

מרתון בהמרת אנרגיה

רון בנימין

1 ביולי 2026

זכויות יוצרים

בהמרת אנרגיה

כל הזכויות שמורות.

חוברת זו נכתבה ונערכה במיוחד עבור סטודנטים הלומדים את המרתון בהמרת אנרגיה. החוברת כוללת הסברים תמציתיים, דוגמאות, תרגילים פתורים, וידע שנאסף ממגוון מקורות כולל הרצאות, תרגולים, ומסמכים רשמיים של הקורס.

אין להעתיק, לשכפל, להפיץ, לתרגם, להציג בפומבי, או לעשות כל שימוש מסחרי בתכני החוברת, כולם או חלקם, ללא קבלת רשות מפורשת מראש ובכתב מהיוצר.

השימוש בחוברת מותר לסטודנטים לצורכי לימוד אישי בלבד. הכותב אינו אחראי לשגיאות, אי-דיוקים, או תוצאות הנובעות משימוש במידע המופיע בה.

נכתב וערוך על ידי:

רון בנימין

תוכן העניינים

11	1 קונספט של אנרגיה (Concept of Energy)
11	1.1 סיווג סוגי אנרגיה
11	1.2 יחידות מידה והמרות (Units and Conversions)
11	1.3 דוגמאות מספריות להמרת יחידות
12	1.4 הספק (Power) וקצב העברת אנרגיה
12	1.5 החוק הראשון של התרמודינמיקה (First Law of Thermodynamics)
12	1.5.1 אנרגיה מכנית: פוטנציאלית וקינטית
13	1.6 חום ואנרגיה תרמית (Heat and Thermal Energy)
15	1.7 החוק השני של התרמודינמיקה ונצילות
15	1.7.1 החוק השני מול החוק הראשון
15	1.7.2 הגדרת הנצילות (Efficiency)
15	1.8 התקני המרת אנרגיה (Energy Conversion Devices)
16	1.9 חישובי נצילות - דוגמאות מספריות
16	1.10 ערך קלורי של דלקים (Calorific Value)
17	1.11 נצילות אופיינית של התקנים
17	1.12 נצילות של מערכת מורכבת (System Efficiency)
18	1.12.1 נצילות בשרשרת אספקת הדלק
18	1.13 שאלת מבחן
20	2 מבוא לניהול תרמי במערכות הספק
20	2.1 מאזן הספקים ונצילות
20	2.2 המודל התרמי והאנלוגיה לחשמל
21	2.2.1 חימום וקירור - תגובה בזמן
22	2.3 הגדרת הספק נקוב (Rated Power)
22	2.4 ניתוח מקרה: דיודת שוטקי
23	2.4.1 חישוב הפסדים לפי דפי נתונים
24	2.5 איך לחשב הספק ממוצע
25	2.5.1 גרף Derating (הורדת דירוג)
25	2.5.2 זרם הלם (Surge Current)
25	2.6 שרשרת התנגדויות תרמיות
26	2.6.1 חומרים לשיפור מוליכות תרמית (TIM)
26	2.6.2 חישוב הספק מקסימלי ללא גוף קירור
26	2.7 תהליך תכנון מערכת קירור
26	2.8 שאלת מבחן
30	2.9 שאלת מבחן
37	3 מוסכמות סימנים והגדרות יסוד (Sign Convention)
37	3.1 ערכים ממוצעים ויעילים (Average and RMS Values)
37	3.1.1 ערך ממוצע (DC Value)
38	3.1.2 ערך יעיל (RMS - Root Mean Square)
38	4 מערכות ליניאריות וסופרפוזיציה
39	4.1 תגובה לאות סינוסואידלי
39	4.2 משוואות הרכיבים במישור הזמן

39	רשת החשמל החד-פאזית (Single Phase Grid)	5
39	5.1 תקנים בעולם	
40	5.2 מבנה לוח החשמל הביתי	
40	הספק במעגלי זרם חילופין (AC Power)	6
40	6.1 הספק פעיל (Active Power)	
41	6.2 פיתוח מתמטי של ההספק הרגעי	
41	חשיבות ההספק העיוור (Reactive Power)	7
42	7.1 רכיבי ההספק	
42	7.1.1 פירוק הזרם	
42	7.1.2 הגדרת ההספקים	
42	7.2 הספק מרוכב	
42	7.2.1 ייצוג מתמטי	
43	7.2.2 קשר לעכבה ($\vec{Z}$)	
43	7.3 ייצוג פאזורי ועכבות	
43	7.4 הספקים ברכיבים פסיביים	
43	7.4.1 נגד (Resistor)	
43	7.4.2 קבל (Capacitor)	
44	7.4.3 סליל (Inductor)	
44	גורם ההספק (Power Factor) ושיפור	8
44	8.1 הגדרה ומשמעות	
44	8.2 ניתוח מעגל RLC מקבילי ושיפור גורם הספק	
45	8.2.1 חישוב הזרם הכולל	
45	8.2.2 משמעות השיפור (פיצוי ריאקטיבי)	
45	מעגלי AC כלליים	9
46	9.1 חישוב ערכים יעילים והספק	
46	9.2 גורם ההספק במערכות לא-ליניאריות	
47	9.3 עיוות הרמוני כולל (THD)	
47	9.4 שאלת מבחן	
49	9.5 שאלת מבחן	
51	9.6 3. בניית המשוואה	
52	9.7 שאלת מבחן	
57	מערכות תלת-פאזיות (3-Phase Systems)	10
57	10.1 חיבור כוכב (Y-Connection)	
58	10.2 חיבור משולש (Δ -Connection)	
59	10.3 עומסים והמרת כוכב-משולש	
59	10.4 הספק במערכות תלת-פאזיות	
60	10.5 תהליך פתרון בעיות תלת-פאזיות	
60	10.6 דוגמה	
60	10.7 נתוני המעגל	
65	השדה המגנטי	11
66	11.1 לכידת שטף ועיקרון מחלק הזרם	

66	12 משתנים פיזיקליים במעגל המגנטי
66	12.1 מוליכות סגולית (Permeability)
66	12.2 חוק אמפר ועוצמת השדה
66	12.3 צפיפות השטף והשטף הכולל
67	12.4 תכונות חומרים מגנטיים
67	13 המודל המגנטי: אנלוגיה למעגל חשמלי
68	13.1 חוק פאראדיי והשראות עצמית
68	14 מבוא לשנאי האידאלי
69	14.1 הנחות השנאי האידאלי
69	14.2 משוואות היסוד
69	14.2.1 יחס המתחים (חוק פאראדיי)
69	14.2.2 יחס הזרמים והספקים
69	14.2.3 שיקוף עכבות
70	14.3 ניתוח במצב סינוסי (AC)
70	14.4 ערכים נקובים
70	14.5 דוגמה
71	15 השנאי המעשי: התנגדות ליפופים ואפקט העור
71	15.1 אפקט העור (Skin Effect)
71	16 תופעות פיזיקליות במוליכים
71	16.1 אפקט הקירבה (Proximity Effect)
72	16.2 שימוש בחוט שזור (Litz Wire)
72	17 מודל השנאי המעשי
72	17.1 שטפי דליפה
73	17.2 מעגל התמורה החשמלי
73	17.3 מגנוט הליבה
73	17.3.1 זרם המגנוט
74	17.3.2 ייצוג במעגל התמורה ושיקוף אימפדנס
74	17.4 הפסדי הליבה
74	17.4.1 זרמי מערבולת (Eddy Currents)
75	17.5 הפסדי היסטריזיס (Hysteresis Losses)
76	17.6 סך הפסדי הליבה והשוואת חומרים
76	18 מודל השנאי המלא ושיקוף עכבות
77	18.1 שיקוף לראשוני ולמשני
77	18.2 מנגנון הרוויה (Saturation)
78	18.3 סוגי מבנה שנאים
78	19 שנאים תלת-פאזיים ושנאי מדידה
78	19.1 שנאי תלת-פאזי
79	19.2 שנאי מדידה (Instrument Transformers)

79	20 הפסדים בשנאי
79	20.1 הפסדי גרעין / ברזל (P_{Fe} או P_{core})
80	20.2 הפסדי נחושת (P_{Cu})
80	20.3 נצילות השנאי (η)
80	20.4 שאלה
83	20.5 שאלת מבחן
84	20.6 שאלת מבחן
86	20.7 שאלה
88	21 מבוא להעברת אנרגיה
88	21.1 יישומים נפוצים
89	21.2 סיווג שיטות להעברת אנרגיה
89	21.3 המודל הפיזיקלי: משנאי לסלילים מצומדים
89	21.4 הגדרת ההשראויות במעגל
90	21.5 ניתוח המעגל החשמלי
90	21.6 מקדם הצימוד (Coupling Coefficient)
91	21.7 שנאי בעל צימוד רופף
92	21.8 מעגל התמורה של ה-LCT
92	21.9 מגבלות העברת ההספק ללא פיצוי
93	22 רשתות פיצוי ותהודה
93	22.1 טופולוגיית טור-טור (Series-Series)
94	22.2 פעולת הממיר ואופייני תדר
95	22.3 ניתוח צד המשני: יישור זרם ועומס
95	22.4 גלי מתח וזרם במיישר
95	22.5 מודל נגד AC שקול (R_{AC})
96	22.6 מודל ליניארי וניתוח נקודות עבודה
96	22.7 פעולה בתדר התהודה (ω_R)
96	22.8 פעולה בתדר לא-תהודתי (תדר גבוה)
96	23 מכונת DC
96	23.1 הגדרת הספקים וסוגי מכונות
97	23.2 יחידות מהירות
97	23.3 נקודת עבודה (Operating Point)
97	23.4 קשרים בין תנועה קווית לסיבובית
98	24 מבנה המכונה ודינמיקה
98	24.1 מבנה פיזי
98	24.2 דינמיקה סיבובית
98	24.3 משוואת התנועה (עבור מנוע וגנראטור)
99	25 עקרון הפעולה החשמלי - השראת מתח
99	25.1 מבנה שדה מגנטי
99	25.2 חוק פראדיי והשראת כא"מ (EMF)
99	25.3 השפעת מספר הקטבים (P)