

”עושים חשבון”

הספקים תלת-פאזיים פי שלושה או פי שורש שלוש?

לאחר חישוב, לפי נוסחה (6) לעיל, ערך ההספק התלת-פאזי הוא:

$$P_{ph} = 3 \cdot 2000 = 6000 \text{ Watt}$$

ערך ההספק המדומה החד-פאזי המתקבל, על פי נוסחה (4) לעיל, הוא:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = 0.8 ; S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{2000}{0.8} = 2500 \text{ VA}$$

לכן, ערך ההספק המדומה התלת-פאזי הוא:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P_{\text{תלתפאזי}}}{S_{\text{תלתפאזי}}} = 0.8 \text{ (7)} ; S_{\text{תלתפאזי}} = \frac{P_{\text{תלתפאזי}}}{\cos \varphi} = \frac{6000}{0.8} = 7500 \text{ VA}$$

או, על פי נוסחה (6) לעיל:

$$S_{\text{תלתפאזי}} = 3 \cdot S_{\text{פאזי}} = 3 \cdot 2500 = 7500 \text{ VA}$$

כשאנו באים לחשב את זרם ההולכה בקו, עלינו להגדיר אם אנו רוצים למצוא זרם פאזי $I_{ph} [A]$ או זרם שלוב $I_L [A]$ שלוב - המכונה גם זרם בין-פאזי או זרם קווי (Line), וגם זרם הרשת.

הזרם הפאזי הוא זה שזורם בכל פאזה בין הדקי הרכיב הפאזי, בין הפאזה לבין נקודת ה-N.

כך גם מבדילים בין מתח פאזי $U_{ph} [V]$ למתח השלוב $U_L [V]$ ברשת הולכת החשמל.

המתח הפאזי הוא הפרש הפוטנציאל בכל פאזה בין הדקי הרכיב הפאזי, בין הפאזה לנקודת ה-N.

המתח הבין-פאזי או המתח השלוב הוא הפרש הפוטנציאל בין כל שתי פאזות.

אם מדדנו מתח פאזי אפקטיבי 230 וולט בהדקי המנוע הפאזי של דוגמא 2, ניתן לחשב את הזרם האפקטיבי במנוע לפי הנוסחה להלן:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ Watt (9)} ; I_{ph} = \frac{P_{ph}}{U_{ph} \cdot \cos \varphi} = \frac{2000}{230 \cdot 0.8} = 10.87 \text{ A}$$

זרם זה הוא זרם אפקטיבי פאזי, או בדרך אחרת, באמצעות ההספק התלת-פאזי:

$$S_{\text{תלתפאזי}} = 3 \cdot S_{ph} = 3 \cdot U_{ph} \cdot I_{ph} \text{ VA (10)} ; I_{ph} = \frac{S_{\text{תלתפאזי}}}{3 \cdot U_{ph}} = \frac{7500}{3 \cdot 230} = 10.87 \text{ A}$$

נשים לב, שחישוב זה אפשרי מפני שמדובר בעומס תלת-פאזי סימטרי; כלומר, אותה עכבה או אימפדנס מחוברת בכל פאזה. כמו כן, מדובר ברשת מאוזנת שמתחי הפאזות והזרמי הפאזות בה זהים, ואותה זווית φ נמדדת בין המתח לזרם.

כשאנו באים להתייחס לערכים השלובים או בין-פאזיים של מעגל תלת-פאזי זרם חילופין, עלינו לדעת מהי תצורת החיבור של רכיבי העומס התלת-פאזי. קיימות שתי תצורות - משולש (Δ) או כוכב (Y). בתצורת משולש, רכיבי כל פאזה מחוברים ביניהם כשהדק אחד של רכיב פאזי מחובר להדק של שכנו. באיור 3 מוצגים המתחים והזרמים השלובים בתצורת משולש. מכך נובע, שהמתח הבין-פאזי זהה למתח הפאזי, בעוד הזרם השלוב הוא

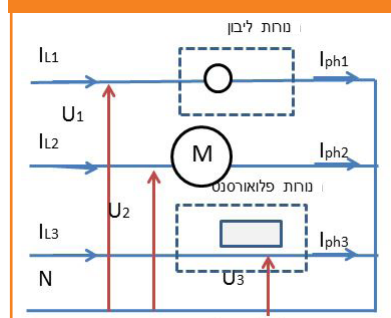
הספק ידוע כמכפלת מתח בזרם, הוא מבטא את צריכת ההתקן החשמלי. בזרם ישר, זהו פשוטו כמשמעו, אך בזרם חילופין עלינו להתייחס גם להספק רגעי ולהספק ממוצע.

במאמר זה נעסוק במעגלים בהם זרם חילופין סינוסי תלת-פאזי. באמצעות דוגמאות נאפיין את סוג המתח והזרם, וניתן תשובה לשאלה: האם להכפיל ב-3 או בשורש 3 את מכפלת הזוג מתח-זרם כדי לקבל את ההספק התלת-פאזי הנדרש?

דוגמא 1: נניח עומס תלת-פאזי לא סימטרי כמתואר באיור 1. בפאזה אחת מותקנות 10 נורות ליבון בעלות הספק של 100

ואט. בפאזה שנייה מותקן מנוע בעל הספק חשמלי 2,000 ואט ומקדם הספק 0.8. בפאזה שלישית מותקנות 20 נורות פלואורסנטיות בהספק 50 ואט ומקדם הספק 0.5 כל אחת. יש לחשב את ההספקים התלת-פאזיים - הפעיל וההיגבי.

איור 1: עומס תלת-פאזי לא סימטרי



לאחר חישוב, ערך ההספק הפאזי בכל ענף הוא:

$$P1 = 10 \cdot 100 = 1000 \text{ Watt}; Q1 = 0 \text{ VAR (1)}$$

$$P2 = 2000 \text{ Watt}; Q2 = P2 \cdot \tan \varphi = 1500 \text{ VAR (2)}$$

$$P3 = 20 \cdot 50 = 1000 \text{ Watt}; Q3 = P3 \cdot \tan \varphi = 1750 \text{ VAR (3)}$$

לכן, ערך ההספק התלת-פאזי הפעיל הוא:

$$P_{ph} = 1500 + 2000 + 1000 = 4500 \text{ Watt (4)}$$

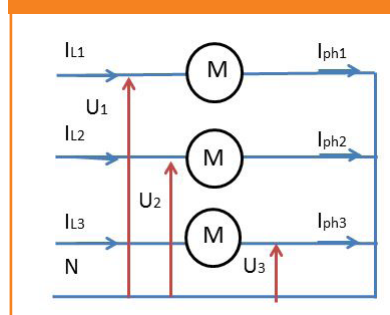
וערך ההספק התלת-פאזי ההיגבי הוא:

$$Q_{ph} = 0 + 1500 + 1750 = 3250 \text{ VAR (5)}$$

אם מדובר בעומס תלת-פאזי סימטרי, כי אז ניתן לפשט את המשוואה, ולחשב הספק תלת-פאזי φ פי 3 מההספק הפאזי של אחד הענפים:

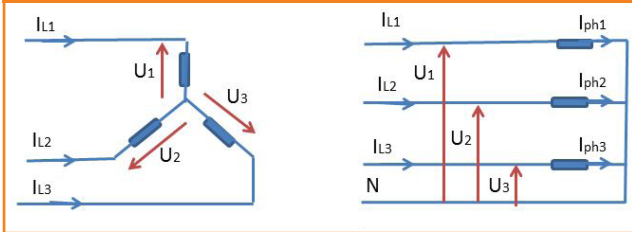
$$P_{ph} = 3 P_{\text{פאזי}} [\text{Watt}]; Q_{ph} = 3 Q_{\text{פאזי}} [\text{VAR}]; S_{ph} = 3 S_{\text{פאזי}} [\text{VA}] \text{ (6)}$$

איור 2: עומס תלת-פאזי סימטרי



דוגמא 2: נניח עומס תלת-פאזי סימטרי כמתואר באיור 2. בכל פאזה מותקן מנוע בעל הספק חשמלי של 2,000 ואט ומקדם הספק 0.8. יש לחשב את ההספק התלת-פאזי האפקטיבי ואת ההספק המדומה התלת-פאזי.

איור 4: תצורת כוכב



כעת נבדוק איך משפיעה תצורת חיבור העומס על ביטויי ההספק התלת-פאזי, בתלות בערכים השלובים של המתח והזרם. בתצורת משולש:

$$S_{\text{תלתפאזי}} = 3 \cdot S_{\text{פאזי}} \quad VA = 3 \cdot U_{ph} \cdot I_{ph} = 3 \cdot U_L \cdot \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L [VA]$$

בתצורת כוכב:

$$S_{\text{תלתפאזי}} = 3 \cdot S_{\text{פאזי}} \quad VA = 3 \cdot U_{ph} \cdot I_{ph} = 3 \cdot \frac{U_L}{\sqrt{3}} \cdot I_L = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L [VA]$$

הפתעה! הביטוי של ההספק התלת-פאזי בתלות בערכים השלובים של מתח וזרם הוא אותו ביטוי, ולא משנה באיזו תצורה חיברנו את העומס!

$$S_{\text{תלתפאזי}} = 3 \cdot S_{\text{פאזי}} \quad VA = 3 \cdot U_{ph} \cdot I_{ph} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L [VA]$$

נחזור לדוגמא 2 לעיל ונבין טוב יותר. ניתן להיעזר באיור 4, בו המתחים U_1, U_2, U_3 הם מתחים פאזיים בכל ענף. הם זהים ומסומנים U_{ph} .

נניח שהעומס התלת-פאזי הסימטרי מחובר בתצורת כוכב, ונחשב מתח אפקטיבי בין-פאזי. כידוע, בתצורת חיבור כוכב, המתח השלוב הוא פי שורש 3 מהמתח הפאזי.

$$U_L = U_{phY} \cdot \sqrt{3} = 230 \cdot \sqrt{3} = 398.4 V$$

מכאן ערך הזרם השלוב:

$$S_{\text{תלתפאזי}} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L [VA]; \quad I_L = \frac{S_{\text{תלתפאזי}}}{\sqrt{3} \cdot U_L} = \frac{7500}{\sqrt{3} \cdot 398.4} = 10.87 A$$

כמו כן, ידוע שבתצורת כוכב, זרם השלוב הוא זרם הפאזי, ולכן:

$$I_{phY} = I_L = 10.87 A$$

דוגמא 3: נמצא את המתח הפאזי, ונחשב זרמי שלוב ופאזי שנמשך על-ידי עומס תלת-פאזי סימטרי בעל הספק תלת-פאזי $VA_{10,000}$ המחובר לרשת בתצורת משולש, והוא מוזן מהרשת במתח אפקטיבי שלוב 400 וולט. ניתן להיעזר באיור 3.

מכאן, שערך הזרם השלוב

$$S_{\text{תלתפאזי}} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L [VA]; \quad I_L = \frac{S_{\text{תלתפאזי}}}{\sqrt{3} \cdot U_L} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 14.43 A$$

ידוע שבתצורת משולש, המתח השלוב זהה למתח הפאזי $U_{ph\Delta} = U_L = 400 V$, והזרם השלוב הוא פי שורש 3 מהזרם הפאזי, ולכן ערך הזרם הפאזי:

$$I_L = I_{ph\Delta} \cdot \sqrt{3}; \quad I_{ph\Delta} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{14.43}{\sqrt{3}} = 8.3 A$$

בהמשך לדוגמאות אפשר לסכם ולהפיק את הלקחים הבאים:

- חשוב להגדיר את סוג הפרמטר הנמדד - מתח, זרם - האם הוא פאזי או שלוב?
- בהתאם לנתונים הנמדדים, חשוב לשמור על אחידות הביטויים.
- אם נבחר לעסוק בערכים שלובים, אזי ביטוי ההספק יהיה פי שורש 3.
- אם נבחר לעסוק בערכים פאזיים, אזי ביטוי ההספק יהיה פי 3.
- בארץ, מתח נמוך 230 וולט מבטא מתח אפקטיבי פאזי - בתנאי שהצרכן מחובר בכוכב.
- בארץ, מתח נמוך 400 וולט מבטא מתח אפקטיבי שלוב.

רקע: במעגל בו זרם חילופין סינוסי בעל מופע אחד או חד-פאזי עלינו להכיר שלושה סוגים של הספקים ממוצעים בתלות ברכיבי המעגל:

- ההספק הממשי או האקטיבי (active), המסומן באות P , אשר נגרם מרכיבים אהמיים. הספק זה נמדד בוואט (Watt).

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ (Watt)}$$

- ההספק העיוור או ההיגבי או הריאקטיבי (reactive), המסומן באות Q , אשר נגרם מרכיבים לא-ליניאריים שיוצרים שדה חשמלי - כמו קבל או מגנטי - כמו סליל. הספק זה נמדד בוואר (Var).

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ (Var)}$$

- ההספק המדומה או מוכלל (apparent), שהוא השקול של שני ההספקים הללו, והוא המכפלה של הזרם והמתח במעגל.

$$S = U \cdot I \text{ (VA)}$$

- מקדם ההספק, או גורם ההספק, הוא $\cos \varphi$, אשר מייצג את היחס בין ההספק האקטיבי לבין ההספק המדומה. בעזרת הצגת ההספקים במשולש ישר זווית ומשפט פיתגורס ניתן להציג את הקשר בין כל הגדלים הללו.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

במעגלים תלת-פאזיים ניתן להגדיר הספק תלת-פאזי כסיכום אלגברי של שלושת ההספקים הפאזיים על-פי משפט בושרו (Boucherot theorem).

$$P = \sum_{i=1}^3 P_i \text{ Watt}; \quad Q = \sum_{i=1}^3 Q_i \text{ [Var]}; \quad S = \sum_{i=1}^3 S_i \text{ [VA]}$$

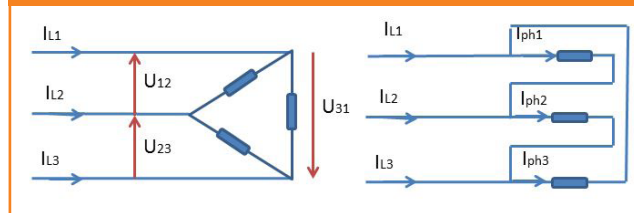
(תלתפאזי) (תלתפאזי) (תלתפאזי)

נציין שבנוסחאות לעיל, כל ערכי הזרם והמתח הם ערכים אפקטיביים, ונזכיר שערך אפקטיבי או יעיל של זרם מתקבל על-ידי החלוקה בשורש 2 של ערך המרבי של זרם חילופין בצורת גל סינוסי. $I = I_{eff} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} [A]$ והוא מבטא את

השורש הריבועי הממוצע של הערך או R.M.S.

$$U = U_{eff} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} [V] \text{ כך גם למתח:}$$

איור 3: תצורת משולש



מכפלת הזרם הפאזי בשורש 3. באיור 3, המתחים U_{12}, U_{23}, U_{31} הם מתחים שלובים.

בתצורת כוכב, רכיבי כל פאזה משתפים הדק אחד, והוא נקודת ה-N. באיור 4 מוצגים מתחים וזרמים פאזיים בתצורת כוכב. מכך נובע, שהזרם השלוב זהה לזרם הפאזי, בעוד המתח השלוב הוא מכפלת המתח הפאזי בשורש 3. באיור 4, המתחים U_1, U_2, U_3 הם מתחים פאזיים.