

LISTEN.
THINK.
SOLVE.®

Měniče a jejich vliv na vyšší harmonické v síti

Petr Drahota
Commercial Engineer Drives



PUBLIC

I



Allen-Bradley • Rockwell Software

Rockwell
Automation

LISTEN.
THINK.
SOLVE.®

Kvalita elektrické energie



PUBLIC



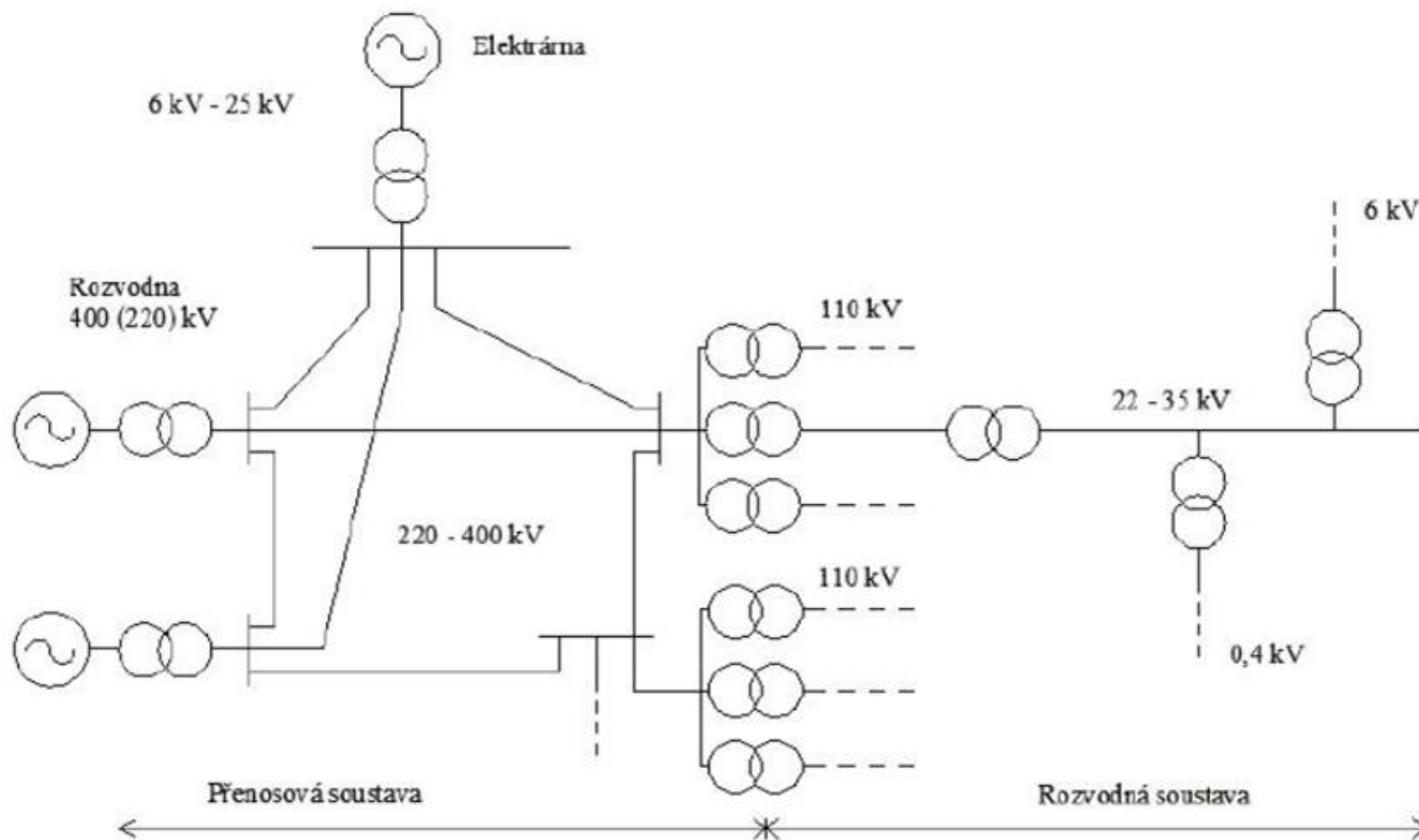
Allen-Bradley • Rockwell Software

Rockwell
Automation

Základy – kvalita elektrické energie

Základní schéma soustavy

**Rockwell
Automation**

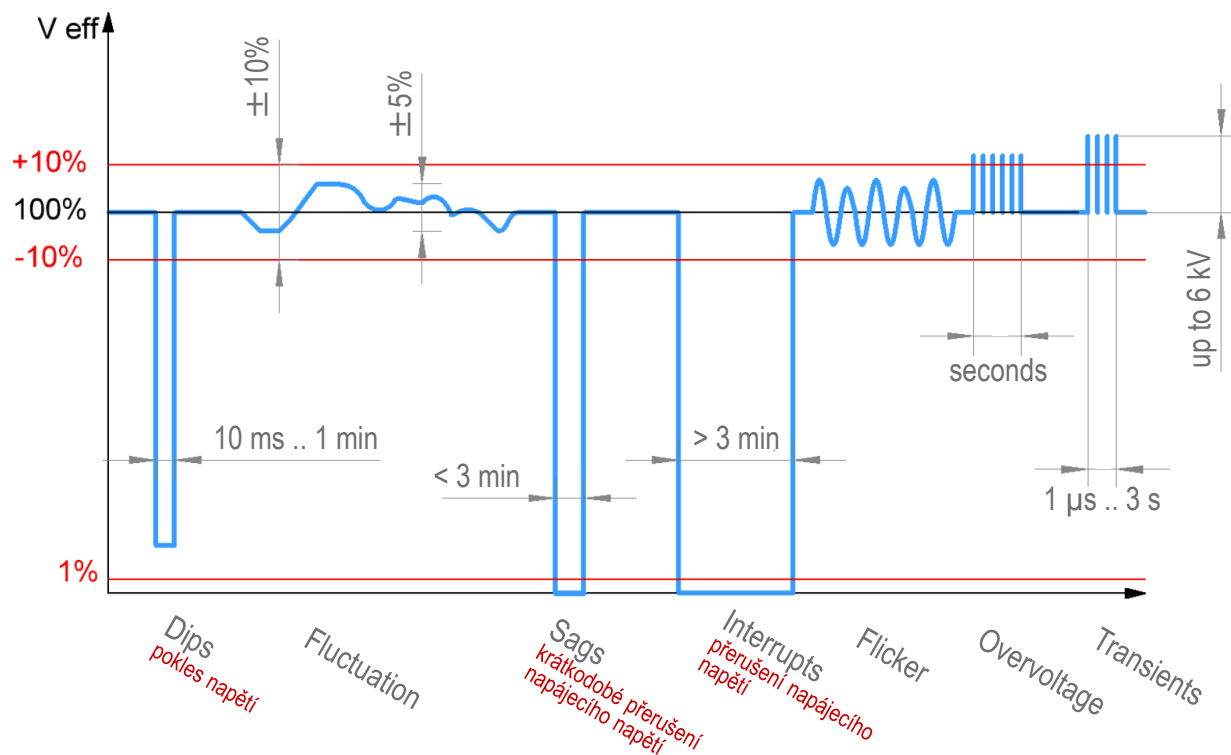


Obrázek 1 Struktura elektrizační soustavy [2]

Základy – kvalita elektrické energie

Základní pojmy

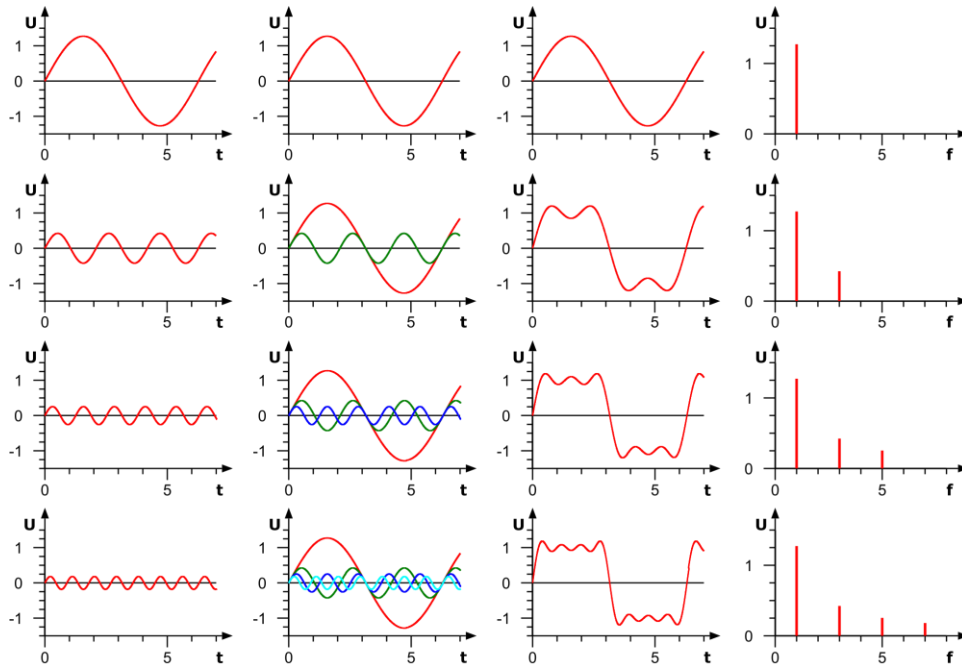
■ Anglické termíny pro sjednocení



Základy – kvalita elektrické energie

Harmonické složky

- Spektrální rozložení signálu jako součet jednotlivých složek



$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin(n\pi t / T)$$

f(t) time domain function

n harmonic number (only odd values of **n** are required)

A_n amplitude of the nth harmonic component

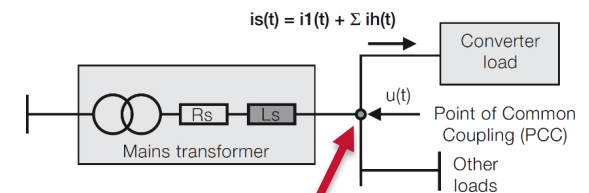
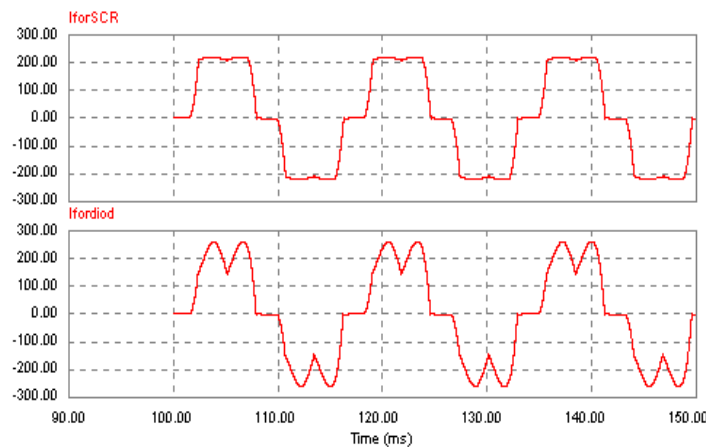
T length of one cycle in seconds

Základy – kvalita elektrické energie

Harmonické proudy

Rockwell
Automation

- Zkreslení základní sinusovky
 - Způsobené nelineárními spotřebiči, v našem případě usměrňovači
- Tyristorový 6P můstek
- Diodový 6P můstek
- Pouze ztráty



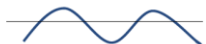
nejdůležitější
místo



Základy – kvalita elektrické energie

Vyšší harmonické

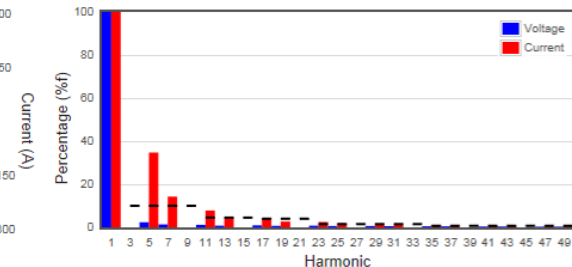
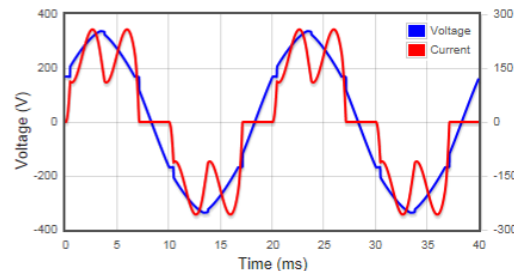
■ Sudé harmonické



■ Liché harmonické



pulsy	vzorec	vliv harmonických
n	$h = (n \times p) \pm 1$	
1	$h = (n \times 1) \pm 1$	2, 3, 4, 5, 6, 7
2	$h = (n \times 2) \pm 1$	3, 5, 7, 9
6	$h = (n \times 6) \pm 1$	5, 7, 11, 13, 17, 19
12	$h = (n \times 12) \pm 1$	11, 13, 23, 25, 35, 37
18	$h = (n \times 18) \pm 1$	17, 19, 35, 37
24	$h = (n \times 24) \pm 1$	23, 25, 47, 49



Vyšší harmonické

Problémy způsobené harmonickými proudy

**Rockwell
Automation**

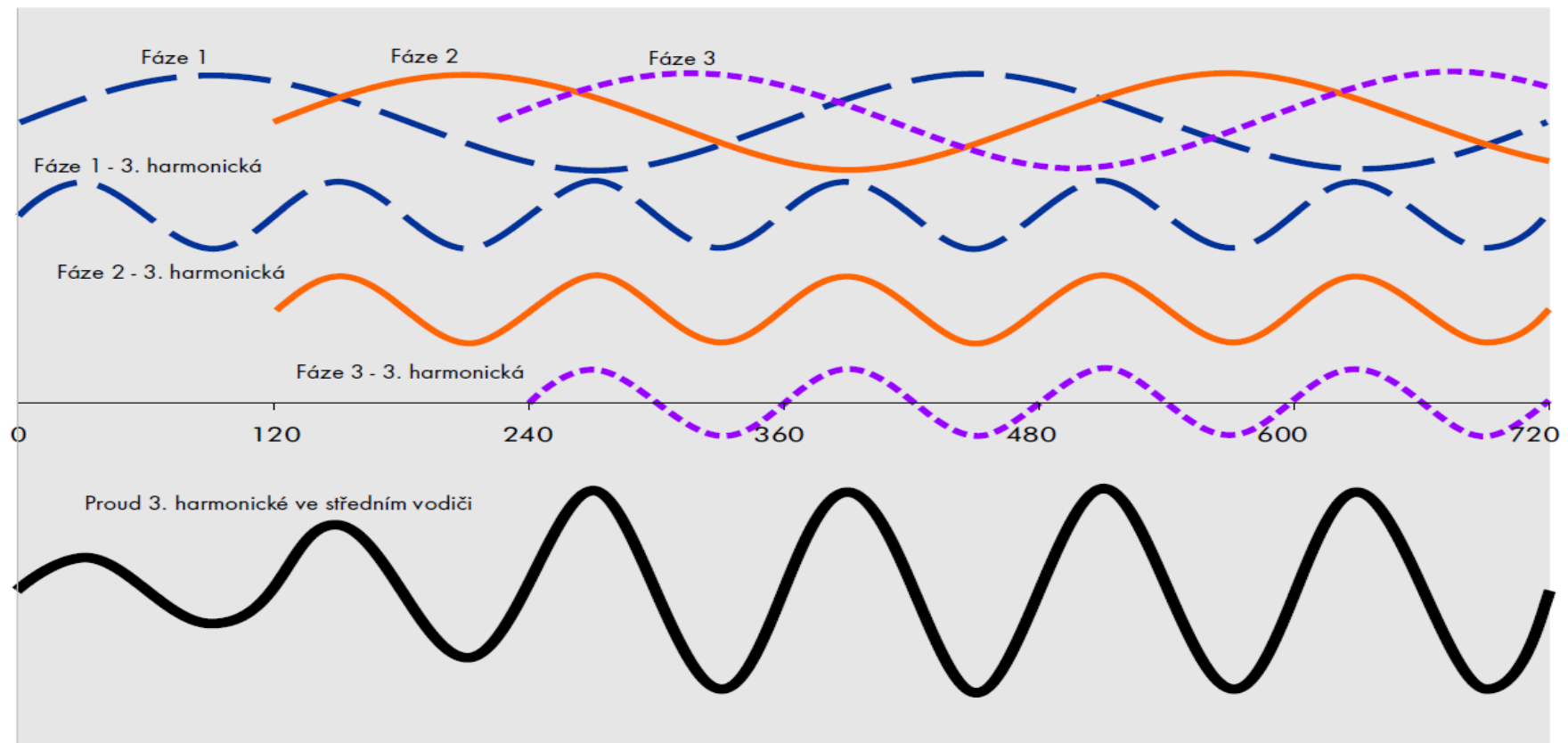
- přetížení středního vodiče
- přehřátí transformátorů
- rušení při spínání vypínačů
- přetěžování kompenzačních kondenzátorů
- skinefekt



Vyšší harmonické

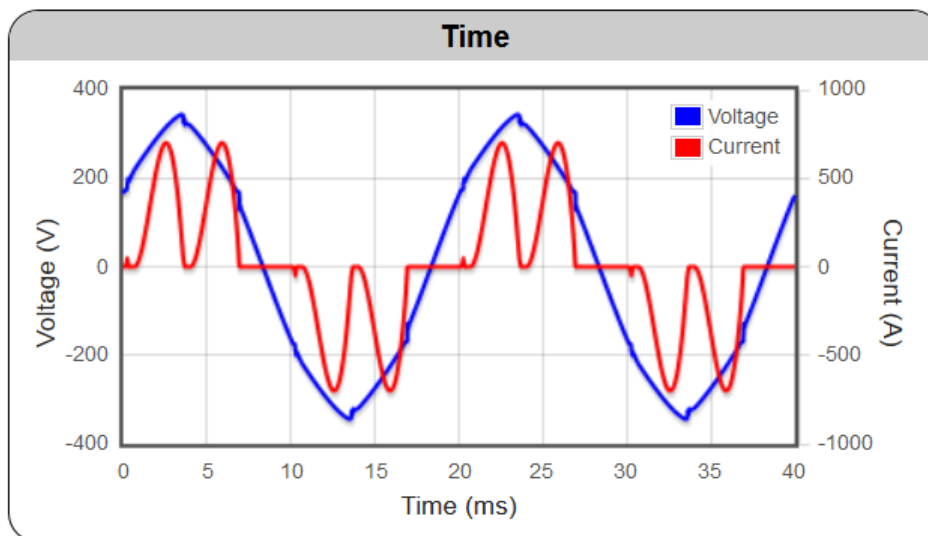
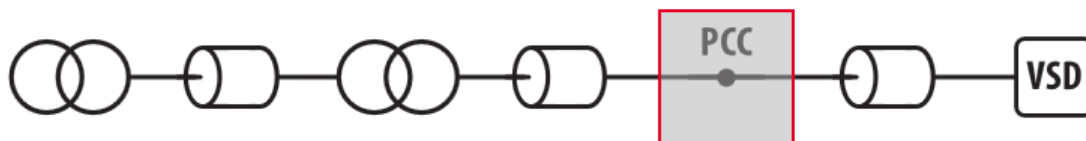
Přetížení středního vodiče

**Rockwell
Automation**



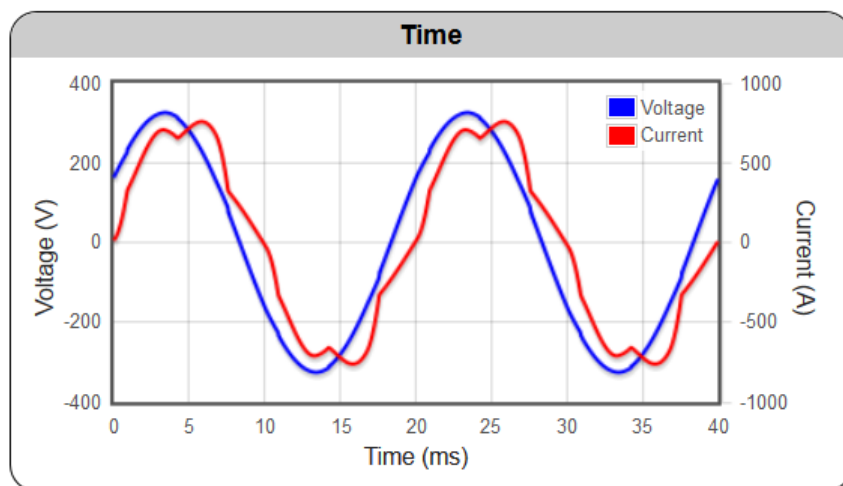
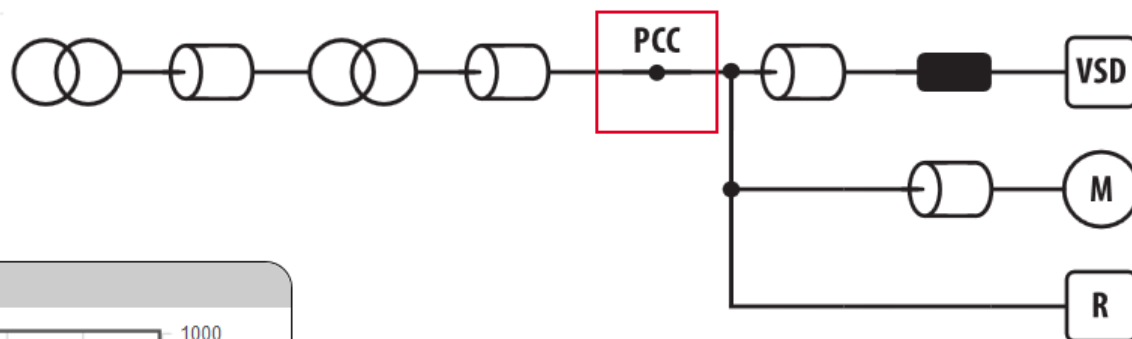
Vyšší harmonické

Vliv proudových harmonických na napětí



Vyšší harmonické

Vliv proudových harmonických na napětí



Vyšší harmonické

Problémy způsobené harmonickými napětími

- harmonické zkreslení napětí
- přetížení indukčních motorů
- poruchy při průchodu nulou
- interference s telekomunikačními zařízeními, HDO a podobně

Celkové harmonické zkreslení

Vzorce ☹

**Rockwell
Automation**

- Total harmonic current distortion THDi
 - někde THDI či THiD

$$THDi = \sqrt{\sum_{n=2}^{50} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} * 100\% = \frac{\sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + \dots + I_{50}^2}}{I_1} * 100\%$$

- $\leq 10\%$ skvělé hodnoty bez rizika poškození zařízení
- 10 to 50% významný podíl harmonických složek, nutno uvážit ztráty, popř. kontrola dimenzování N
- $\geq 50\%$ velké zkreslení, analýza a případně korekční zařízení (filtry apod.)

Celkové harmonické zkreslení

Vzorce ☹

- Total harmonic voltage distortion THDu
 - někde THvD či THuD
 - výsledek průchodu harmonických proudů soustavou s jejími impedancemi

$$THDu = \sqrt{\sum_{n=2}^{50} \left(\frac{U_n}{U_N}\right)^2} * 100\% = \frac{\sqrt{U_5^2 + U_7^2 + U_{11}^2 + U_{13}^2 + \dots + U_{50}^2}}{U_N} * 100\%$$

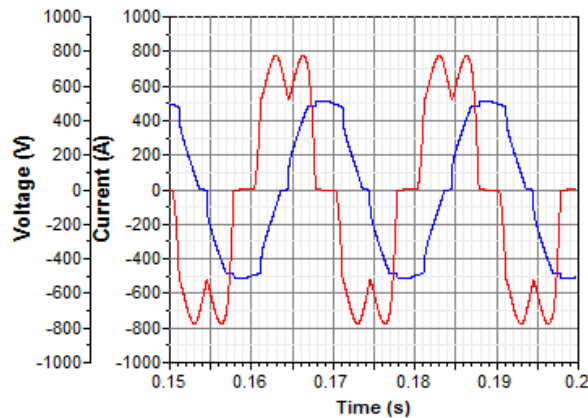
- $\leq 5\%$ normální stav
- 5 to 8% zvýšený podíl harmonických, možné selhání citlivých přístrojů
- $\geq 8\%$ velké zkreslení, analýza a případně korekční zařízení (filtry apod.)

Celkové harmonické zkreslení

Vzorce ☹ porovnání dvou scénářů

Drive 1 Input

Waveform



Performance Measures

VRMS	380.0
VTHD	8.63 %
IRMS	543.8
IFUND	523.9
IHARM	145.5
ITHD	27.77 %
ISC/ILOAD	76.7

IEEE Standards

✓	Dedicated	Pass
✗	General	Fail
✗	Special	Fail

Drive Ratings

Type	6-Pulse
Total HP Rating	500 hp
% Load	95.0 %
DC Link Choke	Yes
Line Reactor / Filter	No Line Reactor or Filter
Distance to Transformer B	350 ft

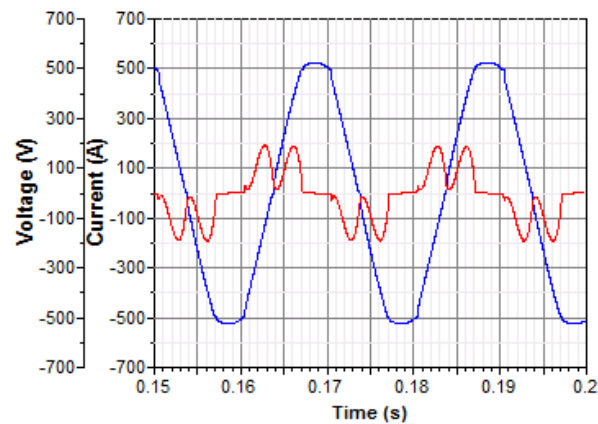
<http://webdc.transim.com/rockwell/>

Celkové harmonické zkreslení

Vzorce ☹ porovnání dvou scénářů

Drive 1 Input

Waveform



Performance Measures

V _{RMS}	383.2
V _{THD}	3.25 %
I _{RMS}	100.9
I _{FUND}	84.6
I _{HARM}	54.8
I _{THD}	64.81 %
I _{SC} /I _{LOAD}	474.8

IEEE Standards

✓	Dedicated	Pass
✗	General	Fail
✗	Special	Fail

Drive Ratings

Type	6-Pulse
Total HP Rating	500 hp
% Load	15.0 %
DC Link Choke	Yes
Line Reactor / Filter	No Line Reactor or Filter
Distance to Transformer B	350 ft

<http://webdc.transim.com/rockwell/>

Celkové harmonické zkreslení

Vzorce ☹

**Rockwell
Automation**

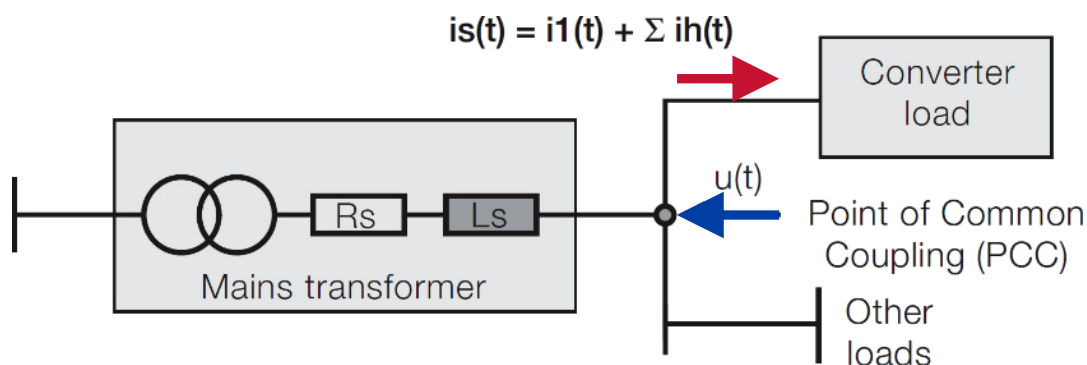
- Total demand distortion TDD
 - uvažuje max. proud zátěže (různě definovaný)
 - Při 100% : $TDD_i = THD_i$

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=40} I_n^2}}{I_L} * 100\%$$

- I_L = Maximum během daného intervalu
- typicky 15 - 30 minut, IEEE 519 rok*, někde 100% proudu obvodu

- Proudové vs napěťové zkreslení

Harmonické proudy způsobují zkreslení napětí



- Jednoduché pravidlo
 - vyšší impedance (dlouhé a poddimenzované kabely, transformátory) ...
 - ... nižší zkratové proudy
 - ... vyšší zkreslení

LISTEN.
THINK.
SOLVE.®

Normy a standardy



PUBLIC

I



Allen-Bradley • Rockwell Software

Rockwell
Automation

- Normy a standardy pro kvalitu elektrické energie
 - EN 50160 Charakteristiky napětí elektrické energie z veřejné sítě
 - **IEEE 519** Obdobné, ale ukládá povinnosti i spotřebitelům
- Normy a standardy pro zařízení
 - **IEC 61000-3-2** nn zařízení do 16 A
 - **IEC 61000-3-12** nn zařízení 16 A až 75 A
 - **IEC 61000-3-4** doporučení pro zařízení nad 75 A

- Rozsah
 - Malá elektrická zařízení $\geq 220\text{V}$ a proud $\leq 16\text{ A}$
- Rozdělení
 - **Třída A:** domácí zařízení, třífázová zařízení
 - Třída B: nářadí a svářečky
 - Třída C: osvětlení
 - Třída D: specifická zařízení s výkonem $< 600\text{ W}$ (PC, TV, malé chladničky)
- IEC EN 61000-3-2 str. 21

- Rozsah

- Zařízení s napájecím napětím 240 V jednofázově a do 690V třífázově, proud ≥ 16 A a ≤ 75 A, připojená přímo k veřejné síti

- úrovně

- Dovolené úrovně harmonických proudu závisí na $R_{sce} (I_{SC}/I_{Load})$ [zkratový proud/proud zátěže]
- Nejsou uvedeny napěťové harmonické

- EN 61000-3-12 str. 15

■ Poznámky

- platí při přímém připojení na veřejnou síť. Pokud je zařízení odděleno od veřejné sítě trafem, nejde o připojení na veřejnou síť
- čili většina průmyslových instalací nemusí být normou dotčena
- měniče s DC tlumivkou většinou spadají do tabulky 4, $R_s > 120$; ($I_5 / I_1 < 40$), a to splňují
- malé měniče bez DC tlumivky splní limity s 3% tlumivkou
- pro danou instalaci je nutné ověřit výše uvedenou podmínku $R_s > 120$

- norma nemá za úkol stanovit meze harmonických, ale doporučit zkušební postupy a jejich vyhodnocení pro zařízení, na které se nevztahují předchozí normy
- obdobné tabulky jako v předchozích normách, ale důležitá poznámka:

překračuje-li vstupní proud zařízení 75 A, může dodavatel elektřiny připustit připojení zařízení na základě dohodnutého činného příkonu instalace odběratele. V tomto případě se aplikují místní požadavky dodavatele elektřiny.

▪ Rozsah

- doporučení pro projektování a stavbu rozvodných sítí
 - dodavatel musí dodávat energii v předepsané kvalitě
 - spotřebitel je odpovědný za svoje zařízení a jeho vliv na síť

▪ Třídy

- Speciální instalace
 - letiště, nemocnice apod.
- Standardní síť
- jednoúčelové instalace
 - průmyslové instalace s měniči

▪ zkreslení v PCC

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 kV and below	3.0	5.0
69.001 kV through 161 kV	1.5	2.5 ^{5.0}
161.001 kV and above	1.0	1.5

NOTE: High-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user.

■ THDi (Standardní síť)

- opět závisí na zkratových poměrech (I_{sc}/I_L)
 - větší I_L : přísnější limity oproti EN
 - menší I_{sc} : přísnější limity oproti EN
- přísnější i u harmonických vyšších řádů

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.						
Current distortions that result in a dc offset, e.g. half-wave converters, are not allowed.						
* All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .						
Where						
I_{sc}	= maximum short-circuit current at PCC.					
I_L	= maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.					
TDD	= Total demand distortion (RSS), harmonic current distortion in % of maximum demand load current (15 or 30 min demand).					
PCC	= Point of common coupling.					

LISTEN.
THINK.
SOLVE.®

Základní topologie měničů



PUBLIC

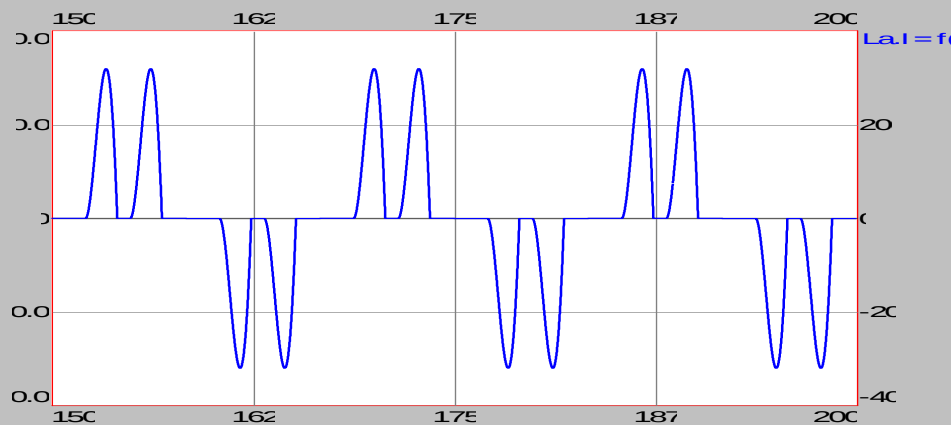
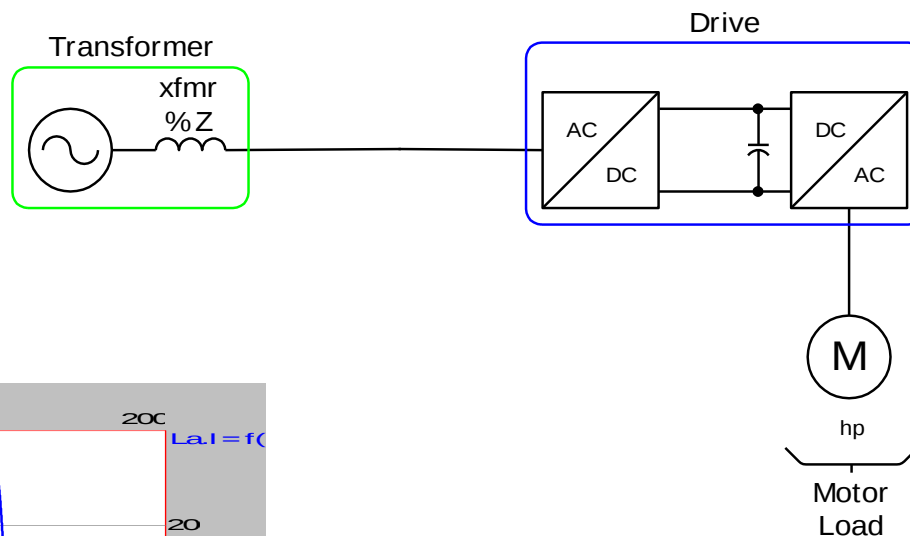


Allen-Bradley • Rockwell Software

Rockwell
Automation

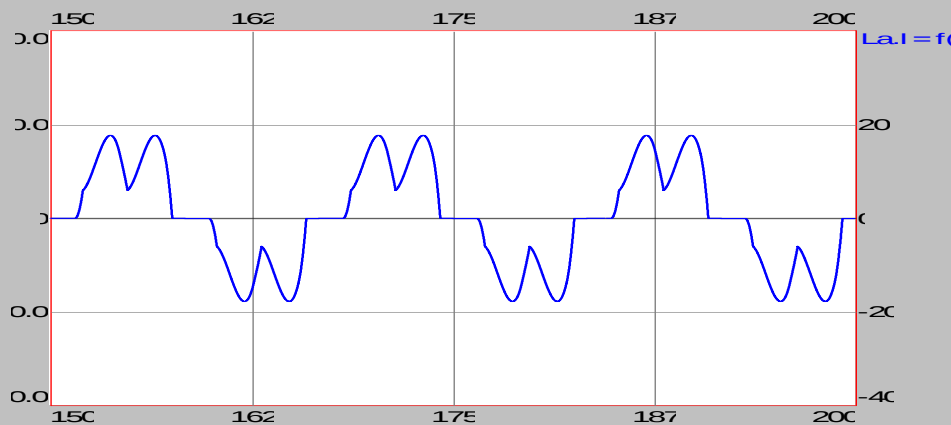
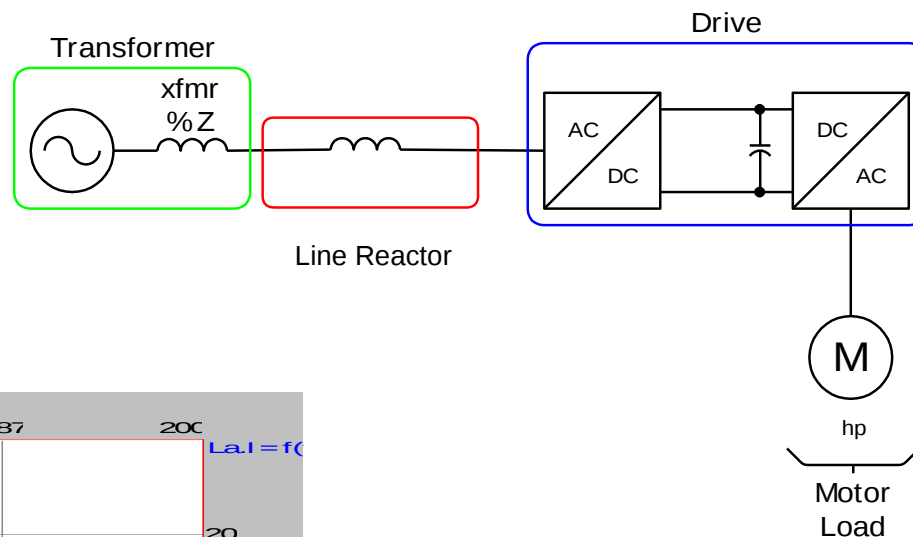
Měniče bez DC tlumivky (DC Link)

- Typicky THDi kolem 80%
- citlivé na přepětí
- Malé PF4x, PF520
- Větší měniče už mají DC Link



Měniče bez DC tlumivky (DC Link), s tlumivkou na vstupu

- Typický THDi
mezi 30 - 45%

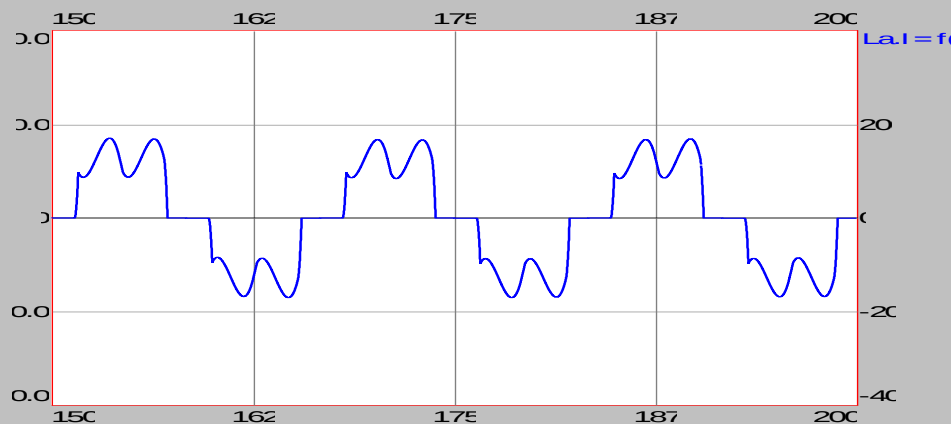
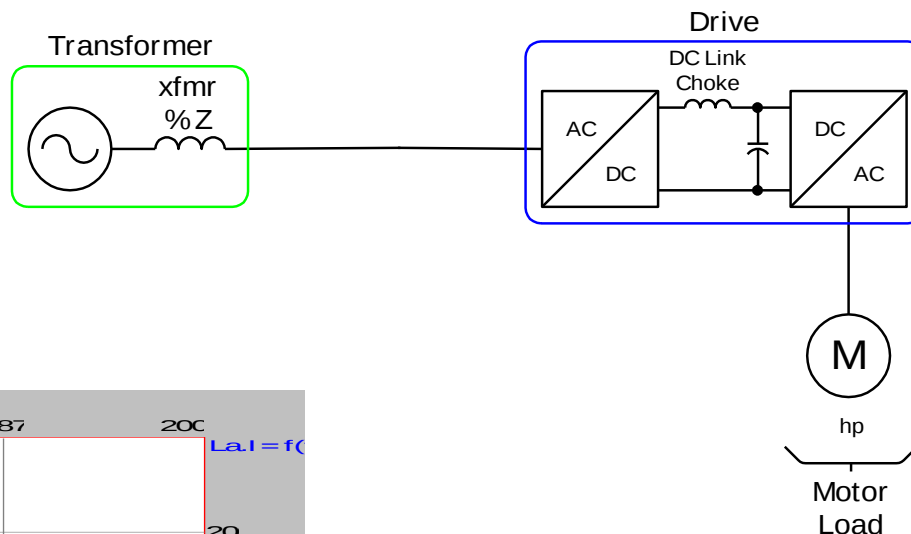


Copyright © 2008 Rockwell Automation, Inc. All rights reserved.

3% LR

Měníče s DC tlumivkou (DC Link)

- Typický THDi od 30 do 40%
- odolné i proti přepětovým špičkám



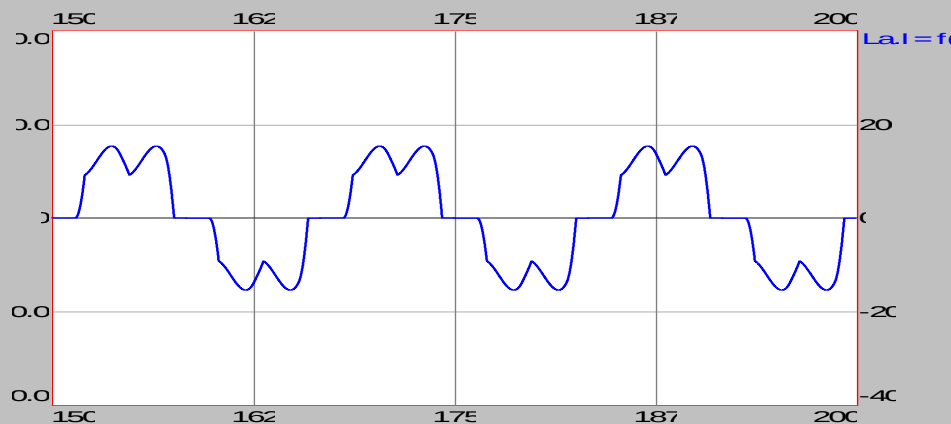
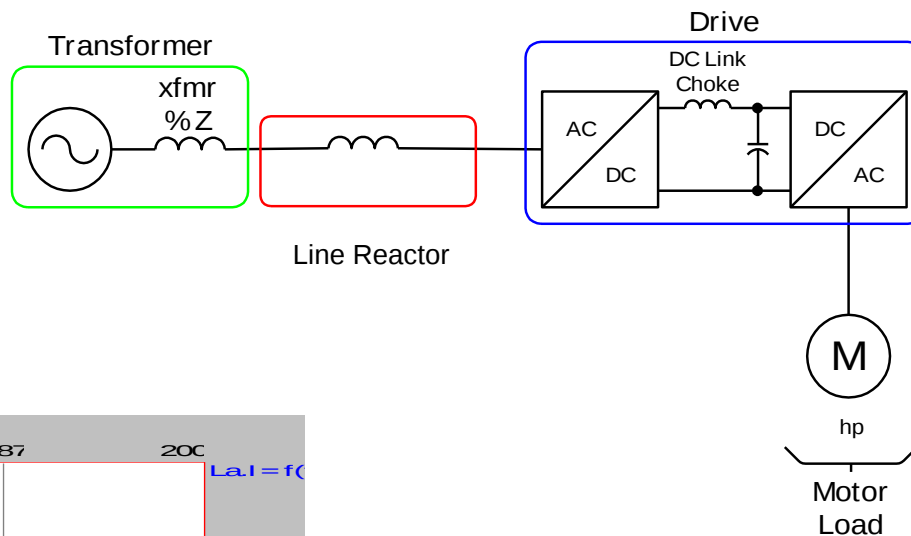
Copyright © 2008 Rockwell Automation, Inc. All rights reserved.

- všechny PF700, 750

Měniče s DC tlumivkou (DC Link) a s tlumivkou na vstupu

Rockwell
Automation

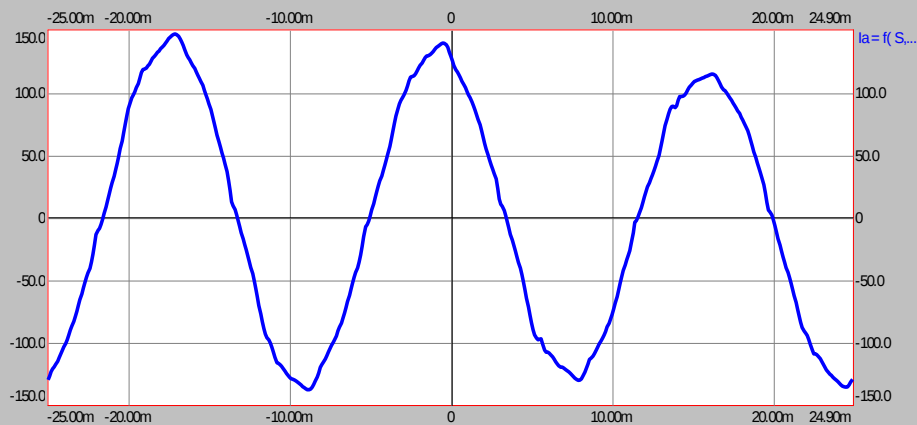
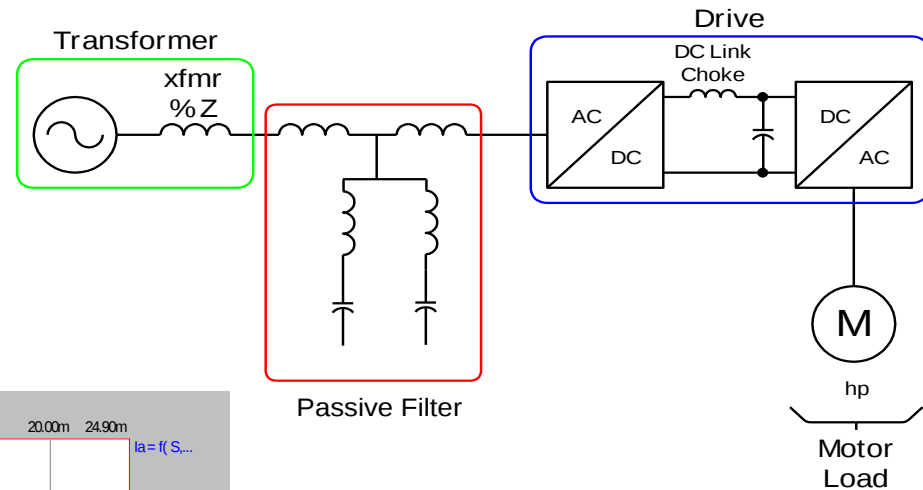
- Typický THDi 20 - 35%



3% LR

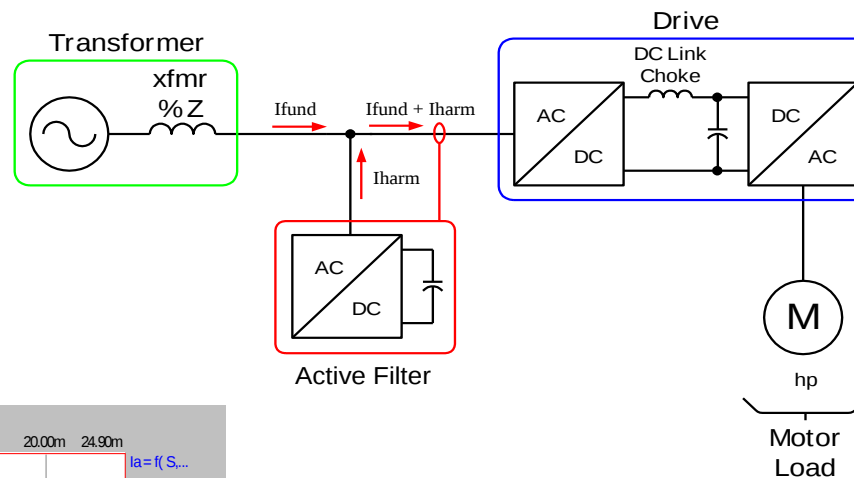
Passive Harmonic Filter

- Typicky THDi 4 - 10%



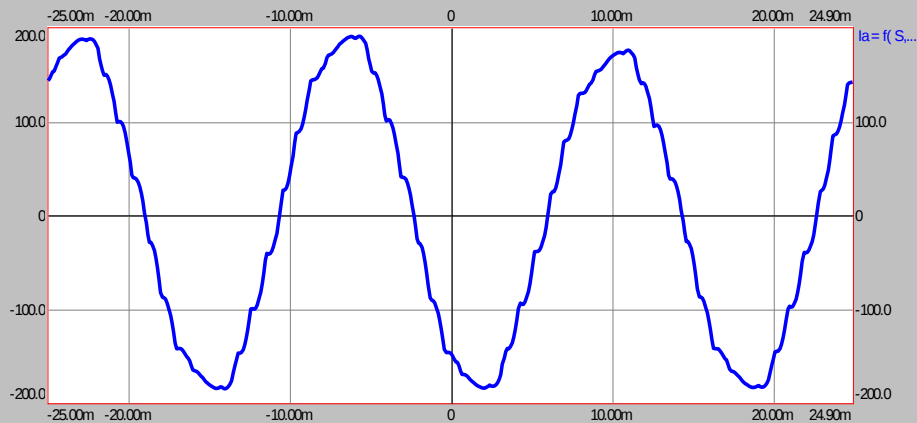
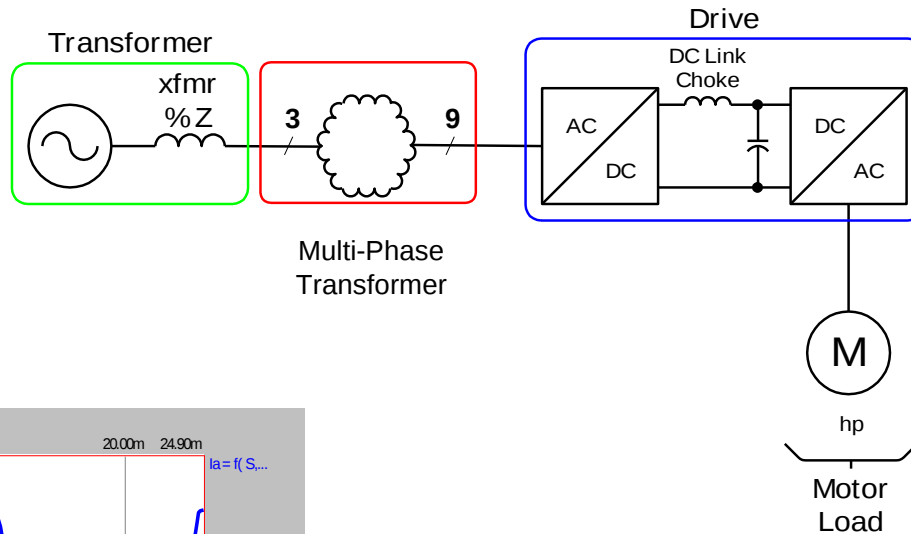
Active Harmonic Filter

- Typicky THDi 3 - 6%



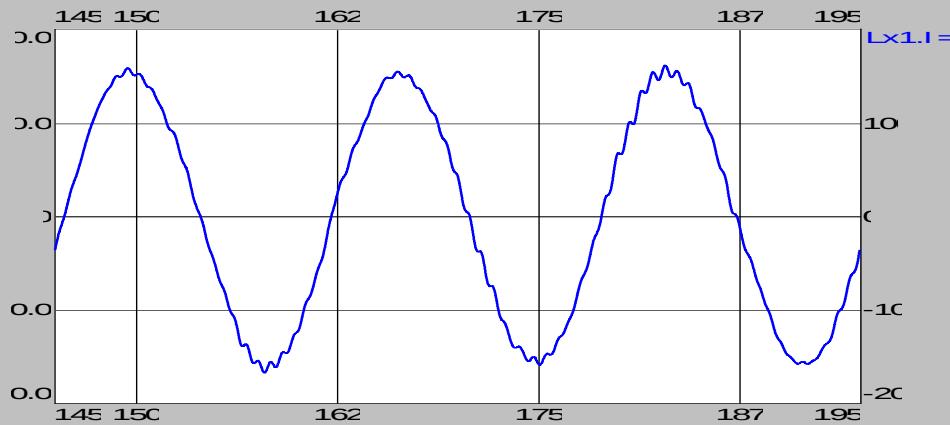
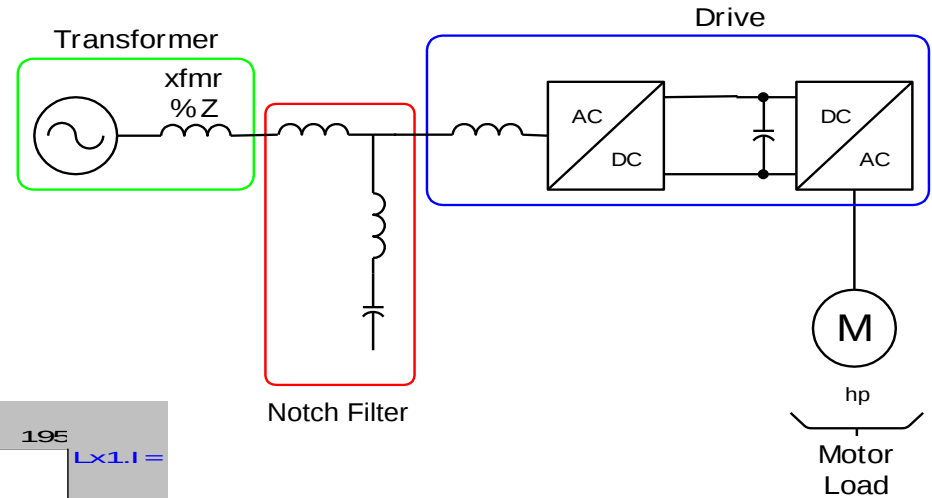
Vícepulzní zapojení

- 12Puls
Typický THDi 9 - 12%
- 18Puls
Typický THDi 4 - 5%



Active Front-End

- Typicky THDi 3 - 5%
- Rekuperace



LISTEN.
THINK.
SOLVE.®

Zařízení pro omezení harmonických



PUBLIC

I



Allen-Bradley • Rockwell Software

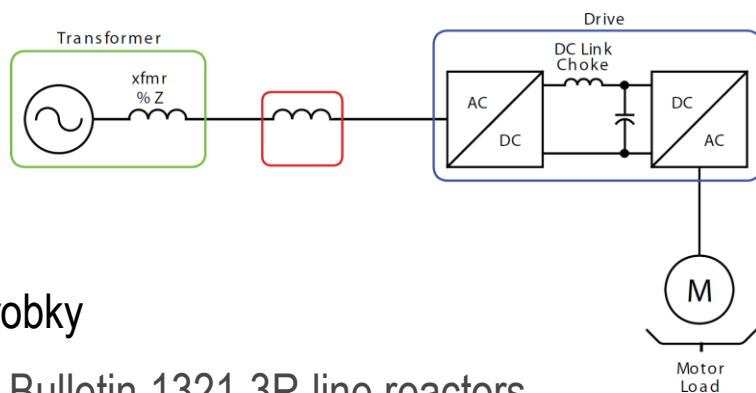
Rockwell
Automation

Možnosti omezení

Tlumivky

■ Funkce

- vyšší impedance obvodu omezuje harmonické proudy



■ Výrobky

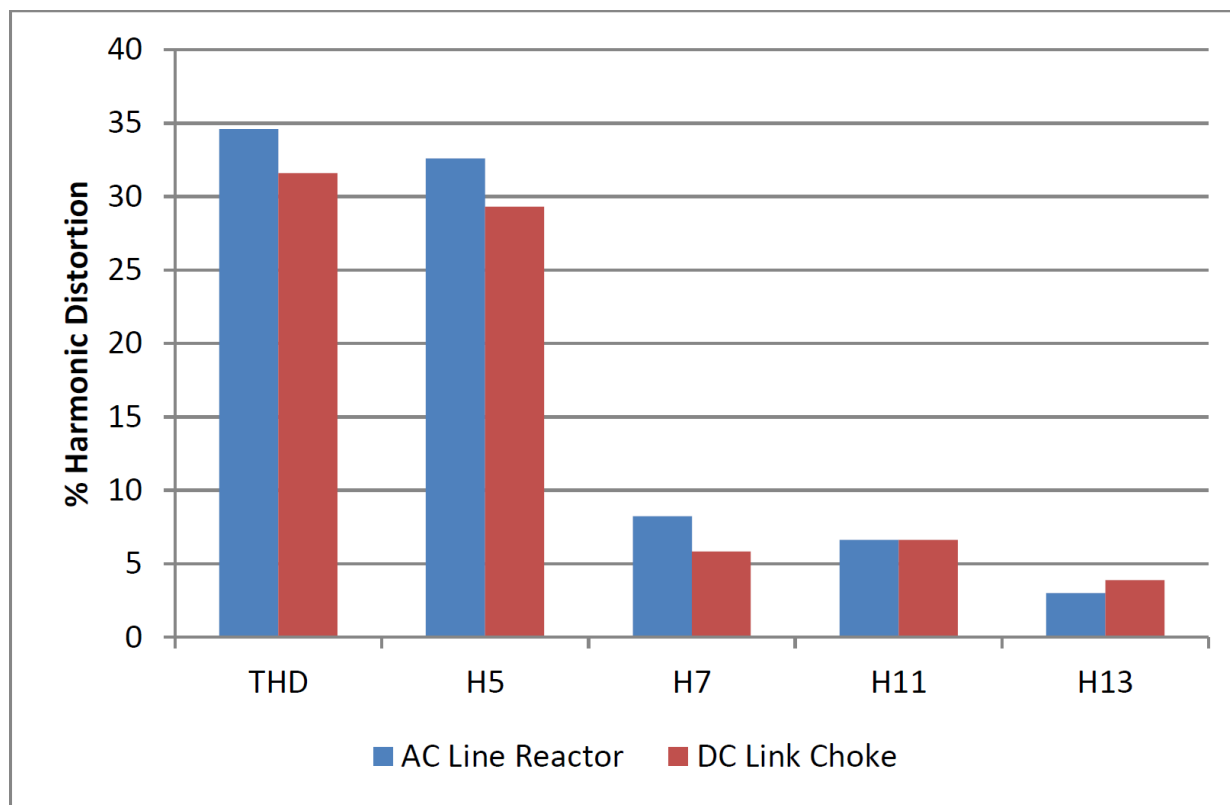
- Bulletin 1321-3R line reactors
- Schaffner RWK AC reactors



Možnosti omezení

DC Link versus tlumivka na vstupu

**Rockwell
Automation**

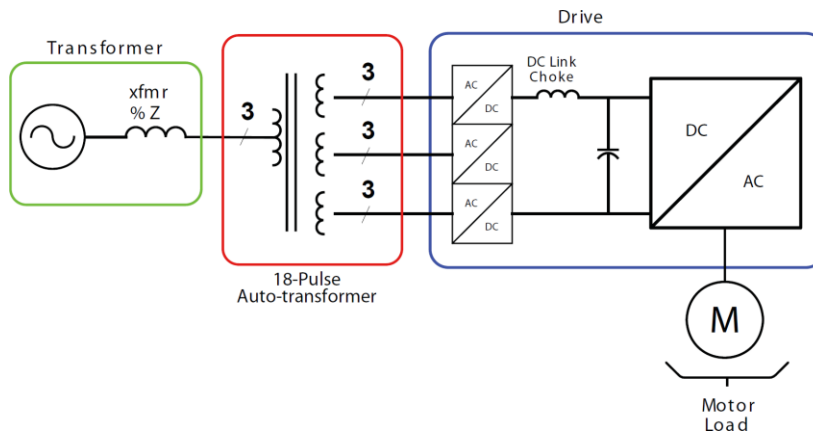


Možnosti omezení

Více pulzní zapojení

▪ Funkce

- fázový posuv mezi jednotlivými sekundárními vinutími
- na primární straně se harmonické vyruší
- 12, 18 až 24-pulzní zapojení



Možnosti omezení

12-Pulzní zapojení

**Rockwell
Automation**

■ Výrobky

- transformátory nejsou standardní produkt RA pro EU trh
- PowerFlex SCR
- [12-Pulse selection and installation guidelines](#)



Možnosti omezení

12-Pulzní zapojení

**Rockwell
Automation**

■ Výhody

- znatelné omezení harmonických

Typ	THDi	THDu $R_{SC} = 20$	THDu $R_{SC} = 100$
6-P	30%	10%	2%
12-P	10%	6%	1.2%

- robustní konstrukce
- jednoduchá instalace
- vysoká účinnost

■ Nevýhoda

- transformátor

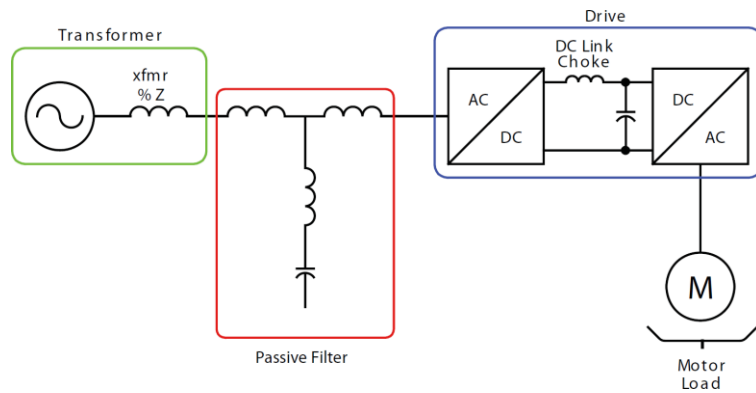


Možnosti omezení

Pasivní filtry

■ Funkce

- LC obvody, laděné na každou harmonickou



Možnosti omezení

Pasivní filtry

**Rockwell
Automation**

■ výrobky

- Schaffner FN 3410/HV and FN 3412
 - 500V/690V, max. 160 kW
 - Nově i 500V, max. 400 kW
 - optimalizováno pro měniče s DC tlumivkou
- MTE Matrix AP
 - 500V/600V, max. 1200 A
 - vyšší účinnost u malých zátěží



Možnosti omezení

Pasivní filtry

■ Výhody

- vysoké potlačení harmonických
 - THDi 10..16%
 - až k 5% THDi v kombinaci s tlumivkou
- rozměry, cena
- pasivní komponenty

■ Nevýhody

- přídavné ztráty (teplo)
- Design ovlivněn situací v místě instalace



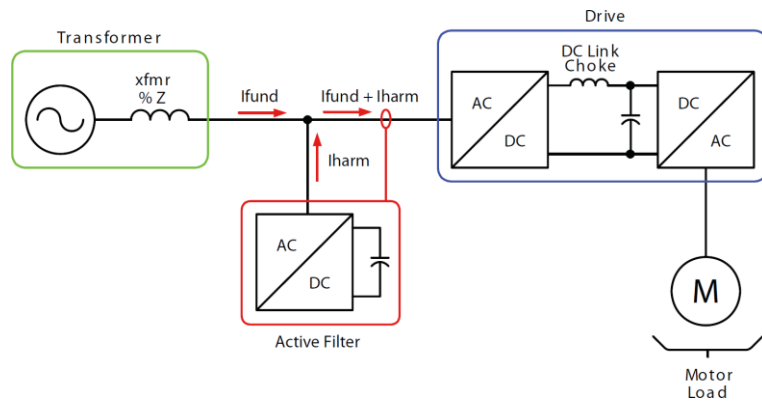
Možnosti omezení

Aktivní filtry

**Rockwell
Automation**

■ Funkce

- blok výkonové elektroniky, připojený sériově či paralelně k zátěži
- detekce vytvářených harmonických
- injektování proudu harmonických v protifázi



Možnosti omezení

Aktivní filtry

■ Produkty

- Schaffner [FN3420/HV](#) / [FN3430](#)
 - 480V/690V, do 300 A kompenzačního proudu
- Comsys [ADF P100](#) / [ADF P300](#)
 - 480V/690V, do 450 A kompenzačního proudu
 - cena

■ Výběr

- podle proudu vyšších harmonických v PCCC
- nezbytná podrobná specifikace lokálních poměrů v síti



Možnosti omezení

Aktivní filtry

**Rockwell
Automation**

■ Výhody

- automatická kompenzace ~ 100%
- paralelní filtr nelze přetížit
- kompaktní rozměry
- jednoduchá instalace

■ Nevýhody

- snížení celkové účinnosti
- elektronické zařízení
- cena



- Funkce

- aktivní usměrňovač
v podstatě střídač standardního měniče pracující v inverzním režimu jako usměrňovač



Možnosti omezení

Active Front-End

**Rockwell
Automation**

■ Výrobky

■ PowerFlex 700AFE

- 460, 1300 A_{DC} @ 400..480 V
- 325, 1030 A_{DC} @ 500..690 V
- Rittal TS8 IP20

■ PowerFlex AFE

- 460, 1300 A_{DC} @ 400..480 V
- 325, 1030 A_{DC} @ 500..690 V
- CENTERLINE 2500 IP20
- MCC sběrnice pro PowerFlex 755 Hi Hp



Možnosti omezení

Active Front-End

**Rockwell
Automation**

- Výběr
 - podle proudu na DC sběrnici
- Výhody
 - regenerace energie
 - nízký obsah harmonických
 - splňuje IEEE519, většinou mnohem lepší
 - účinník blízký jedné



Možnosti omezení

Active Front-End

**Rockwell
Automation**

■ Výhody

- napěťový boost
 - možnost provozu 480/690 VAC motoru na síti 380/460 VAC
 - ochrana proti krátkodobým výpadkům

■ Nevýhody

- nižší účinnost
- elektronické zařízení
- rozměry
- cena



Rockwell Automation simulátory

- <http://webdc.transim.com/rockwell//>

Schaffner PQS

- <http://pqs.schaffner.com/index.php>