

מדיניות שמירת רזרבה סובבת במערכות הספק

מחבר: כרמון דוד M.sc

1. תקציר

משק החשמל בעולם בכלל ובמדינת ישראל בפרט הינו דינמי ומשתנה מרגע לרגע. מדינת ישראל הינה אי חשמלי שאינו מחובר לשכנותיה ומערכת החשמל בה קטנה יחסית. כל שינוי מצד ספקי או צרכני האנרגיה מורגש ומחייב תגובה מיידית. אי עמידה בדרישה זו עלול לגרום לחריגות בערכי הפרמטרים הקבועים ע"פ תקנים, ביציבותה של מערכת החשמל ואף לפגיעה באספקת החשמל הסדירה.

לצורך תפעול שוטף של מערכת חשמל, מקובל לשמור על רזרבות (יכולת ייצור נוספת) מסוגים שונים, שיתנו מענה לשינויים בצריכת האנרגיה בשגרה ולשינויים שייגרמו עקב הפרעות במערכת החשמל.

כאשר מתרחשת הפרעת תדר, אם הרזרבה הסובבת אינה מספקת, תדר המערכת יתדרדר ועלול לפגוע ביציבותה ובאספקת החשמל לצרכניה.

בעשור האחרון חלו שינויים משמעותיים במשק החשמל בישראל בכלל ובמערך הייצור בפרט. לאור שינויים אלו קיים צורך בבדיקה וחידוש של הכללים, סיווג ושיטות החישוב לשמירת הרזרבה המתאימה במערכת החשמל.

מאמר זה הינו חלק מעבודת מחקר (תזה) שבוצעה במסגרת לימודי הכותב לתואר שני בחשמל. מטרת העבודה הייתה לבדוק את השפעת גודל הרזרבה הסובבת ואופן חלוקתה בין יחידות הייצור השונות על התנהגות מערכת החשמל בזמן הפרעת תדר.

בהתאם לתוצאות שהתקבלו בעבודה זו, גובשו המלצות לחישוב ושמירת הרזרבה הסובבת במערכת החשמל והעמסת יחידות הייצור השונות בהתאם. אופן התפעול המוצע ישפר את תגובת מערכת החשמל בזמן הפרעת תדר ויקטין או ימנע השלת עומסים.

החוקר משמש כמפקח ארצי ביחידת ניהול המערכת בחברת החשמל לישראל. במסגרת עבודתו הינו אחראי על ניהול משק החשמל בזמן אמת, הפעלת יחידות הייצור במערכת החשמל והעמסתן, בטיפול בהפרעות ותקלות המתרחשות במערך הייצור ובמערכת ההולכה. במסגרת זו אחראי לאספקת החשמל בגבולות תדר תקנים ולשמירה על רזרבה מתאימה בהתאם להוראות התפעול.

2. מבוא

משק החשמל בעולם בכלל ובמדינת ישראל בפרט הינו דינמי ומשתנה מרגע לרגע. האנרגיה החשמלית מועברת מספקי האנרגיה לצרכני האנרגיה השונים דרך מערכת תמסורת.

אנרגיה חשמלית הינה מוצר בו תהליך הייצור, בקרת האיכות והשיווק נעשים בו זמנית. גודל השוק מוגדר ע"י צריכה מיידית ומשתנה מרגע לרגע, מאופיין בשינויים יומיים ועונתיים, תלוי במזג אויר וגורמים חיצוניים אחרים.

כל צרכן או ספק אנרגיה המתחבר או מתנתק ממערכת החשמל גורם לשינוי המחייב התאמה מחדש למצב שנוצר. ככל שמערכת החשמל גדולה יותר, שינוי שכזה יגרום לתנודה קטנה יותר ותגובת המערכת תתחלק בין כל הספקים והעומסים המחוברים אליה באותו הרגע.

מדינת ישראל הינה אי חשמלי שאינו מחובר לשכנותיה ומערכת החשמל בה קטנה יחסית. משום כך כל שינוי מורגש ומחייב תגובה מיידית. אי עמידה בדרישה זו עלול לגרום לחריגות בערכי הפרמטרים הקבועים ע"פ תקנים, ביציבותה של מערכת החשמל ואף לפגיעה באספקת החשמל הסדירה.

לצורך תפעול שוטף של מערכת החשמל, מקובל לשמור על רזרבות (יכולת ייצור נוספת) מסוגים שונים שיתנו מענה לשינויים: רזרבה סובבת (מיידית), רזרבה מהירה (חמה) ורזרבה איטית (קרה).

רזרבה סובבת מוגדרת כהפרש בין סה"כ ההספק הזמין ביחידות הייצור המחוברות למערכת ההספק לבין סה"כ ההספקים שיחידות הייצור מספקות באותו הרגע. ניתן לחלקה לרזרבה מיידית שמקורה באנרגיה האגורה במערכות תחנות הכח ומשמשת ככלי לתגובה ברגע בו מתרחשת הפרעה כלשהיא, לרזרבה סובבת שמקורה ביכולת היחידה לספק אנרגיה בתלות במתקני עזר הפועלים (משאבות מים, מדלקות, מטחנות פחם ועוד). נדון לצורך דוגמא באירוע של הפסקת של יחידת ייצור. באירוע שכזה, האיזון הקיים בשגרה בין ייצור האנרגיה החשמלית לבין צריכתה מופר, היחידות שנשארו מסונכרנות למערכת נושאות בעומס גדול יותר ולכן צריהם מאיטים. התופעה גורמת לירידת התדר. האינרציה הקיימת במערכת האגורה באנרגיה הקינטית של הצירים המסתובבים מתנגדת לשינוי זה. מערכות הבקרה (הראשונית) של אותן היחידות המסונכרנות למערכת ההספק מגיבות והן פעולות בכדי להתמודד עם העומס החדש. אם אותן יחידות מצליחות לשקם את התדר, כלומר, תאוצת כל הצירים המסתובבים של כל יחידות הייצור המחוברות לרשת נעצרה, התדר יתייצב על ערך חדש (נמוך מהמצב הנומינלי - הרצוי). בשלב זה הבקרה המשנית (המפעיל המקומי או יחידת ניהול המערכת) תדרוש עלייה נוספת בהספק המיוצר בכדי לחזור למצב תפעולי רצוי.

סוגים נוספים של רזרבה כוללים בתוכם גם יחידות ייצור שיכולות להיות מונעות ומסונכרנות למערכת תוך פרק זמן מסוים. במידת הצורך, יונעו יחידות ייצור נוספות, שהן חלק מהרזרבה המהירה, בכדי לשקם את תדר המערכת והיקף הרזרבה הסובבת.

כאשר הרזרבה הסובבת אינה מספקת, תדר המערכת ממשיך להתדרדר, מערכות השלת עומסים יפעלו בכדי להשיב את האיזון שהופר בין ייצור האנרגיה החשמלית לצריכתה.

היקף הרזרבה הסובבת הדרושה למערכת חשמל מסוימת תלוי במספר גורמים ביניהם: גודלה של מערכת החשמל, סוגם ומצבם התפעולי של יחידות הייצור המחוברות אליה, אופי הצרכנות המחוברת אליה והתדר המינימלי הרצוי במערכת.

לחלוקת הרזרבה הסובבת בין יחידות הייצור ישנה חשיבות רבה שכן תגובתן של היחידות אינה זהה במצב הפרעתי ותלויה בסוג היחידה, מצבה התפעולי וגורמים נוספים.

2.1. תגובת יחידות הייצור לשינוי תדר:

במצב מתמיד, הקשר בין שינוי ההספק האקטיבי של כל יחידת ייצור ושינוי התדר מאופיין ע"י המשוואה:

$$\frac{\Delta f}{f_n} = -\rho_i \frac{\Delta P_{mi}}{P_{ni}} ; \frac{\Delta P_{mi}}{P_{ni}} = -K_i \frac{\Delta f}{f_n} \quad (1)$$

ΔP_{mi} – שינוי ההספק המכני ביחידת ייצור i ; f_n – התדר הנקוב; Δf – תדר שינוי המערכת
 P_{ni} – ההספק המכני הנקוב ביחידת ייצור i

K_i ; ρ – מקדמים המבטאים את היחס בין שינוי המהירות לשינוי ההספק ביחידה i (droop)

במצב מתמיד, כל הגנראטורים המחוברים למערכת החשמל עובדים בסנכרון. כל שינוי בהספק המערכת, ניתן לחשב כסכום שינוי ההספק של כל הגנראטורים:

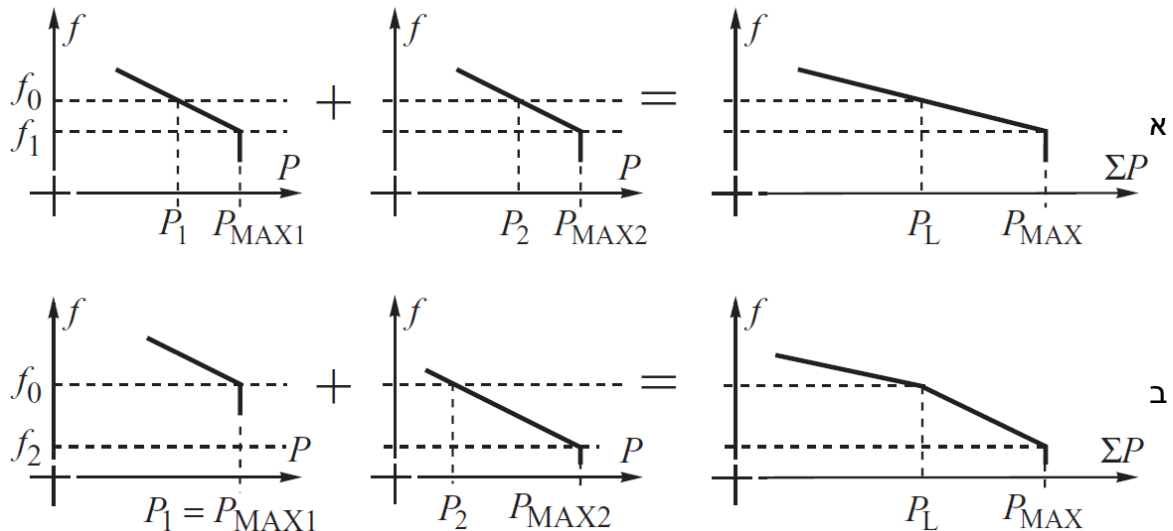
$$\Delta P_T = \sum_{i=1}^{N_G} \Delta P_{mi} = -\frac{\Delta f}{f_n} \sum_{i=1}^{N_G} K_i \cdot \Delta P_{ni} = -\Delta f \sum_{i=1}^{N_G} \frac{K_i \cdot \Delta P_{ni}}{f_n} \quad (2)$$

N_G – מספר הגנראטורים המחוברים למערכת

כאשר יחידת יצור עובדת בהספקה המרבי, היא לא תוכל להגיב לשינוי התדר בתוספת הספק. במצב כזה $k=0$; $\rho=\infty$. אם כך, תגובת המערכת תלויה ביחידות יצור שאינן עובדות בהספקן המרבי.

לגודל הרזרבה הסובבת וחלוקתה בין היחידות הפועלות במערכת חשיבות גבוהה והיא תקבע את תגובתה של המערכת לשינויים.

באיור מס' 1 מתוארת מערכת בשני מצבי עבודה שונים. במערכת א' מחולק ההספק באופן שווה בין שתי יחידות יצור שאינן עובדות בעומס מלא ואילו במערכת ב' היחידות פועלות בעומסים שונים.



איור מס' 1: השפעת מיקום רזרבה סובבת במערכת [1]

ניתן לראות כי תגובת המערכת במקרה א' תהיה לינארית עד להספק המירבי ובמקרה ב' לא לינארית ומורכבת משני אזורים בעלי שיפוע שונה. תוצאה זו התקבלה בשל כך שבמקרה א' הרזרבה הסובבת חולקה באופן שווה בין שתי היחידות. עם ירידת התדר, שתי היחידות הגיבו יחדיו עד הגעתן לעומס המירבי עבור שתיהן $k \neq 0$. במקרה ב', לעומת זאת, הרזרבה לא חולקה בצורה שווה. בחלק הראשון של הגרף, שתי היחידות הגיבו עד הגעת יחידה 1 לעומס המרבי שלה. במצב זה $k_1=0$, $k_2 \neq 0$ ומכאן ואילך רק יחידה 2 מגיבה לשינוי ולכן שיפוע הגרף גדול יותר.

במערכות חשמל מספר יחידות היצור הפועלות גדול, הן מסוגים שונים ובעלות מאפיינים שונים. חלקן עובדות בעומס מרבי וחלקן בעומס נמוך מהמרבי, חלוקת העומס בין היחידות נובעת בד"כ משיקולים כלכליים. הרזרבה הסובבת מחולקת ביניהן בצורה לא שווה ולכן הגרף שיתאר את תגובת המערכת יהיה לא לינארי ומורכב מסכום כל תגובות היחידות המסונכרונות.

2.2. אינרציה במערכת החשמל:

היקף גדול של גנרטורים סינכרוניים, אקוויולנטי לקבוע אינרציה סיבובית $[H]$ גבוה של מערכת החשמל. ככל שהאינרציה הסיבובית, קרי האנרגיה הקינטית האגורה במערכת החשמל גבוהה יותר, כך דינמיקת התדר ברשת החשמל תהיה איטית ומרוסנת יותר. במצב של הפרעה ברשת הגורם לחוסר איזון הספקים, סטיית התדר מהתדר הנומינלי תהיה קטנה יותר, קצב שינוי התדר יהיה איטי יותר.

מערכות חשמל מבודדות מאופיינות באנרציה מערכתית נמוכה בשל מספר גנרטורים קטן. התדר במערכות חשמל כאלו רגיש יותר לאיזון בין ההספק המיוצר לבין ההספק הכולל של העומס מאשר מערכות חשמל גדולות, המחוברות ביניהן.

שוק האנרגיה הסולארית, במיוחד של PV (PhotoVoltaics) המחברים לרשת החשמל, גדל במהירות במהלך השנים האחרונות. גידול השנתי הגיע לכ-40% בעשור האחרון וצפוי להימשך [2].

התחברות כמות גדולה של מערכות PV למערכת החשמל עלולה להשפיע על יציבותה של המערכת. ככל שיותקנו ויתחברו יותר מערכות כאלו, כמות יחידות הייצור הקונבנציונאליות תרד ועקב כך תקטן האינרציה הסיבובית האגורה ביחידות אלו. בזמן הפרעת תדר, תגובת מערכת החשמל תפחת ושיקום התדר יארך זמן רב יותר. בנוסף לכך, בזמן הפרעת תדר, מתקבלות תנודות גדולות יותר בזווית הפישוק של הגנרטורים ויציבות המעבר תהיה נמוכה יותר [3].

2.3. דרישות לרזרבה סובבת:

בשל השוני הקיים בין מערכות חשמל שונות, הן מבחינת גודלן והן מבחינת סוגי הטכנולוגיה, קיום או אי קיום של חיבורים למערכות שכנות, נקבעו כללים שונים לשמירה על רזרבה סובבת.

במערכת החשמל של מדינת ישראל, נשמרים 3 סוגי רזרבה[4]:

1. רזרבה מיידיית של 200MW - תגובת מערכת החשמל תוך 30 שניות. תגובה זו מתקבלת הודות לבקרה הראשונית של היחידות המסונכרנות.
2. רזרבה מהירה של 600MW - תגובת מערכת החשמל תוך 10 דקות. תגובה זו מתקבלת הודות לבקרה הראשונית ולבקרה המשנית של יחידות הייצור המסונכרנות, בתוספת יחידות הייצור המסוגלות להסתנכרן תוך זמן קצר.
3. רזרבה איטית של 1100MW - תגובת מערכת החשמל תוך 30 דקות. תגובה זו מתקבלת הודות לבקרה הראשונית ולבקרה המשנית של יחידות הייצור המסונכרנות, בתוספת יחידות הייצור המסוגלות להסתנכרן בזמן זה.

מדיניות שמירת הרזרבה מוכתבת משיקולים כלכליים, הגבלות ספקי הגז הטבעי והנחיות איכות הסביבה.

יחידת ניהול המערכת משתמשת בהגדרות רזרבה אלו. השיטות לחישוב פותחו בתקופה בה ייצור החשמל בארץ התבסס, בעיקר, על הפעלת יחידות ייצור קיטוריות בתוספת יחסית קטנה של יחידות ייצור מונעות ע"י בטורבינות גז. בעשור האחרון חלו שינויים משמעותיים המשק החשמל בכלל ובמערך הייצור בפרט:

- שיא הביקוש המשקי עלה מ-9,450 מגו"ט בשנת 2006 ל-12,920 מגו"ט בשנת 2017.
- היכולת המותקנת המשקית עלתה באותה התקופה מ-10,920 מגו"ט לכ-17,800 מגו"ט.
- תוספת כושר ייצור זו באה לידי ביטוי בהוספת יחידות ייצור בטכנולוגיית מחז"מ, עם מאפייני התנהגות שונים מאלה של יחידות הייצור הוותיקות.
- פיתוח מאגרי הגז הפך את יחידות הייצור הללו לגורמים המשמעותיים ביותר לייצור החשמל בארץ.
- בשנים האחרונות הלך וגדל פיתוח ייצור החשמל במתקני אנרגיות מתחדשות, בעיקר במתקני PV. ההספק המיוצר בהם כיום מגיע לכ-800 מגו"ט ובעתיד הוא יגדל עוד יותר. יחידות ייצור מסוג אנרגיות מתחדשות הן בעלות מאפייני התנהגות תפעולית שונים מהיחידות הקונבנציונליות ובנוסף הן מושפעות מתופעות מזג אוויר הגורמות לשינויים מהירים ולפרקי זמן קצרים בהספקם.

בעקבות השינויים הנ"ל יש צורך בבדיקה וחינוש של הכללים, סיווג ושיטות החישוב לשמירת הרזרבה המתאימה במערכת החשמל.

3. ביצוע המחקר

מטרת עבודת המחקר היתה: בדיקת השפעת גודל הרזרבה המיידיית וחלוקתה בין יחידות הייצור הפועלות על התנהגות התדר במערכת החשמל בזמן הופעת אירועים הפרעתיים.

3.1. תוכנית המחקר:

המחקר התבצע בשלבים הבאים:

- ניתוח סטטיסטי של תגובת יחידות היצור השונות בזמן הפרעות תדר במערכת החשמל של מדינת ישראל:
לצורך כך נבנה ע"י החוקר בסיס נתונים הכולל כ-100 הפרעות תדר שנבעו כתוצאה מתקלה ביחידת יצור. על סמך בסיס נתונים זה, נבדקו תגובותיהן של יחידות היצור השונות הפועלות במערכת החשמל ויוסקו מסקנות לגבי אופי הפעלתן לקבלת תגובה לתדר מיטבית. שימוש בתוכנת הדמיה:
- לצורך ניתוח תגובת יחידות היצור השונות בזמן הפרעות תדר במערכת החשמל של מדינת ישראל נבנו מודלים לכלל יחידות הייצור ולמערכת החשמל בתוכנת הדמיה. באמצעות התוכנה, נבדקה תגובת מערכת החשמל באופני העמסה שונים של יחידות היצור ובעומסי מערכת שונים. על סמך התוצאות, גובשו מסקנות לחלוקת הרזרבה הסובבת בין יחידות היצור על מנת לקבל תגובת מערכת מיטבית להפרעת תדר. חישוב עלויות:
- לצורך חישוב עלות הרזרבה הסובבת, בוצעו הרצות בתוכנת Economic Dispatch אשר בדקו את המשמעות הכלכלית של ההמלצות והמסקנות לאופן חלוקת הרזרבה שהתקבלו בשלבים הקודמים. התבצעה השוואה בין עלויות אלו לעלויות הנגרמות עקב השלת עומסים במקרים בהם הרזרבה אינה מספקת להתמודדות עם הפרעת התדר. מסקנות והמלצות:
- לאחר הניתוח הסטטיסטי, ההדמיות וחישוב העלויות, הוסקו מסקנות וגובשו המלצות הנוגעות לאופן חישוב הרזרבה הסובבת, חלוקתה בין יחידות היצור הפועלות על מנת להשיג תגובת מערכת חשמל מיטבית כך שתגדיל את יציבותה ותקטין את הצורך בהשלת עומסים בזמן הפרעת תדר.

3.2. ניתוח סטטיסטי של תגובת יחידות היצור השונות בזמן הפרעות תדר:

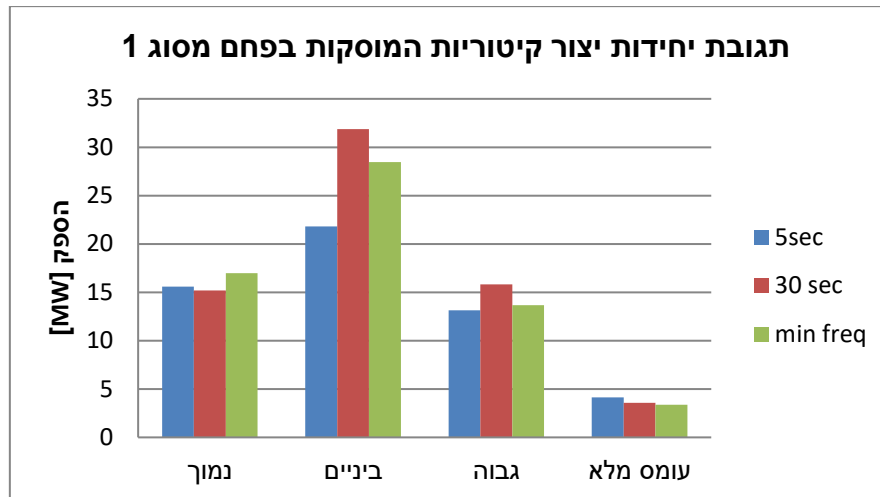
הנתונים סווגו ע"פ טכנולוגיות יצור: יחידות יצור קיטוריות המוסקות בפחם (3 סוגי טכנולוגיות), יחידות יצור קיטוריות המוסקות בגז (2 סוגים), יחידות יצור מסוג טורבינות גז - ט"ג (3 סוגים), יחידות יצור מסוג מחזור משולב - מחז"מ (טורבינת גז וטורבינה קיטורית) (3 סוגים).

תגובות יחידות הייצור (ב-MW) מוצגות בתחומי עבודה (עומס חשמלי) שונים, בתלות בהיקף עבודת מתקני העזר (משאבות מי הזנה, מדלקות בדוד, מטחנות ועוד), כעבור 5 שניות, 30 שניות ובזמן בו התדר הגיע לערכו המינימלי. להלן דוגמאות לתוצאות שהתקבלו.

3.2.1. תגובות יחידות יצור קיטוריות המוסקות בפחם

באיור 2 מוצגות תגובות יחידות יצור קיטוריות המוסקות בפחם בטווח עומסים (באחוזים מהעומס הנקוב):

עומס נמוך-עד 70%, עומס ביניים-70%-90%, עומס גבוה-מעל 90%, עומס מלא-100%.

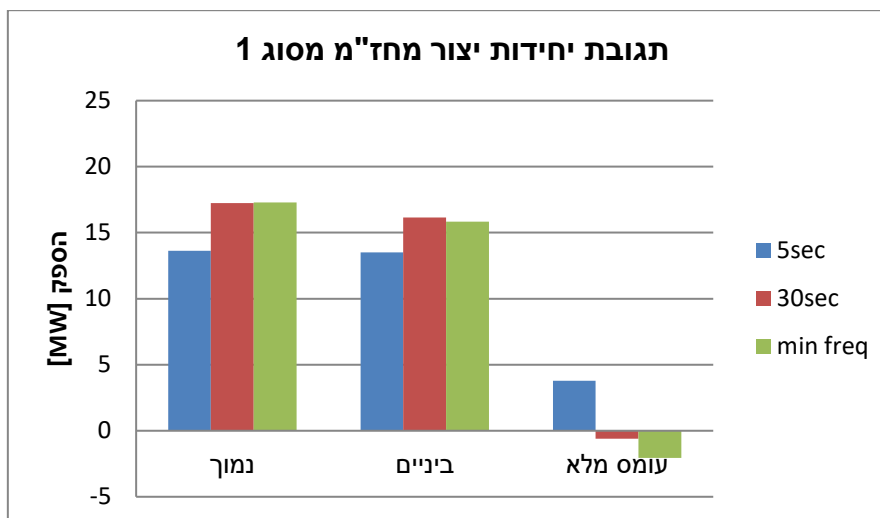


איור מס' 2: תגובת יחידות יצור קיטוריות המוסקות בפחם מסוג 1 בתחומי עבודה שונים

ניתן לראות כי תגובת יחידות היצור הקיטוריות המוסקות בפחם מסוג 1 שונה בתחומי העבודה השונים. תגובת היחידות לאחר 5 שניות נעה בין 13MW-22MW ולאחר 30 שניות בין 15MW-32MW. התגובות הטובות ביותר מתקבלות בטווח עומסי הביניים של היחידה, וכאשר היחידה פעלה בעומס מלא, כמעט ואין תגובה.

3.2.2. תגובות יחידות יצור מסוג מחז"מ

באיור 3 מוצגות תגובות יחידות יצור מסוג מחז"מ מסוג 1 בטווח עומסים (אחוזים מהעומס הנקוב): עומס נמוך-עד 75%, עומס ביניים-75%-95%, עומס מלא-100%.



איור מס' 3: תגובת יחידות יצור מחז"מ מסוג 1 בתחומי עבודה שונים

ניתן לראות שקיים שוני בין תגובת יחידות היצור מחז"מ בהתאם לתחומי העבודה. תגובת היחידות לאחר 5 שניות הינה כ- 14MW ולאחר 30 שניות, בין 16MW-17MW, כאשר אין תלות בתגובות בטווח עומסי היחידה. בעומס מלא התגובה נמוכה ואף שלילית.

3.2.3. תחומי העבודה המועדפים ליחידות היצור מבחינת תגובת היחידה לתדר

לאור התוצאות, רוכזו המלצות, בנוגע לתחומי העבודה המועדפים ליחידות היצור מבחינת תגובתן (תוספת הספק) בזמן הפרעת תדר. חלוקת הרזרבה הסובבת בין יחידות היצור ע"י העמסתן בתחומי העבודה הללו, תגרום לכך שתגובת מערכת החשמל תהיה גדולה יותר בזמן הפרעת תדר.

3.3. הפרעות תדר וניתוחן באמצעות תוכנת PSSE:

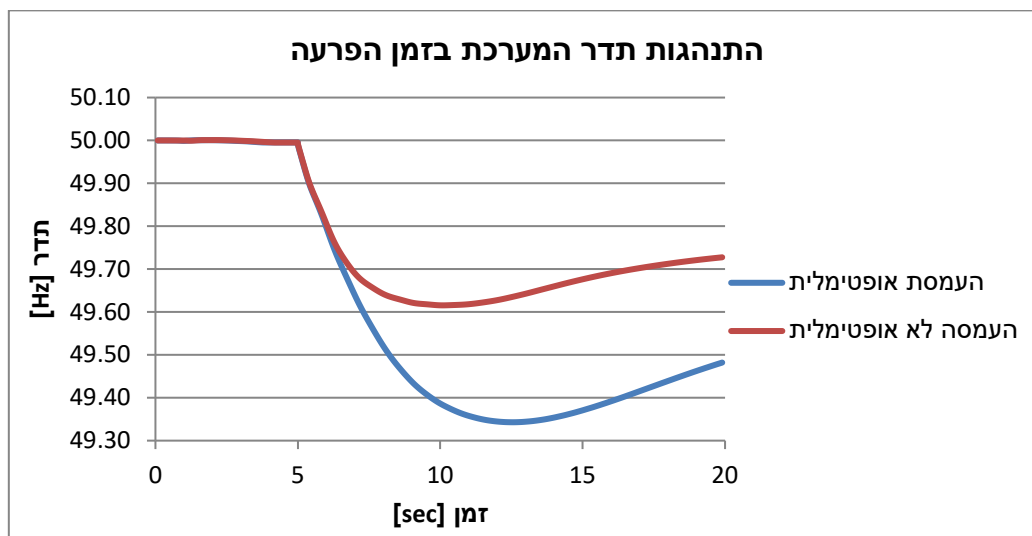
לצורך ביצוע הדמיות בהן הייתה כוונה לבדוק את תגובת מערכת החשמל ומרכיביה להפרעות תדר, נעשה שימוש בתוכנת Power System Simulator for Engineering - PSSE.

כל אחת מההפרעות נותחו ע"פ 2 העמסות שונות של יחידות הייצור המסונכרנות:

1. העמסה אופטימלית - הרכב ועומסי היחידות נקבע ע"פ שיקולים כלכליים. כפועל יוצא, הרזרבה הסובבת נשמרת ביחידות הייצור שהעמסתן "יקרות יותר".
2. העמסה לא אופטימלית - הרכב ועומסי היחידות נקבע ע"פ שיקולים תפעוליים. הרזרבה הסובבת מחולקת בין מספר גדול יותר של יחידות ייצור, ואלו פועלות בעומסים בהן יגיבו בצורה טובה יותר להפרעות תדר במערכת החשמל.

3.3.1. הפרעה תדר

באיור מס' 4 מתוארת דוגמא להפרעת תדר שנותחה בעבודה בעקבות הפסקת יחידת ייצור.



איור מס' 4: התנהגות תדר המערכת בזמן הפרעה מס' 1

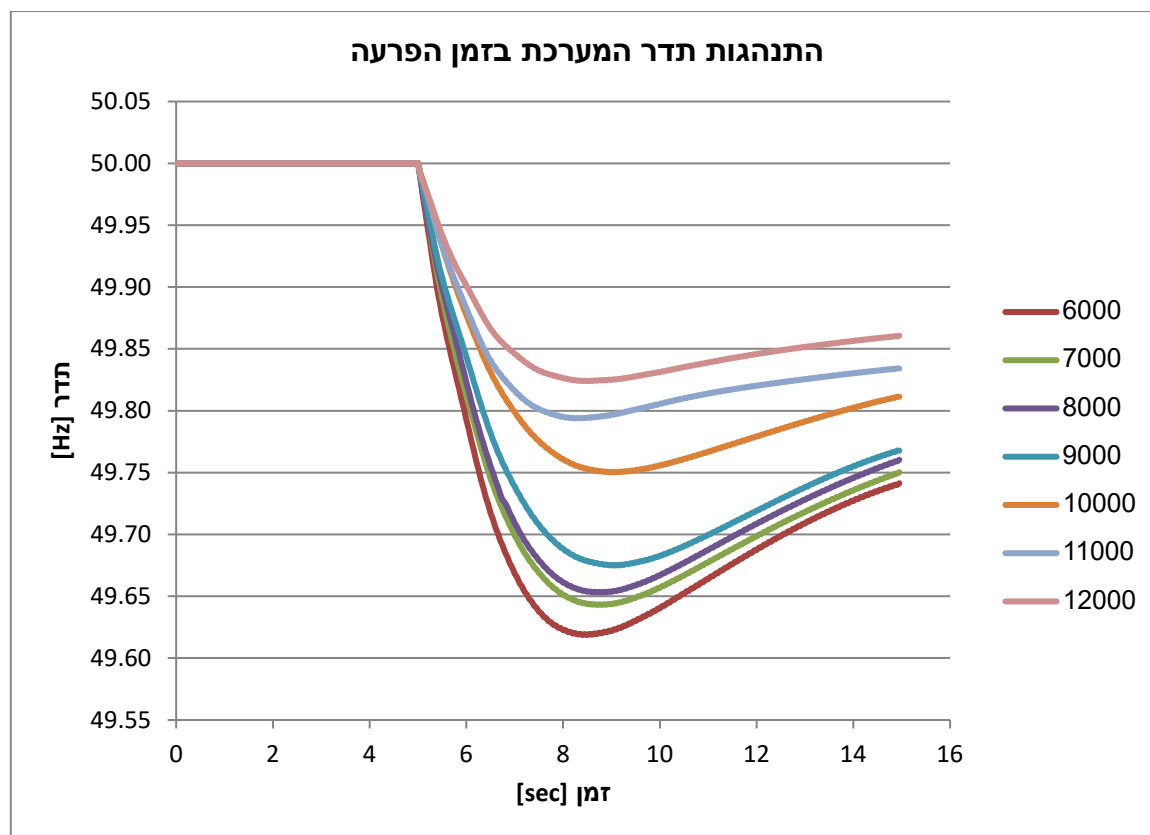
בהפרעה זו, כעבור 5 שניות מתחילת המדידה נפסקת יחידת ייצור. כאשר יחידות הייצור מועמסות בצורה אופטימלית, התדר יורד בעקבות ההפסקה, לערך של 49.34Hz כעבור 7 שניות מרגע ההפסקה. כאשר היחידות מועמסות בצורה לא אופטימלית, בעקבות ההפסקה, התדר יורד לערך של 49.62Hz כעבור 4 שניות מרגע ההפסקה. המקרה המתואר תפעל מערכת השלת עומס ותגרום להפסקת צרכנות.

3.3.2. סיכום תוצאות ההדמיות

במקרים שנותחו, ניתן לראות בוודאות שלהעמסת היחידות בצורה אופטימלית מבחינה כלכלית ישנה משמעות תפעולית. ערכי התייצבותו של התדר במינימום זמן ההגעה לערכים אלו משתנה בתלות בהעמסת היחידות. כאשר מעמיסים את יחידות הייצור באופן אופטימלי מבחינה כלכלית, פחות יחידות ייצור משתתפות ברזרבה הסובבת ו/או קיימות יותר יחידות ייצור שיגיבו להפרעת התדר בצורה פחות טובה. כאשר הרזרבה מחולקת בצורה לא אופטימלית מבחינה כלכלית, המערכת יציבה יותר, התדר יתייצב בערך מינימלי שהוא גבוה יותר ותוך פרק זמן קצר יותר. הן שיקום תדר המערכת לאחר ההפרעה והן חזרת המערכת לתחום העבודה התקין מבחינת התדר יהיו מהירים יותר. עבודה בתדר נמוך עלולה לגרום לנזק מצטבר לציוד.

3.3.3. השפעת עומס המערכת על הפרעת התדר

לצורך בדיקת השפעת עומס המערכת על התנהגות התדר בעת הפרעה, בוצעו הדמיות לתקלה זהה בעומסים שונים. באיור 5 מוצגת תגובת מערכת החשמל בזמן הפסקת יחידת יצור בעומסים שונים בכלל המערכת.



איור מס' 5: התנהגות תדר המערכת בזמן הפרעה בתלות בעומס המערכת

כפי שניתן לראות, התדר המינימלי הוא נמוך יותר ככל שהעומס המערכת נמוך יותר. אם כך, לעומס המערכת וכפועל יוצא מכך לאינרציית המערכת (H) ישנה השפעה על תגובתה להפסקת יחידת יצור. מומנט האינרציה השקול של המערכת H, משפיע על שינוי התדר וקצב שינוי התדר בזמן הפרעה.

3.4. עלות רזרבה סובבת

תוצאות ההדמיות המוצגות בעבודה מוכיחות שהפעלת מערך ייצור החשמל עם רזרבה מיידית גדולה יותר, המחולקת בצורה טובה יותר, משפרת את יציבות מערכת החשמל. לצורך בדיקת היקף העלויות למשטר העבודה המוצע, חושבו העלויות של שני אופני התפעול. נמצא כי בעומסי מערכת נמוכים ובינוניים (עד 10,500 MW), תוספת העלות היומית שמקורה בדלקים הינה נמוכה מ-1%. כאשר עומס המערכת גבוה, ניכרת עלות גבוהה יותר בשמירת רזרבה בצורה לא אופטימלית מבחינה כלכלית. הסיבה העיקרית לכך הינה הפעלת יחידות ט"ג במחזור פתוח ויחידות נוספות שהן בעלות נצילות נמוכה יותר. סל הדלקים של מערכת החשמל במדינת ישראל מורכב ברובו מפחם וגז טבעי. שימוש בדלקים אחרים, יקרים ומזהמים יותר, כגון: סולר ומזוט נעשה רק לאחר שמוצתה היכולת לעבוד בדלקים אלו. מקרים שכאלה מתקיימים בד"כ בעומסי מערכת גבוהים ועלולים להתרחש במקרים בהם ישנן תקלות ביחידות יצור או תקלות במערכת הגז הטבעי. כאשר נעשה שימוש בדלקים יקרים יותר, תוספת העלות היומית בדלקים מגיעה לכ-5%.

בשנת 2016, עומס מערכת החשמל במדינת ישראל היה מתחת ל-10,500 MW במשך כ-90% מהזמן. מכאן שעלות שמירת רזרבה המוצעת בעבודה זו לאורך השנה תהיה נמוכה מ-1%.

3.5. השלת עומס

אפשרות נוספת להתמודדות עם הפרעות תדר, מעבר לשמירת רזרבה מתאימה, הינה השלת עומסים (הפסקת צרכני חשמל). כאשר מתרחשת הפרעה הנגרמת מהפסקת יחידת יצור, תדר מערכת החשמל ירד, בהתאם לכיולים שנקבעו מראש (תדר, הספק מושל והשהייה), יושלו עומסים בכדי לשקם את תדר המערכת. לאחר חזרת התדר לערכים נורמאליים, בהתאם ליכולת מערכת החשמל, תוחזר הזנת החשמל לצרכנים שהופסקו.

3.5.1. הסכמי השלת עומס

בחברת החשמל קיימים שני סוגי לקוחות שמשתתפים בתכנית להשלת עומס כתוצאה מהפרעת תדר:

- צרכנים בהסכם המושלים ראשונים בתדרים 49.2Hz, 49.4Hz
- שאר צרכני המשק, המושלים בדרגות תדר נמוכות יותר ו/או בירידת תדר מהירה (df/dt)

חברת חשמל מאפשרת ללקוחותיה הגדולים להצטרף לקבוצה הראשונה (צרכנים בהסכם) באמצעותו לקוחות אלה מאפשרים כמות השלות עומס מוגדרת מראש בשנה תמורת פיצוי כספי. בהפרעות תדר, לקוחות אלו יהיו הראשונים שמושלים. במידה והתדר משתקם לאחר הפסקתם של הצרכנים בהסכם, אין צורך בהשלות צרכנים נוספות. בשנת 2016, התשלום לצרכנים בהסכם היה 20 ₪ לכל קוויט"ש אנרגיה בלתי מסופקת.

שאר צרכני המשק לא מפוצים על האנרגיה הבלתי מסופקת. הפגיעה הינה תדמיתית בלבד. במקרים מסוימים מוגשות תביעות נזקין בעקבות השלת העומס.

בשנים 2013-2016, כמות השלות העומס הממוצעת היתה 37 לשנה. ב-24 מקרים (בממוצע לשנה) השתתפו רק צרכנים בהסכם.

4. סיכום ומסקנות :

בעבודה זו נבדקו תגובותיהן של יחידות היצור המופעלות ע"י חברת החשמל לישראל בזמן הפרעות תדר. הבדיקה נעשתה ע"י ניתוח סטטיסטי של כ-100 הפרעות תדר. התוצאות סווגו ע"פ טכנולוגיות הפקת האנרגיה והמצב התפעולי של המתקנים שלהן בעומסים שונים. לאור תוצאות הבדיקות, רוכזו המלצות לגבי אופן העמסת יחידות היצור כך שבזמן הפרעה תתקבל תגובה מיטבית להפרעות תדר.

נמצא כי תדר המערכת מגיע לערכו המינימלי כעבור פרק זמן של 5-9 שניות ברוב ההפרעות. תגובת יחידות היצור בפרק זמן זה הינה הגורם הדומיננטי ביותר בקביעת הערך המינימלי אליו יגיע התדר. מומלץ כי חישוב הרזרבה המיידית ותגובת המערכת בזמני הפרעה יעשה ע"י תגובת יחידות היצור לאחר 5 שניות (כיום החישוב נעשה ע"י 30 שניות). תגובתן לאחר 30 שניות מרגע ההפרעה יהווה מדד לשיקום התדר לאחר ההפרעה.

בוצעו הדמיות באמצעות תוכנת PSSE, מטרת הדמיות אלו היתה לבחון את תגובת מערכת החשמל להפרעה בעומסי מערכת שונים ובאופני חלוקה שונים של הרזרבה בין יחידות היצור: חלוקת רזרבה אופטימלית כלכלית, הנהוגה כיום, לעומת חלוקת רזרבה אופטימלית טכנולוגית, המתבטאת בכך שמספר רב יותר של יחידות יצור משתתפות ברזרבה ע"י כך שהן מועמסות בתחומים בהם יגיבו טוב יותר להפרעת תדר, בהתאם להמלצות שהוצגו.

התוצאות שהתקבלו מוכיחות כי לחלוקת הרזרבה הסובבת בין יחידות היצור בצורה שאינה אופטימלית כלכלית ישנה השפעה חיובית על התנהגות מערכת חשמל בזמן הפרעת תדר: הערכים המינימליים אליהם מגיע תדר המערכת במהלך ההפרעה הינם גבוהים יותר, היקף השלת העומס מצומצם יותר ואף נמנע לחלוטין בחלק מהמקרים. כמו כן, שיקום התדר לאחר ההפרעה מהיר יותר.

כיום, לא כל יצרני החשמל משתתפים ברזרבה הסובבת בשל הסכמים וחוסר הסדרה בנושא. ככל שיותר יחידות יצור ישתתפו ברזרבה כך תגובת המערכת תהיה טובה יותר להפרעת תדר.

קיימת תלות בין עומס מערכת החשמל לכמות יחידות היצור הפועלות המסונכרנות למערכת. ככל שעומס המערכת גבוה יותר, מספר יחידות היצור המסונכרנות למערכת החשמל רב יותר וכתוצאה מכך אינרציית מערכת החשמל גבוהה יותר, תדר המערכת יתדרדר פחות בזמן הפרעה. חדירת יחידות יצור לא קונבנציונאליות כגון תחנות כח פוטוולטאיות (PV), המתחברות לרשת החשמל דרך מהפך, מורידות את אינרציית המערכת ופוגעות בתגובתה להפרעות תדר.

בהתאם לתוצאות שהתקבלו, מומלץ להתחשב בעומס מערכת החשמל בקביעת דרישות הרזרבה הסובבת (כיום אין לכך התייחסות). כמו כן, יש להגדיל את הרזרבה בשעות בהן יחידות יצור ללא אינרציה פועלות או לחילופין, להגביל את הספקן. אפשרות נוספת הינה שיתוף יחידות יצור אלו בשמירת הרזרבה (העמסה בהספק נמוך מהמירבי) וויסות התדר ע"י בקר מתאים, כך שישתתפו בתגובת המערכת לתדר בזמן הפרעה.

לעבודת יחידות היצור בצורה המוצעת בעבודה זו ישנה משמעות כלכלית המתבטאת בעלויות דלקים. ע"י שימוש בתוכנה לחלוקה אופטימלית של העומס בין יחידות היצור, נבדקה עלות זו בעומסי מערכת שונים. על מנת לחשב את תוספת העלות השנתית שתיגרם, בוצע ניתוח לכמות השעות בשנה בכל עומס מערכתי בהתאם. בשנת 2016, העמסת יחידות היצור בהתאם להמלצות עבודה זו הייתה גורמת לעלות נוספת של פחות מ-1% לסל הדלקים.

כאשר תגובת מערכת החשמל בזמן הפרעת תדר אינה מספקת, תדר המערכת ממשיך להתדרדר ובכדי למנוע פגיעה ביציבותה של המערכת, פועלת באופן אוטומטי מערכת השלת עומס. צרכני החשמל בהסכם מקבלים פיצוי עבור אנרגיה בלתי מסופקת זו.

5. מקורות :

1. Machowski J. Bialek J. W. Bumby J. R. *POWER SYSTEMS DYNAMICS Stability and Control Second Edition*. (John Wiley & Sons, Ltd. United Kingdom 2008)
2. N. Srisaen, A. Sangswang, Effects of PV grid-connected system location on a distribution system, (IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, pp. 852-855, Dec. 2006).
3. Omar.G. Mrehel, Abdunnaser .S. Shamek, Mohamed .D. Hamouda, Power System Transient Stability Investigation In The Presence Of Photovoltaic Generation, (17th international conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering 2016).
4. עקרונות המשטר התפעולי ביחידה לניהול המערכת לשנת 2016, חברת החשמל.
5. Rodolfo J. Koessler, James W. Feltes, Johnny R Willis, *A Methodology for Management of spinning reserve requirements*. (Power Technologies Inc. 1998)

6. ספר אמות המידה לשנת 2016, רשות החשמל.