך (פיזז) למתח גבוה (I_s limiter) – מנתק לגמרי את חלק הרשת הגורם לקצר מסוגל לעבוד בזרמים ומתחים גבוהים מאוד. החיסרון הגדול שעל מנת להחזיר את אספקת החשמל צריך להחליף באופן ידני את הפיזז, פעולה שאורכת זמן רב ודורשת אחזקת מלאי של חלקי חילוף בעלי עלות גבוהה.

הדרך האפקטיבית ביותר, הדרך בה נדון בעבודה זו, היא להגביל את זרם הקצר לפני שהוא מגיע לערכו המקסימלי. בכך ניתן למנוע שדרוגים בלתי פוסקים של ציוד הרשת. התקן להגבלת זרם צריך להיות מבוסס על אימפדנס נמוך במצב עבודה רגיל, כך שאפשר יהיה ליהנות מהיתרונות של רשתות מקבילות עם אימפדנס נמוך. בד בבד יציג ההתקן אימפדנס גבוה בעת קצר ויקטין את זרם הקצר הצפוי לתחום הניתן לניתוק בעזרת ההגנות המקובלות (CB). התקן מסוג זה נקרא מגביל זרם קצר (FCL (Fault Current Limiter) והוא צריך לשתף פעולה עם מערכות ההגנה הקיימות.

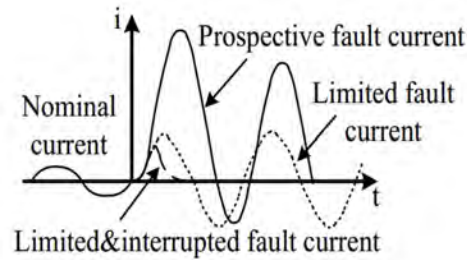
כאמור, ה-FCL הינו התקן בעל אימפדנס זניח במצב עבודה תקין של הרשת אבל מגביל את זרם הקצר לרמה רצויה בזמן קצר⁸. FCL יכול להיות מותקן בטור גם ברשת HV וגם ברשת MV.



איור 4-1. תרשים כללי של רשת החשמל עם התקני FCL. (לקוח ממקור [8]).

באיור 5-1 מוצגת צורת גל של זרם קצר טיפוסי בלי ועם FCL. לזרם הלא מוגבל יש מרכיב DC⁹ דועך שנובע מהשראות הרשת. לשיא הראשון של זרם קצר לא מוגבל יש ערך גבוה מערכו של

הזרם במצב היציב. נקודת השיא הראשונה גורמת לדחק מכני עצום¹⁰. לפיכך, FCL צריך להגיב מספיק מהר (לכל היותר 5ms אחרי תחילת הקצר) על מנת להגביל את השיא הראשון.



איור 5-1. צורת גל של זרם קצר מוגבל ולא מוגבל. (לקוח מ- CIGRE A3.10)

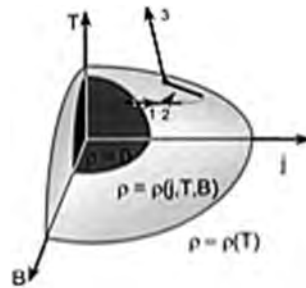
באופן אידאלי FCL צריך לעמוד בדרישות הבאות:

1. אימפדנס נמוך בזמן עבודה נורמלית של הרשת
 2. תגובה מהירה ויכולת הגבלה של הזרם כולל השיא הראשון
 3. חזרה אוטומטית ומהירה לאימפדנס נמוך אחרי שהקצר נוקה
 4. זמן תפקוד ארוך ללא הרעה ביכולת הגבלה
 5. אמינות גבוהה
 6. רמת הפסדים נמוכה
 7. ללא סיכון לאנשי התפעול
 8. מחיר סביר
 9. ידידותיות לסביבה – ללא שימוש בחומרים מזהמים
 10. אינטגרציה פשוטה לרשתות קיימות
 11. רמת תחזוקה נמוכה.
- מחקרים רבים נעשו בתחום ה-FCL בעשורים האחרונים^{5,11-17} במטרה לאפשר התקנה בטוחה ויעילה של ה-FCL ברשתות הקיימות. קיימות מספר שיטות לקבל את הפונקציונאליות הנדרשת¹⁸.

1.2 טכנולוגיות FCL קיימות

1.2.1 FCL התנגדותי

הגילוי של מוליכי-על בטמפרטורות גבוהות, הוליד אפשרות לפתרון חדש ומקורי לבעיית זרם הקצר¹⁹. דיאגרמת הפאזות של מוליכי-על (איור 6-1) מראה איזורים של שדה מגנטי, טמפרטורה וזרם בהם למוליך העל התנגדות פרקטית אפס (האיזור השחור המרכזי) ואיזורים אחרים בזרמים, שדות וטמפרטורה גבוהים יותר (איזור אפור) בהם מופיעה התנגדות חשמלית לא ליניארית במוליך העל²⁰. לפיכך, נראה טבעי ביותר לנסות ולהשתמש במוליכי-על כאלמנטים העוברים ממצב חסר התנגדות למצב התנגדותי כאמצעי להגבלת זרם קצר (Fault Current Limiter- FCL)^{16,18,19,21-24}.



איור 6-1. דיאגרמת פאזות טמפרטורה-שדה מגנטי-זרם חשמלי טיפוסית למוליכי-על. האיזור המרכזי הכהה הוא איזור ללא התנגדות והאיזור האפור הוא בעל התנגדות לא ליניארית

מרבית הפעילות בעולם מתרכזת בפיתוח FCL מוליך-על התנגדותי^{22 25-28} בו מוליך-העל נמצא בטור ברשת. כאשר זרם הרשת נומינלי, התנגדות מוליך-העל קטנה וכאשר מופיע קצר, הזרם הגבוה מעביר את מוליך העל למצבו הנורמלי, ההתנגדותי, וזרם הקצר מוגבל. יתרון השיטה ההתנגדותית הוא בפשטות הרעיון. חברות רבות בעולם כמו Siemens, American Superconductor, Rolls-Royce ועוד עובדות על פיתוח התקני FCL התנגדותיים. עם זאת, לשיטה זו חסרונות רבים שהולכים בהדרגה ומתבהרים²⁹:

1. הגבלת הזרם מבוססת על המעבר ממצב מוליך-על לנורמלי, מעבר הנמשך על פני זמן ארוך

יחסית

2. ההגבלה היא דינמית ושיא הזרם הראשון אינו מוגבל במלואו

3. יש הכרח לנתק את הזרם לאחר זמן קצר כדי למנוע פגיעה במוליך-העל

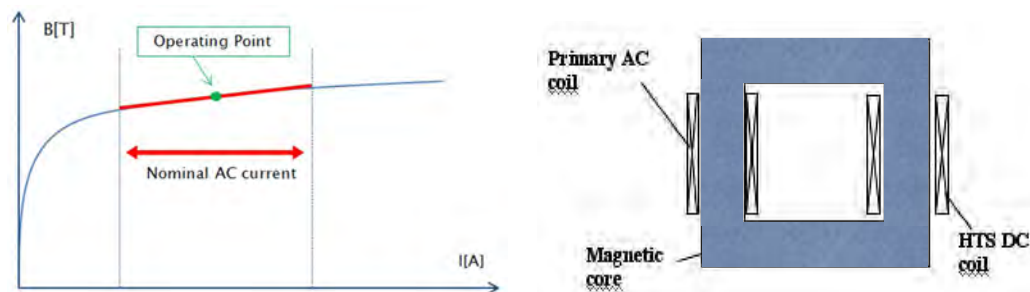
4. ההתאוששות לאחר חלוף הקצר היא פסיבית ואיטית

5. קיימים הפסדי AC משמעותיים במוליך-על גם בזרם נומינלי. הפסדים אלו מעמידים בסימן

שאלה את אפשרות השדרוג של ההתקן להספקים גבוהים.

1.2.2 FCL השראותי

גישה מתחרה עליה עובדים בעולם היא הגישה האינדוקטיבית המבוססת על ליבות מגנטיות ברוויה. גישה זו מבוססת על רעיון של Parton ושותפיו משנות השמונים^{30,31} ועל פיה סליל מוליך-על נושא זרם DC מלופף על ליבת ברזל סגורה כך שהשדה המגנטי DC מכניס את הליבה לרוויה (איור 7-1 א', ב'). סליל הרשת AC מלופף בצד השני של הליבה והוא "רואה" ברזל ברוויה כך שהאימפדנס הכללי של הסליל נמוך. תמונת השדה המגנטי בליבה מובאת באופן סכמטי באיור 7-1 ב' ומצביעה על כך שבמצב נורמלי של זרם AC נומינלי, הליבה ברוויה עמוקה והפרמביליות של הברזל נמוכה. בעת קצר, זרם ה-AC הגבוה מוציא בכל חצי מחזור את הליבה מרוויה, האימפדנס של הסליל גדל וזרם הקצר מוגבל. באופן עקרוני יש צורך להכפיל את המבנה המתואר כאן כדי לטפל בשני חצאי המחזור.



איור 7-1 . א'- תיאור סכמטי של ליבת ברזל עליה מלופפים בצד אחד סליל מוליך-על DC ובצד שני סליל הרשת AC. ב'- תיאור סכמטי של השדה המגנטי בליבה כתלות בסך הזרם AC+DC בסלילים

יתרונות השיטה העיקריים:

1. ההגבלה אינה נסמכת על המעבר ממצב מוליכות-על למצב נורמלי. מוליך העל נמצא בכל עת

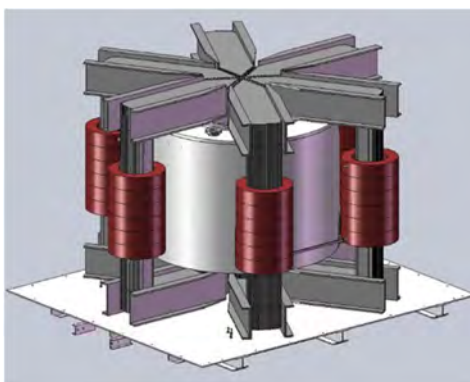
במצבו חסר ההתנגדות

2. ההגבלה פסיבית, אוטומטית ומיידית. שיא הזרם הראשון מוגבל.

3. זמן ההתאוששות בחלופי הקצר הוא מיידי (אפס).
4. ניתן להחזיק את המגביל במצב הגבלה כל זמן שנדרש. תכונה זו מאפשרת "סלקטיביות", כלומר מפסקים במורד הרשת במקום בו התרחש הקצר יכולים להפתח ו"לנקות" את הקצר ללא צורך בניתוק ענפים ראשיים יותר.
5. מוליך העל עובד במצב DC כל העת ומציג הפסדי אנרגיה מינימליים.

לשיטה גם חסרונות:

1. ההתקן בעל מימדים ומשקל גדולים עד כדי כך שהוא לא היה כלכלי במהלך השנים מאז הוצע הרעיון
2. בעת ארוע קצר, הליבה אינה ברוויה ונוצר צימוד מגנטי בין סלילי ה-AC וה-DC. כתוצאה מכך, נופל מתח גבוה על סליל ה-DC ועל מקור הזרם שלו שאינו מסוגל לעמוד במתח גבוה ביציאות שלו. יתר-על-כן, הגנה על מקור הזרם (בדר"כ קבל ביציאה) יוצרת מצב של שנאי עם סליל משני מקוצר ולמעשה פעולת ההגבלה נפגעת משמעותית במצב זה. זוהי בעיה טכנולוגית משמעותית של FCL קונבנציונלי עם ליבות ברוויה. Parton^{30,31} ניסה להתמודד עם בעיה זו באמצעות הוספת סלילים בטור המשמשים כ-chokes. הבעיה בפתרון זה היא הגדלה נוספת של ממדי ההתקן ומסתו והתרחקות נוספת שלו מכדאיות כלכלית.
- שני החסרונות העיקריים הללו מנעו במשך השנים את הפיכתו של ה-FCL עם ליבות ברוויה למוצר מסחרי. בשנים האחרונות נעשו ניסיונות מחודשים לשפר את ה-FCL הזה כאשר לנו ידועים - בנוסף לפיתוח שלנו אותו נתאר להלן בהרחבה - שני פיתוחים משמעותיים בנושא. שתי קבוצות המחקר הנוספות הפועלות בכיוון זה הן הקבוצה הסינית של Xiao and Lin³² וקונסורציום אמריקאי-גרמני-בריטי-אוסטרלי אותו מובילה חברת Zenergy הגרמנית-בריטית²⁹. שתיהם התעלמו מבעיית הצימוד המגנטי בעת קצר והם בונים התקן בו סליל DC אחד משותף ל-6 ליבות, כל אחת מהן מטפלת בחצי זמן מחזור רשת (איור 8-1). העובדה ששתי הקבוצות לא התמודדו עם בעיית הצימוד המגנטי, גוררת מצב בו הגבלת הזרם בעת קצר היא קטנה. בדיווח שנתפרסם באפריל 2008, הוצג הפרוייקט של הקונסורציום והובהר כי הצליחו להשיג הגבלת זרם קצר נמוכה בלבד, בשיעור של 10-23% מהזרם הלא מוגבל²⁹.



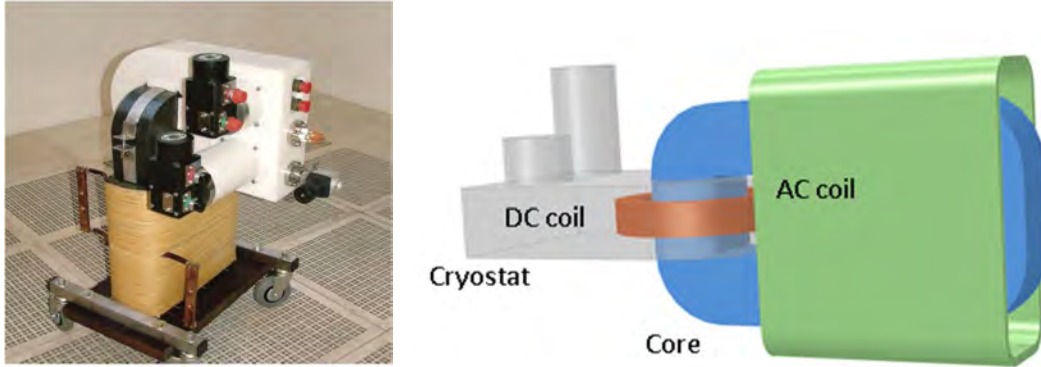
איור 8-1. סכימת הליבות והסלילים ב-FCL של קונצורציום Zenergy.

Open Core FCL 1.2.3

למרות הבעיות שתוארו לעיל, השיטה ההשראותית עדיין נראית כמבטיחה ביותר^{29,33}. קבוצת המחקר במעבדה שלנו, בשיתוף פעולה עם חברת "ריקור", השיגה פריצת דרך משמעותית בפיתוח FCL המבוסס ליבה מגנטית ברוויה³⁴. הפיתוח מציג הקטנה משמעותית של נפח ומשקל ההתקן ופותר בעיה טכנולוגית מעכבת של צימוד מגנטי בין סלילים. ההתקן שפיתחה הקבוצה נבדק בהצלחה. חברת סטארט-אפ בשם GridON קמה לצורך מסחור הטכנולוגיה, והתקנה ראשונה ברשת חשמל אירופית צפויה להתממש בתוך כשנה. הטכנולוגיה גם זכתה לאחרונה בשני פרסים בינלאומיים יוקרתיים^{35, 36}. במחקר הושגה פריצת דרך משמעותית ונבנה FCL חד-פאזי בו התגברנו על שתי הבעיות המשמעותיות שנזכרו לעיל.

איורים 9-1 א' ו-ב', מציגים את סכימת ה-FCL שפותח בבר-אילן (9-1 א') ואת התמונה הממשית שלו (9-1 ב'). המתקן, בהספק נומינלי של 120kVA, נבנה בבר אילן ונבדק בהצלחה במעבדות חברת החשמל הישראלית. ה-FCL שפותח מציע גישה חדשנית ותכנון קומפקטי של FCL בו הסליל מוליך העל DC מלוּפף על הליבה במעגל מגנטי סגור. סליל הרשת, AC, מלוּפף מחוץ לליבה על שתי צלעות מקבילות שלה באופן היוצר מעגל מגנטי פתוח. סליל ה-AC היחיד מטפל בשני חצאי מחזור זרם הקצר כאשר בכל חצי מחזור צלע אחרת יוצאת מרוויה ותורמת לאימפדנס הסליל ולהגבלת הזרם. בעיית הצימוד המגנטי בין סלילי ה-DC ל-AC, נפתרת גם היא בשיטה זו מכיוון

שהסלילים אורתוגונוליים אחד לשני ונמצאים על מעגלים מגנטיים שונים. המדידות מראות כי הצימוד בין הסלילים יורד בשני סדרי גודל, כך שרק כ-1% מהשטף המגנטי AC עובר דרך הסליל מוליך העל. פתרון בעיית הצימוד מגדיל את יעילות העבודה של ה-FCL ומאפשר לקבל הגבלת זרם קצר של פי 2 עד 2.5, בדיוק התחום הנדרש ע"י חברות החשמל בנקודות פוטנציאליות רבות להתקנה. עקרונות הפיתוח של בר-אילן ותוצאות הבדיקות מתוארות בפטנטים ובמאמרים³⁷⁻³⁹.



איור 9-1. א'. תיאור סכמתי של הליבה וסלילי ה-AC, DC ב' - תמונה של התקן ה-FCL בהספק נקוב של 120 kVA שפותח ונבדק בחברת החשמל

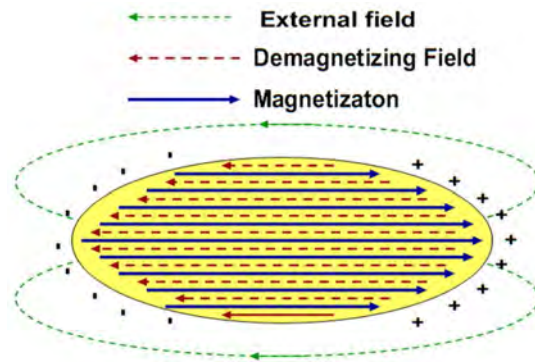
הפיתוח של ה-FCL על עקרון ליבה מגנטית פתוחה מחייב אותנו להסתכל על המעגל המגנטי עם שדות לא הומוגניים בעזרת חישובים לוקאליים של השדות שכוללים גם שדות דה-מגנטיזציה עקב היווצרות קטבים מגנטיים.

1.3 פקטור דה-מגנטיזציה (Demagnetization factor)

כשגוף נמצא בשדה מגנטי חיצוני H נוצרת אינטראקציה בין החומר לשדה. השדה בתוך הגוף H' שונה מהשדה החיצוני בגלל המגנטיזציה. מכיוון שקווי שדה "בורחים" מהצדדים מתקבלת מגנטיזציה לא אחידה. (מגנטיזציה אחידה מתקבלת רק עם החומר מעוצב לאליפסואיד של סיבוב (איור 10-1)). $H' = H - NM$ כאשר H הוא השדה החיצוני, N מקדם הדה-מגנטיזציה ו- M המומנט המגנטי של החומר. עבור אליפסואיד סיבוב אידיאלי נקבל פקטור דה-מגנטיזציה

$$N = \frac{1}{m^2-1} \left[\frac{m}{\sqrt{m^2-1}} \cdot \text{Ln} \left(m + \sqrt{m^2-1} \right) \right]$$

כאשר m הוא היחס בין הצירים של האליפסואיד. הסכום של שלושת מקדמי הדה-מגנטיזציה $N_x + N_y + N_z = 1$. במציאות, חומר פרומגנטי בנוי מאזורים (magnetic domains) הממוגנטים בכיוונים שונים כך שאפילו דגם בצורת אליפסואיד לא יכול להיות ממוגנט הומוגנית.



איור 10-1. שדות מגנטיים בתוך ומחוץ לגוף ממוגנט. מגנטיזציה (כחול), שדה דה-מגנטיזציה (אדום) ושדה חיצוני (ירוק) (תמונה לקוחה מ- UCLA Magnetic Materials Lecture)

קיימים שני סוגים של מקדמי דה-מגנטיזציה^{40, 41} - פלקסומטרי ומגנטומטרי. להלן נפרט:

פלקסומטרי (fluxmetric) - מקדם דה-מגנטיזציה שמתייחס למישור החיתוך של הגוף במרכז. מקדם זה מתאים למדידות עם סליל דק ממוקם במרכז הדגם, דהיינו השדה החיצוני מקורב ללולאת זרם.

מגנטומטרי (magnetometric) - מקדם דה-מגנטיזציה המתייחס לממוצע מגנטיזציה של הדגם כולו. מתאים למדידות של דגמים קטנים עם סליל סולנויד ארוך, כלומר הקירוב הוא לשדה חיצוני הומוגני.

הפרמביליות היחסית האפקטיבית, הנראית, (Apparent Permeability), μ_a , של הגוף שונה מערך הפרמביליות היחסית μ_r של החומר בגלל שדות דה-מגנטיזציה:

$$\mu_a = \frac{B_i}{\mu_0 H_a}$$

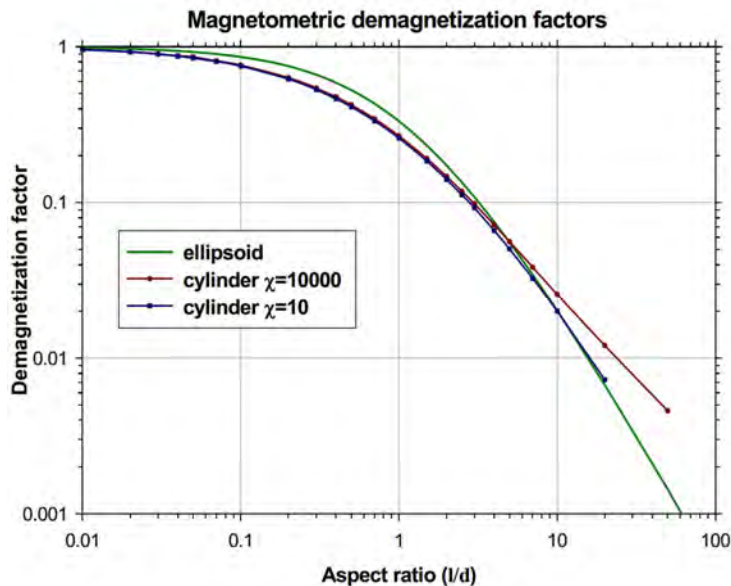
$$\mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_a (H + NM) = \mu_0 \mu_a \left[H + N \left(\frac{B}{\mu_0} - H \right) \right]$$

$$\mu_r = \mu_a [1 + N(\mu_r - 1)]$$

$$\mu_a = \frac{\mu_r}{1 + N(\mu_r - 1)}$$

ההשראות של סליל המלופף על גוף מגנטי תהיה נתונה ע"י: $L = \mu_a L_0$, L_0 הינה השראות הסליל באוויר.

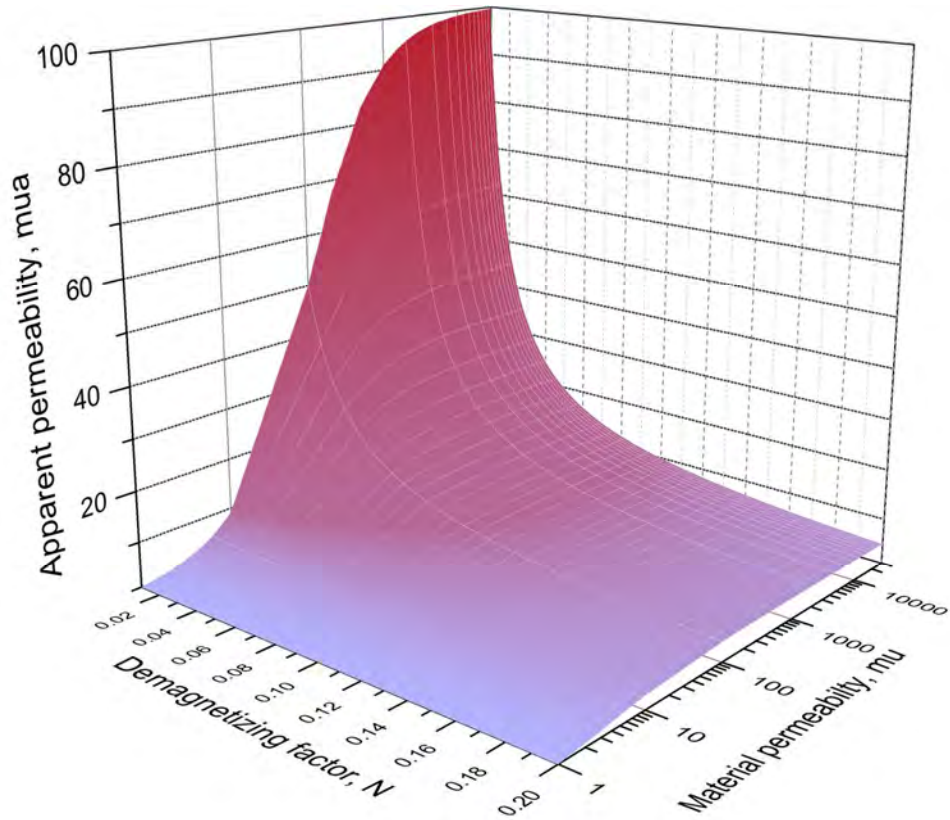
עבור צורות גוף שונות מאליפסואיד חישוב מקדם הדה-מגנטיזציה מורכב בהרבה מכיוון שהמגנטיזציה של החומר אינה אחידה. במקרים כאלו המקדם ניתן לחישוב בצורה נומרית בלבד. עבור גופים ארוכים (צילינדר ארוך), מקובל להשתמש בקירוב של אליפסואיד. אם יחס הצירים (m) גדול מ-20, השגיאה קטנה והיא בסביבות 0.5%. אם m קטן השגיאה גדלה משמעותית.



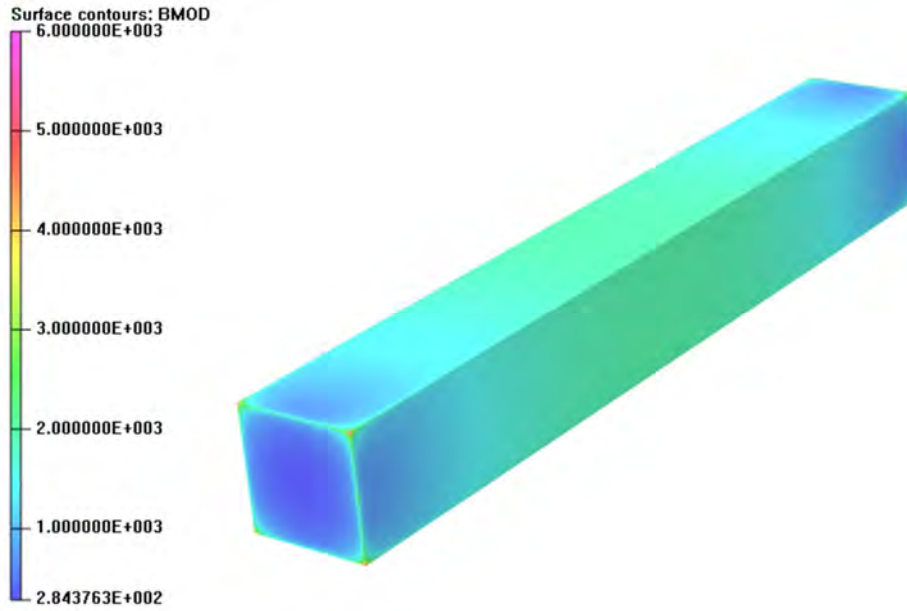
איור 11-1. פקטור דה-מגנטיזציה מגנטומטרי כפונקציה של יחס בין הציר הארוך לקצר באליפסואיד וגליל עם ערכי χ שונים

באיור 11-1 מוצג פקטור דה-מגנטיזציה מגנטומטרי כתלות ביחס בין ציר הארוך לקצר עבור אליפסואיד וגליל עם ערכי סוספטביליות שונים. בדגמים עם יחס הצירים גדול שדות דה-מגנטיזציה מספיק קטנים ולכן אפשר לקבל אינדוקציה גבוהה בדגם. באיור 12-1 תלות של פרמאביליות נראית (אפקטיבית) בפקטור דה-מגנטיזציה מ 0.015 ועד 0.2 וגם בפרמאביליות האינטרינזית של החומר

מ-1 עד 30000. אפשר לראות את הירידה החדה בערך הפרמאביליות הנראית עם עליית פקטור הדה-מגנטיזציה. לדוגמה עבור ערך הדה-מגנטיזציה של 0.1 השראות הסליל מלוכף על ליבה עשויה מחומר עם פרמאביליות של 30000 או 100 תהיה כמעט זהה.



איור 12-1. תלות של פקטור דה-מגנטיזציה בפרמאביליות האפקטיבית עבור פרמאביליות אינרניציות של החומר מ-1 עד 30000.



איור 13-1. דוגמא למגנטיזציה לא הומוגנית של גוף שנמצא בשדה חיצוני אחיד.

במקרה של גוף בצורה כללית עם μ לא ליניארי (חומרים פרומגנטיים) ושדה חיצוני לא אחיד נקבל שצפיפות הקטבים המגנטיים בתוך הגוף לא אחידה: $\sigma_v = -\nabla \cdot M \neq 0$. זה מוביל אותנו לבעיה מורכבת בעלת פתרון נומרי בלבד שבה נטפל בסעיפים הבאים.

1.4 השראות Inductance

השראות הסליל מוגדרת כיחס בין השטף המגנטי המושרה, Φ , לזרם, I , הזורם בסליל בכל ליפוי הסליל: $L_s = \sum_i \frac{\Phi_i}{I}$. במקרה של השראות לא ליניארית נהוג להשתמש בהגדרה הדיפרנציאלית: $L_d = \sum_i \frac{d\Phi_i}{dI}$.
מכאן מקבלים:

$$\sum_i \Phi_i = L_s(I)I = \int L_d(I)dI$$

לפי חוק פרדיי המתח המושרה בסליל $V = \sum_i \frac{d\Phi_i}{dt}$

עבור השראות ליניארית

$$V = \sum_i \frac{d\Phi_i}{dt} = \frac{d}{dt}(L_s(I)I) = \left(L_s(I) + I \frac{dL_s(I)}{dI}\right) \frac{dI}{dt}$$

ועבור השראות דיפרנציאלית:

$$V = \sum_i \frac{d\Phi_i}{dt} = \sum_i \frac{d\Phi_i}{dI} \frac{dI}{dt} = L_d(I) \frac{dI}{dt}$$

אם נשווה את שני המתחים נקבל ש:

$$L_d(I) \equiv L_s(I) + I \frac{dL_s(I)}{dI}$$

על מנת לקבל את הפונקציית ההשראות הדיפרנציאלית $L_d(I)$ משתמשים בפתרון נומרי בשיטת (IEM) Incremental Energy Method ⁴².

האנרגיה של הסליל נתונה ע"י: $W = \int IV dt = \int IL_d(I) dI$ מכאן יוצא ש:

$$L_d(I) = 2 \frac{d^2W}{dI^2}$$

התנהגותו המגנטית והחשמלית של התקן FCL לא ניתנת לתיאור אנליטי בגלל היותו מערכת מגנטית מצומדת, לא הומוגנית ואי-ליניארית. לפיכך, הדרך היחידה, לבד מבניה פיסית של ההתקן, היא לפתור פתרון נומרי את המשוואות הדיפרנציאליות החלקיות המתארות את ההתקן. (המתודולוגיה המקובלת לפתרון היא השימוש בשיטת האלמנטים הסופיים (FEM) Final Elements Method). מתוך הפתרון הנומרי אפשר, בעזרת אינטגרציה על המרחב, לקבל את האנרגיה המגנטית של הסליל. בעקרון, מבצעים שינוי קטן בזרם ובודקים את השינוי באנרגיה. באופן זה, לכל נקודה של $L_d(I)$ נדרשות שלוש סימולציות FEM. הנחת השיטה היא שההשראות לא משתנה כתוצאה מהשינוי הקטן בזרם והנחה זו מוצדקת רק כאשר שינוי הזרם אינפיניטיסימלי קטן. ככל שמקטינים את השינוי בזרם, כך קטן גם השינוי באנרגיה. על פני האנרגיה האגורה בשדה DC השינויים אלו מאוד קטנים. הדבר מהווה בעייה מכיוון שחישוב האנרגיה בעזרת FEM מעצם היותו

חישוב מקורב מכניס בעצמו שגיאה שחייבת להיות בסדרי גודל קטנה יותר מהפרש האנרגיה. לקבלת תוצאה מדויקת כל כך זמני החישוב גדלים באופן ניכר.

בעבודה זו אנחנו מציעים גישה שונה לחישוב ההשראות העצמית. הגישה מבוססת על שימוש בהשראות ליניאריות במקום דיפרנציאליות. את הסכום על כל הליפופים של הסליל ניתן להחליף באינטגרל על אורך הסליל:

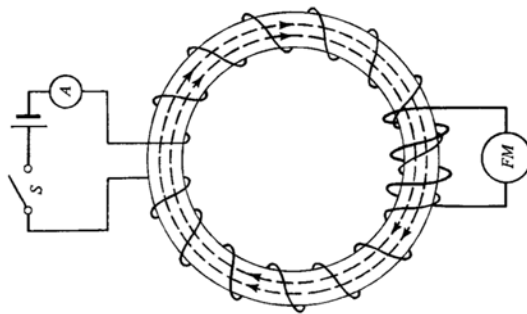
$$L_s(I) = \sum_i \frac{\Phi_i^*}{I} = \frac{N}{l} \int_0^l \Phi^* dl = \frac{N}{l} \int_0^V B^* dV$$

כאשר l הוא אורך הסליל עם N ליפופים, V הוא נפח הליבה מתחת לסליל ו- I הוא הזרם הרגעי בסליל. $\Phi^* = \Phi - \Phi_{DC}$ הוא השטף המגנטי של סליל ה- AC בלבד כלומר, ללא שטף DC. פתרון המודל של ה- FCL בעזרת FEM נותן את התפלגות השדה במרחב בנפח הליבה בכלל ומתחת לסליל בפרט. ראשית, יש לפתור את המודל ללא זרם בסלילי ה- AC ולקבל את ערכי המגנטיזציה בליבה הנובעים רק מסלילי ה- DC. את מצב הליבה המתקבל יש לחסר מהפתרונות בנקודות זרם אחרות כך שכל שינוי בשדה יהיה כתוצאה משינוי בזרם ה- AC בלבד. בדרך זו ניתן למפות את L_s עבור כל ערך זרם הזורם בסליל בלי צורך להניח דבר וללא תלות בנקודות אחרות. לאחר בניית הפונקציה המלאה אפשר לגזור אותה לקבלת ההשראות הדיפרנציאליות.

1.5 פקטור דה-מגנטיזציה שימושי

כפי שאמרנו בסעיפים הקודמים, מקדם הדה-מגנטיזציה מייצג תופעה המתנגדת למיגנוט על ידי שדה חיצוני או פנימי במקרה של מגנטים קבועים. פקטור דה-מגנטיזציה אפסי מתקבל כאשר המסלול המגנטי של קווי השדה כולו נמצא בתוך הגוף. גוף שעונה על קריטריון כזה חייב להיות בצורת טבעת סגורה (טורואיד). למעשה, זוהי הטכניקה למדידת תכונות מגנטיות של חומרים בלי צורך להכניס תיקונים הנובעים מהגיאומטריה של הדגם. סליל שמלופף על כל הדגם בצורת טורואיד ⁴³ (איור 14-1) מייצר צפיפות קווי שדה אחידה בתוך הגוף. עבור גופים לא סגורים ושונים

מאליפסואיד סיבוב, משתמשים בפקטור דה-מגנטיזציה ידוע עבור גאומטריה ופרמביליות נתונים. גם עבור התקן FCL היינו רוצים להשתמש בפקטור דה-מגנטיזציה ידוע. אולם, אחת הבעיות במערכת זאת היא להגדיר את צורת הגוף. כאשר הליבה רוויה והפרמביליות מאד קרובה לזו של אוויר, אין משמעות לדה-מגנטיזציה מכיוון שבאופן מעשי הדבר דומה לגוף אוויר בתוך אוויר. אולם, בזמן שהליבה יוצאת בהדרגה מרוויה, בעקבות עליית הזרם בסלילי ה-AC, "נוצר" יותר ויותר חומר עם תכונות מגנטיות שונות מאוויר. מכיוון שאנחנו מעוניינים לאפיין FCL מנקודת המבט של השראות הסליל, נתייחס לנפח הליבה שבתוך לסליל ככל הגוף. כל סליל AC באורך שונה ומספר ליפופים שונה יתנהג אחרת ויגרום לשינוי מגנטיזציה בליבה משלו. לכן, נגדיר פקטור דה-מגנטיזציה שימושי שיהיה תלוי בזרם הסליל ויתייחס לסליל מסוים עם נתונים ספציפיים. כפי שנראה בהמשך, הדבר יאפשר אנליזה פיסיקלית עמוקה יותר של התהליך והשפעת פרמטרים שונים של המערכת.



איור 14-1. מערכת מדידה של חומרים מגנטיים. במעגל מגנטי סגור טורואידאלי אין הוצרות קטבים מגנטיים

נתייחס לסליל כאוסף של ליפופים בודדים. סה"כ השראות הסליל נתונה ע"י סכום של הפרמביליות האפקטיבית הלוקאלית, μ_a^i , כפול השראות אוויר לוקאלית של אותו המקטע בסליל. חשוב לציין שבגישה הזאת הכוונה היא לליפוף בודד שנמצא בתוך הסליל ומושפע משאר הליפופים כך שאפילו בסליל אוויר לא כל הליפופים מציגים אותה השראות.

$$L = \sum_i^N \mu_a^i L_{air}^i$$

$$\mu_a^i = \frac{L_s^i}{L_{air}^i} = \frac{\Phi_i^*}{\Phi_i^{air}} = \frac{\mu_r^i}{1 + N_i^*(\mu_r^i - 1)}$$

N_i^* הוא פקטור דה-מגנטיזציה הלוקאלי

השדה $\mu_r^i = \frac{B_{in}}{\mu_0 H_{in}}$ הוא הפרמביליות הלוקאלית האינהרנטית של החומר כלומר, צפיפות קווי השדה

חלקי השדה בתוך החומר. הפרמביליות מתוארת למעשה ע"י עקומת BH של החומר. H_a^i – השדה

החיצוני הלוקאלי שהסליל מייצר בריק. את המשוואה עבור N ניתן לכתוב בצורה הבאה:

$$N_i^* = \frac{B_{in}^i H_a^i - H_{in}^i (B_{DC}^i - B_{in}^i)}{(B_{in}^i - H_{in}^i)(B_{DC}^i - B_{in}^i)}$$

שיטה זו מגדירה למעשה את הדה-מגנטיזציה עבור סליל נושא זרם AC. מטבע הדברים, כאשר אין

זרם בסליל AC הבעיה אינה מוגדרת וכך גם המשוואה האחרונה אינה מוגדרת לזרם אפס.

2 מטרת המחקר

ככל שטכנולוגיית ה-FCL ההשראותי המבוסס ליבות ברוויה מתקדמת, מתברר כי נותרו עדיין

שאלות בסיסיות פתוחות הקשורות בהבנת התהליכים הפיסיקליים המתרחשים בליבות המגנטיות.

בעת פעולת ה-FCL עוברות הליבות בין מצבי רוויה מלאים לחלקיים באופן לא הומגני ולא ליניארי

ובתלות בפרמטרים רבים הקשורים זה בזה. השאלה הפתוחה העיקרית, שהיא הבסיס למחקר זה:

מה האופן בו מתרחש תהליך המעבר בין מצבי המגנטיזציה בליבה כתלות בזרם ובזמן? התכנון של

מגבילי זרם קצר מבוססים ליבות מגנטיות ברחבי העולם מניח בקירוב כי הליבה כולה יוצאת מרוויה

באופן הומוגני. החישובים המגנטיים ולוקחים בחשבון כאילו כל נפח הליבה עובר בעת

מחזור של זרם קצר ממצב של רוויה מלאה בכיוון אחד למצב של רוויה מלאה בכיוון אחר עם מעבר

דרך אפס שטף מגנטי בליבה. בפועל, המצב מורכב הרבה יותר ומצב הליבה תלוי בדה-מגנטיזציה

המוגדרת ע"י הגיאומטריה של הליבה והסלילים והזרם בכל נקודת זמן. בעבודה זו נחקרה הדינמיקה

של המעבר בין מצבי הליבה והודגמה החשיבות של הבנת דינמיקה זו. בהמשך נראה כי תחילה יוצא

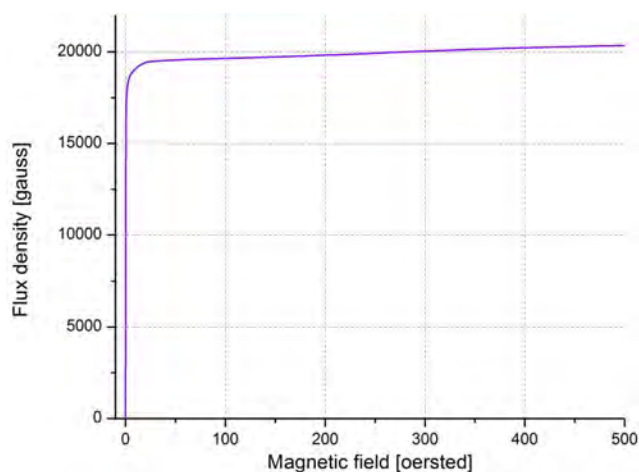
מרוויה האיזור שמתחת לסליל AC ובמרכזו. עם עליית זרם הקצר הנפח הבלתי רווי מתפשט

בהדרגה אל קצוות הסליל. רמת אי-ההומוגניות של השטף בליבה נקבעת ע"י הקונפיגורציה

המסויימת של מגביל הזרם. מקצת מתוצאות העבודה הוצגו בכנס Magnet Technology 2011.³⁹

כפי שניתן לראות באיור 2-2, ליבת הברזל מציגה מגנטיזציה לא הומוגנית עם פקטור דה-

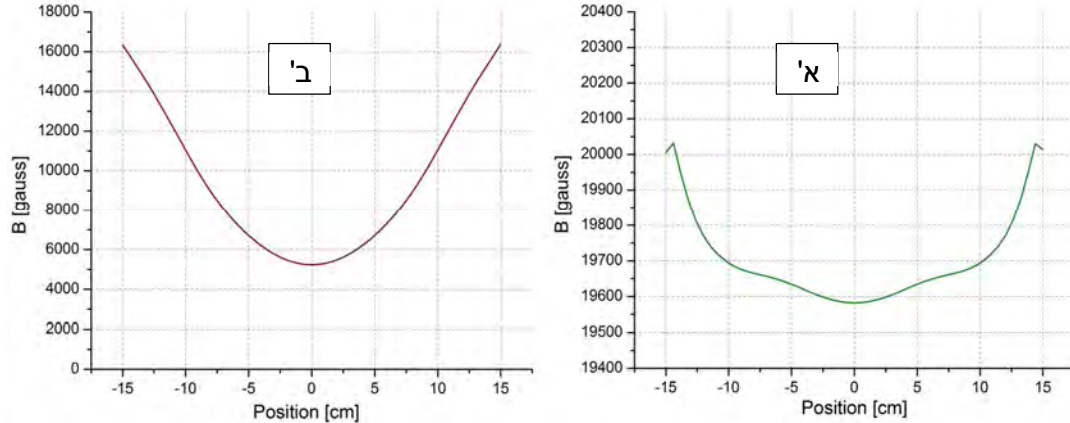
מגנטיזציה תלוי מקום וזמן. באיור 2-2 א' ניתן לראות בבירור את ההתפלגות הלא הומוגנית של השדה בתוך הליבה בזמן שבסליל AC שמלופף עליה לא זורם וכשזורם זרם קצר של 50 אמפר (2-2 ב'). ערכי שדה B שונים לאורך הסליל גורמים לפרמאביליות הלוקאלית לקבל ערכים שונים לפי עקומת BH של החומר הפרומגנטי (איור 1-2). תהליך היציאה של הליבה מרוויה מגנטית מתחיל מהמרכז, המקום שבו הרוויה הכי פחות עמוקה (איור) בגלל המרחק שלו מסלילי ה DC. בתהליך זה ערכי הפרמביליות יתחילו לגדול מהאמצע לכיוון צידי הליבה. בצורה כזאת ליפופים באזור האמצעי של הסליל יושפעו מהשינויים בליבה לפני שאר הליפופים. ככל שהזרם בסליל יעלה, האזור עם הפרמביליות הגבוהה יתרחב עד למצב שבו השראות הסליל תהיה מקסימלית. עלייה נוספת של הזרם מעבר לערך זה תגרור אחריה את הקטנת השראות מכיוון שהליבה תתחיל להיכנס לרוויה הפוכה. הבנת התהליך הכרחית לתיאור ההתקן ברשת החשמל. השראות ה-FCL תלויה במספר גורמים כמו הגאומטריה של הליבה הפרומגנטית בכלל ושטח החתך בפרט, הצורה ומספר הליפופים של הסליל AC ו-DC. הפרמטר החשוב מכולם הוא ההשראות הדינמית של הסליל כפונקציה של הזרם העצמי $L(I)$.



איור 1-2. עקומת BH של פלדת שגאים H105.

במחקר זה נתמקד בפרמטר $L(I)$ של המערכת לצד שאלות נוספות כמו: מהי השפעת המעבר הלא ליניארי בזרם על רשת החשמל ואיכות החשמל? כיצד ניתן להגדיר ולחשב את מקדם הדה-מגנטיזציה והפרמביליות המקומיים כתלות בזמן ומהי השפעת הגיאומטריה המסויימת של המתקן על הפרמטרים הפיסיקליים הללו? כיצד ניתן לחשב את ההשראות העצמית וההדדית של הסלילים

במערכת לא ליניארית עם צימוד גבוה?



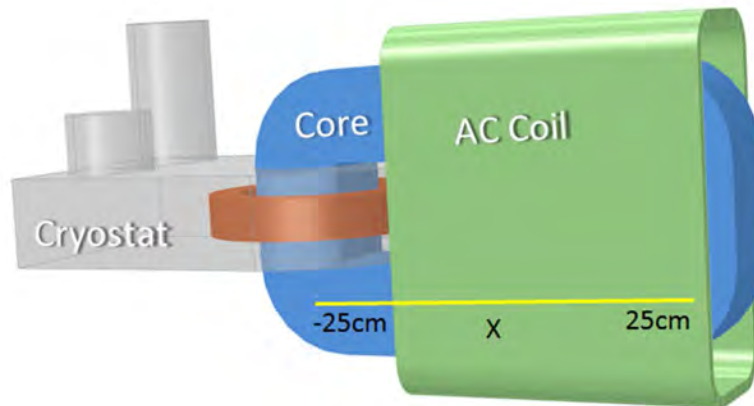
איור 2-2. צפיפות שדה בצלע הארוכה של הליבה בזרם AC : א' אפס. ב' 50 אמפר

ככל הידוע לנו, עבודות המחקר התכנון והאפיון של התקני FCL שנעשו עד כה התעלמו מהמורכבות של המערכת והניחו התפלגות שדה אחידה לאורך הליבה ולכן לא ניתן היה עד היום לחשב ו/או לצפות במדויק את מצב ההתקן והאימפדנס שלו בכל מצב ברשת. העבודות שהתפרסמו חקרו את ביצועי ה-FCL בשתי נקודות עבודה: זרם נומינלי וזרם קצר והתעלמו ממצבי עומס יתר ומזרמי ביניים אחרים. אולם, ברור שידע זה הכרחי להמשך פיתוח ה-FCL, להבנת התנהגותו ברשת בכל תסריט אפשרי לצורך תכנון התקנים בסקלות גדולות ולצורך אפיון ההתקן לאחר בנייתו.

3 התקן FCL חד-פאזי ראשון

הפרק הקודם התייחס למבנה הכללי של רשת החשמל ולבעיית זרמי קצר והצורך בהגבלתם. הגדרנו גם את המושגים הבסיסיים של השראות ודה-מגנטיזציה בהקשר המסויים של הבעיה האי-ליניארית המצומדת הבאה לידי ביטוי בתכונות המגנטיות של FCL. הפרק הנוכחי יעסוק בהתבוננות עמוקה יותר אל תוך עקרון הפעולה של FCL השראותי ואל התכונות המגנטיות של הליבה. קבוצת המחקר שלנו רשמה מספר פטנטים,³⁸ והציעה תפיסה חדשנית למימוש FCL. הקבוצה תכננה ובנתה, בשיתוף עם חברת "ריקור"³⁴, התקן חד-פאזי בהספק נומינלי של 120kVA בשיטת "ליבה פתוחה" (open core). ההתקן נבדק בהצלחה במעבדות חברת החשמל באתר "אורים" בנשר. עם

זאת, למרות ההצלחה הניסיונית, פרטי תהליך המעבר בין מצב מגנטיזציה שונים נשארו לא ידועים. מדידות מגנטיות נותנות מידע רק על המצב הממוצע של הליבה ולא על התפלגות השדה המרחבית. מגבלה זאת מחייבת להשתמש בשיטות חישוב ממוחשבות מבוססות FEM. כלים אלו מאפשרים לבצע סימולציות נומריות של המודל המדויק תוך כדי התחשבות בכל הפרמטרים הפיזיקליים והגיאומטריים. תוצאות הסימולציות מספקות מידע על תהליכים שמתרחשים בכל נקודת זמן ומרחב ומהווים כלי הכרחי לאנליזה ותכנון עתידי של ה-FCL.

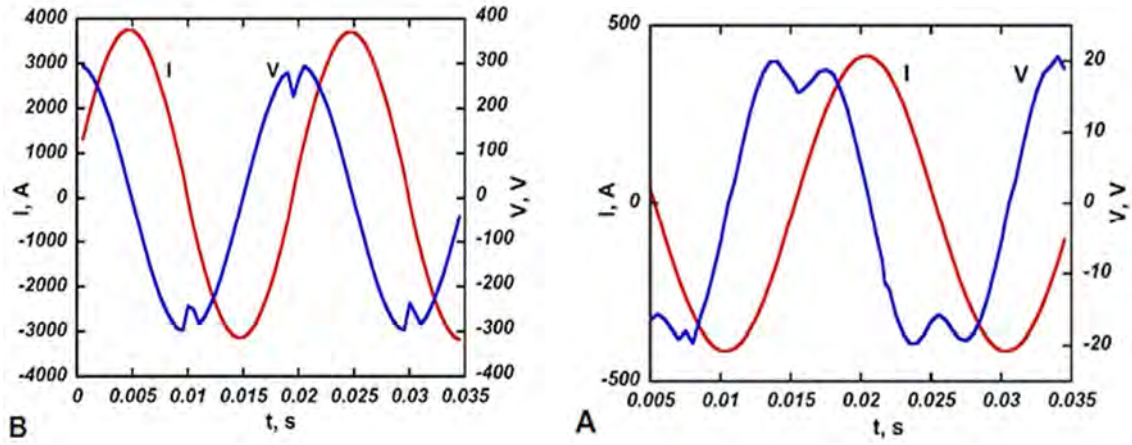


איור 3-1. מודל ממוחשב של FCL מתוך Vector Fields.

באיור 1-3 מוצג מודל FCL התרשים צויר בתוכנת COBHAM Vector fields והפרמטרים של המודל הממוחשב הם אותם הפרמטרים של ההתקן הפיסי. צבועה הכחול היא הליבה הפרומגנטית העשויה בטכנולוגית C-Core. הליבה מהווה מעגל מגנטי סגור עבור סליל DC מוליך-על (באדום). הסליל עשוי מחוט דור ראשון מסוג BSCCO והוא משמש כמקור שטף מגנטי על מנת להכניס את הליבה לרוויה in (High-temperature superconducting magnet for use in saturated core FCL). סליל ה-DC סגור בתוך מערכת קריאוגנית וטמפרטורות העבודה שנבחרו לעבודת הסליל הן 40-55 K.

מעגל ה-AC מורכב ממתח מקור של $400V_{RMS}$, השראות והתנגדות הרשת $0.25mH$ ו- 0.04Ω בהתאמה ועומס של 1.3Ω וסליל ה-AC שמחובר בטור. הזרם הלא מוגבל (Prospective

(current) לרשת זו עומד על 5100A. באיור 2-3 מוצגות צורות הגל של הזרם והמתח במצב נומינלי עם זרם של 298A_{RMS} ובמצב קצר.



איור 2-3. צורות הגל של הזרם והמתח: (a) - במצב נומינלי עם זרם של 298A_{RMS}, (b) - במצב קצר.

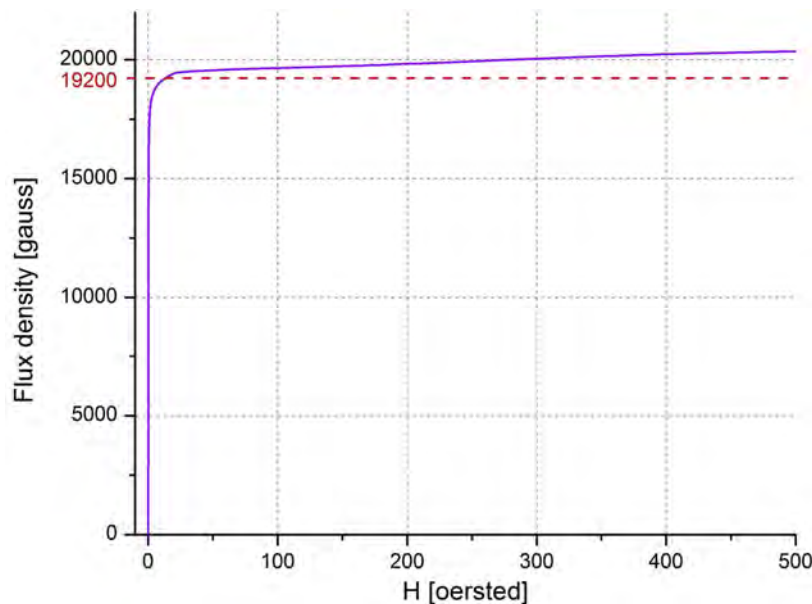
ניתן לראות בבירור שצורת הזרם סינוסואידלית כאשר המתח על ה-FCL מראה סימנים של טבעו הלא ליניארי. ההתנגדות האוהמית של סליל ה-AC ב-FCL נמוכה מאוד. מפל המתח על ה-FCL הוא לפיכך השראותי ברובו ונובע רק משינוי השטף המגנטי בליבה מתחת לסליל. כאשר הזרם מגיע לשיאו אין שינוי שטף ולכן המתח בנקודה זו מתאפס. לעומת זאת, בסליל ליניארי, שינוי שטף מקסימלי מתקבל כשהזרם עובר דרך האפס ואז הנגזרת מקסימלית. במערכת שלנו קל לראות שהמתח בנקודה הזאת לא מקסימלי. יתר-על-כן, יש נפילה בנקודה הזאת. הסיבה לכך היא שבזרם אפס הליבה נמצאת ברוויה עמוקה ביותר עם פרמביליות מינימלית. באופן אידיאלי, הליבה של FCL צריכה להשאר במצב רוויה מקסימלי על פני כל המחזור של הזרם הנומינלי. בפועל, כשהזרם עולה מתרחש מעבר חלקי של הליבה למצב פחות רווי. ערכי ה-RMS של המתח והזרם שהתקבלו מוצגים בטבלה 1-3.

Parameter	nominal state	fault state
Current, Irms	298 A	2468 A
Voltage drop on FCL, Vrms	15.1 V	207 V
FCL impedance, Ohm	0.05	0.084
Voltage drop on FCL, %	3.78	51.8

טבלה 3-1. ערכי ה-RMS של מתח וזרם במצב נומינל וקצר.

מפל המתח שהתקבל, 15.1V, מהווה 3.8% ממתח המקור. ערכים אלה עונים על הדרישה שבמצב נומינלי, המתח על ה-FCL צריך להיות פחות מ-5% ממתח הרשת. המודל מציג יחס האימפדנס של 1.68 בין מצב נומינל לקצר. נציין כי ככל שהמתח הנופל על ה-FCL נמוך יותר, כך טוב הדבר מבחינת הרשת. התקני רשת מקובלים כמו שנאים וריאקטורים תורמים מפל מתח של 5-15% בדר"כ ולכן 5% הוא מספר מתקבל על הדעת באופן עקרוני.

כאשר ה-FCL עובד במצב קצר, הזרם מוגבל ל-2468A ומפל המתח עליו עולה ל-207V. משמעות הדבר היא ש-51% ממתח הרשת נופל על מגביל הזרם או במילים אחרות, זרם הקצר הוגבל פי 2! (איור 3-2(b))



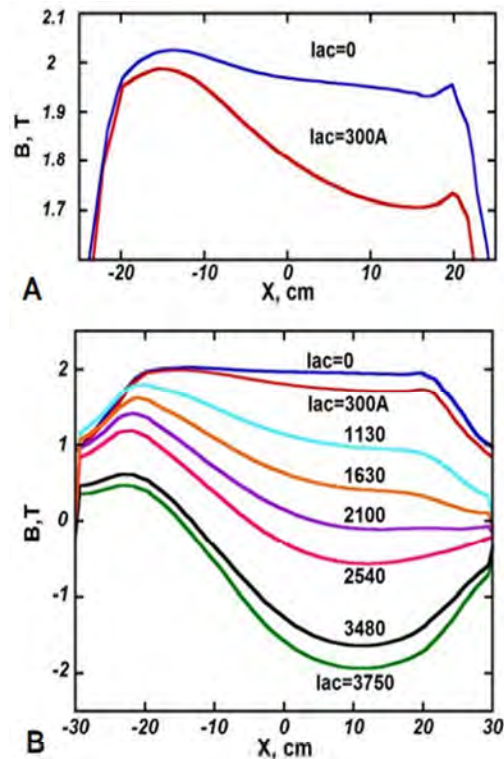
איור 3-3. עקומת ה-BH של פלדת שנאים H105 עם סימון של סף הרוויה ב-1.92T.

הליבה הפרומגנטית עשויה מפלדת שנאים מסוג H105 Grain oriented electrical steel. זהו חומר מגנטי רך מאוד עם ערכי פרמביליות גבוהים מאוד (40000) בחלק הלא רווי והפסדי AC נמוכים (כתוצאה מההיסטרזיס הנמוך). הליבה מורכבת מפחים דקים של פלדת שנאים זו כדי להקטין הפסדים הנגרמים על ידי זרמי מערבולת. בשדה חיצוני של 12 Oe ($B=19200 \text{ Gauss}$) החומר נכנס לרוויה. במצב זה רוב הדומיינים (איזורים) המגנטיים כבר פונים לכיוון השדה החיצוני והמומנט המגנטי לא ממשיך לגדול עם העלאה נוספת של השדה החיצוני H . הפרמביליות במצב זה היא מינימלית. לצורך הגדרת האזור האפקטיבי של הליבה המשתנה עם הזרם, נחליט באופן מעשי כי האיזור שמתחת לקו האדום באיור 3-3 נחשב ללא רווי. כדי להבין ולשפר את ביצועי ההתקן ביצענו אנליזה של ההתפלגות המרחבית של השדה. פרופילים של האינדוקציה המגנטית, B , לאורך הליבה על הקו האמצעי מוצגים באיור 4-3 (a) עבור מצב נומינלי, (b) עבור קצר. סליל DC ממוקם על הרגל הקצרה של הליבה בניצב לרגל AC של הליבה בנקודה $X=-27\text{cm}$. סליל ה-AC מתחיל ב -12 ומסתיים ב $+30$.

להלן מסקנות ראשוניות מהתוצאות כפי שהן מובאות באיור 4-3:

- כשהזרם AC שווה לאפס, מעגל ה-DC מצליח להכניס את הליבה לרוויה. כל נקודות הגרף מעל הערך של 1.92T . בנקודת זרם זו הפרמביליות לאורך כל ציר הליבה נמוכה מאוד וההתקן תורם מפל מתח (השראות) מינימלי לרשת.

- בזרם 300A (האמפליטודה המקסימלית RMS של הזרם הנומינלי) המצב שונה משמעותית. האזור המרוחק מסליל ה-DC חווה רמת שדה פנימי נמוכה עד 1.7T . לפי עקומת BH של החומר הנתון, הפרמביליות באיזור שדה זה גבוהה. ירידה זו במגנט אחראית לגודל ולצורה הלא סינوسیודאלית של המתח

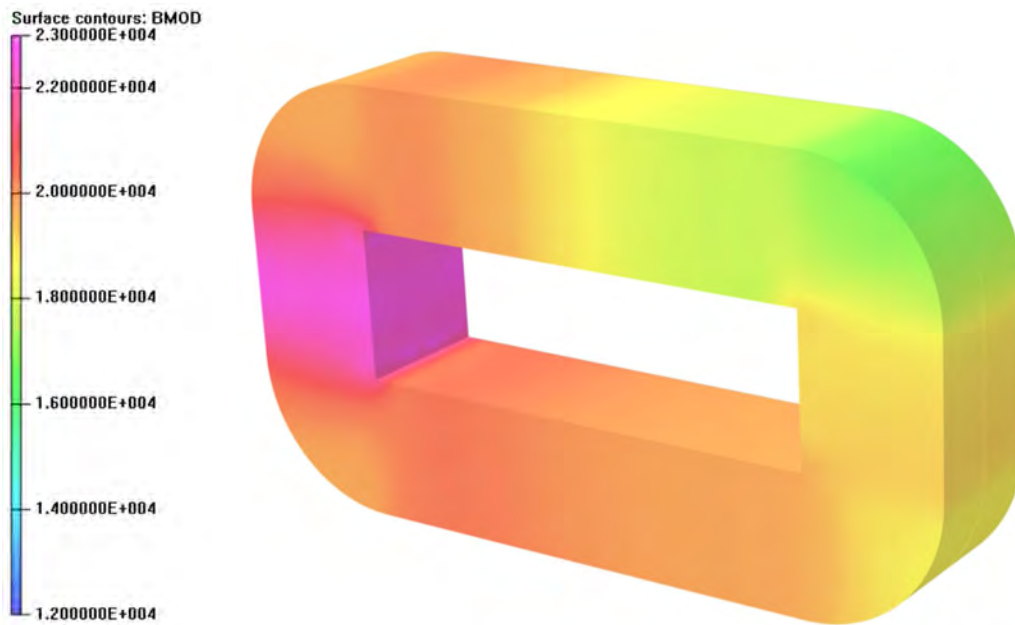


איור 4-3. פרופילים של אינדוקציה מגנטית לאורך הליבה: (a) מצב נומינלי, (b) עבור קצר.

באיור 3-2(a). חלקים בסליל AC הקרובים יותר ל- DC חווים שינויים קטנים בהרבה בשדה ובפרמביליות.

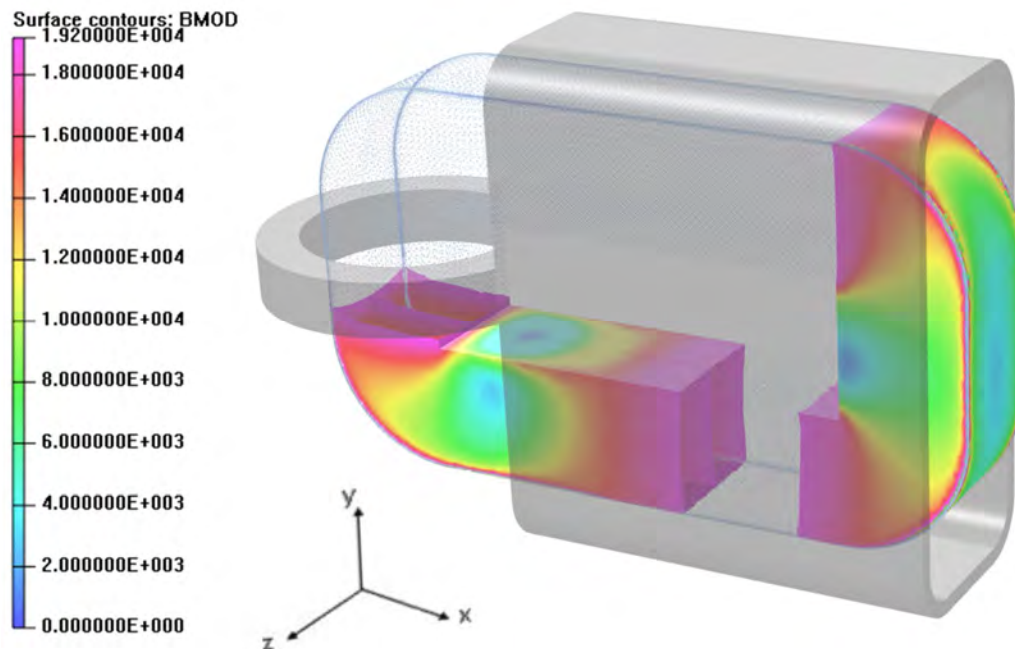
- התפלגות השדה תלויה חזק במקום ובזמן. לצורך חישוב מדוייק של השראות הסליל AC, יש לקחת בחשבון את התלות $B(x,t)$.

איור 3-2(b) מציג פרופילים של אינדוקציה B במצב קצר עבור זרמים שונים על פני המחזור. הפרופילים מראים מעבר ממצב של רוויה $+2T$ למצב של רוויה הפוכה $-2T$. זהו תחום שינוי שטף מקסימלי. עם זאת, אפשר לראות מהגרף שרק חלק מהליבה מגיע לרוויה הפוכה של $-2T$. כמו כן, כאשר הזרמים נמוכים רק חלק מהליבה יוצא מרוויה. חלק זה הולך וגדל עם עליית הזרם. רק החלק הלא רווי תורם בצורה יעילה להגבלת הזרם ולכן מפל מתח על הסליל מושפע מאוד מגודל האזור האפקטיבי (לא רווי) של הליבה גם בזמן קצר וגם במצב נומינלי. השאיפה שלנו על סמך מחקר זה היא לתכנן מעגל מגנטי כזה שעבור כל ערך של זרם נומינלי האזור הזה יהיה אפס, ובזמן קצר כל חלק שנמצא מתחת לסליל AC יעבור שינוי של $4T$ בשיא הזרם המוגבל.



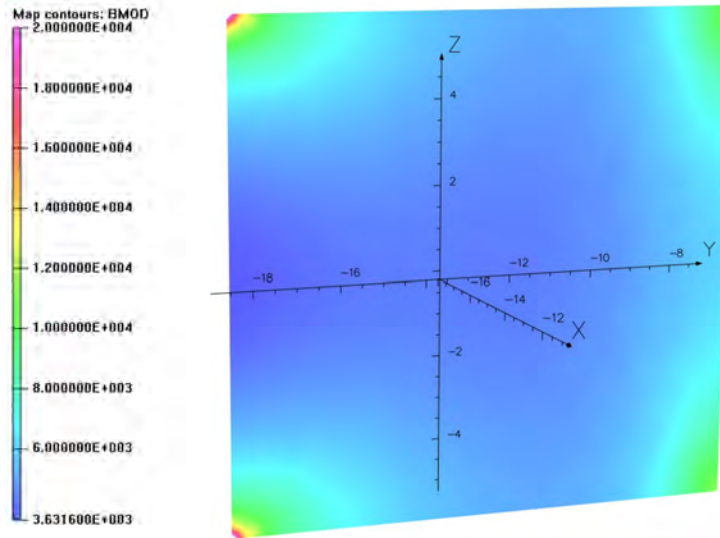
איור 3-5. התפלגות צפיפות השטף המגנטי על פני הליבה עבור זרם AC של 300A.

את האינדוקציה על פני הליבה אפשר לראות גם באיור 3-5. כאן מוצגת הליבה המגנטית כשהיא צבועה בקודים של צבע על פי עצמת השדה B הלוקאלית. האיור מציג את התפלגות השדה בליבה עבור זרם 300A. ניתן לראות כי חלק משמעותי מאד של הליבה אינו ברוויה עמוקה. גם הרגל הקצרה שאין עליה סליל DC לא נמצאת ברוויה עמוקה ומכיוון שאותו חלק של סליל AC שנמצא מעל הרגל הקצרה רואה שטח חתך גדול בערך פי 3 משטח החתך של הליבה בשאר המקומות התרומה למפל המתח של חלק זה גבוהה.



איור 3-6. התפלגות צפיפות שטף מגנטי על פני הליבה בזרם 3750A. בצבע מסומנים אזורים שבהם שדה מתחת ל 1.92T. באפור שקוף מסומן מיקום הסלילים.

באיור 3-6 מוצג רק חלק הליבה שלא נמצא ברוויה. הזרם בנקודה זו הוא 3750A וזהו השיא של זרם הקצר המוגבל כלומר, נגזרת הזרם מתאפסת ביחד עם המתח על ה-FCL. קיים איזור בין סלילי ה-DC ל-AC שבו המגנטיציה קרובה לאפס באמצע הליבה (קרוב לנקודות העיקול של הליבה). הגרדיאנט של השדה בכיוונים y ו-z גבוה מאוד (איור 3-7). הדבר נובע מכיוונים מנוגדים של השטף המגנטי של הסלילים ש"בורח" מאיזור זה של הליבה לצדדים. זהו נתון נוסף בעל השפעה שחובה להתייחס אליו בניתוח ותכנון מגנטי של FCL.



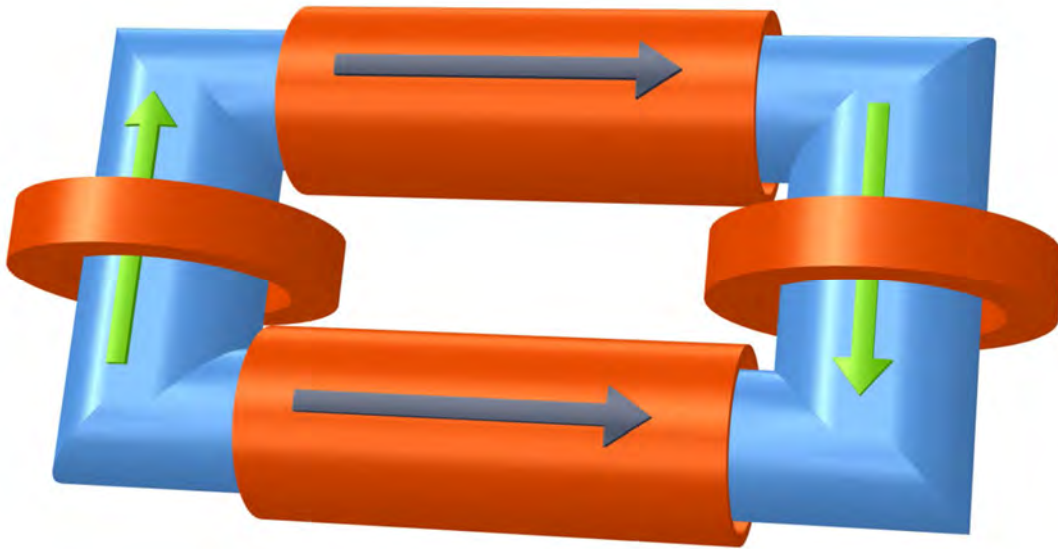
איור 7-3. התפלגות האינדוקציה על פני שטח חתך של הליבה בזמן קצר.

באיור 7-3 אפשר לראות את ההבדל של בערך פי 3 בין צפיפות השטף באמצע הליבה לבין הפינות שלה. כשמדובר בחומר פרומגנטי, אי הליניאריות בעקומת BH גורמת לפרמביליות שלו להיות לא הומוגנית בתוך הגוף.

3.1 מודל FCL משופר בהספק של 120kVA

המודל עם סליל AC בודד שהוצג בפרק הקודם הציג שינוי אימפדנס מ 0.05Ω בנומינל ל 0.084Ω בקצר. למרות שמקדם ההגבלה של 50% מספיק לרוב הרשתות, יחס האימפדנסים (1.68 במודל שתואר בסעיף הקודם) בין מצבי נומינל לקצר אמור להיות גבוה משמעותית בשביל תנאי רשת קיימים בעולם. במאמץ לשפר נתון זה ערכנו מספר שינויים למודל הקודם. מיקמנו שני סלילי DC על שתי הרגליים הקצרות של הליבה ושני סלילי AC על הארוכות. העקרון הבסיסי של מעגל מגנטי סגור עבור DC ומעגל מגנטי פתוח עבור AC נשמר. באיור 8-3 מוצג הסידור החדש של הסלילים. החצים הירוקים מראים את כיוון המגנטיזציה DC. החצים השחורים מסמנים את כיוון השדה AC כאשר הזרם חיובי. הכיוון מתהפך כשהזרם שלילי. סלילי ה-AC מכוונים באותו כיוון ותמיד אחד מהם יהיה מנוגד ל-DC. כשהזרם באחד מסלילי ה-AC גבוה מספיק כדי להתנגד לשדה

הקבוע של ה- DC רגל אחת של הליבה יוצאת מרוויה כאשר רגל הנגדית נכנסת לרוויה עמוקה עוד יותר. בחצי המחזור השני המצב מתהפך. על ידי כך שני חצאי המחזור של זרם הקצר מוגבלים.



איור 8-3. המודל הסימטרי מתוך Vector Fields

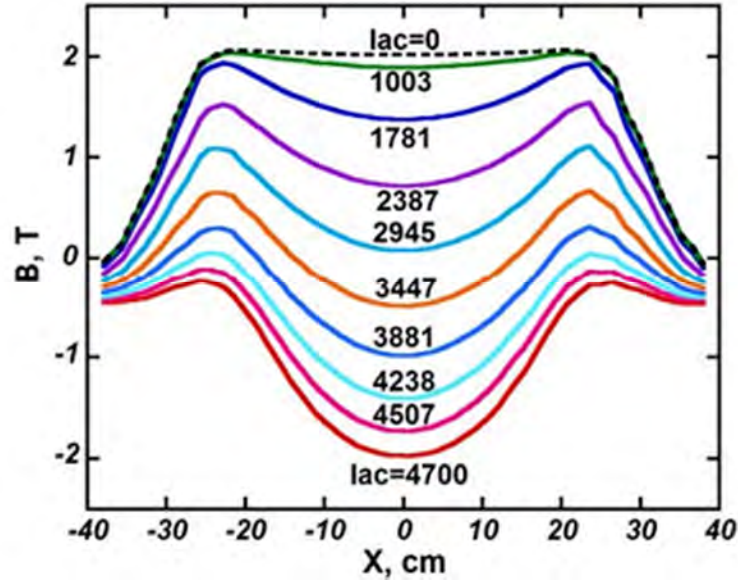
לפיצול סליל ה- AC לשניים יש מספר יתרונות. הדבר מקטין את שטח חתך של הסליל ובכך מקטין את השראות האוויר שלו ואת מפל המתח עליו במצב נומינלי. במצב קצר, שינוי השטף מוגבל על ידי כניסה לרוויה הפוכה ושטח החתך של הליבה הפרומגנטית. השראות של אותו חלק של שטח הסליל שנמצא באוויר לא משתנה ולא תורמת ממילא הרבה לביצועים של ה- FCL. טבלה 2-3 מסכמת את הפרמטרים הפיסיים של שני המודלים. שני המודלים דומים מאוד מבחינה גיאומטרית. הליבה של המודל עם שני סלילים ארוכה יותר בכ 10% אבל בעלת שטח חתך קטן יותר ב 20%. סה"כ כמות אמפר-ליפופים (Ampere-turn) של חלק ה- DC נשארה ללא שינוי למרות שכעת היא מחולקת בין שני הסלילים.

פרמטר	מודל עם סליל יחיד	מודל עם שני סלילים	
אורך, cm	68	76	
ליבה פרומגנטית עובי, cm	37	40	
שטח חתך, cm ²	144	113	
קוטר פנימי, cm	20	20	
סלילי DC גובה, cm	5.4	5.4	
מס' ליפופים	1x1080	2x540	
ממדים פנימיים,	14x40	14	
סלילי AC אורך, cm	44	40	
מס' ליפופים, cm	20	2x16	
אימפדנס [Ω] מצב נומינלי	0.05	0.01	
מצב קצר	0.084	0.047	

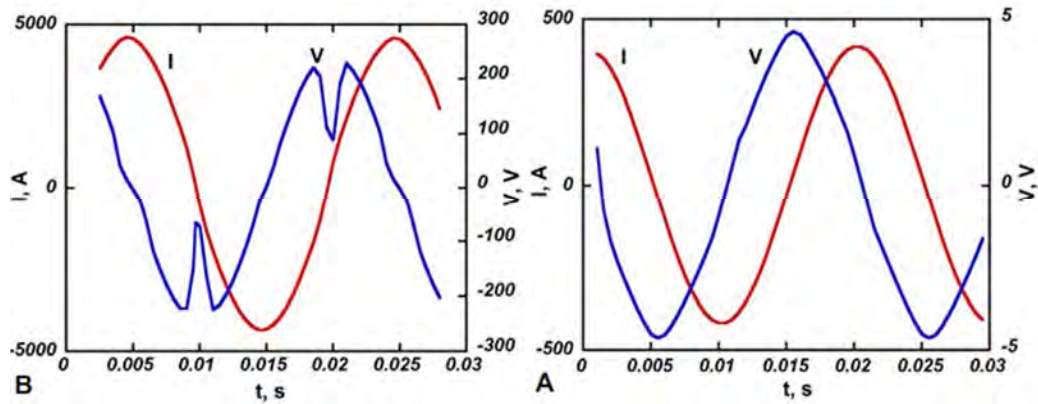
טבלה 2-3. נתוני המודל הסימטרי

איור 9-3 מראה את פרופיל האינדוקציה המגנטית לאורך הרגל שבה השטף AC מתנגד לזה של ה-DC. השינוי הבולט המיידי הוא בפרופילים שעששו הם סימטריים יחסית לאמצע הרגל ($x=0$). ההתנהגות הסימטרית היא תוצאה של שימוש בשני סלילי DC שתורמים בצורה שווה לאינדוקציה משני צידי הרגל הארוכה. בעזרת הקונפיגורציה המשופרת ניתן לקבל אינדוקציה הרבה יותר הומוגנית עבור זרמים קטנים של המצב הנומינלי. כל הליבה נשארת רוויה גם בשיא הזרם הנומינלי.

ההסבר להצלחת הקונפיגורציה המשופרת הוא, בעיקרו, כלהלן: המסלול של שטף מגנטי חייב להיות מסלול סגור אולם אורך המסלול תלוי בהתנגדות (reluctance) המגנטית של המעגל. כשהליבה הפרומגנטית מגיעה לרוויה, התנגדותה המגנטית גדלה באופן קיצוני. במצב כזה משתלם יותר מבחינה אנרגטית לקווי השטף לצאת מתוך הליבה ולהסגר קרוב ככל האפשר לסליל DC שמייצר אותם. זוהי הסיבה לכך שקשה מאד לסליל בודד להכניס לרוויה עמוקה אזורים רחוקים ממנו.



איור 9-3. התפלגות צפיפות שטף מגנטי לאורך ציר X עבור זרמים שונים בסליל AC.



איור 10-3. צורות גל של מתח וזרם (a) בנומינל, (b) בקצר.

באיור 10-3 מוצגות צורות הגל של המתח והזרם שהתקבלו מסימולציה של המודל הסימטרי. איור 10-3(a) מציג את העקומות בזרם נומינלי של 300A ו-10-3(b) בזרם קצר. מפל המתח הנומינלי הוא כעת 3.12V, סה"כ 0.78% ממתח הרשת. **זהו שיפור של פי 5 מהמודל האסימטרי עם סליל בודד.** בנוסף, צורת המתח הרבה יותר קרובה לצורה של סינוס הודות לאינדוקציה הגבוהה יותר במרכז הליבה. צורת מתח כזאת מעידה על התנהגות ליניארית של התקן בזרם נומינלי. התנהגות כזאת חשובה לאיכות רשת החשמל מכיוון שאינה מכניסה הרמוניות גבוהות לרשת.

פרמטר	נומינל	קצר
זרם, A_{RMS}	296A	3051A
מתח, V_{RMS}	3.12V	145V
אימפדנס, $m\Omega$	10m Ω	47m Ω
מפל מתח, %	0.78%	36.2%

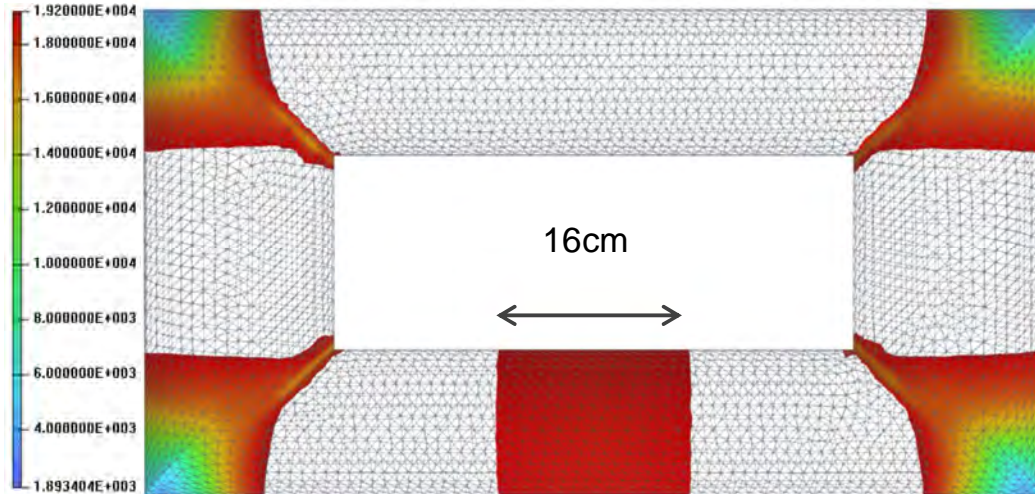
טבלה 3-3. תוצאות סימולציה של המודל סימטרי עם שני סלילי DC | שני סלילי AC

מפל המתח הנמוך יותר בקונפיגורציה הסימטרית נובע מכך שנפח קטן יותר מתחת לסליל עובר שינוי מגנטיזציה ברבע מחזור של זרם קצר. הסליל AC מלופף רק על שתי הרגליים הארוכות לעומת המודל האסימטרי שבו בנוסף לרגליים הקצרות כל האיזור של הרגל הקצרה בלי הסליל DC תורם למפל מתח על ה FCL. למרות ההגבלה הנמוכה יותר (36.25%) יחס האימפדנסים בין מצב נומינל לקצר גדל משמעותית מ- 1.68 ל- 4.7.

4 אורך אפקטיבי של הליבה

תהליך היציאה מרוויה של הליבה תלוי בחדירת שטף מגנטי לתוכה. תהליך זה תלוי במספר פרמטרים עיקריים: הגיאומטריה של הליבה, עוצמת השדה DC, אורך הסליל AC וכמות האמפר-ליפופים. עבור כל שילוב של פרמטרים אלו יתקבל אופי שונה במקצת של תהליך דה-סטורציה. השטף המגנטי חודר קודם כל למקום שבו הפרמביליות גבוהה ביותר או במילים אחרות, הרוויה חלשה ביותר. בקונפיגורציה הסימטרית, זוהי הנקודה הרחוקה משני סלילי ה-DC דהיינו, במרכז של הרגל הארוכה של הליבה. גם סלילי ה-AC מייצר את השדה החזק ביותר שלו בנקודה הזאת. השילוב של השניים גורם לתהליך הדה-סטורציה להתחיל מנקודת האמצע של הליבה. רק האיזור שיצא מרוויה והאינדוקציה המגנטית בו מתחת ל-1.92T תורם למפל מתח על הסליל AC. באופן מעשי, אפשר לראות את הליבה מבחינה מגנטית כגוף שמורכב משני חומרים: הנפח אשר האינדוקציה בו גבוהה מ-1.92T מתנהג כמו אוויר וכל שאר הנפח עם אינדוקציה פחותה מערך זה מתנהג כמו גוף עשוי מחומר פרומגנטי. ככל שהזרם בסליל AC גדול יותר, כך ה"גוף" הפרומגנטי גדל. את האורך הלא רווי של הליבה אנו מגדירים בעבודה זו כאורך האפקטיבי של הליבה שכן זהו אורך הליבה התורם למפל המתח על הסליל AC.

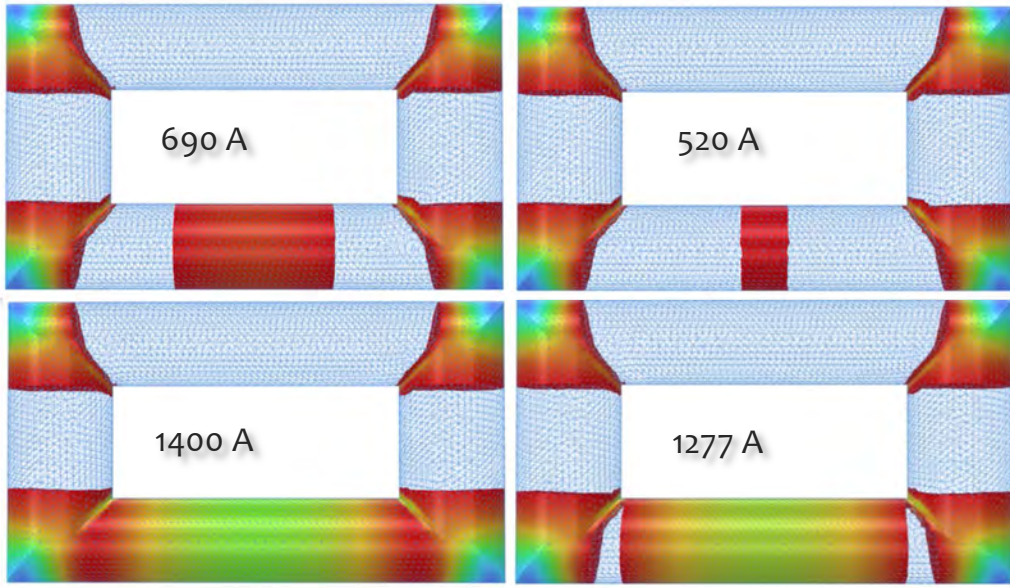
כדי ללמוד על הדינמיקה של המעבר בין מצבי הליבה רווי-לא רווי, ביצענו מדידות של אורך הליבה האפקטיבי בזרמים שונים בסליל AC בדגם ה-FCL הסימטרי. כאמור, האורך האפקטיבי נמדד על ידי הצגה של האינדוקציה על פני הליבה רק עד 1.92T. איור 1-4 מראה את מצב הליבה בזרם AC של 630A. האזור המסומן בצבעים הוא האזור הלא רווי של הליבה ואורכו עבור זרם זה הוא 16cm.



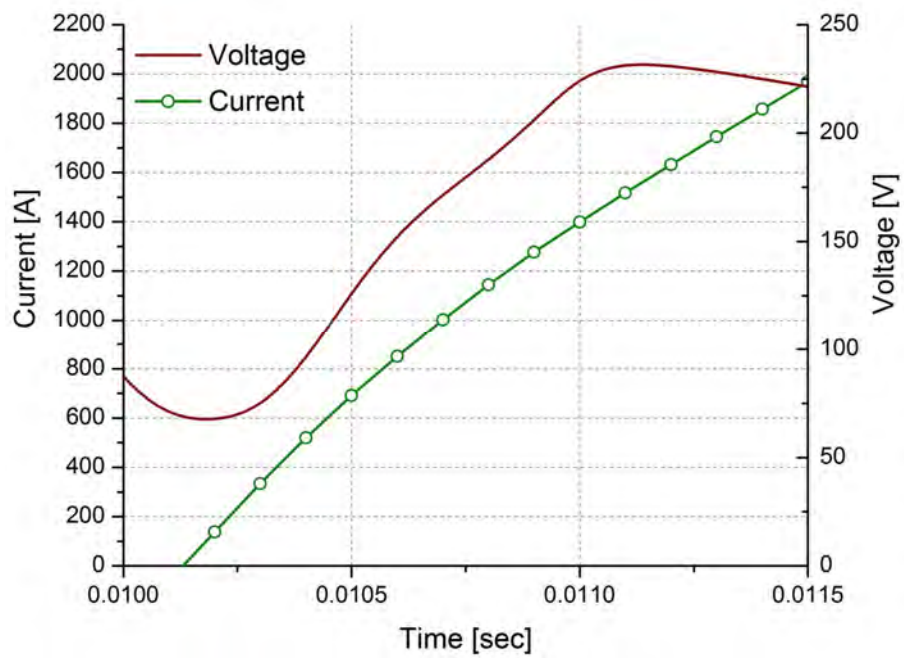
איור 1-4. אורך אפקטיבי של הליבה בזרם AC 630A. האיזורים בצבע הם האיזורים בליבה עם אינדוקציה קטנה מ-
T1.92

ארבע פינות הליבה נשארות לא רוויות בכל הזרמים. זאת מכיוון שמודל זה בנוי באופן שבו שטח החתך של צלע ה-DC גדול משטח החתך של צלע ה-AC. תכנון זה נעשה מראש כדי שמקסימום שטף DC יעבור אל צלע ה-AC לקבלת מקסימום רוויה. עקב כך, לאורך המסלול של השטף DC, שטח החתך גדל בפינות ושוב קטן כשהוא נכנס אל הרגל הארוכה של הליבה כלומר, צפיפות השטף DC קטנה עם הגדלת שטח החתך בפינות.

ככל שהאורך האפקטיבי של הליבה גדול יותר מקדם הדה-מגנטיזציה קטן יותר, כלומר שדות הדה-מגנטיזציה חלשים יותר. כתוצאה מכך מתאפשר שינוי שטף גדול יותר עבור אותו שינוי בזרם. באיור 2-4 רואים ארבעה מצבים שונים של הליבה עבור זרמים 520, 690, 1277, ו-1400 אמפר. בעזרת רשת הסימולציה (mesh) מוצגים הממדים הכללים של הליבה כאשר בצבע מוצגים ערכי שדה B על פני הליבה רק עד 1.92T. תמונות מצב אלו נלקחו מתוך סימולציה של ה-FCL בעת אירוע קצר ברשת עם מקור מתח של 400V.



איור 2-4. ארבעה מצבים שונים של הליבה עבור זרמים שונים: 1400, 1277, 690, 520 אמפר.

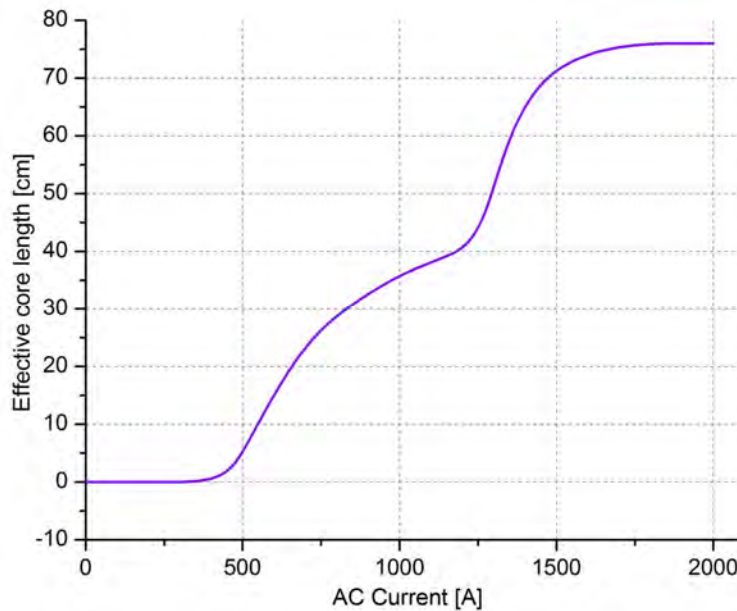


איור 3-4. זרם במעגל ומתח על ה FCL בזמן קצר

באיור 3-4 רואים אירוע קצר בפרק זמן של 1.5msec. הזרם עולה מאפס ל-2000 אמפ' על פני זמן זה. צורת הגל של הזרם דומה לסינוס בפרק זמן זה אך לעומת זאת, המתח שונה

משמעותית ומעיד על טבעו הלא ליניארי של ההתקן. הסיבה לצורת גל כזאת קשורה לתהליך היציאה של הליבה מרוויה.

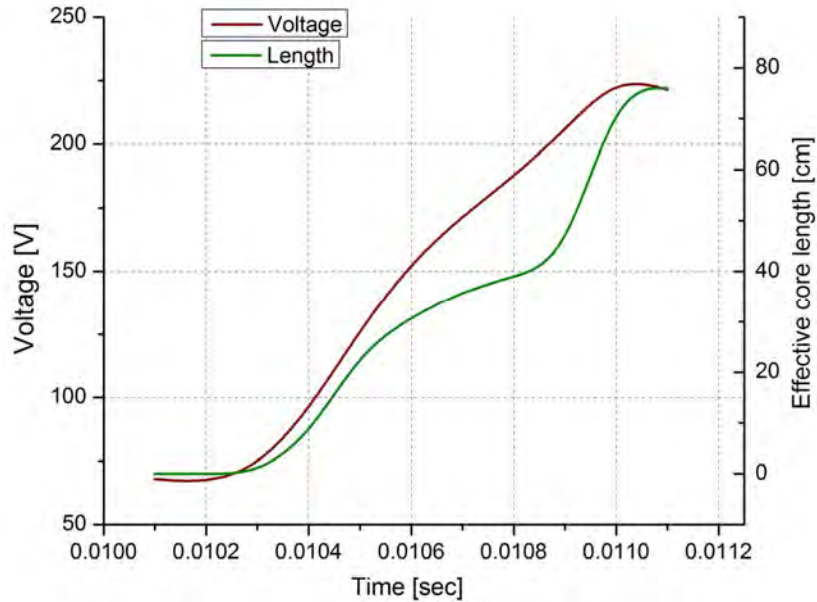
נשוב כעת לדיון אודות אורך האזור האפקטיבי. אורך זה נמדד כפונקציה של הזרם ומתואר באיור 4-4. באיור רואים שכאשר הזרם עולה מעל כ 400A האזור מתחיל להתרחב לצדדים עד שהוא מגיע לאורך המלא של הליבה בערך ב 1400A; משם ואילך אין שינוי באורך האזור האפקטיבי. אפשר לראות בבירור שקצב הגדילה של האזור האפקטיבי איננו אחיד.



איור 4-4. זרם במעגל ומתח על ה FCL בזמן קצר

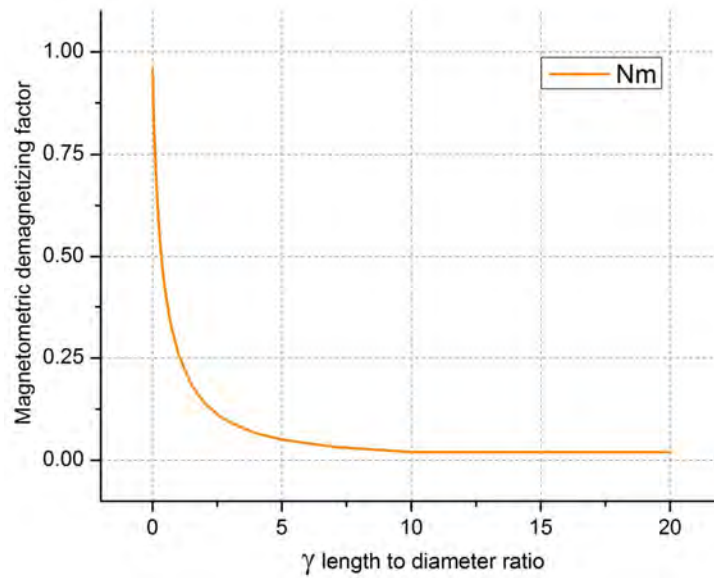
תופעה נוספת הנראית בבירור מאיור זה היא העובדה שהאורך האפקטיבי גדל בשתי מדרגות בולטות. הראשונה, משתרעת על זרמים מ- 400A ועד 1300A שם קצב הגדילה הולך ומאיט. השניה, מתרחשת באופן פתאומי כאשר שתי הפינות הלא רוויות של הליבה מתחברות אל אותו אזור שיצא מרוויה ויוצרות "גוף" משותף. גידול פתאומי כזה בממדי הגוף משפיע על השראות הסליל וגם על מפל המתח עליו. באיור 5-4 אפשר לראות את השתנות המתח על הסליל ואת האורך האפקטיבי כתלות בזמן. שינוי הזרם באותו פרק זמן היה מ- 0 עד 1500A. בפרק זמן זה הזרם עולה בצורה כמעט ליניארית ולכן עבור השראות שאינה משתנה אנחנו מצפים למפל מתח קבוע. אכן, עד זרם 400A השראות קבוע והמתח קבוע אך בזמן 10.3msec האזור האפקטיבי מתחיל לגדול

וגורם לעליה חדה במתח. קצב ההתרחבות יורד בסביבות זמן 10.5msec ויחד איתו יורד גם קצב עליית המתח. בזמן 10.85msec התואם לזרם 1300A, האזור האפקטיבי במרכז מתחבר אל הפינות הלא רוויות של הליבה. למרות הקפיצה החדה באורך הלא רווי של הליבה, הקפיצה במתח אינה כל כך חזקה אם כי עדיין מורגשת. הדבר מעיד על קשר לא ליניארי בין אורך האזור האפקטיבי לבין ההשראות הסליל.



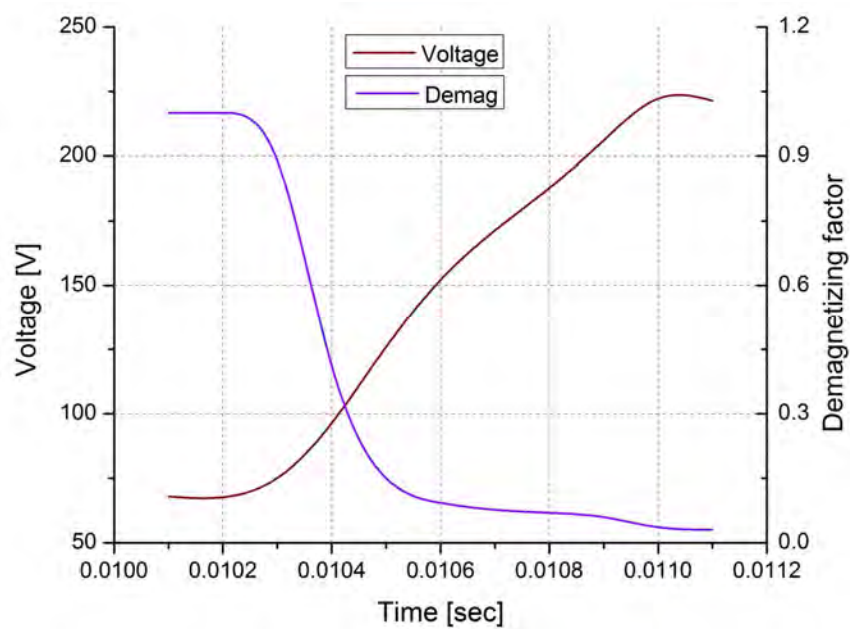
איור 5-4. מפל מתח על סליל AC (חום) ואורך הלא רווי של הליבה (ירוק) בזמן

כדי לחקור את השפעת התהליך של דה-סטורציה על השראות הסליל השתמשנו בחישובי פקטור דה-מגנטיזציה מגנטומטרי לגליל⁴⁵ ובפרמביליות הנראית לסליל. במקרה זה השימוש בפקטור מגנטומטרי (magnetometric) לעומת פלקסמטרי (fluxmetric) מוצדק מהסיבה שהסליל מכסה רוב הזמן את האזור הלא רווי וצורתו קרובה יותר לסולנויד ארוך מאשר ללולאת זרם דקה. התלות של פקטור דה-מגנטיזציה ביחס של אורך הגליל בקוטרו γ מוצג באיור 6-4 והיא מראה ירידה מאוד חדה בערך פקטור דה-מגנטיזציה עם הגדלת היחס.



איור 6-4. פקטור דה-מגנטיזציה מגנטומטרי כתלות ביחס הצירים בגליל עם סוספטביליות 10^3

איור 7-4 מציג את המתח על הסליל ביחד עם פקטור דה-מגנטיזציה המגנטומטרי באותו פרק הזמן שהצגנו קודם. גם כאן ניתן לראות קשר התנהגותי אבל בכדי שניתן יהיה לשחזר את המתח על הסליל מתוך אורך ליבה האפקטיבי יש לחשב תחילה את השראות הסליל בעזרת פקטור הדה-מגנטיזציה.



איור 7-4. פקטור דה-מגנטיזציה (סגול) ומתח על הסלילים כפונקציה של הזמן

ההשראות של סליל יחיד באוויר מחושבת לפי $L_0 = \mu_0 \frac{n^2 A}{l}$ ועבור נתוני הסליל במודל שלנו

נקבל: $L_0 = 12 \mu\text{H}$. השראות זו נמדדה גם בעזרת סימולציית FEM שם קיבלנו ערך של

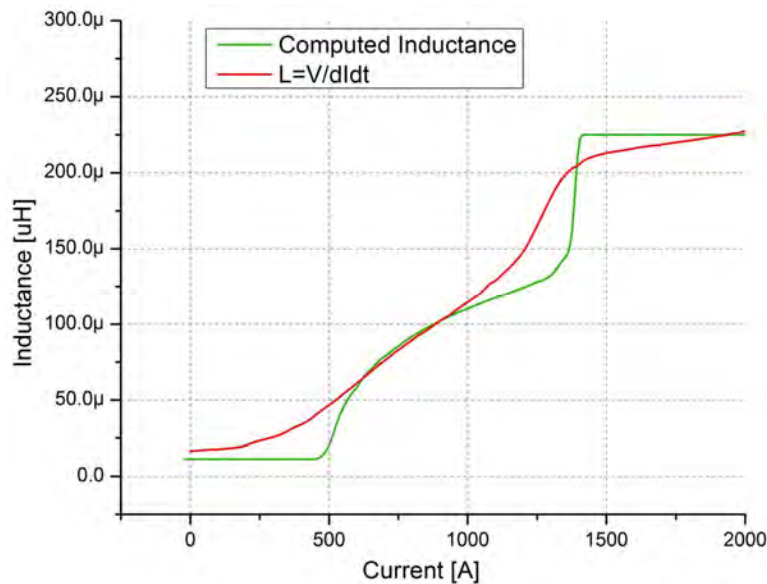
$L_0 = 11 \mu\text{H}$. את השראות הסליל על ליבת ה-FCL כפונקציה של פקטור דה-מגנטיזציה ניתן לקבל

בעזרת:

$$\mu_a = \frac{\mu}{1 + N_m \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right)}$$

$$L = L_0 \mu_a$$

כאשר μ_a – פרמביליות נראית, N_m – פקטור דה-מגנטיזציה מגנטומטרי, L_0 – השראות סליל אוויר. לטובת ניסוי זה ערכנו סימולציה טרנזיאנטית נוספת שבה שני סליל ה-AC חוברו אל מקור זרם המשתנה בצורה ליניארית מ-0 עד 2000A עם מאה נקודות סימולציה בזמן. בכל נקודת זמן נרשם מפל המתח על כל סליל בנפרד לצורך חישוב ההשראות. בסימולציות אלו הזנחנו את ההתנגדות האומית של הסלילים כמו גם את הפסדי ההיסטריסי ואת זרמי המערבולת בליבה. מכיון שמדובר כאן על ברזל שנאים המיועד בדיוק להקטין תופעות אלו, זוהי הזנחה סבירה בהחלט.

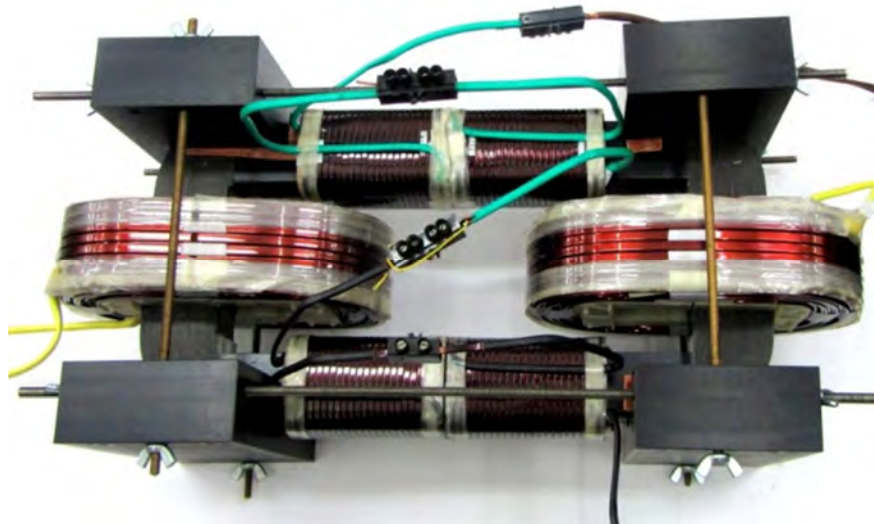


איור 8-4. השראות סליל AC מחושבת לפי פקטור דה-מגנטיזציה (ירוק) והשראות דיפרנציאלית מתוך מפל מתח על הסליל.

באיור 8-4 מוצגות תוצאות החישוב של השראות סליל יחיד המנוגד ל DC (ירוק) על ידי שימוש באורך אפקטיבי ופקטור דה-מגנטיזציה מגנטומטרי. הקו האדום מתאר את השראות הסליל הדיפרנציאלית מתוך היחס $L = \frac{V}{dI/dt}$. הגרף מראה התאמה מגמתית כללית למרות שהתנהגות הפונקציה שונה מאד במקומות שאורך האפקטיבי הנמדד משתנה באופן חד. הדבר נובע מתוך ההגדרה של האורך האפקטיבי ובה אנחנו מעבירים קו הפרדה ברור בין מצב של רוויה עמוקה לבין מצב פרומגנטי של החומר. במציאות, התפלגות השדה מאד לא הומוגנית בתוך הגוף והיא גורמת לאי-הומוגניות חזקה גם בערכי הפרמביליות לפי עקומת BH. בתהליך הדה-סטורציה, אזור לא מבוטל נמצא בסביבת ה"ברך" של עקומת ה BH של הליבה. ההנחה שלחלק של הליבה עם צפיפות שטף גדולה מ $1.92T$ יש פרמביליות יחסית 1 כמו של אוויר אינה מדויקת ובפועל הפרמביליות היא פונקציה רציפה של השדה H שמתכנסת ל- 1 רק בשדות מאד גבוהים. מכאן נובע ההבדל בין ההשראות המחושבת לבין זו ה"מדודה" כאשר בזרם AC אפס נתקבל פקטור של 1.47 ביניהן. בנוסף, הפונקציה של פקטור הדה-מגנטיזציה המגנטומטרי שהשתמשנו בה מניחה סוספטביליות אחידה בתוך הגוף. הנחה זאת, יחד עם העובדה שצפיפות השטף היא סולנוידאלית, $\nabla \cdot B = 0$, משמעותן שצפיפות נפחית של קטבים מגנטיים שווה לאפס גם כן כלומר, כל הקטבים נמצאים על פני הגליל. במקרה של מעגל מגנטי כמו FCL נדרש תיקון דה-מגנטיזציה שמתייחס לעובדה שהסוספטביליות אינה אחידה בתוך הגוף ולכן נדרש חישוב לוקאלי של פקטור הדה-מגנטיזציה.

5 דגם מעבדה – השראות לא ליניארית

דגם ה-FCL שתואר בפרקים הקודמים היה בהספק של 120kVA ונועד לבדיקות בחברת החשמל. לטובת המשך המחקר במעבדה היה צורך להתקדם עם מודלים "שולחניים" בהספק של קילו-וואטים בודדים, אותם ניתן לבדוק במסגרת תשתית החשמל הקיימת באוניברסיטה. לצורך זה תכננו ובנינו מודל FCL חדש אשר תמונתו מוצגת באיור 1-5. זהו דגם חד-פאזי בהספק של 1.5kVA ונתונו מובאים בטבלה 1-5. הליבה הפרומגנטית עשויה מלמינציות (פחים דקים מבודדים) של פלדת שנאים המלופפים בטכנולוגית C-Core. השימוש בלמינציות הכרחי כדי להקטין את הפסדי זרמי המערבולת בליבה המתפתחים בחומר בו המוליך חשוף לשינוי שטף מגנטי. הליבה מורכבת מארבעה חלקים המוצמדים זה לזה ליצירת מסגרת בעלת חתך מלבני עם פינות מעוגלות. שתי רגלי ה-AC בעלות שטח חתך של $4 \times 4 \text{cm}^2$ ואורך 30cm ושני רגלי ה-DC בעלי שטח חתך $5 \times 4 \text{cm}^2$ ואורך 20cm. שטח החתך של ה-DC גדול ב 20 אחוזים מזה של ה-AC. כפי שהסברנו בפרק הקודם, השטף מגנטי DC נכנס לתוך אזור עם שטח חתך קטן יותר וגורם לעליה בצפיפות השטף בתוך הרגל ה-AC. טכניקה כזאת מאפשרת להשיג רוויה עמוקה יותר בפחות אמפר-ליפופים של סלילי ה-DC.



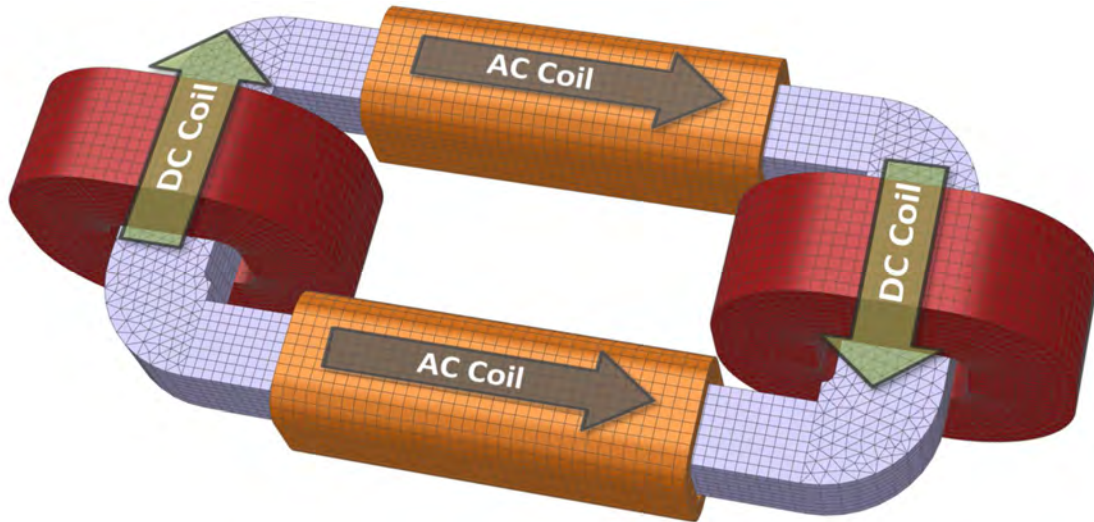
איור 1-5. דגם מעבדה של FCL חד-פאזי

כל הסלילים מלופפים מחוטי מנחושת בעלי חתך מלבני מצופים לקה מבודדת. כפי שנראה באיור 1-5 כל אחד מסלילי ה-AC בנוי משני סלילים המחוברים בטור וניתנים לפירוק בקלות. ההתנגדות האקטיבית של הסלילים נמדדה בשיטה 4-point measurement. ההתנגדות הנמוכה יחסית של הסלילים מאפשרת זמן עבודה ממושך לפני שהמערכת מתחממת. כל סליל DC פולט 230 וואט בזרם עבודה של 43 אמפר.

אלמנט FCL	פרמטר	ערך
ליבה	אורך ליבת AC, mm	300
	שטח חתך AC, mm	40x40
	שטח חתך DC, mm	50x40
סליל AC	אורך, mm	200
	מספר ליפופים	148
	התנגדות, $m\Omega$	130
סליל DC	אורך, mm	60
	מספר ליפופים	200
	התנגדות, $m\Omega$	133

טבלה 1-5. נתוני FCL.

המודל הממוחשב שנבנה עבור הדגם שנמצא במעבדה מוצג באיור 2-5. הליבה הפרומגנטית מסומנת בצבע סגול בהיר, שני סלילי ה-AC בצבע נחושת וסלילי ה-DC בצבע אדום. החצים מסמנים את כיווני השדה של הסלילים כאשר זורם בהם זרם חיובי. רשת החישוב (mesh) מחלקת את המודל לאלמנטים סופיים. גודל הרשת קובע את דיוק ומהירות החישוב של המודל.



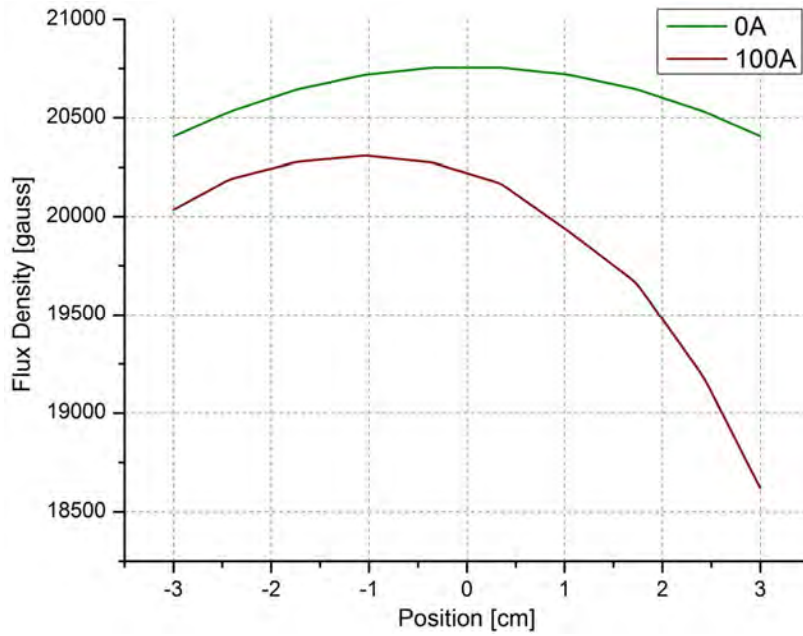
איור 2-5. דגם FCL החדש כפי שהוא מופיע בסביבת Vector Fields Opera.

5.1 אפיון המגנטיזציה בליבה

חקר המגנטיזציה בליבה נעשה באמצעות מדידת ההשראות של ה-FCL (כאשר שני סלילי ה-AC מחוברים יחד). מדידה זו נעשתה בזרמי DC בתחום שבין 0 עד 52.5A. תוצאות המדידה מובאות באיור 3. מטרת המדידה היא לאפיין את רמת הרוויה המגנטית כתלות בזרם בסלילי DC. ככל שהליבה נכנסת לרוויה עמוקה יותר הפרמביליות של החומר יורדת ומשנה את השראות הסליל AC שמשמש כסליל בדיקה בניסוי זה. תוצאות הניסוי נותנות תמונה של הפרמביליות הממוצעת של הליבה בקטע שנמצא מתחת לסליל AC. במדידות אלו השתמשנו במקור מתח Pacific AC power source 140AMX כדי להזרים דרך שני סלילי ה-AC זרם AC נמוך מאוד (כ 10mA) בתדר של 63Hz. השימוש בזרם קטן נדרש כדי שלא לשנות את מצב המגנטיזציה של הליבה במחזור אחד של זרם. התדר של 63Hz נבחר על מנת לסנן את השפעת ההפרעות המושרות מרשת החשמל ב-50Hz. לצורך מדידת זרם מדויקת במעגל ה-AC, הוכנס נגד (shunt) של 221mΩ. המתח על הנגד והמתח על הסלילים נמדדו על ידי אוסילוסקופ שגם נותן את ערכי ה-RMS של הגלים. הזרם במעגל ה-DC סופק על ידי מקור זרם Sorensen DCS 20-150 שיכול להספק 150 אמפר בעד 20 וולט. מדידת מתח על נגד 11mΩ הנמצא בטור במעגל ה-DC מאפשרת לקבל ערכים מדויקים של הזרם

וגם לעקוב אחר על צורת הגל שלו. במהלך הניסוי עקבנו אחרי צורות גל שונות. העדר רכיב AC משמעותי בזרם DC מעיד על רמת צימוד מאד נמוכה. צורת הזרם והמתח שנרשמה על סלילי ה-AC הייתה סינוסואידלית בכל שלבי הניסוי.

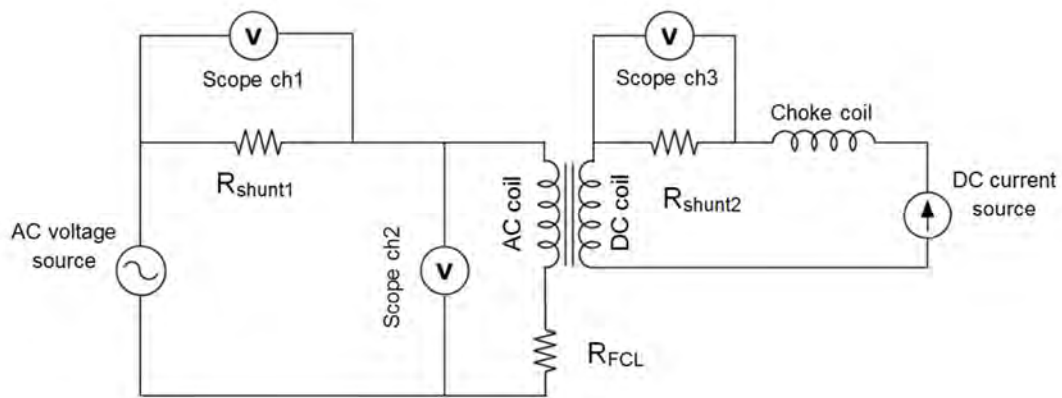
בין כל הסלילים במערכת קיימת רמה מסוימת של צימוד אלקטרומגנטי (Transformer coupling). תופעה זאת תלויה במצב הליבה, גורמת להפסדים ופוגעת בדיוק המדידה. יתרון בולט של תצורת ה-Open Core שפותחה במעבדה הוא הקטנת הצימוד בין מעגל AC ל DC ביחס לתצורות FCL אחרות. במקרה של זרם קצר, צלע אחת יוצאת מרוויה ולכן השדה בצד אחד של סליל ה-DC שונה מזה שבצדו השני והסימטריה נשברת. בזמן קצר השדה מסלילי AC אינו מתבטל לגמרי מתחת לסלילי ה-DC. שבירת הסימטריה גורמת לשינוי שטף בזמן וכתוצאה מכך למפל מתח על סלילי ה-DC. באיור 3-5 מוצגת צפיפות השטף מתחת לסלילי ה-DC בזרם AC של 100 אמפר ובזרם אפס. נקודת האפס מסמנת את מרכז הסליל. אפשר לראות בבירור את חוסר הסימטריה בין שני צדי הסליל יחד עם ירידה כללית של השדה מתחת לסליל. על מנת לשמור על זרם קבוע, מקור הזרם חייב לפצות על המתח המושרה על סלילי ה-DC. סכמת המעגל החשמלי עבור הניסוי הזה מוצגת באיור 4-5. מקור זרם DC בו השתמשנו הוא Kepco BOP 20-50MG המכוון ל 43A, מתח העבודה בזרם הזה הוא 11 וולט. המתח המקסימלי של הספק הוא 20 וולט כלומר, את תיקון המתח המושרה אפשר לעשות בתנאי שסה"כ המתח על הספק לא יעלה על ± 20 וולט. אולם, בעת אירוע קצר, בגלל הצימוד בין המעגלים, המתח המושרה יכול להיות עשרות וולטים ועלול להפעיל את הגנות הספק ולנתק את הזרם. כדי למנוע את הבעיה ולהקטין את המתח המושרה חיברנו סליל אוויר (choke) עם השראות 6mH במעגל ה-DC. למעשה הסליל משמש כמסנן AC במעגל ה-DC. המתח המושרה על סלילי ה DC גורם לשינוי זרם במעגל DC סליל האוויר הטורי הנוסף מתנגד לשינוי הזרם ולכן מאפשר מדידת השראות מדויקת יותר של סליל ה-AC.



איור 3-5. צפיפות השטף מתחת לסליל DC בנקודות זמן בהן הזרם AC 0A ו-100A.

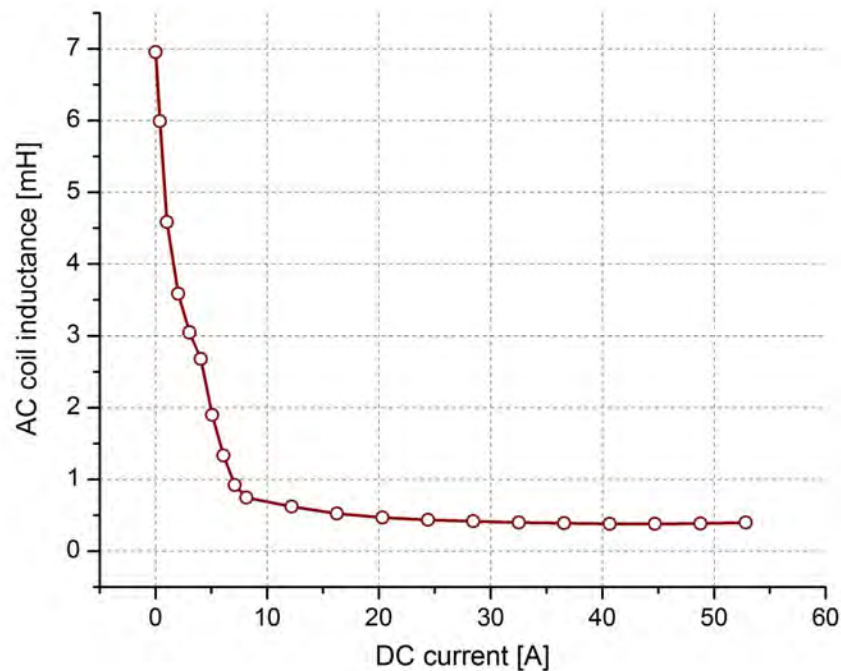
$$L_{FCL} = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\left(V_{FCL} \div \left(\frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} \right) \right)^2 - R_{FCL}^2}$$

השראות המחושבת לפי המשוואה הינה השראות דיפרנציאלית ממוצעת על פני מחזור אחד של הזרם. בהנחה שמצב הליבה אינו משתנה כמעט בזרם עם אמפליטודה של 14mA מדידה זאת משקפת את רמת הרוויה של הליבה כפונקציה של זרם DC.



איור 4-5. סכמה של מעגל המדידה.

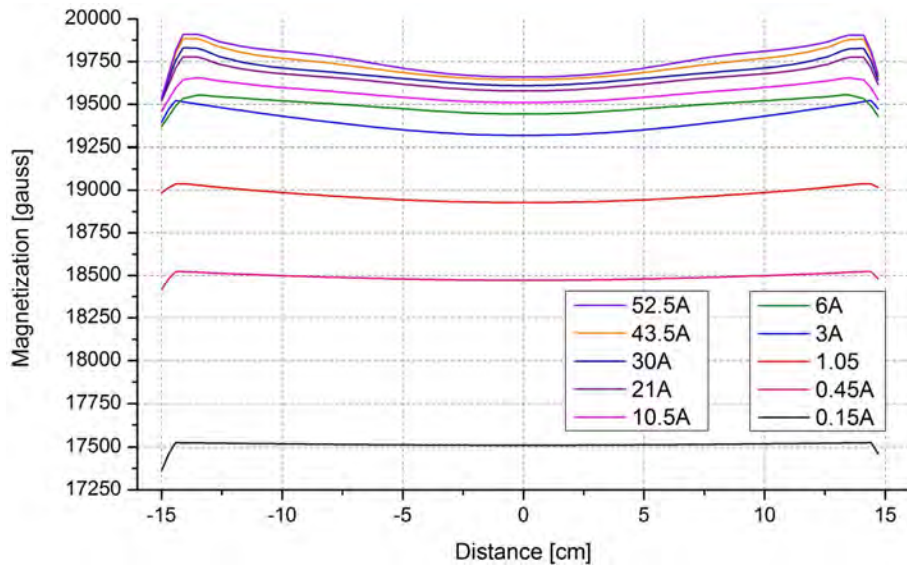
באיור 5-5 מוצגות תוצאות של הניסוי. אפשר לראות את התלות של השראות סליל AC בזרם DC. עבור זרם אפס ההשראות מקסימלית שכן הליבה אינה ברוויה והפרמביליות מקסימלית. מ 0A עד 7A מתקבלת ירידה תלולה בהשראות ובזרם 20A ההשראות כמעט מפסיקה להשתנות. זו הנקודה בה הליבה נכנסת לרוויה עמוקה. הגדלה נוספת של הזרם DC לא תקטין את השראות הסליל AC אבל יכולה לשחק תפקיד באופטימיזציה של תפקוד ההתקן. ככל שצפיפות השטף המגנטי גדולה יותר בליבה נמצאת הרוויה כך נדרש יותר שדה AC על מנת להוציא את הליבה מרוויה. על ידי הגדלת הזרם DC אפשר להגדיל את זרם AC הנומינלי ברשת מבלי לשנות פרמטרים נוספים בהתקן. כאשר משתמשים בסלילים שאינם מוליכי-על, להגדלת זרם ה-DC השפעה על העלות השוטפת של ההתקן מכיוון שההספק המתבזבז על הסליל גדל ביחס ריבועי עם הזרם.



איור 5-5. תלות ההשראות של סלילי ה AC בזרם DC.

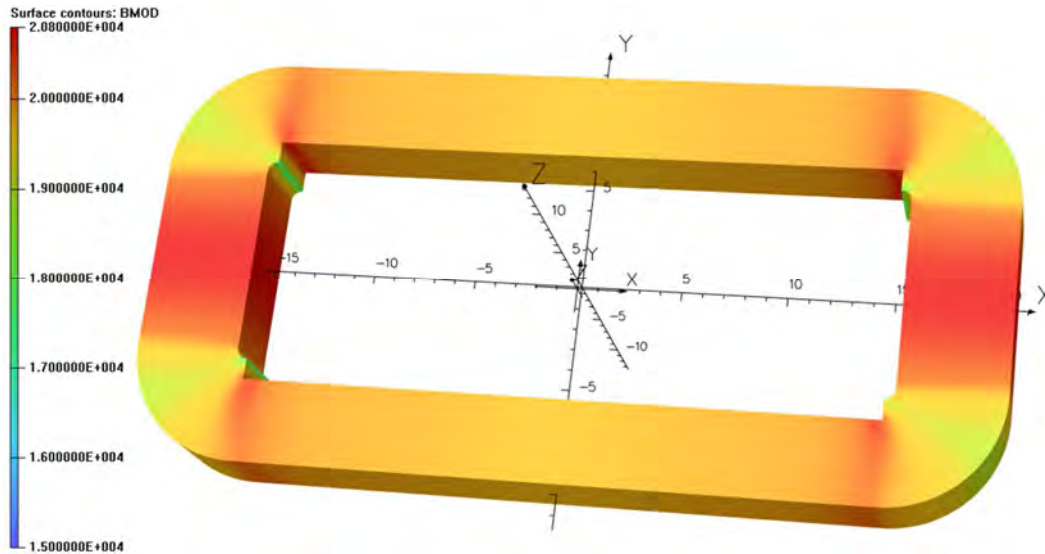
5.1.1 תוצאות סימולציות

לצד הניסוי הפיזי נעשתה סימולציית FEM של ה-FCL באותם זרמי DC. הסימולציה נותנת את ערכי הצפיפות השטף בליבה ישירות ובעזרת הצבה בעקומת ה-BH ניתן לקבל פרמאביליות בכל מקום במודל. איור 5 מראה את התפלגות צפיפות השטף המגנטי בקו האמצעי של הרגל הארוכה של הליבה. עבור סליל ה-DC הליבה מהווה מעגל מגנטי סגור ולכן פקטור הדה-מגנטיזציה מתקרב לאפס. כבר בזרם של DC 1A המגנטיזציה מגיעה ל 1.9T. התמונה שונה לחלוטין עבור מעגל המגנטי הפתוח (AC). כאן, למרות שהפרמביליות של החומר, כפי שהיא נראית לכאורה בעקומת BH, גבוהה מאד פקטור הדה-מגנטיזציה מקטין מאד את הפרמביליות האפקטיבית והשראות הסליל גדולה רק בערך פי 10 מהשראות אוויר. אפשר לראות באיור 5-6 שמעל זרם DC של 30A צפיפות השטף גדלה בעיקר בקצוות הליבה ולא במרכזה. הדבר נובע מבריחת שטף מגנטי מחוץ לליבה שכן הפרמביליות הנמוכה הופכת את המסלול המגנטי דרך הליבה "פחות משתלם" עבור השטף DC. כדי לקבל צפיפות שטף מקסימלית ואחידה יותר במינימום אמפר-ליפופים של ה-DC נדרשת אופטימיזציה גיאומטרית של ההתקן. הירידה החדה בצפיפות השטף הנראית בגרף בשני קצוות העקומה נובעת מהתקרבות האזור לרגל ה-DC של הליבה בה שטח החתך גדול יותר.



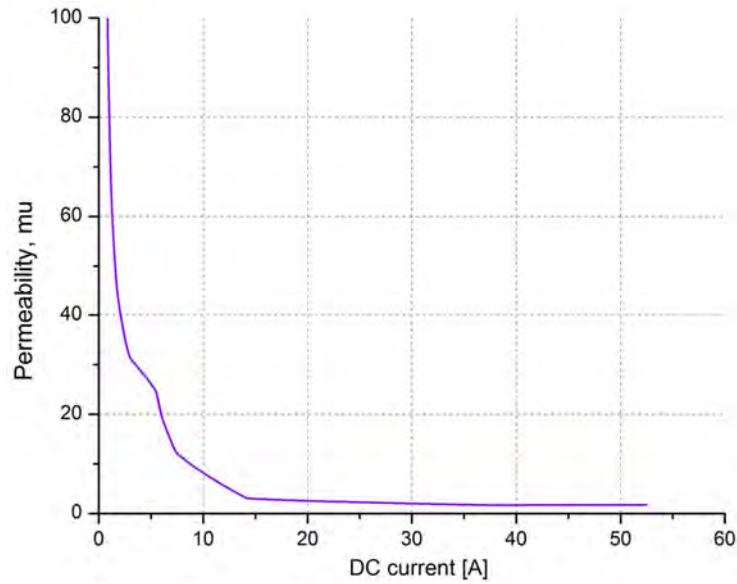
איור 5-6. התפלגות של שדה מגנטי בתוך הצלע הארוך של הליבה עבור זרמי DC שונים.

איור 7-5 מציג בדרך נוספת את התפלגות השדה בליבה ללא זרם בסלילי AC. אפשר לראות שבאזור החיבור בין הצלעות AC ל DC השדה גבוה יותר בצד הצלע הארוכה (צבע אדום יותר). כאמור, הדבר נובע מהבדלי שטח החתך בצלעות. במעבר משטח חתך גדול לקטן, השדה מתרכז תחילה בקצוות הצלע הארוכה בנקודת הממשק בין השטחים ואז מתפזר לקראת מרכז הצלע הארוכה.



איור 7-5. התפלגות צפיפות השטף בליבה בזרם AC אפס.

קיבלנו את ערכי הפרמביליות הדיפרנציאלית של הנקודה האמצעית במרכז הצלע הארוכה מתחת לסליל ה-AC. התלות של הפרמביליות בזרם DC שונה בכל נקודה ונקודה לכן הסתכלות על נקודה ספציפית נותנת רק תמונה כללית של המצב. כמו כן, מדובר בפרמביליות אינטרינזית של החומר ללא תיקוני דה-מגנטיזציה שכפי שהראנו כבר משחקים תפקיד מכריע בהשפעה על השראות הסליל AC. תוצאות החישוב מוצגות באיור 8-5 לפי החישוב הנ"ל אפשר להניח שמצב רוויה מתרחש כבר ב- 7 אמפר וב- 14 אמפר הליבה מגיעה לרוויה עמוקה מאוד.

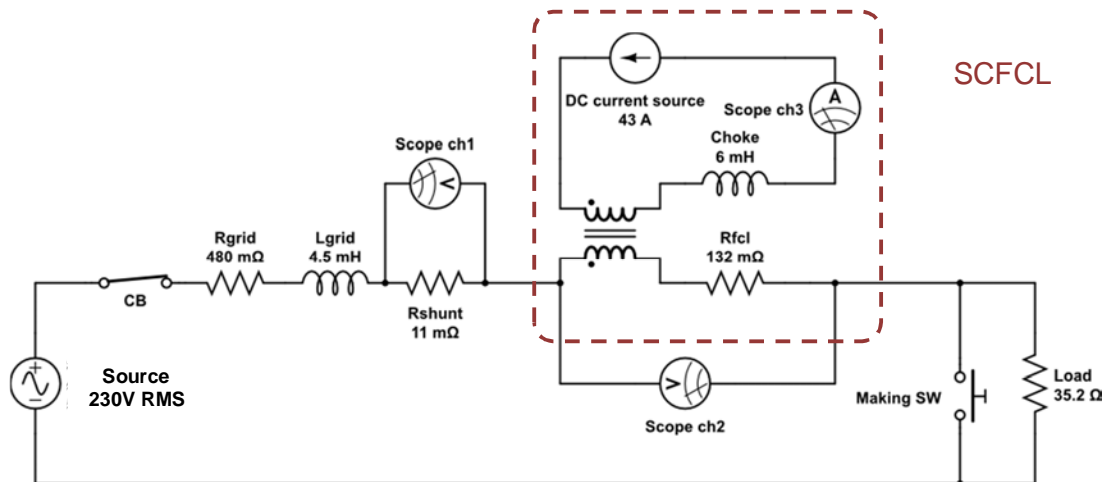


איור 8-5. פרמאביליות דיפרנציאלית בנקודה האמצעית של צלע הארוך כתלות בזרם DC.

5.2 מדידות של FCL ברשת החשמל

התקן ה-FCL שתואר לעיל, נבנה במעבדה וחובר לרשת החשמל שנתונה מפורטים בטבלה 2-5. המעגל החשמלי של הניסוי מוצג באופן סכמתי באיור 5-9. מקור המתח הוא רשת החשמל העירונית במתח חד-פאזי של $230V_{RMS}$. במעבדה מותקנים מפסקי הגנה מפני זרם גבוה מ-40A (CB) עם זמן תגובה של מספר מילישניות. לצורך ביצוע ניסוי בזרם קצר החלפנו את המפסקים בכאלו שנכנסים לפעולה אחרי 100msec בזרם מעל 40A. החלפה כזאת מאפשרת מדידה של המתח והזרם על פני 5 מחזורים מבלי לפגוע בתשתיות המעבדה.

עבור מעגל ה-DC השתמשנו בתצורה שתוארה לעיל דהיינו: מקור זרם (Kepco 20-) 50MG ב-43A, סליל (choke) של 6mH ושני סלילי ה-DC. מדידת הזרם במעגל ה-AC נעשתה בעזרת מדידת מתח על הנגד (shunt) של $11m\Omega$.



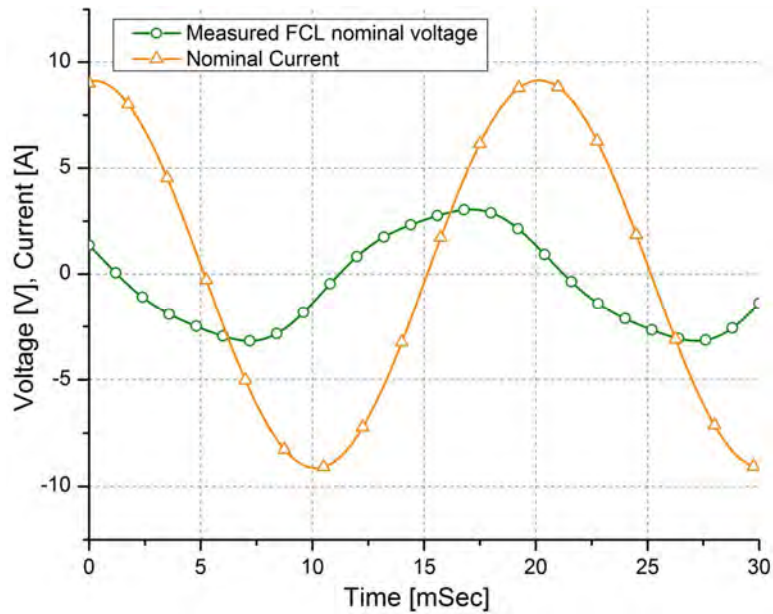
איור 9-5. סכמה של מעגל החשמלי של הניסוי.

Parameter	Value
Voltage RMS [V]	230
Frequency [Hz]	50
Grid inductance [mH]	4.5
Grid resistivity [Ω]	0.48
Normal load [Ω]	35.2
Overload [Ω]	18

טבלה 2-5. נתוני הרשת החשמל

Nominal regime 5.2.1

באיור 10-5 מוצגות תוצאות המדידה במצב נומינלי של הרשת. הזרם הנמדד במעגל $6.46A_{RMS}$ כאשר המתח על ה-FCL $1.96V_{RMS}$ כלומר, 0.8% בלבד מסה"כ מתח הרשת. קיימת סטייה קטנה מסינוס בצורת הגל של המתח סימן לכך שמרכז הסליל AC כבר אינו ברוויה כה עמוקה. עם זאת, בזרם זה הסטייה מרוויה בליבה זניחה ולכל צורך מעשי אין שינוי בהשראות הסלילים.

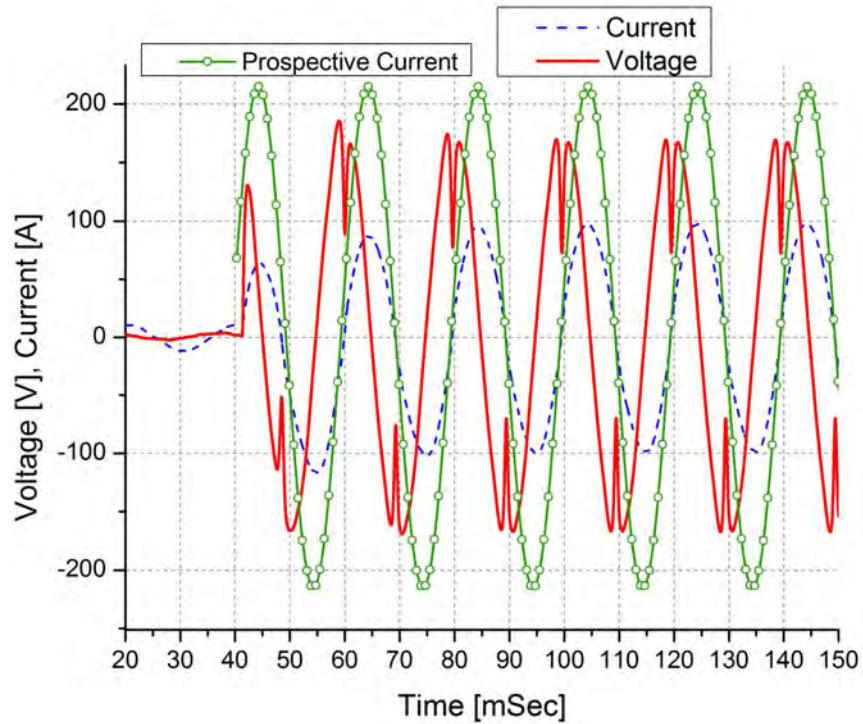


איור 5-10. זרם במעגל ומתח על ה-FCL במצב נורמלי.

Fault Regime 5.2.2

כדי לקבל בניסוי זרם קצר או סוגרים את המפסק (making switch) ובכך מקצרים את העומס (איור 5-9). את צורת הגל שהתקבלה ניתן לראות באיור 5-11. המתח על ה-FCL מסומן בצבע אדום והקו הכחול המקווקו מתאר את הזרם. גל נוסף – הזרם הלא מוגבל שהיה מתקבל ללא FCL (prospective current) מתואר בירוק. ה-FCL משנה את הזווית בין המתח לזרם ולכן הזרם הלא מוגבל מופיע עם הזזת פאזה. לצורך המחשה נוחה יותר של היחסים בין הזרמים, הזזנו באופן מלאכותי את הזרם הלא מוגבל כך שיהיה בפאזה עם הזרם המוגבל. אפשר לראות שקיים בזרם רכיב DC דועך במהירות.

תוצאות הניסוי: זרם מוגבל 74.6A, מתח 124V דהיינו, 54% מ 230V. הזרם לא מוגבל במעגל עומד על 154A. ההתקן מראה הגבלה של 52% של זרם הקצר.



איור 5-11. צורת גל של מתח על ה-FCL (אדום), זרם מוגבל (כחול מקווקו), וזרם הלא מוגבל (ירוק).

תוצאות אלו ואחרות יוסברו לעומק בפרקים הבאים.

לסיכום, בפרק זה חקרנו את הביצועים של דגם FCL מעבדתי שנבנה על סמך התובנות שתוארו בפרקים הקודמים. התכנון משפר משמעותית את הרוויה המגנטית על צלע ה-AC ומעמיק אותה משמעותית במרכז הצלע (והסליל). כתוצאה מהשיפור בתכנון המגנטי נתקבל שיפור משמעותי בביצועי ההתקן. המודל המעבדתי מציג כעת מפל מתח של 0.8% במצב נומינלי במקום 3.8% שהיה בדגם הראשון. מפל המתח בעת קצר עולה ל-52% וזהו גם שיעור הגבלת זרם הקצר. האימפדנס עובר מערך של 0.3 ל-1.66 כלומר יחס אימפדנסים של כ-5.5, שיפור עצום לעומת היחס של 1.68 בדגם הראשון שנבדק בחברת החשמל ו-4.7 בדגם המחושב. ככל שיחס האימפדנסים גבוה יותר כך גבוהה יותר גמישות ויעילות ה-FCL ברשת.

6 חישוב השראות ופתרון אנליטי

על מנת לאפיין את התנהגות של ה-FCL ברשת החשמל צריך לפתור את משוואה (1). את המשוואה ניתן לפתור בקלות בעזרת שיטות נומריות אם התלות של השראות סלילי AC בזרם שזורם דרכם $L(I)$ ידועה. הפונקציה $L(I)$ הינה ייחודית לכל קונפיגורציה של ה-FCL ולכן לא ניתן לקבל את התלות באופן אנליטי. עבור כל תכנון של FCL תהינה פונקציה $L(I)$ משלו.

$$V \cos(\omega t) = I(R_{load} + R_{grid} + R_{fcl}) + L_{grid} \frac{dI}{dt} + \frac{d}{dt}(L_{fcl}I) \quad (1).$$

כאשר R ו- L הם התנגדות והשראות של רכיבי המעגל ו I זה הזרם.

צורת הפונקציה $L(I)$ משחקת תפקיד משמעותי במשוואה כי היא קובעת את מפל מתח על ה-FCL וכתוצאה מכך גם הזרם המעגל. מפל מתח על ה-FCL נתון על ידי:

$$V_{fcl} = IR_{fcl} + L_{fcl} \frac{dI}{dt} + I \frac{dL_{fcl}}{dt} \quad (2).$$

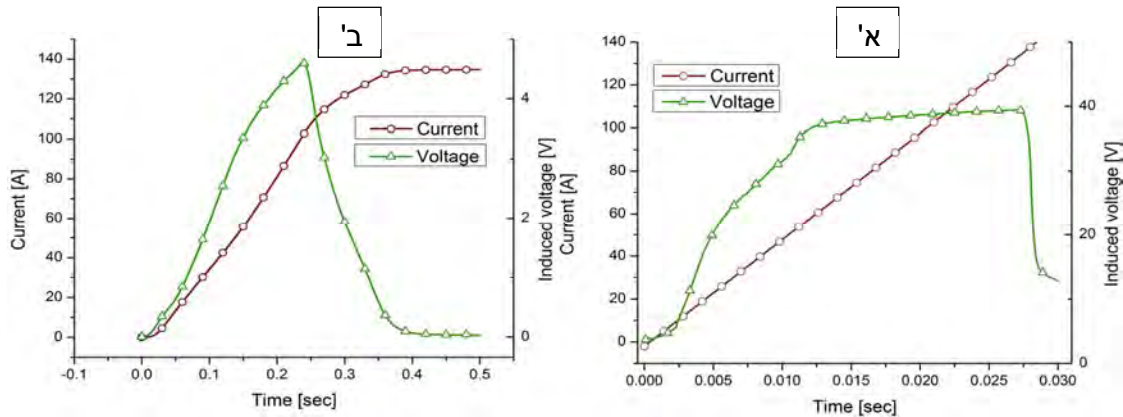
בפרק זה אני רוצה להציג שיטה למדידה ולחישוב השראות הסליל כפונקציה של הזרם הזורם דרכו. לצורך אימות והשוואה קיבלתי את ערכי ההשראות גם מתוך סימולציות FEM וגם מתוך מדידה פיזית של המודל במעבדה.

מתוך משוואה (2) נובע שהשראות הסליל היא:

$$L(t) = \frac{\int (V_{fcl} - IR_{fcl}) dt}{I(t)} \quad (3)$$

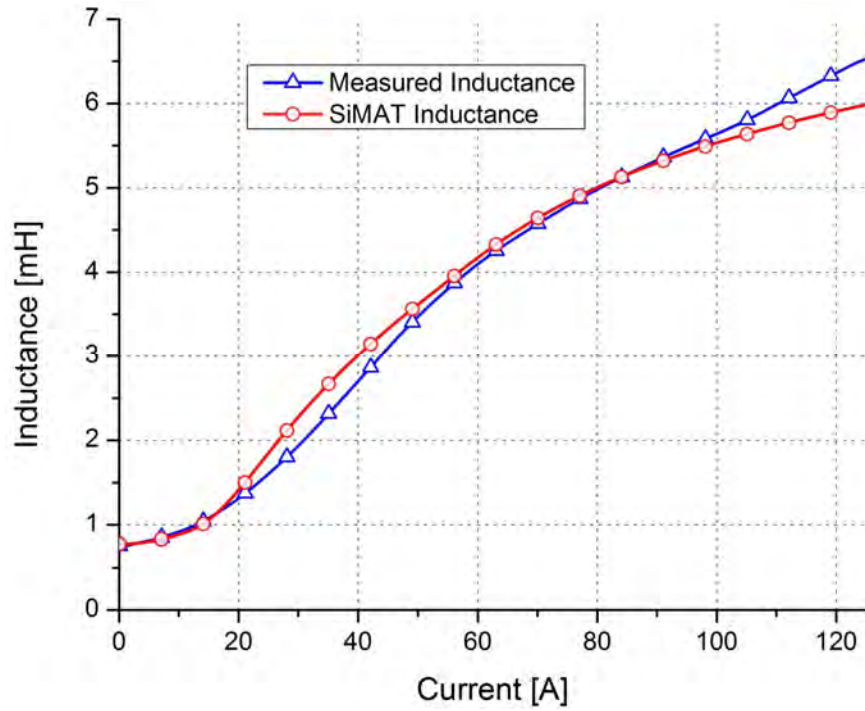
המדידה התבצעה על ידי הזרמת זרם עולה (ramp) דרך סלילי ה-AC בעזרת ספק כח Xantrex SPR 20-300. הזרם המקסימלי שהספק הנ"ל יכול לספק הוא 130A. הזרם הזה מספיק בשביל לאפיין את ההשראות בכל המצבים האפשריים בחיבור לרשת החשמל האמיתית. לפי הניסוי קצר הזרם המוגבל לא עלה מעל 110A. בפועל צורת הזרם בניסוי לא הייתה ליניארית וזה בגלל הגבלה

של הספק (אותו ניסוי נעשה עבור הדגם הממוחשב ב-FEM. בסימולציית FEM אין, כמובן, מניעה להשתמש במקור זרם אידאלי).



איור 6-1. זרם ומתח מושרה: א' סימולציית FEM, ב' מדידה פיזית

המתח המוצג (ירוק) הוא רק החלק המושרה לאחר החסרת המתח ההתנגדתי IR. התלות של $I(t)$ ו- $V(t)$ ידועים ולכן אפשר בקלות לקבל את $L(I)$. אחרי אינטגרציה נומרית קיבלתי את ערכי ההשראות עבור שני הניסויים (איור 6-2). בכחול השראות שהתקבלה ממדידה פיזית בצבע אדום מתוך סימולציית FEM (SiMAT). אפשרות לצפות בהתאמה נהדרת בין שתי העקומות. למרות שיש הבדלים קטנים ביניהם שיכולים לנבוע מחוסר דיוק במדידה, תופעות שלא נלקחו בחשבון בסימולציה כמו זרמי מערבולת ורמת הצימוד בין מעגל DC ו AC קטנה אבל לא אפסית.

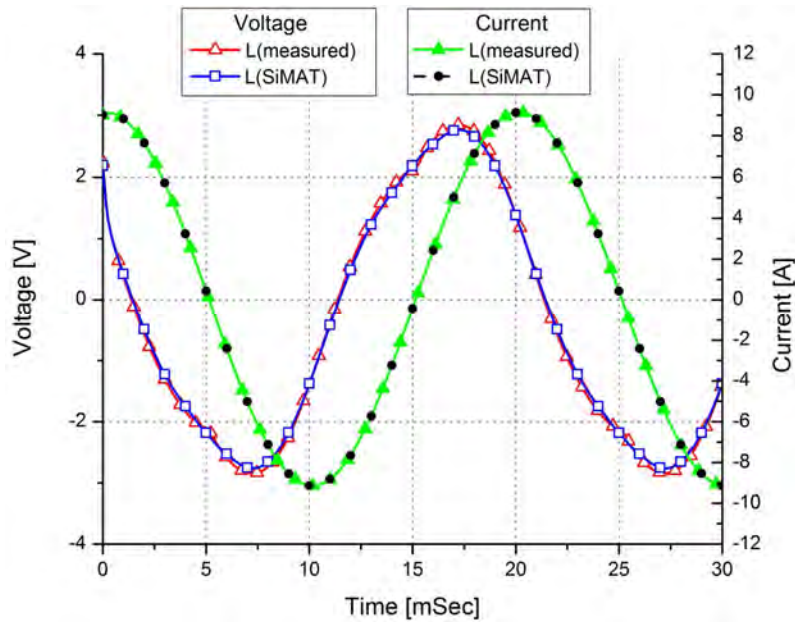


איור 6-2. השראות כתלות בזרם מדודה (כחול) ומתוך סימולציית FEM (אדום).

6.1 פתרון המשוואה

לאחר קבלת הפונקציה $L(I)$ אפשר לפתור את המשוואה של FCL ברשת החשמל. לטובת אימות תוצאות הניסוי מפרק קודם הצבתי את אותם פרמטרים של רשת החשמל (טבלה 5-2). כל החישובים התבצעו בסביבת מיחשוב Matlab. ראשית אני רוצה להשוות ולהסביר את הפתרון נומרי עם השראות מדודה ועם שמופקת מהסימולציה.

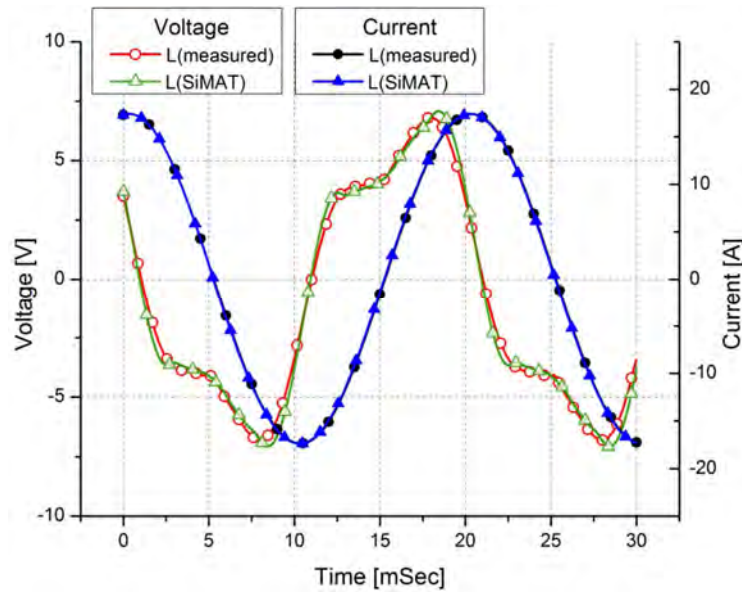
Nominal and overload regimes 6.1.1



איור 6-3. צורות זרם ומתח על ה-FCL במצב נורמלי עבור פתרון נומרי עם השראות מדודה L(measured) (אדום וירוק) ועם השראות מסומלצת (SiMAT) קווים שחור וכחול.

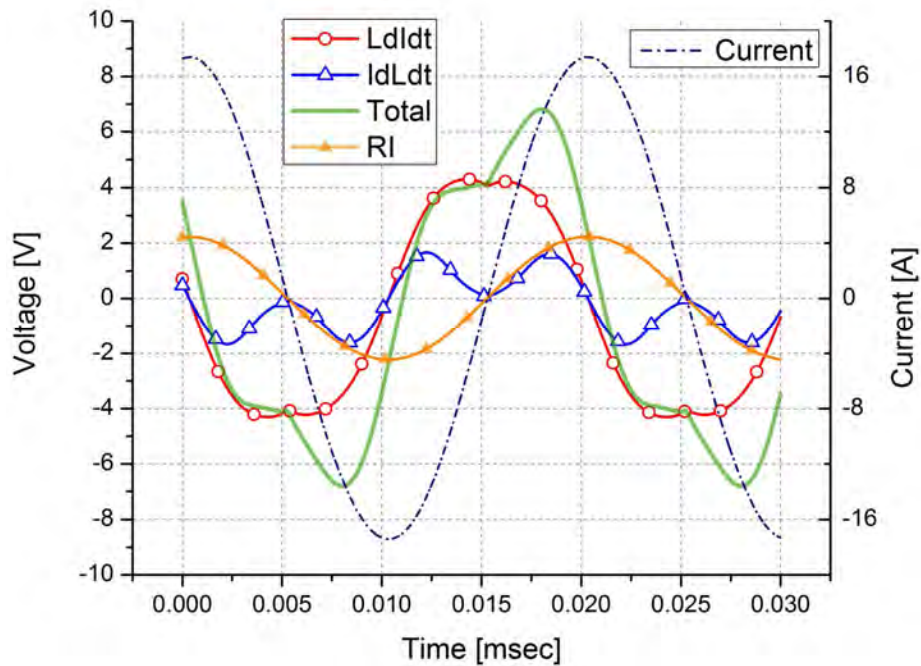
באיור 6-3 מוצגות צורות הגל מתוך פתרון נומרי של המשוואה הדיפרנציאלית (1). יש

התאמה מצוינת של העקומות הרלוונטיות.



איור 6-4. צורות גל של זרם ומתח על ה-FCL במצב עומס יתר של הרשת מתוך פתרון נומרי עם השראות מחושבת L(SiMAT) ומדודה L(measured).

מצב עומס יתר של הרשת מוגדר כמצב עם עומס כפול כלומר 18 אוהם במקום 35.2 אוהם. הזרם עלה מ 6.46 אמפר ל-12.33 אמפר. במצב זה מפל מתח כבר בצורת סינוס. הזרם מספיק גבוה בשביל לגרום לשינוי השראות בזמן המחזור. הדרך שבה קיבלתי את צורת הגל מאפשרת להסתכל על כל המרכיבים של המתח לפי (2).



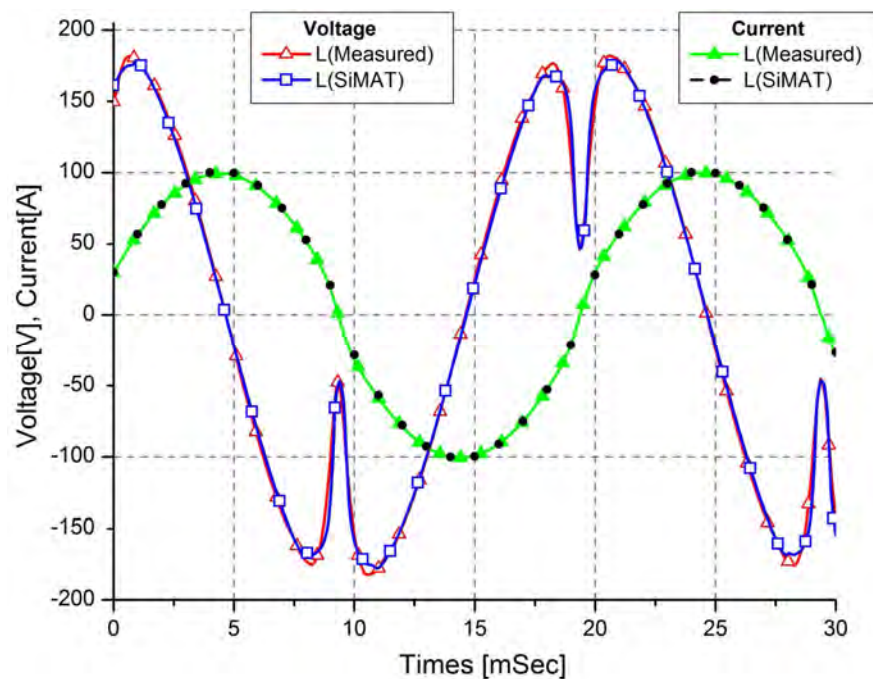
איור 5-6. שלושת המרכיבים של מפל מתח על ה-FCL במצב של עומס יתר. הרכיב הליניארי Ldl/dt באדום, $IdLdt$ נגזרת של השראות בכחול, והרכיב ההתנגדתי RI בכתום. סה"כ מתח בירוק. זרם בסגול מקווקו.

אפשר לראות באיור 5-6 את המרכיבים של המתח על ה-FCL. במקרה הזה החוסר סימטריה במתח בולט מאוד. הרכיב ההתנגדתי ש"הולך" באותה פאזה עם הזרם מסומן בכתום. המתח המושרה מהאיבר הליניארי של השראות $L \frac{dI}{dt}$ באדום. מכיוון שההשראות איננה משתנה בהרבה צורת הגל דומה לסינוס. אבל האיבר הלא ליניארי של השראות תורם הרבה לצורת הגל הכללית. האיבר $I \frac{dL}{dt}$ (מסומן בכחול) מתחיל לגדול כשהזרם עולה מעל 10 אמפר. שבירת הסימטריה נובעת מהעובדה שמרכיב המתח ההתנגדתי מחליף סימן כאשר הזרם מחליף סימן בזמן ששני הרכיבים ההשראותיים לא. כשהזרם מתקרב לנקודת האפס זה מייצר מתח שונה מהמתח כשהזרם מתרחק מהנקודה. בגלל שסה"כ המתח ההשראותי אינו סינוסואדלי כשמחברים אליו את

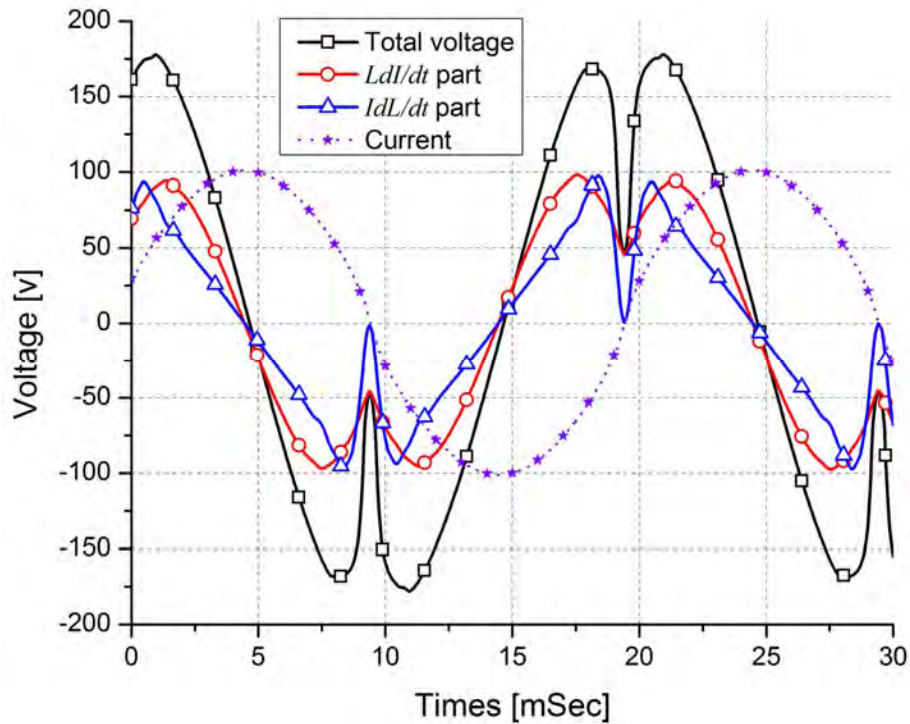
הרכיב ההתנגדתי עם הפרש פאזה של $\pi/2$ נוצר גל שהוא לא סימטרי יחסית לנקודת האפס של הזרם. המתח על ה-FCL בניסוי זה היה 4.58V; זה מהווה 2% ממתח הרשת. למרות העלייה של הזרם ב 190% המתח עלה ב 233% בגלל שינוי השראות הנ"ל. בהתקן FCL בסקלה של רשת חשמל של מתח גבוה או בינוני, תופעה כזאת משחקת תפקיד משמעותי ודורשת אופטימיזציה יסודית.

Fault regime 6.1.2

במקרה של אירוע קצר אין עומס ברשת וכל המתח נופל על השנאי וה-FCL. תוצאות החישוב מובאות באיור 6-6. גם הפעם ההתאמה מצוינת בין העקומות. את צורת המתח בעלת שני שיאים מובהקים בכל חצי מחזור יותר קל להסביר בעזרת איור 6-7. כמו קודם, המתח הכללי מפורק לגורמים המרכיבים אותו. הפעם הליבה יוצאת מרוויה בצורה מלאה והשראות גדלה באופן ניכר.



איור 6-6. צורות הגל של זרם ומתח בעת אירוע קצר מתוך פתרון נומרי עם השראות מחושבת L(SiMAT) ומדודה L(measured).

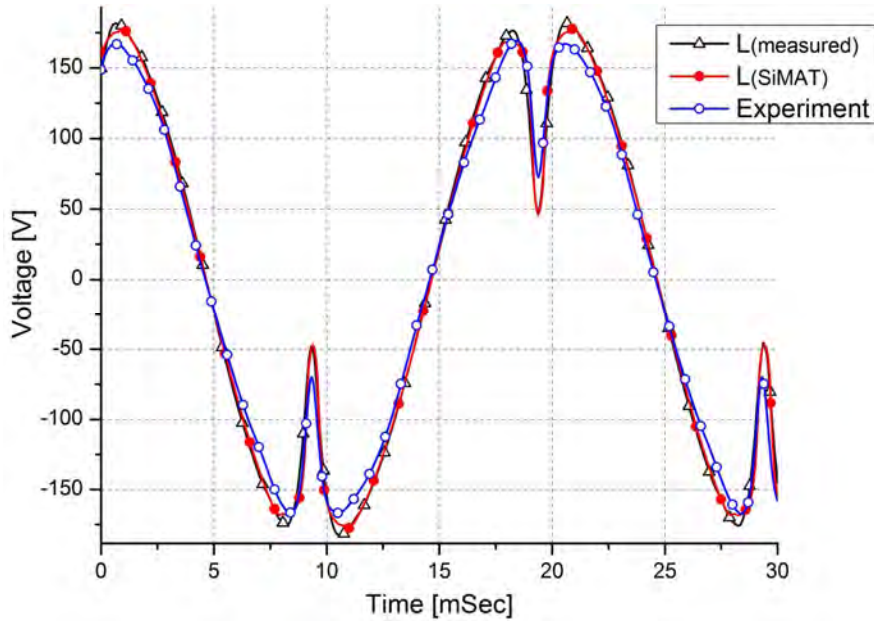


איור 6-7. מרכיבים של מתח על ה-FCL בזמן קצר.

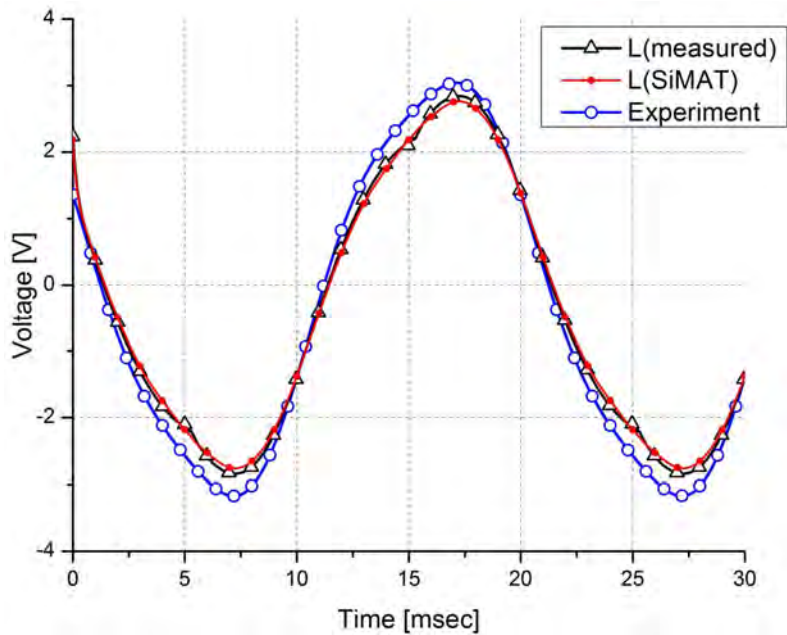
האיבר $I \frac{dL}{dt}$ תורם עד 50% למתח הכללי של ה-FCL. כשהזרם עובר את נקודת האפס ועולה מעל 10 אמפר מתרחש תהליך דה-סטורציה של הליבה. ההשראות מתחילה לגדול וביחד עם הנגזרת שלה גורמים לעליה חדה במתח עד נקודת המקסימום של הזרם שבה המתח מתאפס. מהנקודה הזאת ואילך הזרם קטן ולכן המתח שלילי. כשהזרם חיובי ומגיע לאפס האיבר $I \frac{dL}{dt}$ שלילי בגלל שההשראות פוסקות מלהיות גדולה והופכת להיות קטנה כי הליבה נכנסת לרוויה בחזרה. כשהזרם חוצה את האפס, ההשראות שוב גדלה; אבל האיבר נשאר שלילי כי הסימן של הזרם הוא שלילי, כך שנגזרת של ההשראות תהיה תמיד באותו סימן כמו האיבר הליניארי $L \frac{dI}{dt}$. בעזרת אופטימיזציה נוספת אפשר לגרום למעבר של ההשראות להיות מהיר יותר ועל ידי כך להגדיל את האיבר $I \frac{dL}{dt}$ ולהרוויח מפל מתח גדול יותר, כלומר הגבלת זרם טובה יותר.

לסיום הפרק אני רוצה להראות את צורות הגל שהתקבלו בשלוש דרכים שונות. באיור 6-8 מוצגות שלוש צורות גל של מתח גל ה-FCL. שתיים מהן זה פתרון נומרי ב-Matlab עם השראות

מדודה וזאת המופקת מתוך סימולציה. הגל השלישי התקבל מתוך ניסוי פיסי של FCL ברשת החשמל (Experiment). האיור מציג התאמה מצוינת בין שלשת העקומות.



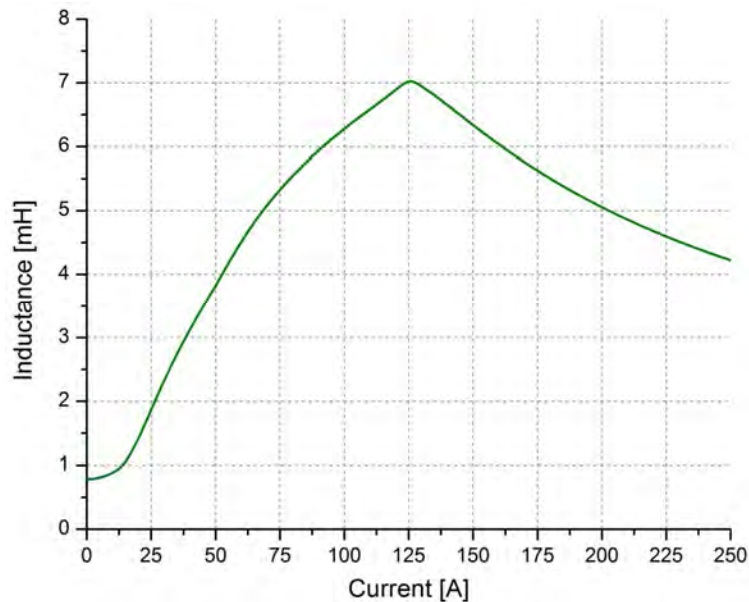
איור 8-6. שלוש צורת גל של מתח על ה-FCL בזמן קצר. פתרון נומרי עם השראות מדודה L(measured), פתרון נומרי עם השראות מסומלצת L(SiMAT), ניסוי פיסי (Experiment).



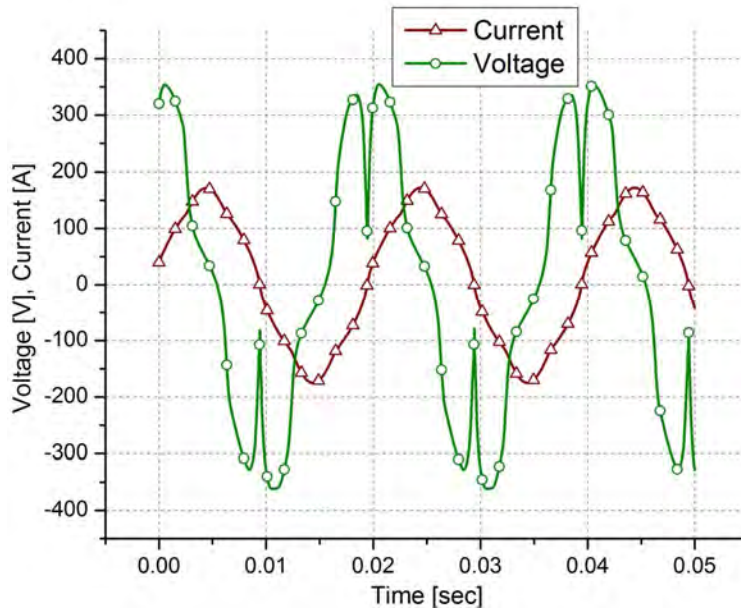
איור 9-6. שלוש צורת גל של מתח על ה-FCL במצב נומינלי. פתרון נומרי עם השראות מדודה L(measured), פתרון נומרי עם השראות מסומלצת L(SiMAT), ניסוי פיסי (Experiment).

Fault regime in 400V grid 6.1.3

לאחר שהשיטה לפתרון משוואה דיפרנציאלית המתארת את רשת החשמל עם FCL נבדקה בהצלחה, ערכנו סימולציית FEM נוספת. הזרם זרם עולה בהדרגה מ-0 עד 250 אמפ' על מנת להרחיב את טווח ערכי ההשראות $L(I)$ של ה-FCL (איור 6-10). זרם של 125 אמפר מספיק גבוה בשביל להכניס את הליבה לרוויה הפוכה, כלומר לאחר שינוי שדה מ $+2T$ ועד $-2T$. מאותה נקודה והלאה ההשראות קטנה עם הזרם.

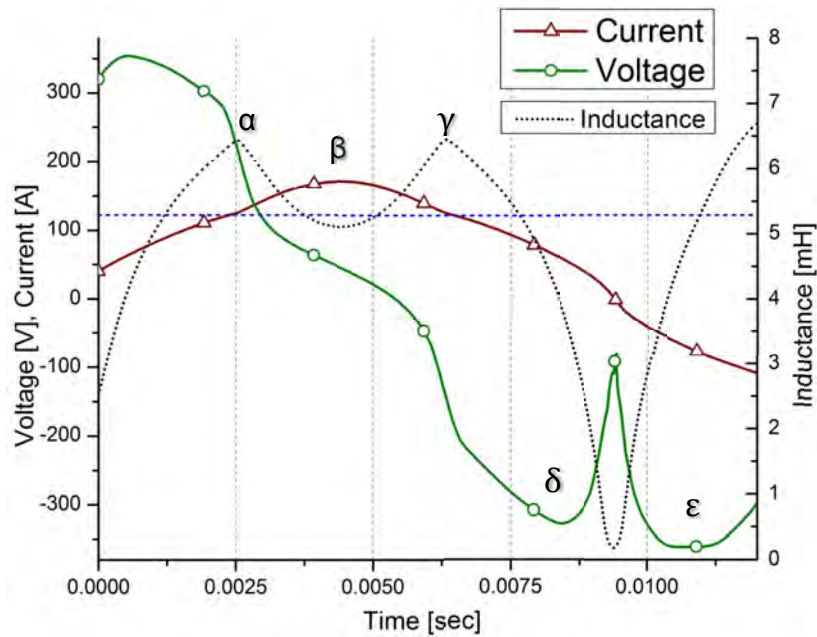


איור 6-10. השראות סלילי ה-AC כפונקציה של הזרם. מתוך סימולציית FEM עם זרם עולה (ramp) עד 250A. השתמשנו בעקומה החדשה כדי לבדוק את התנהגות ההתקן ברשת של 400V כאשר שאר הפרמטרים של הרשת נשארו ללא שינוי. צורות הגל של המתח והזרם מתוך החישוב ב-Matlab של אירוע הקצר מובאים באיור 6-11. הזרם המוגבל בחישוב זה היה 110.7 אמפר (RMS) עם מתח על ה-FCL 227 וולט (RMS). זרם רגעי מקסימלי עומד על 171 אמפר מה שמספיק בשביל שתתרחש כניסה לרוויה הפוכה של הליבה. כדי להסביר את השפעת התהליך על המתח והזרם צורת הגל שלהם מובאים בהגדלה באיור 6-12 עם סימון הנקודות החשובות.



איור 11-6. זרם ומתח על ה-FCL בעת אירוע קצר ברשת החשמל 400 וולט.

באיור 12-6 מציגות הנקודות החשובות בזמן אירוע קצר.



איור 12-6. זרם (אדום), מתח על ה-FCL (ירוק) והשראות ה-FCL (שחור מקוקו) בארוע קצר ברשת החשמל 400 וולט.

בנקודת זמן α ($t=2.5\text{msec}$) הזרם הרגעי עובר את הסף של 125 אמפ' מה שגורם לאיבר $I \frac{dL}{dt}$

להיות שלילי עקב הקטנת השראות בזמן ששני המרכיבים האחרים האינדוקטיבי $L \frac{dI}{dt}$ וההתנגדות

IR_{fcl} נשארים חיוביים. שינוי סימן הזה גורם לירידה חדה במתח (הקו הירוק) וכתוצאה מזה עליה בזרם (קו אדום). אחרי שיא הזרם בנקודה β ($t=4.4\text{msec}$) הזרם מתחיל לקטון האיבר $I \frac{dL}{dt}$ חיובי $L \frac{dI}{dt}$ שלילי ו- IR_{fcl} חיובי עד הנקודה γ ($t=6.3\text{msec}$) שבה שני האיברים האינדוקטיביים שליליים והאיבר ההתנגדתי חיובי. בנקודה δ יש שיא מתח לוקאלי שהוא יותר נמוך מהשיא מתח בנקודה ϵ בגלל שב ϵ גם האיבר ההתנגדתי מחליף סימן כך ששלושת האיברים באותו סימן.

למרות הכניסה של הליבה לרוויה הפוכה בזמן קצר ה-FCL מציג הגבלה טובה יותר, של 2.14, ברשת 400 וולט ו-2.06 ברשת של 230 וולט.

7 התפלגות לוקאלית של הפרמטרים המגנטיים

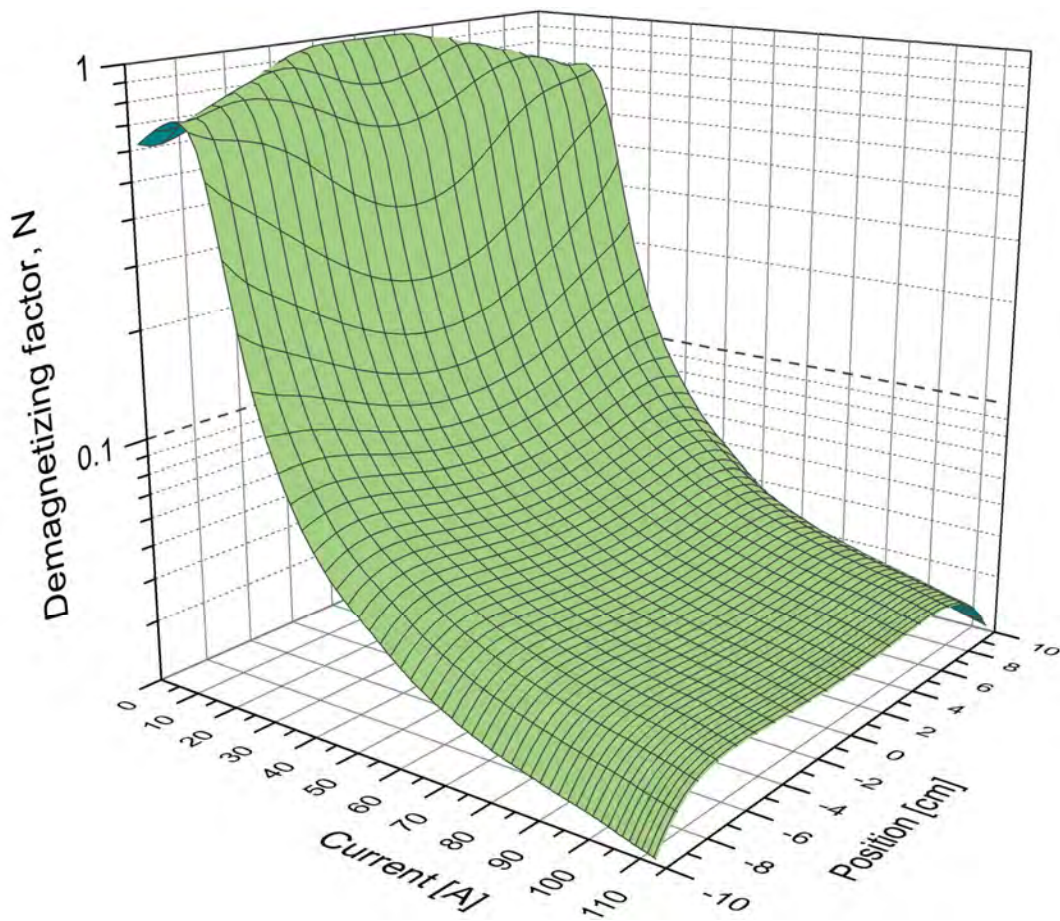
בפרק זה נרחיב את הניתוח של תהליך הדה-סטורציה של הליבה והאופן בו הוא משפיע על הביצועים של ה-FCL. לסליל AC של ה-FCL יש ממדים סופיים, הוא אינו סולנואיד ארוך וגם לא לולאת זרם. בנוסף, המצב המגנטי של החומר מתחת לסליל משתנה באופן קיצוני בתהליך המעבר של הליבה. גורמים אלו אילצו אותנו להגדיר "פקטור דה-מגנטיזציה שימושי" אותו תיארנו בפרק 1.5. פקטור הדה-מגנטיזציה השימושי מוגדר לאזור שנמצא מתחת לסליל בלבד. את האנליזה ביצענו על תוצאות הסימולציה של אירוע קצר בדגם המעבדה. כמו שראינו בפרק 1.5 פקטור דה-מגנטיזציה שימושי נתון על ידי:

$$N_i^* = \frac{B_{in}^i H_a^i - H_{in}^i (B_{DC}^i - B_{in}^i)}{(B_{in}^i - H_{in}^i)(B_{DC}^i - B_{in}^i)}$$

אורך הסליל בחישוב הוא 20cm, ומשתרע מ -10 עד +10 בציר ה-X. החישוב מתבסס על ערכים ממוצעים של השדות (Bin, Hin) על פני שטח החתך בכל נקודה בציר ה-X. ערכנו סימולציות נוספות כדי לקבל את ערכי השדה המגנטי שהסליל היה מייצר לו היה עם ליבת אוויר (Ha). Bdc הוא השדה בתוך הליבה בזרם AC אפס. באיור 22-7 מוצגות תוצאות החישוב של פקטור הדה-מגנטיזציה החדש כפונקציה של המיקום מתחת לסליל AC וכפונקציה של הזרם בסליל. הסליל מלופף ואינו צמוד לגמרי לליבה, כדי לדמות את המצב האמיתי בו קיימת שכבת בידוד בין הסליל לליבה. לפיכך, יש שטח מסוים מתחת לסליל בין הסליל לליבה (איור 7-1) שההשראות הלוקאלית בו אינה משתנה. את יחס השטחים (8:7 - אוויר:ברזל) צריך לקחת בחשבון כשמחשבים את השטף המגנטי והשראות של הסליל.



איור 1-7. חתך של הסליל AC (אדום) והליבה (אפור).

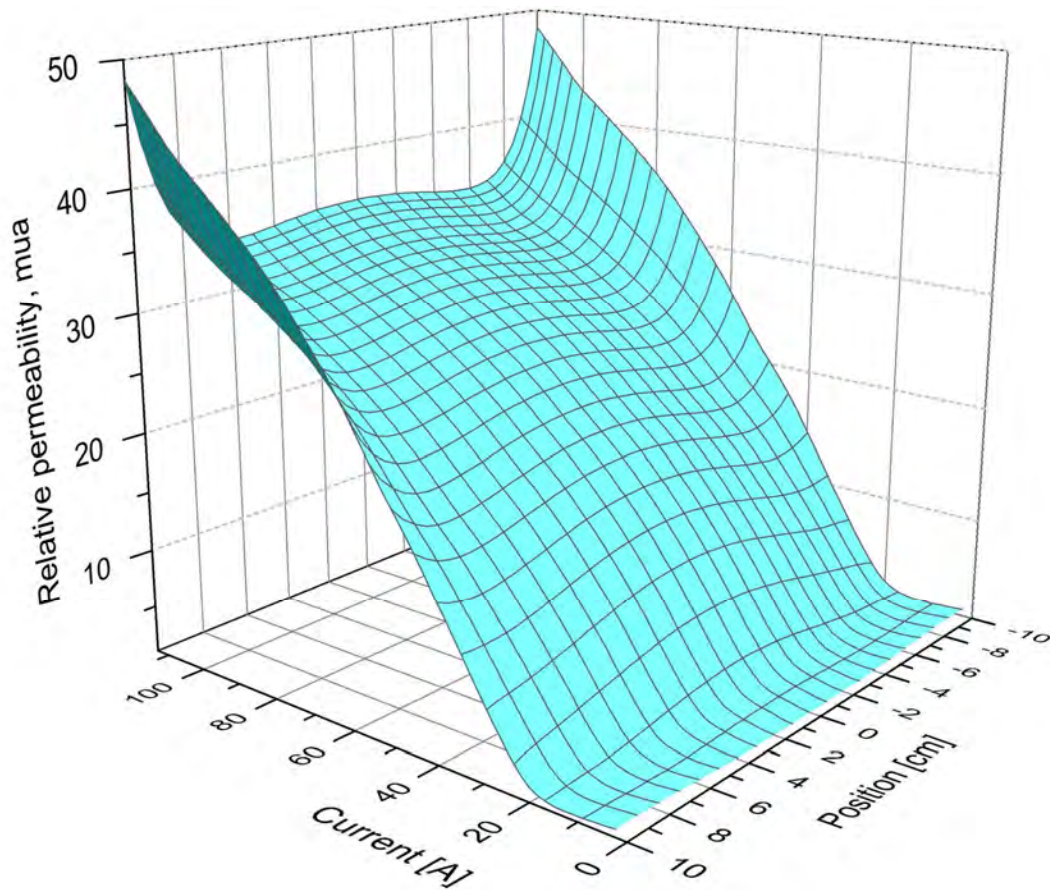


איור 2-7. פקטור הדה-מגנטיזציה החדש כפונקציה של הזרם והמיקום מתחת לסליל.

בזרם AC קרוב לאפס מקדם הדה-מגנטיזציה עבור הסליל מקסימלי במרכז מכיוון שהשדה שהסליל מייצר הכי גבוה במרכז אבל הליבה נשארת רוויה כלומר אין שינוי גדול בשדה בתוך הליבה. כשהזרם עולה תהליך הדה-סטורציה של הליבה מתחיל מהאמצע ומתפשט לצדדים. זה המקום שבו

הרוויה פחות עמוקה מאשר בצדדים. בנוסף, כפי שאמרנו השדה שהסליל מייצר מקסימלי בנקודה זו. ההשראות הלוקאלית מתחילה לגדול גם היא מהמרכז.

ההשראות של סליל נתון כאשר הליבה רוויה ניתנת לחישוב בקלות. את ההשראות המקסימלית גם כן אפשר להעריך אבל אופן המעבר בין שני הערכים תלוי מאוד באופן ההשתנות של פקטור הדה-מגנטיזציה. בדוגמה של FCL ברשת עם עומס יתר הזרם היה מספיק גדול בשביל לשנות פקטור זה במרכז, להגדיל במעט את ההשראות הכללית ולגרום להגדלת מפל המתח.



איור 3-7. פרמביליות יחסית לוקאלית כפונקציה של הזרם והמיקום מתחת לסליל.

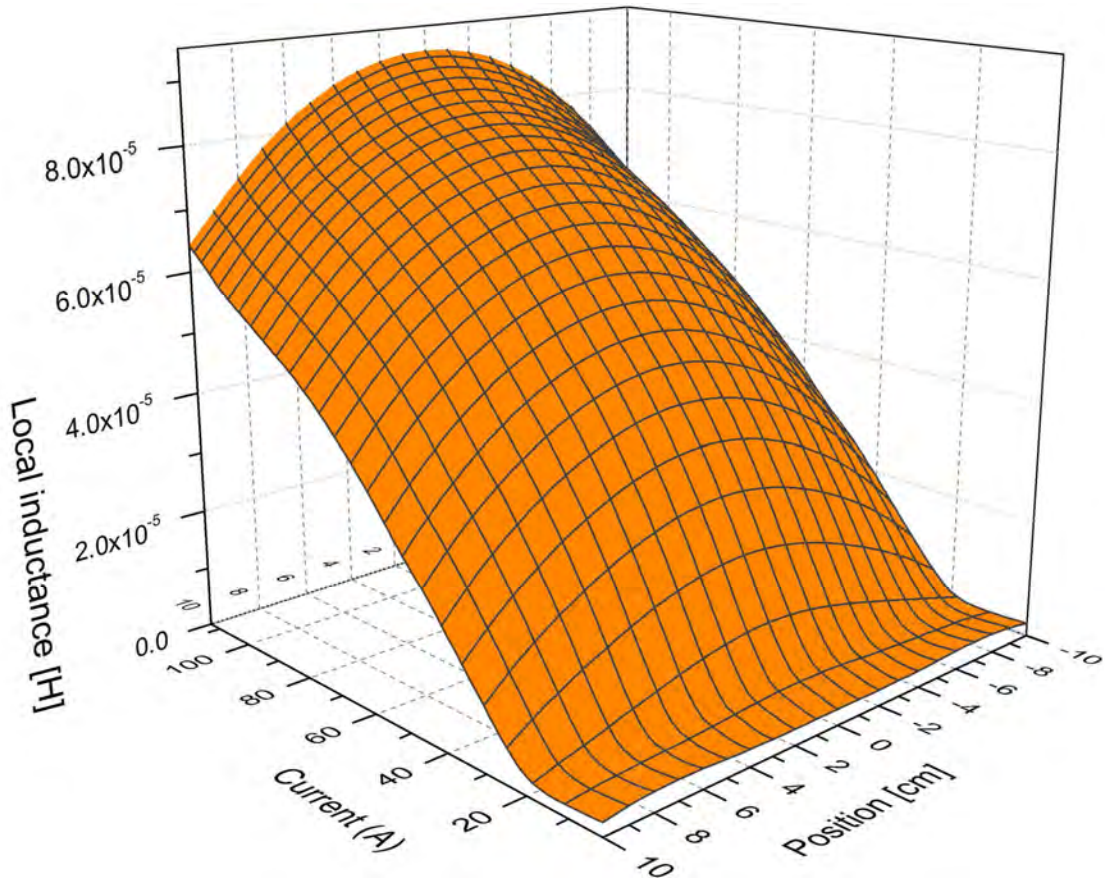
באיור 3-7 אפשר לראות את הפרמביליות היחסית מתחת לסליל כפונקציה של הזרם והמיקום. בתחילת התהליך העלייה הדומיננטית נמצאת במרכז אבל ככל שהזרם עולה, הפרמביליות היחסית גדלה חזק בקצוות הסליל. תופעה זאת נובעת מהגדרת הפרמביליות היחסית הנראית:

$\mu_{a,r} = \frac{B_{in}}{H_a}$ דהיינו היחס בין השדה המתקבל לשדה החיצוני באותה נקודה. השדה שהליפופים החיצוניים מייצרים חלש יותר מאלה שבמרכז אבל השדה בתוך הליבה שאינה רוויה מתחיל להיות אחיד יותר בזרמים גבוהים. כתוצאה מכך הפרמביליות היחסית גדלה בקצוות. אם נכפיל את השראות האוויר הלוקאלית בפרמאביליות היחסית התואמת יתקבל גרף של ההתפלגות של השראות הסליל כפונקציה של הזרם (איור 4-7). השראות הסליל מקסימלית במרכז כצפוי וקטנה יותר בצדדים. מכיוון שמדובר בהשראות ליניאריות גם הנגזרת שלה לפי הזרם משחקת תפקיד חשוב בביצועי ה-FCL. ככל שהתהליך מהיר יותר והומוגני יותר הנגזרת תהיה גדולה יותר וכתוצאה מכך המתח על ה-FCL גבוה יותר. בעזרת שינויי מיקום של ליפופי הסליל אפשר לשפר את הנתונים של ההתקן מבלי להשקיע בשינוי גאומטרי של הליבה.

ההשראות הכללית של הסליל היא סכום של כל ההשראות הלוקאליות לאורך הסליל או:

$$L_{total} = \frac{n}{l} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} L(x) dx$$

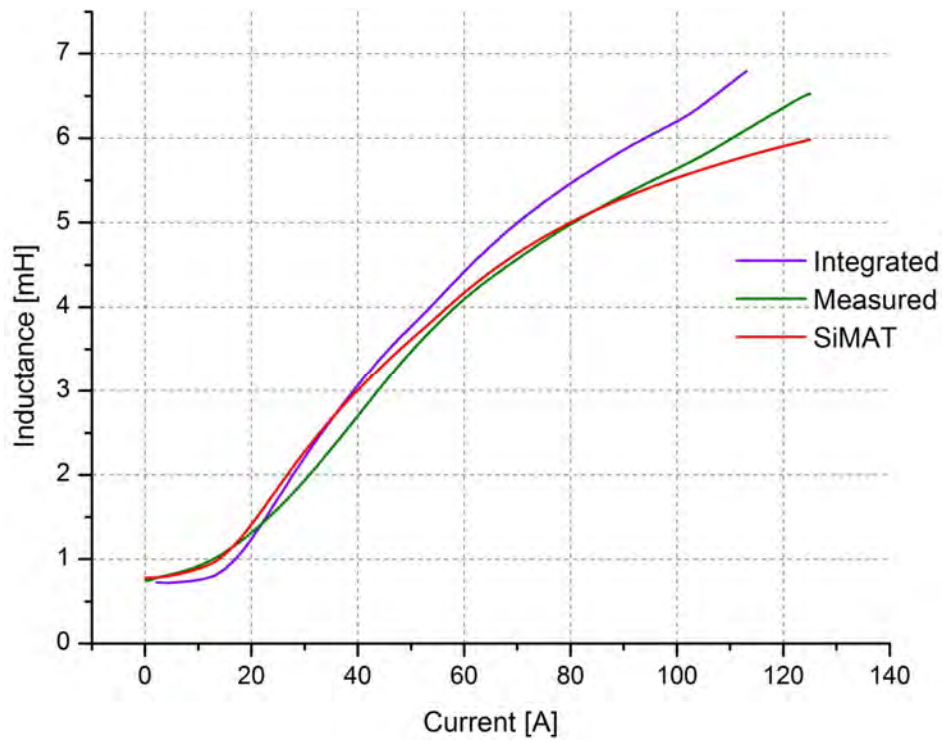
כאשר n הוא מספר הליפופים של הסליל ו l האורך.



איור 4-7. השראות לוקאלית של הסליל AC כפונקציה של הזרם והמיקום מתחת לסליל.

אחרי ביצוע אינטגרציה ניתן לקבל את השראות הסליל כפונקציה של הזרם בדרך החדשה. איור 5-7 מראה את שלושת העקומות של השראות כאשר ניתן לראות התאמה טובה בין שלושת העקומות.

היתרון של שיטת חישוב זאת שהיא נותנת הסתכלות פנימית אל תוך תהליך הדה-סטורציה. השיטה מאפשרת להתייחס לאזורים ספציפיים שדורשים אופטימיזציה. בנוסף, השיטה מאפשרת להשתמש רק בסימולציות FEM סטטיות עבור כל זרם בסליל במקום טרנזיאנטיות, דבר המאפשר להריץ מספר חישובים במקביל ללא קשר אחד לשני ולחסוך זמן חישוב באופן ניכר.



איור 5-7. השראות הסליל כפונקציה של הזרם. קו סגול- מתוך חישוב של השראות לוקאלי, אדום - מתוך סימולציית FEM של זרם עולה, ירוק – השראות מדודה בעזרת זרם עולה.

מגביל זרם קצר FCL המבוסס על ליבות מגנטיות ברוויה, הוא מערכת מגנטית מרתקת ויוצאת דופן. בעוד שמרבית היישומים המגנטיים בזרם חזק עובדים בתחום הלינארי של התכונות המגנטיות של החומר, מהות פעולתו של ה-FCL מבוססת על התנהגותו האי-לינארית.

התצורה המבטיחה ביותר למימוש התפיסה של FCL עם ליבות ברוויה היא זו שהוצעה במעבדה ונרשמו עליה ארבעה פטנטים. באופן בסיסי, מדובר על שני מעגלים מגנטיים החולקים ליבה משותפת. מעגל אחד הוא מעגל מגנטי סגור לשטף DC שתפקידו להכניס את הליבה כולה לרוויה. השני, מעגל מגנטי פתוח AC המחובר בטור לרשת החשמל אשר שינויי הזרם ברשת מתורגמים לשינויי שטף AC בליבה. סופרפוזיציה של השטפים המגנטיים DC ו-AC יוצרים מצב מגנטי רגעי הקובע את הפרמביליות של ההתקן כולו. כאשר הזרם ברשת נומינלי (נמוך) שטף ה-DC "מנצח", הליבה נשארת ברוויה, הפרמביליות וההשראות של ההתקן נמוכות וההתקן למעשה "שקוף" לרשת, עם מפל מתח מינימלי עליו. לעומת זאת, בעת קצר, הזרם גבוה והשטף AC "מנצח". הליבה יוצאת מרוויה, הפרמביליות וההשראות עולות וההתקן הופך לאימפדנס משמעותי ברשת ומגביל את זרם הקצר.

בעבודה זו חקרנו את השינויים במצב הליבה בזרמים שונים ובתלות בפרמטרים השונים של ה-FCL. הראנו כי גם במצב הנומינלי השטף DC אינו הומוגני לאורך צלע הליבה של ה-AC וכי בגלל הפרמביליות הנמוכה במצב רוויה, מתרחשת בריחה של השטף DC במרכז הליבה יחד עם עוצמת השדה AC המקסימלית בנקודה זאת, יוצרים תהליך דינמי של יציאה מרוויה כפונקציה של עליית הזרם AC באופן בו הנפח הלא רווי מופיע תחילה במרכז הליבה ומתפשט בהדרגה אל קצות הסליל AC ומשם אל קצות הליבה. הכניסה לרוויה הפוכה מתרחשת באותו אופן. כאשר השטף AC חזק דיו כדי להעביר את הליבה לרוויה בכיוון ההפוך, רוויה זו מתחילה במרכז הליבה ומתפשטת אל קצותיה.

הדינמיקה הנ"ל יוצרת מצב מגנטי מורכב ומעניין. אם נתבונן "מנקודת המבט" של הסליל AC הרי שלעיתים הוא מתנהג כסליל אוויר (כאשר הליבה ברוויה עמוקה והפרמביליות קבועה ומתקרבת

ל-1) ולעיתים הוא מתנהג כסליל המלוכף על ליבה מגנטית המשנה את אורכה כתלות בזרם. יתר על כן, הסופרפוזיציה בין השטפים ועובדת היות הסליל בעל אורך סופי המייצר שדה חיצוני שאינו הומוגני גורמים לכך שהפרמביליות הלוקלית תלויה במקום ובזמן. בבעיה מורכבת כזאת לא ניתן להשתמש בחישובי דה-מגנטיזציה מקובלים לצורך חישובי השדות הפנימיים בבעיה.

בעבודה זו תיארנו בפעם הראשונה את הדינמיקה של התפשטות האיזור הלא רווי בליבה על חשבון הרווי והצענו להשתמש ב"אורך ליבה אפקטיבי". הצענו קו גבול בין האיזורים הרוויים לבלתי-רוויים המתבסס על ערך אינדוקציה מגנטית $B=1.92$ טסלה. ערך זה נמצא בקרבת "הברך" בעקומת ה- BH של החומר ולכן הגדרנו את כל האיזורים בעלי אינדוקציה נמוכה מערך זה כבלתי רוויים וההיפך בערכים הגבוהים מכך. הראנו כיצד האורך האפקטיבי גדל עם עליית הזרם וכיצד הדינמיקה של גידול זה תלויה בגיאומטריה ובשטף DC. הגדרת האורך האפקטיבי אפשרה לנו להציע לראשונה "פקטור דה-מגנטיזציה" שימושי ומתוך כך לחשב את הפרמביליות הלוקלית ואת ההשראות הכללית כפונקציה של הזרם.

כדי לאשר את תוצאות החישובים שערכנו, הצענו גם שיטת מדידה חדשה ובה אנו "מזריקים" זרם בקצב עליה קבוע לסליל AC ומחשבים את ההשראות האי-לינארית הרגעית. בנוסף, ביצענו "מדידה" באותה שיטה של ההשראות האי-לינארית על דגם סימולציה תלת-מימדי. התוצאות שנתקבלו בשתי השיטות הראו התאמה מצויינת לחישובים שערכנו.

למעשה, ההשראות האי-לינאריות $L(I)$ היא המפתח לניבוי ההתנהגות של ה-FCL בכל מצב שהוא והיא מהווה את האפיין של FCL ספציפי. בהינתן פונקציית ההשראות $L(I)$, יכולנו לחזור אל המשוואה הדיפרנציאלית של רשת החשמל עם ה-FCL ולפתור אותה באופן נומרי ללא צורך בסימולציה FEM. ניתן באופן זה לקבל את צורות הגל המלאות של הזרם והמתח ב-FCL ולשחזר את כל התופעות האי-לינאריות הנראות בצורות הגל הללו. גם כאן, נתקבלה התאמה מעולה בין צורות הגל המחושבות לאלו שנמדדו בהתקן הפיסי. המשמעות היא שהשיטה שהצענו לחישוב ההשראות הלא לינארית מאפשרת לראשונה לקבל את התנהגות ההתקן בכל זרם ובכל פרמטר רשת מבלי שיש צורך לבנות תחילה את ההתקן או לחילופין להריץ סימולציות FEM טרנזיאנטיות

כבודות. מדובר כאן על חיסכון עצום בזמן ובמשאבים ומתן כלים חדשים לתכנון אופטימלי של התקנים עתידיים.

מעבר להישגי העבודה הנובעים מתוך ניתוח התמונה המגנטית המורכבת, לעבודה זו השלכות יישומיות חשובות. טכנולוגיות הגבלת זרמי קצר ברשתות חשמל הן קריטיות להמשך פיתוח רשתות החשמל ולמימוש חזון "הרשתות החכמות". הכלים החדשים שהצענו כאן נותנים דחיפה משמעותית ליכולות הניתוח והתכנון של התקני FCL המבוססים על ליבות מגנטיות ברוויה ומחזקים את האפשרות למימוש מוצלח של טכנולוגיה זו ברשתות הולכה והשנאה.

1. El-Hawary, M. *Introduction to electrical power systems*. 3 (2008).
2. Whitaker, J. *AC Power Systems Handbook, Third Edition*. 8 (2006).
3. U.S. Energy Information Administration (EIA) *Electric Power Monthly*. 22 (2012).
4. CIGRE, W. A3. 10: "Fault Current Limiters in Electrical Medium and High Voltage Systems." *CIGRE Technical Brochure* **10**, 1 (2003).
5. Verma, M. & Ree, J. D. L. A comprehensive overview , behavioral model and simulation of a Fault Current Limiter. M.Sc. thesis, **ch 1.1.2** (Virginia Polytechnic Institute and State University ,2009).
6. Das, J. Limitations of fault-current limiters for expansion of electrical distribution systems. *Industry Applications, IEEE Transactions on* **33**, 1073–1082 (1997).
7. Trepanier, J. & Reggio, M. Analysis of the dielectric strength of an SF6 circuit breaker. *Power Delivery, IEEE Transactions on Power Delivery* **vol 6**, 809 (1991).
8. Cvoric, D. Novel Topology of Saturated-core Fault Current Limiter. Ph.D. Thesis (Delft University of Technology), **Chap 1.2**, 8 (2010)
9. Siemens Anatomy of a Short-Circuit. *TechTopics* **44**, 1–4 (2003).
10. Metz-Noblat, B. de, Dumas, F. & Poulain, C. Cahier Technique no. **158**: Calculation of Short-Circuit Currents. *Schneider Electric, updated* ,1(2005).
11. Xin, Y. *et al.* Performance of the 35 kV / 90 MVA SFCL in Live-Grid Fault Current Limiting Tests. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* , **vol 21**, no. 3,1294 (2011).
12. Gong, W. *et al.* Development of Superconducting Fault Current Limiters . International Conference on Power System Technology , 1-4244-0111-9/06, 1–5 (2006).
13. Abbott, S. B. *et al.* Simulation of HTS Saturable Core-Type FCLs for MV Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery* **21**, 1013–1018 (2006).
14. Xuhong, Z. Design of saturated iron core superconducting fault current limiter based on numerical calculation. *2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, 0-7803-9114-4 , 1–5 (2005).

15. Gong, W. Z., Zhang, J. Y., Wu, T. Q., Niu, X. Y. & Xin, Y. Current limiting characteristic of saturated iron core SFCLs. *Journal of Physics: Conference Series* **234**, 032016 (2010).
16. Noe, M. & Steurer, M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status. *Superconductor Science and Technology* **20**, R15–R29 (2007).
17. Moriconi, F. *et al.* Development and Deployment of Saturated-Core Fault Current Limiters in Distribution and Transmission Substations. **21**, 1–6 (2011).
18. A Neumann. Application of fault current limiters. Business Enterprise and Regulatory Reform (BERR), 1-29 (2007).
19. Neumueller, H.-W. *et al.* Development of Resistive Fault Current Limiters Based on YBCO Coated Conductors. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **19**, 1950–1955 (2009).
20. Seeber, B. *Handbook of applied superconductivity IPP 1998 vol.1.* (1998).
21. Baldan, C. a. *et al.* Design and Test of HTS Coils for Resistive Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **14**, 863–866 (2004).
22. Martini, L. *et al.* Resistive Fault Current Limiter Prototypes: Mechanical and Electrical Analyses. *Journal of Physics: Conference Series* **43**, 925–928 (2006).
23. Elschner, S. *et al.* ENSYSTROB—Resistive Fault Current Limiter Based on Coated Conductors for Medium Voltage Application. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **21**, 1209–1212 (2011).
24. Kudymow, A., Elschner, S., Maeder, O. & Goldacker, W. Optimization of 2G YBCO Wires for Resistive Fault Current Limiters. **21**, 1311 (2010).
25. Rhee, S. B., Lee, J. K. & Lee, B. W. Impacts of Superconducting Fault Current Limiters on the Recloser Operation in Distribution Electric Power Systems. **1**, 1–4 (2010).
26. Neumueller, H. *et al.* Economically Viable Fault Current Limiters using YBCO coated conductors. 1–5 (2007).
27. Kim, J., Lim, S. & Kim, J. Study on Protective Coordination for Application of Superconducting Fault Current Limiter. 1–5 (2010).
28. Normal, I. Superconducting Fault Current Limiters. (2009).
29. Wolsky, A. FAULT CURRENT LIMITERS: SOME RECENT DEVELOPMENTS. IEA (2011).

30. Parton, K. C. Current Limiting Device for Alternating Currents,. *US Patent* 4,117,524 A (1982).
31. Raju, B P. Parton, K. C. A Current Limiting Device Using Superconducting D.C Bias, Applications and Prospects. *IEEE Vol. PAS-101, No. 9* , 3173–3177 (1982).
32. Xiao, L. & Lin, L. Recent Progress of Power Application of Superconductor in China. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **17**, 2355–2360 (2007).
33. Cvoric, D., de Haan, S. W. H. & Ferreira, J. a. Comparison of the four configurations of the inductive Fault Current Limiter. *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 3967–3973 (2008)
34. Rozenshtein, V. *et al.* Saturated Cores FCL—A New Approach. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **17**, 1756–1759 (2007).
35. General Electric Ecomagination: The Innovation Award Winners. (2011).at <<http://challenge.ecomagination.com/ct/e.bix?c=ideas>>
36. ACES Europe's academic innovators recognised in ACES awards. (2011).at <<http://www.sciencebusiness.net/news/74745/Europe%E2%80%99s-academic-innovators-recognised-in-ACES-awards>>
37. Shuki, W., Yeshurun, Y., Friedman, A., Rozenshtein, V. & Bar-Haim, Z. . Improved Fault Current Llimiter With Saturated Core, Patent WO/2011/024179 (2011).
38. Shuki, W., Yeshurun, Y., Friedman, A., Rozenshtein, V. & Bar-Haim, Z. Fault current limiters (FCL) with the Cores Saturated by superconducting coils. European Patent Application No. 05779420.8 (2009).
39. Nikulshin, Y., Friedman, a., Wolfus, Y., Rozenshtein, V. & Yeshurun, Y. Dynamic Desaturation Process in Saturated Cores Fault Current Limiters. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **22**, 5601704–5601704 (2012).
40. Pardo, E. & Sanchez, a. Demagnetizing factors of rectangular prisms and ellipsoids. *IEEE Transactions on Magnetism* **38**, 1742–1752 (2002).
41. Osborn, J. Demagnetizing factors of the general ellipsoid. *Physical Review* **67**, 351(1945).
42. Gyimesi, M. & Ostergaard, D. Inductance computation by incremental finite element analysis. *IEEE Transactions on Magnetism* **35**, 1119–1122 (1999).
43. Cullity, B. & Graham, C. *Introduction to magnetic materials*. **ch 1.7**, 11 (2009)

44. Chen, D., Brug, J. A., Goldfarb, R. B. & Member, S. Demagnetizing Factors for Cylinders. *IEEE Transactions On Magnetics*, **21**, 3602 (1991).

Abstract

The saturated cores fault current limiter (SCFCL) is one of the promising concepts for limiting fault currents in distribution and transmission level grids. The SCFCL utilizes a complex, non-linear magnetic circuit composed of several AC coils sharing common magnetic cores. The AC coils, connected in series to the grid and DC coils, are configured to saturate the core. The FCL is characterized by two principle parameters: impedance at nominal current (insertion impedance) and impedance at fault current (limiting impedance). The impedance is mostly reactive and is defined naturally by the sum of inductances of AC coils. The inductance of each coil depends on the varying permeability of the magnetic core in different points and in each point it is current dependent and thus time dependent. In this research work we present the first study of the spatial and temporal behavior of the this complex system. Our approach is based on a novel experimental approach combined with extensive simulations of the magnetic behavior. We designed and built a laboratory scale SCFCL model and studied its magnetic behavior in different regimes. We developed experimental method to measure the current dependent inductance of AC coils, thus defining the device characteristics $L(I)$. We received the $L(I)$ function also by exploiting the Finite Element Method (FEM), simulating the same experiment for verification. An in depth analysis of a transient process of changing magnetic states of soft ferromagnetic material in terms of demagnetizing factor was performed. The results allowed solving numerically the differential equation that govern the SCFCL dynamics, predicting the exact behavior of the SCFCL in all scenarios at different grid configurations. The solution was obtained by MATLAB for various conditions. In parallel we performed Finite Element Method (FEM) simulations with Vector Fields software. Both results are presented as waveforms of current and voltage drop SCFCL. Waveforms for the laboratory model in nominal, fault and overload states were

measured experimentally and exhibited excellent match to the calculated waveforms. The methods developed in the framework of this research provide new tools for analyzing the SCFCL and improving future designs.



Bar-Ilan University

Mechanism of transition between magnetization states
in Inductive Nonlinear Fault-Current-Limiter

Yakov Nikulshin

Submitted in partial fulfillment of the requirements for the Master Degree
in the Department of Physics, Bar-Ilan University

September 2012

Ramat Gan