

משטר נקודת האפס ברשת

כללי

ברשת סימטרית, שבה מתחי המקור וגם העומסים סימטריים, הפוטנציאלים של כל נקודות האפס שווים לאפס. לפיכך, ניתן לחבר את נקודות האפס בין לבין עצמן או לחברן לאדמה ללא השפעה על המתחים והזרמים ברשת. קרי, ברשת זו משטר נקודת האפס אינו משפיע על המתחים והזרמים בה. מתח בין הפאזה של הרשת לבין נקודת האפס שווה למתח בין הפאזה לבין האדמה. משטר נקודת האפס משפיע על מתחים וזרמים כאשר ברשת מופיעה א-סימטריה (חוסר שוויון וקטורי בין המתחים). סוג קיצוני של א-סימטריה הוא קצר חד-פאזי לאדמה.

אופי משטר נקודת האפס הוא מאפיין חשוב של רשת החשמל, והוא בא לידי ביטוי בפרמטרים הבאים: רמת הבידוד, שיעור ההפרעות ברשת, סוג ההגנה בפני תקלה חד-פאזית, דרישות להארקה, רמת ההשפעה על מערכת התקשורת ועוד (ראו פירוט בהמשך).
להלן כל סוגי המשטרים הנהוגים לגבי נקודת האפס:

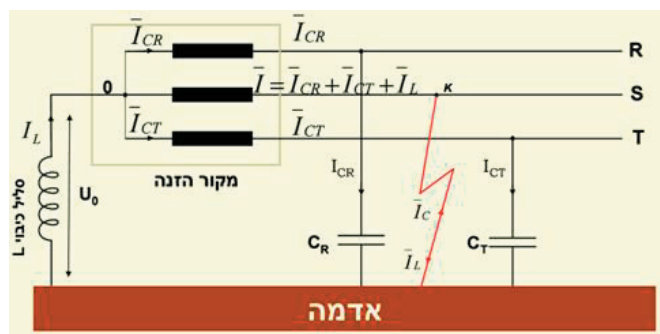
- נקודת אפס מבודדת.
- חיבור נקודת אפס דרך סליל פטרסן.
- הארקה נקודת אפס דרך התנגדות.
- הארקה קשיחה של נקודת האפס.

במאמר זה נתמקד במשטרים הנפוצים בלבד. המאמר מבוסס בחלקו על חומר לימודי של מהנדס אריאל סגל מבית הספר למקצועות הייצור וההולכה בחברת החשמל.

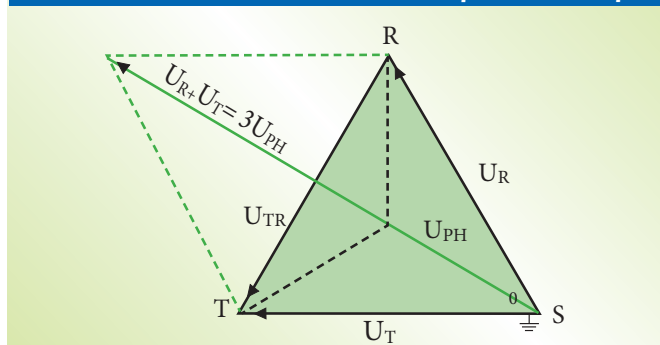
רשת עם נקודת אפס מוארקה דרך סליל פטרסן

על מנת להקטין את זרם הקצר בזמן הופעת קצר חד-פאזי לאדמה (שהוא הנפוץ ביותר) הציע ויליאם פטרסן, עוד בשנת 1916, להאריק את נקודת האפס של הרשת דרך סליל המכאון בתהודה עם קיבול הרשת. כתוצאה מכך קטן זרם הקצר לאדמה.

איור 1: קצר חד-פאזי (פאזה S) לאדמה



איור 2: תיאור וקטורי של מערכת בעלת נקודת אפס מוארקה דרך סליל במצב קצר חד-פאזי



U_R - מתח שלוב בין פאזה R לאדמה.
 U_{TR} - מתח שלוב בין פאזה T לפאזה R.

במקרה של קצר חד-פאזי לאדמה (ראו איור מס' 1), מתח הסליל עולה עד למתח פאזי (מתח של פאזה S) וזרם זרם I_L שאת ערכו ניתן לחשב כדלקמן:

$$I_L = \frac{U_{PH}}{jX_L} = -j \frac{U_{PH}}{\omega L}$$

המתחים בין הפאזות הבריאות לאדמה גדלים עד לערכו הקווי של מתח הרשת:

$$|U_{CR}| = |U_{CR}| = \sqrt{3} \cdot U_{PH}$$

ההיגב הקיבולי של פאזה ברשת הוא:

$$X_C = X_{CR} = X_{CT} = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

הזרם הקיבולי:

$$I_C = \frac{U_{CR} + U_{CT}}{j\omega \cdot C} = 3U_{PH}j\omega C$$

ולסיכום, זרם הקצר הוא:

$$I = I_C + I_L = jU_{PH} \left\{ 3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right\}$$

היגב הסליל X_L נבחר כך ש- $I_L = I_C$. אזי סכום הזרמים בנקודת הקצר שווה לאפס.

נסכם את היתרונות והחסרונות של משטר זה.

יתרונות:

- ניצול המתח המתפתח על הסליל לשם זיהוי קיום תקלה בעזרת הגנות מתאימות (הגנה ואטמטרית: בעת התהוות קצר חד-פאזי לאדמה מופיע בהדקי המשולש הפתוח של משני הזרם מתח סדרת אפס אשר גורם להפעלת ההגנה).
- הקטנת הזרם החשמלי מתחת לערך סף מורידה את רמת האנרגיה בקשת החשמלית הנוצרת עקב הקצר ומביאה לכיבוי.
- זרם קצר נמוך שאינו גורם למאמצי יתר בציוד, דהיינו כוחות אלקטרודינמיים, חימום.
- המתחים השלובים אינם משתנים בעת תקלה. לפיכך, ניתן להמשיך את האספקה לצרכנים גם בזמן תקלה, בתנאי שהצרכן מוזן משנאי בעל קבוצת חיבורי משולש בכיוון המתח בו קיימת התקלה.
- רציפות בהזנת הצרכנים בקצרים חולפים.

חסרונות:

- קשיים באיתור מקום התקלה עקב זרם נמוך.
- שינויים בתצורת הקווים מצריכים שינויים בכיול סלילי הכיבוי (גם מזג האוויר משפיע על קיבול הקווים).
- המתח הפאזי בפאזות התקינות עולה לערך של מתח שלוב. עובדה זו מחייבת השקעה בבידוד, שאם לא כן ייהפך הקצר לדו-פאזי (ב-60% מהמקרים הופך הקצר לדו-פאזי תוך פרק זמן של כ-5 דקות).

היחס בין זרם הסליל לבין הזרם הקיבולי של הרשת נקרא מקדם כיוון הסליל, $q = \frac{I_L}{I_C}$ ואילו מקדם אי-כיוון הסליל הוא $v = 1 - q$

כיוון הסליל נדרש עקב שינויים ברשת החשמל (הוספת קווים אשר גורמת לשינוי הקיבוליות ברשת).

שינוי זרם הסליל מתבצע על-ידי שינוי הלחלות החומר במעגל, קרי: שינוי מירווח בגרעין.

מבחנים בשלושה משטרי כיוון של סליל פטרסן, כדלקמן:

- כיוון עם תת-קיצוץ: $v > 0, I_L < I_C$
- כיוון תהודי (הזרם שנוצר בסליל שווה בערכו הווקטורי לזרם הקיבולי, וברשת מתקיימת תהודה של זרמים): $v = 0, I_L = I_C$
- כיוון עם על קיצוץ: $v < 0, I_L > I_C$

אם נציב את המשוואה האחרונה בזו שלפניה נקבל את היחס הבא:

$$\frac{U_0}{U_{PH}} = \sqrt{1 - \left\{ \frac{I_k}{I_{Kmax}} \right\}^2}$$

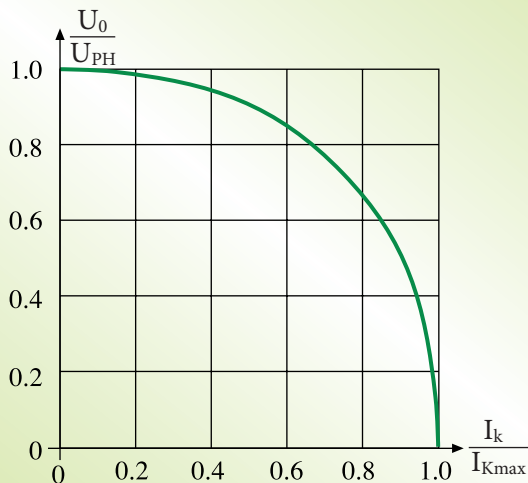
U_0 פוטנציאל נקודת האפס.

U_{PH} מתח פאזי.

I_k זרם קצר בהימצאות גג בנקודת האפס.

I_{Kmax} זרם הקצר המרבי כאשר הגג מקוצר.

איור 4: שינוי פוטנציאל נקודת האפס כתלות בזרם הקצר



ערכה של משוואה זו נע בין 0 כאשר הגג מקוצר (נקודת האפס מוארקת ישירות) לבין 1 כאשר נקודת האפס מבודדת. במילים אחרות, פוטנציאל נקודת האפס נע ממתח אפס עבור חיבור ישיר לאדמה ועד למתח פאזי עבור מערכת מבודדת.

נחשב כעת את פוטנציאל נקודת האפס בעת הקטנת זרם הקצר החד-פאזי למחצית מערכו של הזרם המרבי המתפתח במערכת המוארקת ישירות, ונקבל:

$$U_0 = U_{PH} \sqrt{1 - \left\{ \frac{I_k}{I_{Kmax}} \right\}^2} = U_{PH} \sqrt{1 - \left\{ \frac{0.5 I_{Kmax}}{I_{Kmax}} \right\}^2} = U_{PH} \sqrt{1 - 0.5^2} = 0.86 U_{PH}$$

ניתן לראות, שהקטנת זרם הקצר למחצית מערכו המרבי מגבילה את פוטנציאל נקודת האפס ל- $0.866 U_{PH}$.

נסכם את היתרונות והחסרונות של משטר זה.

יתרונות:

- מתחי יתר נמוכים יחסית.
- שיטות הגנה פשוטות יחסית.
- זרמי קצר חד-פאזיים מוגבלים.
- זול יחסית.

חסרונות:

- כיבוי עצמי בלתי-אפשרי.
- השפעה על קווי תקשורת.
- הפסקת הזנת הצרכנים במקרה של קצר חד-פאזי.

בחירת הספק של סליל פטרסן וחיבורו לרשת

הספק של סליל פטרסן נבחר בהתחשב בכיווןן על-קיוון (כ-5% יותר) ובהתפתחות הרשת בעתיד:

$$S_n = q \cdot k \cdot U_{PH} \cdot I_C$$

S_n - הספק סליל פטרסן.

q - מקדם כיווןן הסליל. ערכו 1.1.

k - מקדם המביא בחשבון את התפתחות הרשת. ערכו 1.2.

סליל פטרסן מחברים לנקודת אפס של גנרטור או שנאי.

אם מחברים את סליל פטרסן לשנאי בעל סכימת חיבור כוכב-כוכב,

אזי לשם הקטנת השפעתו בוחרים את הספק השנאי כדלקמן:

$$S_T \geq 5 \cdot S_n$$

S_T - הספק השנאי.

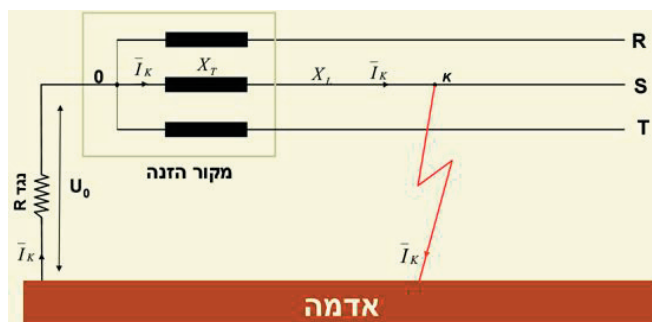
אם נקודת האפס של שנאי ההספק אינה גישה לחיבור, אזי ליצירת נקודת אפס מתקינים שנאי הארקה (במקרים בהם דרושה נקודת אפס לצורך חיבור הארקה משתמשים בשנאי המחובר בצידו הראשוני במשולש ובמוצא בחיבור זיג זג). הספק השנאי ההארקה נבחר כדלקמן:

$$S_T \geq \sqrt{S_n^2 + S^2}$$

S - הספק יתרת הצרכנים המוזנים מהשנאי.

רשת עם נקודת אפס מוארקת דרך גג

איור 3: מערכת בעלת נקודת אפס מוארקת דרך גג במצב קצר חד-פאזי



נרשום כעת מספר ביטויים אשר יסייעו לנו להבין את המתרחש במצב שכזה.

$$U_0 = I_k \cdot R \quad \text{מפל מתח על פני הגג R}$$

$$I_R = \frac{U_{PH}}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad \text{זרם הקצר החד-פאזי המתפתח הוא:}$$

$$X = X_T + X_L \quad \text{כאשר ההיגב X הוא:}$$

משילוב שתי המשוואות הראשונות נוכל לרשום שמפל המתח על פני הגג R הוא:

$$U_0 = I_k \cdot R = I_k \sqrt{\left\{ \frac{U_{PH}}{I_k} \right\}^2 - X^2}$$

כעת נוכל לרשום כי זרם הקצר החד-פאזי במערכת מוארקת ישירות לאדמה הוא זרם קצר מקסימלי וערכו

$$I_{Kmax} = \frac{U_{PH}}{X}$$

לסיכום, נציג את היתרונות והחסרונות של כל השיטות בטבלה הבאה:

מאורקת דרך נגד	מאורקת ישירות לאדמה	מאורקת דרך סליל	
כיבוי קשת אפשרי ע"י חיבור חוזר אוטומטי	כיבוי קשת אפשרי ע"י חיבור חוזר אוטומטי	כיבוי עצמי אפשרי	קצר חד-פאזי מלווה בקשת
אפשרי	אפשרי	בלתי-אפשרי	הצתה חוזרת של הקשת
בלתי-אפשרי	בלתי-אפשרי	אפשרי	חיבור ממושך לאדמה
שיטות הגנה רגילות	שיטות הגנה רגילות	שיטות הגנה מיוחדות	איבחון הקצר לאדמה
עד מתח שלוב	עד 0.8 מהמתח השלוב	עד פי $\sqrt{3}$ בכל הרשת	מתחי יתר ממושכים
-----	-----	-----	תופעות לוואי
מוגבלת	חזקה למדי	זניחה	השפעה על קווי תקשורת (לא סיבים אופטיים)
12.6KV	161KV, 400KV	24KV, 33KV	רמת מתח

רשת עם נקודת אפס מוארקת ישירות

איור 5: מערכת בעלת נקודת אפס מוארקת ישירות במצב קצר חד-פאזי



זרם הקצר החד-פאזי המתפתח ברשת מאורקת ישירות הוא:

$$I_k \approx \frac{U_{PH}}{X_T + X_L}$$

X_T - היגב השנאי.
 X_L - היגב הקו.

נסכם את היתרונות והחסרונות של משטר זה.

יתרונות:

- מתחי יתר נמוכים.
- זול, אין צורך בציווד נוסף.
- שיטות הגנה פשוטות ומהירות לסילוק המעגל הפגוע.
- הבטחת תנאי הארקה אפקטיבית, קרי: נקודת אפס מאורקת ישירות, כך שבמקרה של קצר חד-פאזי לאדמה לא יעלה מתח הפאזות התקינות מעל 80% מהמתח השלוב. כך ניתן לקבוע את רמת הבידוד הדרושה, ולכן ניתן להשיג חיסכון כספי ניכר.

חסרונות:

- הפסקת הזנת צרכנים במקרה של קצר חד-פאזי.
- השפעה על קווי תקשורת.
- כיבוי עצמי בלתי-אפשרי.