

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vlivy měničů kmitočtu velkých výkonů na harmonická
napětí v průmyslovém závodě**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef BREJŠA**
Osobní číslo: **E17N0001K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Vlivy měničů kmitočtu velkých výkonů na harmonická napětí v průmyslovém závodě**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování

Provozem měničů výkonů nad MW lze očekávat, že může dojít ke zkreslení napětí vyššími harmonickými. Proto je nutné zajistit, že nedojde jejich provozem k nežádoucímu zkreslení.

1. Popište situaci průmyslového závodu s ohledem na polovodičové měniče. Soustředte se na technologie s velkými výkony, a to jak s měniči, tak i bez měničů. Popište možné ovlivňování z případných dalších paralelních odběrů harmonických proudů (trakce).
2. Nakreslete náhradní schéma soustavy s ohledem na výpočet impedance a harmonická napětí. Vypočítejte impedanci soustavy ve zvolených bodech jako funkci frekvence.
3. Vypočítejte harmonické proudy vyšších řádů, které mohou velké měniče odebírat ze sítě. Respektujte soudobost a reálné zatížení jednotlivých měničů.
4. Vypočítejte harmonická napětí ve vybraných uzlech soustavy.
5. Provedte krátkodobá (synchronizovaná) měření harmonických napětí ve vybraných uzlech. Měření proveďte pro variantu s vypnutými měniči a se zapnutými měniči. Dle možnosti proveďte tato měření pro rozdílné podmínky provozu (léto x zima). Porovnejte výsledky měření s výpočty. Výsledky porovnejte s příslušnými normami.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Kůs,V., Hammerbauer,J., Skála, J.: Elektromagnetická kompatibilita výkonových systémů. BEN., Technická literatura, 2013

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



L.S.



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na šíření harmonických napětí vyšších řádů v elektrické síti průmyslového závodu, způsobené používáním frekvenčních měničů velkých výkonů.

Diplomová práce je rozdělena do několika částí, v první části jsou uvedeny základní vztahy a definice nízkofrekvenčního rušení, základní popis průmyslového závodu od napájecího bodu, rozvod elektrické energie, po spotřebiče velkých výkonů.

V praktické části je proveden výpočet harmonických proudů vyšších řádů, které měniče velkých výkonů odebírají. V prostředí MATLAB-SIMULINK byl vytvořen model závodové sítě a pomocí něj byla vypočítána impedance sítě ve zvolených bodech a také harmonická napětí vyšších řádů.

Závěr práce se zabývá vyhodnocením naměřených hodnot, jejich porovnáním s normativními hodnotami a možnostmi eliminace těchto nežádoucích složek v napájecí síti.

Klíčová slova

Harmonická napětí vyšších řádů, harmonické proudy o vyšších řádech, frekvenční měnič, impedance sítě.

Abstract

The presented diploma thesis is focused on the propagation of higher order harmonic voltages in the electrical network of an industrial plant, which is caused by the use of high-power frequency converters.

The diploma thesis is divided into several parts. The first part contains the basic relationships and definitions of low-frequency interference, a basic description of the industrial plant from the supply point, electricity distribution, to high-power appliances.

In the practical part, the calculation of higher order harmonic currents, which are consumed by high power converters, is performed. In the MATLAB-SIMULINK environment, a model of the racing network was created and using it, the impedance of the network at selected points was calculated, as well as higher-order harmonic voltages.

The conclusion deals with the evaluation of measured values, their comparison with normative values and the possibility of eliminating these undesirable components in the power supply network.

Keywords

Higher order harmonic voltages, higher order harmonic currents, frequency changer, transformer, electrical network impedance.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 6. 6. 2020

Josef Brejša

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Václavu Kůsovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Také děkuji konzultantovi diplomové práce Ing. Davidu Pavelkovi za trpělivost a ochotu, kterou mi věnoval při řešení praktických záležitostí. Mé poděkování patří také rodině.

Obsah

ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	14
SEZNAM TABULEK	15
1 ZÁKLADNÍ VZTAHY A DEFINICE	16
1.1 NÍZKOFREKVENČNÍ RUŠENÍ	16
1.2 HARMONICKÉ PRŮBĚHY VYŠŠÍCH ŘÁDŮ	17
1.2.1 Vyjádření funkce Fourierovou řadou	17
1.2.2 Výkony v obvodech s nesinusovými průběhy	18
1.2.3 Celkové harmonické zkreslení	19
2 POPIS SITUACE PRŮMYSLVÉHO ZÁVODU	21
2.1 PŘEDSTAVENÍ SPOLEČNOSTI	21
2.2 NAPÁJENÍ ELEKTRICKOU ENERGIL	22
2.3 HLAVNÍ KOMPONENTY	23
2.3.1 Vysokonapěťové motory	23
2.3.2 Nízkonapěťové asynchronní motory ovládané frekvenčními měniči	28
2.3.3 Elektrická trakce	32
3 VÝPOČET IMPEDANCE SÍTĚ PRŮMYSLVÉHO ZÁVODU	33
3.1 TVORBA MODELU PRO VÝPOČET IMPEDANCE PRŮMYSLVÉ SÍTĚ	33
3.2 PRAVIDLA PRO VYTVOŘENÍ MODELU ZÁVODOVÉ SÍTĚ	34
3.3 VÝPOČET ZÁTĚŽÍ VYSOKONAPĚŤOVÝCH HLADIN	35
3.4 VÝPOČET ZÁTĚŽÍ NÍZKONAPĚŤOVÝCH HLADIN	42
3.5 CHARAKTERISTICKÉ IMPEDANCE ZAŘÍZENÍ PŘIPOJENÝCH V ZÁVODOVÝCH SÍTÍCH	45
3.5.1 Elektrické sítě s odporovou nebo induktivně-odporovou zátěží	45
3.5.2 Elektrické sítě s odporově-induktivní zátěží s kompenzací	46
3.5.3 Elektrické sítě s odporově-induktivní zátěží a s kompenzací připojenou přes vedení	46
3.6 VÝPOČET PARAMETRŮ V NÁHRADNÍM SCHÉMATU	46
4 HARMONICKÉ PROUDY NEPŘÍMÝCH MĚNIČŮ KMITOČTU S NAPĚŤOVÝM STRÍDAČEM	48
4.1 NEPŘÍZNIVÉ JEVY PŘI PROVOZU NAPĚŤOVÝCH MĚNIČŮ	48
4.2 ŠÍŘENÍ HARMONICKÝCH PROUDŮ V SÍTĚ	50
4.3 VÝPOČET HARMONICKÝCH PROUDŮ VYŠŠÍCH ŘÁDŮ	51
5 VÝPOČET A ZOBRAZENÍ HARMONICKÝCH NAPĚTÍ VYŠŠÍCH ŘÁDŮ	53
5.1 VÝPOČET HARMONICKÝCH NAPĚTÍ	53
6 MĚŘENÍ HARMONICKÝCH SLOŽEK	56
6.1 MĚŘENÍ HARMONICKÝCH SLOŽEK O VYŠŠÍCH ŘÁDECH	56
6.2 POPIS ANALYZÁTORU SÍTĚ EPPE CX	57
6.3 NAMĚŘENÉ HODNOTY URČENÝCH UZLŮ	58
7 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT S NORMOU	61
7.1 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT S NORMOU	61
7.2 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT S ČSN EN 61000-2-4	64
7.3 POROVNÁNÍ VÝPOČTENÝCH A NAMĚŘENÝCH HODNOT S NORMOU	67

ZÁVĚR	69
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	71
PŘÍLOHY	1

Úvod

Energetická náročnost podniků neustále roste. Z tohoto pohledu jsou v průmyslových a výrobních závodech energetické výdaje poměrně aktuálním tématem. Tyto náklady je nutné zahrnout do výrobního procesu. Proto se nabízí otázka, zda jsou tyto výdaje za energie účelně vynaložené. V průmyslových a výrobních podnicích jsou nejvýznamnější oblastí, kde lze uspořit nemalou část finančních prostředků, elektrické pohony. Většina výrobního procesu stojí právě na elektrických pohonech, tudíž tvoří největší podíl nákladů na výrobu. Optimálním řešením může být regulace elektrických motorů pomocí frekvenčních měničů.

Tato diplomová práce je zaměřena na šíření harmonických proudů a napětí vyšších řádů v napájecí síti průmyslového závodu. Provozem frekvenčních měničů velkých výkonů může dojít k ovlivnění napájecí sítě, a tím k nežádoucímu zkreslení. V okamžiku, kdy se stala elektrická energie zbožím, bylo nutné stanovit kritéria pro posuzování její kvality. V minulosti určovaly kvalitu elektrické energie pouze dva parametry, stabilita dodávaného napětí a kmitočet. Naproti tomu v současné době se posuzuje u elektrické energie jmenovité napětí, jmenovitá frekvence, sinusový průběh křivky napětí a proudu, nulový fázový posuv napětí proti proudu, souměrnost a také vyváženost trojfázové soustavy.

Trendem dnešní doby v elektrotechnice je používání úspornějších zařízení. Nevýhodou těchto zařízení je jejich nelineární provozní charakteristika. Typickým příkladem je náhrada klasických svítidel za svítidla úsporná. Provozem těchto spotřebičů se více projevují zpětné vlivy na napájecí síť, které mohou za určitých podmínek vést k rušivému ovlivnění činnosti jiných zařízení.

V poslední době došlo k velkému nárůstu počtu používaných polovodičových měničů. Jejich počty a celkový výkon motorů v závodových sítích mohou způsobit nepříznivé jevy, a to i s ohledem na napájecí síť. Z tohoto důvodu byly zavedeny základní zákony a směrnice týkající se oblasti elektromagnetické kompatibility. Vznikl také ucelený soubor norem týkající se oblasti nízkofrekvenčního rušení. Proto je potřeba se touto problematikou zabývat a hledat optimální řešení.

Seznam symbolů a zkratek

a_0	Fourierovy koeficienty	
a_h	Fourierovy koeficienty	
b_h	Fourierovy koeficienty	
C	Kondenzátor	[F]
\cos	Goniometrická funkce	[-]
$\cos\varphi_1$	Účinitel základní harmonické	[-]
ČSN	Česká státní norma	
D	Deformační výkon	[VA]
Dh	Fourierovy koeficienty pro h-tou harmonickou	
EMC	Elektromagnetická komptabilita	
EN	Evropské norma	
$f(t)$	Funkce spojitého průběhu	
FM	Frekvenční měnič	
h, H	Řád harmonické	
f	Frekvence	[Hz]
I	Elektrický proud	[A]
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise	
I_h	Proud h-té harmonické vyskytující se v soustavě	[A]
I_h	Poměrná hodnota h-té harmonické proudu	[%]
IPC	Napájecí bod uvnitř vyšetřované soustavy	
i_r	Přetížitelnost motorů	[-]
IT	Trojfázová síť s izolovaným nulovým bodem	
k_{hf}	Korekční činitel	
k_{VM}	Korekční činitel asynchronního motoru	
k_{vT}	Korekční činitel zatížení transformátoru	
L_S	Indukčnost sítě	
M	Elektromotor	
NN	Nízké napětí	
η	Účinnost	[-]
P	Činný výkon	[W]
P_1	Činný výkon základní harmonické	[W]
P_{AM}	Činný výkon asynchronního motoru	[W]

PCC	Společný napájecí bod	
PF	Celkový účinník	[-]
P_M	Činný výkon motoru	[W]
Q_I	Jalový výkon základní harmonické	[VAr]
Q_K	Jalový výkon kondenzátoru	[VAr]
R	Činný odpor	[Ω]
R_{AM}	Činný odpor motoru	[Ω]
R_S	Činný odpor spotřebičů	[Ω]
R_V	Činný odpor vedení	[Ω]
RI	Označení hlavní rozvodny	
RIA	Označení podružné rozvodny	
S	Zdánlivý výkon	[VA]
S_I	Zdánlivý výkon základní harmonické	[VA]
\sin	Goniometrická funkce	[-]
S_K	Zdánlivý výkon	[VA]
S_T	Zdánlivý výkon transformátoru	[VA]
t	Čas	[s]
T	Perioda	[s]
THD	Celkové harmonické zkreslení	[%]
THD_I	Celkové harmonické zkreslení proudu	[%]
THD_U	Celkové harmonické zkreslení napětí	[%]
U	Elektrické napětí	[V]
U_T	Elektrické napětí transformátoru	[V]
U_V	Elektrické napětí – vztažná napěťová hladina	[V]
VN	Vysoké napětí	
X_{AM}	Reaktance asynchronního motoru	[Ω]
X_S	Reaktance sítě	[Ω]
X_V	Reaktance vedení	[Ω]
$YD1, YD5$	Zapojení vinutí transformátoru	[$^\circ$]
Z	Impedance	[Ω]
Z_{AM}	Impedance asynchronního motoru	[Ω]
Z_S	Impedance spotřebičů	[Ω]
Z_T	Impedance transformátoru	[Ω]
λ	Celkový účinník, skutečný účinník	[-]

φ	Úhel	[-, rad]
φ_h	Fázový posun h-té harmonické	[°, rad]
ω	Úhlový kmitočet	[rad*s ⁻¹]
Σ	Suma	

Seznam použitých obrázků

OBR. 2.1	ODPOROVÉ BLOKY ROTOROVÉHO SPOUŠTĚČE SPD 3	24
OBR. 2.2	ROZBĚHOVÝ SPOUŠTĚČ TYPU INDUSTART M350	25
OBR. 2.3	POŠKOZENÉ KROUŽKY MOTORU 1K4D 355Y-6	26
OBR. 2.4	DEMONTOVANÁ POŠKOZENÁ KROUŽKOVÁ HLAVA MOTORU 1K4D 355Y-6	26
OBR. 2.5	DEMONTOVANÝ UHLÍKOVÝ KARTÁČ Z POŠKOZENÉ KROUŽKOVÉ HLAVY MOTORU	27
OBR. 2.6	NÍZKONAPĚŤOVÝ MOTOR SIMOTICS TYP 1LQ1322-4BC53-3AA2	28
OBR. 2.7	NÁHRADNÍ SCHÉMA ASYNCHRONNÍHO MOTORU S PŘÍSLUŠNÝMI PROUDOVÝMI VEKTORY (PŘEVZATO [11])	29
OBR. 2.8	ROZVADĚČOVÉ POLE VYBAVENÉ FREKVENČNÍM MĚNIČEM (ZDROJ [16]).....	30
OBR. 2.9	CELKOVÝ POMĚR ZAŘÍZENÍ S INSTALOVANÝMI FREKVENČNÍMI MĚNIČI	31
OBR. 2.10	CELKOVÝ POMĚR ZAŘÍZENÍ S INSTALOVANÝMI MĚNIČI – VÝHLED V ROCE 2024.....	31
OBR. 3.1	PRŮBĚH IMPEDANCE SÍTĚ UZLU 1 - R1 V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI	47
OBR. 3.2	PRŮBĚH IMPEDANCE SÍTĚ UZLU 20 – R1 V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI.....	47
OBR. 3.3	PRŮBĚH IMPEDANCE SÍTĚ UZLU 1 - R1A V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI	47
OBR. 4.1	STRUKTURA NEPŘÍMÉHO MĚNIČE KMITOČTU S NAPĚŤOVÝM STRÍDAČEM (PŘEVZATO [4])	48
OBR. 4.2	PRŮBĚH NAPĚTÍ A PROUDU ŠESTIPULSNÍHO USMĚRNĚNÍ KONDENZÁTOROVOU BATERIÍ (PŘEVZATO [5])..	49
OBR. 4.3	NÁHRADNÍ OBVOD NELINEÁRNÍ ZÁTĚŽE A NAPÁJECÍHO ZDROJE (PŘEVZATO [7])	50
OBR. 4.4	PRŮBĚH IMPEDANČNÍ CHARAKTERISTIKY V MÍSTĚ PŘIPOJENÍ ZÁTĚŽE (PŘEVZATO [7]).....	51
OBR. 5.1	PRINCIP ELIMINACE 5. A 7. HARMONICKÉ (PŘEVZATO [1])	53
OBR. 5.2	ZASTOUPENÍ HARMONICKÝCH SLOŽEK NAPĚTÍ K UZLU 1 – R1	54
OBR. 5.3	ZASTOUPENÍ HARMONICKÝCH SLOŽEK NAPĚTÍ K UZLU 20 - R1	55
OBR. 5.4	ZASTOUPENÍ HARMONICKÝCH SLOŽEK NAPĚTÍ K UZLU 1 – R1A.....	55
OBR. 6.1	ANALYZÁTOR SÍTĚ EPPE CX (PŘEVZATO [12])	56
OBR. 7.1	STRUKTURA NOREM A PŘEDPISŮ URČUJÍCÍCH VLASTNOSTI ELEKTRICKÝCH SÍTÍ Z HLEDISKA EMC V NF OBLASTI (PŘEVZATO [1]).....	61
OBR. 7.2	ZASTOUPENÍ HARMONICKÝCH SLOŽEK NAPĚTÍ TAB. 6.1 – L1 V POROVNÁNÍ S NORMOU	64
OBR. 7.3	ZASTOUPENÍ HARMONICKÝCH SLOŽEK NAPĚTÍ TAB. 6.2 – L1 V POROVNÁNÍ S NORMOU	64
OBR. 7.4	ZASTOUPENÍ HARMONICKÝCH SLOŽEK NAPĚTÍ TAB. 6.3 - L1 V POROVNÁNÍ S NORMOU	65
OBR. 7.5	ZASTOUPENÍ HARMONICKÝCH SLOŽEK NAPĚTÍ TAB. 6.4 - L1 V POROVNÁNÍ S NORMOU	65
OBR. 7.6	ZASTOUPENÍ HARMONICKÝCH SLOŽEK NAPĚTÍ TAB 6.5 - L1 V POROVNÁNÍ S NORMOU	66
OBR. 7.7	ZASTOUPENÍ HARMONICKÝCH SLOŽEK NAPĚTÍ TAB 6.6 - L1 V POROVNÁNÍ S NORMOU	66
OBR. 7.8	ZASTOUPENÍ HARMONICKÝCH SLOŽEK VYPOČÍTANÝCH HODNOT A NAMĚŘENÝCH HODNOT TAB.6.2 V POROVNÁNÍ S NORMOU	67
OBR. 7.9	ZASTOUPENÍ HARMONICKÝCH SLOŽEK VYPOČÍTANÝCH HODNOT A NAMĚŘENÝCH HODNOT TAB.6.2 V POROVNÁNÍ S NORMOU	67
OBR. 7.10	ZASTOUPENÍ HARMONICKÝCH SLOŽEK VYPOČÍTANÝCH HODNOT A NAMĚŘENÝCH HODNOT TAB.6.2 V POROVNÁNÍ S NORMOU	68

Seznam tabulek

TAB. 2.1 TABULKA NEJVÍCE UŽÍVANÝCH MOTORŮ K POHONŮM DÁLKOVÉ PÁSOVÉ DOPRAVY	24
TAB. 2.2 TABULKA UŽÍVANÝCH VYSOKONAPĚŤOVÝCH ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ S KOTVOU NAKRÁTKO	27
TAB. 2.3 TABULKA POUŽÍVANÝCH NN MOTORŮ SPOUŠTĚNÝCH POMOCÍ FREKVENČNÍCH MĚNIČŮ.....	30
TAB. 3.1 TABULKA VYPOČTENÝCH NÁHRADNÍCH PARAMETRŮ TRANSFORMÁTORŮ PRVKŮ RL	36
TAB. 3.2 TABULKA VYPOČTENÝCH NÁHRADNÍCH PARAMETRŮ TRANSFORMÁTORŮ PRVKŮ RL	37
TAB. 3.3 TABULKA VYPOČÍTANÝCH HODNOT NÁHRADNÍCH PARAMETRŮ PRVEK C	38
TAB. 3.4 TABULKA VYPOČTENÝCH NÁHRADNÍCH PARAMETRŮ VENKOVNÍHO VEDENÍ PRVKŮ RL.....	39
TAB. 3.5 TABULKA VYPOČÍTANÝCH NÁHRADNÍCH PARAMETRŮ VENKOVNÍHO VEDENÍ PRVKŮ RLC	40
TAB. 3.6 VYPOČÍTANÉ HODNOTY NÁHRADNÍCH PARAMETRŮ VYSOKONAPĚŤOVÝCH MOTORŮ PRVKŮ RL.....	41
TAB. 3.7 TABULKA VYPOČÍTANÝCH NÁHRADNÍCH PARAMETRŮ NÍZKONAPĚŤOVÝCH MOTORŮ PRVKŮ RL	43
TAB. 3.8 TABULKA VYPOČÍTANÝCH NÁHRADNÍCH PARAMETRŮ SPOTŘEBIČŮ NÍZKONAPĚŤOVÉ HLADINY PRVKŮ RL. 44	44
TAB. 4.1 HODNOTY PŘÍSLUŠNÝCH HARMONICKÝCH PROUDŮ ODEBÍRANÉ MĚNIČI	52
TAB. 6.1 ZMĚŘENÉ HODNOTY ZE DNE 31. 7. 2018 V ČASE 15:20 ZAŘÍZENÍ S FM V PROVOZU LÉTO – DEN.....	58
TAB. 6.2 ZMĚŘENÉ HODNOTY ZE DNE 8. 12. 2018 V ČASE 15:30 ZAŘÍZENÍ S FM V PROVOZU ZIMA – DEN	58
TAB. 6.3 ZMĚŘENÉ HODNOTY ZE DNE 1. 8. 2018 V ČASE 5:10 ZAŘÍZENÍ S FM V PROVOZU LÉTO – NOC.....	59
TAB. 6.4 ZMĚŘENÉ HODNOTY ZE DNE 10. 12. 2018 V ČASE 22:40 ZAŘÍZENÍ S FM V PROVOZU ZIMA – NOC	59
TAB. 6.5 ZMĚŘENÉ HODNOTY ZE DNE 16. 8. 2018 V ČASE 9:20 ZAŘÍZENÍ ROZVODNY R1A BEZ NAPĚTÍ	60
TAB. 6.6 ZMĚŘENÉ HODNOTY ZE DNE 8. 11. 2018 V ČASE 6:20 ZAŘÍZENÍ S FM VELKÝCH VÝKONŮ BEZ PROVOZU... 60	60
TAB. 7.1 KOMPATIBILNÍ ÚROVNĚ PRO JEDNOTLIVÉ HARMONICKÉ SLOŽKY NAPĚTÍ LICHÉHO ŘÁDU MIMO NÁSOBKŮ TŘÍ (PŘEVZATO [16]).....	62
TAB. 7.2 KOMPATIBILNÍ ÚROVNĚ PRO JEDNOTLIVÉ HARMONICKÉ SLOŽKY NAPĚTÍ LICHÉHO ŘÁDU, KTERÉ JSOU NÁSOBKEM TŘÍ (PŘEVZATO [3]).....	63
TAB. 7.3 KOMPATIBILNÍ ÚROVNĚ PRO CELKOVÉ HARMONICKÉ ZKRESLENÍ (PŘEVZATO [3]).....	63

1 Základní vztahy a definice

1.1 Nízkofrekvenční rušení

Jak uvádím v úvodu této diplomové práce, roste počet spotřebičů, které neodebírají pouze sinusový proud. A právě kvůli snaze ušetřit elektrickou energii i díky technologickému pokroku výrobců roste masivně množství používaných frekvenčních měničů v průmyslových závodech. Bohužel nástupem takové technologie dochází ke zpětnému působení na napájecí síť a také na ostatní připojená zařízení. V určitých případech může docházet k tomu, že zařízení ruší napájecí síť takovým způsobem, že není schopno pracovat samo o sobě, a navíc ovlivňuje ostatní zařízení, která jsou k této síti připojena. Těmto problémům se věnuje obor tzv. elektromagnetické kompatibility (EMC). Tuto oblast lze rozdělit na:

- a) nízkofrekvenční rušení v udávaném pásmu 0–2500 Hz,
- b) vysokofrekvenční rušení v udávaném pásmu 9 kHz–1 GHz.

Diplomová práce se zabývá pouze oblastí nízkofrekvenčního rušení.

Frekvenční měniče svým charakterem působí jako zdroj nízkofrekvenčního rušení a jsou těmito jevy samy ovlivňovány.

Konstrukčním uspořádáním frekvenční měnič odděluje napájecí síť od spotřebiče a proto můžeme vlivy frekvenčního měniče rozdělit na:

- a) vliv měniče na napájecí soustavu,
- b) vliv měniče na napájené zařízení,
- c) vliv měniče na okolí.

[6]

V průmyslových závodech jsou používány rozvodné soustavy různých napěťových úrovní, elektrické sítě jsou vzájemně propojovány, a tím dochází k daleko častějšímu ovlivňování spotřebičů. Je snahou tyto účinky potlačit, nebo alespoň eliminovat na přijatelnou mez. Z tohoto důvodu je nutné znát hodnoty harmonických proudů vyšších řádů, které se do napájecí soustavy generují a následně se v napájecí soustavě šíří, a tím ji zatěžují například zhoršením účinníku, vyššími ztrátami, zvýšeným tepelným namáháním transformátorů, přetěžováním kompenzačních kondenzátorů atd.

[1]

1.2 Harmonické průběhy vyšších řádů

Základní frekvence je rovna frekvenci napájecího napětí. Průběh okamžité hodnoty napětí a proudu lze charakterizovat harmonickou funkcí sinus anebo kosinus s určitou amplitudou, počáteční fází a frekvencí. Jsou-li tyto parametry napětí a proudu v čase neměnné, považujeme tento stav v lineárních obvodech za ustálený. V reálných obvodech se ale průběhy okamžitých napětí a proudů harmonickým funkcím vůbec nepodobají. Jsou z části deformované, neharmonické. V napájecích sítích takto deformované – zkreslené veličiny napětí a proudu způsobují mnoho problémů, a tím ovlivňují provoz všech prvků soustavy.

[7]

1.2.1 Vyjádření funkce Fourierovou řadou

Popsat takový děj pomocí okamžitých hodnot deformovaného časového průběhu napětí a proudu je velice obtížný, proto se vyjadřuje jejich popis do frekvenční oblasti.

K takovému vyjádření se používá Fourierova řada. Ta určuje vzájemný vztah mezi funkcí v časové oblasti a funkcí ve frekvenční oblasti.

[7]

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega_1 t) + b_h \sin \omega_1 t] \quad (1.1)$$

Výpočet úhlové frekvence je možné vyjádřit vztahem:

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T} \quad (1.2)$$

Výpočet Fourierových koeficientů a_0 , a_h , b_h určuje vztah:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (1.3)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega_1 t) dt, h = 1, 2, 3, \dots \quad (1.4)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega_1 t) dt, h = 1, 2, 3, \dots \quad (1.5)$$

V praxi se častěji využívá spektrální tvar Fourierovy řady ve tvaru:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum D_h \sin(h\omega_1 t + \phi_h), h = 1, 2, 3, \dots \quad (1.6)$$

[1]

1.2.2 Výkony v obvodech s nesinusovými průběhy

Pro zjištění velikosti zdánlivého výkonu platí součin efektivní hodnoty napětí a efektivní hodnoty proudu, ale při odběru nelineární zátěže je nutné vzít v potaz, že na impedancích spotřebiče průchodem harmonických proudů dochází ke vzniku harmonických napětí vyšších řádů. Zdánlivý výkon se vypočte podle vzorce:

[6]

$$S = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} I_k^2} = U \cdot I \quad (1.7)$$

[1]

Činný výkon doprovází na přenosové cestě navíc také jalový výkon. Jalový výkon se vypočte podle vzorce:

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h = \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \sin \varphi_h \quad (1.8)$$

[1]

Neharmonickými průběhy napětí a proudu platí vztah mezi zdánlivým výkonem a jalovým a činným výkonem:

$$S^2 \geq P^2 + Q^2 \quad (1.9)$$

[1]

Harmonické proudy o vyšších řádech však při průchodu proudu generují do výkonu také další složku, která značně ovlivňuje výsledný účinník odběru. Další část rovnice obsahuje složku, která svým charakterem působí jako kmitavá-nečinná. Obecně se nazývá jako deformační výkon, značí se D a je závislý na odebíraném proudu.

Zdánlivý výkon je tedy možné vypočítat dle vztahu:

[6]

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \quad (1.10)$$

[1]

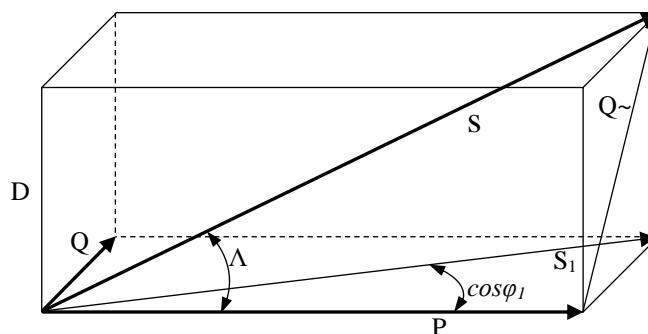
Z výše uvedeného vyplývá, že výkon spotřebiče není určen pouze činným a jalovým výkonem, ale také deformačním výkonem, který má vliv na celkový odebraný účinník. Tento celkový účinník je dán vztahem:

$$\Lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (1.11)$$

[1]

Koeficient Λ je v originálním názvu uveden pod pojmem „power factor“, v české literatuře je nazýván též skutečným účinníkem.

Velice často dochází k chybné záměně $\cos \varphi$ a Λ , kdy $\cos \varphi$ je účinník pro základní harmonickou, kdežto Λ označuje celkový účinník.



Obr. 1.1 Diagram složek výkonů a význam účinníku Λ a účinníku $\cos \varphi_1$ (převzato [1])

[1]

1.2.3 Celkové harmonické zkreslení

Aby bylo možné hodnotit kvalitu elektrické energie a definovat ji určitými parametry, zavádí se pojem celkové harmonické zkreslení (total harmonic distortion), označené

zkratkou THD, které vyjadřuje poměr efektivní hodnoty, obsahující střídavé harmonické veličiny, ku efektivní hodnotě základní (referenční) složky. Je to jeden z hlavních ukazatelů energie. Maximální přípustné hodnoty, jež se mohou vyskytnout v napájecí síti, jsou udávány normou a lze je vypočítat dle níže uvedených vztahů:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} \quad (1.121)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_1} \quad (1.12)$$

[1]

2 Popis situace průmyslového závodu

2.1 Představení společnosti

Průmyslový závod zabývající se energetikou je rozdělen na zpracovatelskou a těžební část. Nachází se zde několik odvětví jako je např. zpracování strategických surovin a energetika ve formě elektrické energie a tepla.

V původní zpracovatelské části se nacházela plynárna. Ta sloužila jako výrobní svítíplynu. V 90. letech se začal budovat projekt pro výrobu paroplynové elektrárny. Z výroby svítíplynu se přešlo na výrobu Energoplynu. Ten je vyráběn zplyňováním uhlí a je primárně určen pro potřeby pokrytí dodávky tepla a elektrické energie. Energoplyn slouží jako palivo pro paroplynovou elektrárnu o výkonu 370 MW. Průmyslový závod na zpracovatelské části je koncipován tak, aby byl co neúčinnější s minimálním množstvím vznikajícího odpadu.

Těžební část se nachází hned vedle zpracovatelské části. Má na starosti těžbu uhlí a také přepravu těžené suroviny. K tomu je zapotřebí rozsáhlý soubor technologií, kterým jsou například dobývací velkstroje, skládkové stroje, zakládací stroje a mnohdy jde o naprosté unikáty. Klíčové je propojení těchto technologií. K tomu slouží dálková pásová doprava v délce 42 kilometrů se šíří 1,4–1,8 metru pásu. Pásová doprava přinesla řadu výhod, je využívána zejména v oblastech s vyššími sklony nebo z důvodu prokluzů vlakové přepravy. Dálková pásová doprava je také používána pro kontinuální těžbu na pás. Mezi pásovou dopravu nepatří jen pásové dopravníky a poháněcí stanice, ale také shazovací vozy, rozdělovací vozy, kladivové drtící stanice, které upravují vytěžené uhlí na potřebnou zrnitost, a nakonec nakládací stanice. Zde dochází ke kontinuální nakládce vytěženého uhlí. V rámci těžebních postupů je nutné provádět odvodnění jednotlivých těžebních řezů. Z důvodu výškového uspořádání jednotlivých odtěžovaných řezů jsou zapotřebí výkonné čerpací stanice a čerpací vrty. Aby bylo možné tyto technologie a zařízení provozovat, je nutné provádět jejich údržbu a opravy. Průmyslový závod tedy netvoří jen výrobní část, ale i divize, které se starají o údržbu a opravy, což také tvoří nezanedbatelnou část výrobních a opravárenských prostorů této společnosti. Takto koncipovaný průmyslový závod obsahující rozsáhlý soubor uvedených technologií spotřebuje velkou část elektrické energie pro vlastní spotřebu.

[13]

2.2 Napájení elektrickou energií

Spotřeba elektrické energie těžebního úseku je zajištěna z vlastní elektrárny Zpracovatelské části. Elektrina je přiváděna do těžební části venkovním vedením o napět'ové hladině 110 kV do jednotlivých hlavních rozvoden Těžebního úseku.

V hlavních rozvodnách dochází následně k transformaci napětí na nižší napět'ové hladiny 22 kV a 6 kV. Nejužívanější napět'ovou hladinou těžebního úseku je 6 kV v soustavě IT. Dále je rozvod veden venkovním vedením, kde se používají především vodiče AlFe lana o průřezu 110 mm² do distribučních rozvoden na stejné napět'ové hladině 6 kV v soustavě IT. Z distribučních rozvoden je dále veden rozvod na jednotlivá technologická zařízení pomocí vysokonapět'ových vlečných kabelů typu 6-CHCU 3x95+3x16. Převážnou část těchto zařízení tvoří dobývací velkstroje, úpravny uhlí a dopravníky dálkové pásové dopravy, kde délka některých jednotlivých dopravníků dosahuje až 1 300 m. K tomu jsou zapotřebí velmi výkonné pohonné jednotky, osazené elektromotory pracující s napět'ovou hladinou 6 kV, 0,69 kV nebo 0,5 kV. Nízkonapět'ovou hladinu 0,69 kV a 0,5 kV si transformuje každé zařízení samo ze své rozvodny, která je součástí každého zařízení. Čerpací stanice jsou osazeny motory napět'ové hladiny 6 kV nebo 0,5 kV. K rozvodu elektrické energie je připojeno také mnoho univerzálních příhradových stožárových trafostanic a přesuvných trafostanic, která napájí pomocné provozy a provozovny nezbytné k zajištění chodu celého Těžebního úseku.

Pro cíl měření byla vybrána rozvodna R1 110/6 kV. Zde je instalován hlavní transformátor T1 o příkonu 25 000 kVA a napětí je následně transformováno na hladinu 6 kV. Z transformátoru odchází paralelní kabelové vedení do rozvodny 6 kV, kde se nachází 20 vysokonapět'ových polí. Pole č. 1 a pole č. 20 jsou přívodní pole, do kterých je zaústěno kabelové vedení z transformátoru. Ostatní pole jsou vzájemně propojena sběrníkovým systémem, do těchto polí patří i pole vlastní spotřeby, kde je připojen transformátor 6/0,4 kV. Protože se jedná o izolovanou síť IT, je zde zapotřebí připojení Petersenovy kompenzační tlumivky, která kompenzuje zemní kapacitní proudy a poruchové proudy, tak aby v případě poruchy nepřesáhly bezpečnou mez (bezpečnou mez určuje např. ČSN). Dále je připojeno kompenzační pole s trvale připojenou neregulovanou kondenzátorovou baterií 1 200 kVAr. Zbývajících 12 vývodových polí slouží k napájení jednotlivých technologií a podružných rozvoden buď pomocí vzdušného vedení, které na koncových stožárech pokračuje kabelovým vedením, které je zaústěno do rozvodny, nebo vlečným kabelem typu

CHCU 3x95+3x16. Z vývodového pole č. 5 je napojena podružná rozvodna č. R1A. Ta napájí dva výkonové transformátory 1630 kVA s napět'ovou hadinou 6/0,69 kV, z nichž jsou napojené výkonné pohonné jednotky, osazené frekvenčními měniči. Tyto transformátory mají vůči sobě posunutý úhel vinutí YD1 a YD5 z důvodu potlačení harmonických složek. Rozvodna R1A napájí pásové dopravníky, které jsou jednak osazeny vysokonapět'ovými kroužkovými asynchronními motory o výkonu 250 kW, nebo pohonnými jednotkami s frekvenčními měniči, tentokrát připojené z transformátoru 6/0,5 kV. Z vývodového pole č. 8 a 19 je napájena technologická pasová doprava, která je osazena vysokonapět'ovými asynchronními motory s kotvou nakrátko. Vývodové pole č. 3 napájí dálkovou pásovou dopravu, kde jsou osazeny výkonné pohonné jednotky s frekvenčními měniči napájené s transformátorů 6/0,69 kV. Dále jsou z rozvodny R1 napojené menší transformovny s napět'ové hladiny 6/0,4 kV, z nichž jsou napájené dílny, technická zázemí, administrativní budovy z napět'ové hladiny 6/0,4 kV.

2.3 Hlavní komponenty

2.3.1 Vysokonapět'ové motory

Každé technologické zařízení má svojí kompaktní rozvodnu kontejnerového typu. Součástí vybavení této rozvodny jsou rozvaděče vysokého napětí 6 kV, z nichž jsou napojeny motory hlavních pohonů, kompenzační pole, transformátor 6/0,5 kV a nízkonapět'ové rozvaděče.

2.3.1.1 Asynchronní kroužkový motor

Nejrozšířenějším elektromotorem technologických celků je vysokonapět'ový vzduchem chlazený asynchronní kroužkový motor typu 1YG 500-L a 1K4D 355Y-6. Používá se ve výkonové řadě v rozmezí 200 kW–800 kW. K rozběhům těchto asynchronních motorů jsou používány technicky zastaralé rotorové olejové spouštěče typu SPD a rozběhové spouštěče typu INDUSTART. Elektromotor je spojen s převodovou skříní pomocí pružného periflexu a tato sestava je usazena na společném rámu.

Tab. 2.1 Tabulka nejvíce užívaných motorů k pohonům dálkové pásové dopravy

Typ motoru	Výkon [kW]	U [V]	I [A]	U [V]	I [A]	ot [min-1]	cos φ	Třída provozu
		stator		rotor				
1K4D 355Y-6	200	6000	32	617	256	986	0,81	S1
1K4D 355Y-6	250	6000	32	617	256	986	-	S1
1YG 500L-6	250	6000	32,8	400	386	992	-	S1
GP 500X-4	320	6000	37,4	480	406	1485	0,84	S1
GP 600Z-6	500	6000	57,6	836	376	990	0,87	S1
1YGD 600L-6	500	6000	57,6	836	376	990	0,88	S1
1YG 700L-6	800	6000	95,5	1076	465	991	0,88	S1

2.3.1.2 Rotorové olejové spouštěče

Samočinný rotorový spouštěč SPD je rozdělen do tří částí, kterými jsou spínací ústrojí, odporová část a nádoba na olej. Spínací část je tvořena 12 ks stykačů, které jsou spínány pomocí programového časového relé. Odporová část je tvořena 3 odporovými bloky požadované specifikace odporu pro každou fázi zvlášť. Pomocí těchto stykačů dochází postupně k odpínání („vykracování“) odporových bloků. Poslední část tvoří nádoba obsahující olej, ve které jsou ponořeny odporové bloky. Na Obr. 2.1 je možné vidět odporové bloky rotorového spouštěče 800 kW vyzdvižené z olejové lázně při roční kontrole zařízení. [14]



Obr. 2.1 Odporové bloky rotorového spouštěče SPD 3

Rozběhový spouštěč typu INDUSTART *Obr. 2.2* pracuje na principu změny impedance speciálně navinuté třífázové tlumivky s masivním železným jádrem, která pracuje v závislosti na změně rotorového kmitočtu. Díky tomu se dosahuje vysoký záběrný moment i při nízkém proudu bez proudových a momentových rázů. Mezi přední výhody tohoto spouštěče patří jeho velká tepelná kapacita, malé rozměry (malá prostorová zastavěnost v rozvodně), jednoduchá instalace, snadná a minimální údržba. Mezi další výhody patří ekologická nezávadnost, protože neobsahuje olejovou náplň oproti technicky starším olejovým spouštěčům typu SPD.

[10]



Obr. 2.2 Rozběhový spouštěč typu INDUSTART M350

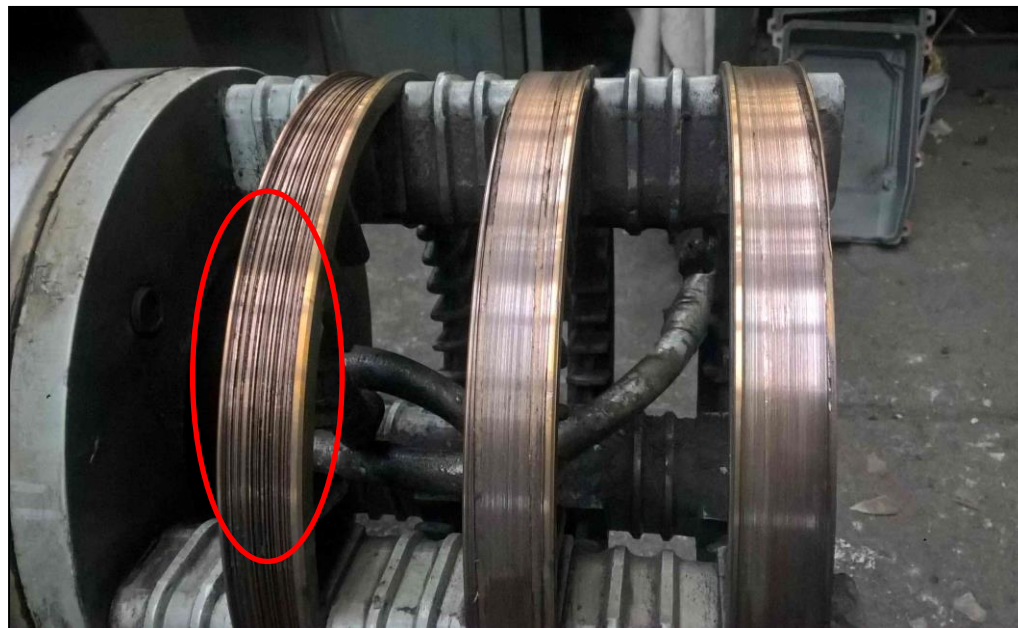
2.3.1.3 Nevýhody kroužkových motorů

Asynchronní kroužkové motory osazené na zařízení dálkové pásové dopravy jsou často provozovány s proměnlivou zátěží, která má za následek značné opotřebení kroužků způsobeným provozními a klimatickými podmínkami. Díky tomu dochází k proměnlivým proudovým odběrům, což má zásadní vliv na životnost kroužkové hlavy. Vlivem malého zatížení motoru, je odebíraný proud nízký a tím nedochází k potřebné teplotě uhlíkových kartáčů. Příliš měkké uhlíkové kartáče se rychle opotřebovávají. Použitím tvrdších

uhlíkových kartáčů dochází k vydírání sběracích kroužků. U krátkých dopravníků řádově 300–400 m je řešením snížení počtu uhlíkových kartáčů. Bohužel u delších dopravníků toto není možné a díky tomu dochází časem ke značnému poškození kroužkových hlav. Na *Obr. 2.3* a *Obr. 2.4* je vidět poškození kroužkové hlavy a na *Obr. 2.5* je vidět demontovaný uhlíkový kartáč poškozených kroužků motoru 1K4D 355Y-6.



Obr. 2.3 Poškozené kroužky motoru 1K4D 355Y-6



Obr. 2.4 Demontovaná poškozená kroužková hlava motoru 1K4D 355Y-6



Obr. 2.5 Demontovaný uhlíkový kartáč z poškozené kroužkové hlavy motoru

2.3.1.4 Asynchronní motor s kotvou nakrátko

K technologickým pásům, které nepřesáhnou délku 200 m, a v čerpacích stanicích je nejvíce využíván vysokonapěťový asynchronní motor s kotvou nakrátko typu 1AN5 355Y- 6 a 1AN5 355Y- 4 s výkonovým rozmezím 160 kW–250 kW. Tento motor není možné připojit přímo k síti z důvodu velkého záběrného proudu. Pro tento typ motorů se využívá k rozběhu Hydrodynamická spojka. Hydrodynamické spojky se řadí do skupiny hydrodynamických přenašečů výkonu. Přenos kroutícího momentu se uskutečňuje prostřednictvím setrvačných sil provozní náplně, na základě Föttingerova principu. Čerpadlové kolo přijímá vstupní mechanický výkon a zvyšuje energii pomocí cirkulující provozní kapaliny. Turbínové kolo odebírá energii provozní kapalině a předává mechanický výkon. Mezi oběma koly neexistuje žádné pevné spojení. Ztráty vznikající v důsledku skluzu, který je pro přenos výkonu nezbytný, se dále přeměňují v teplo.

Předností této spojky je rozběh hnacího motoru téměř bez zatížení, díky tomu dochází k rychlému poklesu záběrného proudu a tím také k nízkému tepelnému zatížení motoru, což vede k možnosti vyšší četnosti zapínání. Volbou provozní náplně je možné přenášený kroutící moment měnit a přizpůsobit požadavkům konkrétního pracovního stroje.

[15]

Tab. 2.2 Tabulka užívaných vysokonapěťových asynchronních motorů s kotvou nakrátko

Typ	U [kW]	I [V]	I [A]	ot [1/min]	cos φ	Třída provozu
1AN5 355L-6	160	6000	19,9	989	0,87	S1
1AN5 355L-4	200	6000	23,5	1485	0,87	S1
1AN5 355X -6	200	6000	24,4	989	0,89	S1
1AN5 355X -4	250	6000	29,1	1484	0,88	S1

2.3.2 Nízkonapět'ové asynchronní motory ovládané frekvenčními měniči

V současné době jsou na zařízení těžební části při rekonstrukcích elektrozařízení nahrazovány vysokonapět'ové motory pohonů za motory nízkonapět'ové řízené pomocí frekvenčních měničů. Důvody jsou jak ekonomické, z důvodu dosažení značných úspor elektrické energie, tak provozní, protože umožňují řízený rozběh, bez momentových a proudových rázů. Asynchronní motory s kotvou nakrátko řízené napět'ovými střídači zaujímají v oblasti pohonů přední místo, především kvůli robustní a bezúdržbové konstrukci motoru, dokonce i v oblastech průmyslových aplikací, kde se dříve upřednostňovaly jiné druhy motorů z důvodu regulace.

Řízení motorů pomocí frekvenčních měničů umožňuje v případě potřeby nezastavovat dopravníky, ale pouze snížit rychlost celé technologie na minimum a tím šetřit energii. Toto řešení šetří i gumové pásmo, které tvoří jednu z největších položek na údržbu. Při menších rychlostech, nedochází k tak výraznému opotřebení gumového pásma. Snížení rychlosti se také využívá při opravě gumového pásma, kdy je potřeba poškozenou část gumového pásma najet na konkrétní určené místo. U dopravníků, které nemají řízení pomocí frekvenčních měničů, je tato činnost problematická a zdlouhavá.

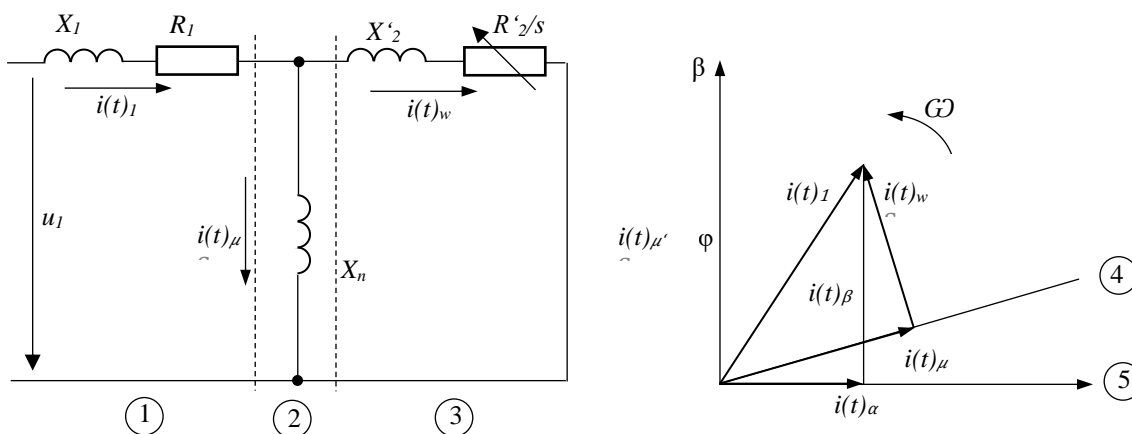


Obr. 2.6 Nízkonapět'ový motor SIMOTICS typ 1LQ1322-4BC53-3AA2

2.3.2.1 Řízení nízkonapěťových motorů pomocí frekvenčních měničů

Základním principem frekvenčních měničů je vytvoření střídavého napětí s potřebnou velikostí a kmitočtu ze zdroje střídavého napětí s obecně proměnným kmitočtem. Pro pásové dopravníky a technologické dopravníky je využíváno řízení frekvenčními měniči v režimu sensorless vector control (vektorové řízení bez otáčkové zpětné vazby) s cílem dosáhnout maximální kroutící moment při rozběhu pohonu. [4]

Protože se jedná o frekvenční měniče s napěťovým střídačem, používá se při vektorovém řízení takzvaný napěťový model, který používá jako vstupní signál statorové napětí u_1 a statorový proud i_1 . Tyto veličiny jsou zpracovány pomocí matematického modelu, ve kterém regulátor otáček řídí požadovanou momentotvornou složku proudu i_w . Předností vektorového řízení bez zpětné vazby je možnost regulovat tok na hodnotu, která odpovídá jmenovité hodnotě toku motoru. Na tomto základě je možné provádět dynamickou regulaci kroutícího momentu u asynchronních motorů, stejně jako u motorů stejnosměrných. [5]



- ① Stator
- ② Vzduchová mezera
- ③ Rotor
- ④ Orientace na tok reaktoru
- ⑤ Orientace na stator

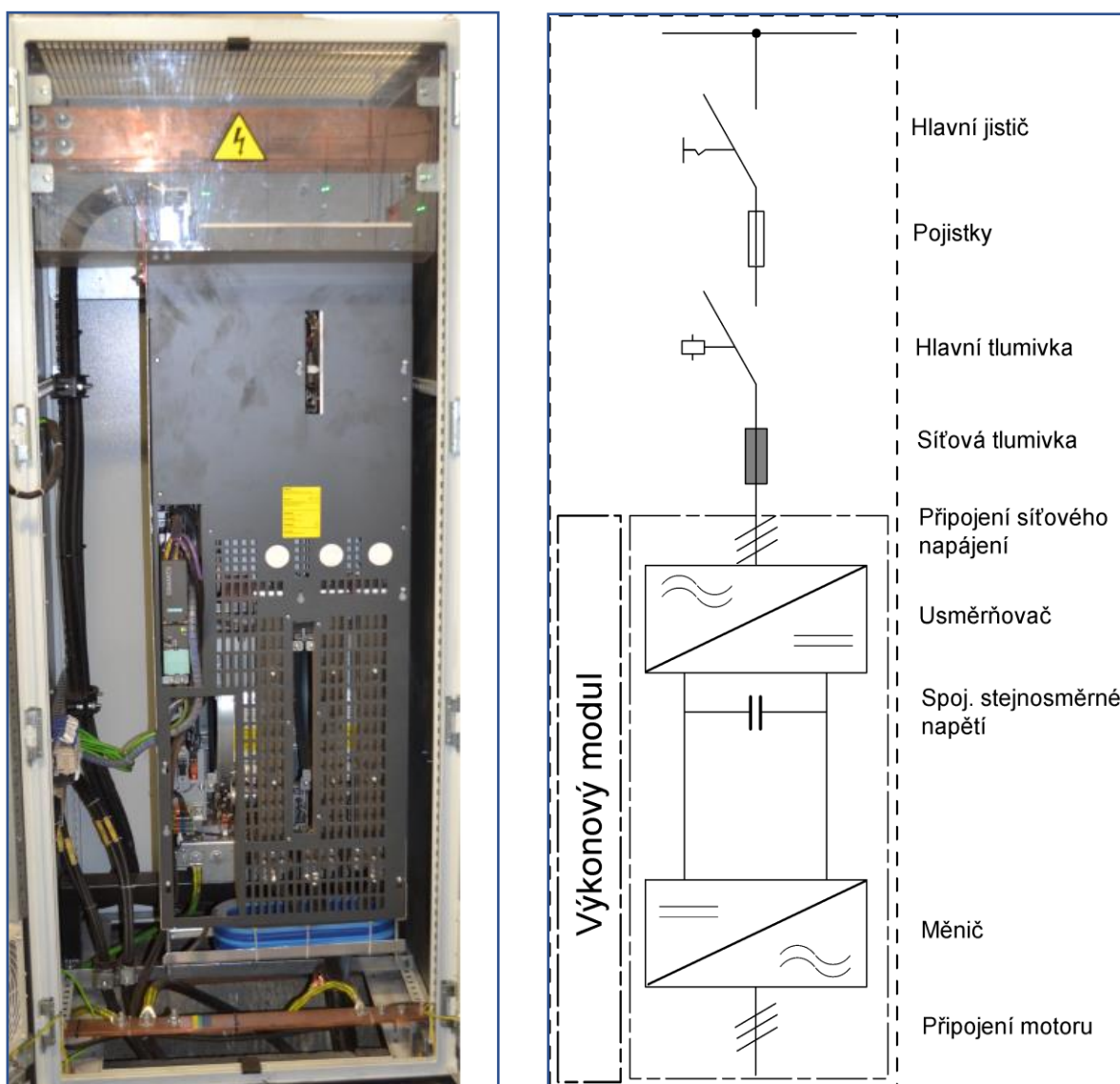
- i_1 = proud statoru (proud v odbočce)
- i_μ = proudová složka tvořící tok
- i_w = proudová složka tvořící kroutící moment
- $R_{2/s}$ = odpor rotoru závislý na skluzu

Obr. 2.7 Náhradní schéma asynchronního motoru s příslušnými proudovými vektory (převzato [11])

Tab. 2.3 Tabulka používaných nn motorů spouštěných pomocí frekvenčních měničů

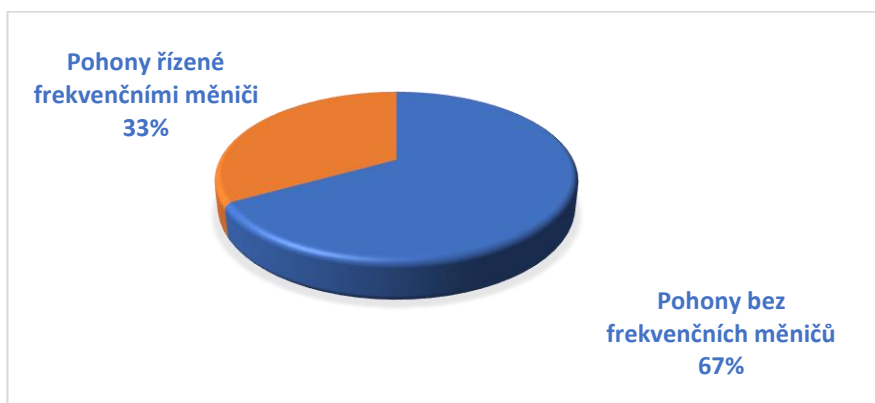
Typ	P [kW]	U [V]	I [A]	ot [1/min]	cos φ [-]
1LQ1322-3AC13-3AA2-Z	215	600	245	1000	0,81
1LQ1222-3AC32-3AA1-Z	270	500	415	1000	0,82
1LQ1322-3AC33-3AA2-Z	270	660	300	1000	0,83
1LQ1222-4BC13-3AA2-Z	560	660	630	1000	0,81
1LQ1322-4BC53-3AA2-Z	800	660	860	1000	0,84

Na Obr. 2.8 vlevo je rozvaděčové pole vybavené frekvenčním měničem Sinamics G130 a vpravo blokové schéma.



Obr. 2.8 Rozvaděčové pole vybavené frekvenčním měničem (zdroj [16])

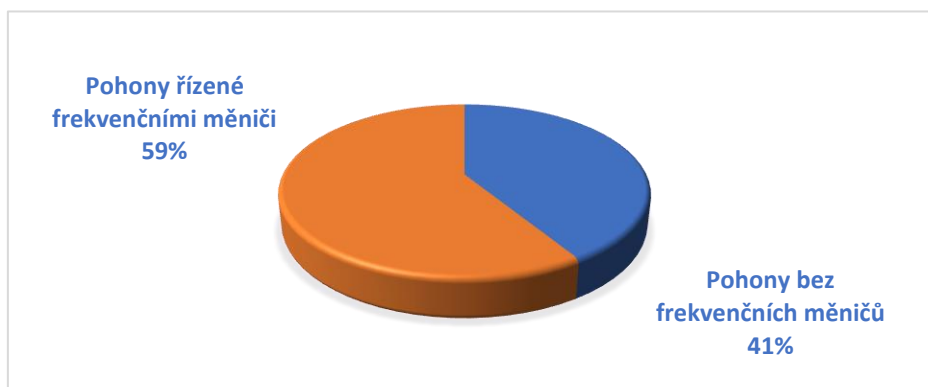
2.3.2.2 Zastoupení pohonů řízených frekvenčními měniči



Obr. 2.9 Celkový poměr zařízení s instalovanými frekvenčními měniči

Zastoupení pohonů řízených frekvenčními měniči jsou uvedena na Obr. 2.9. V roce 2019 bylo z celkového počtu těžební technologie čítajícího 133 strojů osazeno frekvenčními měniči 44 stroje.

V řádu několika let dojde k rekonstrukci některých těžebních zařízení. Klasické pohony osazené vysokonapětovými motory, které k rozběhu používají především technicky zastaralé olejové spouštěče typu SPD, budou nahrazeny novými nízkonapětovými motory řízenými frekvenčními měniči. Také dojde k odstavení některé části technicky zastaralé technologie, vlivem postupného útlumu, za účelem snížení podílu energetiky založené na uhlí. Obr. 2.10 graficky znázorňuje předpokládané procentuální zastoupení v roce 2024. Celkový počet zařízení by měl být snížen na 85 ks, naproti tomu vzroste počet zařízení na 50 strojů, které budou používat k rozběhu nízkonapětové motory řízené frekvenčními měniči. Právě s ohledem na plánované rozšíření frekvenčních měničů nutnost věnovat se vlivům těchto měničů na podnikovou síť.



Obr. 2.10 Celkový poměr zařízení s instalovanými měniči – výhled v roce 2024

2.3.3 Elektrická trakce

Vlivem postupného útlumu těžby a také změnou ekonomických podmínek, které značně ovlivňují budoucnost uhelných společností v České republice, bylo nutné připravit velkou restrukturalizaci firmy, při které došlo k úplnému ukončení některých částí provozu. Jedním z nich je využívání trakce k převozu vytěžené zeminy ze skrývkových řezů a jejich následnému zakládání. To zčásti nahradila pásová doprava.

3 Výpočet impedance sítě průmyslového závodu

Impedance sítě je jedna ze základních veličin, která je pro následnou analýzu elektrického obvodu naprosto nezbytná veličina. Impedance vyjadřuje poměr mezi napětím a proudem, který může být i fázově posunut, na rozdíl od elektrického odporu, u kterého je napětí a proud ve fázi.

[9]

Impedance je závislá na frekvenci. Odběrem připojených nelineárních spotřebičů dochází ke zpětnému vlivu na elektrickou síť. V rozsáhlých průmyslových sítích jsou připojeny také filtračně kompenzační zařízení, čímž mohou vzniknout rezonance a další jevy s neharmonickými průběhy, a proto je nutné znát základní vlastnosti napájecích elektrických sítí. Vlivem kapacitního charakteru, především u rozsáhlých kabelových sítí, dochází na určité rezonanční frekvenci ke změně původně indukčního charakteru impedance elektrické sítě základní harmonické na kapacitní. V síti se vyskytují soustředěné kapacity v podobě nehrazených kondenzátorových baterií, a tím vznikají nebezpečné rezonance i v sítích NN. Harmonické proudy svým průchodem zatěžují transformátor, nadřazenou síť a také nehrazené kompenzační zařízení, které bývá dimenzováno pouze na zatížení základní harmonickou a hrozí mu pak jeho zničení. V uzlu se poté mohou tvořit v oblasti rezonanční frekvence harmonická napětí. Díky dalším jevům spojeným s neharmonickými veličinami může dojít k rušení připojených spotřebičů.

[2]

Proto je důležité provádět výpočet impedance sítě. Působením polovodičových měničů a nelineárních spotřebičů je třeba provádět výpočet sítě průmyslového závodu jako funkci frekvence. Na bezprostřední účinky připojených nelineárních zařízení mají vliv rozvody a spotřebiče v průmyslových sítích.

[1]

3.1 Tvorba modelu pro výpočet impedance průmyslové sítě

S ohledem na nízkofrekvenční rušení je nutné stanovit zjednodušené náhradní schéma rozvodu. Stanovit v praxi ucelené náhradní schéma průmyslového závodu je poměrně

složitě, proto je třeba určit, o kolika zařízeních pro výpočet impedance sítě uvažovat. Sítě bývají navíc zasmyčkované. Výpočet také ovlivňuje množství spotřebičů v chodu, takže jejich odběr je velice proměnlivým parametrem. [1]

3.2 Pravidla pro vytvoření modelu závodové sítě

Jak již bylo zmíněno, určit přesné složení prvků pro náhradní schéma průmyslového závodu je poměrně složité. Při vytváření modelu je potřeba dodržet určitá pravidla s přihlédnutím na místní provozní podmínky daného závodu.

- a) Hlavní transformátory a transformátory s reaktory VVN/VN a VN/VN velkých výkonů je nutné do modelu zařazovat vždy. Transformátory se zahrnují do výpočtu i v případě výpočtu sítí NN.
- b) Do výpočtu (modelu) je nutné zahrnout i motory VN, protože se jedná v převážné většině o velké výkony a z tohoto důvodu značně ovlivňují impedanci sítě. Při použití více motorů na společné sběrnici není nutné modelovat každý motor zvlášť. Je možné provést sloučení a skupinu modelovat jako jeden motor s výkonem, který je roven součtu uvažovaných motorů. Při vytváření modelu se pracuje se skutečným výkonem, nikoliv výkonem instalovaným.
- c) Venkovní vedení a kabelové vedení VN, je počítáno pomocí π -článku. Kabely mezi jednotlivými rozvodnami nad 100 m délky je nutné do modelu vždy zařadit a modelovat je podélnou složkou RL a u příčné složky uvažovat pouze kapacitu. Svodový odpor je možné ve většině případů zanedbat (uvažuje se pouze u velmi dlouhých vedení). U venkovních vedení delších než 500 m se uvažuje pouze podélný článek a zahrnuje se do modelu. Při délce nad 4 km je vhodné model rozdělit na více článků, v opačném případě je nutné vedení počítat pomocí rozprostřených parametrů.
- d) Kondenzátory se také vždy zahrnují do modelu.
- e) Zátěže NN – při vytváření modelu závodové sítě VN se zátěže NN modelují v kombinaci $R+j\omega L$ prvku, případně se doplní paralelní kapacitou.
- f) Filtry, které jsou připojené v průmyslovém závodě je nutné do modelu zahrnout vždy.
- g) Zdroje vyšších harmonických proudů se do modelu zahrnují pouze v případě výpočtu vyšších harmonických napětí. [1]

Před samotnými výpočty je nutné vytvořit přehledové schéma (jednopolové schéma). Po vytvoření schématu je možné provést výpočty dle kapitol 3.3–3.4. Přehledové schéma je uvedeno v příloze č. 1.

3.3 Výpočet zátěží vysokonapěťových hladin

Napájecí síť Z_s

Soustava se modeluje pouze jako indukčnost. Určí se ze zkratového výkonu. Výpočet impedance se provede podle vzorce:

$$Z_s = \frac{1,1 \cdot U_v^2}{S_k} = \frac{1,1 \cdot (6000)^2}{(I_{ks} \cdot U_n)} = \frac{1,1 \cdot 6000^2}{(11540 \cdot (110 \cdot 10^3))} = 0,0312 [\Omega] \quad (3.1)$$

[1]

Při výpočtu indukčnosti se uvažuje $\cos\varphi_k = 0,114$. Výpočet indukčnosti nadřazené sítě se provede podle vztahu:

$$X_s = Z_s \cdot \sin(\cos^{-1}(0,114)) = 0,031 [\Omega] \quad (3.2)$$

$$L_s = \frac{X_s}{\omega} = \frac{0,031}{(2 \cdot \pi \cdot 50)} = 0,00009866 [H] \quad (3.3)$$

[1]

Transformátory

Jsou ve většině případů modelovány jako RL prvky, výpočet impedance se vypočte podle vzorce:

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_T^2}{S_T} \quad (3.4)$$

$$R_T = \Delta P_k \cdot \frac{U_T^2}{S_T^2} \quad (3.5)$$

$$L_T = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (3.6)$$

[1]

Pomocí výše uvedených vzorců byl proveden výpočet RL prvků připojených transformátorů

Tab. 3.1 Tabulka vypočtených náhradních parametrů transformátorů prvků RL

Transformátory							
Označení ve schématu	Štítkové hodnoty					Vypočítané hodnoty	
	S [kVA]	U ₁ [kV]	U ₂ [kV]	P _k [W]	uk [%]	R [Ω]	L [H]
T1	25000	110	6	140000	16,5	0,0081	0,0008
T3.0	100	6	0,5	1100	4	3,9600	0,0441
T3.1	160	6	0,4	1500	4	2,1094	0,0279
T3.2	160	6	0,4	1500	4	2,1094	0,0279
T3.3	63	6	0,23	1200	4	10,8844	0,0640
T3.4	400	6	0,5	4300	4	0,9675	0,0110
T3.5	700	6	0,69	7600	4	0,5584	0,0063
T3.6	700	6	0,69	7600	4	0,5584	0,0063
T3.9	50	6	0,4	800	4	11,5200	0,0841
T4.1	400	6	0,4	5500	6	1,2375	0,0167
T4.2	50	6	0,4	700	4	10,0800	0,0859
T5.1	400	6	0,4	5500	6	1,2375	0,0167
T5.2	1600	6	0,69	14000	6	0,1969	0,0043
T5.3	630	6	0,5	7600	6	0,6893	0,0107
T5.4	400	6	0,5	5288	4	1,1898	0,0108
T5.5	100	0,5	0,23	1415	4,14	5,0940	0,0446
T5.6	1600	6	0,69	12414	6,18	0,1746	0,0044
T5.7	160	6	0,5	2400	5,4	3,3750	0,0372
T5.8	100	6	0,23	2500	6	9,0000	0,0625
T5.9	630	6	0,5	7600	6	0,6893	0,0107
T6.1	160	6	0,4	1500	4	2,1094	0,0279
T6.2	160	6	0,4	1500	4	2,1094	0,0279
T6.3	160	6	0,4	1500	4	2,1094	0,0279
T6.4	160	6	0,4	1500	4	2,1094	0,0279
T8.1	400	6	0,5	4300	4,2	0,9675	0,0116
T8.2	250	6	0,4	3100	4	1,7856	0,0174
T9.1	250	6	0,4	4700	6	2,7072	0,0261
T9.2	250	6	0,4	3500	4,11	2,0160	0,0177
T9.3	250	6	0,5	3500	4,11	2,0160	0,0177
T9.4	250	6	0,5	3500	4,11	2,0160	0,0177
T9.5	250	6	0,5	3500	4,11	2,0160	0,0177
T9.6	160	6	0,5	1500	4	2,1094	0,0279
T9.7	250	6	0,5	3500	4,11	2,0160	0,0177
T10.1	250	6	0,4	3500	4,11	2,0160	0,0177
T10.2a	250	6	0,4	3100	4,47	1,7856	0,0197
T10.2b	250	6	0,4	3100	4,47	1,7856	0,0197
T10.3	250	6	0,4	3500	4,11	2,0160	0,0177
T10.4	250	6	0,4	3500	4,11	2,0160	0,0177

Tab. 3.2 Tabulka vypočtených náhradních parametrů transformátorů prvků RL

Transformátory							
Označení ve schématu	Štítkové hodnoty					Vypočítané hodnoty	
	S [kVA]	U ₁ [kV]	U ₂ [kV]	P _k [W]	u _k [%]	R [Ω]	L [H]
T14	400	6	0,4	6000	4	1,3500	0,0106
T15	160	6	0,4	3600	4	5,0625	0,0237
T16.1	160	6	0,4	1500	4	2,1094	0,0279
T16.2	400	6	0,5	5500	6	1,2375	0,0167
T16.3	400	6	0,5	5500	6	1,2375	0,0167
T16.4	400	6	0,5	5500	6	1,2375	0,0167
T16.5	1000	6	0,4	15000	6	0,5400	0,0067
T16.6	1000	6	0,4	15000	6	0,5400	0,0067
T16.7	1000	6	0,4	15000	6	0,5400	0,0067
T16.8	1000	6	0,4	15000	6	0,5400	0,0067
T16.9	1000	6	0,4	15000	6	0,5400	0,0067
T18.1	630	6	0,4	11000	6	0,9977	0,0104
T19.1	400	6	0,5	4300	4,2	0,9675	0,0116

Příklad výpočtu prvního řádku náhradních parametrů transformátoru *Tab. 3.1*

$$Z_{T1} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_V^2}{S_T} = \frac{16,5}{100} \cdot \frac{6000^2}{25000000} = 0,2376 [\Omega] \quad (3.7)$$

$$R_{T1} = \Delta P_k \cdot \frac{U_T^2}{S_T^2} = 140000 \cdot \frac{6000^2}{25000000^2} = 0,008064 [\Omega] \quad (3.8)$$

$$L_{T1} = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cdot \sqrt{0,2376^2 - 0,008064^2} = 0,00076 [H] \quad (3.9)$$

Kondenzátory

Kondenzátory určené pro kompenzace jalového výkonu nelze při výpočtu zanedbat a je nutné je zahrnout. Výpočet impedance se provede podle vzorce:

$$X_K = \frac{U_V^2}{Q_{KB}} \quad (3.10)$$

$$C = \frac{X_{KB}}{\omega} \quad (3.11)$$

[1]

Tab. 3.3 Tabulka vypočítaných hodnot náhradních parametrů prvek C

Označení ve schématu	Vstupní hodnoty		Vypočítaná hodnota
	Qk [VAr]	Uv [V]	C [F]
C 2	1200000	6000	0,0001061
C 5.1	200000	6000	0,0000177
C 5.3	150000	6000	0,0000133
C 8.1	50000	6000	0,0000044
C 8.2	150000	6000	0,0000133
C19.1	120000	6000	0,0000106
C19.2	110000	6000	0,0000097

Příklad výpočtu prvního řádku pro C2 v Tab. 3.3.:

$$X_{K2} = \frac{U_V^2}{Q_{K2}} = \frac{6000^2}{1200000} = 30 \text{ } [\Omega] \quad (3.12)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega X_{K2}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 30} = 0,0001061 \text{ } [F] \quad (3.13)$$

Venkovní a kabelová vedení

Dlouhá vedení jsou modelována pomocí π -článku. Ve výpočtu je řešena nejdelší vzdálenost venkovního vedení do 2 km, proto je modelováno pouze jako RL spojení. U kabelového vedení se uplatňuje také příčná kapacita, kterou je nutné do modelu zahrnout.

$$X_V = x_k \cdot l \cdot \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{U_v}{U}\right)^2 \quad (3.14)$$

$$R_V = r_k \cdot l \cdot \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{U_V}{U}\right)^2 \quad (3.15)$$

$$C_V = c_k \cdot l \cdot \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{U_V}{U}\right)^2 \quad (3.16)$$

[1]

Tab. 3.4 Tabulka vypočtených náhradních parametrů venkovního vedení prvků RL

Tabulka vypočtených parametrů vedení AlFe 110/22							
Označení ve schématu	Uvažované hodnoty			Parametry udané výrobcem		Vypočítané hodnoty	
	U _v [V]	U [V]	l [m]	r _k [Ω/m]	x _k [Ω/m]	R [Ω]	L [H]
Zv3	6000	6000	2500	0,000266	0,00009739	0,6650	0,000775
Zv4	6000	6000	1160	0,000266	0,00009739	0,3086	0,000360
Zv5	6000	6000	1000	0,000266	0,00009739	0,2660	0,000310
Zv6	6000	6000	1000	0,000266	0,00009739	0,2660	0,000310
Zv8	6000	6000	1300	0,000266	0,00009739	0,3458	0,000403
Zv9	6000	6000	2235	0,000266	0,00009739	0,5945	0,000693
Zv10	6000	6000	1000	0,000266	0,00009739	0,2660	0,000310
Zv16	6000	6000	1100	0,000266	0,00009739	0,2926	0,000341
Zv19	6000	6000	1300	0,000266	0,00009739	0,3458	0,000403

Příklad výpočtu prvního řádku určení parametrů venkovního vedení AlFe110/22

v Tab. 3.4:

$$X_{V3} = x_k \cdot l_3 \cdot \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{U_V}{U}\right)^2 = 0,00009739 \cdot 2500 \cdot 1 \cdot \left(\frac{6000}{6000}\right)^2 = 0,2345 \text{ [}\Omega\text{]} \quad (3.17)$$

$$L_{V3} = \frac{X_{V3}}{(2 \cdot \pi \cdot 50)} = 0,000775 \text{ [H]} \quad (3.18)$$

$$R_{V3} = r_k \cdot l \cdot \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{U_V}{U}\right)^2 = 0,000266 \cdot 2500 \cdot 1 \cdot \left(\frac{6000}{6000}\right)^2 = 0,655 \text{ [}\Omega\text{]} \quad (3.19)$$

Tab. 3.5 Tabulka vypočítaných náhradních parametrů venkovního vedení prvků RLC

Tabulka vypočítaných parametrů prvků RLC pro kabel 6CHCU 3x95+3x16									
Označení ve schématu	Uvažované hodnoty			Parametry udané výrobcem			Vypočítané hodnoty		
	U _v [V]	U [V]	l [m]	r _k [Ω/m]	x _k [Ω/m]	x _c [F/m]	R [Ω]	L [H]	C [F]
Zk5.1	6000	6000	300	0,000795	0,000113	566,39	0,2385	0,00001079	0,0000000843
Zk9.1	6000	6000	1000	0,000795	0,000113	566,39	0,7950	0,00035969	0,000000281
Zk9.2	6000	6000	1000	0,000795	0,000113	566,39	0,7950	0,00035969	0,000000281

Příklad výpočtu prvního řádku kabelového vedení CHCU 3x95+3x16 v Tab 3.5.:

$$X_{k5.1} = x_{k5.1} \cdot l_{5.1} \cdot \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{U_V}{U}\right)^2 = 0,000113 \cdot 300 \cdot \frac{1}{1} \cdot \left(\frac{6000}{6000}\right)^2 = 0,0339 [\Omega] \quad (3.20)$$

$$L_{k5.1} = \frac{X_{k3}}{(2 \cdot \pi \cdot 50)} = 0,00001079 [H] \quad (3.21)$$

$$R_{k5.1} = r_{k5.1} \cdot l_{5.1} \cdot \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{U_V}{U}\right)^2 = 0,000795 \cdot 300 \cdot \frac{1}{1} \cdot \left(\frac{6000}{6000}\right)^2 = 0,2385 [\Omega] \quad (3.22)$$

$$C_{k5.1} = c_{k5.1} \cdot l_{5.1} \cdot \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{U_V}{U}\right)^2 = 2,81 \cdot 10^{-10} \cdot 300 \cdot \frac{1}{1} \cdot \left(\frac{6000}{6000}\right)^2 = 84,3 \cdot 10^{-9} [\mu F] \quad (3.23)$$

Asynchronní vysokonapěťové motory

V průmyslu se jedná o nejrozšířenější spotřebiče, v praxi se modelují jako RL spojení. Výpočet parametrů motoru se určí ze vztahu:

$$Z_{AM} = \frac{U_V^2}{P_{AM}} \cdot \eta \cdot \cos\varphi_K \cdot \frac{1}{i_r} \quad (3.24)$$

Účinnost motoru je velmi nízký, proto lze uvést, že $Z_{AM} = X_{AM}$

$$R_{AM} = (0.005 - 0.1) \cdot X_{AM} \quad (3.25)$$

Při výpočtu se uplatní korekční koeficient:

- $k_{hf} = 0,78$ pro asynchronní motor s kotvou nakrátko
- $k_{hf} = 0,88$ pro asynchronní motor s kotvou vinutou

[1]

Tab. 3.6 Vypočítané hodnoty náhradních parametrů vysokonapěťových motorů prvků RL

Tabulka motorů vysokonapěťových									
Označení	Uvažované hodnoty		Štítkové hodnoty motorů				Vypočítané honoty		
	P [W]	U _v [V]	U [V]	cos φ [-]	η [-]	I _r [-]	R _m [Ω]	L [H]	cosφ _K [-]
M 5.7	300000	6000	6000	0,81	0,93	3,5	1,7046	0,0723	0,7128
M 6.1	350000	6000	6000	0,88	0,94	5,4	1,0399	0,0441	0,7744
M 8.1	350000	6000	6000	0,88	0,94	5,4	1,0399	0,0441	0,7744
M 19.1	350000	6000	6000	0,88	0,94	5,4	1,0399	0,0441	0,7744

Příklad výpočtu prvního řádku pro M 5.7 Tab 3.6:

$$\cos\varphi_{K5.7} = k_{vf} \cdot \cos\varphi_{5.7} = 0,88 \cdot 0,81 = 0,7218 \quad (3.26)$$

$$Z_{M5.7} \approx X_{M5.7} = \frac{U_v^2}{P_{M5.7}} \cdot \eta \cdot \cos\varphi_K \cdot \frac{1}{i_r} = \frac{6000^2}{180000} \cdot 0,93 \cdot 0,7128 \cdot \frac{1}{5} \quad (3.27)$$

$$Z_{M5.7} \approx X_{M5.7} = 22,72814 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$L_{M5.7} = \frac{X_{M5.7}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{22,72814}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,0723 \text{ [H]} \quad (3.28)$$

$$R_{M5.7} = 0,075 \cdot X_{M5.7} = 0,075 \cdot 22,7814 = 1,7046 \text{ [}\Omega\text{]} \quad (3.29)$$

3.4 Výpočet zátěží nízkonapěťových hladin

Odběry NN s připojenými asynchronními motory bez kompenzace

Pro zjištění parametrů se vychází z odhadu:

- výkonového využití napájecích transformátorů – k_{VT} ,
- výkonového využití skutečně připojených motorů – k_{VM} ,
- účinníku motorů nakrátko – $\cos \varphi_K$.

Dosazením do vzorců lze určit požadované parametry potřebné pro výpočet modelu impedance sítě.

Střední výpočtový výkon připojených motorů:

$$S_{AM} = S_{TR} \cdot \frac{k_{VT}}{k_{VM}} \quad (3.30)$$

$$X_{AM} = \frac{1}{i_r} \cdot \frac{k_{VM}}{k_{VT}} \cdot \frac{U_V^2}{S_{TR}} \cdot \cos \varphi_K \quad (3.31)$$

[1]

V případě výpočtu bez nutnosti odhadovat neznámé koeficienty je možné vypočítat požadované parametry podle vzorců:

$$X_{AM} = (0.098 - 0.115) \cdot \frac{U_V^2}{S_{AM}} \quad (3.32)$$

$$R_{AM} = 0.15 \cdot X_{AM} \quad (3.33)$$

[1]

Vzhledem k rozsáhlosti závodové sítě a k poměrně velkému počtu neznámých parametrů motorů, které by bylo nutné znát pro výpočet modelovaných parametrů RL, byl zvolen druhý způsob výpočtu.

Tab. 3.7 Tabulka vypočítaných náhradních parametrů nízkonapěťových motorů prvků RL

Tabulka motorů nízkonapěťových									
Označení	Uvažované hodnoty		Štítkové hodnoty motorů				Vypočítané hodnoty		
	P [W]	U _v [V]	U [V]	cos φ [-]	η [-]	i _r [-]	R _m [Ω]	L [H]	cos φ _K [-]
M 5.3	180000	6000	500	0,83	0,93	5	1,8062	0,0767	0,6474
M 5.4	100000	6000	500	0,83	0,887	5	3,1009	0,1316	0,6474
M 8.2	170000	6000	500	0,85	0,92	5	1,9375	0,0822	0,663
M 9.3	80000	6000	500	0,84	0,946	5	4,1838	0,1776	0,6552
M 9.4	80000	6000	500	0,84	0,946	5	4,1838	0,1776	0,6552
M 9.5	80000	6000	500	0,84	0,946	5	4,1838	0,1776	0,6552
M 9.7	90000	6000	500	0,84	0,946	5	3,7189	0,1578	0,6552
M 16.1	300000	6000	500	0,88	0,94	5,4	1,0754	0,0456	0,6864
M 16.2	300000	6000	500	0,88	0,94	5,4	1,0754	0,0456	0,6864
M 16.3	300000	6000	500	0,88	0,94	5,4	1,0754	0,0456	0,6864
M 19.2	150000	6000	500	0,85	0,92	5	2,1959	0,0932	0,663

Příklad výpočtu prvního řádku pro M 5.3 Tab. 3.7:

$$M_{5.3} \approx X_{M5.3} = \frac{U_v^2}{P_{M5.3}} \cdot \eta \cdot \cos \varphi_K \cdot \frac{1}{i_r} = \frac{6000^2}{180000} \cdot 0,93 \cdot 0,674 \cdot \frac{1}{5} \quad (3.34)$$

$$= 24,0832 [\Omega]$$

$$R_{M5.3} = 0,075 \cdot X_{M5.3} = 0,075 \cdot 24,08328 = 1,8062 [\Omega] \quad (3.35)$$

$$L_{M5.3} = \frac{X_{M5.3}}{(2 \cdot \pi \cdot f)} = \frac{21,675}{(2 \cdot \pi \cdot 50)} = 0,07670 [H] \quad (3.36)$$

Odběry NN bez připojených asynchronních motorů

Jedná se o odběry pasivních spotřebičů, světla, topení, činné odpory. Výpočet parametrů se určí ze vztahu:

$$R_s = \frac{U_v^2}{k_{VT} S_{TR}} \cdot \cos \varphi_s \quad (3.37)$$

$$X_s = R_s \cdot \operatorname{ctg} \varphi_s \quad (3.38)$$

[1]

Tab. 3.8 Tabulka vypočítaných náhradních parametrů spotřebičů nízkonapěťové hladiny prvků RL

Výpočet náhradních prvků spotřebičů								
Označení ve schématu	Tr	Uvažovaná hodnota		Vypočítaná hodnota				
	S [kVA]	S [VA]	U [V]	Rs [Ω]	Xs [Ω]	L[H]	k _{vt}	cos φ [-]
Zs 3.0	100	20000	6000	1656,00	3887,34	12,37	0,20	0,92
Zs 3.1	160	16000	6000	2205,00	10858,93	34,57	0,10	0,98
Zs 3.2	160	24000	6000	1470,00	7239,29	23,04	0,15	0,98
Zs 3.3	63	12000	6000	2940,00	14478,57	46,09	0,19	0,98
Zs 3.4	400	10000	6000	3528,00	17374,29	55,30	0,03	0,98
Zs 3.9	50	7000	6000	5040,00	24820,41	79,01	0,14	0,98
Zs 4.1	400	360000	6000	80,00	106,67	0,34	0,90	0,8
Zs 4.2	50	5000	6000	6480,00	13379,53	42,59	0,10	0,9
Zs 5.1	400	55000	6000	615,27	1695,19	5,40	0,14	0,94
Zs 5.5	100	26000	6000	1301,54	3585,98	11,41	0,26	0,94
Zs 5.7	160	8000	6000	4140,00	9718,35	30,93	0,05	0,92
Zs 5.8	100	12000	6000	2820,00	7769,63	24,73	0,12	0,94
Zs 6.1	160	14000	6000	2108,57	3020,86	9,62	0,09	0,82
Zs 6.2	160	14400	6000	2200,00	4076,02	12,97	0,09	0,88
Zs 6.3	160	20000	6000	1584,00	2934,73	9,34	0,13	0,88
Zs 6.4	160	32000	6000	967,50	1630,53	5,19	0,20	0,86
Zs 8.2	250	97000	6000	304,33	436,00	1,39	0,39	0,82
Zs 9.1	250	64000	6000	551,25	2714,73	8,64	0,26	0,98
Zs 9.2	250	108000	6000	326,67	1608,73	5,12	0,43	0,98
Zs 9.6	160	10000	6000	3528,00	17374,29	55,30	0,06	0,98
Zs 10.1	250	20000	6000	1710,00	5202,56	16,56	0,08	0,95
Zs 10.2a	250	80000	6000	400,50	781,75	2,49	0,32	0,89
Zs 10.2b	250	70000	6000	504,00	2482,04	7,90	0,28	0,98
Zs 10.3	250	50000	6000	705,60	3474,86	11,06	0,20	0,98
Zs 10.4	250	40000	6000	882,00	4343,57	13,83	0,16	0,98
Zs 14	400	87000	6000	405,52	1997,04	6,36	0,22	0,98
Zs 15	160	22066	6000	1582,53	6314,35	20,10	0,14	0,97
Zs 16.4	160	10000	6000	3276,00	7190,31	22,89	0,06	0,91
Zs 16.5	1000	25000	6000	1296,00	2675,91	8,52	0,03	0,9
Zs 16.6	1000	25000	6000	1324,80	3109,87	9,90	0,03	0,92
Zs 16.7	1000	15000	6000	2232,00	5647,41	17,98	0,02	0,93
Zs 16.8	1000	15000	6000	2184,00	4793,54	15,26	0,02	0,91
Zs 16.9	1000	20000	6000	1674,00	4235,56	13,48	0,02	0,93
Zs 18	630	110000	6000	294,55	608,16	1,94	0,17	0,9

Příklad výpočtu prvního řádku Rs 3.0 Tab. 3.8:

$$R_{S3.0} = \frac{U_v^2}{k_{VT} \cdot S_{TR}} \cdot \cos\varphi_s = \frac{6000^2}{0,1 \cdot 200000} \cdot 0,92 = 1656 [\Omega] \quad (3.39)$$

$$X_{S3.0} = R_{S3.0} \cdot \cot g\varphi_s = 1656 \cdot 2,3474 = 3887 [\Omega] \quad (3.40)$$

$$L_{S3.0} = \frac{X_{S3.0}}{(2 * \pi * f)} = \frac{3887}{(2 * \pi * 50)} = 12,37 [H] \quad (3.41)$$

Poté je možné vytvořit náhradní schéma pro samotný výpočet software Matlab/Simulink. Náhradní schéma je uvedeno v příloze č. 2.

3.5 Charakteristické impedance zařízení připojených v závodových sítích

Výslednou impedanci sítě lze graficky zobrazit dvěma způsoby. První způsob ji zobrazí jako funkci frekvence, kde jsou vyneseny složka amplitudy a složka fáze samostatně. Druhou možností je zobrazení výsledné impedance v komplexní rovině. V praxi je využívána především první možnost, protože tento způsob umožňuje snadný odečet frekvenční závislosti a rezonanční frekvence. [1]

3.5.1 Elektrické sítě s odporovou nebo induktivně-odporovou zátěží

V síti s odporovou nebo induktivně-odporovou zátěží mohou být připojeny elektrické odporové pece, vařiče, žárovkové osvětlení, sítě s asynchronními motory bez připojené kompenzace apod. Takovéto sítě mají impedanční charakter přímkový nebo polokruhový.

U těchto sítí nedochází k rezonančnímu jevu. [1]

3.5.2 *Elektrické sítě s odporově-induktivní zátěží s kompenzací*

V takovéto síti je velmi často připojeno velké množství motorů společně s individuální nechráněnou kompenzací, nebo mohou být kompenzovány centrální kompenzací. Tyto sítě mají impedanční charakteristiku kruhovou, dochází zde k rezonančnímu jevu. [1]

3.5.3 *Elektrické sítě s odporově-induktivní zátěží a s kompenzací připojenou přes vedení*

Jde v podstatě o síť předešlého příkladu, kde dochází vlivem dlouhého napájecího kabelu k značnému ovlivnění celé sítě. Uplatňují se zde kapacity zejména u vyšších frekvencí, tato kapacita způsobuje posunutí rezonanční frekvence. [1]

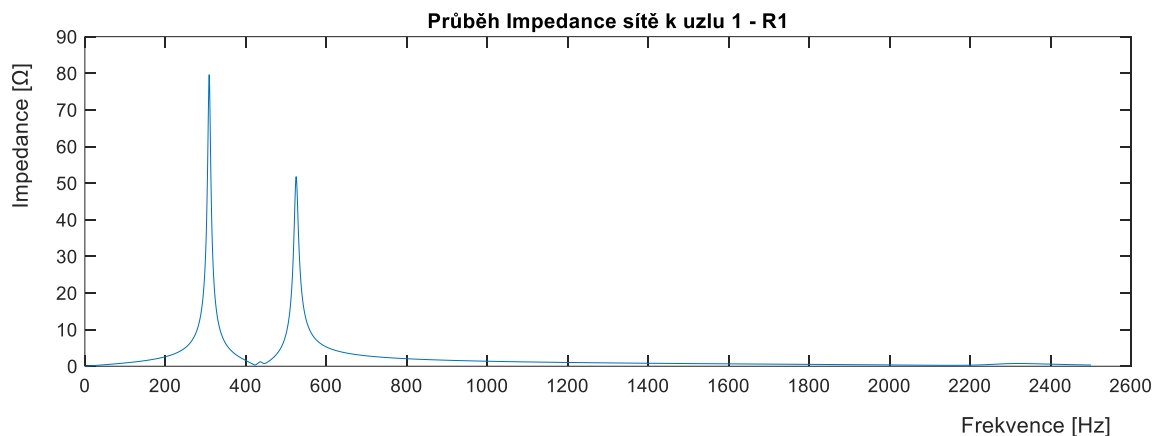
3.6 Výpočet parametrů v náhradním schématu

Určit jednopólové schéma u prezentovaného průmyslového závodu je poměrně složité. Jedná se o rozsáhlé rozvody a velké množství spotřebičů, které se připojují a odpojují. Snahou této práce bylo přiblížit se co možná nejpřesněji, aby byl výsledný model co nejpřesnější a zároveň přehledný. Jsou zde zahrnuty takové prvky, které mohou nebo ovlivňují uvedený rozvod elektrické energie. Vzdušné vedení v délce do 1 km je zanedbáno a není v modelu zahrnuto. Vedení, které je delší, než 1 km je modelováno pomocí π -článku. Vzhledem k tomu, že se nejedná o velké vzdálenosti, je modelováno jen podélnou indukčností a podélným odporem. U rozvodu pomocí vysokonapěťového kabelu typu CHCU je v modelu zahrnuta navíc také boční kapacita, která se u delších kabelových tras uplatňuje. Kabely do 250 m nejsou v modelu zahrnuty.

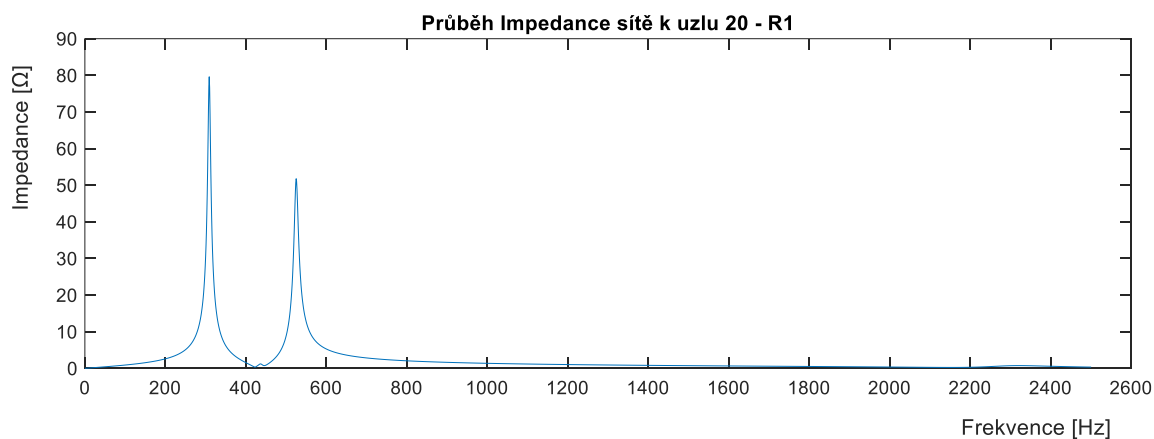
Jednopólové schéma obsahuje všechny připojené výkonové transformátory. Výpočet těchto parametrů vycházel ze štítkových hodnot jednotlivých transformátorů.

Při určování parametrů motorů pro náhradní schéma je uvažován součinitel zatížení, nikoliv instalovaný výkon.

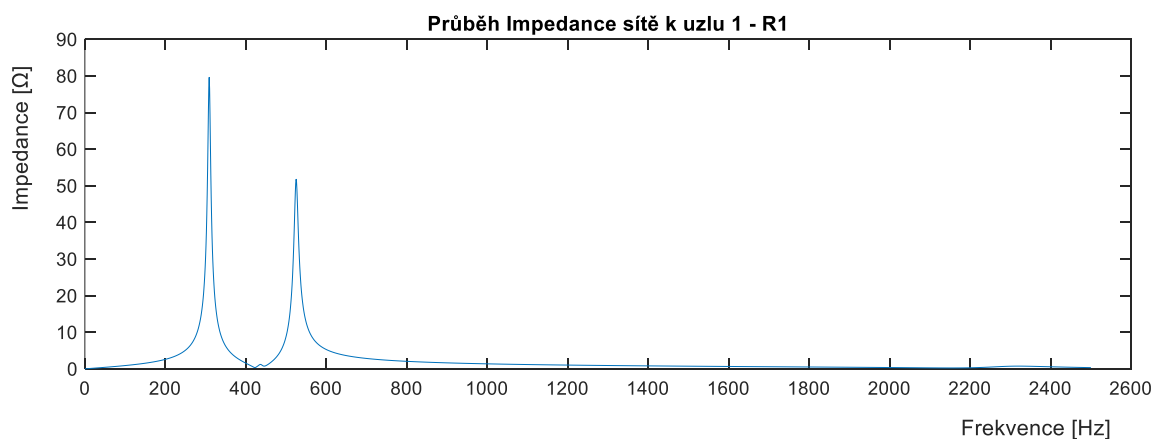
Nejsložitější částí, při tvorbě modelu závodové sítě bylo odhadnutí výkonu připojených pasivních spotřebičů. Aby byl model co nejpřesnější, bylo provedeno měření proudu a na základě toho bylo možné určit přibližně výkon připojených spotřebičů.



Obr. 3.1 Průběh impedance sítě uzlu 1 - R1 v závislosti na frekvenci



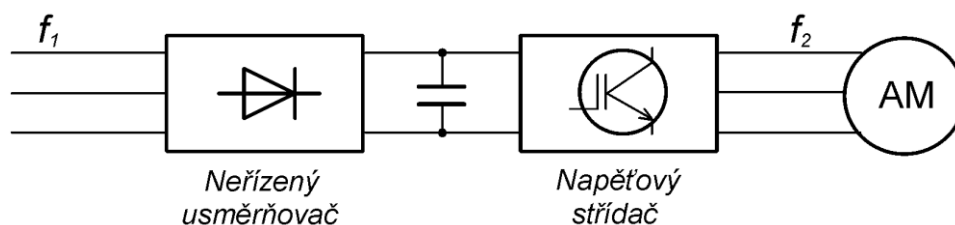
Obr. 3.2 Průběh impedance sítě uzlu 20 – R1 v závislosti na frekvenci



Obr. 3.3 Průběh impedance sítě uzlu 1 - R1A v závislosti na frekvenci

4 Harmonické proudy nepřímých měničů kmitočtu s napětovým střídačem

V současné době se nejvíce používají měniče kmitočtu s napětovým střídačem. Struktura takového měniče je znázorněna na *Obr. 4.1*.



Obr. 4.1 Struktura nepřímého měniče kmitočtu s napětovým střídačem (převzato [4])

Frekvenční měnič s napětovým střídačem se skládají z usměrňovače, který usměrní vstupní napětí, a střídače, který usměrněné napětí a proud zpětně rozstřídá na požadovaný kmitočet. [5]

4.1 Nepříznivé jevy při provozu napětových měničů

Zjednodušeně lze popsat měnič následovně. Vstupním článkem frekvenčního měniče je usměrňovač, který je z důvodů ekonomických, ale také konstrukčních, nejčastěji neřízený. Ten usměrní vstupní napětí. Stejnoseměrný meziobvod obsahuje velký kondenzátor na vstupu do střídače, stejnoseměrný meziobvod se jeví ke střídači jako napětový zdroj a zároveň je zátěží pro usměrňovač. Jeho úkolem je zmenšovat trvalé či náhodné výchylky usměrněného napětí, tím pádem přivádí na střídač málo zvlněné napětí. Bohužel z hlediska působení kondenzátoru na napájecí síť se jedná o zátěž s nepříznivým průběhem proudu, to vede na vysoké hodnoty s obsahem vyšších harmonických. Průběh fázových a sdružených napětí včetně proudů u šestipulsního usměrnění názorně ukazuje *Obr. 4.2*. Poslední částí je střídač, ten usměrněné napětí rozstřídá na požadovaný kmitočet f_2 . Oba střídavé obvody jsou oddělené stejnoseměrným meziobvodem, řízení výstupního kmitočtu je zcela nezávislé na kmitočtu vstupním. [4]

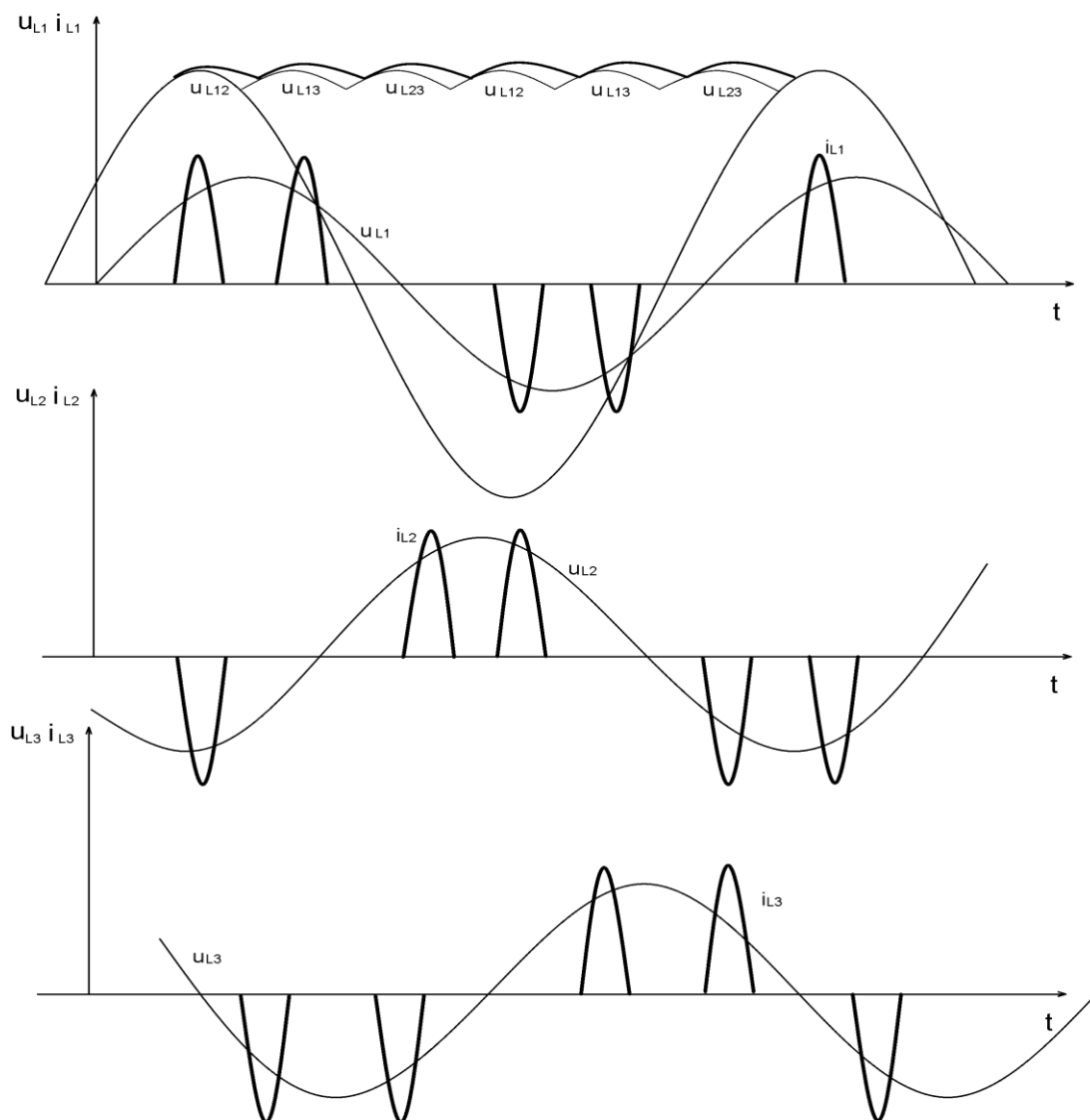
Na Obr. 4.1 je vidět deformovaný vstupní fázový proud protékající usměrňovačem. Tyto proudy nejsou jednovlnné harmonické, a proto při provozu měniče vznikají zpětné vlivy na napájecí síť.

Tyto zpětné vlivy lze rozdělit na:

- vyšší harmonické proudů a napětí,
- deformační výkon,
- jalový výkon,
- rádiové rušení.

Použitím nepřímých měničů kmitočtu se šestipulsním můstkovým zapojením jsou generovány harmonické s řádem $h=5, 7, 11, 13, 17, 19\dots$

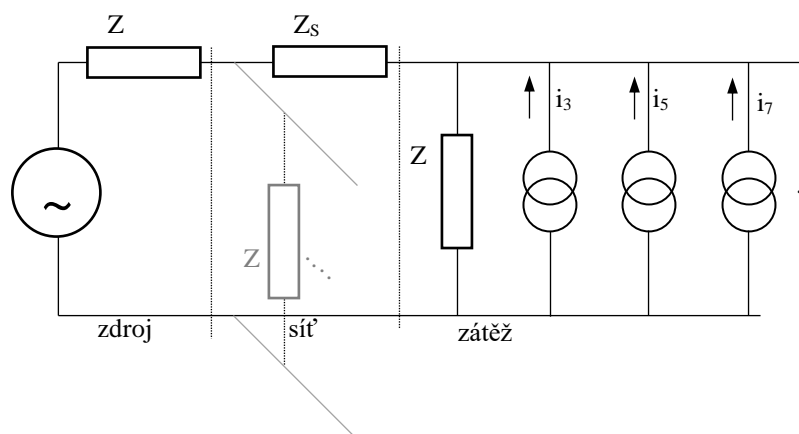
[4]



Obr. 4.2 Průběh napětí a proudu šestipulsního usměrňování kondenzátorovou baterií (převzato [5])

4.2 Šíření harmonických proudů v síti

Každou nelineární zátěž v obvodu lze za určitých podmínek a zjednodušení reprezentovat náhradním obvodem, a to tak, že nahradíme zátěž lineární zátěží, která představuje odebíraný proud základní harmonické frekvence a k tomu přiřazené jednotlivé proudové zdroje, z nichž každý představuje daný harmonický proud příslušné frekvence, který generuje. Tím dostaneme příslušný náhradní obvod nelineární zátěže. [7]



Obr. 4.3 Náhradní obvod nelineární zátěže a napájecího zdroje (převzato [7])

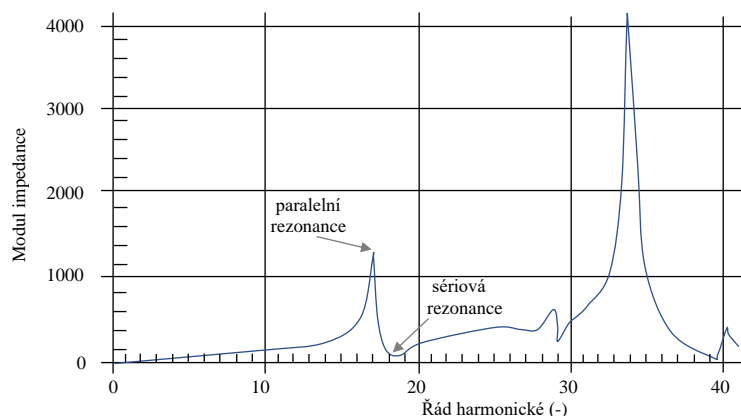
Na uvedeném zjednodušeném náhradním schématu (Obr. 4.2) se budou generované harmonické proudy šířit od daného zdroje zátěže, směrem do napájecí sítě. Rozložení harmonických proudů jednotlivých větví bude rozděleno dle Ohmova zákona. Pomocí Theveninovy věty a principu superpozice lze zjistit velikost jednotlivých harmonických proudů pro každou frekvenci zvlášť a tudíž lze podle vzorce 4.1 a 4.2 vypočítat celkovou efektivní hodnotu proudu.

$$I_h = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^K I_h^{(k)} \cos \varphi_{I,h}^k\right)^2 + \left(\sum_{k=1}^K I_h^{(k)} \sin \varphi_{I,h}^k\right)^2} \quad (4.1)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + I_6^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{h=0}^H I_h^2} \quad (4.2)$$

[7]

Šíření a velikost harmonických proudů ovlivňuje impedance sítě, ve které mohou být rezonanční obvody složené z kapacit a indukčností, které svým zapojením tvoří sériová, či paralelní kombinace. Čím více se přibližuje frekvence harmonické složky dané rezonanční frekvenci sítě, tím větší má vliv na její samotnou velikost.



Obr. 4.4 Průběh impedanční charakteristiky v místě připojení zátěže (převzato [7])

4.3 Výpočet harmonických proudů vyšších řádů

Aby bylo možné zjistit pomocí prostředí MATLAB/SIMULINK velikosti jednotlivých napěťových harmonických složek, je nutné nejdříve vypočítat proudy, které instalované měniče mohou odebírat. Vypočtené proudy budou následně dosazeny do simulace.

Pro harmonickou analýzu odebíraného proudu třífázového usměrňovače je uvažován zjednodušený průběh proudu. K výpočtu je použit zobecněný amplitudový zákon. Je přihlédnuto k reálnému zatížení měničů, nikoliv k instalovanému výkonu. Vztažné napětí je 6 000 V.

$$I_h = \frac{1}{h} \cdot I_1 \frac{\sin \frac{hd}{2}}{\sin \frac{d}{2}} \quad (4.3)$$

Uvažujeme-li, že je dioda otevřena 120 ° dostáváme tvar

$$I_h = \frac{1}{h} \cdot I_1 \quad (4.4)$$

To, jak velká je sledovaná harmonická h , ovlivňuje průběh d

[2]

Tab. 4.1 Hodnoty příslušných harmonických proudů odebírané měniči

Označení motoru ve schématu	Výkon motoru [kW]	Zastoupení jednotlivých harmonických [A]					
		I _{h5}	I _{h7}	I _{h11}	I _{h13}	I _{h17}	I _{h19}
M 3.5	550	11,14	7,96	5,06	4,29	3,28	2,93
M 3.6	550	11,14	7,96	5,06	4,29	3,28	2,93
M 5.3	800	16,21	11,58	7,37	6,23	4,77	4,26
M 5.6	800	16,21	11,58	7,37	6,23	4,77	4,26
M 5.8	200	4,05	2,89	1,84	1,56	1,19	1,07

Příklad výpočtu pro motor M 3.5 Tab. 4.1 harmonických proudů odebíraných frekvenčním měničem:

$$I_1 = \frac{P_{M3.5}}{\sqrt{3} \cdot U_v \cdot \cos\varphi} = \frac{400000}{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0,95} = 40,52 \text{ [A]} \quad (4.5)$$

$$I_{hM3.5} = \frac{1}{h} \cdot I_1 = \frac{1}{5} \cdot 40,52 = 11,14 \text{ [A]} \quad (4.6)$$

$$I_{hM3.5} = \frac{1}{h} \cdot I_1 = \frac{1}{7} \cdot 40,52 = 7,96 \text{ [A]} \quad (4.7)$$

$$I_{hM3.5} = \frac{1}{h} \cdot I_1 = \frac{1}{11} \cdot 40,52 = 5,06 \text{ [A]} \quad (4.8)$$

$$I_{hM3.5} = \frac{1}{h} \cdot I_1 = \frac{1}{13} \cdot 40,52 = 4,29 \text{ [A]} \quad (4.9)$$

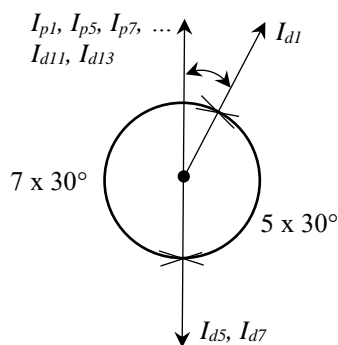
$$I_{hM3.5} = \frac{1}{h} \cdot I_1 = \frac{1}{17} \cdot 40,52 = 3,28 \text{ [A]} \quad (4.10)$$

$$I_{hM3.5} = \frac{1}{h} \cdot I_1 = \frac{1}{19} \cdot 40,52 = 2,93 \text{ [A]} \quad (4.11)$$

5 Výpočet a zobrazení harmonických napětí vyšších řádů

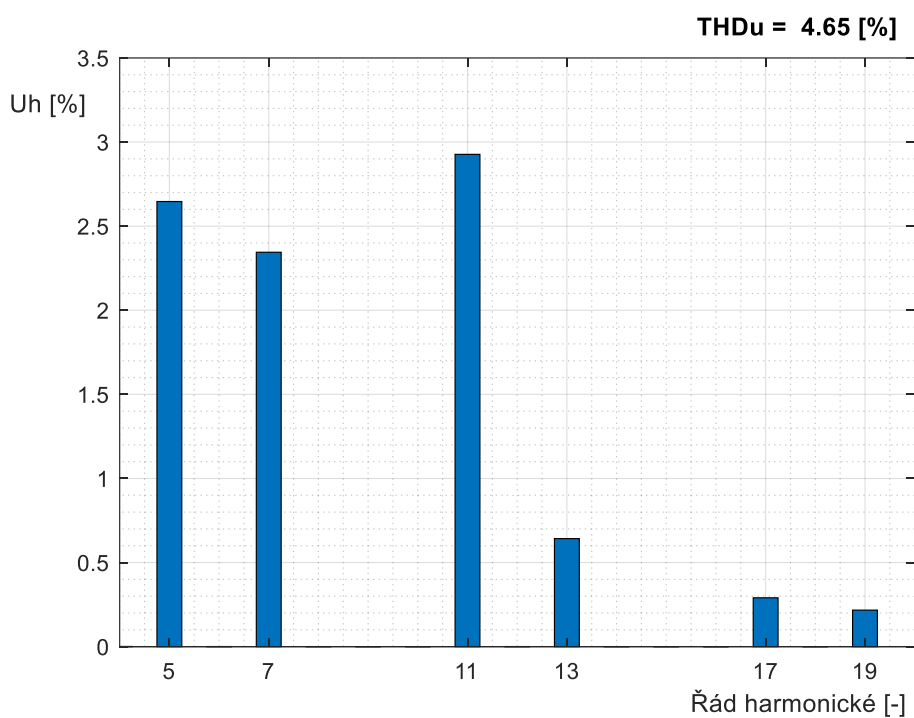
5.1 Výpočet harmonických napětí

K výpočtu harmonických napětí vyšších řádů bylo užito prostředí MATLAB-SIMULINK. Pomocí této dynamické nadstavby prostředí MATLAB byly zjištěny velikosti jednotlivých napěťových složek. K výpočtu a simulaci bylo použito náhradní schéma, které sloužilo pro výpočet impedance závodové sítě. Do schématu byly navíc zahrnuty proudové zdroje. Každý proudový zdroj představuje u frekvenčního měniče příslušnou jednotlivou proudovou harmonickou odpovídajícího řádu. Velikosti jednotlivých proudů, byly dosazeny z výpočtů v předchozí kapitole 4.2. Při dosazování jednotlivých proudů bylo přihlédnuto k hodinovému úhlu vinutí příslušného transformátoru, ze kterého jsou dané frekvenční měniče zapojeny. U transformátoru T3.5 je vinutí zapojené v Dy0 a hodinový úhel transformátoru je 0° , proto proudové zdroje, které zastupují jednotlivé harmonické složky mají úhel 0° . Oproti tomu transformátor T3.6 má vinutí zapojené Dy1, hodinový úhel vinutí je 30° , proudové zdroje, které zastupují jednotlivé harmonické složky mají úhel 30° . U transformátoru T5.2 je hodinový úhel transformátoru Dy1, a tedy stejně jako u T3.6 je dosazen úhel 30° . U transformátoru T5.9 je hodinový úhel vinutí posunutý o úhel 150° , proudové zdroje, které zastupují jednotlivé harmonické složky mají úhel 150° . Transformátor T5.9 je v zapojení Dy0, zde jsou u proudových zdrojů úhly 0° . U všech proudových zdrojů je vynechána základní harmonická, není ve schématech modelována, protože impedance je počítána pro vyšší frekvence.

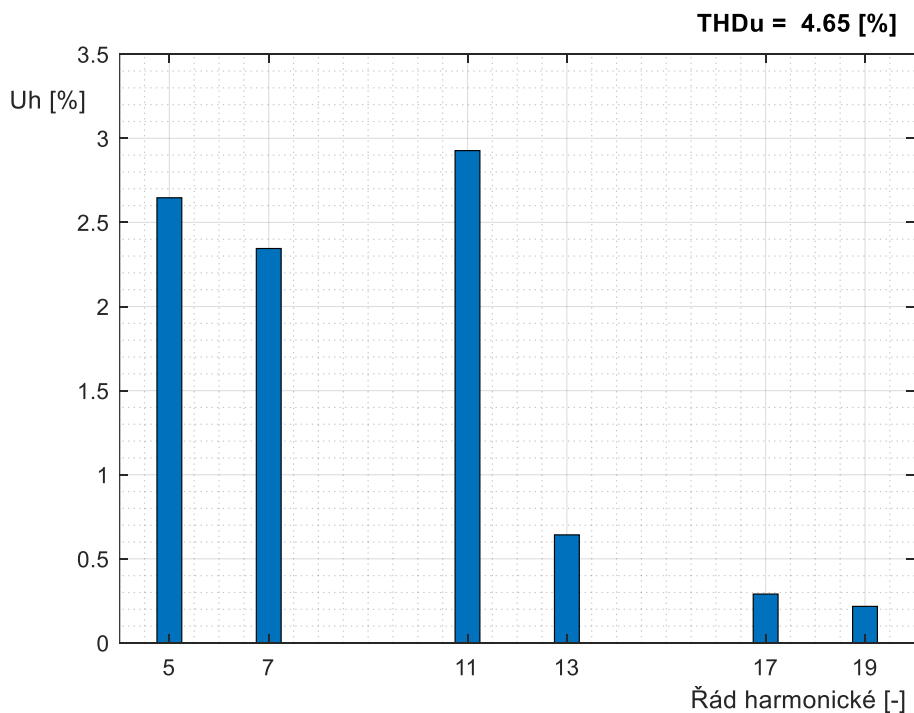


Obr. 5.1 Princip eliminace 5. a 7. harmonické (převzato [1])

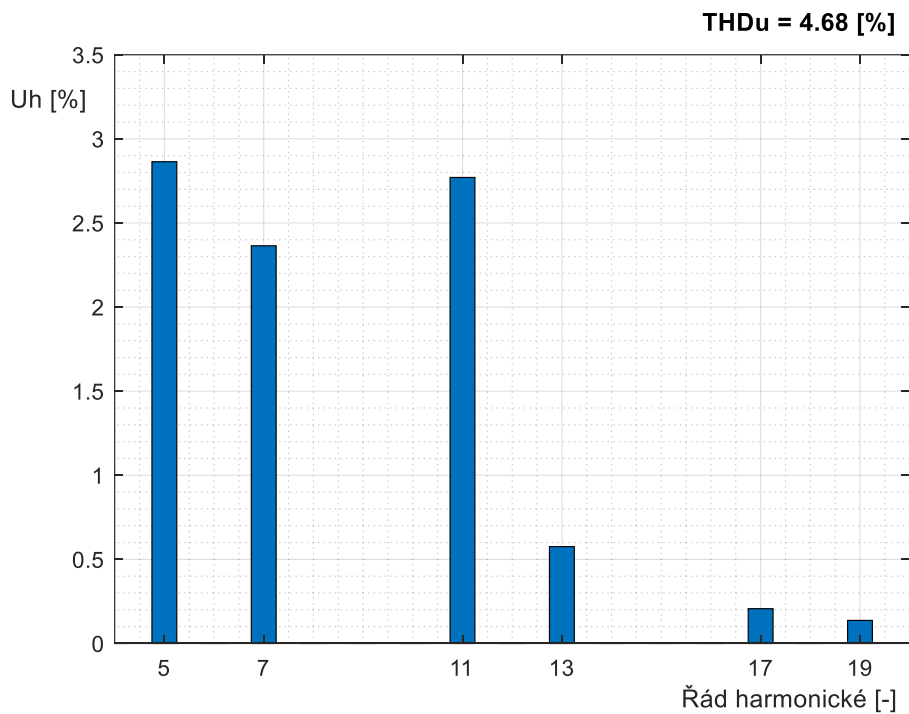
Důvod různě zapojených vinutí instalovaných transformátorů, názorně vystihuje *Obr. 5.1*. Všechny instalované frekvenční měniče, které se užívají v průmyslovém závodě mají neřízený usměrňovač, tudíž všechny měniče mají stejný úhel řízení, ale naproti tomu s rozdílným zapojením vinutí, například T3.5 Dy0 a T3.6 Dy1. Tyto dva transformátory pracují na jedné poháněcí stanici. Jejich výsledný posuv stejných fází napětí je 30° , proto se eliminují složky 5. a 7. harmonické, naproti tomu složky 11. a 13. harmonické obou měničů se algebraicky sčítají. [2]



Obr. 5.2 Zastoupení harmonických složek napětí k uzlu 1 – R1



Obr. 5.3 Zastoupení harmonických složek napětí k uzlu 20 - R1



Obr. 5.4 Zastoupení harmonických složek napětí k uzlu 1 - R1A

6 Měření harmonických složek

6.1 Měření harmonických složek o vyšších řádech

Krátkodobé synchronizované měření ve vybraných uzlech, bylo provedeno pomocí analyzátorů sítě EPPE CX vyráběné firmou KoCoS Messtechnik AG. Tyto analyzátoři sítě jsou přímo zabudované v Rozvodně R1, v přívodním poli č. 1 a poli č. 20. Dalším vybraným uzlem, kde je analyzátor sítě pevně zabudován, je rozvodna R1A (také přívodní pole č. 1). Všechny tři analyzátoři byly synchronizovány v jednotný čas, aby bylo možné porovnávat šíření harmonických emisí v napájecí síti. Perioda ukládání byla nastavena na 10 minut. Sledované období probíhalo od 31. července 2018 do 11. dubna 2019. V tomto období bylo získáno dostatečné množství dat, která byla následně vyhodnocena při provozu:

- léto/zima
- noc/den
- pracovní cyklus týden/víkend,
- provoz s frekvenčními měniči/bez provozu frekvenčních měničů.



Obr. 6.1 Analyzátor sítě EPPE CX (převzato [12])

6.2 Popis analyzátoru sítě EPPE CX

Analyzátor sítě EPPE CX vyhodnocuje kvalitu elektrické energie v souladu s předvolenou normou ČSN EN 50160. Jedná se o jednoduše použitelný nástroj pro analýzu s automatickým hodnocením a posouzením kvality elektrické energie podle mezinárodních norem. Analyzátor sítě má 4 proudové a 4 napěťové kanály. Analogové vstupy mají přesnost 0,05 % a vzorkovací frekvenci ve výši 200 kHz.

Měřicí přístroj nabízí:

- vzdálenou konfiguraci,
- plně automatický provoz měřícího systému s:
 - dálkovým přenosem dat,
 - archivací záznamů v databázi,
 - tiskem nebo odesláním PQ nebo poruchových zpráv,
 - exportem PQ a poruchových záznamů v běžných formátech,
 - online monitoringem,
- importní exportní funkce umožňující výměnu dat mezi různými systémy pomocí standardních formátů, jako je PQDIF, Comtrade, CSV a XML (Nequal),
- schopnost mnohačetného zobrazení.

[12]

6.3 Naměřené hodnoty určených uzlů

Tab. 6.1 Změřené hodnoty ze dne 31. 7. 2018 v čase 15:20 zařízení s FM v provozu léto – den

31.07.2018 15:20	1-R1			20-R1			1-R1A		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
U [V]	3630	3754	3654	3629	3755	3656	3591	3718	3617
I [A]	102,725	103,51	105,448	98	98,3	95,93	86,779	84,3218	83,99
P [W]	359184	372168	371260	340791	353447	334115	266924	263889	256839
Q [VAr]	13356	5048	21056	23767	19177	55888	137191	144750	139205
THD-U [%]	3,728	3,7949	3,657	3,7145	3,7908	3,6501	4,5759	4,5823	4,5265
THD-I [%]	27,214	29,6498	26,7819	28,51	28,975	26,502	26,55	27,5188	27,2539
PF [-]	0,991	0,998	0,9982	0,9975	0,9984	0,9863	0,8812	0,8667	0,8705
harmonická	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]
5	1,3666	1,2515	1,316	1,3636	1,2529	1,3144	2,3584	2,2264	2,3098
7	1,07	0,9703	0,9644	1,0677	0,9697	0,964	2,0092	1,8633	1,904
11	3,2484	3,4077	3,2289	3,24	3,404	3,223	3,2066	3,4116	3,2484
13	0,456	0,4143	0,42	0,4633	0,4125	0,2267	0,5236	0,4732	0,5211
17	0,0103	0,1855	0,0227	0,1912	0,4125	0,267	0,5372	0,5007	0,4841
19	0,0941	0,0756	0,0685	0,0936	0,1847	0,0682	0,212	0,2204	0,2117

Tab. 6.2 Změřené hodnoty ze dne 8. 12. 2018 v čase 15:30 zařízení s FM v provozu zima – den

08.12.2018 15:30	1-R1			20-R1			1-R1A		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
U [V]	3665	3716	3598	3665	3717	3601	3629,57	3682,85	3565,65
I [A]	149,237	150	150	144,3	143,7	142	89,234	86,468	85,4123
P [W]	540569	549992	536958	518592	524069	497306	278351	264524	259063
Q [Var]	21099	47773	12870	65422	69295	63280	144103	156116	138561
THD-U [%]	2,8794	2,7273	2,7832	2,8738	2,7244	2,7788	3,7971	3,6614	3,7413
THD-I [%]	14,359	14,42	14,416	14,69	13,94	13,69	25,0633	26,4182	26,4529
PF [-]	0,9991	0,9961	0,996	0,922	0,9913	0,9803	0,885	0,8574	0,8787
harmonická	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]
5	1,7878	1,6733	1,698	1,7858	1,6751	1,696	2,767	2,6547	2,7368
7	1,1244	1,264	1,2022	1,1225	1,1243	1,205	1,6984	1,7129	1,7792
11	1,935	1,7992	1,8173	1,929	1,7973	1,8136	1,8027	1,6909	1,6428
13	0,1619	1,792	0,1654	0,1614	0,1431	0,1654	0,3663	0,3332	0,3301
17	0,1534	0,1438	0,2083	0,1525	0,1366	0,2072	0,4035	0,3118	0,3818
19	0,0756	0,0826	0,0859	0,0752	0,0819	0,0852	0,1777	0,2276	0,1811

Tab. 6.3 Změřené hodnoty ze dne 1. 8. 2018 v čase 5:10 zařízení s FM v provozu léto – noc

01.08.2018	1-R1			20-R1			1-R1A		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
5:10									
U [V]	3578	3692	3566	3578,27	3692,9	3567,79	3556	3672	3545
I [A]	101,71	104,95	103,385	106,248	105,652	106,123	57,1	55	55
P [W]	354369	378001	359413	370462	381020	367206	181531	176708	172758
Q [VAr]	27341	7412	20693	26050	18652	55525	58818	65708	58423
THD-U [%]	2,9307	2,8366	2,8495	2,9249	2,8361	2,8458	3,7005	3,5598	3,6318
THD-I [%]	20,0234	20,1489	19,671	28,0116	27,467	25,01	35,9518	37,694	37,156
PF [-]	0,9933	0,9959	0,9943	0,994	0,9953	0,9953	0,9495	0,9364	0,9457
harmonická	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]
5	1,9042	1,7861	1,8869	1,9011	1,7878	1,8848	2,8099	2,6676	2,7995
7	1,1433	1,1363	1,0968	1,1417	1,1348	1,0972	1,6122	1,5412	1,5477
11	1,8458	1,8197	1,7676	1,842	1,8189	1,7649	1,6952	1,6878	1,6266
13	0,3357	0,3118	0,2342	0,3351	0,3103	0,234	0,3565	0,3539	0,2929
17	0,26	0,2878	0,334	0,2607	0,2866	0,3324	0,2058	0,2028	0,2265
19	0,166	0,1399	0,1504	0,1653	0,1388	0,1494	0,1703	0,1555	0,1866

Tab. 6.4 Změřené hodnoty ze dne 10. 12. 2018 v čase 22:40 zařízení s FM v provozu zima – noc

10.12.2018	1-R1			20-R1			1-R1A		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
22:40									
U [V]	3647	3678	3573	3646	3679	3576	3616	3649	3544
I [A]	128,18	133,24	129,337	130,92	131,65	130,21	78,919	76,88	75,77
P [W]	438285	454932	433909	464610	471726	447126	243095	230931	226524
Q [VAr]	21419	1728	20684	78978	80693	110607	128822	138879	123651
THD-U [%]	2,9579	2,933	2,9205	2,952	2,9316	2,9157	3,7852	3,7588	3,8113
THD-I [%]	16,294	16,107	16,208	15,647	15,0451	14,2065	26,685	28,0937	28,0506
PF [-]	0,9986	0,998	0,999	0,9858	0,9856	0,9707	0,8799	0,8527	0,8742
harmonická	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]
5	1,8311	1,6933	1,7456	1,82921	1,6948	1,7429	2,711	2,588	2,6877
7	1,1585	1,1544	1,2074	1,1567	1,1527	1,2076	1,5835	1,6099	1,6619
11	1,965	2,046	1,9473	1,9598	2,04	1,9431	1,9574	2,0488	1,955
13	0,253	0,254	0,2918	0,26633	0,2576	0,2784	0,4617	0,4328	0,467
17	0,253	0,254	0,21918	0,2517	0,2531	0,2904	0,3303	0,2808	0,3468
19	0,143	0,1478	0,17	0,1422	0,1467	0,1696	0,2291	0,2876	0,2842

Tab. 6.5 Změřené hodnoty ze dne 16. 8. 2018 v čase 9:20 zařízení rozvodny R1A bez napětí

16.8.2018 9:20	1-R1			20-R1			1-R1A		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
U [V]	3635	3753	3630	3635	3753	3632	0	0	0
I [A]	50,24	51,34	51,83	48,7	47,58	46,65	0	0	0
P [W]	96783	114660	104269	126918	124110	131567	0	0	0
Q [VAr]	154737	54398	157782	118555	123560	102821	0	0	0
THD-U [%]	1,302	1,2256	1,1131	1,2993	1,2246	1,109	0	0	0
THD-I [%]	18,042	18,54	15,658	18,81	19,14	16,4	0	0	0
PF [-]	0,5299	0,5959	0,5511	0,7302	0,7081	0,7874	0	0	0
harmonická	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]
5	0,5473	0,3924	0,414	0,5467	0,3936	0,4127	0	0	0
7	0,5395	0,5476	0,4881	0,5388	0,547	0,4871	0	0	0
11	1,0262	0,9865	0,8717	1,0234	0,9858	0,87	0	0	0
13	0,1433	0,1412	0,1793	0,1425	0,1401	0,1791	0	0	0
17	0,0873	0,0872	0,0857	0,0871	0,087	0,0849	0	0	0
19	0,102	0,075	0,0641	0,1014	0,0744	0,0634	0	0	0

Tab. 6.6 Změřené hodnoty ze dne 8. 11. 2018 v čase 6:20 zařízení s FM velkých výkonů bez provozu

8. 11. 2018 6:20	1-R1			20-R1			1-R1A		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
U [V]	3722	3680	3596	3722	3681	3598	3722	3683	3597
I [A]	73,81	76,13	75,64	78,55	75,44	78,7	8,68	7,19	9,41
P [W]	252690	264639	247015	350963	337028	330555	31807	26201	29998
Q [VAr]	103288	86048	107825	33013	26651	33517	7673	10773	15117
THD-U [%]	0,989	0,9579	1,0359	0,988	0,958	1,034	1,0098	0,9865	1,0742
THD-I [%]	7,1615	7,09	7,5329	6,6	6,852	6,5812	13,329	13,7892	11,9602
PF [-]	0,9214	0,9465	0,9122	0,9951	0,9963	0,9913	0,9715	0,9112	0,9101
harmonická	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]	U _h [%]
5	0,7899	0,7	0,7635	0,7635	0,7001	0,7635	0,7739	0,6855	0,7482
7	0,3577	0,4251	0,4806	0,4806	0,4246	0,4806	0,3255	0,4073	0,4666
11	0,3947	0,3876	0,4091	0,4091	0,3876	0,4091	0,477	0,4508	0,4898
13	0,2159	0,2307	0,2715	0,2715	0,2299	0,2715	0,2356	0,3011	0,3454
17	0,1042	0,0961	0,0456	0,0456	0,0957	0,0456	0,1137	0,1013	0,0577
19	0,0521	0,0451	0,0262	0,0262	0,0448	0,0262	0,0587	0,0468	0,0268

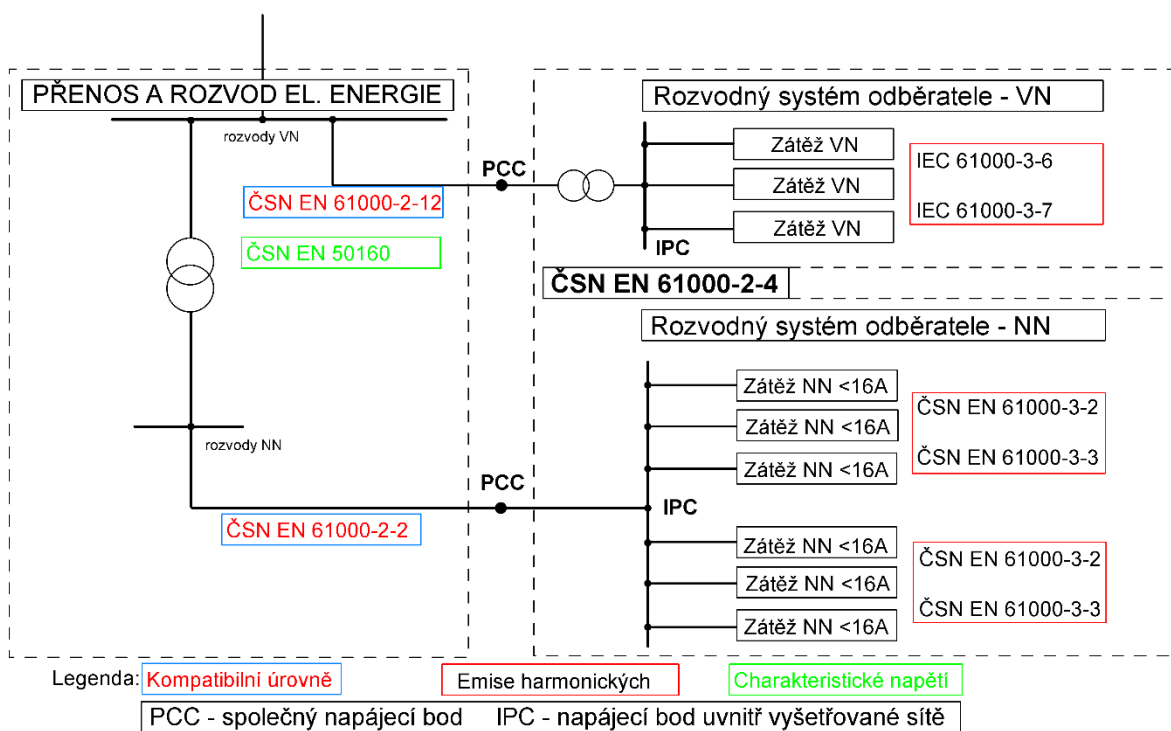
7 Porovnání naměřených hodnot s normou

7.1 Porovnání naměřených hodnot s normou

Již v úvodu této práce bylo zmíněno, že společnost patří mezi největší regionální dodavatele elektřiny, i když využívá její velkou část pro vlastní spotřebu. Z tohoto důvodu je nutné dodržovat kvalitu elektrické energie a minimalizovat výpadky ze strany distribuce. Také je však nutné posuzovat zpětně vliv připojených odběratelů na kvalitu v napájecí síti z hlediska EMC. Strukturu norem a předpisů určujících vlastnosti elektrických sítí z hlediska EMC v NF oblasti definuje Obr. 7.1.

V praxi provozovatel distribuční sítě stanoví tzv. společný napájecí bod PCC, tedy místo, kde provozovatel distribuční sítě provádí kontrolu, zda jsou plněny stanovené podmínky ze strany odběratele v případě připojení nelineárního spotřebiče.

[1][8]



Obr. 7.1 Struktura norem a předpisů určujících vlastnosti elektrických sítí z hlediska EMC v NF oblasti (převzato [1])

Společný napájecí bod PCC je přiřazen na straně primárního napětí 110 kV rozvodny R1. Zde je nutné dodržet předepsanou kvalitu elektrické energie dle platné legislativy.

Bod IPC je přiřazen sekundární straně rozvodu 6 kV rozvodny R1, je neveřejnou napájecí sítí, kde dochází k častému rozbíhání motorů velkých výkonů a je zde proměnlivé zatížení, které se neustále mění. V tomto elektromagnetickém prostředí platí pro vnitřní rozvod elektrické energie meze stanové třídou 3.

Stanovení mezí emisí v kompatibilních úrovních pro průmyslové a neveřejné střídavé sítě do napětí 35 kV uvnitř závodu určuje ČSN EN 61000-2-4. Tato norma zavádí třídy přístrojů:

- Třída 1: tato třída se týká zařízení citlivých na rušení v napájecí síti, jako je přístrojové vybavení v laboratořích, automatizační a ochranná zařízení atd. Kompatibilní úrovně jsou nižší než úrovně pro veřejné rozvodné sítě.
- Třída 2: tato třída se týká bodů PCC a IPC v průmyslových a neveřejných napájecích sítích. Kompatibilní úrovně jsou identické s úrovněmi pro veřejné sítě.
- Třída 3: tato třída se týká pouze bodů IPC v průmyslovém prostředí. Tato třída má pro některé jevy rušení vyšší kompatibilní úrovně než třída 2.

[3]

Tab. 7.1 Kompatibilní úrovně pro jednotlivé harmonické složky napětí lichého řádu mimo násobků tří (převzato [16])

Řád h	Třída 1 U _h %	Třída 2 U _h %	Třída 3 U _h %
5	3	6	8
7	3	5	7
11	3	3,5	5
13	3	3	4,5
17	2	2	4
17 < h ≤ 49	2,27 x (17/h) - 0,27	2,27 x (17/h) - 0,27	54,5 x (17/h) - 0,5

Tab. 7.2 Kompatibilní úrovně pro jednotlivé harmonické složky napětí lichého řádu, které jsou násobkem tří (převzato [3])

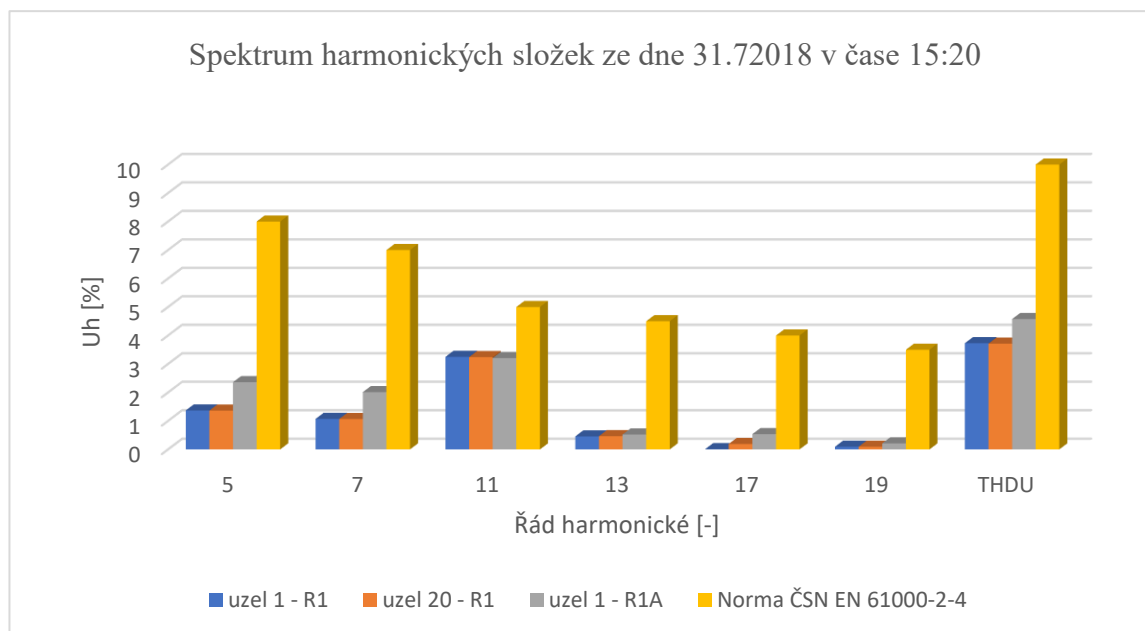
Řád h	Třída 1 U _h	Třída 2 U _h	Třída 3 U _h
	%	%	%
3	3	5	6
9	1,5	1,5	2,5
15	0,3	0,4	2
21	0,2	0,3	1,75
21 < h ≤ 45	0,2	0,2	1

Tab. 7.3 Kompatibilní úrovně pro celkové harmonické zkreslení (převzato [3])

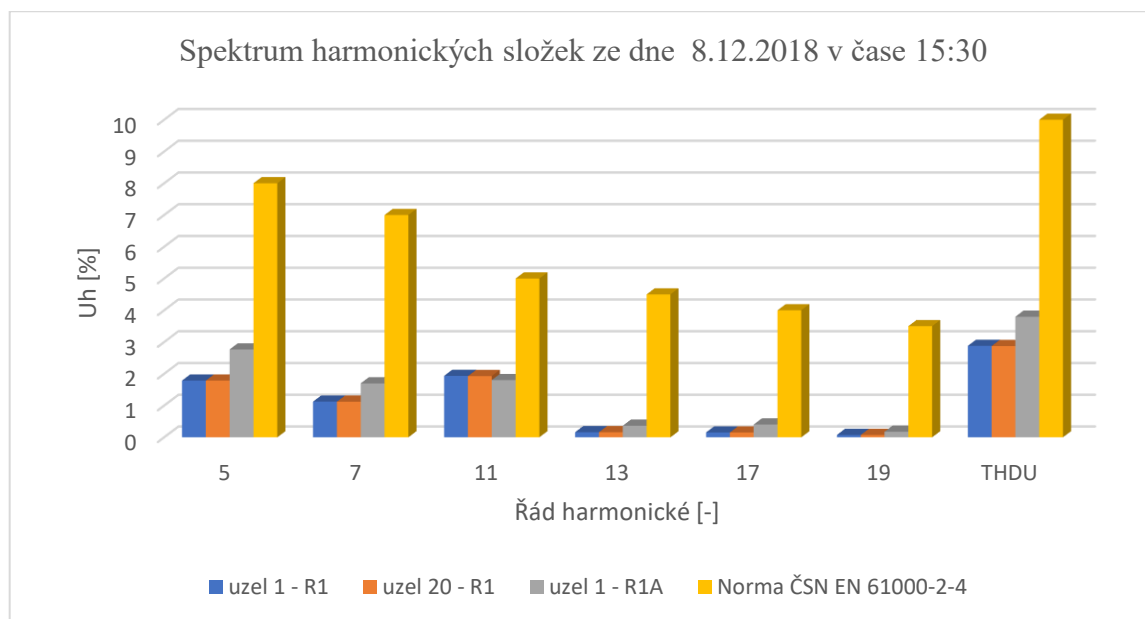
	Třída 1	Třída 2	Třída 3
Celkové harmonické zkreslení (THD)	5 %	8 %	10 %

7.2 Porovnání naměřených hodnot s ČSN EN 61000-2-4

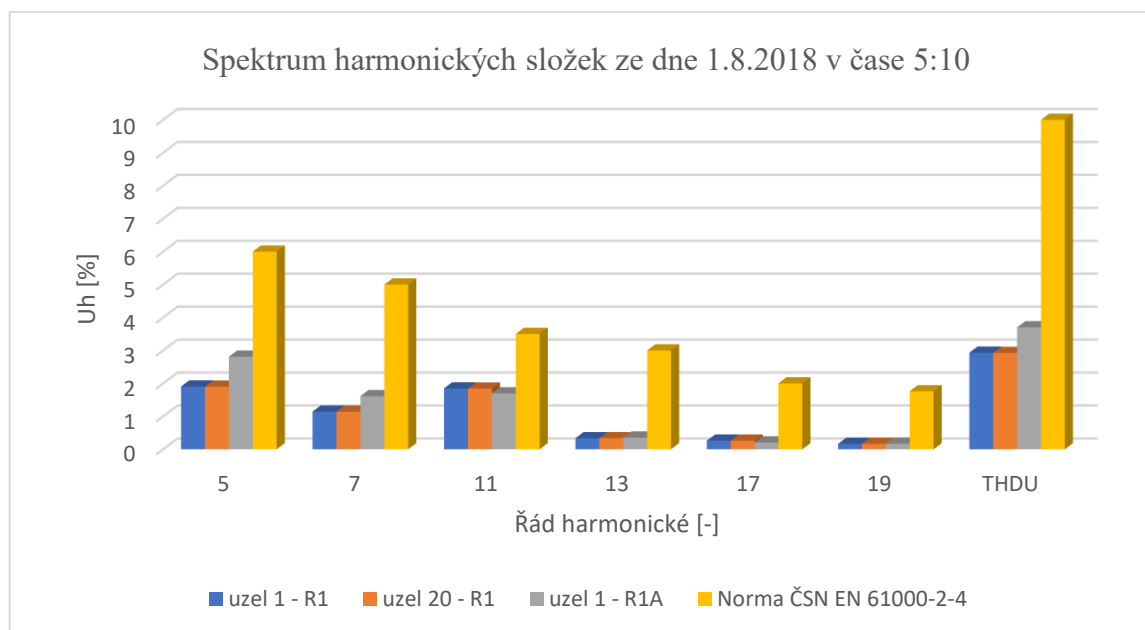
Velikost jednotlivých harmonických složek v uvedených uzlech, kde jsou osazeny analyzátoři sítě EPPE CX, jsou uvedeny na následujících obrázcích.



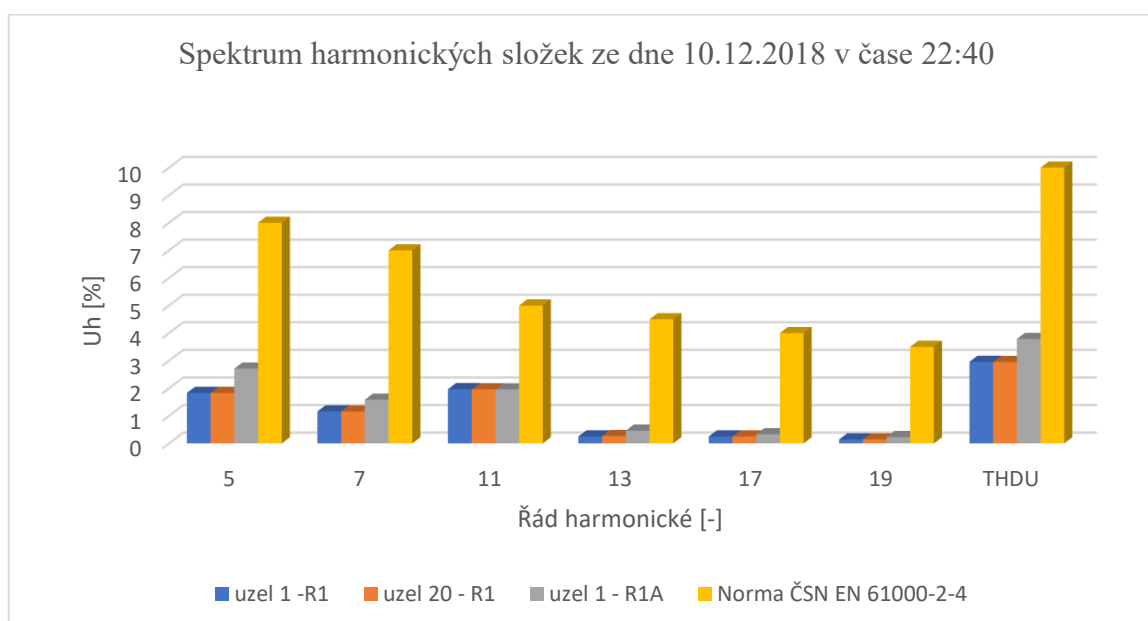
Obr. 7.2 Zastoupení harmonických složek napětí Tab. 6.1 – L1 v porovnání s normou



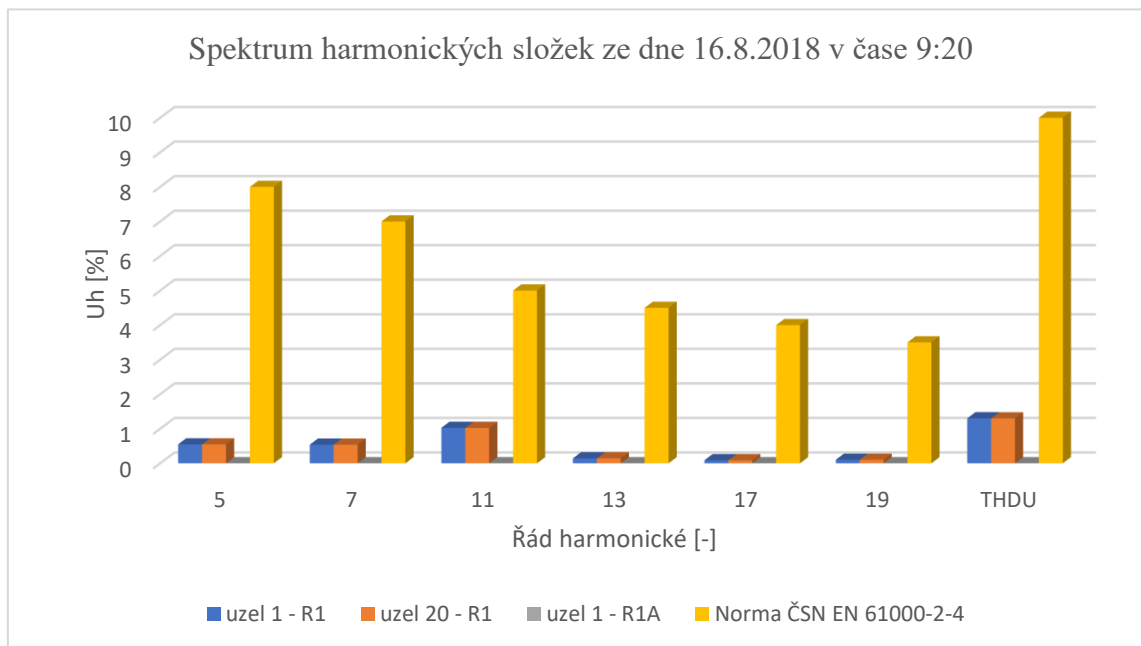
Obr. 7.3 Zastoupení harmonických složek napětí Tab. 6.2 – L1 v porovnání s normou



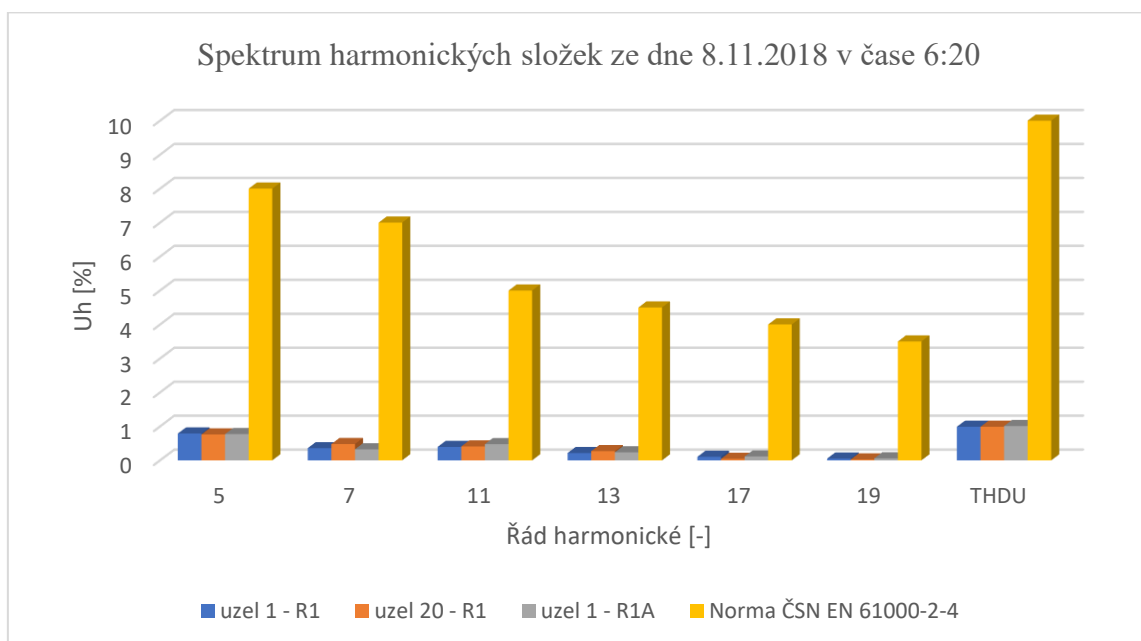
Obr. 7.4 Zastoupení harmonických složek napětí Tab. 6.3 - L1 v porovnání s normou



Obr. 7.5 Zastoupení harmonických složek napětí Tab. 6.4 - L1 v porovnání s normou

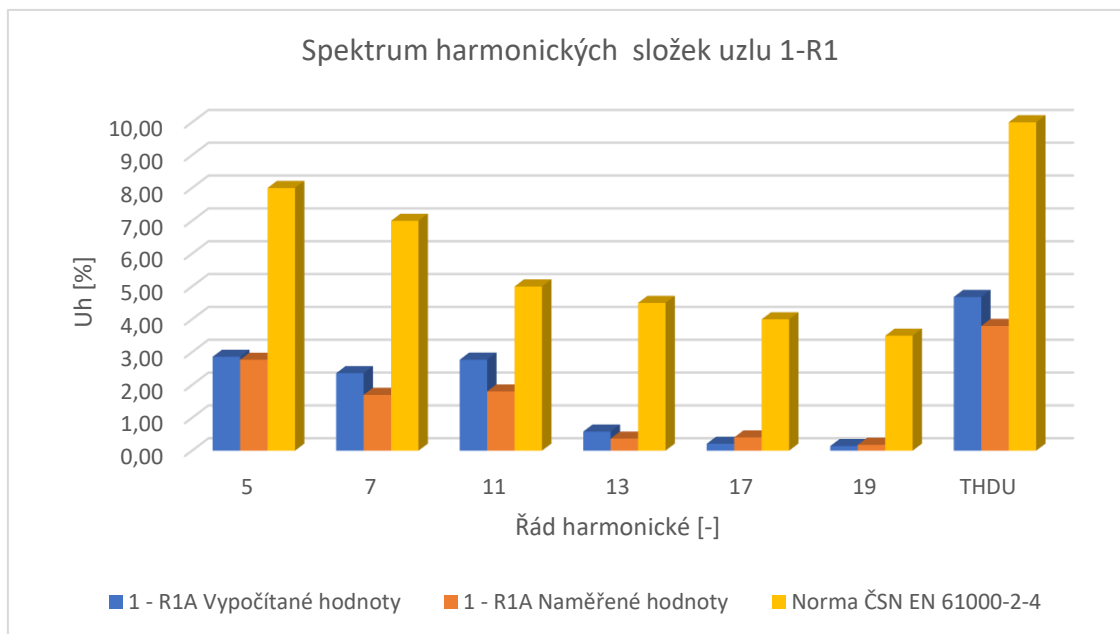


Obr. 7.6 Zastoupení harmonických složek napětí Tab. 6.5 - L1 v porovnání s normou

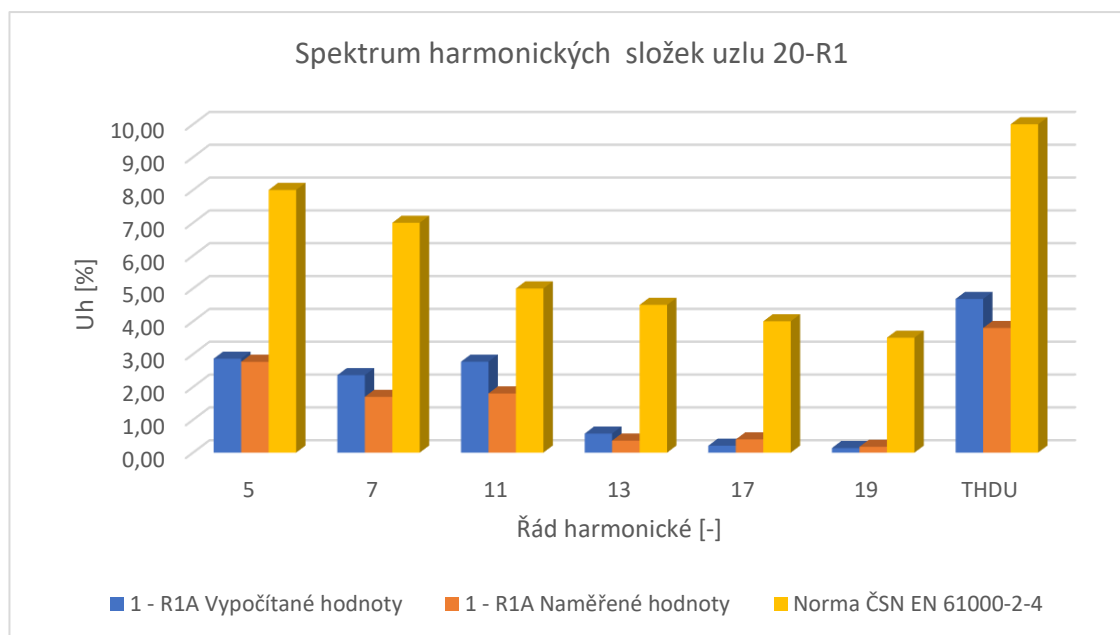


Obr. 7.7 Zastoupení harmonických složek napětí Tab. 6.6 - L1 v porovnání s normou

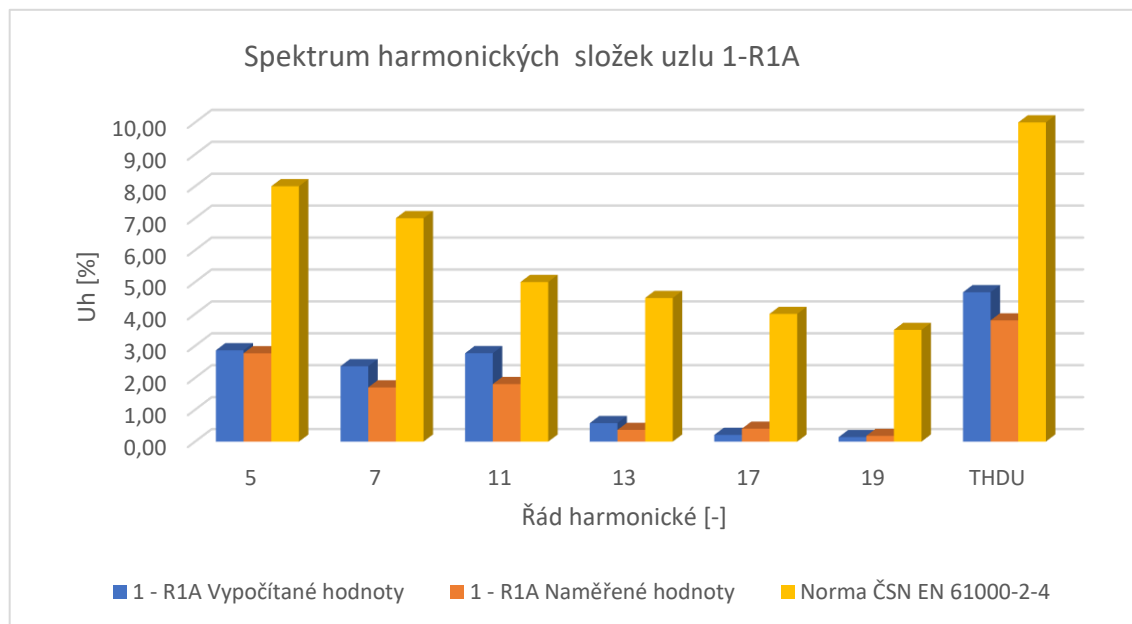
7.3 Porovnání vypočtených a naměřených hodnot s normou



Obr. 7.8 Zastoupení harmonických složek vypočítaných hodnot a naměřených hodnot Tab.6.2 v porovnání s normou



Obr. 7.9 Zastoupení harmonických složek vypočítaných hodnot a naměřených hodnot Tab.6.2 v porovnání s normou



Obr. 7.10 Zastoupení harmonických složek vypočítaných hodnot a naměřených hodnot Tab.6.2 v porovnání s normou

Závěr

Ve své diplomové práci jsem se snažil poskytnout ucelený pohled na problematiku vytvoření modelu průmyslového závodu s ohledem na vlivy měničů kmitočtu velkých výkonů na harmonická napětí v průmyslovém závodě.

Pro sestavení modelu byla nutná celá řada úkonů, bez kterých by model průmyslového rozvodu nebylo možné vytvořit. Na úplném začátku bylo nutné seznámení se s rozvodem celého průmyslového areálu, zejména s ohledem na napájecí síť jednotlivých provozů.

Bez znalosti vzájemných vazeb a zjišťování skutečných stavů instalovaných zařízení není možné sestavit odpovídající náhradní schéma napájení a z tohoto schématu následně vytvořit model sítě v prostředí MATLAB-Simulink.

Při zjišťování skutečného stavu elektrozařízení bylo nutné získání dokumentací jednotlivých provozovatelů a jejich schválení vstupů do jednotlivých provozů pro opis požadovaných štítkových údajů.

Pro vytvoření modelu je důležitá znalost provozních hodnot instalovaných zařízení. Z tohoto důvodu bylo nutné zajistit měření požadovaných veličin. Pro zajištění měření analyzátoři bylo nutné, pro osazení měřících přístrojů, odstavení některých částí technologií. Odstavování (vypínání) technologií je velmi náročným procesem s ohledem na provozní a ekonomické podmínky. Vyžaduje koordinaci více provozů z důvodu provázanosti technologií s řídicími systémy a s vazbou na jednotlivá dispečerská stanoviště. Vypínání technologií podléhá přísným pravidlům a je možné pouze v předem odsouhlasených a stanovených termínech.

V této diplomové práci jsem napsal, že pro správné vyhodnocení vyšších harmonických je nutné vycházet ze skutečných provozních hodnot zařízení, nikoli z hodnot štítkových.

V praxi je však téměř nemožné vystihnout veškeré provozní děje, které mají vliv na vytváření modelu. Velmi záleží na jednotlivých provozních cyklech (např. při odstavení rozvodny, stroje apod. dojde k odlehčení celé části provozního celku či technologie a tím i k poklesu vyšších harmonických, která by se generovala ze zařízení, pokud by byla zařízení v provozu). Pro sestavení modelu jsem určil termíny měření i s ohledem na pravidelné generální opravy a rekonstrukce tak, aby náhradní schéma odpovídalo běžným provozním podmínkám.

Při sestavování modelu byly tedy zvoleny štítkové hodnoty, a to z toho důvodu, že zařízení nemůže překročit jmenovité údaje. Výsledný výpočet vyšších harmonických vychází v určitých případech vyšší, než bylo změřeno analyzátořem sítí a to z toho důvodu,

že se do měření mohly promítnout okolnosti, které jsem popsal výše (např. noční porucha zařízení). Modelované stavy jsou tedy přísnější a vliv zařízení na napájecí síť se jeví horší, než je ve skutečnosti. Tato chyba je však na straně bezpečnosti. Z výsledků je patrné, že i při uvažování nejhoršího stavu (zařízení pracují dle štítkových hodnot) je dodržena platná legislativa a ČSN.

Měřením bylo zjištěno, že nedochází k překračování stanovených mezí emisí harmonických napětí dle ČSN.

Z výsledků je patrné, že i při nárůstu provozovaných frekvenčních měničů bude zařízení a napájecí síť vyhovovat platné legislativě s ohledem na zamýšlený rozvoj průmyslového závodu.

Pokud by se hranice emisí začaly přibližovat povoleným mezím, bylo by nutné provést takové technické opatření, které bude emise harmonických omezovat. Tímto technickým řešením může být například instalace filtračně kompenzačních opatření a omezení zpětného působení na napájecí síť instalací frekvenčních měničů s obvody ve dvanáctipulsním zapojení.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KŮS, Václav, Jiří SKÁLA a Jiří HAMMERBAUER. *Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2013, 372 s. ISBN 978-80-7300-476-7.
- [2] KŮS, Václav. *Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-062-8.
- [3] ČSN EN 61000-2-4. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC)-Část 2: Prostředí. Oddíl 4: Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šíření ve vedením v průmyslových závodech*. Červenec 2003. Praha 2003.
- [4] FLAJTINGR, Jiří a Lumír KULE. *Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči*. 2., upr. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2005. ISBN 80-7043-354-x.
- [5] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-7043-422-8.
- [6] KŮS, Václav. *Nízkofrekvenční rušení*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2003, 195 s. ISBN 80-7082-976-1.
- [7] CSIRIK, Vincent et al. *Sborník přednášek č. 58: Frekvenční složky ve výkonových systémech Harmonické, jejich původ, šíření, důsledky a omezení*. č. 58. Brno: L. P. Elektro s.r.o., 2003, 179 s. 1. pololetí 2013. ISBN 978-80-87616-06-2.
- [8] Pavlas, Jaroslav, 2016. Zajištění kvality elektřiny podmínky připojení a možnost odběratele je splnit. [online]. DocPlayer.cz [cit 2.5.2020]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/28149033-Zajisteni-kvality-elekriny-podminky-pripojeni-a-moznost-odberatele-je-splnit-ing-jaroslav-pawlas-elcom-a-s-divize-realizace-a-inzenyriink.html>.
- [9] PAWLAS, Jaroslav. *Hrozba nebezpečných rezonancí v elektrických sítích* [online]. 2014 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/43381489-Hrozba-nebezpecnych-rezonanci-v-elektrickyx-sitich-ing-jaroslav-pawlas-elcom-a-s-divize-realizace-a-inzenyriink.html>.
- [10] Elcom a.s. Produkty Silnoprůdá elektrotechnika Pohony Rotorové spouštěče Indukční spouštěč INDUSTART. *Elcom*. [online]. 2.5.2020 [cit. 2020-05-2] Dostupné z: <https://www.elcom.cz/cz/produkty/silnoprudaeelektrotechnika/pohony/rotorove-spoustece/indukcni-industart/industart-m>.

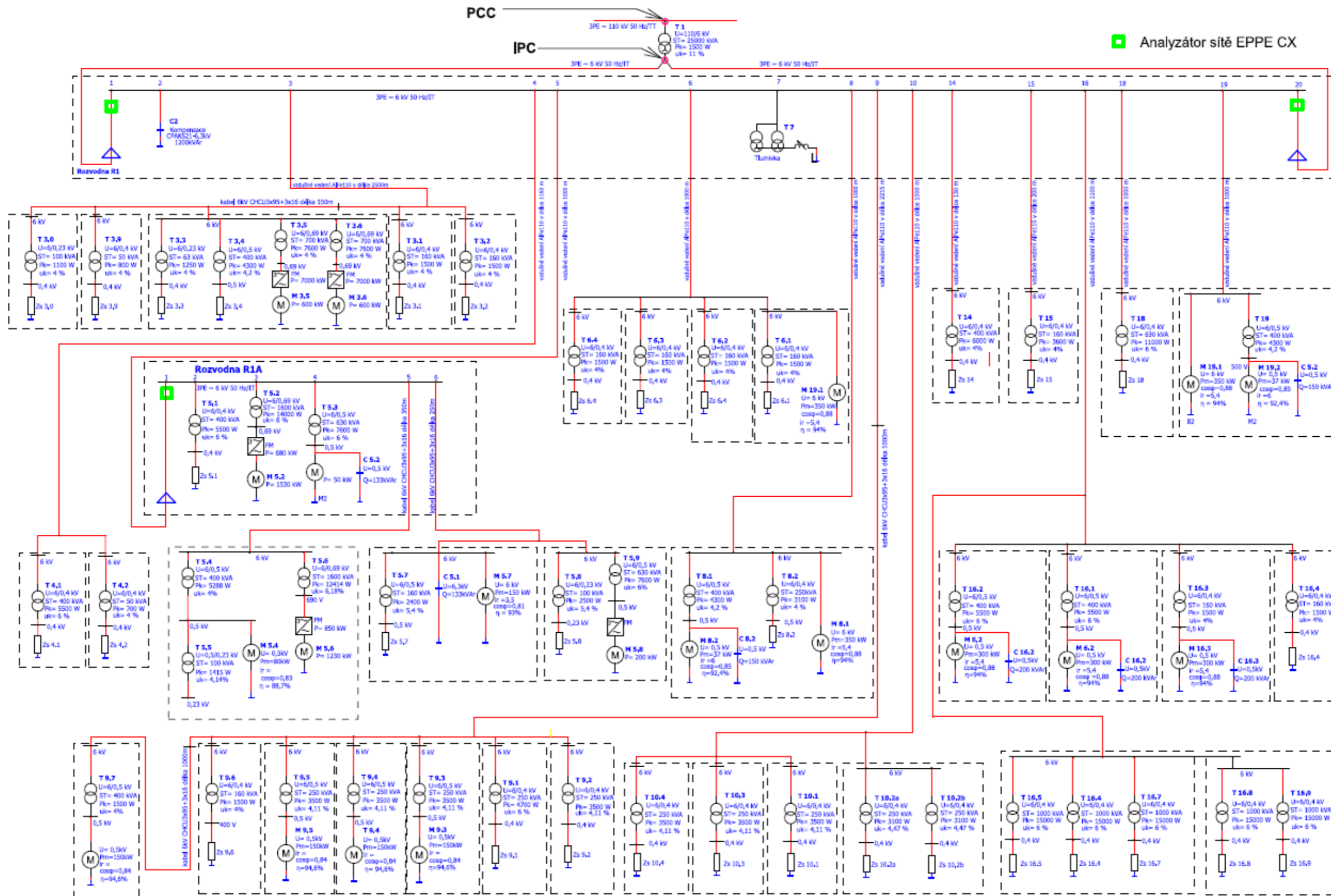
- [11] Elektronické spouštěče motorů a pohony: Základy techniky pohonů, vektorové řízení bez zpětné vazby. Eaton [online]. Praha> EATON, 2009,[cit. 2020-05-1]. Dostupné z: <http://archiv.eatonelektrotechnika.cz/priruckazapojeni/drives022.html>.
- [12] *Požadavky na měřicí systémy pro efektivní monitorování rozvodných napájecích systémů a technických vybavení* [online]. Hajany: Časopis ElektroPrůmysl, 2015 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/merici-technika/pozadavky-na-merici-systemy-pro-efektivni-monitorovani-rozvodnych-napajecich-systemu-a-technicky-vybaveni>.
- [13] Průmyslový komplex Vřesová – Wikipedie. [online]. [cit.10.5.2020]. Dostupné z:https://cs.wikipedia.org/wiki/Průmyslový_komplex_Vřesová
- [14] *Rotorové spouštěče: Produkty* [online]. Dobřenice: SEZ [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.sez-cr.cz/files/produkty/vn/rotorove-spoustece/rotorove-spoustece.pdf>
- [15] Hydrodynamické spojky: TK-N. Berlin: COMAC Maschinenhandel, [cca 1998].
- [16] *Manuál SINAMICS G 130: Princip zapojení jednotek SINAMICS G130*. 03/2011. Siemens.

Přílohy

Zde jsou následující přílohy.

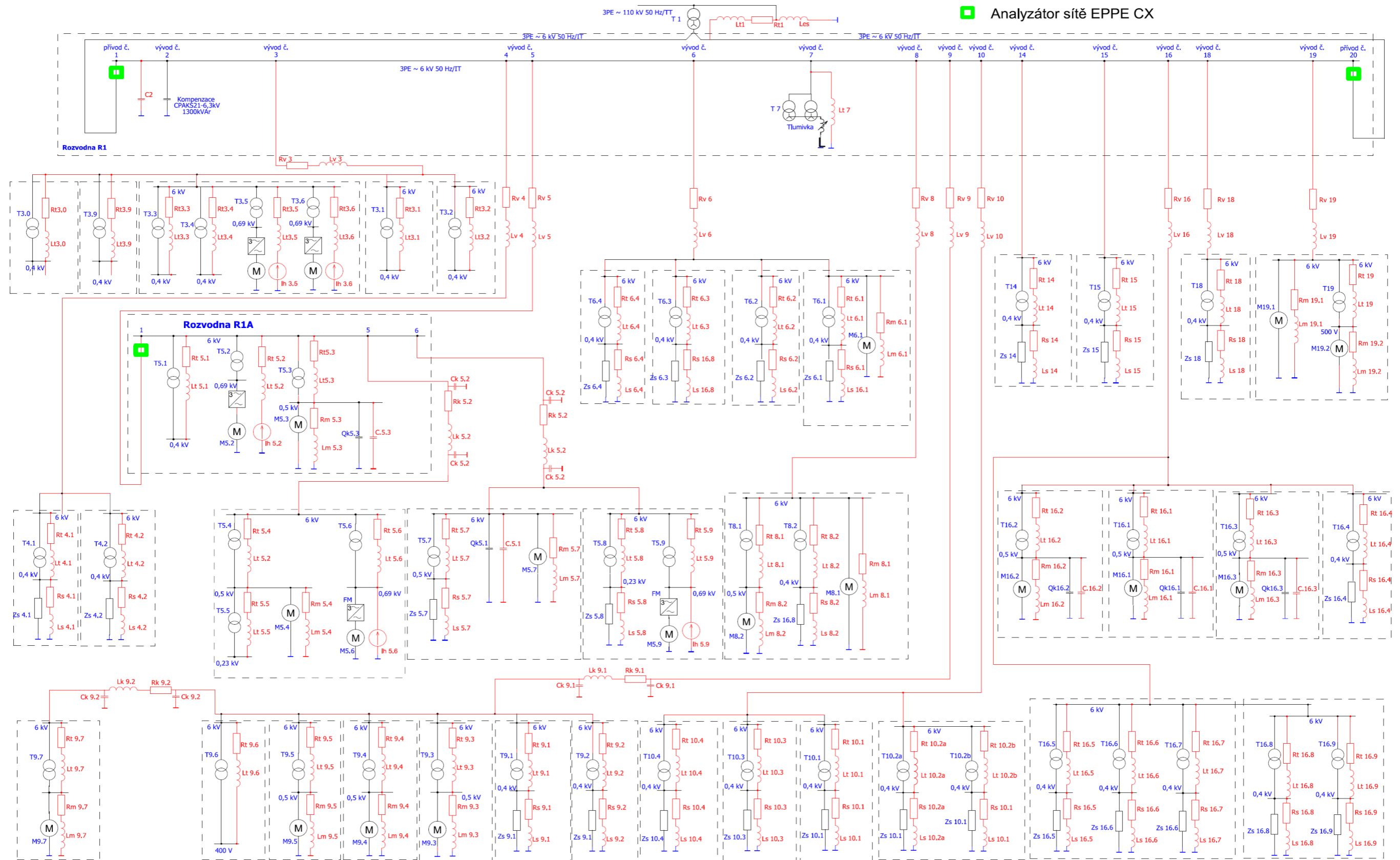
- Příloha č. 1 Přehledové schéma (jednopolové schéma) průmyslového závodu
- Příloha č. 2 Náhradní schéma průmyslového závodu
- Příloha č. 3 Náhradní schéma v prostředí MATLAB/SIMULINK

Příloha č. 1 Přehledové schéma (jednopolové schéma) průmyslového závodu



Analyzátor sítě EPPE CX

• Příloha č. 2 Náhradní schéma průmyslového závodu



• Příloha č. 3 Náhradní schéma v prostředí MATLAB - Simulink

