

מבוא להגנות

תפקידי מערך ההגנות במערכת הארצית:

א לאבחן מעבר של הרשת המוגנת ממשטר תקין למשטר הפרעתי.

ב לאתר את הקטע הפגוע או את הגורם הפרעתי.

ג לסלק את הקטע הפגוע או את הגורם המפריע, תוך שמירה על תנאים המאפשרים המשך פעילות תקינה של המערכת.

ברשת החשמל ניתן לעקוב אחרי 4 נתונים בסיסיים.

ערכי מתחים ערכי זרמים זוויות מופע בין הנתונים תדירות

הגנות מתח גבוה



תכונות בסיסיות של ממסרי ההגנה

תכונה	פרוט
אמינות	פעולה תקינה במהלך כל הזמן ותגובה רק במקרה של תקלה
סלקטיביות	פעולה רק עבור תרחישי הגנה מוגדרים ולהימנע מהפסקה במקטעים אחרים
מהירות	פעולה בזמן קצר תוך הפחתת הנזק מהימשכות התקלה
רגישות	זיהוי הופעת תקלה כבר בשלבים מוקדמים כדי למנוע התפתחותם
פשטות	פשטה וקלה לתחזוקה, לתפעול ולזיהוי סיבת ההפסקה והערכים שגרמו להפסקה
מחיר	הגנה מיטבית במחיר אופטימלי

מבוא להגנות

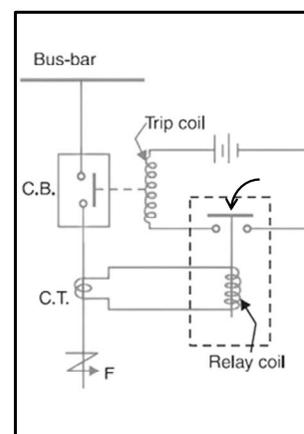
מפסקי מתח גבוה הם יחידות מיתוג המאפשרות חיבור והפסקה של קווים או צרכנים בתנאי עומס, ללא עומס (בריקס) ובמצבי קצר.

בניגוד למתקני מתח נמוך שבהם יחידת ההגנה מהווה חלק אינטגרלי של המפסק, במתח גבוה מתבססת הפסקת המפסקים על ממסרי הגנה שמכילים את פונקציות ההגנה הנדרשות על פי סוג המתקן.

הממסרים מקבלים את ערכי המדידות משנאי זרם ומשנאי מתח המותקנים במעגל המוגן ואשר מאפשרים את תפקוד או הפסקת המעגל בהתאם לערכים שכווננו בממסר.

ממסר ההגנה מחובר לסליל ההפסקה של המפסק ובעת חריגה מהערכים המכוונים יפסק המפסק בהתאם.

סלילי ההפסקה מופעלים על פי רוב במתח ישר המתקבל ממצברים, למניעת תלות בין המתח במתקן ומתח פעולת הסליל.



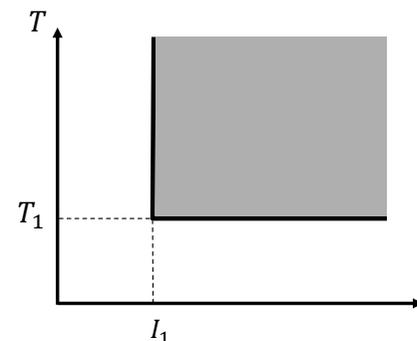
מבוא להגנות

ממטר ההגנה נועד כאמור לאבחן את המשטר ההפרעתי ולסלק את הקטע הפגוע. לפיכך, חייבת ההגנה להתבסס על אופיין זרם/זמן (כלומר, תגובה התלויה בזרם ובזמן).

קיימים 2 סוגים עקרוניים של אופיינים לתלות זו:

אופיין 1: Definite Time - זמן מוחלט.

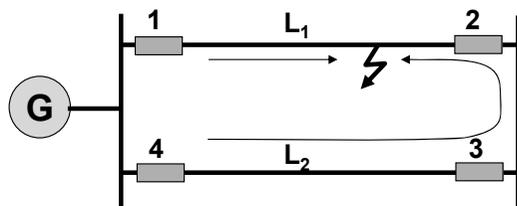
אופיין זה מבטיח שבזרם גדול מהזרם המרבי המותר במעגל למשך זמן מוגדר מראש, תפיק ההגנה אות הפסקה והמפסק המגן על המעגל יפסק. הפונקציה דומה לפונקציה S (Short Time Delay) שמותקנת במפסקי מתח נמוך.



מבוא להגנות

הגנה של מתקני מתח גבוה עשויה להיות מורכבת ותלויה בתכונות המתקן ובשיטות הטיפול בנקודת האפס. לפיכך, נזדקק לשילוב של פונקציות הגנה וללימוד מעמיק ומקיף של נושא זה.

במתקני מתח עליון ומתח על שבהם הרשתות טבעתיות, פונקציות ההגנה מורכבות יותר ושם נפגוש גם פונקציות הגנה כמו הגנות מרחק, תקשורת בין ממסרי הגנה והגנות דיפרנציאליות.

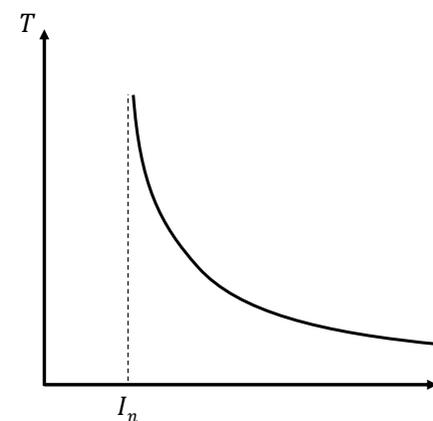


זמן הפוך (Inverse Time)

אופיין 2: Inverse Time - זמן הפוך.

ממטר ההגנה שבו מופעלת פונקציית הגנה זו גורם להפסקת המפסק תוך זמן קצר יותר ככל שערך הזרם גדול יותר. הפונקציה דומה לפונקציה L (Long Time Delay) שמותקנת במפסקי מתח נמוך.

לפיכך, זרם יתר בעוצמה גדולה (או בסמוך למקור הזינה) יופסק תוך זמן קצר, בעוד שבזרם יתר בעוצמה נמוכה (או מרוחק ממקור הזינה) זמן התגובה יהיה יחסית ממושך.

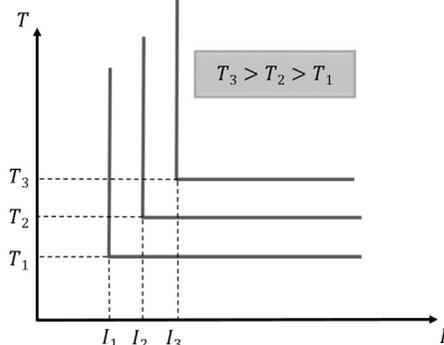


מבוא להגנות

בכל מקרה שבו ערך הזרם יהיה מעל ערך הכוונון I_1 למשך זמן ממושך מספיק, ההגנה תגרום להפסקת המעגל בזמן זה ללא תלות בערך הזרם.

על מנת להבטיח סלקטיביות (הפסקת הקטע הפגוע בלבד), חייב להתקיים מדרג זמנים שמשמעותו התארכות זמן התגובה ככל שמתקרבים למקור הזינה.

לכן, כאשר ההגנות הן מסוג Definite Time בלבד וככל שהקצר מתרחש סמוך יותר למקור הזינה, יש להגדיל את ערך הזמן (T) בממסרי ההגנה בתחילת הקו, על מנת שמצבי קצר רחוקים לא יגרמו להפסקת ההזנה לכל הקו.



שילוב של פונקציות הגנה

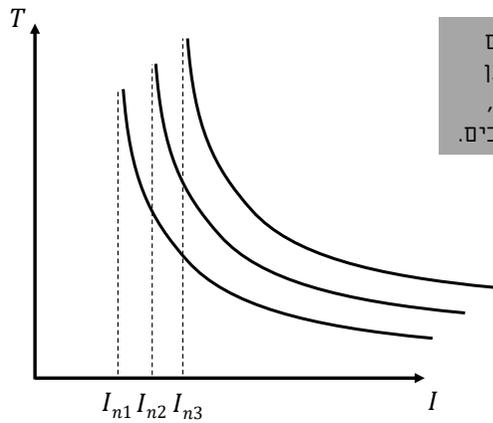
כדי להגן על מתקני מתח גבוה מסוגים שונים נדרש כאמור שילוב של פונקציות הגנה.

במקרים רבים נמצא שילוב של אופיין יתרת זרם מסוג Definite Time או Inverse Time ומנגנון מיידי – Instantaneous.

אפשרי גם לשלב בין שלושת הפונקציות. יתרת זרם עומס מסוג Inverse Time, מנגנון Definite Time שנועד להפסיק את המתקן לאחר השהיה קצרה בעת חריגות קטנות בזרם, ומנגנון מיידי אשר תפקידו להפסיק מיידי בעת חריגות גדולות בזרם. פעולה זו דומה לתפקודן של פונקציות הגנה LSI במפסקי מתח נמוך.

זמן הפוך (Inverse Time)

במערך הגנות הכולל מספר ממסרים, בממסרים שקרובים יותר למקור הזינה הזרם המכוונן גדול יותר מזה שמכוונן בממסרים שמתקנים בהסתעפויות המעגל. בהתאם לכך, זמני התגובה של ההגנות שקרובות למקור הזינה מתארכים.



ממסרים ספרתיים (דיגיטליים)

חסרונות:

מדידה לא ישירה (קצב דגימה Sample Rate).

“קופסה שחורה”.

רגישות להפרעות במעגלי ההזנה.

חשיפה אפשרית למתקפות סייבר.

שיבוש אפשרי באמצעות פולס אלקטרומגנטי.

ריבוי הפרמטרים בכל פונקציה דורש הבנה עמוקה של ערכי הכוונן

ממסרים ספרתיים (דיגיטליים)

ממסרי ההגנה הספרתיים מבוססים על מעבדים מהירים

יתרונות:

פונקציות הגנה רבות במסר אחד.

פונקציות לוגיות מובנות וניתנות לתכנות.

כניסות ויציאות אנלוגיות ודיגיטליות.

גמישות בתכנון.

שליטה/ כוונן מהמחשב/ תכנות מרחוק.

סנכרון לשעון זמן לויני.

רישום אירועים/ רישום הפרעות.

בקרה עצמית (Self Check, Watchdog).

קידוד פונקציות הגנה

ממסרים בעלי הגנות ספרתיות מאפשרים שימוש במספר פונקציות הגנה בממסר יחיד.

בממסרים אלו נדרש לסמן בקודים את הפונקציות השונות אותן מכיל הממסר.

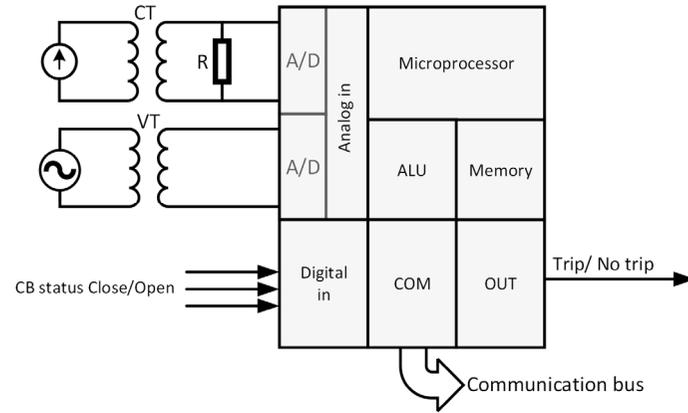
שני קודים שונים נפוצים בעולם:

(1) קוד ANSI/IEEE האמריקאי.

(2) קוד IEC 60617 הבינלאומי.

בקוד האמריקאי מסומנות פונקציות ההגנה השונות באמצעות מספרים בשילוב של אותיות ובקוד הבינלאומי באמצעות אותיות וסימנים.

ממסרים ספרתיים (דיגיטליים)



רשימה חלקית של פונקציות ההגנה לפי ANSI-IEEE

מפסק זרם לז"ח	52
גורם הספק	55
מתח יתר	59
איוון מתחים	60
השהייה	62
מפסק לחץ	63
גלאי פחת	64
פחת כיווני	67N/67NC
מפסק לזרם ישר	72
יתרת זרם לזרם ישר	76
יציאה מסנכרון out of step	78
חיבור חוזר	79
תדר	81
נעילת הפעלה מרחוק Lock out	86
הגנה הפרשית (דיפרציאלית)	87
ממסר הפסקה (trip)	94

מהירות יתר	12
התאמת מהירות / תדר	15
תת עכבה (מרחק)	21
יהוס מתח לתדר	24
סינכרון או בדיקת סינכרון	25
תת מתח	27
תצוגת פונקציות הגנה	30
הספק כיווני (וואטמטרי)	32
קוטביות מתח	36
תת זרם או תת הספק	37
אובדן עירור	40
מפסק שדה	41
זיהוי רכיב שלילי	46
עומס יתר תלוי בטמפרטורה	49
יתרת זרם עם פעולה מיידיית	50
יתרת זרם חילופין מושהה	51

השוואת הסימונים לפי ANSI ו-IEC

Description	ANSI	IEC 60617	Description	ANSI	IEC 60617
Overspeed relay	12	$\omega >$	Inverse time earth fault overcurrent relay	51G	$I_{\perp} >$
Underspeed relay	14	$\omega <$	Definite time earth fault overcurrent relay	51N	$I_{\perp} >$
Distance relay	21	$Z <$	Voltage restrained/controlled overcurrent relay	51V	$U' I >$
Overtemperature relay	26	$\theta >$	Power factor relay	55	$\cos \phi >$
Undervoltage relay	27	$U <$	Overvoltage relay	59	$U >$
Directional overpower relay	32	$\rightarrow P >$	Neutral point displacement relay	59N	$U_{sd} >$
Underpower relay	37	$P <$	Earth-fault relay	64	$I_{\perp} >$
Undercurrent relay	37	$I <$	Directional overcurrent relay	67	$\rightarrow I >$
Negative sequence relay	46	$I_2 >$	Directional earth fault relay	67N	$\rightarrow I_{\perp} >$

השוואת הסימונים לפי ANSI ו-IEC

Description	ANSI	IEC 60617	Description	ANSI	IEC 60617
Negative sequence voltage relay	47	$U_2 >$	Phase angle relay	78	$\varphi >$
Thermal relay	49		Autoreclose relay	79	$0 \rightarrow 1$
Instantaneous overcurrent relay	50	$I >>$	Underfrequency relay	81U	$f <$
Inverse time overcurrent relay	51	$I >$	Overfrequency relay	81O	$f >$
			Differential relay	87	$I_d >$

הגנות יתרת זרם

הגנת יתרת זרם הינה ההגנה הבסיסית והנפוצה ביותר במתקני חשמל. כשזרם הקו גדול מהערך המרבי המותר שולח ממסר ההגנה פקודת הפסקה למפסק, במטרה למנוע נזק לציוד ולקווי חלוקת החשמל שנגרם עקב התפתחות חום יתר. מאותה סיבה בדיוק, הגנת זרם יתר מופעלת להגנת שנאים, מנועים, גנרטורים וצרכני חשמל בכל רמת מתח.

ההגנה מיושמת על פי רוב באמצעות 2 פונקציות בסיסיות המקודדות כ-50 ו-51 בתקן ANSI/IEEE, או מקודדות כ- $I >$ ו- $I >>$ בתקן IEC.

הגנות יתרת זרם

יתרת זרם עם פעולה מיידי (Instantaneous Overcurrent (ANSI/IEEE Code 50)

פונקציית הגנה זו גורמת להפסקה מיידי של המפסק ברגע שערך הזרם עולה על ערך הכוונון המוגדר. הפונקציה דומה בפעולתה לפעולת המנגנון המגנטי במפסקי מתח נמוך בעלי הגנות תרמו מגנטיות, או לפונקציית Instantaneous במפסקים בעלי הגנות אלקטרוניות.

יתרת זרם מושהה (Time Overcurrent (ANSI/IEEE Code 51)

פונקציית הגנה זו מיישמת הפסקה מושהית באמצעות שילוב של זרם וזמן. המעגל המוגן יפסק כאשר ערך הזרם עולה על הערך המכוונן למשך זמן העולה על הזמן המוגדר באמצעות אופיין ההגנה. במפסקי מתח נמוך מיושמת פונקציה זו על ידי מנגנון תרמי (Inverse Time) או באמצעות פונקציית L במפסקים בעלי יחידות הגנה אלקטרוניות.

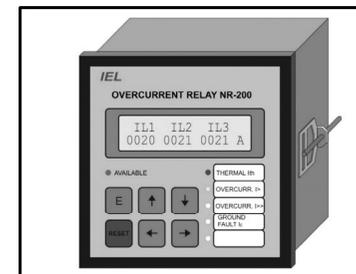
הגנות יתרת זרם

הגנה זו מיושמת באמצעות שלושה שנאי זרם (אחד בכל פאזה), שתפקידם למדוד את עוצמת זרמי מוליכי הפאזות.

עליית הזרם עלולה להתרחש משתי סיבות:

1 העמסת יתר (51).

2 מצבי קצר (50).



אופייני זמן הפוך

בתקן IEC קיימות ארבע משפחות עיקריות של אופייני זמן הפוך:

IEC curve	קבועים	
	α	β
Normal inverse	0.02	0.14
Very inverse	1.0	13.5
Extremely inverse	2.0	80.0
Long time inverse	1.0	120.0

α משפיע בעיקר על שיפוע האופייני (בדומה ל- a במשוואת ישר).

β משפיע בעיקר על נקודת ההתחלה של האופייני (בדומה ל- b במשוואת ישר שמגדיר תזוזה אנכית לאורך ציר y).

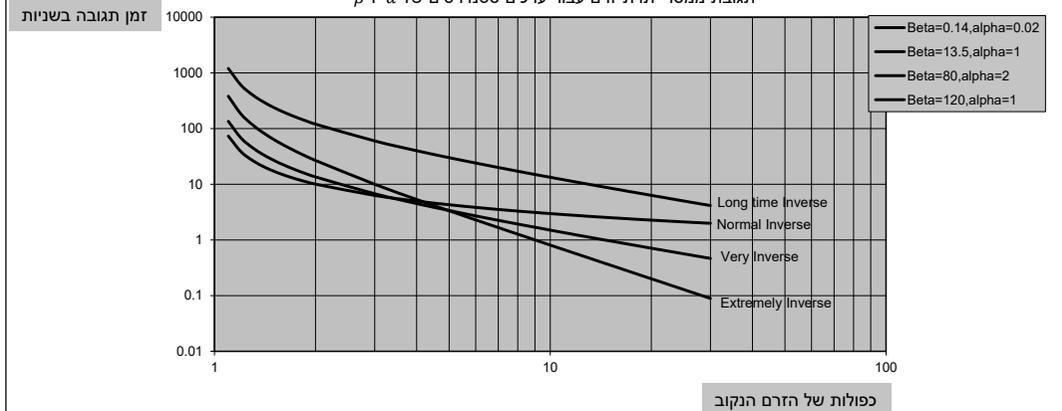
אופייני זמן הפוך

בתקנים IEC-60255-3 ו-BS 142 אופייני זמן הפוך סטנדרטים מוגדרים על פי המשוואה הבאה:

$t = \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{I}{I >}\right)^\alpha - 1}$	t זמן הפעולה [sec]
	k כופל זמן
	I ערך זרם תקלה
	$I >$ זרם להתחלת פעולה (Pickup Current)
$2 < \frac{I}{I >} < 20$	על פי רוב נדרש הממסר לשמור על דיוק (טווח אפקטיבי) של:
$\frac{I}{I >} > 1.1$	ולהגיב לזרם יתר החל מ:

אופייני זמן הפוך

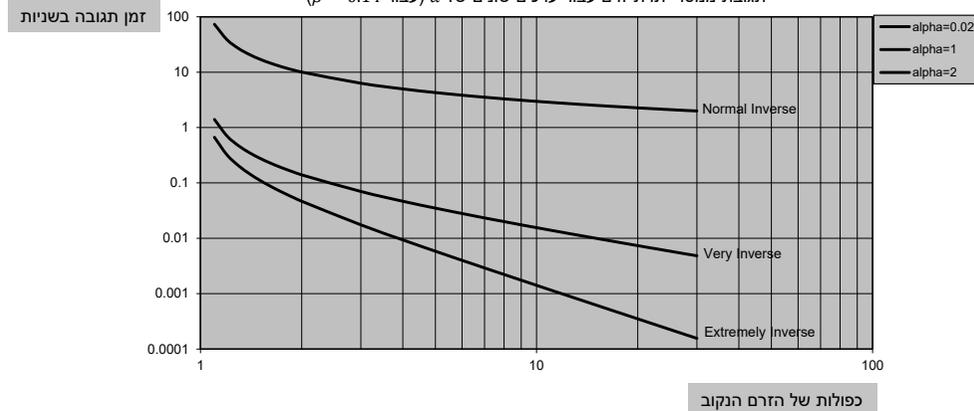
תגובת ממסר יתרת זרם עבור ערכים סטנדרטים של α ו- β



כפולות של הזרם הנקוב

אופייני זמן הפוך

תגובת ממסר יתרת זרם עבור ערכים שונים של α (עבור $\beta = 0.14$)



כפולות של הזרם הנקוב

אופייני זמן הפוך

דוגמא מספרית

חשב את הזמן להפסקה על ידי ממסר בעל אופיין זמן הפוך (Normal inverse) בזרם יתר השווה ל:

(א) פי 3 מהזרם המרבי המותר במעגל $k = 0.6$.

(ב) פי 5 מהזרם המרבי המותר במעגל $k = 0.6$.

פתרון

סעיף א':

$$t = \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{I}{I_N}\right)^\alpha - 1} = \frac{0.6 \cdot 0.14}{(3)^{0.02} - 1} = 3.78 \text{Sec}$$

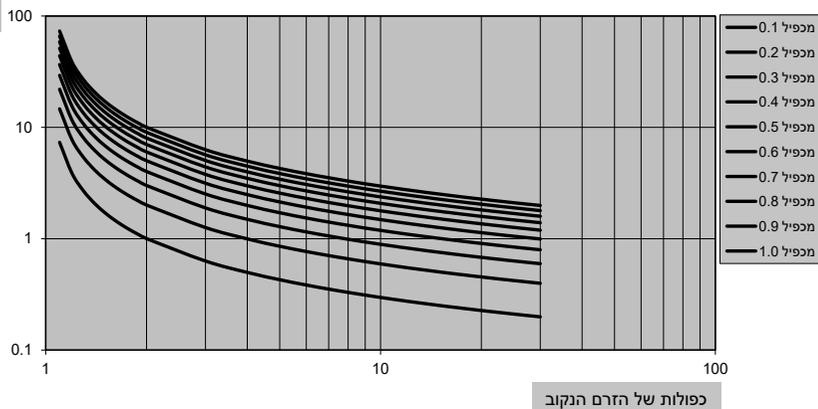
סעיף ב':

$$t = \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{I}{I_N}\right)^\alpha - 1} = \frac{0.6 \cdot 0.14}{(5)^{0.02} - 1} = 2.568 \text{Sec}$$

אופייני זמן הפוך

משמעות מכפיל הזמן (k)

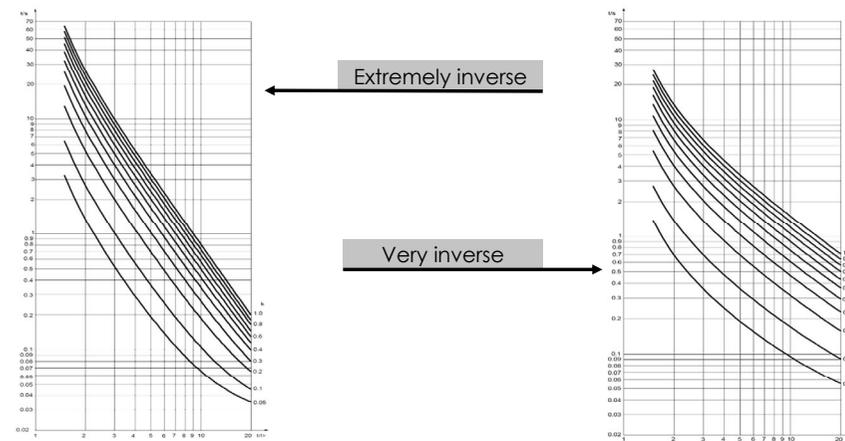
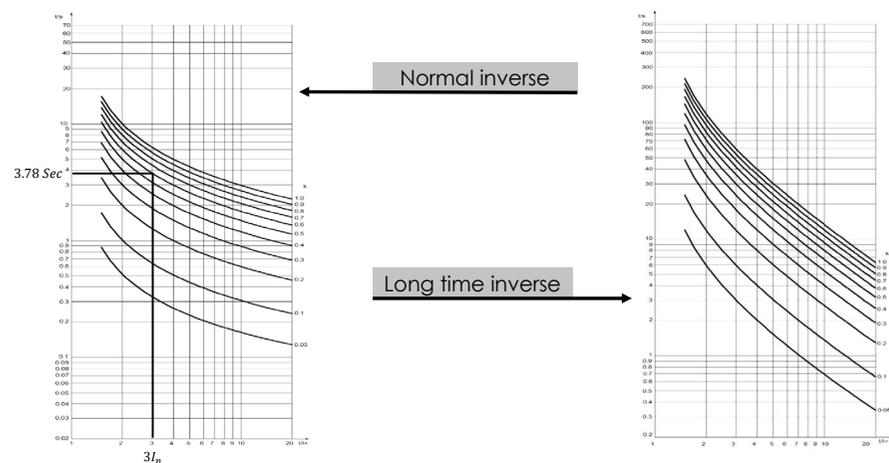
זמן תגובה בשניות



כפולות של הזרם הנקוב

אופייני זמן הפוך

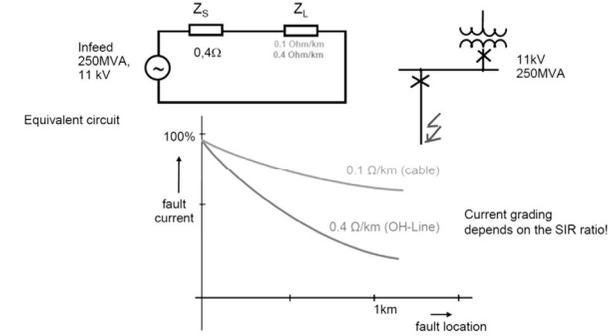
אופייני זמן הפוך



אופייני זמן הפוך

Very inverse

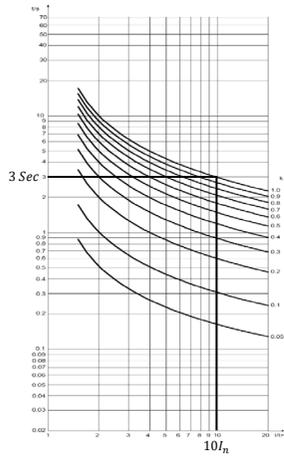
משמשת להגנת רשתות בהן ההפרשים בעוצמות זרמי הקצר בין קצות המעגל גדולים כתוצאה מהפרשים גדולים בעכבת המעגל. מתאימה לרשתות בהן השינויים משמעותיים בערך זרמי הקצר.



אופייני זמן הפוך

Normal inverse

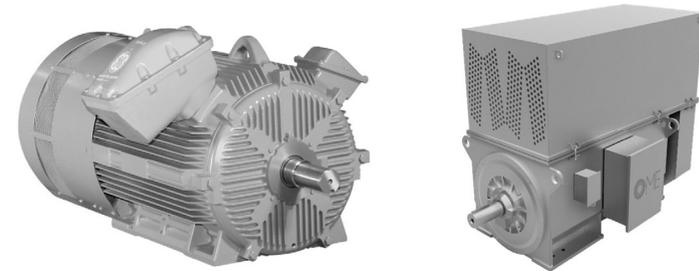
עקומת זמן הפוך סטנדרטית. משמשת להגנת רשתות בהן ערך זרם התקלה תלוי ביכולת הזרמת זרם התקלה של המערכת. אופיין זה ידוע כ-3/10 היות וב- $10I_n$ עבור $k = 1$, זמן הפעולה יהיה כ-3 שניות.



אופייני זמן הפוך

Long time inverse

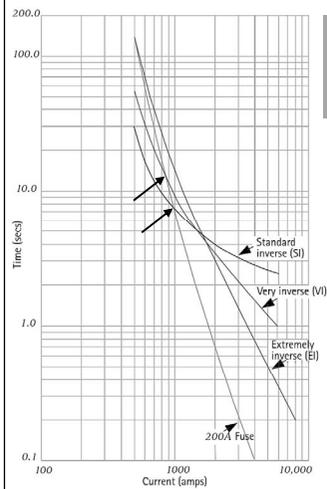
עקומה בעלת שהיית זמן ארוכה שמתאימה להגנת מנועים בעלי זמן התנעה ממושך כמו מפוחים גדולים, כתחליף להגנה תרמית, וכן להגנת נגדי חיבור לאדמה שמוקנים בנקודת הכוכב של שנאים.



סלקטיביות בין אופייני ההגנה ונתיכי גיבוי

Extremely inverse

זמן תגובה קצר בזרמים גבוהים. לכן מתאים לשילוב להשגת סלקטיביות עם נתיכי גיבוי. השימוש הנפוץ של אופיין זה הינו להגנת קווים שמכילים שנאי חלוקה.



אופייני זמן הפוך על פי תקן ANSI

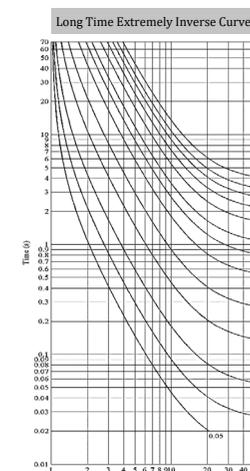
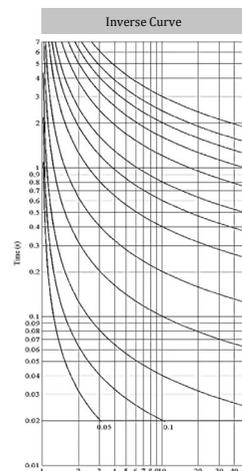
בתקן ANSI קיימות שמונה משפחות עיקריות של אופייני זמן הפוך:

ANSI Curve	Value of Constants		
	A	B	p
Extremely Inverse	6.407	0.025	2.0
Very Inverse	2.855	0.0712	2.0
Inverse	0.0086	0.0185	0.02
Short Time Inverse	0.00172	0.0037	0.02
Short Time Extremely Inverse	1.281	0.005	2.0
Long Time Extremely Inverse	64.07	0.250	2.0
Long Time Very Inverse	28.55	0.712	2.0
Long Time Inverse	0.086	0.185	0.02

$$Trip\ time = \left(\frac{A}{M^p - 1} + B \right) \cdot \left(\frac{14n - 5}{9} \right)$$

$$M = \frac{I}{I_{pickup}} \quad n - \text{מכפיל הזמן בגרף}$$

אופייני זמן הפוך על פי תקן ANSI



אופייני זמן הפוך על פי תקן ANSI

דוגמא

חשב את הזמן להפסקה על ידי ממסר בעל אופיין זמן הפוך (Inverse) לפי תקן ANSI בזרם יתר השווה:
 (א) פי 3 מהזרם המרבי המותר במעגל, כאשר $n = 6$.
 (ב) פי 5 מהזרם המרבי המותר במעגל, כאשר $n = 6$.

פתרון

סעיף א':

$$Trip\ time = \left(\frac{A}{M^p - 1} + B \right) \cdot \left(\frac{14n - 5}{9} \right) = \left(\frac{0.0086}{3^{0.02} - 1} + 0.0185 \right) \cdot \left(\frac{14 \cdot 6 - 5}{9} \right) = 3.56\text{Sec}$$

סעיף ב':

$$Trip\ time = \left(\frac{0.0086}{5^{0.02} - 1} + 0.0185 \right) \cdot \left(\frac{14 \cdot 6 - 5}{9} \right) = 2.47\text{Sec}$$

מסקנה: קיים דמיון רב בין זמני התגובה של ממסרי הגנה בעלי אותו סוג אופיין בשני התקנים השונים.

שילוב זמן הפוך, זמן מוחלט וזמן מיידי

שילוב פונקציות ההגנה של זמן הפוך, זמן מוחלט ופעולה מיידי מאפשר הגנה בפני זרם יתר, הגנה בפני קצר בזרם בעוצמה קטנה והגנה בפני קצר בזרם בעוצמה גדולה, תוך השגת סלקטיביות.

אופיין זמן הפוך מאפשר הגנה בפני העמסת יתר תוך הפסקת המעגל אחרי זמן די ניכר (תלוי בעוצמת הזרם).

פונקציית זמן מוחלט מאפשרת הפסקת המעגל בזרם מעל לערך מסוים ולאחר זמן קצוב. הערך המכוון יאפשר השהיה ביחס לזמן התגובה של ההגנות במתקנים האחרים המוזנים מאותו מעגל.

פעולה מיידי תגרום להפסקה מיידי של המעגל בעת זרמי קצר בעוצמה גדולה.

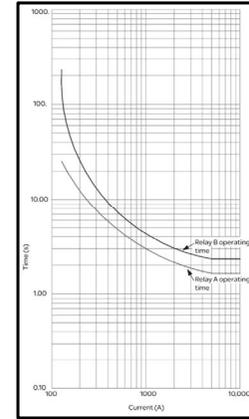
שילוב זמן הפוך, זמן מוחלט וזמן מידי

במקרה של קצר המתאפיין בעוצמת זרם גבוהה, תגובתו המושהית של מנגנון זמן הפוך תגרום למאמצים תרמיים ואלקטרומכניים גבוהים בצידו. על מנת שמערכת הגנה תפעל כנדרש יש לבנות מדרג זמנים בין הממסרים השונים תוך שמירה על "שוליים" – מרווחים מתאימים בין האופיינים.

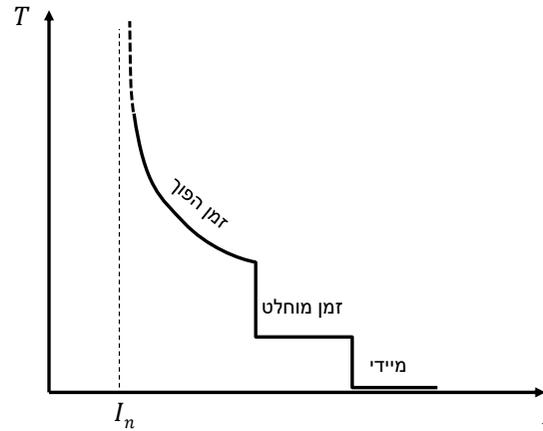
שוליים אלו תלויים ב:

זמן ההפסקה של המפסקים.	שגיאות במסר ובשנאי הזרם.
זמן התגובה של ממסרי ההגנה.	מרווח בטחון.

כדי להקנות שוליים מתאימים נהוג לבחור הפרש זמני תגובה של 0.25-0.3 שניות בין זמני פעולות ההגנות בממסרים השייכים לאותו מעגל.



שילוב זמן הפוך, זמן מוחלט וזמן מידי

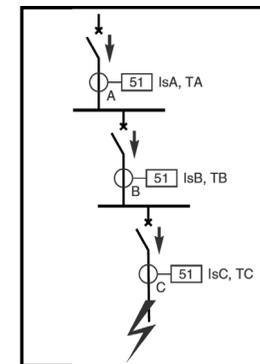


סלקטיביות בזמן

סלקטיביות בזמן פירושה הפרש בין זמני התגובה של ממסרי ההגנה לזרם יתר או קצר (בדרך כלל בעוצמה נמוכה) בזכות זמן תגובה ארוך יותר של ממסרי הגנה שמותקנים במעלה הזרם.

כשהמפסק שמגן על הקטע התקול נפסק בעוד שיתר המפסקים במעלה הזרם נשארים מחוברים, קיימת סלקטיביות מלאה.

בקו רדיאלי כשמרחש קצר בקטע C, כמתואר באיור, אנו מעוניינים שהמפסק שמגן על קטע זה יפסק בעוד שיתר המפסקים יישארו מחוברים.



סוגי סלקטיביות

כדי להבטיח רציפות ואמינות הזנה בעת עבודה רגילה וגם בעת מצבים חריגים כמו: זרם יתר, קצר או קצר לאדמה, נדרש שבעת תקלה, יפסק רק המפסק האוטומטי הקרוב ביותר לתקלה בעוד שהמפסקים האחרים במתקן יישארו מחוברים. לשם כך נדרשת יכולת הבחנה (סלקטיביות) של הגנות המתקן.

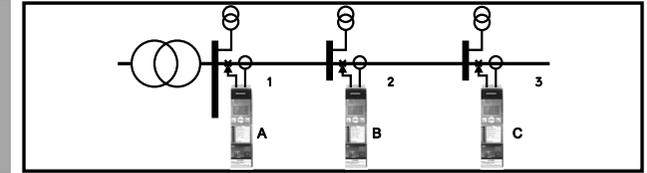
במתקני מתח גבוה קיימים 3 סוגי הבחנה:

1 סלקטיביות בזמן.

2 סלקטיביות בזרם.

3 סלקטיביות בלוגיקה.

סלקטיביות בזמן



פער הזמנים בין הממסרים צריך לאפשר את זיהוי התקלה, את פקודת ההפסקה ואת ההפסקה המלאה של הקשת. בדרך כלל לא פחות מ- $250mSec$.

היתרון הוא פשטות הפתרון.

החיסרון הוא זמן הפסקה גדול בעת קצר בקטע 1.

כשמרחש קצר בקטע 3 שמוגן באמצעות ממסר C, מזהים שלשת הממסרים זרם יתר. אנו מעוניינים שיפסק רק המפסק שמגן על קטע זה, למרות שעוצמת הזרם גדולה מספיק כדי לגרום גם למפסקים שבמעלה הזרם להיפסק.

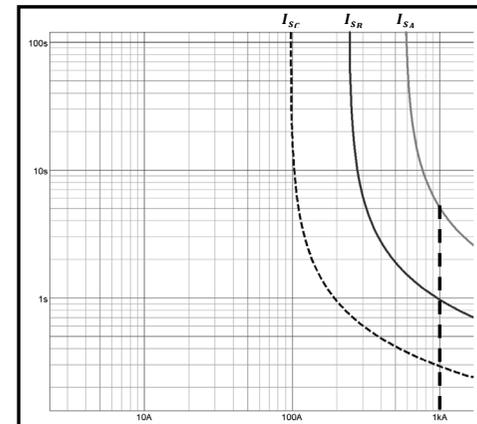
מאחר וזמן התגובה של ממסר C הוא הקצר ביותר יפסק המפסק של קטע 3, הקצר יפסק והממסרים A ו-B יתאפסו. בדרך זו מובטחת סלקטיביות.

סלקטיביות בזמן

סלקטיביות בזמן מתבססת על אופיין זרם/זמן של ההגנות לכל ממסר הגנה מוגדרת תגובה לזרם יתר ולזרם קצר. התגובה לזרם יתר מתבססת על אופיין זמן הפוך Inverse Time או אופיין זמן מוחלט Definite Time.

כדי ליצור סלקטיביות בזמן נדרש להגדיר הפרש בין זמני התגובה של הממסרים עבור עוצמת זרם זהה. ניתן לעשות זאת ע"י הפרש בין כוונון זרם הפעולה בממסרים השונים, או מקדם K שונה, או אופיין תגובה שונה.

סלקטיביות בזמן

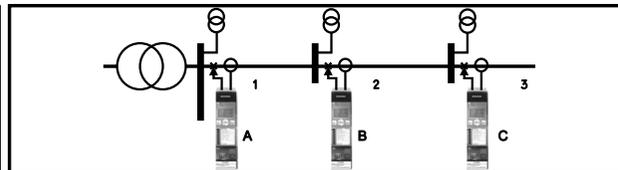


בגרף ניכר הפרש בין שלושה אופייני זמן הפוך מסוג Normal Inverse. ההפרש בזמנים נובע מהגדרת זרם נקוב שונה:

$$I_{SA} > I_{SB} > I_{SC}$$

ניתן לראות שבזרם יתר של $1kA$ ישנו הפרש זמנים ניכר בין זמני התגובה של הממסרים.

סלקטיביות בזמן



נניח שבקטע 3 מתרחש קצר בעוצמה של $1kA$. לפיכך, נגדיר את הזמנים הבאים:

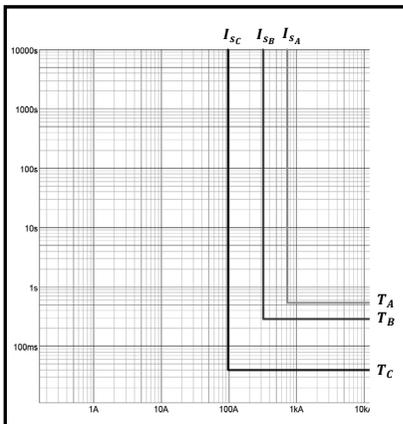
בשל זמן התגובה הקצר של ממסר C, ברור שאם המפסק של קטע 3 תקין והקצר יפסק, המפסקים של הקטעים 1 ו-2 יישארו מחוברים.

הממסרים B ואז A מספקים גיבוי במקרה של כישלון המפסק של קטע 3 בהפסקת זרם הקצר.

ממסר C יפסיק את הקצר אחרי כ- $40mSec$.

ממסר B יפסיק את הקצר אחרי כ- $300mSec$.

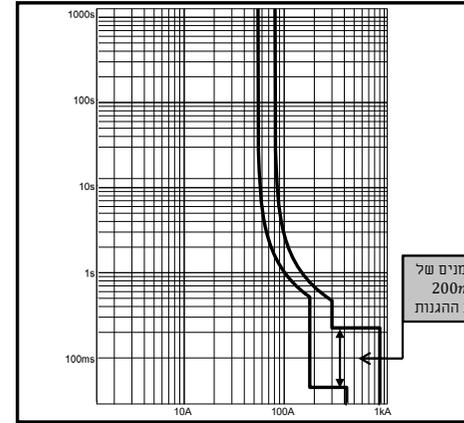
ממסר A יפסיק את הקצר אחרי כ- $600mSec$.



סלקטיביות בזמן

סלקטיביות בזמן יכולה לבוא לידי ביטוי גם בשילוב אופייני הגנה של Inverse Time ו-Definite Time.

בזכות ערכים שונים של זרם פעולת ממסרי ההגנה בפונקציית Inverse Time, בפונקציית Definite Time ובפעולה המיידית מתקבלים שני דברים: גם סלקטיביות מלאה (עד לפעולה מיידית של ההגנה במעלה הזרם) וגם הפסקה מיידית בעת קצר משמעותי.

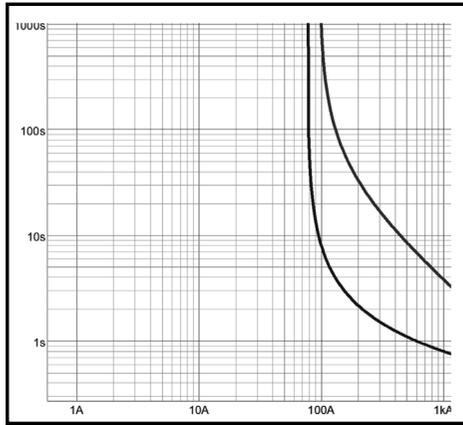


הפרש זמנים של 200mSec בפעולת ההגנות

סלקטיביות בזמן

בגרף שלפנינו ניכר הפרש בין שני אופייני זמן הפוך: אופייני Long Time Inverse בצבע אדום ואופייני Normal Inverse בצבע כחול. ההפרש בזמנים נובע מהגדרת אופייני שונה ובמידה מעטה בשל זרם נקוב שונה. ערך הזרם הנקוב של הקו האדום, גדול במעט מערך הזרם הנקוב של הקו הכחול.

במקרה זה יתקבל הפרש זמן תגובה של כ-3 שניות בזרם יתר של כ-1kA.



סלקטיביות בזרם

כשממסר A מזהה זרם קצר שעולה על 2.4kA, פירושו של דבר שהקצר הוא בקטע מספר 1.

כשממסר B מזהה זרם קצר שעולה על 0.4kA, פירושו של דבר שהקצר הוא בקטע מספר 2.

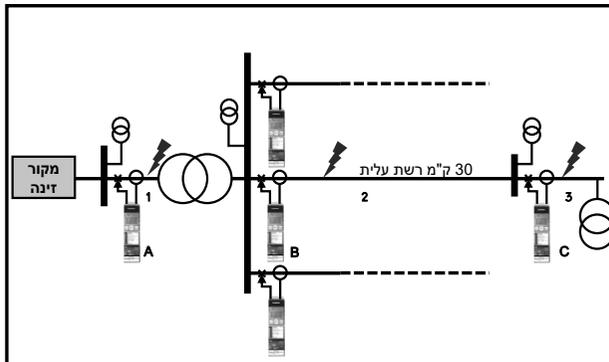
מיקום הקצר בקטע	זרם קצר מרבי שנמדד בממסר A	זרם קצר מרבי שנמדד בממסר B	זרם קצר מרבי שנמדד בממסר C
1	25kA	0kA	0kA
2	2.4kA	13kA	0kA
3	0.07kA	0.4kA	0.4kA

שיטת השגת הסלקטיביות	יתרון	חסרון
סלקטיביות בזמן	ישימה תמיד באמצעות כוונון ערכי זרם נקוב או אופייני	זמני הפסקה גבוהים של קצר שמתרחש סמוך למקור הזינה
סלקטיביות בזרם	נמנעים ערכי זמני פעולה ארוכים בעת קצר בעצמה גבוהה	נדרש לדעת מהו זרם הקצר הצפוי בקטעים השונים וכן נדרש הפרש גדול בין ערכי זרם הקצר בנקודות השונות

סלקטיביות בזרם

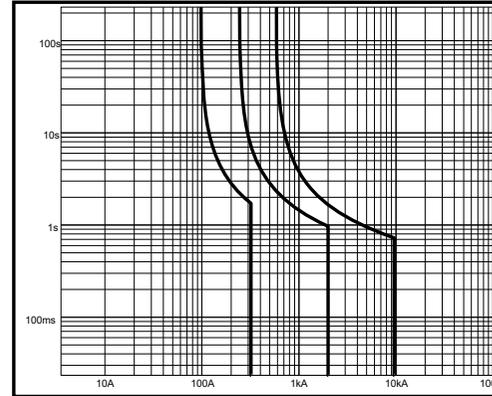
סלקטיביות בזרם פרושה הפרש בין ערכי זרם ההפסקה המיידית.

נבהיר את הנושא באמצעות הדוגמה הבאה:



מיקום הקצר בקטע	זרם קצר מרבי שנמדד בממסר A	זרם קצר מרבי שנמדד בממסר B	זרם קצר מרבי שנמדד בממסר C
1	25kA	0kA	0kA
2	2.4kA	13kA	0kA
3	0.07kA	0.4kA	0.4kA

שילוב של סלקטיביות בזמן ובזרם



מיקום הקצר בקטע	זרם קצר מרבי שנמדד בממטר A	זרם קצר מרבי שנמדד בממטר B	זרם קצר מרבי שנמדד בממטר C
1	25kA	0kA	0kA
2	2.4kA	13kA	0kA
3	0.07kA	0.4kA	0.4kA

מנגנון ההפסקה המיידית של ממטר A	יכוון ל- 10kA	A
מנגנון ההפסקה המיידית של ממטר B	יכוון ל- 2kA	B
מנגנון ההפסקה המיידית של ממטר C	יכוון ל- 0.32kA	C
כוונון ההגנות בממטר A		<input type="checkbox"/>
כוונון ההגנות בממטר B		<input checked="" type="checkbox"/>
כוונון ההגנות בממטר C		<input type="checkbox"/>

שילוב של סלקטיביות בזמן ובזרם

כדי לאפשר הפסקה מהירה בעת קצר בעוצמה גדולה וסלקטיביות מלאה בזרמי קצר ובזרמי יתר קטנים, יש לשלב בין סלקטיביות בזמן ובין סלקטיביות בזרם.

בכל מקרה יש לדרוש גם:

1. שהממסר שבמעלה הזרם יפסק כגיבוי בעת כישלון מפסק הזרם שקרוב לתקלה.

2. שמירה על סלקטיביות באמצעות הפרשים בזמני הפעולה של 250 מילי שנייה לפחות.

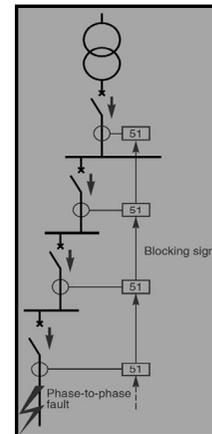
3. פעולה תקינה של המתקן בזרם עבודה מרבי.

סלקטיביות בלוגיקה

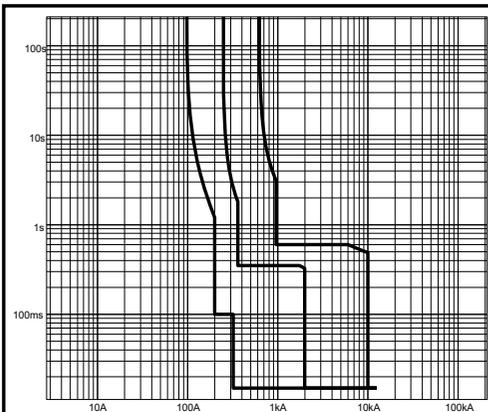
סלקטיביות בלוגיקה מושגת על ידי תקשורת בין ממסרים שמתקשרים ביניהם ומונעים או מאפשרים הפעלה הדדית. הפעלה תהיה בהתאם לערכים שהוגדרו בהם ולערכים לוגיים שמתקבלים בתקשורת.

חילופי מידע לוגי בין יחידות הגנה עוקבות, מבטל את הצורך בהגדרת מרווחי זמן השהיה ובכך מקטין באופן משמעותי את זמן ההפסקה של המפסקים האוטומטיים הקרובים לנקודת הקצר. הגנה זו שימושית במיוחד בקווים רדיאליים, ובעזרתה מובטח שבעת קצר יפעלו יחידות ההגנה הקרובות ביותר לנקודת התקלה ואילו אלה שבמעלה הזרם לא יפעלו. בדרך זו ניתן לאתר בבירור את אזור הקצר.

כל ממסר הגנה שזיהה קצר אמור לגרום להפסקת המפסק אליו הוא מחובר ובמקביל לשלוח אות חסימה לממסר ההגנה שבמעלה הזרם. המפסק שבמעלה הזרם לא אמור להיפסק וכתוצאה מאות החסימה תפעל ההשהיה המוגדרת בו. בתום ההשהיה ובמידה והותקלה נמשכת בשל כישלון בהפסקת הקצר ע"י המפסק האוטומטי שבממסר, ייפסק המפסק במעלה הזרם כגיבוי.



שילוב של סלקטיביות בזמן ובזרם



מיקום הקצר בקטע	זרם קצר מרבי שנמדד בממטר A	זרם קצר מרבי שנמדד בממטר B	זרם קצר מרבי שנמדד בממטר C
1	25kA	0kA	0kA
2	2.4kA	13kA	0kA
3	0.07kA	0.4kA	0.4kA

שילוב של Definite time, Inverse time ופעולה מיידית

מנגנון ההפסקה המושהית של ממטר A	יכוון ל- 1kA	A
מנגנון ההפסקה המושהית של ממטר B	יכוון ל- 0.35kA	B
מנגנון ההפסקה המושהית של ממטר C	יכוון ל- 0.2kA	C

בזרם קצר העולה על 10kA ייפסקו כל שלושת הממסרים.

כוונון ההגנות בממטר A	<input type="checkbox"/>
כוונון ההגנות בממטר B	<input checked="" type="checkbox"/>
כוונון ההגנות בממטר C	<input type="checkbox"/>

יתרונות סלקטיביות בלוגיקה

זמן הפסקה קצר ואחיד של כל המפסקים (ללא צורך במדרג זמנים). ההשהיה הנדרשת שווה לזו הנדרשת לזהות אות חסימה בלבד.

הפחתת אנרגיית הקשת בצורה משמעותית מפחיתה סיכון חיי אדם.

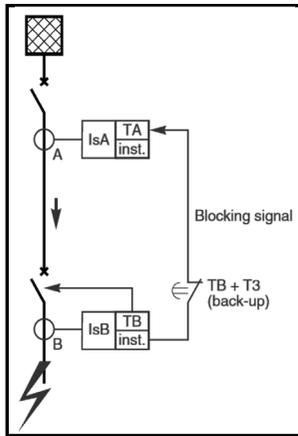
הגבלת מאמצים תרמיים ודינמיים בצידוד.

ניתנת לביצוע גם במפסקים בעלי כוונון זרם נקוב זהה.

הגנה על קו רדיאלי שמכיל מפסקים רבים תוך שמירה על סלקטיביות.

יכולת גיבוי במקרה של כישלון הפסקת מפסק הזרם שבמורד.

סלקטיביות בלוגיקה



באיור מתוארים 2 מפסקים, A ו-B, כשהפסקת כל אחד מהם נשלטת על ידי ממסר הגנה. בין הממסרים ישנה סלקטיביות בלוגיקה.

בכל אחד מהממסרים מוגדרת השהיה קצרה: TA בממסר A ו-TB בממסר B.

כאשר מתרחש קצר בנקודה B ובתנאי שלא קיבל את חסימה ממורד הזרם, מפסיק ממסר ההגנה B את הקצר לאחר השהיה של TB וחוסם את פעולת ממסר ההגנה A.

משך אות החסימה המועבר לממסר ההגנה A מוגבל בזמן ל: $TB + T3$ ($T3$ הינו זמן ההפסקה וכיבוי קשת אופייני של מפסק, בדרך כלל עד כ-200 מילי שנייה).

אם מפסק B נכשל בהפסקת הקצר, ממסר ההגנה A ייתן פקודת הפסקה למפסק A לאחר סיום החסימה.

כאשר מופיע קצר בין A ל-B, יחידת ההגנה A תגרום להפסקת הקצר אחרי השהיה קצרה המיועדת לזיהוי אות חסימה מהגנה שבמורד הזרם.

הגנות בפני זרם פחת לאדמה

הגנה מפני זרם קצר לאדמה (פחת) הינה האמצעי העיקרי להפסקת מצבי קצר לאדמה בקווים שבהם נקודת האפס של השנאי מוארקת ישירות לאדמה, או באמצעות נגד או במתקנים שבהם ההארקה אינה מאפשרת התפתחות זרם קצר גדול.

הגנה זו מיושמת באמצעות שלושה שנאי זרם (אחד בכל פאזה) או באמצעות שנאי זרם מסכם.

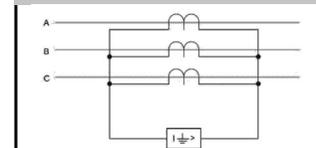
בדומה לממסרי יתרת הזרם מצויד גם הממסר לזרם פחת ב-2 יחידות:

יחידה מושהית שמיושמת באמצעות פונקציית הגנה 51N/51G ע"פ ANSI/IEEE, או $I > I_{set}$ ע"פ תקן IEC.

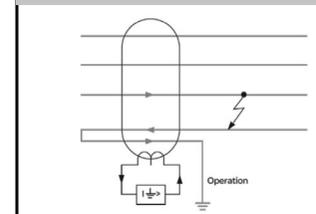
יחידה מיידיית שמיושמת באמצעות פונקציית הגנה 50N/50G ע"פ ANSI/IEEE, או $I >> I_{set}$ ע"פ תקן IEC.

במרבית המקרים תפעל ההגנה על פי אופיין Very inverse ולכן תפעל מהר יותר מאשר הגנות בפני יתרת זרם.

יישום באמצעות 3 שנאי זרם



יישום באמצעות שנאי זרם מסכם

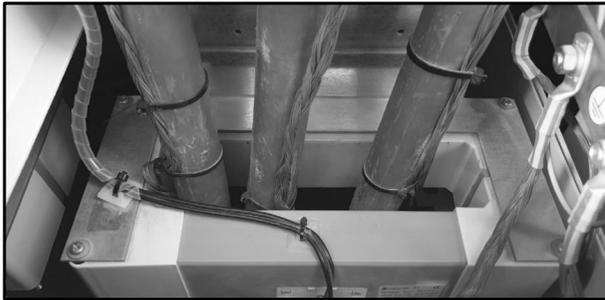


חסרונות סלקטיביות בלוגיקה

יש להתקין חיוט נוסף מכיוון שיש להעביר אותות לוגיים בין הרמות השונות של יחידות ההגנה.

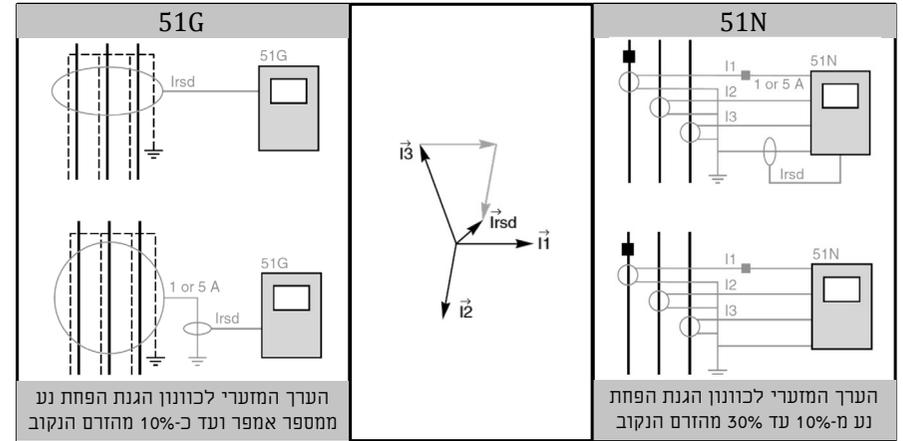
קיים קושי לחבר בין יחידות הגנה שמרוחקות זו מזו כמו באתרים שונים. ניתן לעקוף קושי זה על ידי שילוב פונקציות: סלקטיביות לוגית במתקני מתח גבוה סמוכים וסלקטיביות מבוססת זמן בין אזורים רחוקים זה מזה.

הגנות בפני זרם פחת לאדמה



הגנות מתח גבוה

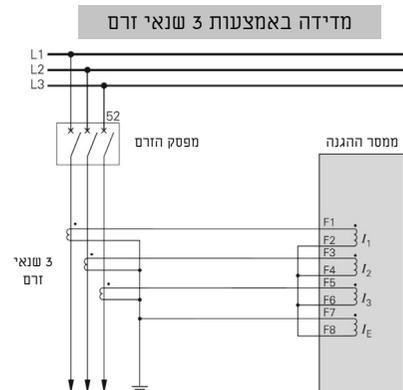
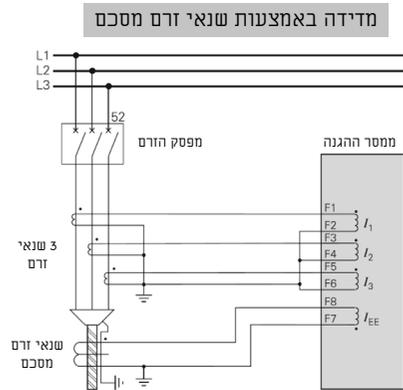
הגנות בפני זרם פחת לאדמה



WWW.arielsegal.co.il אריאל סגל

הגנות מתח גבוה

הגנות בפני זרם פחת לאדמה



הגנות מתח גבוה

הגנות בקווי חלוקה במתח גבוה

- מערך ההגנות בקווי מתח גבוה מיועד לפעול במקרים הבאים:
- עליית זרמים במוליכי הפאזות בשל עומס יתר.
- עליית זרמים במוליכי הפאזות בשל מצבי קצר.
- חיבור או קצר לאדמה.
- ראוי להזכיר שנקודת האפס ברשתות מתח גבוה מחוברת לאדמה באחד מהאמצעים הבאים:
- סליל כיבוי.
- הארקה ישירה.
- נגד.

הגנות מתח גבוה

הגנות בקווי מתח גבוה הפועלים במתח של 13kV

מרבית הקווים הפועלים במתח של 13kV מבוססים על רשת כבלים. בכבלים לא יתכנו קצרים חולפים (קצר בכבל גורם נזק בכבל ומחייב הפסקת המעגל ותיקון הליקוי, וזאת לעומת פריצה רגעית שיכולה להתרחש ברשת עלית).

מאחר ונקודת הכוכב בקווים אלה מחוברת לאדמה באמצעות נגד שערכו בדרך כלל הוא 8Ω , זרם הקצר החד פאזי לאדמה מוגבל לכ-1000A.

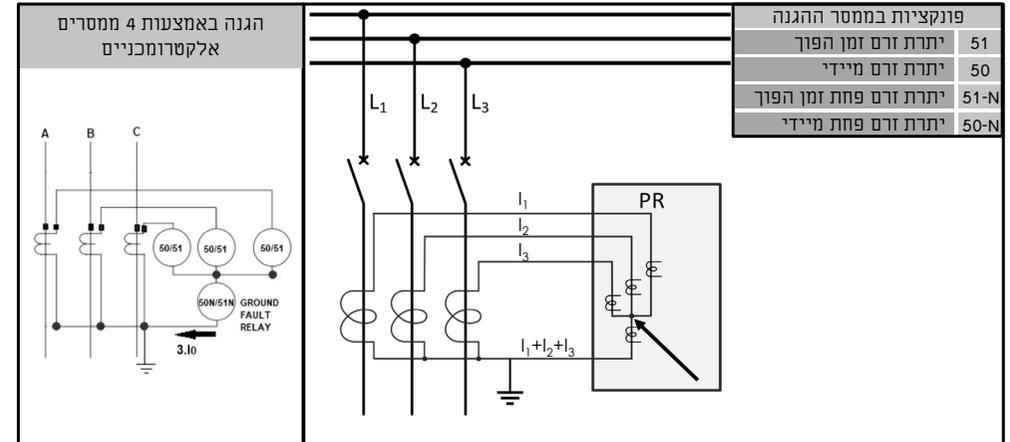
מערך ההגנות כולל:

הגנות יתרת זרם.

הגנות לזרם פחת.

*בניגוד לרשתות חלוקה אחרות לא מיושם חיבור חוזר.

הגנות בקווי מתח גבוה הפועלים במתח של 13kV



הגנות בקווי מתח גבוה הפועלים במתח של 33kV (עם הארקה ישירה)

בחלק ניכר מהקווים הפועלים במתח של 33kV, נקודת הכוכב מוארקה ישירות. לפיכך, זרם הקצר במקרה של קצר חד פאזי לאדמה גבוה מאוד.

ברשתות עליות במתח של 33kV ייתכנו קצרים חולפים ולאור העובדה שכל קצר חולף גורם להפסקת חשמל, חייב ממסר ההגנה לכלול פיקוד אוטומטי לחיבורים חוזרים.

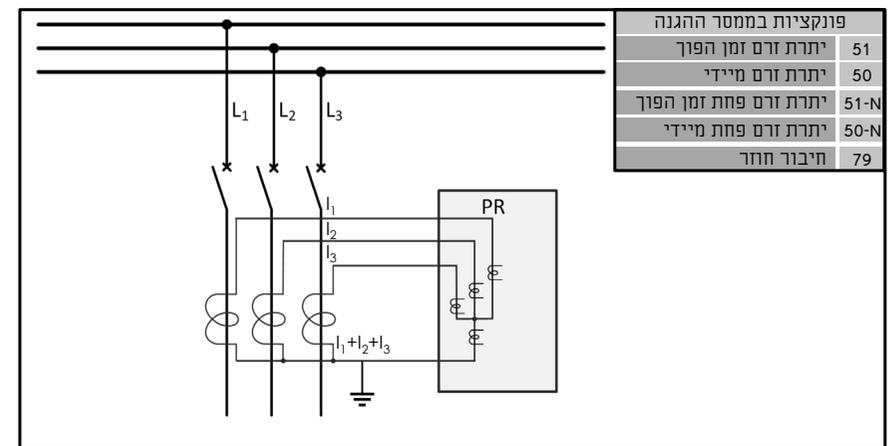
מערך ההגנות כולל:

הגנות יתרת זרם.

הגנות לזרם פחת.

2 חיבורים חוזרים אוטומטיים.

הגנות בקווי מתח גבוה הפועלים במתח של 33kV (עם הארקה ישירה)



הגנות בקווי מתח גבוה הפועלים במתח של 22kV או 33kV (עם סליל כיבוי)

בקווי מתח גבוה בהם חלק מהרשת מבוסס על קווים עיליים ובנקודת הכוכב מותקן סליל כיבוי, הזרמים בקצר חד פאזי לאדמה נמוכים מאוד ולכן לא ניתן לזהות קצר באמצעות הגנות יתרת זרם.

זיהוי באמצעות פונקציות פחת גם הוא אינו אפשרי היות וסכום הזרמים בכל אחד מקווי הרשת שונה מאפס (בשל הזרמים הקיבוליים שמופיעים בעת קצר לאדמה במעגלים התקינים).

כתוצאה מהרגישות הגבוהה הנדרשת מפונקציות הפחת קיימת סכנה לחוסר סלקטיביות והפסקות שווא.

הגנות בקווי מתח גבוה הפועלים במתח של 22kV או 33kV (עם סליל כיבוי)

מערך ההגנות בקווים אלה כולל:

הגנות יתרת זרם.

הגנה וואטמטרית באתרי חברת החשמל או פחת כיוונית באתרי לקוחות.

הגנת פחת כגיבוי.

2 חיבורים חוזרים אוטומטיים.

הגנות בקווי מתח גבוה הפועלים במתח של 22kV או 33kV (עם סליל כיבוי) (הגנת פחת כגיבוי)

הרגישות הגבוהה של פונקציות הפחת בממסרי הגנה מחייבת את ניטרולן בקווים שבהם נקודת האפס מוארקת באמצעות סליל כיבוי מהסיבות הבאות:

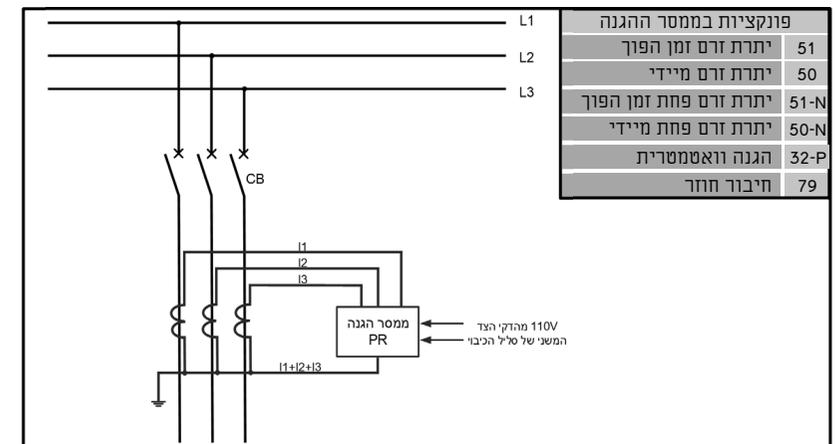
א בשל אי איזון טבעי של הרשת קיים פחת גם בעת עבודה תקינה של הרשת.

ב כשמתרחש קצר חד פאזי לאדמה קיים אי איזון בכל קווי הרשת בשל השתתפותן של הפאזות התקינות בזרם הקצר הקיבולי ובשל תופעת המעבר המתלווה לקצר.

הניטרול לשם הוצאתן מניצול של פונקציות הפחת מתבצע אוטומטית ע"י מגע העזר של מנתק ההארקה בתחנת המשנה של הקו הספציפי.

בעקבות ניסוי שביצעה חברת חשמל והקטנת רגישות פונקציות הפחת, הוחלט להשאיר את ממסרי הפחת בפעולה בלא קשר למצב המנתק.

הגנות בקווי מתח גבוה הפועלים במתח של 22kV או 33kV (עם סליל כיבוי)



הגנה וואטמטרית

ברשותן בהן נקודת האפס של השנאים בתחנות המשנה מחוברת לאדמה באמצעות סליל כיבוי, זרם הקצר החד פאזי לאדמה נמוך בהרבה מהזרם הנקוב של המעגל. לכן, ממסרי יתרת זרם אינם מסוגלים לזהות זרם קצר מסוג זה.

פונקציות הגנה הפועלות על עיקרון של מדידת סכום זרמים (פחת) בקווים אינן אפקטיביות לזיהוי המעגל המקוצר ולכן לא ניתן לזהות ולהפסיק מצבי קצר לאדמה בדרך זו.

בעת קצר חד פאזי לאדמה מופיע מתח על הדקי סליל הכיבוי שערכו יכול להגיע עד למתח פאזי. מתח זה גורם להיווצרות זרם השראי שנסגר דרך מקום התקלה, מקטין את הזרם הקיבולי ואמור לגרום לכיבוי הקשת.

בקצר קבוע (שאינו חולף) לא יצליח הזרם השראי לסלק את התקלה. למקרים כאלה נדרשת הגנה מתאימה שמסוגלת לזהות את המעגל התקול עם רגישות מתאימה וסלקטיביות. הגנה כזו הינה הגנה וואטמטרית.

הגנה וואטמטרית

עקרון הפעולה של ההגנה הוואטמטרית:

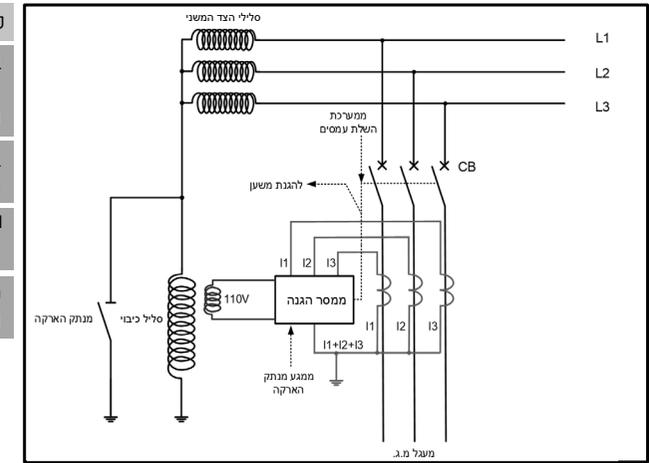
ברגע זיהוי הקצר, מושהית פעולת ההגנה על מנת לאפשר לסליל הכיבוי לכבות את הקשת ללא צורך בהפסקת המעגל.

במידה והקצר נמשך, נבנה מעגל תקלה דרכו נסגר זרם שמייצר הספק P_0 בעל אופי פעיל.

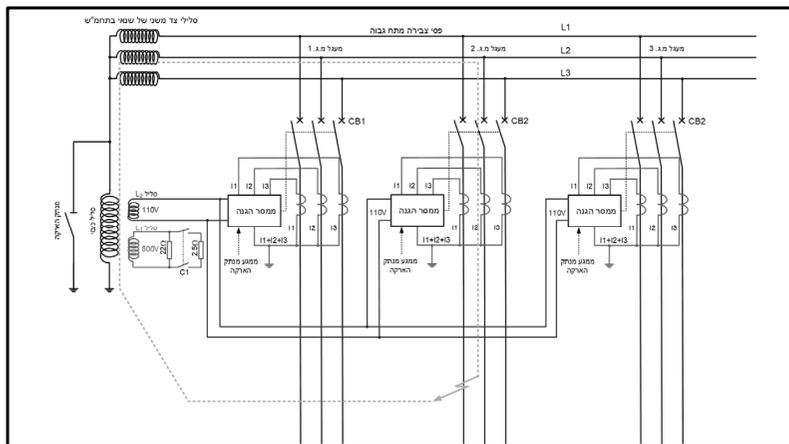
הממסר מודד את ההספק הפעיל P_0 שערכו:

$$P_0 = U_0 \cdot I_0 \cdot \cos \phi_0$$

כשההספק הפעיל עולה על המוגדר בממסר ההגנה, נפסק הקו המקוצר לאדמה.



הגנה וואטמטרית



הגנה וואטמטרית

למרות מצב הקצר, ההספק הפעיל שמוודדים ממסרי ההגנה בקווים התקינים שווה לאפס. אמנם כל אחד מהם מקבל מתח של 110V וסכום זרמים השונה מאפס, אבל מאחר וסכום הזרמים בכל אחד מהמעגלים הוא בעל אופי קיבולי, הזווית בין הזרם למתח היא בת 90° ולכן ההספק הנמדד בהם הינו אפס.

$$P_0 = U_0 \cdot I_0 \cdot \cos \phi_0 = 110 \cdot \sum I \cdot \cos(90^\circ) = 0$$

בקו מספר 2, שבו אירע הקצר, סכום הזרמים קטן מ-5A בשל הסכימה של הזרם הקיבולי של המעגלים התקינים והזרם דרך סליל הכיבוי. כמו כן, זרם זה מוזן בזווית בת 90° מהמתח מאחר והוא בעל אופי קיבולי או השראי (תלוי מי גדול יותר: קיבוליות הקווים או היגב הסליל). לכן, גם בקו זה נמדד הספק פעיל ששווה בקירוב לאפס. מצב זה נמשך 2 שניות עד אשר קוצב זמן מסיים את ספירתו.

הגנה וואטמטרית

$$I_{R_1} = \frac{U}{R} = \frac{500V}{2.5\Omega} = 200A$$

הזרם דרך הנגד R_1 במצב זה יהיה:

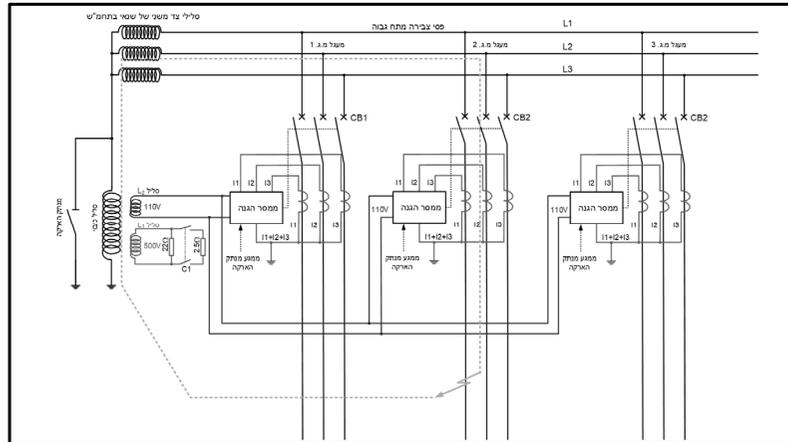
$$P = U \cdot I_{R_1} = 500V \cdot 200A = 100kW$$

ההספק הפעיל המתפתח בנגד הוא:

חשוב לציין!

ערכים אלה הם תיאורטיים בלבד. בפועל, המתחים במוצא סליל L_1 ו- L_2 נמוכים יותר בשל מפל המתח על האדמה בין נקודת הקצר לסליל הכיבוי. בשל כך, גם הזרמים וההספקים שנמדדים למעשה נמוכים יותר מהחישובים שהוצגו.

הגנה וואטמטרית



הגנה וואטמטרית

סכום הזרמים במצב המתואר, הינו בעל מרכיב התנגדותי ולכן נמדד הספק פעיל בממסר ההגנה. לפני חיבור הנגד לסליל L_1 , סכום הזרמים של שלושת שנאי הזרם המחוברים לממסר היה בעל אופי השראי או קיבולי, בהתאם ליחס בין השראות סליל הכיבוי וקיבול המעגל.

$$I_{sec CT} = I_L \cdot \frac{5A}{400A} = 7.87 \cdot 0.0125 \approx 0.1A$$

מרבית קווי המתח הגבוה בישראל מתוכננים לזרם נקוב של $400A$. לפיכך, הם מצוידים בשנאי זרם בעלי יחס תמסורת $400A/5A$. במקרה זה הזרם בצד המשני של שנאי הזרם הוא:

$$P_0 = U_0 \cdot I_{sec CT} = 110V \cdot 0.1A = 11W$$

לפיכך, ההספק החשמלי המרבי הנמדד ע"י הממסר הוואטמטרי יהיה:

הגנה וואטמטרית

$$I_L = I_{R_1} \cdot \frac{500V}{\frac{22}{\sqrt{3}}kV} = 200A \cdot \frac{500V}{\frac{22}{\sqrt{3}}kV} = 7.87A$$

הזרם וההספק שמתפתחים בצד המשני של סליל הכיבוי, מקורם בפאזה המקוצרת לאדמה ובמעגל הקצר. ערך הזרם שזורם בסליל הכיבוי ודרך מעגל התקלה בעת הקצר I_L שווה ל:

הזרם I_L עובר דרך הפאזה המקוצרת במעגל שבו אירע הקצר וגורם לאי איזון של הזרמים במעגל זה בלבד. שנאי זרם המורכבים על כל אחת מהפזות מודדים בפאזה המקוצרת זרם שונה מזה שעובר בשתי הפזות האחרות. לכן, סכום הזרמים אינו שווה לאפס.

הגנה וואטמטרית

הספק זה הוא תיאורטי בלבד. מעשית ההספק שנמדד נמוך משמעותית מערך זה בשל הסיבות שפורטו. לכן, הממטר הוואטמטרי מכוונן לפעול בגילוי הספק שעולה על $1W$.

למרות זיהוי הספק שעולה על $1W$, ההפסקה תתבצע שנייה אחת לאחר הופעתו. ההמתנה נועדה לאפשר הפסקה של המתקנים המוגנים באמצעות ממסרים (שנקראים ממסרי פחת כיוונים) באתרי לקוחות. כשמתרחש קצר באתר לקוח, הממסרים הפחת כיוונים אמורים להפסיק את התקלה לפני הפסקת הקו מחברת החשמל (מצב שקראנו לו בעבר "סלקטיביות").

סליל כיבוי ולידו ארון הנגדים



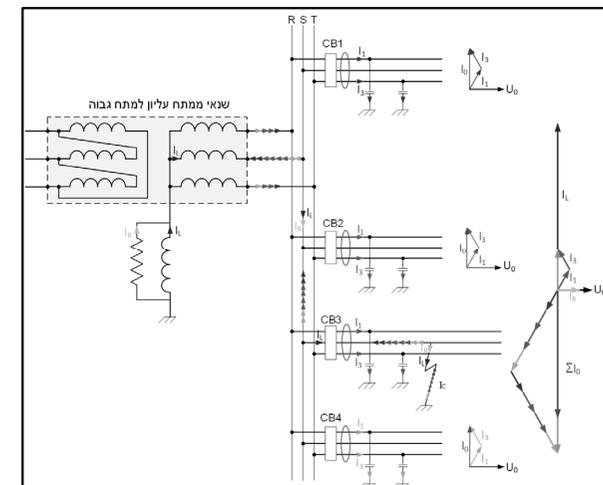
נגדי הצד המשני של הסליל

הנגד שערכו 22Ω ומחובר באופן קבוע להדקי הסליל L_1 משמש ל-2 מטרות:

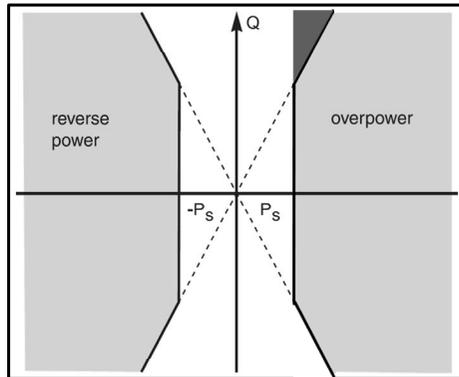
1 להפחית את מתח הרפאים על הדקי סליל L_2 . בשל חוסר איזון של קיבולי הפזות, מופיע מתח קבוע על סליל הכיבוי שערכו יכול להגיע עד ל-70% מהמתח הפאזי, גם במצב תקין של הרשת. במתח זה קוצב הזמן שמחובר להדקי הסליל L_2 עשוי לסיים ספירה של 2 שניות, לגרום לחיבור המגנען C_1 ולחיבור הנגד בערך של 2.5Ω להדקי סליל L_1 שיגרום שוב להפסקת המגנען וחוזר חלילה. חיבור נגד באופן קבוע במקביל לסליל L_1 מעמיס את הסליל, מפחית באופן משמעותי את מתח הרפאים על הדקי הסליל ומונע הפעלת שווא של המגנען C_1 .

2 לאפשר זיהוי קצר לאדמה באמצעות ממסרי הגנה פחת כיווניים באתרי לקוחות בעת שהקצר מתרחש בחצריהם והפסקת המתקן התקול עוד בטרם יתבצע חיבור הנגד שערכו 2.5Ω לסליל L_1 . נלמד על הגנת פחת כיוונית בהמשך השיעור.

עצמה ומסלול זרם תקלה בעת קצר חד פאזי לאדמה



הגנה וואטמטרית באתרי חברת החשמל



הגנות באתרי לקוחות על פי דרישות חח"י

לרוב, במתקני מתח גבוה פרטיים, חברת החשמל דורשת ממסרי הגנה הכוללים 4 פונקציות הגנה:

- 1 הגנת פחת כיוונית.
- 2 הגנת יתרת זרם המבוססת על פונקציה 49 (ערכי כונוון מקובלים הם 5% זרם יתר כאשר בבדיקת ההגנה המפסק צריך להיפסק תוך 30 דקות בזרם יתר של $1.2I_n$).
- 3 הגנת יתרת זרם זמן מוחלט (ערכי כונוון מקובלים הם $1.2I_n$ למשך 0.3 שנייה).
- 4 הגנת יתרת זרם עם מנגנון מיידי (ערכי כונוון מקובלים הם $4I_n$).

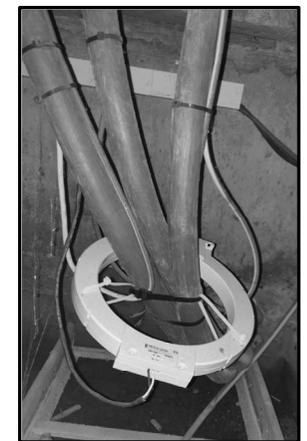
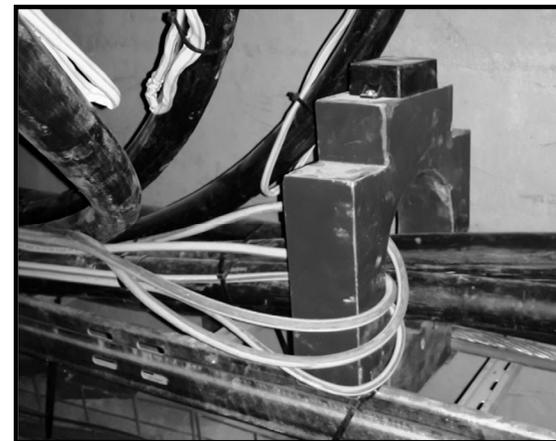
הגנת פחת כיוונית

חברת החשמל מחייבת צרכנים פרטיים במתח גבוה הניזונים מרשת שמורכבת מקטעים עליים ומקווצות באמצעות סליל כיבוי בנקודת הכוכב של השנאי המזין, להגן על מתקניהם באמצעות הגנת פחת כיוונית (הדומה במידה מסויימת להגנה וואטמטרית) וזאת על מנת למנוע הפסקת הקו כולו בעת קצר לאדמה במתחם הצרכן.

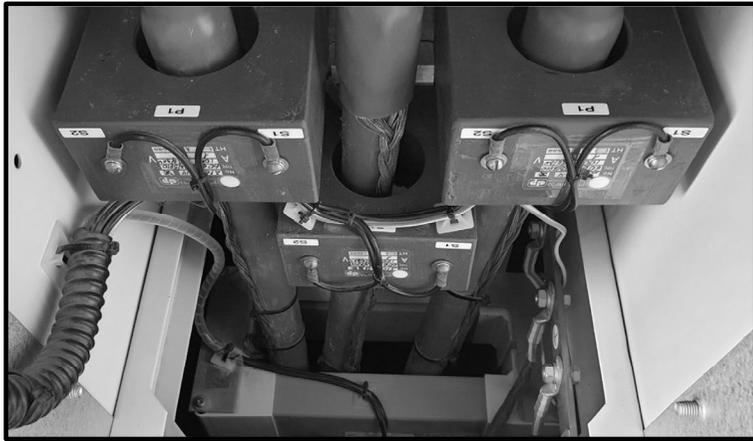
הגנה זו מוזנת במתח U_0 שמתקבל משנאי מתח בחיבור משולש פתוח ומסכום הזרמים שנמדד באמצעות שנאי זרם מסכם.

לפיכך, אתר הלקוח יכול 3 שנאי מתח כשבכל אחד מהם יש 2 סלילים משניים, אחד למדידה ואחד לחיבור משולש פתוח, 3 שנאי זרם למדידה ולהגנות יתרת זרם וקצר, ושנאי זרם מסכם.

שנאי זרם מסכם במסדר לקוח פרטי



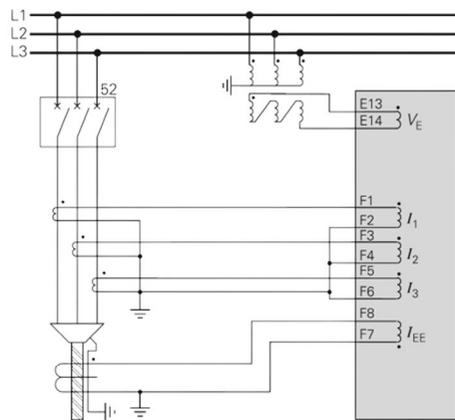
שנאי זרם לכל פאזה ושנאי זרם מסכם



שנאי מתח במסדר לקוח פרטי



חיבור שנאי המדידה לממסר שמכיל הגנת פחת כיוונית



הגנת פחת כיוונית

הפסקת המעגל באמצעות הגנת פחת כיוונית מבוססת על 2 מדידות: סכום זרמים ומתח הדקי משולש פתוח. יש 3 תנאים להפסקת המפסק: מתח מעל הערך המכוון בממסר שמתקבל מהדקי המשולש הפתוח, סכום זרמים מעל הערך המכוון בממסר שמתקבל משנאי הזרם המסכם וזווית מופע בין המתח לסכום הזרמים בתוך תחום מוגדר.

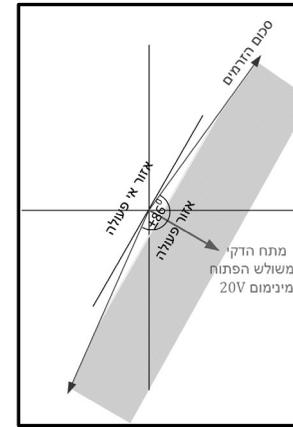
ערכים מקובלים להפעלת הממסר הם: מתח של כ- $4kV$ בצד המתח הגבוה שיוצר כ- $20V$ בהדקי המשולש הפתוח, זרם אי איזון התנגדותי של $1A$ בצד הראשוני של שנאי הזרם (ההיטל של וקטור הזרם על וקטור המתח צריך לעלות על $1A$) וזווית מופע בין הזרם למתח בגבולות $\pm 86^\circ$.

הגנת פחת כיוונית

בעת קצר חד פאזי לאדמה במתקן הצרכן, נפסק המתקן בהשגחה מרבית של חצי שנייה אחרי זיהוי תקלה שבה הערכים הנמדדים עולים על ערכי הכוונון. השגחה זו מאפשרת להתקין ממסרים נוספים ליציאות הקווים בתוך אתר הצרכן ולהשגחה את פעולתם לזמן קצר יותר מחצי שנייה, כדי להבטיח פעולה סלקטיבית.

ע"פ תקן ANSI הקוד לפונקציית הגנת פחת כיוונית הוא 68N או 68C.

הגנת פחת כיוונית

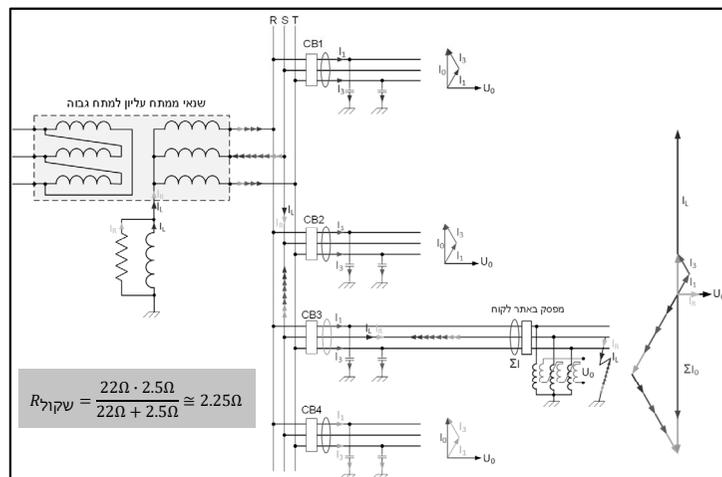


כיוון מתח הדקי המשולש הפתוח מתואר בצבע ירוק ומוגדר לפי הפאזה המקוצרת לאדמה. ערכו צריך להיות לפחות 20V.

סכום הזרמים נמדד ע"י שנאי זרם מסכם. היטלו על מחוג המתח צריך להיות 1A לפחות (שווה למרחק הקו הצהוב מראשית הצירים).

הזווית של תחום פעולת ההגנה היא $\pm 86^\circ$. הזווית נמדדת בין מתח הדקי המשולש הפתוח לבין סכום הזרמים.

קצר באתר לקוח ופעולת הגנת פחת כיוונית



$$R_{שקול} = \frac{22\Omega \cdot 2.5\Omega}{22\Omega + 2.5\Omega} \approx 2.25\Omega$$

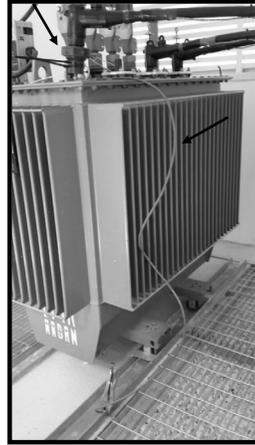
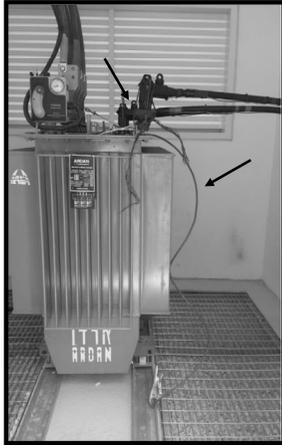
הגנת פחת כיוונית

לצורך בדיקת פעולת הגנת פחת כיוונית בעת תקלה אמיתית (עם דגש על בדיקת הכיווניות), מבצעים קצר חד פאזי במתקן הצרכן. הקצר מבוצע על ידי חיבור פאזה לאדמה בנקודה נוחה כלשהי. זרם הקצר צפוי להיות נמוך מאוד בשל סליל הכיבוי, כך שלא צפויים כוחות אלקטרודינמיים גדולים ומאפיינים אחרים של קצר. מפעילים את המפסק הראשי של המתקן וממסר ההגנה אמור להפסיק את הקצר לאחר שהגנה של חצי שנייה לכל המאוחר.

הבדיקה מבוקרת באמצעות קוצב זמן שמגביל את הזמן כדי למנוע הפסקת הקו באמצעות ההגנה הוואטמטרית בתחנת המשנה (שמפסיקה את הקו אם הקצר נמשך יותר מ-3 שניות וממסר ההגנה בחצרי הצרכן לא יפעל כשורה). על מנת למנוע את הפעלתה של ההגנה הוואטמטרית, קוצב הזמן מפסיק את המפסק הראשי באתר הלקוח לרוב כאשר הקצר נמשך כ-1.5 שניות בלבד. מדידת זמן התגובה מתבצעת באמצעות מכשור מתאים לבדיקת הגנות.

בעת ניסוי זה עולים מתחי הפאזות התקינות בכלל הקווים המחוברים לאותו שנאי ולעיתים מתרחשת פריצה של פאזה נוספת בקו בשל אי עמידת בידוד הקו במתח היתר ומתפתח קצר דו פאזי לאדמה.

ביצוע קצר חי לבדיקת כוונון הגנה



הגנות מתח גבוה

הגנת יתרת זרם תרמית ANSI 49 RMS

לרוב, פונקציית זו משמשת להגנה על ציוד (מונעים, שנאים, גנרטורים, קווים, קבלים וכו') מנזק שעלול להגרם בשל עומסי יתר. פעולת ההגנה מבוססת על מודל מתמטי שלוקח בחשבון את זרם הצריכה, חימום שמקורו בפעולה קודמת, טמפרטורת הסביבה ועוד.

עקרון הפעולה:

ההגנה מפיקה פקודת הפסקה כשעליית החום E (המחושבת על פי מדידה של זרם שווה ערך I_{eq}) גדולה מהערך המכוון E_s .

הזרם הרציף הגדול ביותר המותר הוא: $I = I_b \cdot \sqrt{E_s}$

זמן פעולת ההגנה נקבע לפי קבוע זמן τ .

E - רמת החימום התרמי המצטבר של הציוד (למשל, מזין, שנאי, או גנרטור) כתוצאה מהזרם החשמלי (חסר מימדים).
 E_s - הסף התרמי המכוון, שבו ההגנה תפעיל פקודת הפסקה אם E עולה עליו. הערך מייצג את רמת החימום המרבית המותרת לציוד לפני שהוא נמצא בסכנה ערך זה מוגדר על ידי היצרן ובתקן IEC 60255-151.
 I_{eq} - זרם שווה ערך ממוצע שקול תרמית, שמשלב את ההשפעה של הזרמים שמשתנים בצרכן לאורך זמן.
 I_b - זרם נקוב מרבי שיכול לזרם בצרכן לזמן נתון ללא נזק (למצב מתמיד יש לדרוש ערך שנמוך מ- $0.9I_b$).

הגנות מתח גבוה

הגנת יתרת זרם תרמית ANSI 49 RMS

$$I_{eq} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{(t)}^2 dt}$$

$$E = \frac{I_{eq}^2}{I_b^2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) + E_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}}$$

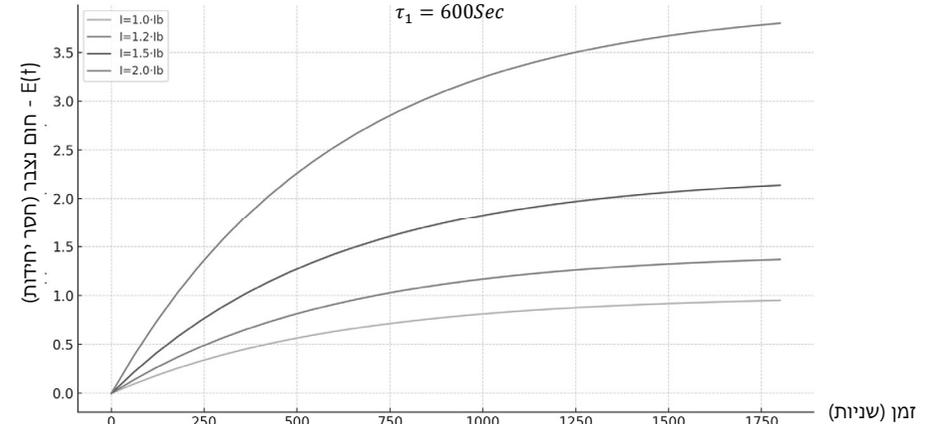
ההגנה מפיקה פקודת הפסקה כאשר $E > E_s$ כלומר כאשר הזרם השווה ערך I_{eq} גורם לחימום המצטבר לעלות מעל הסף התרמי המותר (בעומסים יתר ממושכים).

τ_1 - קבוע הזמן בחימום, τ_2 - קבוע הזמן בהתקררות.
 E - רמת החימום התרמי המצטבר של הציוד (למשל, מזין, שנאי, או גנרטור) כתוצאה מהזרם החשמלי (חסר מימדים).
 E_s - הסף התרמי המכוון, שבו ההגנה תפעיל פקודת הפסקה אם E עולה עליו. הערך מייצג את רמת החימום המרבית המותרת לציוד לפני שהוא נמצא בסכנה ערך זה מוגדר על ידי היצרן ובתקן IEC 60255-151.
 I_{eq} - זרם שווה ערך ממוצע שקול תרמית, שמשלב את ההשפעה של הזרמים שמשתנים בצרכן לאורך זמן.
 I_b - זרם נקוב מרבי שיכול לזרם בצרכן לזמן נתון ללא נזק (למצב מתמיד יש לדרוש ערך שנמוך מ- $0.9I_b$).

הגנות מתח גבוה

הגנת יתרת זרם תרמית ANSI 49 RMS

עלית חום יחסית לפי ערכי זרם שונים (ממצב קר)
 $\tau_1 = 600Sec$



זמן (שניות)

הגנות מתח גבוה

הגנת יתרת זרם תרמית ANSI 49 RMS - דוגמה

נתון שנאי שמוגן באמצעות פונקציה 49 שבו $I_b=1000A$, $E_s=1$ ו- $\tau=10min$. יש לחשב את זמן ההפסקה של ההגנה עבור זרם יתר של $I_{eq}=1,200A$ (הנח E התחלתי אפס)

פתרון

$$I = I_b \cdot \sqrt{E_s} = 1,000 \cdot \sqrt{1} = 1,000A$$

ההגנה גורמת להפסקה כאשר: $E_s \leq E$ לכן $E=1$

$$E = \frac{I_{eq}^2}{I_b^2} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$1.0 = \left(\frac{1,200}{1,000}\right)^2 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{10}}) \Rightarrow$$

$$t=11.85min$$

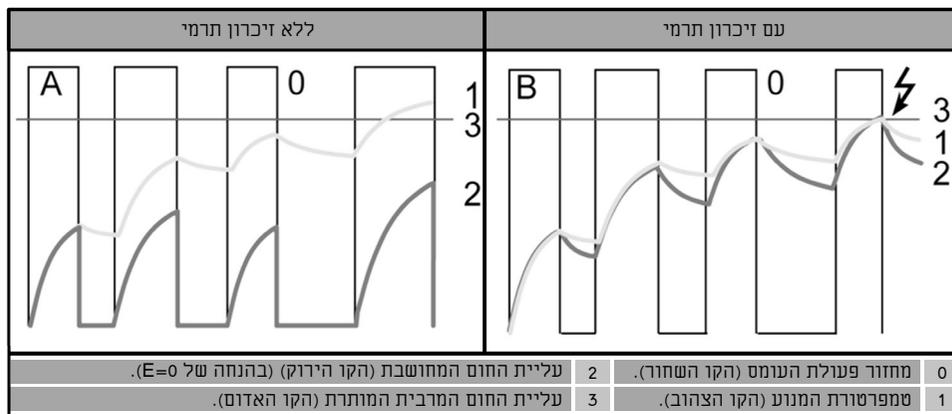
הגנת יתרת זרם תרמית ANSI 49 RMS

עליית החום המחושבת תלויה בזרם הצריכה ובחום שנוצר בשל פעולה קודמת של המתקן. כתוצאה מכך, תהיינה עקומות תגובה שונות למצבים קרים ולמצבים חמים (זה נקרא זיכרון תרמי).

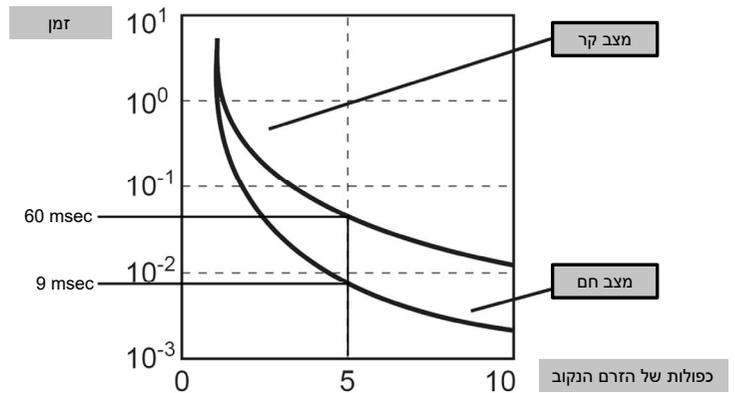
העקומה הקרה תגדיר את זמן הפסקת פעולת המתקן באמצעות ההגנה, בהתבסס על עליית חום ממצב אפס (כלומר במקרה שבו לא הייתה פעולה קודמת של המתקן וטמפרטורת המתקן היא טמפרטורת הסביבה).

העקומה החמה תגדיר את זמן הפסקת פעולת המתקן באמצעות ההגנה, בהתבסס על הטמפרטורה ההתחלתית של המתקן שפעל לפני כן (בשל עומס יתר שנגרם לאחר פעולה בעומס נומינלי).

הגנת יתרת זרם תרמית ANSI 49 RMS



הגנת יתרת זרם תרמית ANSI 49 RMS



הגנת יתרת זרם תרמית ANSI 49 RMS

$$t = \tau_2 \cdot \text{Ln} \frac{\left(\frac{I_{eq}}{I_b}\right)^2}{\left(\frac{I_{eq}}{I_b}\right)^2 - E_S}$$

זמן המצב הקר מתואר על ידי הפונקציה:

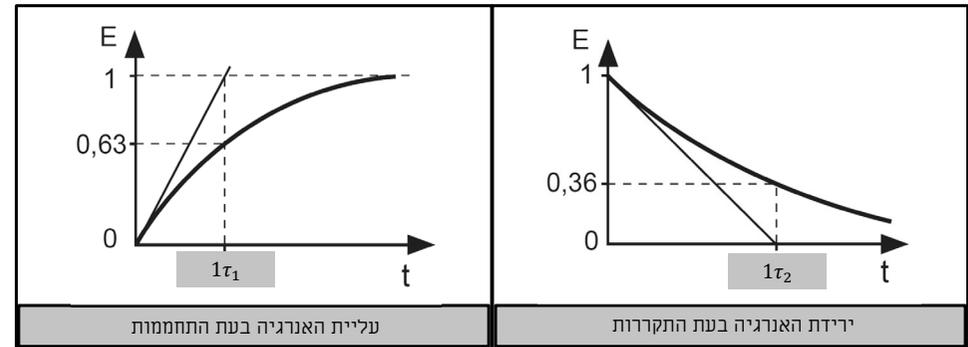
$$t = \tau_1 \cdot \text{Ln} \frac{\left(\frac{I_{eq}}{I_b}\right)^2 - 1}{\left(\frac{I_{eq}}{I_b}\right)^2 - E_S}$$

זמן המצב החם מתואר על ידי הפונקציה:

כשהפונקציה משמשת להגנה על מנוע, המצב החם מושפע ממספר ההתנועות. במקרה זה מגדירים את E_S כ-50%.

במרבית ממסרי ההגנה ניתן להגדיר 2 ערכים של E_S , כאשר באחד יש התרעה ובשני יש הפסקה.

הגנת יתרת זרם תרמית ANSI 49 RMS



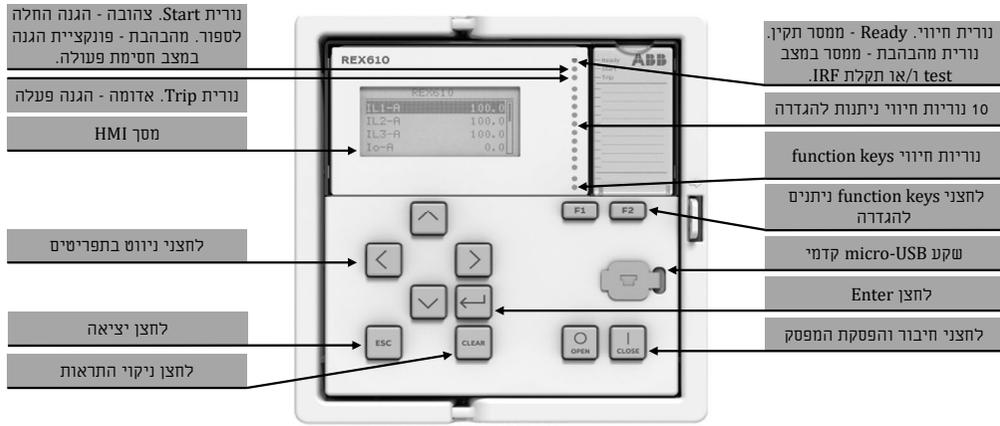
דוגמאות לממסרי הגנה במתח גבוה



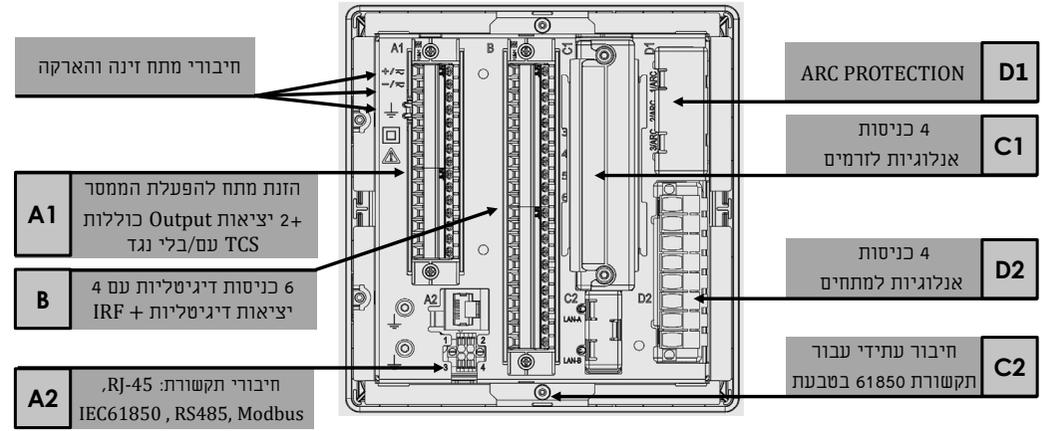
מכשירי בדיקה לממסרי הגנה במתח גבוה



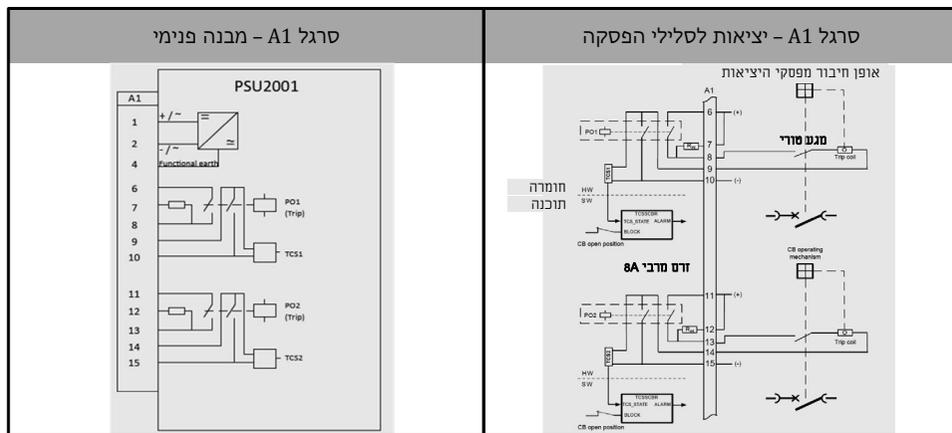
דוגמא לממסר הגנה רב פונקציונלי מתוצרת ABB



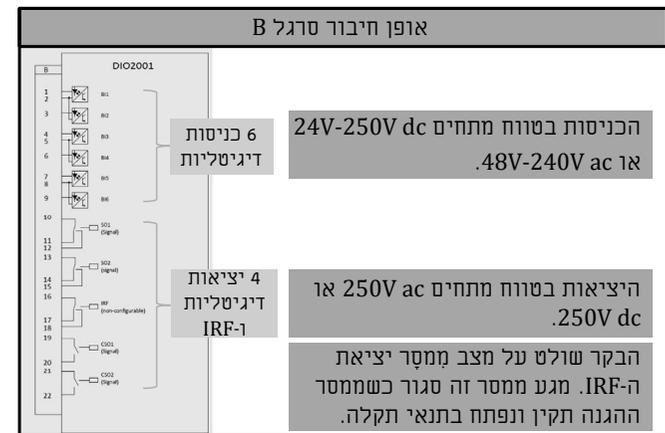
דוגמא לממסר הגנה רב פונקציונלי מתוצרת ABB



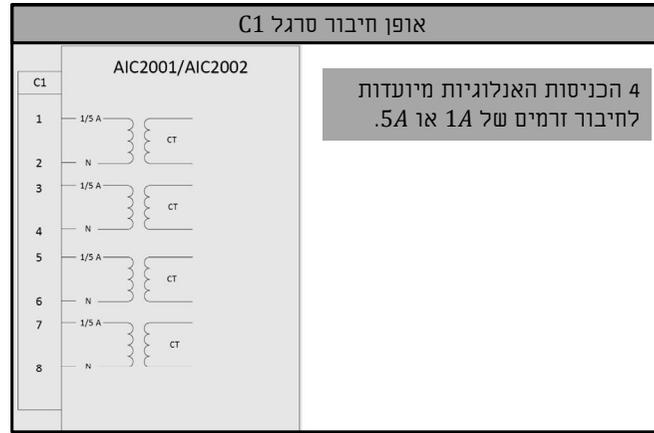
דוגמא לממסר הגנה רב פונקציונלי מתוצרת ABB



דוגמא לממסר הגנה רב פונקציונלי מתוצרת ABB



דוגמא לממסר הגנה רב פונקציונלי מתוצרת ABB



דוגמא לממסר הגנה רב פונקציונלי מתוצרת ABB

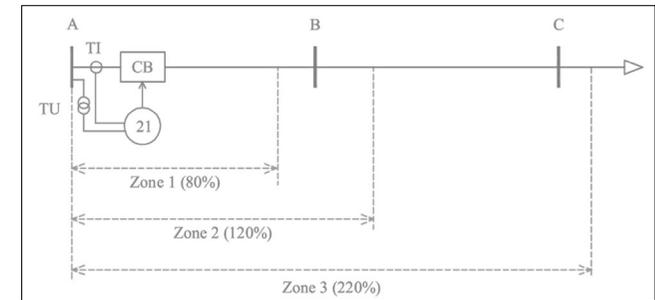


פונקציות הגנת יתרת זרם בממסר מתוצרת ABB

משמעות	הגנה	פעולה	כינוי
יתרת זרם חד או תלת פאזית מושהית ערך גבוה	יתרת זרם $I >>$ 51P-2	Three-phase non-directional overcurrent protection, high stage	PHHPTOC
יתרת זרם חד או תלת פאזית מיידיית	יתרת זרם $I >>>$ 50-P	Three-phase non-directional overcurrent protection, instantaneous stage	PHIPTOC
יתרת זרם חד או תלת פאזית מושהית ערך נמוך	יתרת זרם $I >$ 51P-1	Three-phase non-directional overcurrent protection, low stage	PHLPTOC
יתרת זרם פחת לא כיווני ערך גבוה	יתרת זרם $I_0 >>$ 51G/51N-2	Non-directional earth-fault protection, high stage	EFHPTOC
יתרת זרם פחת לא כיווני ערך נמוך	יתרת זרם $I_0 >$ 51G/51N-1	Non-directional earth-fault protection, low stage	EFLPTOC
יתרת זרם תרמית 3Ph	יתרת זרם תרמית $3I_{th} > F$ 49F	Three-phase thermal protection for feeders, cables and distribution transformers	T1PTTR
זהוי זרם חיבור של שנאים ומניעת הפסקה בחיבור	זרם התנהגות $3I2F >$ (DI) 68HB	Three-phase inrush detector	INRPHAR
זהוי מצב קצר לאדמה ערך גבוה	פחת כונוני $I_0 >>$ 67G/N-2	Directional earth-fault protection, high stage	DEFHPDEF
זהוי מצב קצר לאדמה ערך נמוך	פחת כונוני $I_0 >$ 67G/N-2	Directional earth-fault protection, low stage	DEFLPDEF

הגנות מרחק

כתיבה ועריכה:
סגל אריאל

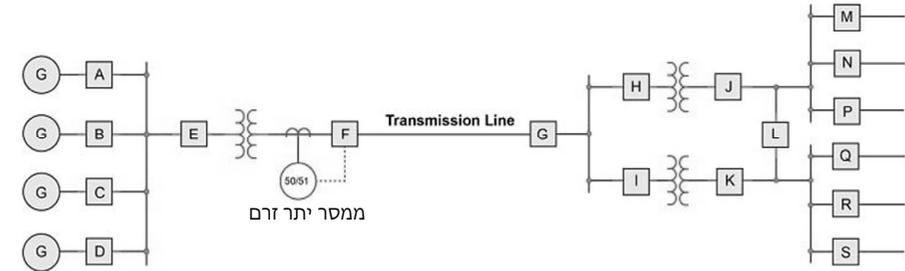


הגנת מרחק (21)

- הגנת מרחק ANSI/IEEE 21 משמשת בעיקר להגנה על קווי הזנה ארוכים כמו ברשת ארצית. ההגנה מכונה כך משום שהיא למעשה מסוגלת להעריך את המרחק הפיזי בין שנאי המדידה של הממסר (CTs ו-PTs) לבין מיקום התקלה.
- הגנה זו מתוחכמת יותר בזיהוי מצבי קצר לעומת ממסרים המכילים הגנת יתרת זרם יתר פשוטה (כמו למשל בממסרים עם פונקציות יתרת זרם 50 או 51)

הגנות יתרת זרם

- נתבונן ראשית בקו מתח עליון המוגן באמצעות הגנות יתרת זרם רגילות



הגנות יתרת זרם

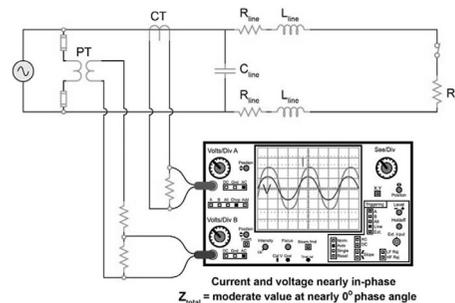
- ממסר זרם יתר השולט על מפסק "F" צריך להיות רגיש לתקלות בקטע הקו שלו בלבד, ובלתי רגיש לתקלות שנמצאות מחוץ לאזור זה.
- אם ממסר הגנת יתרת זרם המכיל פונקציות 50/51 יגרום להפסקת המפסק "F" בשל זרם תקלה באחד **משנאי התחנות**, תפסק ההזנה לתחנת המשנה כולה, ותגרם הפסקת חשמל לכל העומסים המוזנים מאותה תחנת משנה.
- פתרון לבעיה זו עשוי על פניו להיראות פשוט: נדרש לחשב את זרם התקלה המקסימלי בקו ההולכה עקב קצר במקרה הגרוע ביותר בנקודה מחוץ לאזור זה, ולהגדיר את ממסר זרם היתר כך שהוא יפעל מיידית רק בעת זרם גדול מהסכום הזה, או להגדיר אותו כך שהוא יפעל לאחר השהיית זמן ארוכה יותר מזו שממסרי התחנות יפעלו, כדי לתת לממסרי התחנות הזדמנות להפסיק תחילה את התקלה.

הגנות יתרת זרם

- חולשתה של גישה זו היא שמיקום התקלה אינו הגורם היחיד המשפיע על גודל זרם התקלה. גורם חשוב נוסף הוא מספר מקורות הזינה שפועלים בעת התקלה. במקרה שאחד או יותר מהמקורות מופסקים, זרם התקלה קטן. הגדרת ממסר שעבדה היטב כדי להגן על קו ההולכה תהיה כעת גבוהה מדי למצבי קצר שמתרחשים בקצה הרחוק של הקו. ממסר זרם היתר עלול שלא להפסיק את מפסק "F" מכיוון שזרם התקלה נמוך מזה שהממסר הוגדר להגן מפניו.
- לא ניתן לזהות באופן אמין את מיקומה של תקלה במערכת הולכת חשמל שמתאפיינת במרחקים ארוכים על ידי מדידת זרם בלבד. כדי לספק הגנה אזורית עקבית ואמינה יותר לקו ההולכה, נזדקק להגנה המסוגלת להבחין טוב יותר במיקום התקלה. שיטה אחת כזו היא למדוד את העכבה של האזור המוגן, בהתבסס על מדידות זרם ומתח בנקודת הכניסה לאזור זה. זוהי התפיסה הבסיסית של הגנת מרחק שמבצעת חישוב העכבה של האזור המוגן בלבד והפסקת המפסקים המזינים את אותו אזור רק כאשר העכבה מצביעה על תקלה בגבולות אותו אזור.

מאפייני עכבת קו

- חיבור עומס R_{Load} יגרום לזרם גדול בהרבה מזה שזרם בקו בריקים. חשוב מכך, זווית המופע בין הזרם למתח תהיה כעת קרובה לאפס מכיוון שהתנגדות העומס היא הדומיננטית ביותר מבין עכבות המעגל.



בקו מועמס בעומס R_{Load} זווית המופע בין הזרם למתח תהיה קרובה לאפס.

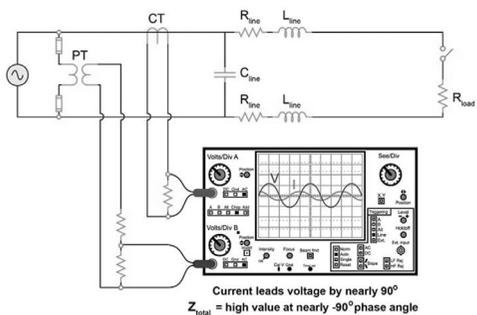
הגנות מרחק

סגל אריאל www.arielsegal.co.il

118

מאפייני עכבת קו

- לקווי מתח יש באופן טבעי קיבול, השראות והתנגדות: הקיבול נובע מהשדות החשמליים הקיימים בין קווים מקבילים זה לזה ובינם לבין האדמה; השראות נגרמת עקב השדות המגנטיים המקיפים את הקווים כשהם נושאים זרם חילופין; והתנגדות בשל תכונת המוליכים. האופי הקיבולי של קו מתח ניכר כאשר לא מחובר עומס (ריקים).



בקו בריקים שמחובר למתח יקדים הזרם את המתח בזווית ששווה בקירוב ל- $+90^\circ$ בשל קיבוליות הקו.

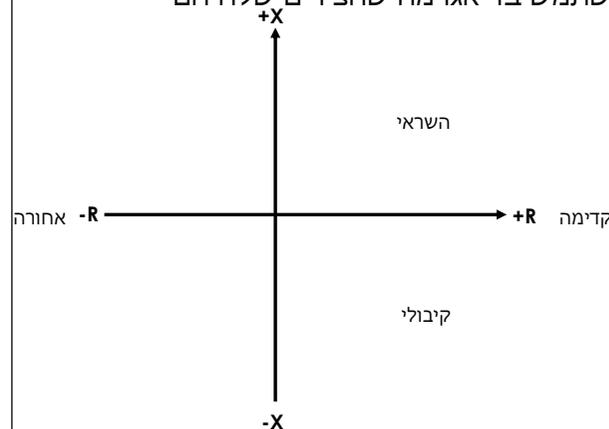
הגנות מרחק

סגל אריאל www.arielsegal.co.il

117

דיאגרמת העכבה

- כדי לתאר את עכבת הקו נהוג להשתמש בדיאגרמה שהצירים שלה הם התנגדות R והיגב X.



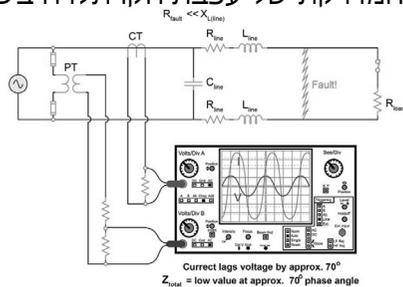
הגנות מרחק

סגל אריאל www.arielsegal.co.il

120

מאפייני עכבת קו

- כשמתרחש קצר בקו, קטנה העכבה הכוללת וגורמת לזווית המופע של המעגל להיות קרובה ל- -90° מכיוון שכעת היגב הקו הוא משמעותי בהשוואה להתנגדות מעגל התקלה.
- זוויות המופע בקווי תמסורת בעת קצר קרובות יותר ל- -70° ולא ל- -90° , בגלל השפעת התנגדות הקו. זווית המופע המדויקת של עכבת הקו תלויה בשטח חתך המוליכים ובמרחק ביניהם.



תקלת קצר שמאופיינת בהיגב הקו משמעותי ביחס להתנגדותו. הזווית היא בערך -70° .

הגנות מרחק

סגל אריאל www.arielsegal.co.il

119

שימוש בדיאגרמת העכבה לאפיון תקלות

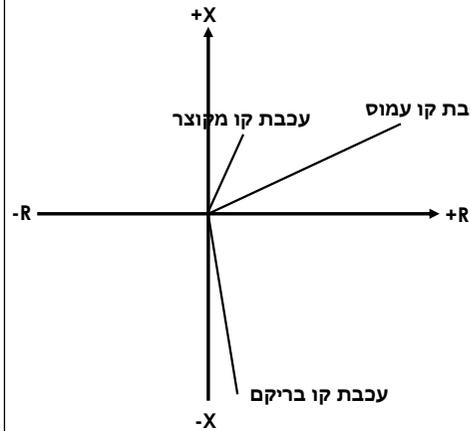
- מצבי קצר בנקודות שונות לאורך הקו יגרמו למחוג העכבה להשתנות בעיקר בגודל ובזווית. במצבי קצר, ההתנגדות וההיגב של הקו עצמו הם אלה שמגבילים את זרם הקצר, הקצר בפועל מתרחש דרך עכבה שמאופיינת בערך קטן מאוד.
- בתקלה רחוקה מהממסר, מחוג העכבה יהיה ארוך (כלומר עכבה גבוהה יחסית) עם זווית ששווה כמעט לזו של עכבת הקו בלבד.
- בתקלה קרובה לממסר, מחוג העכבה יהיה קצר (כלומר עכבה נמוכה) עם זווית קטנה מזו של זווית עכבת הקו בלבד.
- המטרה של פונקציית הגנת מרחק (המסומנת באמצעות 21 בקוד ANSI/IEEE) היא לגרום להפסקת המפסקים כשמרחק תקלה בקטע הקו המוגן ולהתעלם מעומסי פעולה רגילים ו/או מתקלות שנמצאות מחוץ לטווח.

122

הגנות מרחק

סגל אריאל www.arielsegal.co.il

שימוש בדיאגרמת העכבה לאפיון תקלות



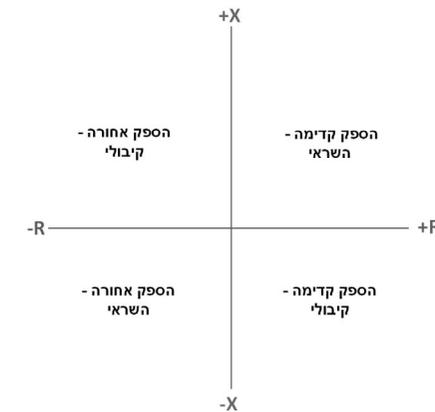
- המחוגים מייצגים עכבה, ולכן מצב קצר במעגל מוצג באמצעות מחוג קצר, בעוד שמצב ריקם מיוצג באמצעות מחוג ארוך.
- בשל חישוב העכבות על פי ערכי המתח והזרם, ערכן קבוע, אלא אם כן משתנים מאפייני הקו, העומס או נקודת התקלה.
- אם מתח המערכת יורד עקב בעיית בהזנה למשל, מחוג העכבה המייצג את ההשפעות המשולבות של עכבת הקו והעומס לא ישתנה והממסר יתעלם משינויים כאלה, ויגיב רק אם מאפייני הקו ישתנו. זה בדיוק המאפיין הנדרש מממסר "מרחק", שמאפשר לו להבחין בקצר טוב יותר מאשר כל ממסר יתרת זרם פשוט.

121

הגנות מרחק

סגל אריאל www.arielsegal.co.il

דיאגרמת העכבה לאפיון תקלות



124

הגנות מרחק

סגל אריאל www.arielsegal.co.il

דיאגרמת העכבה לאפיון תקלות

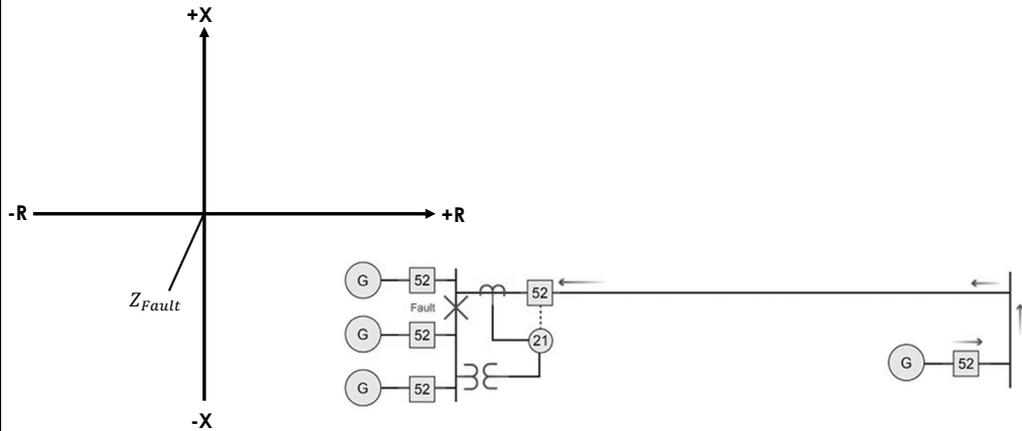
- תקלה משמאל לממסר המרחק (שבתרשים) מתבטאת גם היא בזרם גבוה ובמתח נמוך ממש כמו תקלה בקו ההולכה, אך מכיוון שזווית הגל מתהפכת (הסטת פאזה של 180 מעלות) בשל הכיוון ההפוך של זרם התקלה, מחוג העכבה יפנה לרביע אחר של דיאגרמת R-X.
- כשמטרת ממסר המרחק היא להגן על קו ההולכה, חייב הממסר להתעלם מסוג זה של תקלות.
- כל אחד מהרביעים של דיאגרמת R-X מבטא את כיוון ההספק ומקדם ההספק, הספק חיובי קדימה ושלילי אחורה "בפיגור" (השראי) או "מוביל" (קיבולי):

123

הגנות מרחק

סגל אריאל www.arielsegal.co.il

דיאגרמת העכבה בעת תקלה משמאל לממסר



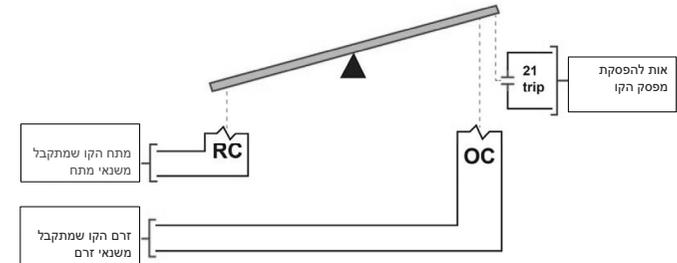
125

הגנות מרחק

WWW.arielsegal.co.il סגל אריאל

ממסר מרחק אלקטרומכני

• ממסר עכבה (מרחק) אלקטרומכני משתמש במנגנון נדנדה כדי לזהות כשהיחס בין הזרם למתח הקו (I/U) עולה על המותר. הממסר יגרום להפסקת המפסק אם העכבה תהיה קטנה מדי (בשל זרם I גדול מדי ומתח U קטן מדי).



126

הגנות מרחק

WWW.arielsegal.co.il סגל אריאל

ממסר מרחק אלקטרומכני

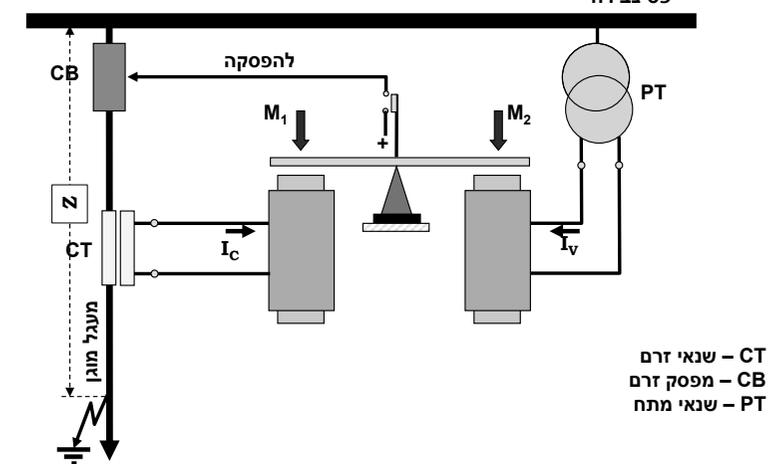
- סליל ההפעלה (OC) מוזן בזרם שמתקבל משנאי זרם, בעוד שסליל הריסון (RC) מוזן ממתח שמתקבל משנאי מתח.
- כשהמתח תקין והזרם נמוך מהנקוב, כוח המשיכה המופעל על צידה השמאלי של הנדנדה באמצעות השדה המגנטי של סליל הריסון עולה על כוח המשיכה המופעל על הנדנדה בשל השדה המגנטי של סליל ההפעלה, והמגע נשאר פתוח.
- כשמטרחש קצר בקו, הזרם יגדל באופן דרמטי בעוד שהמתח ירד. כתוצאה מכך תגבר המשיכה של סליל ההפעלה על זו של סליל הריסון, הנדנדה תיטה ימינה, והמגע המחובר לסליל ההפעלה של המפסק יסגר ויפסיק את הקו.
- ממסר עכבה פשוט זה אינו רגיש להזזת המופע בין המתח לזרם ואינו מבדיל בין ערכי עכבת קווים בעלי זוויות מופע שונות, ויגיב על סמך ערך עכבה קטן מהמינימלית בלבד.
- ה"טווח" של ממסר עכבה זה על דיאגרמת מחוגים R-X יתאר מעגל שמרכזו סביב ראשית הצירים

127

הגנות מרחק

WWW.arielsegal.co.il סגל אריאל

ממסר מרחק אלקטרומכני



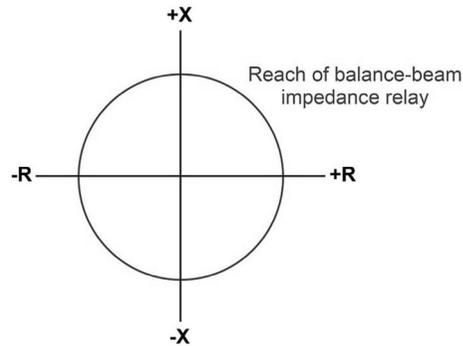
CT – שנאי זרם
CB – מפסק זרם
PT – שנאי מתח

128

הגנות מרחק

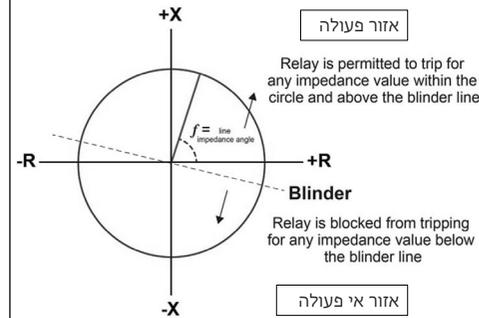
WWW.arielsegal.co.il סגל אריאל

ממסר מרחק אלקטרומכני



- כשקצה מחוג העכבה נמצא בתוך המעגל יפסיק הממסר את המפסק וכשקצה מחוג העכבה נמצא מחוץ למעגל הממסר לא יגיב.
- ממסר מרחק כזה יגרום להפסקת המעגל גם כשכוון ההספק הפוך, בדיוק באותו אופן שהוא מגיב להספק שכוונו מהמקור לקו.
- אחד הפתרונות לבעיית התגובה להספק הפוך הוא להשתמש בממסר כיווני בשילוב עם ממסר המרחק כדי לחסום את פעולת ממסר המרחק בתנאי הספק הפוך.

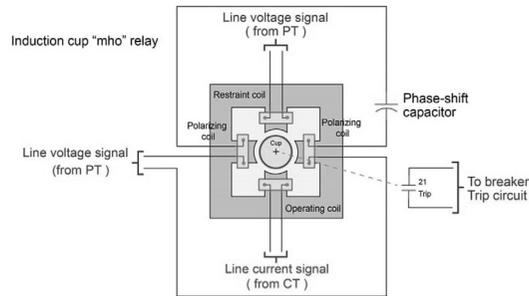
ממסר מרחק אלקטרומכני



- הסטת מופע שמתבצעת בתוך מנגנון הממסר הכיווני מטה את אופיין התגובה שלו במידה מעטה בכיוון השעון מהאופיין הטבעי (האופקי). הטיה זו מונעת כל פעולה ברביע השמאלי התחתון, ומגבילה את הפסקת המעגל באמצעות ממסר העכבה בעיקר לרביע הימני העליון והשמאלי העליון, כאשר רק חלק קטן מהרבע הימני התחתון פעיל.
- חסימת פעולת ממסר העכבה באמצעות ממסר כיווני מהווה פתרון גס ובסיסי מאוד. מאז פותחו ממסרי מרחק מתוחכמים בהרבה.

ממסר מרחק אלקטרומכני

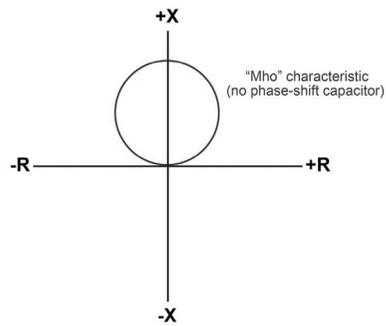
- פריצת דרך גדולה בתכנון ממסר למרחק הגיעה עם פיתוח מנגנון דומה מאוד למנוע השראה דו-פאזי, שבו רוטור מתכת קטן בצורת כוס מוקף בשני סטים של קטבים אלקטרומגנטיים. מומנט מרבי יופעל על הרוטור כאשר השדות המגנטיים של הקטבים מוזחים זה מזה בזווית של 90 מעלות. כאשר מופעל מומנט חיובי על הכוס, היא תסתובב על צירה כדי לסגור מגע יציאה, ותגרום להפסקת המפסק



ממסר מרחק אלקטרומכני

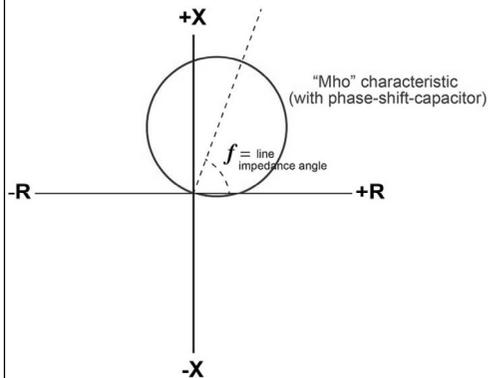
- כאשר מתרחשת תקלה והעכבה הנמדדת נכנסת לאזור ההגנה המוגדר (למשל, תקלה קדימה), הפרש הפאזה בין המתח לזרם גורם למומנט חיובי על הרוטור שגורם לרוטור (הכוס) להסתובב על צירו ולסגור מגע.
- הממסר כולל גם מנגנון איוון (קפיצים או מגנטים) שמונעים תנועה בלתי רצויה בתנאים תקינים. המומנט מופעל רק כאשר התנאים עומדים בקריטריונים של תקלה (למשל, עכבה נמוכה מדי). תקלה אחורה עשויה ליצור מומנט הפוך או אפסי, המוגבל על ידי האיוון.

ממסר מרחק אלקטרומכני Mho



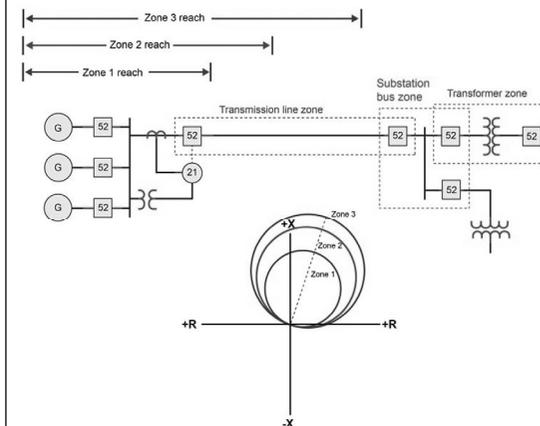
- בממסר הקודם מגדירים את הסלילים כך שהשדה המגנטי המשולב של מתח וזרם יוצר מומנט שפועל על הרוטור כאשר העכבה נמצאת ברביעים I ו-II.
- האופין על הצירים R ו-X מייצר צורת עיגול שנקרא אופין Mho היות ומומנט הסיבוב יחסי למנה של הזרם חלקי המתח.

ממסר מרחק אלקטרומכני Mho



- הוספת קבל גורמת להסטת הפאזה (הטיה) של המעגל. זווית ההטיה מוגדרת כך שתתאים לזוויות מחוג העכבה של קו ההולכה כדי להפוך את הממסר לרגיש בצורה מקסימלית לתקלות לאורך הקו.
- נקודת הפגישה בין זווית ההטיה והמעגל מציינת את ערך העכבה הגבוה ביותר שעדין מסוגל להפעיל את הממסר ולגרום להפסקת המפסק.

ממסר מרחק אלקטרומכני Mho



- גרסה מתקדמת יותר של ממסר מסוג "Mho" מציידת את ממסר המרחק במספר אלמנטים, כשכל אחד יש טווח הגעה שונה.
- המטרה לספק הגנת גיבוי לאזורים מרוחקים יותר מאזור ההגנה הראשי של הממסר.
- טווח ההגעה לאזור 2 מושהה ביחס לתגובה לאזור 1, ואזור 3 מושהה ביחס לפעולה בעת זיהוי תקלה באזור 2.

ממסר מרחק מודרני

- הממסר דוגם את אותות המתח והזרם בקצב גבוה (בדר"כ 24-48 דגימות למחזור).
- באמצעות ממירים אנלוגיים-דיגיטליים מומרות הדגימות לנתונים דיגיטליים לעיבוד.
- המיקרו-מעבר מחשב את העכבה ($Z = R + jX$) על ידי ניתוח הפאזה והערך המוחלט של המתח והזרם באמצעות אלגוריתמים מתמטיים.
- העכבה הנמדדת מושווית לאופיין הגנת המרובע המוגדר והממסר מחליט אם לפעול (לשלוח פקודת ניתוק) בהתבסס על מיקום העכבה בדיאגרמת R-X.
- האופיין המרובע מאפשר הגנה בטווח רחב של תקלות, כולל תקלות שמתאפיינות בהתנגדות גבוהה או תקלות עם השפעות קיבוליות, שקשות יותר לזיהוי בעזרת אופיין עגול.
- כדי להגדיר את הקווים יש להכנס לתפריט המתאים ולכלל אזור להגדיר את הערכים של R_{min} ו- R_{max} וכן X_{min} ו- X_{max} .

137

הגנות מרחק

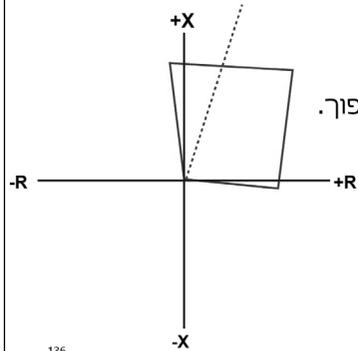
סגל אריאל www.arielsegal.co.il

ממסר מרחק מודרני

- ממסרי מרחק מודרניים מבוססי מיקרו-מעבד אינם מוגבלים למאפייני טווח מעגליים, וניתן לתכנתם ליישום מגוון של טווחים. למרות שמאפיין ה"mho" המסורתי עדיין זמין כאופציה בתוך ממסרי מרחק דיגיטליים, לרוב מגדירים צורת הגנה הנקראת מרובע, שלפיה ניתן להגדיר פעולה עבור ערכים של מחוג עכבה שקצהו תחום מארבע צדדים

מאפייני המרובע (Quadrilateral Characteristic)

- גבול קדמי (Forward Reach) מגבלת מרחק.
- גבול אחורי (Reverse Reach) מניעת תגובה לקצרים בכיוון ההפוך.
- גבול תת-עכבה (Low |Z|) לאבחון קצרים עם עכבה נמוכה.
- גבול יתר-עכבה (High |Z|) סינון תקלות רחוקות מאוד.



136

הגנות מרחק

סגל אריאל www.arielsegal.co.il

גורמים המשפיעים על כונוני הערכים בממסר ההגנה

1. התנגדות הקשת בעת קצר חד פאזי לאדמה.
2. השפעת הקשת על המדידה.
3. השפעת קווים מקבילים.
4. אי-סימטריה של קווי חשמל.
5. השפעת קווים ארוכים



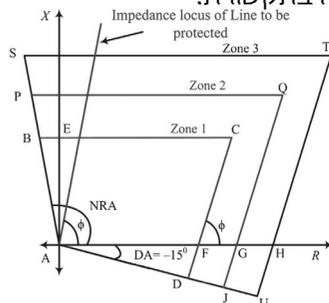
139

הגנות מרחק

סגל אריאל www.arielsegal.co.il

ממסר מרחק מודרני

- הקווים הישרים ברוב המקרים עוברים במרכז מערכת הקואורדינטות כאשר $\alpha_1 \alpha_2$ נמדדות ביחס לציר R+. כאשר: $115^\circ \leq \alpha_1 \leq 125^\circ$ ו- $15^\circ \leq \alpha_2 \leq -25^\circ$.
- לממסר כסטנדרט יש שלושה אזורי הגנה; אזור 1 ו-2 מתוכנתים לפעול בכיוון קדימה בעוד שאזור 3 יכול להיות מוגדר קדימה כגיבוי, או אחורה. אזור רביעי זמין כאופציה בחלק מהדגמים והוא מאופיין באופיין הפוך מהאופיין קדימה. הוא משמש בדרך כלל כאזור ללא הפסקה בשילוב עם חסימה ואפשרו פעולה בתקשורת.



138

הגנות מרחק

סגל אריאל www.arielsegal.co.il

פעולת ממסרי מרחק

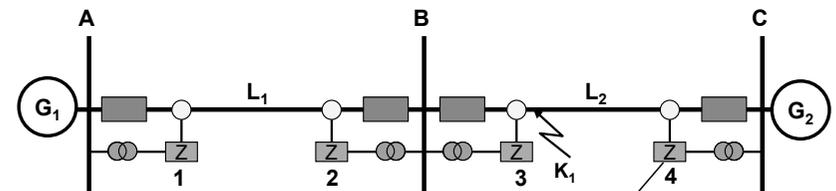
- בשל העובדה שאזור 1 מכסה רק 80% מהקו, תקלות באזור הקצה יגרמו להפסקה מיידית בקצה אחד ולהפסקה אחרי השהיה בקצה השני, השהיה זו עלולה להוביל ל:
 - בעיות ביציבות המערכת בשל הקצר הממושך.
 - קשה מאוד ליישם בדרך זו חיבור חוזר ותקלה חולפת הופכת להיות קבועה.
 - ככל שזמני ההפסקה ארוכים יותר - המזק רב יותר.
- הגנות מרחק מודרנית מצוידות גם ביחידות חיבור חוזר אוטומטי וביכולת תקשורת בין ממסרים. בזכות התקשורת מתאפשרת הפסקת הקטע הפגוע בלי השהיה גם במצבי קצר בקו שמחוץ ל-80% של אזור 1.
- כשמתרחש קצר בקטע שנמצא בתחום ה-80% של 2 הממסרים יפסיקו 2 הממסרים את הקצר בלי השהיה.
- כשמתרחש קצר בקטע שנמצא בתחום שמעבר ל-80% של אחד הממסרים אבל בקו המוגן, יפסיק הממסר הקרוב לקצר את המפסק שצמוד אליו בלי השהיה וישלח את תקשורת לממסר השני המגן על אותו קטע. הממסר השני שחש את הקצר באזור 2 שלו יפסיק כעת מיידית ללא השהיה.

כוונון ממסרי מרחק

- כוונון עכבת הקו אמור לכסות את אורך הקו כולו, אבל בשל חוסר דיוק של שנאי הזרם, השתנות אורך הקווים בשל טמפרטורות ומצבי עבודה (עומס מלא/ללא עומס) והגורמים שפורטו קודם, משתנה עכבת הקו ולא ניתן לשערך אותה בדיוק. לפיכך:
 - הגדרת אזור 1 תתבצע על פי רוב ל-80% מהעכבה הכוללת של הקו המוגן. הטווח מוגבל כדי להבטיח סלקטיביות ולהימנע מפעולה שגויה עקב שגיאות מדידה, השפעות קיבוליות (כגון אפקט פראנט), או חפיפה עם קווי הגנה סמוכים.
 - אזור 1 מספק הגנה מיידית. זמן הפעולה של זיהוי קצר שמתרחש באזור 1 יכול להיות בסדר גודל של מחזור אחד. הטווח מוגדר על פי רוב ל-80-85% מאורך הקו ומשאיר את אזור הקצה לא מוגן.
 - אזור 2 מוגדר בדרך כלל ל-120% עד 150% מאורך הקו עם השהיה של כ-0.25 עד 0.5 שניות, כדי לתת עדיפות לאזור 1 של הממסר השכן.
 - אזור 3 עשוי להגיע ל-200% עד 250% מהקו עם השהיה של בדרך כלל 0.5 עד 1 שניות.

פעולת ממסרי מרחק

- בעת קצר בנקודה K_1 אמורה יחידת ההפעלה בממסר 3 לטפל בקצר בדרגה ראשונה (מיידית) ואילו ממסר 4 אמור לטפל בקצר בדרגה שניה. השהיה זו כאמור אינה רצויה ולכן נשלח את תקשורת ממסר 3 לממסר 4. אם ממסר 4 חש את הקצר בדרגה השנייה שלו, הוא לא ימתין ויפסיק מיידית אחרי קבלת התקשורת.

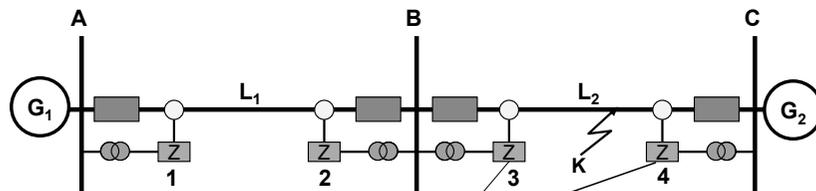


זיהוי תקלה ב- Zone 2 + אות ממסר 3 על הפסקה = Trip

Z הגנת מרחק
 O שנאי זרם
 C שנאי מתח

פעולת ממסרי מרחק

- בעת קצר בנקודה K אמורות יחידות ההפעלה בממסרים 3 ו-4 לטפל בקצר בדרגה ראשונה (מיידית). יחידת ההפעלה בממסר 2 לא תפעל מאחר וכוון הזרימה אינו מכוון פסי הצבירה לנק' הקצר. יחידת ההפעלה בממסר 1 תטפל בקצר בדרגה שנייה (אחרי השהיה של כ-0.25 שניות).

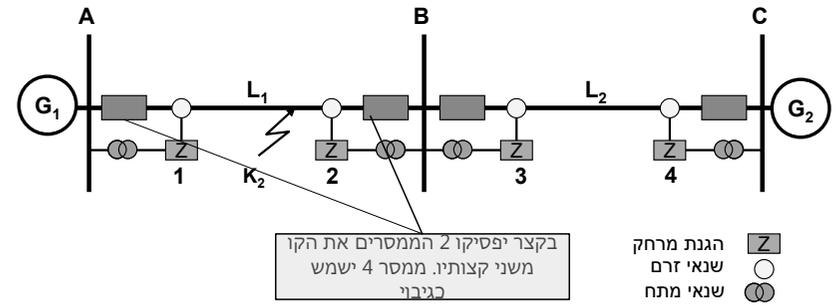


בעת קצר יפסיקו 2 הממסרים את הקו משני קצותיו

Z הגנת מרחק
 O שנאי זרם
 C שנאי מתח

פעולת ממסרי מרחק

- בעת קצר בנקודה K_2 שמתרחש בתחום קטן מ- 120% של ממסר 4, אמורות יחידות ההפעלה בממסר 1 ו-2 לטפל בקצר בדרגה ראשונה (מיידית) ולהפסיק את הקו המקוצר. ממסר 3 לא יגיב כי התקלה מזוהה לכוון הפוך וממסר 4 חש את הקצר בדרגה השנייה שלו וישמש כגיבוי ויפסיק את הקצר רק אם הקצר נמשך מעבר להשהיה שלו.



בקצר יפסיקו 2 הממסרים את הקו משני קצותיו. ממסר 4 ישמש כגיבוי

Z הגנת מרחק
○ שנאי זרם
● שנאי מתח

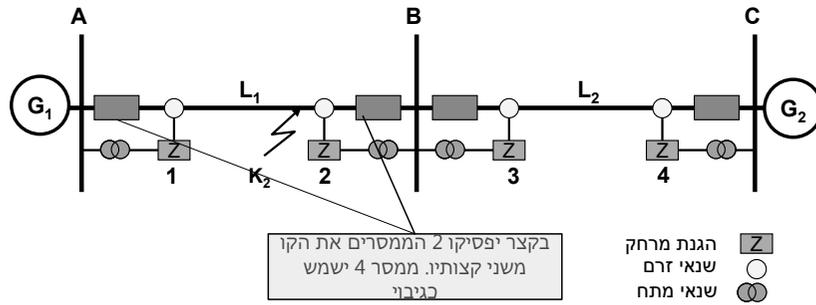
הגנות מרחק

סגל אריאל www.arielsegal.co.il

145

פעולת ממסרי מרחק

- בעת קצר בנקודה K_2 שמתרחש בקטע שאינו עולה על 120% של ממסר 4, אמורות יחידות ההפעלה בממסר 1 ו-2 לטפל בקצר בדרגה ראשונה (מיידית) ולהפסיק את הקו המקוצר. ממסר 3 לא יגיב כי התקלה מזוהה לכוון הפוך וממסר 4 חש את הקצר בדרגה השנייה שלו וישמש כגיבוי ויפסיק את הקצר רק אם הקצר נמשך מעבר להשהיה שלו.



בקצר יפסיקו 2 הממסרים את הקו משני קצותיו. ממסר 4 ישמש כגיבוי

Z הגנת מרחק
○ שנאי זרם
● שנאי מתח

הגנות מרחק

סגל אריאל www.arielsegal.co.il

144

דוגמת חישוב

- יש לקבוע את פרמטרי הכונון להגנת מרחק לקו במתח על של 400kV תלת פאזי שכל אחד ממוליכי הפאזה מכיל 3 מוליכים. שטח חתך כל מוליך מתוך השלשה הוא 600 ממ"ר ואורך הקטע הראשון 100 קילומטר.

פתרון:

- היגב אופייני של רשת במתח עליון כ- $0.42 \frac{\Omega}{km}$. ההיגב של קצר באזור 1 ל- 80% מהמרחק יהיה 33.6Ω .

- התנגדות מוליכי הקו לאורך העובדה שהמוליכים עשויים מסגסוגת אלומיניום ובהתחשב בטמפרטורת העבודה ובאפקט קרום נקבל שהתנגדות הקו היא כ- $0.025 \frac{\Omega}{km}$ (2.5Ω) שנותן זווית של כ- 85° . גם תקן IEC 60909 מגדיר זווית טיפוסית בקווים עליים של כ- 85° .

- העכבה הכוללת של הקו: $Z = 42 \angle 85^\circ$.

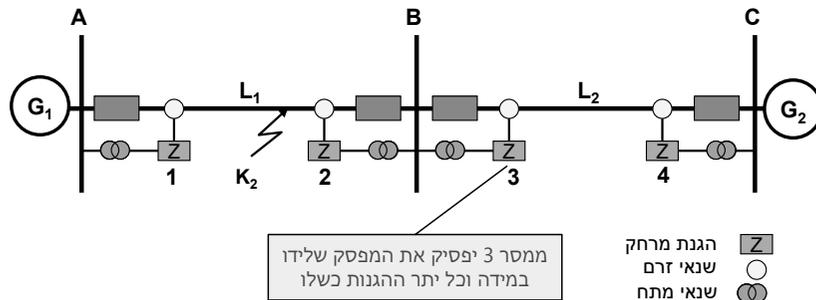
הגנות מרחק

סגל אריאל www.arielsegal.co.il

147

פעולת ממסרי מרחק

- בעת קצר בנקודה K_2 שמתרחש בתחום קטן מ- 120% של ממסר 4, ובמידה וממסרים 1 ו-2 לא הפסיקו את הקצר וגם ממסר 4 כשל, יפעל אזור 4 בממסר 3 (למרות הכוון הפוך) ויפסיק את הקצר. ההשהיה במקרה זה היא ממושכת



ממסר 3 יפסיק את המפסק שלידו במידה וכל יתר ההגנות כשלו

Z הגנת מרחק
○ שנאי זרם
● שנאי מתח

הגנות מרחק

סגל אריאל www.arielsegal.co.il

146

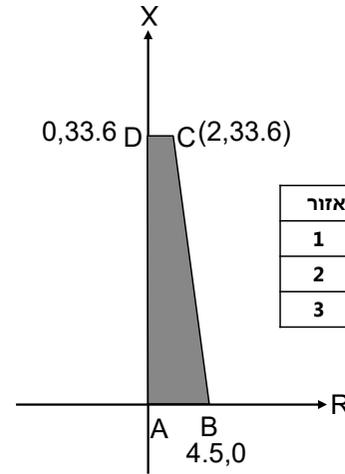
דוגמת חישוב

- 80% מערך העכבה הוא: היגב של 33.6Ω , והתנגדות של 2 אום.
- מאחר ורצוי שההגנה תאפשר הפסקת קצרים לאדמה וגם קצר דרך קשת, הערך של R_{max} שמומלץ בתקנים IEC60255-121 ו-IEEE C37.113 הוא:

Zone	תרומת התנגדות הקשת
Zone 1	תוספת של כ- 2.5 אום
Zone 2	תוספת של 4 עד 7 אום
Zone 3	תוספת של 7 עד 10 אום

כוונון ההגנה בדוגמה הקודמת

כוונון הערכים בממסר ההגנה



אזור	A (R, X)	B (R, X)	C (R, X)	D (R, X)	זמן פעולה
1	0, 0	4.5, 0	2.0, 33.6	0, 33.6	מייד (0-40 מ"ש)
2	0, 0	7.6, 0	2.8, 50.4	0, 50.4	0.3-0.5 שניות
3	0, 0	10, 0	4.0, 84	0, 84	0.5-1 שנייה