

סכנת עירור עצמי של מנוע השראה ומניעתה

בגיליון האחרון של "פאזה אחרת" (אוגוסט 2009) פירסמתי מאמר תחת הכותרת "חיבור מנועים לרשת החשמל לאור אמות-המידה בנושא". במאמר סוקרו שיטות שונות להתנעת מנועים, וביניהן שיטת "התנעה עם קבל" בליווי אזהרה של "קיצוז יתר". על אף ששיטת התנעה זו מביאה לשיפור מקדם ההספק בזמן ההתנעה של המנוע וגם אחריה במהלך פעולה רגילה של המנוע, יש לנקוט צעדי זהירות ביישום שיטה זו כדי למנוע קיצוז יתר ועירור עצמי של המנוע, דבר שיגרום לסכנת מתח גבוה. מאמר זה מתפרסם בעקבות המאמר הקודם ועל פי בקשת קוראים. הוא מבהיר בקצרה את המשמעות של עירור עצמי, את השלכותיו על מיתקן החשמל, ואת המגבלות הכרוכות ביישום השיטה.

על-פי הקשרים הללו, הזרם שזורם בכל רגע במנוע יחסי הפוך למקדם ההספק שלו.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos\phi} \approx \frac{1}{\cos\phi}$$

זרם זה מורכב משני רכיבים: הזרם האקטיבי $(I \cos\phi)$ שגורם להספק פעיל, והזרם הראקטיבי $(I \sin\phi)$ שגורם להספק ראקטיבי.

מקדם ההספק של מנוע חשמלי נמוך מאוד בריקים (ללא עומס מכני על ציר המנוע) או בהעמסה קטנה יחסית להספק (P) המנוע. מאן, שיעיקר הזרם שזורם דרך המנוע בתנאי ריקם או בהעמסה קטנה הוא הזרם הראקטיבי. למעשה, זרם ראקטיבי זה נשאר קבוע בכל גודל העמסה של המנוע.

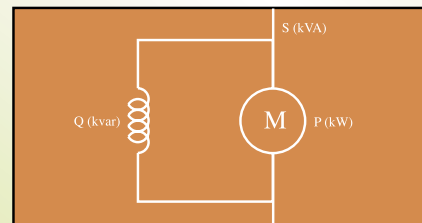
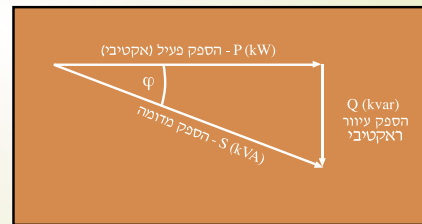
- מסיבה זו ומהיבט האנרגטי, ראוי לשמור על שני כללים:
- להפסיק מנועים שפועלים בריקים.
 - לא לבחור במנוע גדול מהדרוש.

חיבור קבלים במקביל למנוע מביא לכך שהזרם הראקטיבי אשר סופק דרך רשת אספקת החשמל למנוע מסופק כעת על-ידי הקבלים, כמתואר באיור 2.

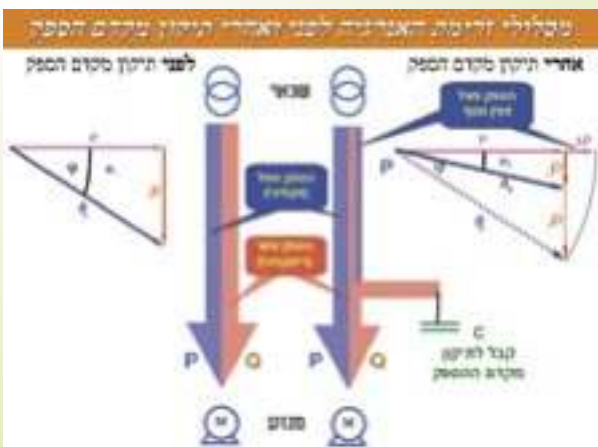
כאשר סוללת קבלים מחוברת לקצוות של מנוע השראה, חשוב לבדוק שגודל הסוללה הוא פחות מזה שעלול לגרום לעירור עצמי

הקשר בין מקדם ההספק $(\cos\phi)$ לבין ההספק האקטיבי (P) וההספק הראקטיבי (Q) של מנוע חשמלי מבוטא על-ידי "משולש ההספקים" של המנוע. כמתואר באיור 1. על-פי משולש ההספקים, ככל שההספק הראקטיבי של המנוע גדול יותר בהשוואה להספקו האקטיבי, מקדם ההספק שלו נמוך יותר. לדוגמא, במקדם הספק של 0.75, ההספק הראקטיבי הוא כ-88% מההספק האקטיבי. במקדם הספק של 0.95, ההספק הראקטיבי הוא כ-33% מההספק האקטיבי.

איור 1: משולש הספקים של מנוע חשמלי



איור 2: חיבור קבלים במקביל למנוע מקטין את ההספק הראקטיבי שמספק שנאי למנוע, ובכך נוצר הספק פעיל זמין נוסף



מקדם ההספק $(\cos\phi)$ של מיתקן חשמלי מוגדר כיחס בין ההספק הפעיל של המיתקן (P) לבין ההספק המדומה של המיתקן (S).

מקדם ההספק:

$$\cos\phi = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{(Q/P)^2 + 1}}$$

הקשרים בין המתח והזרם של מנוע תלת-פאזי לבין הספקי המנוע הם:

$$P = S \cdot \cos\phi = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi$$

$$Q = S \cdot \sin\phi = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \sin\phi = P \cdot \tan\phi$$

$$S = \frac{P}{\cos\phi} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

כאשר:

V - מתח שלוב (מתח בין המופעים).

I - זרם העומס (זרם מופע).

φ - הזווית בין המתח לזרם.

מומלץ להימנע מהתקנת סוללת קבלים נפרדת למנועי צעד, מנועים להפיכת כיוון או רבי מהירות, מנועי מעליות ועגורנים, מנועים שתוך כדי סיבוב מופעלים/מונעים מחדש

לדוגמא: לקצוות של מנוע השראה תלת-פאזי 75kW, 400V, 3000 r.p.m בעל זרם ריקם של 27A, מומלץ לא לחבר קבל שהספקו עולה על 17kvar. לנוחות הקוראים, מובא בטבלה 1 ערך מרבי של סוללת קבלים, שניתן לחבר לקצוות של מנוע כדי למנוע סכנה של עירור עצמי.

נציין, כי אף על פי שתכונות של מנוע אשר מונע מאינרציה של העומס על צירו אינן זהות לחלוטין לתכונות שלו במצב ריקם, הרי שבאופן מעשי ולמטרות נושא זה, הנחה זו סבירה.

בכל מיתקן שבו קיים מנוע שמניע עומס עם אינרציה גבוהה, חייבים מפסקים או קונטקטורים במעגל הבקרה של המנוע להינתק במהירות במקרה של הפסקת חשמל מלאה. ללא אמצעי זהירות זה, ומאחר שסוללות הקבלים האחרים שקיימים במיתקן מחוברות למעשה במקביל למנוע, סביר שיתרחש עירור עצמי ויגרום למתח גבוה מאוד.

מעגלי ההגנה של מנועים כאלה חייבים לכלול ממסר הגנה למתח יתר (overvoltage tripping relay), בתוספת מגעים לזרימה הפוכה של הספק. זאת, על מנת למנוע אספקת חשמל מהמנוע ליתר מיתקני החשמל עד אשר האנרגיה האגורה מהאינרציה המכנית תדעך. אם למנוע בעל אינרציה גבוהה מחוברת סוללת קבלים שערכה גבוה מהמומלץ לעיל, ניתן לחבר את הסוללה למעגל בקרה באמצעות מפסק או קונטקטור, שתנתק אותה בו-זמנית עם מעגל הבקרה הראשי של המנוע, כמתואר באיור 3.

סגירת הקונטקטור הראשי של המנוע מותנית בסגירת הקונטקטור של סוללת הקבלים קודם לכן.

התקנת סוללת קבלים נפרדת לכל מנוע מומלצת כאשר הספק המנוע (kW) גבוה יחסית להספק המותקן הכולל של המערכת

תופעת העירור העצמי

תופעת העירור העצמי במנועי השראה ידועה היטב זה עשרות שנים. כאשר מנוע ההשראה מתנתק ממקור הזינה שלו, והרוטור שלו ממשיך להסתובב מסיבה כלשהי והסטטור מוזן באנרגיה ראקטיבית (קיבולית), נוצר בקצוות המנוע מתח כתוצאה ממגנטיות שירית של הרוטור. תופעה זו מכונה עירור עצמי (Self-excitation). קבלי קיזוז שמחוברים במקביל לליפופי המנוע הם המקור הנפוץ ביותר לאספקת אנרגיה ראקטיבית במקרה זה.

דוגמא אופיינית לתופעת העירור העצמי היא כאשר מנוע מניע עומס מכני בעל אינרציה גבוהה, שממשיך לסובב את המנוע למשך זמן ארוך יחסית, גם לאחר הפסקת החשמל למנוע (אלא אם כן הוא נבלם באופן מלאכותי), ולקצוות שלו מחוברת סוללת קבלים. כאשר לא מחובר קבל קיזוז במקביל למנוע, "האינרציה המגנטית" (מגנטיות שירית) של הרוטור יוצרת כוח אלקטרו-מניע (emf) בליפופי הסטטור של המנוע, שהולך ודועך לאפס במשך זמן קצר יחסית, אחרי הפסקת הזינה אל המנוע. אולם, אם מחובר קבל לסטטור, הרי שהמנוע מוזן מאנרגיה ראקטיבית של הקבל, שמזרימה זרם קיבולי בליפופי הסטטור. זרם זה יוצר שדה מגנטי מסתובב ברוטור, בדיוק לאורך אותו הציר ובאותו כיוון של המגנטיות השירית של הרוטור. כתוצאה מכך, השטף המגנטי של הרוטור גדל, זרם הסטטור גדל, והמתח בקצוות המנוע עולה, לעיתים עד לרמות מסוכנות מאוד. זו אחת הסיבות לכך שגנרטורים לזרם חילופין אינם פועלים באופן תקין עקב מקדם הספק מקדים, היוצר נטייה ספונטנית ולא מבוקרת של עירור עצמי.

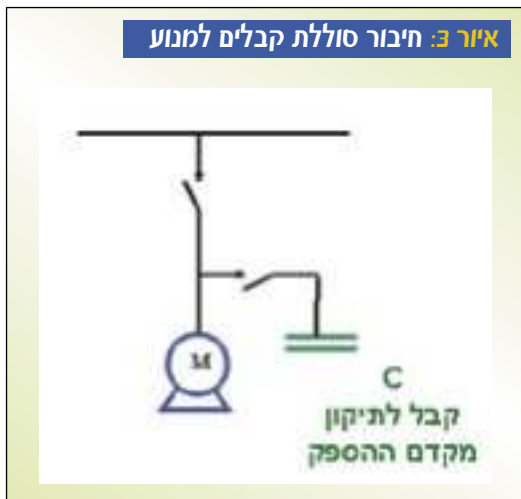
מניעת עירור עצמי של מנוע השראה

כדי למנוע עירור עצמי של המנוע, מומלץ כי ההספק הראקטיבי של סוללת קבלים לא יעלה על ערך מרבי, שיחושב לפי הנוסחה הבאה:

$$Q_c \leq 0.9 \times I_o \times U_n \times \sqrt{3}$$

כאשר:

I_o : זרם ריקם (ללא העמסה) של המנוע.
 U_n : מתח שלוב (בין הפאזות) נומינלי של המנוע.



טבלה 1: ערכים מרביים של קבל (kvar) שמותר לחבר לקצוות של מנוע כדי למנוע עירור עצמי

מנוע תלת-פאזי 230/400V					
Kvar שמותר להתקין				הספק נומינלי	
מהירות (r.p.m)				hp	kW
3000	1500	1000	750		
6	8	9	10	30	22
7.5	10	11	12.5	40	30
9	11	12.5	16	50	37
11	13	14	17	60	45
13	17	18	21	75	55
17	22	25	28	100	75
20	25	27	30	125	90
24	29	33	37	150	110
31	36	38	43	180	132
35	41	44	52	218	160
43	47	53	61	274	200
52	57	63	71	340	250
57	63	70	79	380	280
67	76	86	98	482	355
78	82	97	106	544	400
87	93	107	117	610	540