

אמיר ברושי

- מהנדס חשמל (הטכניון), MBA, בודק 3
- ניסיון של 30+ שנים בתחום איכות החשמל
- מתקן 27 שנים בחברות "אלספק" ו"סייטק"
- משנת 2010 בעלים של Power Quality Doctor

המומחים בהרמוניות ואיכות חשמל

בדיקת הרמוניות והפרעות בחשמל
בניהולו של אמיר ברושי, מומחה איכות חשמל משנת 1987
מומחים מורשים ע"י חברת החשמל
איתור בעיות חשמל מורכבות
אספקת פתרונות לכל הבעיות
החברה היחידה בישראל שעוסקת רק בתחום

Power Quality Doctor

Copyright © Power Quality Doctor

2

Power Quality Doctor

מבוא לאיכות חשמל

כחלק משיקולי תכנון תחנות הטרנספורמציה (LV/MV)

אמיר ברושי

Power Quality Doctor

www.pqdoc.com 052-6347737

linkedin.com/company/pqdoc 09-7433377

facebook.com/PQDoc amir@pqdoc.com

Copyright © Power Quality Doctor

1

מה זה איכות חשמל

- חשמל הוא חומר גלם מיוחד – מיד עם הייצור שלו הוא נצרך
- כמו לכל חומר גלם – יש מדדים של איכות, אבל אי אפשר לא לקבל את ה"משלוח"
- יש 12 פרמטרים שונים, אבל לא כולם חשובים באותה מידה

דבר, רמת מתחים, שישי מתח ספירים, הכוחות, אסטריה, הרמוניות, במתח, הרמוניות בזרם, אינטר-הרמוניות, איתותים, במתח, הפסקות חשמל, שקיעות ועוליות מתח, תופעות מעבר

Power Quality Doctor

Copyright © Power Quality Doctor

4

מה זה איכות חשמל?

Power Quality Doctor

Copyright © Power Quality Doctor

3

מדוע איכות חשמל מעניינת אותם?

- עלולה להשפיע על אמינות המתקן
- עלולה להשפיע על בטיחות המתקן
- עלולה להשפיע על בריאות המשתמשים במתקן
- דרישה רגולטורית

Power Quality Doctor

Copyright © Power Quality Doctor

6

מדוע איכות חשמל מעניינת אותם?

Power Quality Doctor

Copyright © Power Quality Doctor

5



Factor K (תקן אירופאי)

חישוב העמסת השמאי המירבי בעת נכוחות הרמוניות

$$K = \left[1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{n=2}^{\infty} n^2 \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right]^{0.5}$$

הפסדים מזרמי מערבולת (Eddy Currents)	e
זרם RMS	I
זרם בהרמוניה ראשונה	I1
זרם בהרמוניה n	In
קדם שיתלי במבנה השמאי, בד"כ 1.5-1.7	Q



© Power Quality Doctor

Copyright © Power Quality Doctor

גורמי הרמוניות

עומסים לינאריים

עומסים לא לינאריים

Power Quality Doctor Copyright © Power Quality Doctor

32

ת" 51900 לעומת ת" 15470

$$\%THD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_{fund}} \times 100\%$$

$$TDD = \frac{100 \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_{Max Demand}}$$

TRD = Total Rated Current Distortion

Table 26—Maximum odd harmonic current distortion in percent of rated current (I_{rated})^a

Individual odd harmonic order h	h = 11	14 ≤ h ≤ 17	17 ≤ h ≤ 23	23 ≤ h ≤ 35	35 ≤ h ≤ 50	Total rated current distortion (THD)
Distortion (%)	6.0	3.0	1.5	0.6	0.3	1.0

Table 27—Maximum even harmonic current distortion in percent of rated current (I_{rated})^a

Individual even harmonic order h	h = 2	h = 4	h = 6	h ≤ 8	h ≤ 50
Distortion (%)	1.0	0.5	0.3	0.2	0.1

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above

DER = Distributed Energy Resources

31

מישר חד פאזי

עומסים חד פאזיים מייצרים הרמוניות שהן כפולות של 3

Power Quality Doctor Copyright © Power Quality Doctor

34

גורמי הרמוניות: עומסים לא לינאריים

Power Quality Doctor Copyright © Power Quality Doctor

33

חזקים מהרמוניות

הגדלת הפסדי הולכה (אפקט הקרום)

עליית טמפרטורה

קיצור אורך חיים (כלל ארהנוס: 10°C = 50% אורך חיים)

הפעלת הגנת שגיאה

הגדלת הסיכון לשריפות

פגיעה בקבלים לשיפור מקדם הספק

פגיעה במקדם ההספק

$$TPF = \frac{DPF}{\sqrt{1 + THD_i^2}}$$

Power Quality Doctor Copyright © Power Quality Doctor

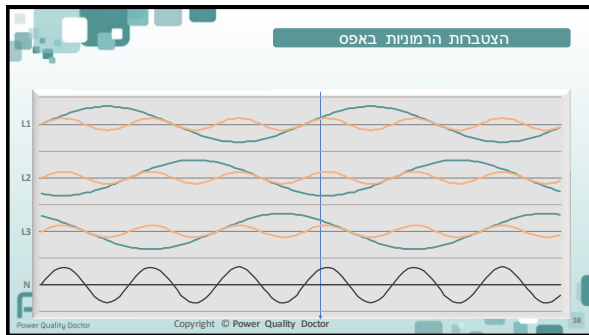
36

מבנה עקחני של ווסת מהירות

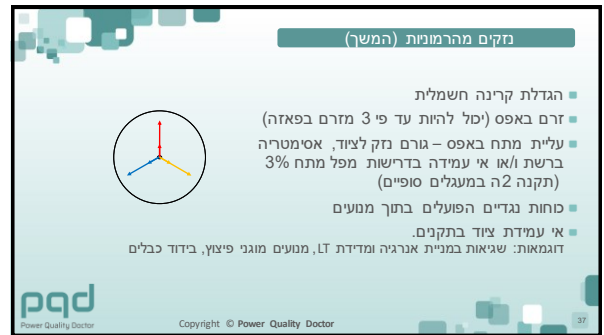
מיישרים 6 דרכים מייצרים הרמוניות 1±x6 (5, 7, 11, 13, ...)

Power Quality Doctor Copyright © Power Quality Doctor

35



38



37

שטח חתך מוליך האפס

60364-5-52 © IEC:2009

Table E.52.1 – Reduction factors for harmonic currents in four-core and five-core cables

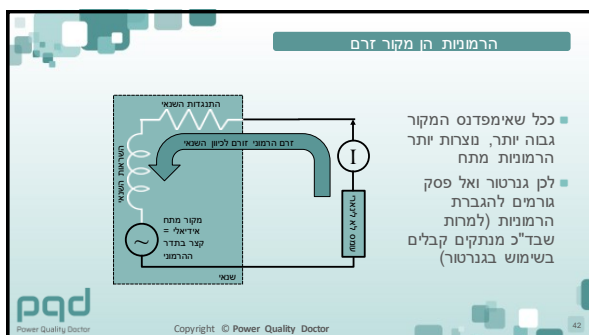
Third harmonic content of line current %	Reduction factor	
	Size selection is based on line current	Size selection is based on neutral current
0 – 15	1.0	–
15 – 33	0.86	–
33 – 45	–	0.86
> 45	–	1.0

Power Quality Doctor Copyright © Power Quality Doctor 40

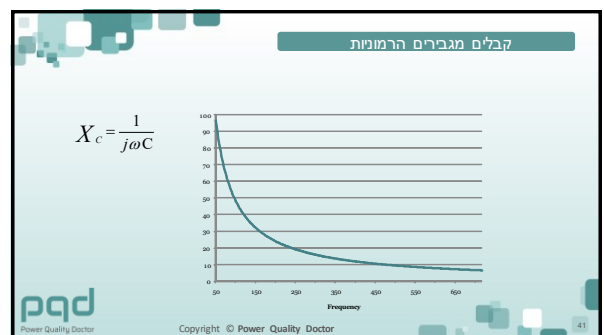
40



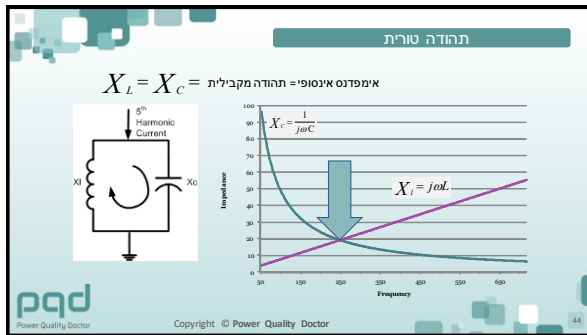
39



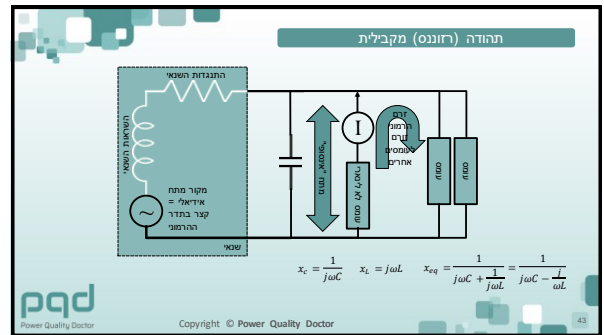
42



41



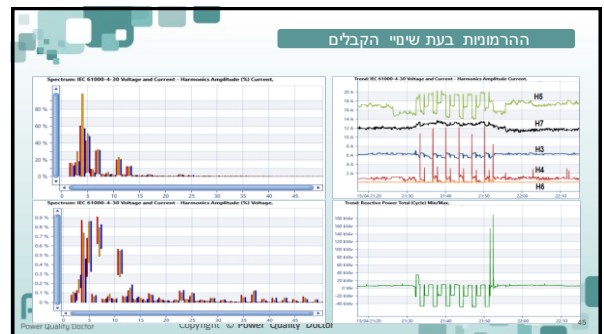
44



43



46



45

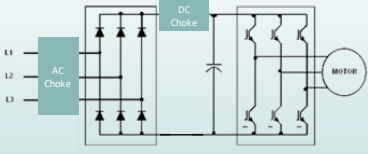


48



47

1. משנק טורי



עקרונות הפעולה

- השראות טורית מתנגדת לשינויי זרם
- ניתן להתקין בכניסה (צד AC) ו/או בתוך המישור (צד DC)

יתרונות

- יחס עלות/תועלת מעולה
- פשוט לאיפיון ורכישה

חסרונות

- סינון מקסימלי ל-20% עיוות הרמוני (בשילוב AC+DC)

Copyright © Power Quality Doctor

50

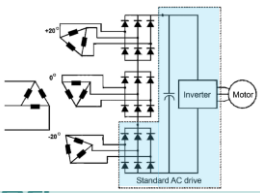
השיטה של מס הכנסה

ניקוי במקור

Copyright © Power Quality Doctor

49

2. ווסת מהירות 12/18 פולסים



עקרונות הפעולה

- שנאי עם הזזת פאזה בכניסה מזין סטים נפרדים של מיישרים
- הרמוניות מקוזזות אלו את אלו

יתרונות

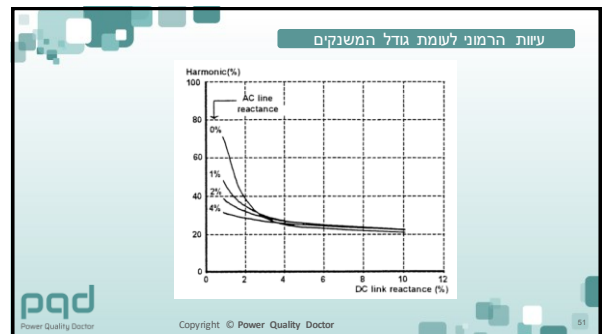
- סינון הרמוניות טוב
- יותר עמיד לעומת AFE (טמפרטורה, מתחים)

חסרונות

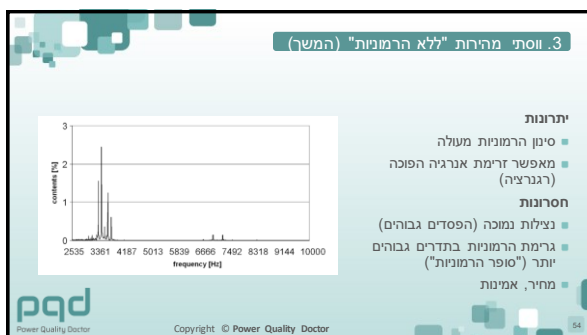
- מחיר
- הפסדים
- גודל

Copyright © Power Quality Doctor

52

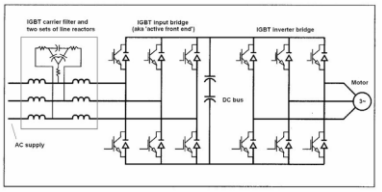


51



54

3. ווסת מהירות "ללא הרמוניות" AFE



עקרונות הפעולה

- שימוש ברכיבי מיתוג ואיפנון PWM ליישור גל "ללא הרמוניות"
- למעשה מדובר על מסנן הרמוניות אקטיבי טורי, בתוספת מסנן פאסיבי לתדרים הגבוהים

Copyright © Power Quality Doctor

53

4. שנאים עם הזזת פאזה

עקרונות הפעולה

- שימוש בשנאי עם כמה יציאות עם הזזת פאזה ביניהן וחיבור עומסים זהים
- יתרונות
 - קיצור הרמוניות מסוימות במעלה השנאי (5+7 או 11+13 או 5+7)
 - חסרונות
 - קיצור רק במעלה השנאי ולא בצד המתח הנמוך
 - מחייב עומס והעמסה זהה

Copyright © Power Quality Doctor

56

ספדק

Power Quality Doctor

סינון הרשת

Copyright © Power Quality Doctor

55

מניעת רזוננס – משנק טור לקבלים

Copyright © Power Quality Doctor

58

הוספת משנק לקבלים

- הוספת משנק בטור לכל קבוצת קבלים
- השראות המשנק היא אחוז מקיבוליות הקבל
- ערכים נפוצים 5%, 7%, 14%

Copyright © Power Quality Doctor

57

6. מסנן פאסיבי טור (רחב סרט)

עקרונות הפעולה

מסנן אלפסטי (Cauer) רחב סרט מהווה נתיב לזרם ההרמוני מצד העומס כלפי האפס וממנה את צורת גל המתח מכיוון הרשת למניעת ייצור הרמוניות בעומס

Copyright © Power Quality Doctor

60

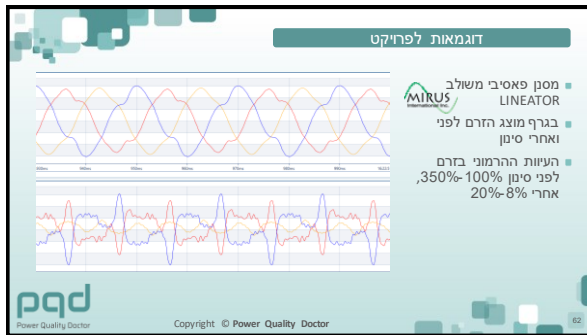
5. מסנן פאסיבי מקביל

עקרונות הפעולה

- מסנן band-pass מהווה נתיב לזרם ההרמוני כלפי האפס
- יתרונות
 - יחס עלות/תועלת טוב
- חסרונות
 - מושפע מאימפדנס הרשת
 - יכול להיפגע מהעמסת יתר
 - בד"כ מסנן הרמוני בודדת (דרשים לפחות 4 מסננים לעמידה בתקן)

Copyright © Power Quality Doctor

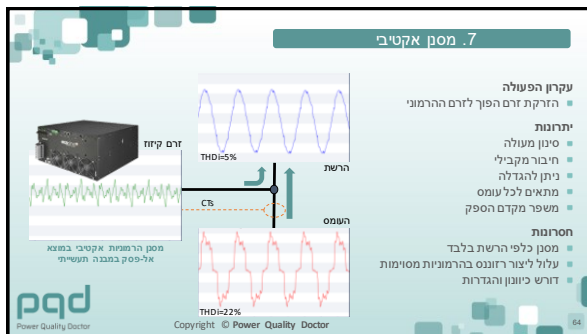
59



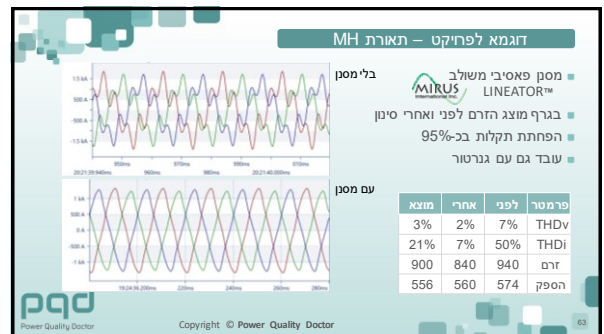
62



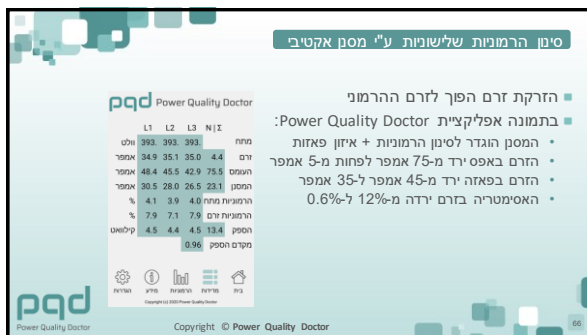
61



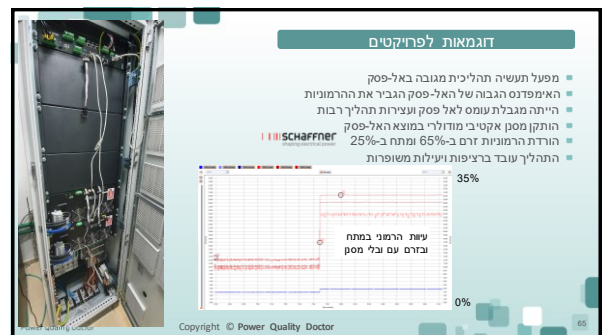
64



63



66



65

אקטיבי או פאסיבי? השוואת חלופות			
תכונה	אקטיבי	פאסיבי טור	פאסיבי מקבילי
מזרז מוביל	ecosine™ by Schaffner	LINEATOR™ by MIRUS	Espece Equalizer™
העמסת יתר	אין (יש אפשרות לחסר הספק וניתוק)	אין	יש
תפוצת מעבר	יש	אין	אין
סכנת תהודה	יש	אין	אין
כיסון והגדרות	מורכב (מחולץ מוגדר)	לא נדרש	פשוט
תחזוקה תקופתית	בדיקת ביצועים, החלפת פסחוס	חיווק בריגים	חיווק בריגים (לפעם אם ממוגן)
אמנות ואחריות	תלו בצינן 1-2 שנות אחריות) תקלה משביתה סטון, מאפשר המשך עבודה, אפשרות לתיקון	גבוהה (3-5 שנות אחריות) תקלה בקבילי פסחוס, ביצועים תקלה, בושש לא מאפשרת עבודה	תקלה משביתה סטון, מאפשר המשך עבודה
הפסדים	2.3%-3.5% מהזרם המסונן	0.6% מהרעש	0.6% מהרעש
מחיר	בינוני-גבוה	בינוני	בינוני-גבוה

68

אקטיבי או פאסיבי? בחינת התאמה			
תכונה	אקטיבי	פאסיבי טור	פאסיבי מקבילי
שיטת סינון	הדחיקת זרם נגדי	מסנן רחב סרט לאסס	מסנן band-width לאסס
אופן סינון	כלפי הרשת בלבד (בתנאי שאין צביות אופוזיטיות)	צורת חץ בין הרעש לרשת, מלכדת להרעשות כסון הרעש מכל הכיוונים	צורת חץ בין הרעש לרשת, מלכדת להרעשות כסון הרעש מכל הכיוונים
אופן חיבור	מקבילי	סדר	מקבילי
גודל	קטן-בינוני	גדול	בינוני
התאמה לרעש	מתאים לכל רעש	רעשיות בודדות	רעשיות בודדות
תכונות מיוחדות	תיקון מקדם הספק חז-כני, אין זרעם	העלאת (ייצוג) הופת	העלאת (ייצוג) הופת
מגבלות	חבה עשוקים מתאמים לל הרעשים (אסס מיוחדות, קבלים, פשרים)	מקום, עליית מוח, בריקס, חיבור טור	מקום, נדרש מקדם הספק גבוה
רמת סינון	THDi<5%	עמידה ב-IEEE 519	סינון עד 50% מכל הרעשות

67

Power Quality Doctor

תופעות מעבר

Copyright © Power Quality Doctor

70

פרמטרים עיקריים של מסננים אקטיביים				
פרמטר	SCHAFNER	מתחרה א'	מתחרה ב'	מתחרה ג'
מודולריות	מלאה	ללא	חלקית	ללא
תצוגה	אלפא-נומרי	מסך מגע 7"	מסך מגע 7"	מסך מגע 6"
טמפר. מריבית	50°C	40°C	40°C	40°C
עם derating	55°C	?	45°C	?
הפסדים	2.3%	2.3%	3%	?
רעש	56-63 dBA	60-67 dBA	56-65 dBA	?
מידות ס"מ (זרם)	44*42*22 (60A)	22*52*85 (50A)	44*19*61 (60A)	66*135*45 (50A)
סמל/ק"אמפר	678	1,945	850	8,019

69

השפעות

- צורך לאתחל מחשבים או בקרים
- בלאי בצידו אלקטרוני
- תקלות בצידו אבטחה או גילוי אש
- תקלות במערכת בקרה של גנרטורים ואל-פסק
- תקלות בלדים ודרייברים
- מזקים בווסתי מהירות, בליפופי ממועים ובבידוד של כבלים
- תקלות בצידו תקשורת וטלפוניה במהלך ואחר סופות
- קיצור אורך חיים של אל-פסק וזמן גיבוי קצר מהמוצא
- תקלות בחיישים וציוד מדידה אחר

Power Quality Doctor

Copyright © Power Quality Doctor

72

תופעות מעבר - הגדרה

הגדרה: הפרעות על גל המתח הקצרות מחצי מחזור תחום התדרים 2-150kHz נקרא סופרה-הרמוניות RFI/EMC מעל 150kHz נקרא EM/RFI

תקן: אין תקן לתחום סופרה-הרמוניות (לא לרשת ולא לציוד)

מחנה

זרם

Power Quality Doctor

Copyright © Power Quality Doctor

71

אז מדוע לא שמענו על זה עד היום?

- כיום יש יותר עומסים ממוזגים בתדיר מיתוג גבוהים יותר
- רגישות היציג גבוהה יותר (מעבד 8080 פעל ב-12V/2KHz דור 9 פועל ב-1.2V/5GHz)
- רוב מכשירי המדידה לא מודדים מעל 26kHz (1024 דגימות במחזור)
- משנת 2015 התקן Class A ממליץ על מדידה עד 150kHz
- רוב המזק נובע מהאפקט המצטבר ולא החד פעמי
- התקינה בארץ לא מקדמת את המשא:
- אמות מידה (41): יש התייחסות רק בעת ביצוע מדידות. אין ספים.
- ת"י 50160 (סעיף 4.3.3): יש התייחסות כללית לגורמים
- ת"י 61439 מתייחס רק לספיקים (Transient Overvoltage)
- וכן שהמשמש צריך להגדיר את הרמה הדרושה

Power Quality Doctor

74

תופעות מעבר וסופר הרמוניות

סוגים

- דירבונים (Spikes)
- שקעים (Notches)
- תופעות מעבר - לא מחזורי
- סופר הרמוניות - מחזורי

גורמים עיקריים

- ברקים (תופעות מעבר)
- קצרים (תופעות מעבר)
- מיתוגים (סופר הרמוניות)

Power Quality Doctor

73

פתרונות

- צמצום התופעה ע"י שימוש ב:
- הארקות וסינוך
- מתנע רך במקום בווסת מהירות (במידת האפשר)
- מעגל אלקטרוני במעבר אפס במקום אלקטרו מכאני
- ווסת מהירות 6 דרגות עם מסך הרמוניות חיצוני
- (ווסת מהירות "ללא הרמוניות" גורם הרבה יותר תופעות מעבר)
- סינון ההפרעות
- מסנני DV/DT וסינון פילטר במוצא ווסת המהירות
- מסך תופעות מעבר SineTamer

Power Quality Doctor

76

המלצות של IEEE קיימות כבר 40 שנה

IEEE C62.41-1980

IEEE 519-1992

Power Quality Doctor

75

סינון תופעות מעבר

Power Quality Doctor

78

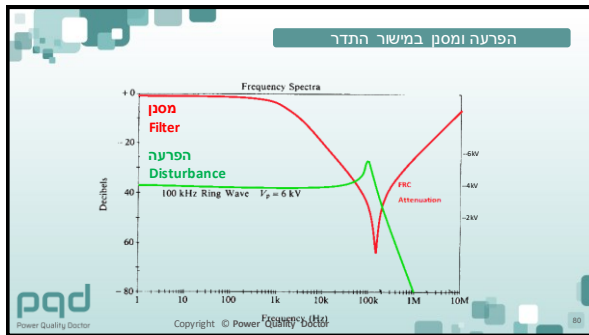
SineTamer

מסך תופעות מעבר וסופר הרמוניות

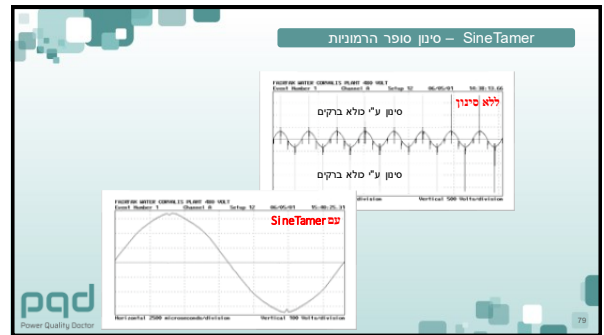
- ארבעה באחד:
- סינון תופעות מעבר ע"פ תדר ההפרעה (במקום עוצמת המתח)
- סינון סופר הרמוניות
- סילור ברק Class 2
- פיוז חום ייחודי בעל עמידות דיאלקטית גבוהה לעבודה ממושכת
- עד 10 סנטימטרים עומקים בכל יחידה
- (בן כל פאזה לאפס, בן כל פאזה להארקה, בן אפס להארקה ובן הפאזה לבין עצמן)
- 15 שנות אחריות (סילור מפגעת ברק)
- קומפקטי, אפסות, יתקנה (החל מ-15x8x5 ס"מ)
- יחס עלות תועלת משהיה (החל מ-3,000 ש"ח)
- פשוט וקל לאיפון - 5 דגמים עיקריים:
- חד פאזה טיפ לעומס עד 30 אמפר
- חד פאזה מקבילי לעומס עד 100 אמפר
- תלת פאזה מקבילי לעומס עד 400 אמפר
- תלת פאזה מקבילי לעומס מעל 400 אמפר
- תלת פאזה ללוח ראשי
- תוצרת ארה"ב

Power Quality Doctor

77



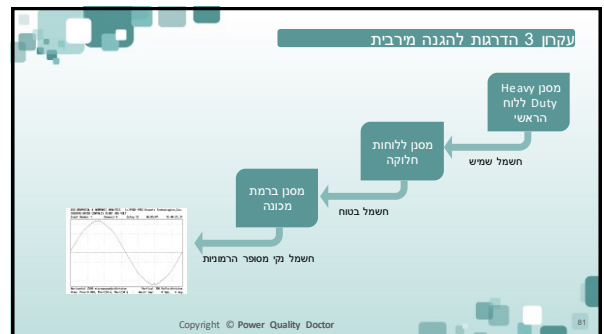
80



79



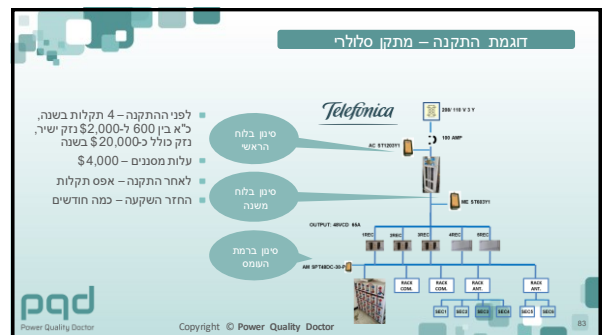
82



81



84



83

סיכום

- כל בעיה או תקלה במתקן ניתנת לאיתור
- כל בעיה המבטעת מתוך המתקן, ורוב הבעיות המבטעות מחוץ למתקן, ניתנת לפתרון

דקדק
Power Quality Doctor

Copyright © Power Quality Doctor

86

דקדק
Power Quality Doctor

סיכום

דקדק
Power Quality Doctor

Copyright © Power Quality Doctor

85

הרמוניות ותופעות מעבר בעומסים

מב עומס	דוגמאות	הפרשת שמיצור	הפרשת שמדיקות ל
מכשירים ללא ווסת מהירות	מפוחי פני עשן	שקיעת מתח	תופעות מעבר, הרמוניות
מכשירים עם ווסת מהירות רגיל	צלילים, משאבות, מופחים, מעליות ימנית	תופעות מעבר	תופעות מעבר
מכשירים עם ווסת מהירות "ללא הרמוניות"	מעליות חדשות	תופעות מעבר	תופעות מעבר
צמד משרדי ואלקטרוני	מחשבים, מדפסות, סטנדים, מכסים	הרמוניות, תופעות מעבר	תופעות מעבר
תאורה	LED	הרמוניות, תופעות מעבר	תופעות מעבר, הרמוניות
מערכות גילוי כיבוי אש		הרמוניות, תופעות מעבר	תופעות מעבר
טעינת רכבים		הרמוניות, תופעות מעבר	תופעות מעבר, הרמוניות

דקדק
Power Quality Doctor

Copyright © Power Quality Doctor

88

הרמוניות ותופעות מעבר בתשתיות

שם	הפרשת שמיצור	הפרשת שמדיקות ל	הערות
שאי	-	הרמוניות	
כבלים ופסי בצורה	-	הרמוניות, תופעות מעבר	
גנרטור	מגבר הרמוניות	הרמוניות, תופעות מעבר	סיכון הרמוניות ותופעות מעבר מאפשר הגדלת ההעמסה
אל-פסק	הרמוניות, תופעות מעבר	תופעות מעבר	
אל-פסק "ללא הרמוניות"	תופעות מעבר, הרמוניות	תופעות מעבר	שיעור הרמוניות המותר – כאשר העומס לא יארי
קבלים ללא משקלים	מגבר הרמוניות	הרמוניות, תופעות מעבר	כיום הרדישה נוספה משמעותית
קבלים עם משקלים	תופעות מעבר	תופעות מעבר	כיום הרדישה נוספה משמעותית
קבלים עם משקלים פחות אלקטרוני	-	תופעות מעבר	כיום הרדישה נוספה משמעותית

דקדק
Power Quality Doctor

Copyright © Power Quality Doctor

87

המלצות למתקן ק"ם

בכל תקלה יש לבצע את השלבים הבאים:

- איסוף נתונים מאנליזרים קיימים
- מדידת איכות חשמל
 - משך הבדיקה בין שעה לחדש, בתלות בתדירות הבעיה
 - בדיקה במצבים משתנים – עומסים, קבלים, גנרטור
- סינון הנתונים ממקורות המידע השונים
- ניתוח ואיתור הבעיה
- בחירת ואיפיון פיתרון
- יישום הפיתרון הנבחר

או פשוט....

דקדק
Power Quality Doctor

Copyright © Power Quality Doctor

90

המלצות בשלב התכנון

- התייחסות לאיכות החשמל בשלב התכנון חוסכת בעיות ועולות בשלב ההקמה והתפעול
- שקיעת מתח
 - לדאוג אמצעי התנעה לכל עומס מ-50 ק"ו-אט ומעלה
 - להתקין אנליזר בכניסה, הסוללת רישום אצות גיל מתח חום (מסלול לשפר הגדרות יצרן)
- הרמוניות
 - ביצוע סימולציה או הערכה למצב ההרמוניות הצפוי, והתאמת מסננים במידת הצורך
 - חוקר מוליך האסס בחוקר מוליך הפאזות
 - מתן דגש לגנרטור – יכולת עבודה והעמסה
 - לכלול במפרט בדיקת איכות חשמל והרמוניות עם השלמת המתקן
- תופעות מעבר
 - להקפיד על סיכון והארכה בהתאם להוראות היצרנים
 - להתקין מסנן תופעות מעבר במעלית (כול ווסת מהירות AFE), ובמקרים עתירי תאורה
- מקדם הספק
 - במידה שיש כמות גדולה של תאורת LED – יתכן מקדם הספק קבולי נדרש מסך הרמוניות אקטיבי
 - אם נדרשים קבלים – תובה שימוש במשקלים

דקדק
Power Quality Doctor

Copyright © Power Quality Doctor

89



ספק
Power Quality Doctor

תודה על ההקשבה

מוזמנים להירשם לעדכונים באתר

אמיר ברושי

Power Quality Doctor

www.pqdoc.com 052-6347737

linkedin.com/company/pqdoc 09-7433377

facebook.com/PQDoc amir@pqdoc.com

Copyright © Power Quality Doctor