

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2022

Bc. Michal Ficbauer

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Posouzení zpětných vlivů nabíjení elektrických silničních vozidel na napájecí síť
Diplomová práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Ficbauer**
Osobní číslo: **D20531**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**
Téma práce: **Posouzení zpětných vlivů nabíjení elektrických silničních vozidel na napájecí síť**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s veličinami popisujícími kvalitu elektrické energie z pohledu dodávky a odběru.
2. Provedte rešerši nabíječů pro elektrická silniční vozidla a proveďte rešerši norem, které se vztahují na nabíjení elektrických silničních vozidel.
3. Navrhněte metodiku měření zpětných vlivů nabíjení elektrických silničních vozidel na napájecí síť.
4. Provedte měření, vyhodnoťte jej a interpretejte výsledky.

Rozsah pracovní zprávy:

Rozsah grafických prací:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Svačina Jiří: Elektromagnetická kompatibilita – principy a metody; VUT, Brno, 2001; ISBN 80-214-1873-7
2. Kůs Václav, Skála Jiří, Hammerbauer Jiří: Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů; BEN – technická literatura, Praha, 2013; ISBN 978-80-7300-476-7

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Sýkora

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **24. ledna 2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2022**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Dušan Čermák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 8. dubna 2022

PROHLAŠUJI:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 12.05.2022

Bc. Michal Ficbauer

PODĚKOVÁNÍ

Je mojí milou povinností na tomto místě poděkovat panu Ing. Petru Sýkorovi, vedoucímu diplomové práce, za řadu podmětných připomínek při jejím zpracování, vstřícnost při konzultacích a v neposlední řadě za poskytnutí nezbytné odborné technické literatury.

Dále bych rád touto cestou poděkoval panu Ing. Zdeňku Maškovi, Ph.D., za softwarové nastavení a kalibraci univerzálního měřicího analyzátoru zpětných vlivů na napájecí síť, a panu doc. Ing. Tomáši Syrovému, Ph.D., za propůjčení vozu Volkswagen e-Golf.

Poděkování patří rovněž všem, kteří mi byli oporou během celého studia. Zejména mým blízkým přátelům a rodině.

V Pardubicích dne 12. 5. 2022

Bc. Michal Ficbauer

ANOTACE

Hlavním cílem diplomové práce je posouzení zpětných vlivů nabíjení elektrických silničních vozidel na napájecí síť. Práce nejprve popisuje veličiny kvalifikující kvalitu elektrické energie z pohledu dodávky a odběru. Následuje rešerše prakticky používaných nabíječů pro elektrická silniční vozidla a technických norem vztahujících se na danou problematiku. Dále je uveden vlastní návrh metodiky měření vlivů nabíjení vozidel na napájecí síť. Nedílnou součástí práce je také interpretace a porovnání prakticky naměřených hodnot během nabíjení několika konkrétních silničních vozidel.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektromobilita, nabíjecí stanice, elektromagnetická kompatibilita

TITLE

Evaluation of Electric Cars Charging Backward Effects on Electric Grid

ANNOTATION

The main goal of the diploma thesis is to appraise the retrograde effects of charging electric road vehicles on the power supply network. Initially, the work describes the quantities qualifying the quality of electric power in terms of supply and offtake. The following is the research on practically used chargers for electric road vehicles and technical standards related to this issue. Furthermore, the methodology proposal for measuring the effects of vehicle charging on the power supply network is presented. The interpretation and comparison of practically measured values during the charging of several specific road vehicles is also an integral part of the thesis.

KEYWORDS

E-mobility, charging station, electromagnetic compatibility

OBSAH

Úvod	10
1 KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE Z POHLEDU DODÁVKY	11
1.1 Kolísání napětí	11
1.1.1 Odchylka jmenovité hodnoty	11
1.1.2 Flicker	12
1.2 Kolísání frekvence	13
2 KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE Z POHLEDU ODBĚRU	14
2.1 Účinník	14
2.2 Vyšší harmonické	15
2.2.1 Definice a deformační výkon	15
2.2.2 Zdroje vyšších harmonických proudů	17
2.2.3 Problémy v sítích NN	18
2.2.4 Problémy v sítích VN	21
2.2.5 Filtrace vyšších harmonických	22
2.3 Napět'ová nesymetrie	23
3 NABÍJENÍ ELEKTRICKÝCH SILNIČNÍCH VOZIDEL	25
3.1 AC nabíjení	25
3.1.1 AC nabíjecí stanice	25
3.1.2 AC konektor	26
3.2 DC nabíjení	27
3.2.1 DC nabíjecí stanice	27
3.2.2 DC konektory	29
4 LEGISLATIVA NABÍJENÍ ELEKTRICKÝCH SILNIČNÍCH VOZIDEL	30
5 NÁVRH METODIKY A MĚŘENÍ ZPĚTNÝCH VLIVŮ	32
5.1 Měření pomocí analyzátoru sítě Fluke NORMA 5000	32
5.1.1 Schéma zapojení měřicího pracoviště	33

5.1.2	Nabíjení vozidla Hyundai KONA Electric.....	34
5.1.3	Nabíjení vozidla Škoda Citigo E.....	37
5.2	Měření pomocí analyzátoru kvality sítě SMY 134.....	40
5.2.1	Schéma zapojení měřícího pracoviště.....	40
5.2.2	Mechanická konstrukce.....	42
5.2.3	Nabíjení vozidla Volkswagen e-Golf.....	47
6	SROVNÁNÍ KVALITATIVNÍCH VLASTNOSTÍ ANALYZÁTORŮ.....	52
6.1	Jednofázová odporová zátěž.....	52
6.1.1	Naměřené hodnoty.....	53
6.2	Jednofázový tyristorový regulátor.....	54
6.2.1	Naměřené hodnoty – regulátor plně otevřen.....	55
6.2.2	Naměřené hodnoty – řídicí úhel přibližně 90°.....	56
6.2.3	Naměřené hodnoty – řídicí úhel přibližně 170°.....	58
6.3	Třífázový frekvenční měnič s pulzním usměrňovačem.....	59
6.3.1	Naměřené hodnoty – frekvence měniče 45 Hz – motorický režim.....	60
6.3.2	Naměřené hodnoty – frekvence měniče 55 Hz – motorický režim.....	62
6.3.3	Naměřené hodnoty – frekvence měniče 45 Hz – generátorický režim.....	63
6.3.4	Naměřené hodnoty – frekvence měniče 55 Hz – generátorický režim.....	65
	ZÁVĚR.....	67
	Použitá literatura.....	69
	Seznam obrázků.....	71
	Seznam tabulek.....	73
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	74
	SEZNAM PŘÍLOH.....	75

ÚVOD

Elektrické energie, která neslouží jen vlastní spotřebě výrobce, ale je dodávána do distribuční sítě i dalším odběratelům, je surovinou, u níž je nutné stanovit a sledovat kritéria pro posouzení její kvality. Většina spotřebičů má proměnlivou nebo nelineární provozní charakteristiku, což má za následek stále větší uplatnění zpětných vlivů na distribuční síť, které mohou v krajním případě vést až k rušivému ovlivnění ostatních přístrojů a zařízení. Za elektromagnetické rušení lze považovat jakýkoliv elektromagnetický jev, jež může zhoršit řádnou funkci zařízení nebo systému. Elektromagnetická kompatibilita, nebo také slučitelnost, je schopnost zařízení nebo systému vyhovujícím způsobem fungovat ve svém elektromagnetickém prostředí bez vytváření nepřijatelného rušení čehokoliv v tomto prostředí.

Věcná náplň diplomové práce je členěna do šesti kapitol. První kapitola je věnována nezbytnému všeobecnému úvodu do problematiky kvality elektrické energie ze pohledu dodávky. Bezprostředně na ni navazuje druhá kapitola, popisující parametry kvality elektrické energie z pohledu odběru. Větší pozornost je dána problematice vyšších harmonických a problémům, které v sítích nízkého i vysokého napětí způsobují. Dále je uveden důsledek napěťové nesymetrie a nízké hodnoty účinníku.

Třetí kapitola seznamuje s možnostmi nabíjení elektrických silničních vozidel, vlastnostmi jednotlivých způsobů nabíjení a jejich specifikacemi. Ve čtvrté kapitole je uveden přehled legislativy, jež se aktuálně vztahuje k nabíjení elektrických silničních vozidel na území Evropské unie.

Pátá kapitola nejprve uvádí návrh metodiky měření zpětných vlivů na distribuční síť. Jsou zde podrobně rozebrány zapojení jednotlivých měřících pracovišť a použité měřicí přístroje. Dále jsou uvedeny možnosti a náležitosti měření proudových vyšších harmonických. Nedílnou součástí je také interpretace výsledků samotného měření během nabíjení několika konkrétních elektrických vozidel. Poslední kapitola porovnává použité měřicí přístroje z hlediska přesnosti.

Tato diplomová práce se zabývá výhradně zpětnými vlivy působící na napájecí síť během tzv. pomalého nabíjení elektrických silničních vozidel střídavým proudem, tedy pomocí wallboxů. I přes rostoucí počet komerčních stejnosměrných rychlonabíjecích stanic má uživatelské nabíjení elektrických silničních vozidel střídavým proudem nezastupitelnou roli, a to především vzhledem k jednoduchosti a dostupnosti tohoto způsobu nabíjení. S rozšířeností nicméně také přímo souvisí míra vlivu toto způsobu nabíjení na elektrizační soustavu, která již přestává být zanedbatelná.

1 KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE Z POHLEDU DODÁVKY

Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí popisuje norma ČSN EN 50160 ed.3. Kvalitativními parametry jsou tedy zejména napětí a frekvence.

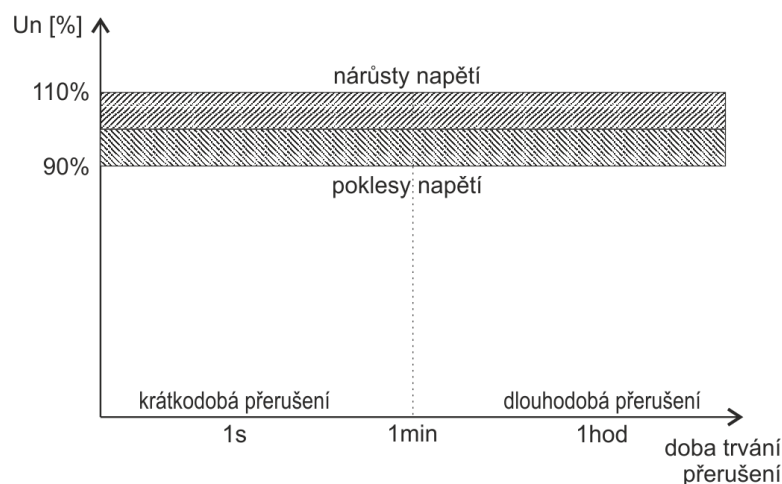
1.1 Kolísání napětí

Jedním z parametrů kvality elektrické energie je míra kolísání napětí. Jako rychlé změny napětí lze označit jakékoliv kolísání maximální hodnoty napětí U_{\max} a tím i efektivní hodnoty U_{ef} v čase. Pokud se efektivní hodnota napětí v síti mění, může být ovlivněna správná činnost všech připojených elektrických zařízení. Poklesem nebo krátkodobým přerušením napětí může dojít ke zhašení výbojek, narušení funkce regulačních prvků, déle změny rychlosti nebo zastavování motorů a vypínání stykačů. U synchronních motorů a generátorů hrozí vypnutí ze synchronismu. Ve výpočetní technice dochází k chybě v datech nebo k jejich úplné ztrátě. Problémem je také chybná funkce měřících přístrojů vybavených elektronikou.

Krátkodobé poklesy napětí bývají obecně způsobeny poruchami v distribučních sítích. S ohledem na jejich rozsah jsou poklesy napětí v nich jevem prakticky nepředvídatelným s nepravidelnou četností výskytu. Typickou příčinou krátkodobého přerušení napětí je vypnutí vypínače vedení v reakci na zkrat v síti. V případě opětovného zapnutí vypínače samočinně po odeznění zkratu dochází k obnově dodávky elektrické energie. Pokud je opětovné zapnutí neúspěšné, zkrat v síti stále přetrvává a odběratel je vystaven dlouhodobému přerušení dodávky elektrické energie, než bude porucha odstraněna nebo zprovozněn náhradní zdroj napájení.

1.1.1 Odchylka jmenovité hodnoty

Všechny parametry kvality napětí se musí pohybovat v předepsaných tolerancích, které udává norma ČSN EN 50160 ed.3. V distribuční soustavě je přípustná odchylka $\pm 10\%$ od jmenovité hodnoty napětí U_n . Podle doby trvání lze přerušení rozdělit na krátkodobá přerušení, jež trvají méně než 1 minutu, a dlouhodobá přerušení, trvající nad rámec krátkodobého přerušení. [1]

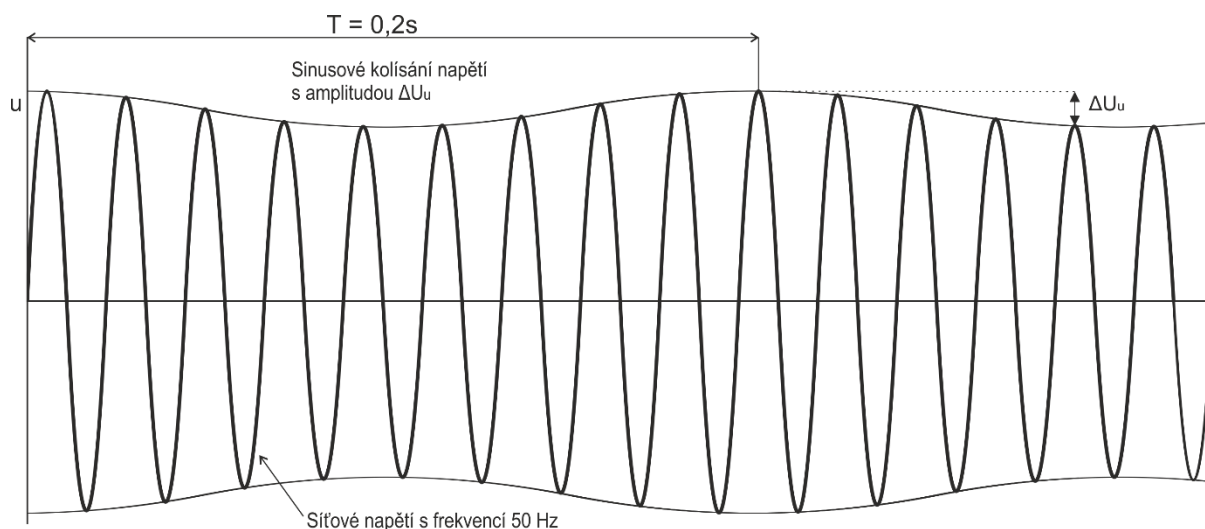


Obr. 1: Odchylka jmenovité hodnoty napětí a doba přerušení

1.1.2 Flicker

Pod pojmem flicker rozumíme opakované změny, kolísání či míhání v napájení. Tyto napěťové změny jsou v reálu nejvíce patrné na nepříjemných změnách ve světelném záření světelných zdrojů. Lidské oko je velmi citlivé na případné změny světelného toku, tudíž musí být změny napětí udrženy v relativně úzkých mezích.

U konkrétních zařízeních jednotlivých odběratelů je nutné ověřit, zda změny zátěže, které jsou vyvolány zařízeními způsobující časté zapínání a vypínání zátěže s velkým odběrem, nevedou k nepřijatelným hodnotám flickeru. Typicky se jedná o provoz velkých proměnlivých zátěží jako jsou obloukové pece, pohon válcových stolic, navíječek apod. Příčinou kolísání obálky napětí ovšem mohou být i zařízení menších výkonů, např. svářečky, tyristorové regulátory výkonu, kompresory, výtahy apod.

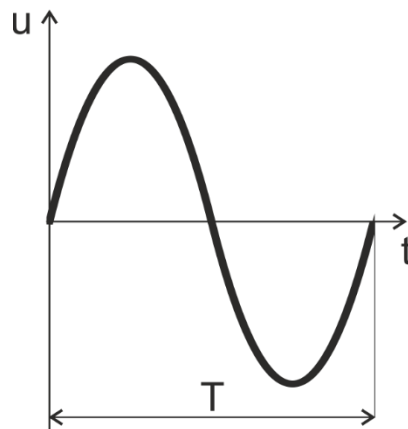


Obr. 2: Kolísání napětí – flicker

Je několik opatření, kterými lze účinky flickeru snížit. Je možné připojit zařízení způsobující flicker do sítě s vyšším zkratovým výkonem, zvětšit průřez napájecího vedení nebo snížit spotřebu jalového výkonu. Vhodná je také kompenzace aktivními filtry, případně připojení nového generátoru či synchronního kompenzátoru.

1.2 Kolísání frekvence

Frekvence, jinými slovy také kmitočet, udává, kolik cyklicky se opakujících se dějů se odehraje za jednu sekundu, tj. $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$. V případě frekvence napětí se jedná o počet period napětí za sekundu. Průběh jedné periody sinusového napětí je znázorněn na obr. 3.



Obr. 3: Perioda sinusového napětí

V české elektrizační soustavě je jmenovitá frekvence napájecího napětí 50 Hz. Přípustná hodnota frekvence odpovídá v intervalu od 49,5 do 50,5 Hz. V elektrizační soustavě je deklarováno napětí s frekvencí v tomto intervalu v průběhu 99,5 % roku. Po zbytek roku jsou přípustné odchylky frekvence napětí větší, s ohledem na případné rozsáhlejší výpadky výroby elektrické energie.

V praxi závisí velikost odchylek od jmenovité hodnoty frekvence v elektrizační soustavě na vzájemném působení generátorů a zátěže v síti. Pro udržení konstantní frekvence je vyžadován dostatečný výkon výroby, který je nutné v reálném čase přizpůsobit aktuálnímu odběru. Frekvenci napětí synchronního generátoru lze určit ze vztahu:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} [\text{Hz}] \quad (1)$$

kde: p počet pólových dvojic, pól párů [-],
 n otáčky [s^{-1}]

Z uvedeného vztahu lze vypočítat, že frekvenci výstupního napětí lze ovlivnit počtem pólových dvojic stroje a otáčkami hřídele, respektive turbíny.

2 KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE Z POHLEDU ODBĚRU

Se současným rozvojem a rozšířením moderních výkonových spínacích prvků na straně spotřeby je nutné klást stále větší důraz na zpětný vliv vyšších harmonických, potažmo hodnotu účinníku. Další kvalitativní veličinou na straně odběru elektrické energie je také napěťová nesymetrie.

2.1 Účinník

Elektrické spotřebiče odebírají ze sítě výkon, který lze obecně vyjádřit jako součin napětí a proudu. Mezi vektorem napětí a proudu leží úhel fázového posunu φ . V případě spotřebičů s odporovým charakterem, tedy pokud je odebíraný proud spotřebičem ve fázi s napětím, spotřebič odebírá pouze činný výkon s hodnotou účinníku rovnou jedné.

Většina odběrů v distribuční soustavě je zpravidla induktivního charakteru. Jedná se typicky o transformátory a motory. Tyto stroje, jež využívají principy indukce, odebírají ze sítě navíc výkon potřebný k vytvoření magnetického pole. Jalový výkon se pak přelévá mezi spotřebičem a sítí, čímž dodatečně k činnému výkonu zatěžuje generátory, transformátory a vedení VVN, VN i rozvodné soustavy v sítích NN.

Vektorový součet činného a jalového výkonu je nazýván výkonem zdánlivým. Lze ho vyjádřit pomocí vztahu:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ [VA]} \quad (2)$$

kde: S zdánlivý výkon [VA],
 Q jalový výkon [VAr],
 P činný výkon [W]

Jalový a činný výkon je pak možné vyčíslit pomocí následujících vztahů:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ [VAr]} \quad (3)$$

kde: $\sin \varphi$ činitel jalového výkonu [-]

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ [W]} \quad (4)$$

kde: U napětí [V],
 I proud [A],
 $\cos \varphi$ účinník [-]

Veličina $\cos \varphi$ je označována jako účinník. Jeho hodnotu lze vyjádřit jako poměr zdánlivého a činného výkonu:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} [-] \quad (5)$$

Pokud se v absolutní hodnotě zvětšuje úhel fázového posunu φ , zvětšuje se v absolutní hodnotě také jalový výkon. V případě spotřebičů s indukčním charakterem se jedná o jalový indukční výkon, jež lze eliminovat paralelním připojením kondenzátoru, nebo skupiny kondenzátorů, ke spotřebiči. Indukční jalový výkon spotřebiče je směřován proti kapacitnímu jalovému výkonu kondenzátoru. V důsledku toho je pak celkový jalový výkon přeléván pouze mezi spotřebičem a kondenzátorem, hodnota účinníku je kompenzována.

Po technické stránce může být kompenzace pevná, jinými slovy neregulovaná, nebo regulovaná. U pevné kompenzace je neměnně daný jmenovitý kompenzační výkon. Používá se pro přímou dílčí kompenzaci spotřebičů, typicky motorů v trvalém provozu a transformátorů, u nichž se kompenzuje jalový výkon naprázdno.

Regulovaná kompenzační zařízení bývají používána v rámci průmyslových objektů a výrobních hal, kde probíhá kompenzace mimo jiné centrálně, v hlavním rozváděči. V něm ústí připojení většího množství strojů s proměnným odebíraným jalovým výkonem. Kompenzační kapacitní výkon je pak stupňovitě, přes speciální kontakty stykačů, spínán v závislosti na aktuálně naměřené a cílové hodnotě účinníku.

2.2 Vyšší harmonické

Jedním ze základních ukazatelů kvality elektrické energie je přítomnost celistvých násobků základní frekvence ve spektrální analýze průběhu napětí nebo proudu. Tyto celistvé násobky jsou nazývány jako vyšší harmonické. Vznikají, pokud spotřebič odebírá ze sítě nesinusový proud. Takové spotřebiče bývají obecně označovány jako nelineární.

2.2.1 Definice a deformační výkon

Harmonické průběhy lze popsat nekonečnou řadou, která je složena z konstanty, tedy stejnosměrné složky, a harmonických veličin o frekvenci rovné celočíselnému násobku základní frekvence.

Obecně lze harmonickou analýzu průběhu odebíraného proudu vyjádřit pomocí Fourierovy řady periodické funkce $f(t)$ s úhlovou frekvencí. V případě dosazení proudu $i(t)$ pak pomocí vztahu:

$$i(t) = \sum_{h=0}^{\infty} i_h(t) = \sum_{h=0}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_h \cdot \sin(h\omega t) = \sum_{h=0}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_h \cdot e^{j(h\omega t)} \quad (6)$$

kde: $i_0(t) = I_0$ stejnosměrná složka proudu [A],
 I_1 základní harmonická ($\omega_1 = \omega$, $f_1 = 50$ [Hz]) [A],
 pro $h \geq 2$
 I_h h-tá harmonická složka ($\omega_1 = h \cdot \omega$, $f_1 = h \cdot 50$ [Hz]) [A]

V uvedeném vztahu byla uvažována jako základní harmonická složka průmyslová frekvence 50 Hz. Velikost amplitud proudu o násobcích této základní frekvence I_h , tj. vyšších harmonických, je dána amplitudovým zákonem:

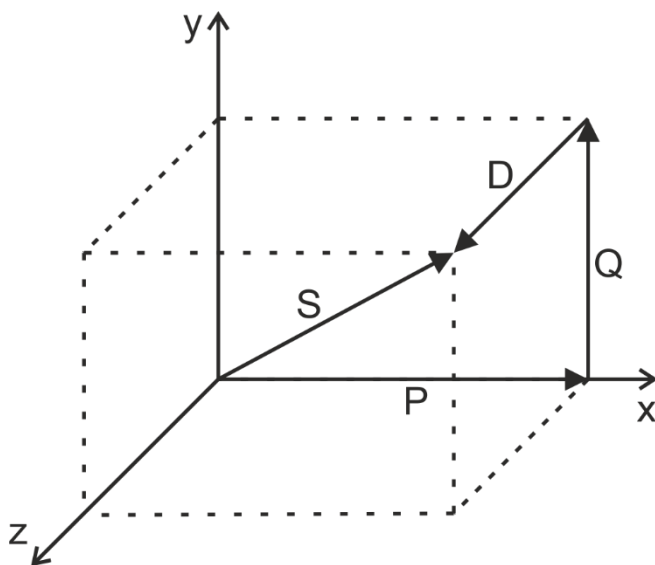
$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (7)$$

Obsah vyšších harmonických složek ve spektru proudu způsobí nárůst ztrát, potažmo zvýšení hodnoty zdánlivého výkonu. Pro vyčíslení těchto ztrát zavádíme veličinu *deformační výkon*. Výsledný zdánlivý výkon, včetně vlivy vyšších harmonických, je pak dán vztahem:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \text{ [VAd]} \quad (8)$$

kde: D deformační výkon [VAd]

Graficky lze zdánlivý výkon znázornit jako tělesovou úhlopříčku kváдру, jehož hrany představují deformační, činný a jalový výkon.



Obr. 4: Grafické znázornění výkonů

V obvodech s neharmonickými průběhy proudu je nutné zavést kromě účinníku $\cos \varphi$ také tzv. reálný účinník, označovaný λ a definovaný vztahem:

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{P}{S} \quad (9)$$

Aby bylo možné posoudit obsah vyšších harmonických složek proudu v celkovém spektru, zavádí se veličina celkové harmonické zkreslení (THD – total harmonic distortion). Je definováno jako suma všech efektivních hodnot vyšších harmonických mimo první harmonické ku efektivní hodnotě první harmonické. Pro proud platí vztah:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (10)$$

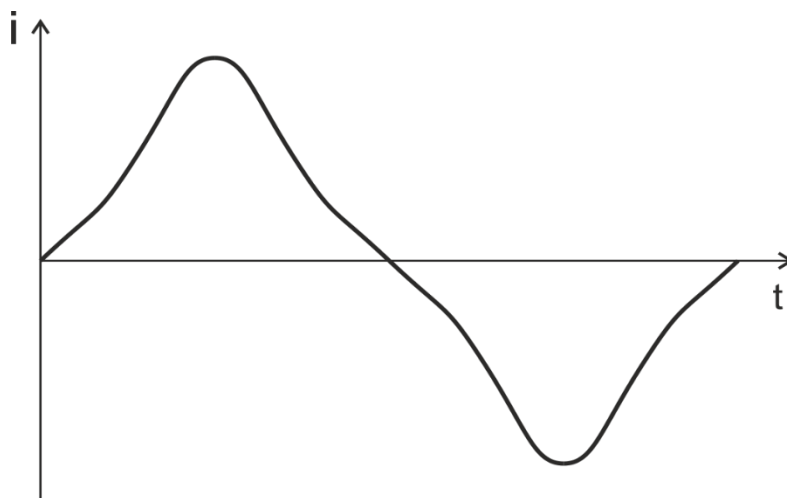
Obdobně pro napětí platí:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (11)$$

2.2.2 Zdroje vyšších harmonických proudu

Zdrojem proudových vyšších harmonických v síti jsou nelineární spotřebiče odebírající proud s nesinusovým průběhem. Jedná se například o transformátory, měniče a usměrňovače a v těžkém průmyslu využívané obloukové pece.

V případě transformátorů má na průběh proudu vliv nelinearita magnetizační charakteristiky, někdy označované také jako hysterezní křivka. Tato nelinearita se nejvíce projeví při chodu transformátoru naprázdno, jelikož magnetický tok v jádře je tom případě největší. Proud transformátoru naprázdno je tedy značně deformovaný.



Obr. 5: Průběh proudu transformátorem při chodu naprázdno

Na straně maloodběratelů elektrické energie představují v síti hlavní nelineární spotřebiče různé spínané zdroje a měniče. Prvky moderní spínací techniky jsou již velice rozšířené, čímž značnou mírou přispívají ke vzniku vyšších harmonických v distribuční síti. Jedná se průmyslovou výkonovou elektroniku, tedy měniče a pulzní regulátory, ale také o světelné zdroje, tedy zářivky, výbojky, LED osvětlení. Dále se, v případě domácností, jedná především o spotřebiče se spínaným zdrojem, tedy televizory, počítače atd. Obecně jde o zařízení, na jejichž vstupu je usměrňovač. U domácích spotřebičů je nejčastěji aplikován jednofázový můstkový usměrňovač, v průmyslu třífázový šestipulzní usměrňovač [10].

Zásadním odběratelem elektrické energie z distribuční soustavy jsou mimo jiné doprava a napájení elektrických drah. V MHD je pro napájení trolejbusových, tramvajových drah a metra také využíváno šestipulzního usměrňovače, se všemi důsledky. U trakčních měnících stejnosměrného napájení 3 kV je využíván dvanáctipulzní usměrňovač, jež poskytuje na svém stejnosměrném výstupu průběh napětí s menším zvlněním. Jeho další výhodnou vlastností je nízký obsah vyšších harmonických ve spektru primárního proudu. Konkrétně obsahuje jen 11., 13. a 23. a 25. harmonickou.

U střídavé trakce 25 kV z principu funkce v trakčních napájecích stanicích usměrňovače nejsou. Jsou umístěny až v jednotlivých hnacích vozidlech na vstupech trakčních měničů. V řadě dosud provozovaných drážních hnacích vozidel, zejména starší konstrukce, jsou dosud využívány usměrňovače diodové a tyristorové. Ty představují zdroj vyšších harmonických proudu, které je následně nutno kompenzovat pomocí FKZ (filtračně kompenzačního zařízení), umístěného v bezprostřední blízkosti trakční napájecí stanice.

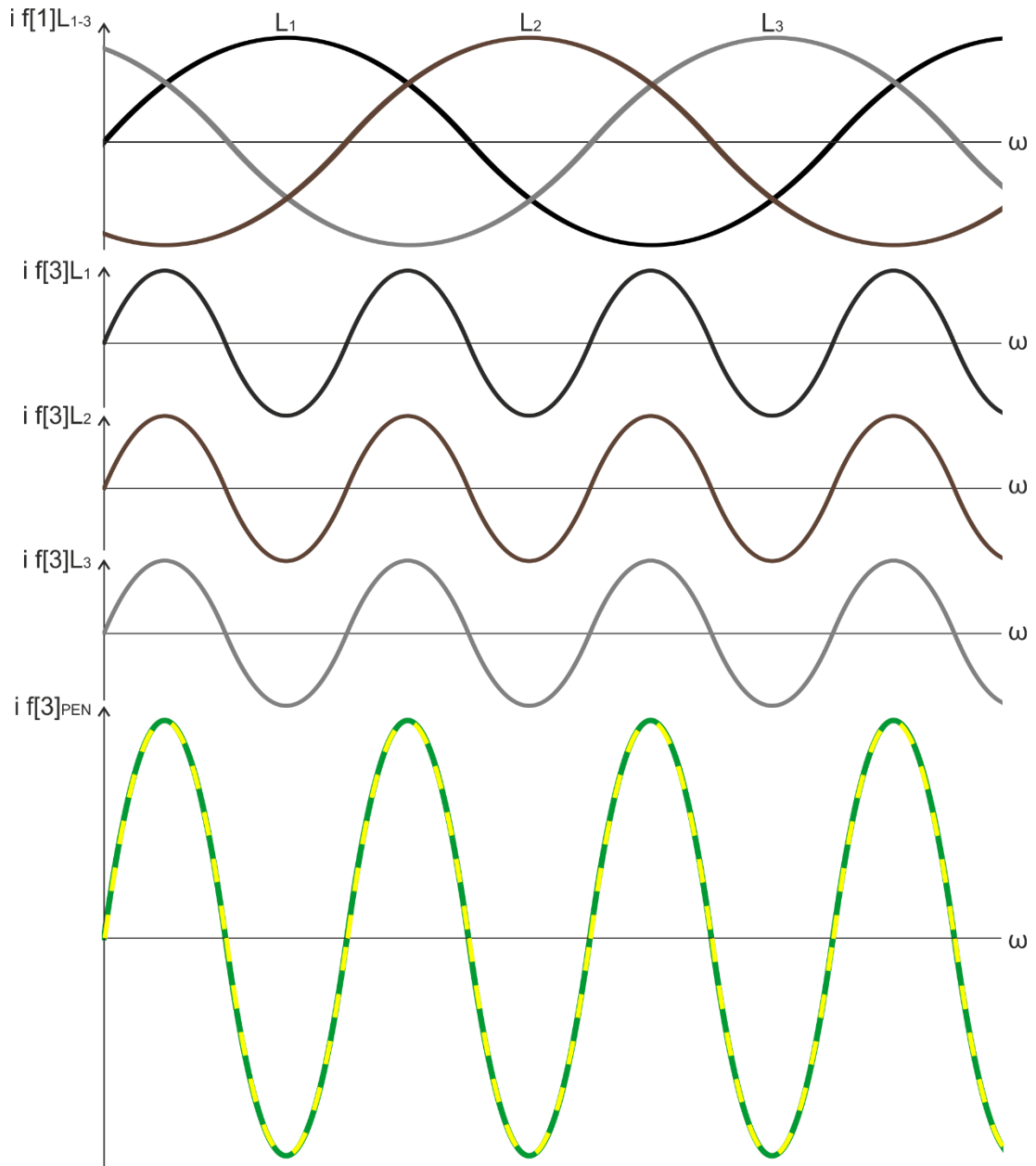
V těžkém průmyslu nejhůře zkresluje sinusový průběh proudu elektrická oblouková pec, využívaná při výrobě oceli. Jedná se o zařízení, které produkuje sudé i liché vyšší harmonické, a i přes třífázové napájení způsobuje značnou nesymetrii sítě.

2.2.3 Problémy v sítích NN

Vyšší harmonické proudy způsobují v sítích nízkého napětí problémy, kterou mohou mít zásadní vliv na její parametry. Jedním z významných důsledků působení zejména třetích vyšších harmonických je přetěžování středního, respektive PEN vodiče.

V trojfázové síti jsou fázová napětí vůči sobě posunuta o 120° . Pokud jsou všechny fáze stejnoměrně zatíženy, tzn. odběr je symetrický, proud základní harmonické ve středním vodiči je nulový. V případě nesymetrického odběru, kdy jsou jednotlivé fáze zatíženy rozdílně,

protéká středním vodičem proud, jenž je výsledkem vektorového součtu fázových proudů základní harmonické.



Obr. 6: Sčítání průběhů proudů třetí harmonické ve středním vodiči

Průběhy proudu třetích harmonických a jejich násobků jsou konfázní, mají v každém okamžiku stejnou fázi a velikost. V důsledku toho se tyto proudy ve středním vodiči sčítají a jejich výsledná hodnota může přesáhnout velikost základní harmonické proudu ve fázi. V případě 70% proudu třetí harmonické v každé fázi dosáhne výsledný proud středním vodičem 210 % hodnoty fázového proudu. S tímto vlivem násobků třetí harmonické proudu musí být počítáno při dimenzování vodičů, jelikož jejich maximální zatížitelnost je de facto dána oteplením vodiče na maximální dovolenou teplotu [11].

Zásadní vliv mají vyšší harmonické proudy na transformátory. Průběhy třetí harmonické proudy jsou ve fázi, proto se ve vinutí zapojeném do trojúhelníka uzavírají a nešíří dále do sítě. Třetí harmonickou proudy, a její násobky, jsou v takto zapojeném vinutí transformátoru eliminovány, přičemž harmonické jiných řádů transformátorem procházejí. Cyklické proudy násobků třetích harmonických nadměrně zatěžují vinutí a musí být brány v úvahu při stanovení jmenovitého zatížení daného transformátoru.

Další faktorem pro návrh dimenzování transformátoru je závislost ztrát vířivými proudy na obsahu vyšších harmonických ve spektru proudy. Ztráty vířivými proudy, které běžně dosahují přibližně 10 % celkových ztrát při plném zatížení, rostou s kvadrátem řádu harmonických. Pokud je transformátor zatížen výhradně nelineárními spotřebiči, tj. například IT technologií, budou jeho celkové ztráty výrazně vyšší. V důsledku toho poroste i jeho provozní teplota, což v delším časovém horizontu může způsobit degradaci izolačních materiálů ve vinutí transformátoru a výrazně tak zkrátit jeho životnost.

Vyšší harmonické mají také nezanedbatelný vliv na kompenzační kondenzátory. S rostoucí frekvencí klesá reaktance kondenzátoru, zatímco převážně induktivní reaktance v síti s frekvencí roste. Z toho důvodu je kompenzační kondenzátor zatěžován hlavně harmonickými vyšších řádů a pokud není patřičně dimenzován, může dojít k jeho poškození až destrukci. Dalším závažným problémem je rezonance kondenzátoru s převažující indukčností v napájecích sítích v blízkosti harmonických frekvencí. Výsledná nízká impedance na rezonanční frekvenci vede k nárůstu velikosti proudů, jež mohou vést až k destrukci kompenzačních zařízení.

Řešením je přidání další indukčnosti, tlumivky, do série ke kompenzačnímu kondenzátoru tak, aby celková impedance měla pro nejvýraznější nejnižší řád vyšší harmonické induktivní charakter. Tímto opatřením je možné omezit případný proud harmonické, tekoucí do kompenzačního kondenzátoru [8].

V neposlední řadě mají vyšší harmonické důsledek na ztráty ve vodiči vlivem skinefektu, kdy má střídavý proud při vyšších frekvencích tendenci protékat jen po obvodu vodiče. Tento jev bývá obvykle na základní frekvenci 50 Hz zanedbán, jelikož se projevuje jen velmi málo. Nicméně u frekvencí nad 350 Hz, které odpovídají 7. harmonické, se skinefekt stává neopominutelným, jelikož způsobuje přídatné ztráty ve vodiči a také jeho další oteplení. Případný vliv 7. a vyšších harmonických proudy musí být při projektování dimenzování kabelů brán v potaz. Bývá eliminován použitím mnohožilových vodičů a vrstvených přípojníc.

2.2.4 Problémy v sítích VN

V distribuční soustavě na hladině vysokého napětí je jedním z hlavních důsledků výskytu vyšších harmonických ve spektru proudu potenciál rušení signálu HDO neboli hromadného dálkového ovládání. Tento systém se využívá k regulaci spotřeby elektrické energie na straně odběratelů. Jeho základem jsou vysílače signálu HDO, jež jsou obvykle umístěny v distribuční síti v rozvodnách 110/22 kV, případně 110/35 kV, a přijímače signálu, které jsou umístěny u odběratelů. V závislosti na aktuální zátěži sítě během dne je možné v případě přebytku elektrické energie odběratelům dálkově sepnout určitou skupinu spotřebičů s vyšším výkonem, typicky bojler, což pomůže stabilizaci distribuční sítě. Signál HDO také zároveň přepíná odběrateli sazbu elektroměru mezi nízkým tarifem (NT) a vysokým tarifem (VT).

V evropské elektrizační soustavě je unifikována základní frekvence sítě 50 Hz. Vyšší liché násobky základní harmonické mohou způsobit rušení superponovaných signálů. Z toho důvodu se pro vysílání signálu HDO v tuzemsku používají frekvence 183,33 Hz, 216,66 Hz, 283,33 Hz, 760 Hz a 1,06 kHz. Frekvence HDO používanou v daném místě je nezbytné zohlednit při návrhu zařízení kvůli hrozbě rezonance či vytvoření nežádoucí pásmové propusti, jež by způsobila útlum signálu HDO. Typicky se jedná o zařízení pro kompenzaci účinníku. Maximální dovolené snížení signálu HDO je 5 % za předpokladu, že po tomto snížení bude jeho hodnota, v případě sítě vysokého napětí, minimálně 190 % náběhového napětí přijímače U_f . [19]

Sítě v distribuční soustavě na hladině vysokého a velmi vysokého napětí jsou obvykle izolovány, tedy bez přímo uzemněného uzlu. Tyto sítě jsou vystaveny působení nejrůznějších atmosférických vlivů, s nimi souvisejícím přepětím a také cizím zásahům. Všechny tyto skutečnosti mají zásadní vliv na bezporuchový chod sítě, jelikož jejich následkem jsou izolační poruchy jednotlivých fází především vůči zemi. Jedná se o tzv. zemní spojení, při němž dochází při určitých hodnotách poruchového proudu ke vzniku a hoření oblouku. Pokud je hoření oblouku nestabilní, tedy pokud dochází k jeho hasnutí a opětovnému zapalování, dojde k přepětí ve zdravých fázích o velikosti až 4,5násobku efektivní hodnoty jmenovitého fázového napětí. Kromě toho je nestabilní hoření oblouku samo o sobě značným zdrojem vyšších harmonických v síti.

Jednou z možností pro zachování sítě se zemním spojením v provozu je instalace Petersenovy zhášecí tlumivky. Síť lze pak po dobu nezbytně nutnou k nalezení poruchy provozovat i s jedním zemním spojením. Výsledná doba přerušení dodávky elektrické energie je tak relativně krátká. Většina přechodných zemních spojení se pak zháší sama, nicméně

případný obsah vyšších harmonických ve spektru proudu má na zhášení oblouků zemního spojení nepříznivý vliv.

2.2.5 Filtrace vyšších harmonických

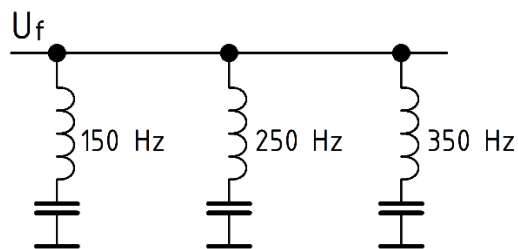
Filtrace je velice efektivní způsob eliminace obsahu vyšších harmonických ve spektru proudu. V zásadě je prakticky realizována za pomoci pasivních nebo aktivních filtrů, které jsou instalovány v blízkosti zdroje vyšších harmonických, a to pro zajištění nízké impedance pro proudy vyšších harmonických.

Pasivní filtry obsahují sériovou kombinace LC prvků s rezonanční frekvencí laděnou v blízkosti harmonické, kterou mají odfiltrovat. Hodnoty kapacit a indukčností lze pro konkrétní frekvence vyšších harmonických explicitně určit vyjádřením z Thomsonova vztahu:

$$f_h = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ [Hz]} \quad (12)$$

kde: f_h frekvence dané vyšší harmonické [Hz],
 L indukčnost [H],
 C kapacita [F]

Vhodnou paralelní kombinací několika sériových LC filtrů lze vytvořit filtrační blok, zajišťující filtraci všech významných vyšších harmonických v síti. Příkladem může být FKZ u trakčních napájecích stanic 25 kV, jež obsahuje zpravidla dvě filtrační větve, naladěné na frekvence blízké 3. a 5. harmonické.

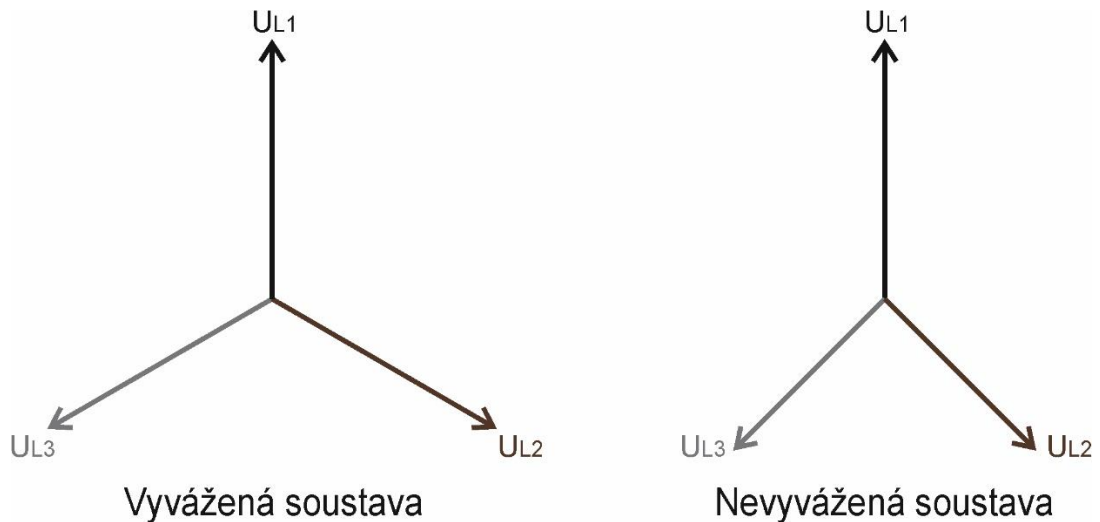


Obr. 7 Schematické provedení pasivního filtru vyšších harmonických

Aktivní filtry tvoří výkonový elektronický měnič připojený paralelně k nelineární zátěži. Proud měniče je řízen takovým způsobem, aby byly jeho činností produkovány stejné úrovně vyšších harmonických jako u nelineární zátěže, avšak v protifázi. Tím se vzájemně v bodě spojení eliminují.

2.3 Napěťová nesymetrie

Vzniká nerovnoměrným rozložením zatížení mezi tři fáze. Napěťová nesymetrie, nebo také napěťové nevyvážení, je parametr, jež je sledován normou ČSN EN 50160. V levé části následujícího obrázku je zobrazen fázorový diagram vyvážené sítě, kdy mají všechna napětí stejnou velikost. Jejich fázory svírají mezi sebou úhel 120° . V praxi si pod středním bodem této soustavy lze představit nulový uzel transformátoru zapojeného do hvězdy. Proti zemi bude jeho napětí v tomto případě nulové.



Obr. 8 Fázorové diagramy vyvážené a nevyvážené soustavy

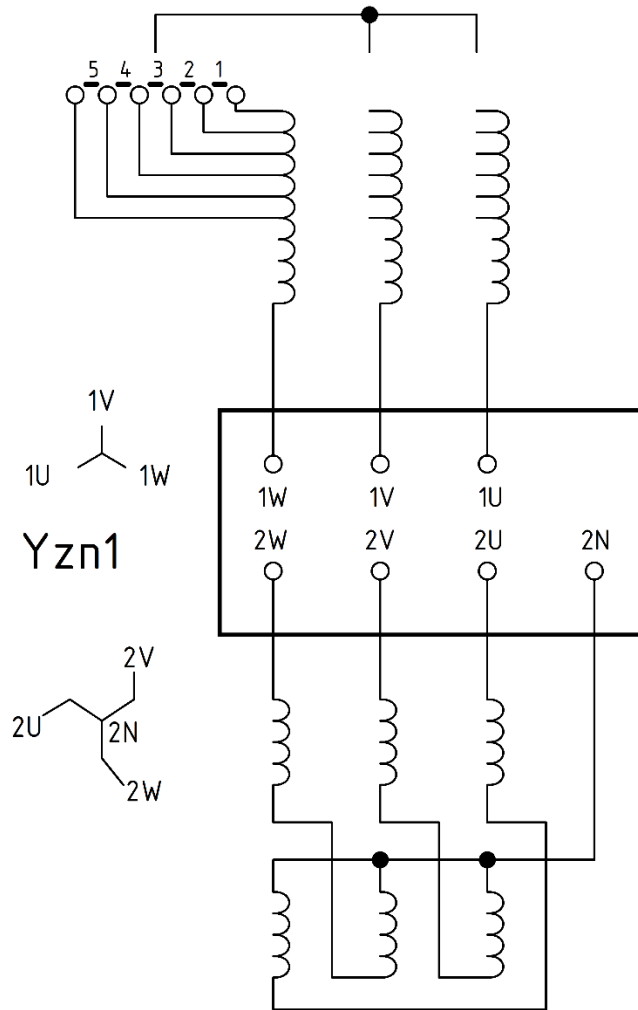
V pravé části zmíněného obrázku je neznačeno nesymetrické zatížení soustavy. Jeho důsledkem je rozdílná velikost napětí jednotlivých fází, čímž dojde k posunutí středního bodu soustavy z nulového bodu. Fázory jednotlivých napětí nesvírají úhel 120° . [17]

Nesymetrický odběr, potažmo průběhy napětí, mají neblahý vliv hlavně na elektrické stroje využívající magnetické pole. U asynchronních motorů znamená 1% nesymetrie napětí 6-9% nesymetrii proudu, čímž dojde k nadměrnému oteplení motoru. To má za následek degradaci vlastností izolace a sníženou životnost. Kromě toho s rostoucím poměrnou nesymetrií klesá výkon motoru. U třífázových měničů vlivem nesymetrického napájení dojde ke vzniku necharakteristických násobků 3. harmonické. To má za následek vypínání měničů a jimi napájených pohonů v důsledku většího vstupního proudu a větší provozní teploty.

Na hladině vysokého napětí jsou hlavními zdroji nesymetrie indukční pece pracující na síťové frekvenci 50 Hz, dále odporové tavicí pece, obloukové ocelářské tavicí pece a odporové svářečky. Na hladině nízkého napětí se jedná o všechny jednofázové spotřebiče zapojené mezi

fázový a střední vodič. Pro potlačení nesymetrie vzniklé současným odběrem více jednofázových spotřebičů je vhodné rozložit tyto odběry mezi jednotlivé fáze.

Symetrického odběru je na hladině nízkého napětí možné dosáhnout vhodným zapojením distribučního transformátoru. Pro tyto účely lze s výhodou využít zapojení vinutí do lomené hvězdy – Y_{zn} .



Obr. 9: Zapojení distribučního transformátoru Y_{zn1}

V případě zapojení transformátoru do lomené hvězdy je vinutí každé fáze rozděleno na polovinu. Každá polovina vinutí je umístěna na dvou sousedních sloupcích magnetického obvodu. Při nesymetrickém zatížení jedné z fází dojde tímto způsobem k přerozdělení zátěže, pomocí magnetického toku v jádru, na odpovídající dvě fáze primárního vinutí. Pro zajištění správného geometrického součtu fázorů indukovaných napětí je nezbytné každou polovinu sekundárního vinutí vhodně zapojit, respektive orientovat, jak je zřejmé z obr. 9.

3 NABÍJENÍ ELEKTRICKÝCH SILNIČNÍCH VOZIDEL

Elektrické silniční vozidlo je dopravní prostředek využívající elektrický pohon. Potřebná elektrická energie může být vozidlem odebírána z trakčního vedení, případně je uložena v trakčních akumulátorech. Jejich nabíjení je prováděno na základě dvou možných principů.

První možností je interní nabíjení trakčních akumulátorů pomocí rekuperace. Časový průběh rekuperované energie je nedeterminovaný. Závisí na jízdním profilu a sklonových poměrech pozemní komunikace a stylu jízdy. Pro čistě elektrická silniční vozidla a vozidla plug-in hybrid se jedná o doplňkový způsob nabíjení trakčních akumulátorů. Rekuperace energie ovšem výrazným způsobem přispívá k hospodárnosti jejich jízdy. U vozidel hybridních je pak rekuperace jediný prostředek pro uživatelské nabíjení trakčních akumulátorů.

Druhou možností je externí nabíjení trakčních akumulátorů pomocí nabíječek. Ty lze dělit na základě průběhu nabíjecího proudu na střídavé (AC) a stejnosměrné (DC).

3.1 AC nabíjení

Při nabíjení elektrických silničních vozidel střídavým proudem je nabíjecí proud nejprve přiveden přes konektor do interního palubního AC/DC měniče, následně je pak přiveden na akumulátor vozidla.

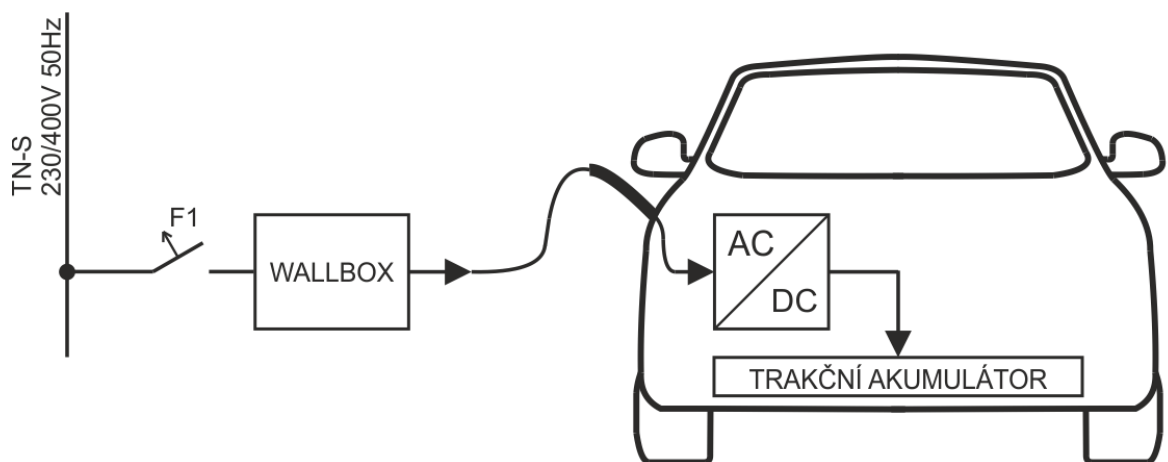
Nabíjecí výkon vozidla je omezen výkonem palubního AC/DC měniče. Z toho důvodu je AC nabíjení z časového hlediska pomalejší. Je vhodné jej využít během dlouhodobějšího stání elektrického vozidla, například během noci.

3.1.1 AC nabíjecí stanice

Při nabíjení AC stanicemi dochází k propojení elektrické sítě s palubní nabíječkou, přes kterou veškerý proud protéká. Tyto AC nabíjecí stanice bývají běžně označovány jako wallboxy. Jejich primárním přínosem je umožnění dálkové řízení a sledování průběhu nabíjení elektrického vozidla. Dále obsahují proudový chránič, respektive monitor reziduálního proudu (RCM).

Wallboxy umožňují řídit proces nabíjení v závislosti na aktuálním vytížení sítě. V kooperaci s battery managementem vozidla řídí velikost nabíjecího proudu dle aktuálních možností odběrného místa. Možné je také propojení s přijímačem HDO. Nabíjení pak volitelně může probíhat na nízké sazbě elektrické energie, což znamená pro uživatele finanční úsporu. Stejně tak je možné některé současné moderní wallboxy, za pomoci chytré instalace, přímo propojit s objektovou fotovoltaickou elektrárnou.

AC nabíjecí stanice, wallboxy, se rozlišují podle možného přenášeného nabíjecího výkonu do vozidla. Od toho se odvíjí, zda je jednofázové připojení do distribuční sítě, pak je nabíjecí výkon trakčního akumulátoru omezen na cca 3,5 kW (16 A), nebo třífázové připojení do distribuční sítě. Pak může být maximální nabíjecí výkon 11 kW (16 A) a 22 kW (32 A).

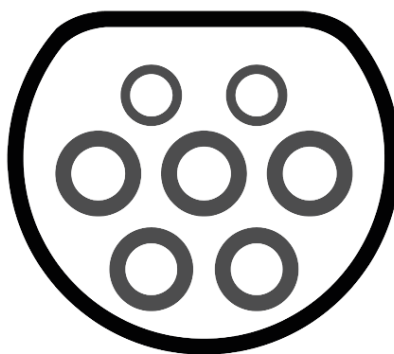


Obr. 10: Blokové schéma AC nabíjení elektrických silničních vozidel

Hlavní výhodou AC nabíjecích stanic je pořizovací cena. Díky tomu jsou výrazně rozšířenější než DC nabíjecí stanice. Mají jednodušší instalaci a menší výkonové nároky na kapacitu distribuční sítě. AC nabíjecí stanice ve formě wallboxů jsou vhodné pro domácí i průmyslové dlouhodobé nabíjení.

3.1.2 AC konektor

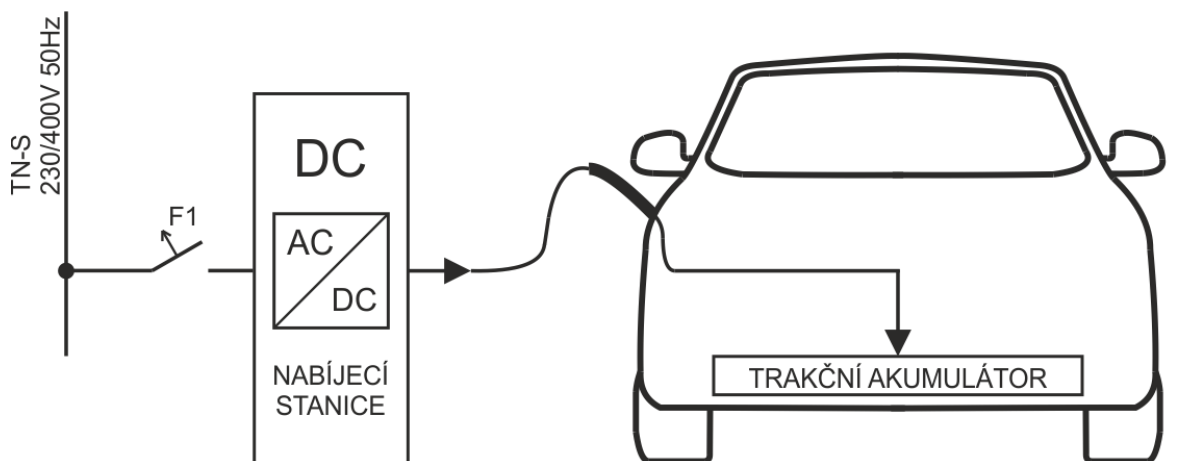
Typickým představitelem konektoru pro nabíjení elektrických silničních vozidel střídavým proudem je konektor Mennekes – type 2. V roce 2014 byl v rámci unifikace schválen Evropskou unií jako standardní konektor. Umožňuje přenos výkonu do 22 kW.



Obr. 11: Konektor Mennekes – type 2

3.2 DC nabíjení

Při nabíjení elektrických silničních vozidel stejnosměrným proudem je střídavý elektrický proud z distribuční sítě nejprve přiveden do DC nabíjecí stanice, která zajistí jeho usměrnění a úpravu velikosti napětí v závislosti na požadavcích battery managementu vozidla. Jelikož do vozidla vstupuje přes konektor již usměrněný proud, není jeho velikost omezena výkonem interního palubního AC/DC měniče vozidla. V případě DC nabíjení, proud tento měnič obchází a je přiveden přímo na trakční akumulátor vozidla. Stejnosměrné nabíjení tak probíhá podstatně rychleji. Bývá běžně hovorově označováno jako „rychlónabíjení“.



Obr. 12: Blokové schéma DC nabíjení elektrických silničních vozidel

3.2.1 DC nabíjecí stanice

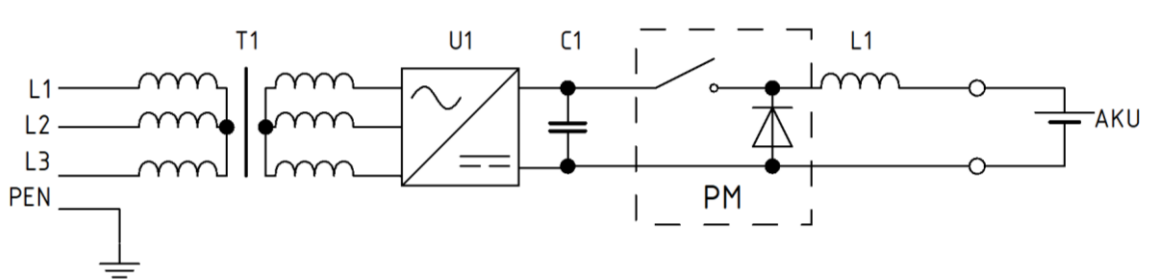
Oproti AC nabíjecím stanicím jsou DC nabíjecí stanice výrazně konstrukčně složitější, od čehož se odvíjí i vyšší pořizovací cena, avšak poskytují násobně vyšší nabíjecí výkon. Ten standardně odpovídá 50 kW. U současných rychlónabíjecích stanic je to až 150 kW a některé komerční nabíjecí stanice, například výrobce Tesla, disponují nabíjecím výkonem až 250 kW.

Od toho se nicméně také odvíjí vyšší nároky na připojení rychlónabíjecích stanic do distribuční soustavy. A to zejména ve vztahu k volnému distribučnímu výkonu v síti. V případě instalace většího počtu rychlónabíjecích DC stanic v jednom místě, například u čerpacích stanic, bývá pro jejich napájení v současnosti již běžně zřízena samostatná trafostanice s distribučním transformátorem s odpovídajícím jmenovitým výkonem. Tím je dosaženo dostatečné tvrdosti sítě, eliminace napěťových úbytků na přípojném NN vedení a v neposlední řadě nemůže docházet k ovlivňování dalších připojených zařízení vlivem změny napětí v síti.

Pro zajištění uživatelské bezpečnosti před úrazem elektrickým proudem při manipulaci s nabíjecím kabelem je nezbytné zajistit galvanické oddělení výstupu a napájecího vstupního

napětí z distribuční soustavy. V topologii rychlonabíjecí stanice tedy nepostačuje pouhé umístění usměrňovače, ale musí tu být umístěn také výkonový oddělovací transformátor. Z hlediska konstrukce jsou v praxi používána dvě řešení.

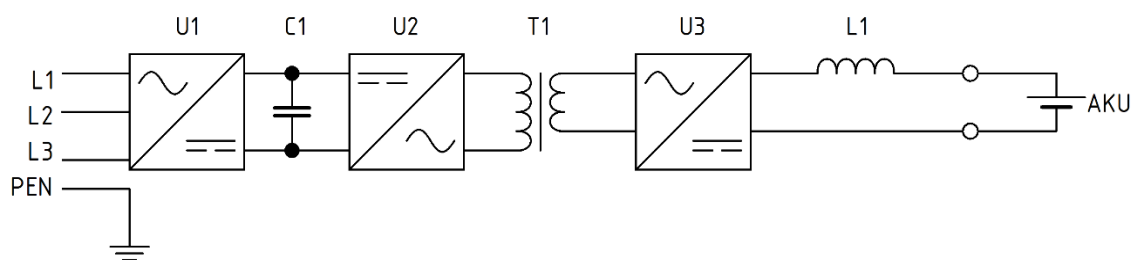
V prvním případě je transformátor umístěn na vstupu obvodu. Je tedy napájen střídavým napětím s frekvencí 50 Hz. Sekundární napětí je dále usměrněno a přivedeno na pulzní měnič, který umožňuje plynulou a nízkoztrátovou změnu výstupního proudu a napětí v závislosti na požadavcích battery managementu. Tlumivka L1 je určena pro vyhlazení průběhu proudu.



Obr. 13: Konstrukce rychlonabíjecí stanice se síťovým transformátorem

Nevýhodou tohoto řešení jsou rozměry vstupního transformátoru, který musí být patřičně dimenzován. Rozvoj a dostupnost výkonových spínacích prvků umožnil realizaci druhého řešení konstrukce rychlonabíjecí stanice, kdy je použit vysokofrekvenční transformátor.

Principiálně je toto řešení velmi podobné spínanému zdroji. Vstupní napětí je usměrněno, vyhlazeno kondenzátorem a rozstředáno pomocí měniče U2, pracujícímu na frekvenci řádově v desítkách kHz. Teprve poté je toto napětí transformováno a následně znovu usměrněno. Pro řízení výstupního napětí a proudu na základě požadavků battery managementu je určen střídač U3. Výstupní proud je opět vyhlazen tlumivkou.



Obr. 14: Konstrukce rychlonabíjecí stanice s VF transformátorem

Tato konstrukce umožňuje, díky vyšší spínací frekvenci, při stejném výkonu použití rozměrově menšího transformátoru. Je zde však nutné použít více výkonových spínacích prvků.

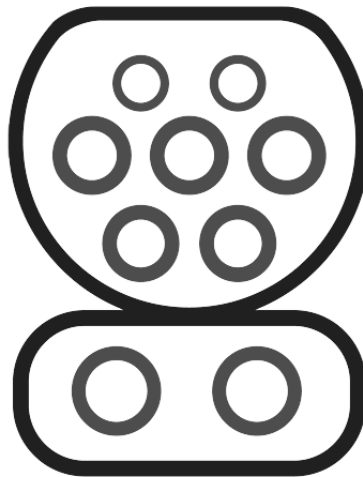
3.2.2 DC konektory

Při nabíjení elektrických silničních vozidel ze stejnosměrných rychlonabíjecích stanic jsou v praxi v Evropské unii používány zejména dva typy konektorů. Prvním je CHAdeMO konektor, který umožňuje přenést nabíjecí výkon až 50 kW, proud až 125 A.



Obr. 15: Konektor CHAdeMO

Druhým zástupcem používaných DC konektorů je konektor CCS (Combined Charging System). Konstrukčně vychází z konektoru Mennekes – type 2. Na rozdíl od něj má další dva nabíjecí kontakty pro rychlé stejnosměrné nabíjení, které může konstrukčně probíhat proudem až 200 A. Maximální přenášený výkon je až 170 kW.



Obr. 16: Konektor CCS (Combined Charging System)

4 LEGISLATIVA NABÍJENÍ ELEKTRICKÝCH SILNIČNÍCH VOZIDEL

Nabíjení elektrických silničních vozidel by mohlo být, za určitých okolností pro laickou veřejnost, rizikovou činností, vedoucí v krajním případě až k úrazu elektrickým proudem nebo vzniku materiálních škod. Neodborná obsluha, možné vystavení nepříznivým povětrnostním podmínkám a hodnoty nabíjecího napětí, které dalece přesahují práh bezpečného dotykového napětí, jsou jen některé z faktorů, jež mají v důsledku zcela zásadní vliv na bezpečnost těchto zařízení. Z toho důvodu je nutné stanovit závazné normy a předpisy, které budou pro veškerá zařízení zajišťující nabíjení elektrických silničních vozidel závazné. Důsledným vymáháním jejich dodržování lze pak prakticky eliminovat ohrožení, především laické obsluhy těchto zařízení, úrazem elektrickým proudem, případně vznik majetkových škod [1].

Z pohledu legislativy lze rozdělit nabíjení elektrických silničních vozidel střídavým proudem, dle počtu využívaných fází, na jednofázové nabíjení s jmenovitým nabíjecím proudem 16 A a trojfázové s jmenovitým nabíjecím proudem do 32 A včetně. Tyto režimy nabíjení, definované v ČSN EN 61851, požadují vybavení přípojovacího místa proudovým chráničem s maximálním reziduálním proudem 30 mA s charakteristikami, které jsou minimálně ekvivalentního typu A, definovanému v IEC 61008-1 nebo IEC 61009-1, nebo IEC/TR 60755, ve spojení s nadproudovou ochranou. Každý obvod napájecího přípojného místa musí být dále vybaven a samostatně chráněn přístrojem zajišťujícím ochranu před nadproudy. [3][4][5]

Mezi další požadavky na nabíjecí obvody vozidla, definované v ČSN EN 61851, dále patří použití sítě TN-S. V obvodech sítě TN, jež nabíjení elektrická silniční vozidla, nesmí být použit vodič PEN. S ohledem na možné poškození elektrického vozidla vlivem přepětí v síti je nutno zajistit jeho ochranu za pomoci přepěťových ochranných zařízení, které jsou umístěny v napájecím obvodu. Signalizační a další obdobná zařízení nesmí narušovat správnou funkci přístrojů zajišťujících ochranné opatření automatickým odpojením od zdroje, tedy například RCD chránič.

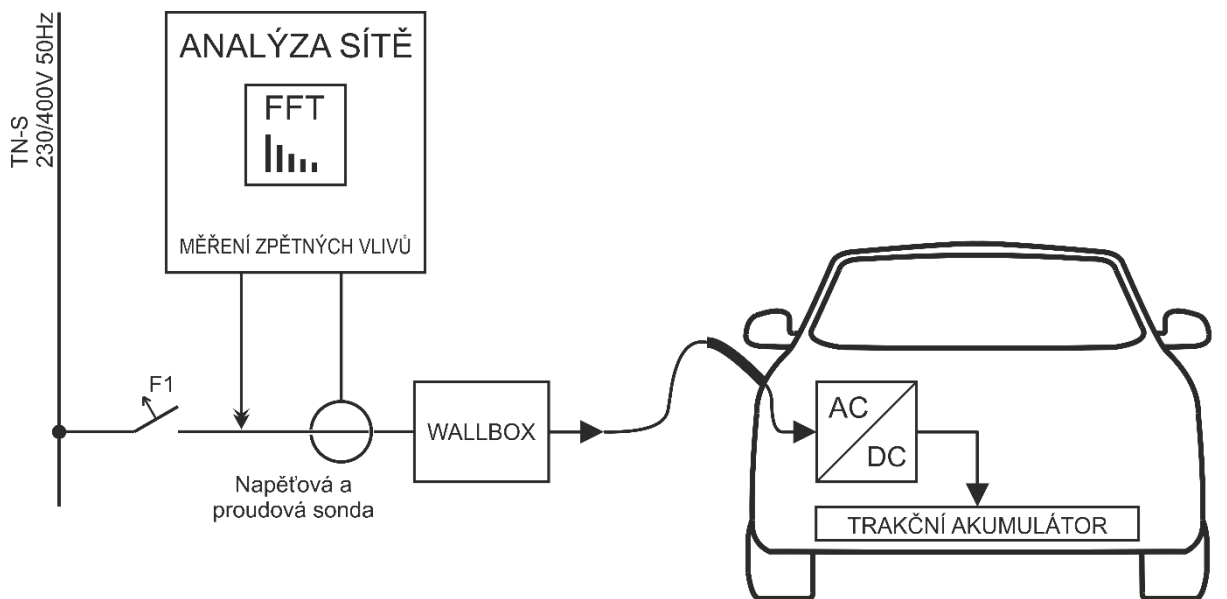
Dalšími faktory řešenými v ČSN EN 61851 jsou provozní podmínky a vnější vlivy. Pokud je přípojovací místo venku, je nezbytné vybavit zařízení ochranou krytem odpovídajícímu krytí alespoň IPX4, tedy ochranou před stříkající vodou. Kromě toho musí mít zařízení ochranu krytem alespoň IP4X, tedy ochranu před vniknutím velmi malých předmětů (okolo 1 mm).

Každý konektor, nebo zásuvka pro připojení vozidla, musí být umístěn tak, aby bylo možné zaparkované elektrické vozidlo připojit k nabíjení. Přičemž pohyblivé (neupevněné) zásuvky je zakázáno používat. Všechny zásuvky musí být nainstalovány v rozváděči, nebo upevněny v pouzdře. Zásuvky musí být umístěny dolním okrajem 0,5 m až 1,5 m nad zemí. Zároveň jedna zásuvka, nebo konektor pro připojení vozidla, smí být použita k nabíjení pouze jednoho vozidla.

Další závaznou normou pro nabíjecí obvody vozidla je ČSN 33 2000-7-722 ed. 3. Je závazná pro obvody určené k dodávce energie elektrickým vozidlům a obvody určené ke zpětnému odběru elektřiny z elektrických vozidel. Obvody, na které se tento dokument vztahuje, jsou ukončeny místem připojení. Požadavky na napájecí zařízení elektrických vozidel pro vodivé nabíjení a příslušné režimy nabíjení jsou uvedeny v souboru IEC 61851. Požadavky na napájecí zařízení elektrických vozidel pro bezdrátový přenos energie jsou uvedeny v souboru IEC 61980. Tento dokument se ovšem nevztahuje na posouzení rizika výbuchu v důsledku možné výroby vodíku nebo jiných hořlavých plynů ve fázi dobíjení akumulátoru. [2][6]

5 NÁVRH METODIKY A MĚŘENÍ ZPĚTNÝCH VLIVŮ

Tato diplomová práce se zaměřuje na zpětné vlivy na distribuční síť během střídavého nabíjení silničních vozidel z wallboxů, tedy s maximálním nabíjecím proudem 32 A. Pro měření zpětných vlivů nabíjení je nezbytné znát velikosti a průběhy proudů ve všech fázových vodičích a ve středním vodiči během nabíjení. Dále je nutné měřit všechny tři hodnoty fázových, případně sdružených napětí.



Obr. 17: Obecné blokové znázornění metodiky měření zpětných vlivů

Naměřené hodnoty jednotlivých proudů a napětí je dále nutné v reálném čase zpracovávat síťovým analyzátozem, který umožňuje v reálném čase výpočet rychlé Fourierovy transformace pro zobrazení frekvenčního spektra proudu, tedy vyšších harmonických.

V rámci této diplomové práce byly, z časových a logistických důvodů, pro měření zpětných vlivů nabíjení několika vybraných elektrických vozidel na distribuční síť použity dva různé analyzátozem – Fluke Norma 5000 a KMB Systems SMY 134. Druhý jmenovaný analyzátozem je nedílnou součástí nového univerzálního měřicího pracoviště zpětných vlivů na distribuční síť. Zapojení a konstrukce tohoto měřicího pracoviště jsou náplní kapitoly 5.2.

5.1 Měření pomocí analyzátozem sítě Fluke NORMA 5000

Analyzátozem Norma 5000, výrobce Fluke, je kompaktní, vysoce přesný šestikanálový analyzátozem elektrické energie. Veškeré vstupy jsou galvanicky oddělené. Současný paralelní záznam všech fází umožňuje přesně sledovat dynamické události u všech fází ve stejném okamžiku. K dispozici je kompletní analýza díky měření harmonických napětí proudu a výkonu až do čtyřicáté harmonické.

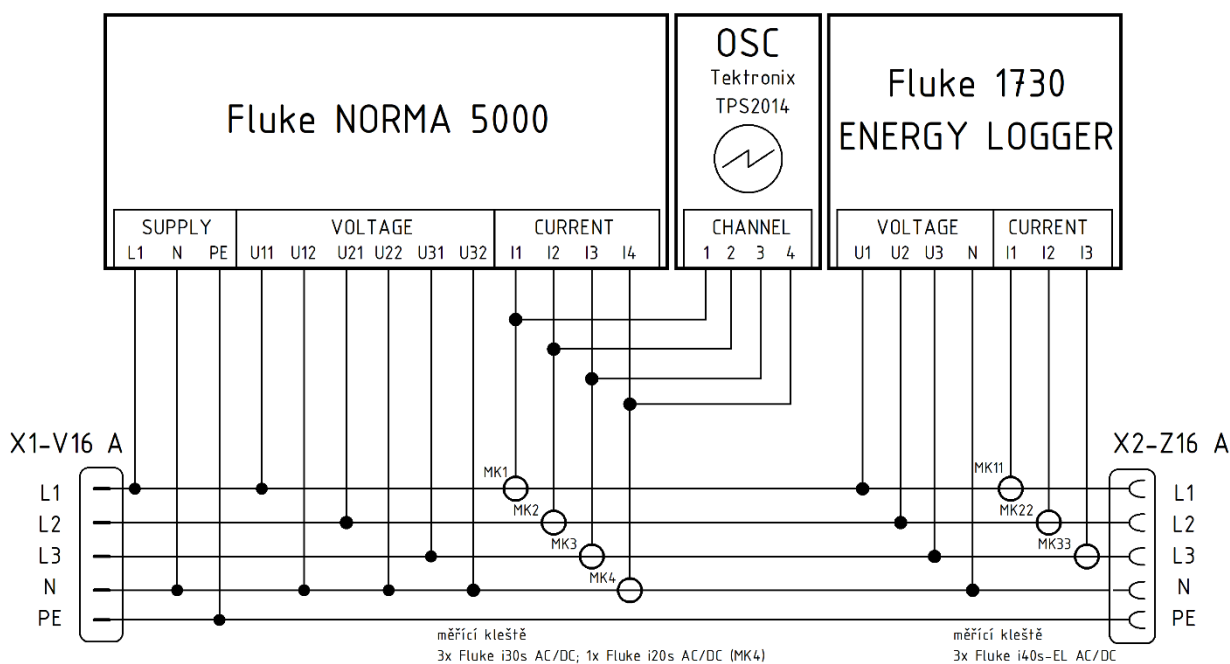
Komunikace a logování naměřených dat je možné pomocí rozhraní RS232 a USB, volitelně také pomocí IEEE488 nebo Ethernet. [12]



Obr. 18: Analyzátor sítě Fluke NORMA 5000 [12]

5.1.1 Schéma zapojení měřícího pracoviště

Zapojení pracoviště vychází z dokumentace analyzátoru Fluke. Jedná se prakticky o měření všech fázových napětí a proudů a protékajícího proudu středním vodičem.



Obr. 19: Schéma zapojení měřícího pracoviště s Fluke NORMA 5000

Pětipólová přívodka X1 je připojena do distribuční sítě. Připojení nabíjeného elektrického vozidla je provedeno pomocí zásuvky X2. Měření fázového napětí je realizováno přímo, na vstupy analyzátoru. Pro měření fázových proudů slouží troje proudové kleště Fluke i30s AC/DC, připojitelné ke vstupům analyzátoru pomocí BNC konektorů. Pro měření proudu středním vodičem byly použity proudové kleště Fluke i20s. Všechny proudové kleště jsou ve schématu zapojení označeny MK1 až MK4. Kromě analyzátoru Fluke Norma 5000 je k nim

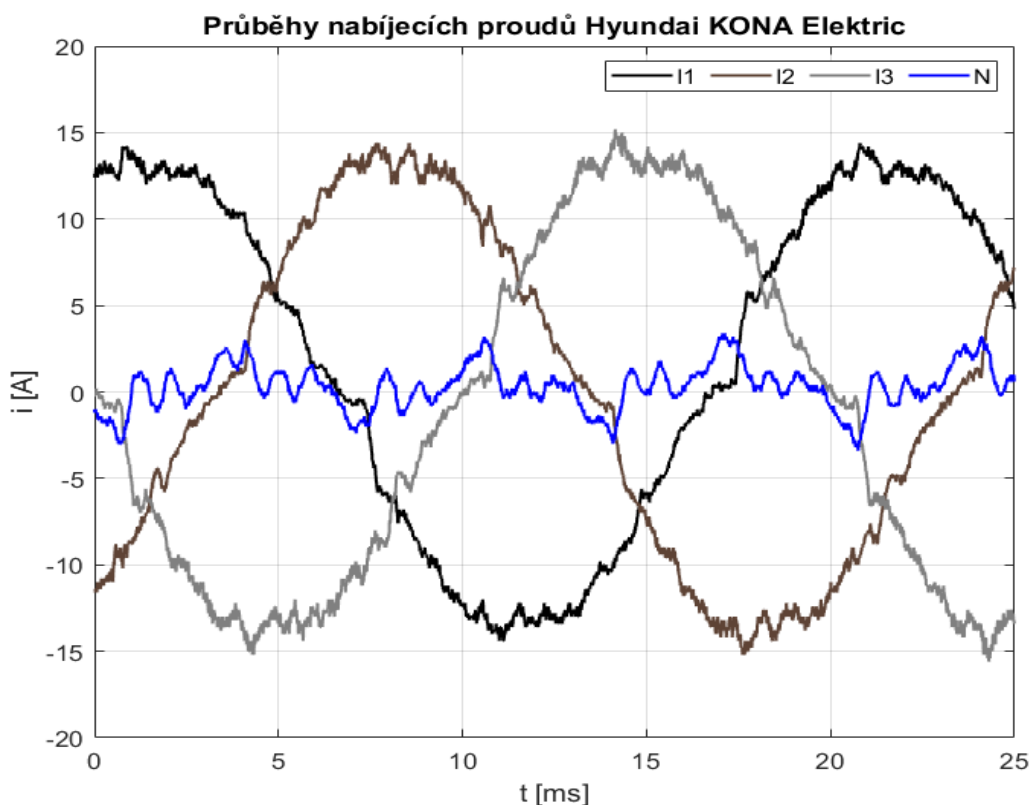
dále, pomocí T rozboček, připojen čtyřkanálový osciloskop Tektronix TPS2014, z něhož v této diplomové práci pochází veškeré naměřené průběhy fázových proudů a proudu středním vodičem.

Nabíjení elektrického silničního vozidla je proces, trvající, při nabíjení z wallboxu, několik hodin. Pro účely autonomního záznamu veličin napětí a proudu, potažmo výkonu během celého nabíjecího cyklu bylo měřicí pracoviště doplněno o Energy logger 1730, výrobce Fluke. Měření napětí probíhá přímo, pro měření proudu přístroj používá další troje proudové kleště Fluke i40s-EL AC/DC, ve schématu označeny MK11 až MK33. Energy logger následně dopočítává hodnotu činného, jalového a zdánlivého výkonu. Měření během nabíjení všech vozidel uvedených v této diplomové práci bylo realizováno v areálu Výukového a výzkumného centra v dopravě v Pardubicích – Doubravicích.

5.1.2 Nabíjení vozidla Hyundai KONA Electric

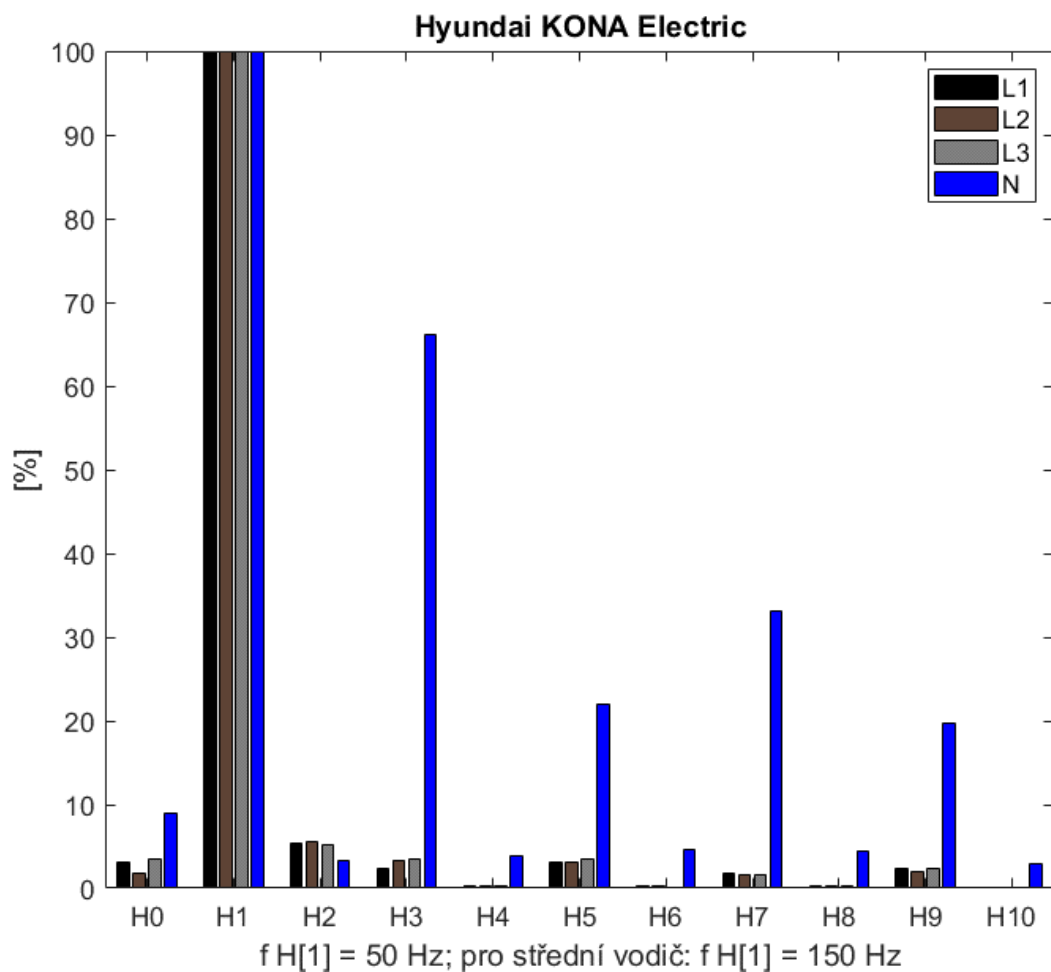
Prvním elektrickým vozidlem, na němž bylo provedeno během jeho nabíjení měření zpětných vlivů na distribuční síť, je Hyundai KONA Electric. Toto vozidlo je sériově vyráběno v České republice, v závodě v Nošovicích nedaleko Frýdku-Místku.

Naměřené průběhy nabíjecího proudu ve všech fázích a nulovém vodiči zobrazuje následující obrázek.



Obr. 20: Průběhy nabíjecích proudů vozidla Hyundai KONA Electric

Jedná se o symetrické zatížení distribuční sítě, proud je odebírán rovnoměrně ze všech tří fází. Průběhy všech proudů jsou přetvořené sinusové. Na naměřených průbězích nabíjecích proudů pozorovat značný proud středním vodičem. Jeho příčinou je součet konfázních proudů třetích harmonických v jednotlivých fázích. Frekvenční spektrum nabíjecího proudu vozidla zachycuje následující obrázek. Veškeré záznamy frekvenčních spekter jednotlivých proudů v této diplomové práci byly zaznamenány pomocí analyzátoru Fluke Norma 5000.



Obr. 21: Frekvenční spektrum nabíjecích proudů vozidla Hyundai KONA Electric

1. harmonická fázových proudů je referenční, s hodnotou 100 %. Odpovídá jmenovité frekvenci napájecí sítě, tedy 50 Hz. Vyšší harmonické jsou celistvé násobky této frekvence. V důsledku součtu konfázních 3. vyšších harmonických fázových proudů odpovídá proud 1. harmonické ve středním vodiči frekvenci 150 Hz.

Ve frekvenčních spektrech fázových proudů jsou prakticky zastoupeny všechny liché vyšší harmonické. Značné je také zastoupení 2. a 0. harmonické. Nultá harmonická představuje stejnosměrnou složku proudu. Především ve středním vodiči dosahuje hodnoty až 10 % základní harmonické.

Frekvenční spektrum proudu středního vodiče obsahuje opět především liché vyšší harmonické. Zcela dominantní je pak 3. a 7. harmonická proudu.

Následující tabulka shrnuje naměřené hodnoty elektrických veličin při nabíjení vozidla Hyundai KONA Electric.

Tab. 1: Naměřené hodnoty během nabíjení vozidla Hyundai KONA Electric

Měřená veličina	L1	L2	L3
$U_{PRŮMĚR}$ [V]	231,3	231,2	230,7
I_{MAX} [A]	10,33	10,31	10,35
$I_{PRŮMĚR}$ [A]	5,08	5,13	5,15
I_{MIN} [A]	0	0	0
$\cos \varphi$ PRŮMĚR	0,96	0,96	0,96
$THD_{I MAX}$ [%]	79,5	96,8	83,3
$THD_{I PRŮMĚR}$ [%]	12,5	12,8	13,7
$THD_{I MIN}$ [%]	5,4	5,6	6
f_{MAX} [Hz]	50,13		
$f_{PRŮMĚR}$ [Hz]	49,99		
f_{MIN} [Hz]	49,91		
P_{MAX} [kW]	6,729		
$P_{PRŮMĚR}$ [kW]	1,986		
P_{MIN} [kW]	0,003		
Q_{MAX} [kVar]	-0,002		
$Q_{PRŮMĚR}$ [kVar]	-0,551		
Q_{MIN} [kVar]	-1,662		
S_{MAX} [kVA]	6,913		
$S_{PRŮMĚR}$ [kVA]	2,061		
S_{MIN} [kVA]	0,004		

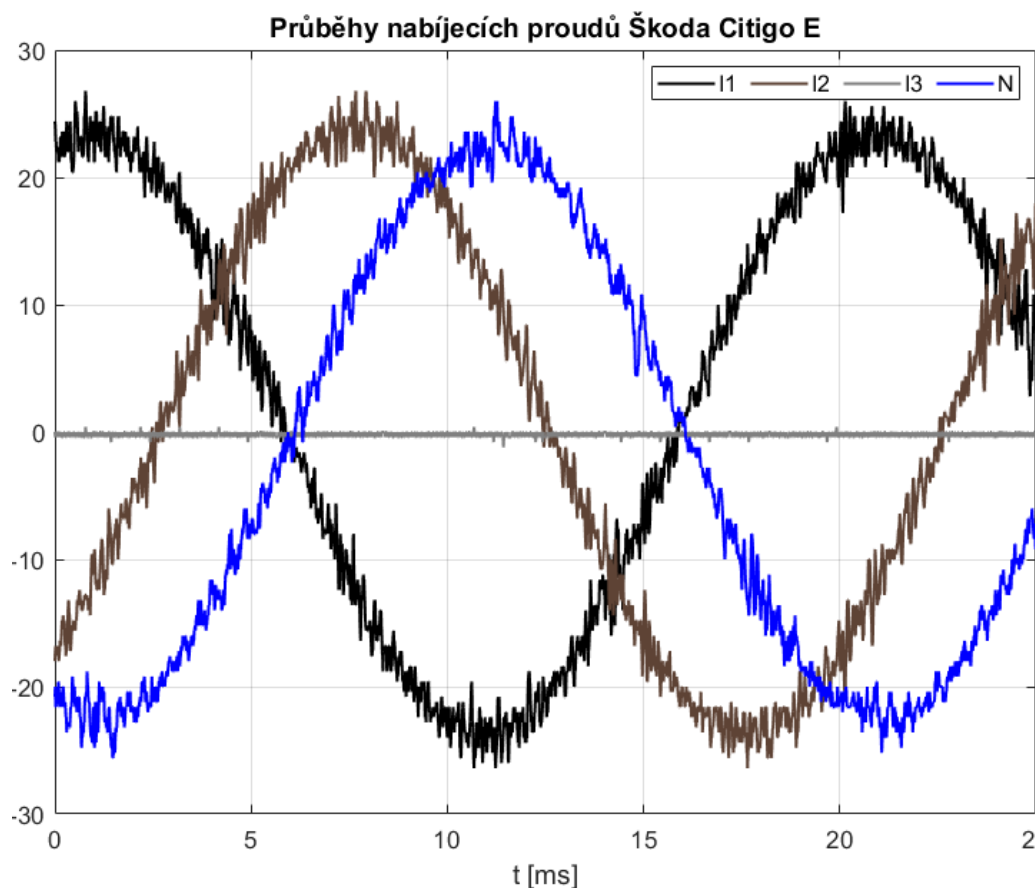
Je zřejmé, že nabíjení vozidla probíhá s účínkem 0,96, avšak se záporným jalovým výkonem. To prakticky znamená, že vozidlo během nabíjení působí na síť jako kapacitní zátěž.

Stojí za povšimnutí, že hodnota celkového harmonického zkreslení proudu, v tabulce označeného jako THD_A , vystoupala během měření v maximu krátkodobě až na 96,8 %. Průměrná hodnota zkreslení proudu TDH je zhruba 13%.

5.1.3 Nabíjení vozidla Škoda Citigo E

Škoda Citigo-e iV je elektromobil vycházející z modelu Škoda Citigo, který byl vyráběn se spalovacími motory od roku 2011. Premiéra vozu proběhla 23. května 2019 v Bratislavě v rámci 83. mistrovství světa v hokeji. Výroba začala ještě v polovině téhož roku. [14]

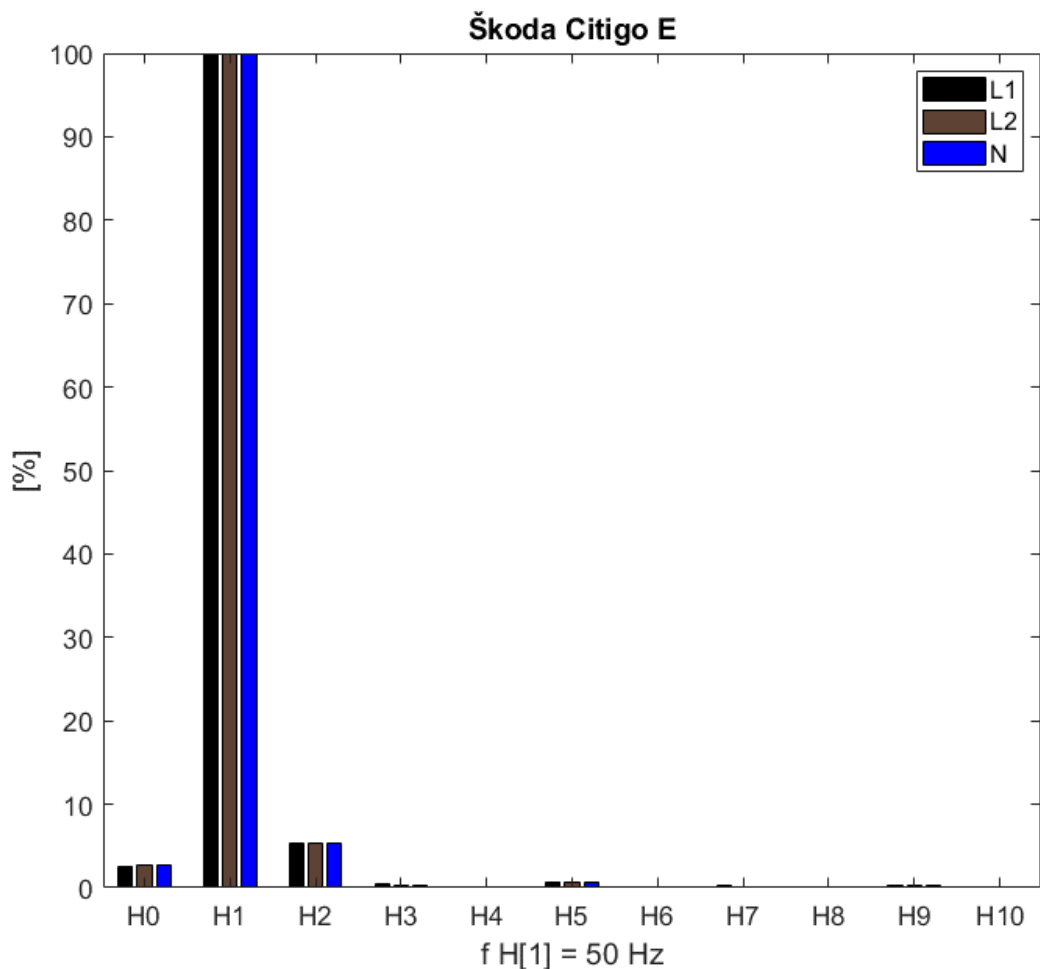
Naměřené průběhy nabíjecího proudu ve všech fázích a středním vodiči zobrazuje následující obrázek.



Obr. 22: Průběhy nabíjecích proudů vozidla Škoda Citigo E

Z naměřených průběhů proudu je zřejmé, že se jedná o nesymetrickou zátěž sítě. Nabíjení se aktivně účastní pouze dvě fáze. Proud fází L3 je prakticky nulový. Zbylé průběhy proudů jsou sinusové se zřetelnou nosnou frekvencí PWM, řádově v kilohertzech, v důsledku činnosti AC/DC měniče ve vozidle.

Frekvenční spektrum nabíjecího proudu vozidla zachycuje obrázek 23.



Obr. 23: Frekvenční spektrum nabíjecích proudů vozidla Škoda Citigo E

1. harmonická fázových proudů je referenční, s hodnotou 100 %. Opět odpovídá jmenovité frekvenci napájecí sítě, tedy 50 Hz. Ve srovnání s vozem Hyundai KONA Electric je obsah vyšších harmonických, ve frekvenčním spektru nabíjecího proudu vozidla Škoda Citigo E, výrazně nižší. Nejvyššího procentuálního zastoupení vyšších harmonických zde dosahuje, v obou fázích a středním vodiči, 2. harmonická. Výrazná je také hodnota stejnosměrné složky, respektive 0. harmonické. Hodnoty 3., 5. a 9. harmonické jsou prakticky zanedbatelné.

Následující tabulka shrnuje naměřené hodnoty elektrických veličin při nabíjení vozidla Škoda Citigo E.

Tab. 2: Naměřené hodnoty během nabíjení vozidla Škoda Citigo E

Měřená veličina	L1	L2	L3
\bar{U} [V]	224,4	226,2	229,7
I_{MAX} [A]	16,66	16,69	0
\bar{I} [A]	14,98	14,37	0
I_{MIN} [A]	0	0	0
$\cos \varphi$ PRŮMĚR	0,999	0,998	-
$THD_{I MAX}$ [%]	52,1	48,4	-
$THD_{I PRŮMĚR}$ [%]	1,3	1,2	-
$THD_{I MIN}$ [%]	1	0,9	-
f_{MAX} [Hz]	50,07		
\bar{f} [Hz]	50		
f_{MIN} [Hz]	49,92		
P_{MAX} [kW]	7,333		
\bar{P} [kW]	6,356		
P_{MIN} [kW]	0,263		
Q_{MAX} [kVar]	0,051		
\bar{Q} [kVar]	-0,189		
Q_{MIN} [kVar]	-0,840		
S_{MAX} [kVA]	7,335		
\bar{S} [kVA]	6,359		
S_{MIN} [kVA]	0		

Průměrná hodnota účinníku během nabíjení vozidla byla téměř rovna jedné. Ze sítě je odebírán téměř pouze činný výkon. V porovnání s vozem Hyundai KONA Electric dosahuje v absolutní hodnotě znatelně menšího jalového výkonu. Jeho hodnota je opět záporná, tedy s kapacitním charakterem.

Během nabíjení vozidla Škoda Citigo E je také citelně menší hodnota celkového harmonického zkreslení THD_A . Průměrně se během nabíjení pohybovala těsně nad 1 %.

Jelikož nabíjení vozidla probíhá nesymetricky pouze ze dvou fází, je v tabulce uveden nulový proud fází L3.

5.2 Měření pomocí analyzátoru kvality sítě SMY 134

V současné době jsou již na trhu k dispozici plnohodnotné kvalitoměry, elektrické energie s kompaktními rozměry. Příkladem takového zařízení je analyzátor kvality sítě SMY134U 230 X/5A AA E4, který je vyráběn firmou KMB Systems.

Jedná se o plnocenný síťový analyzátor, umožňující měření a zaznamenávání všech běžných parametrů – frekvenci, síťové a fázové napětí, proudy, energie, činné a jalové výkony, účinník a PF, nesymetrii a až 50 harmonických, stejně jako celkové harmonické zkreslení a v neposlední řadě měření reziduálního proudu. [13]



Obr. 24: Analyzátor SMY 134 KMB Systems [13]

SMY 134 dále disponuje dvěma vstupy pro měřicí transformátory reziduálních proudů. Komunikace a logování naměřených dat je možné pomocí konektoru RS 485, USB a Ethernet. [13]

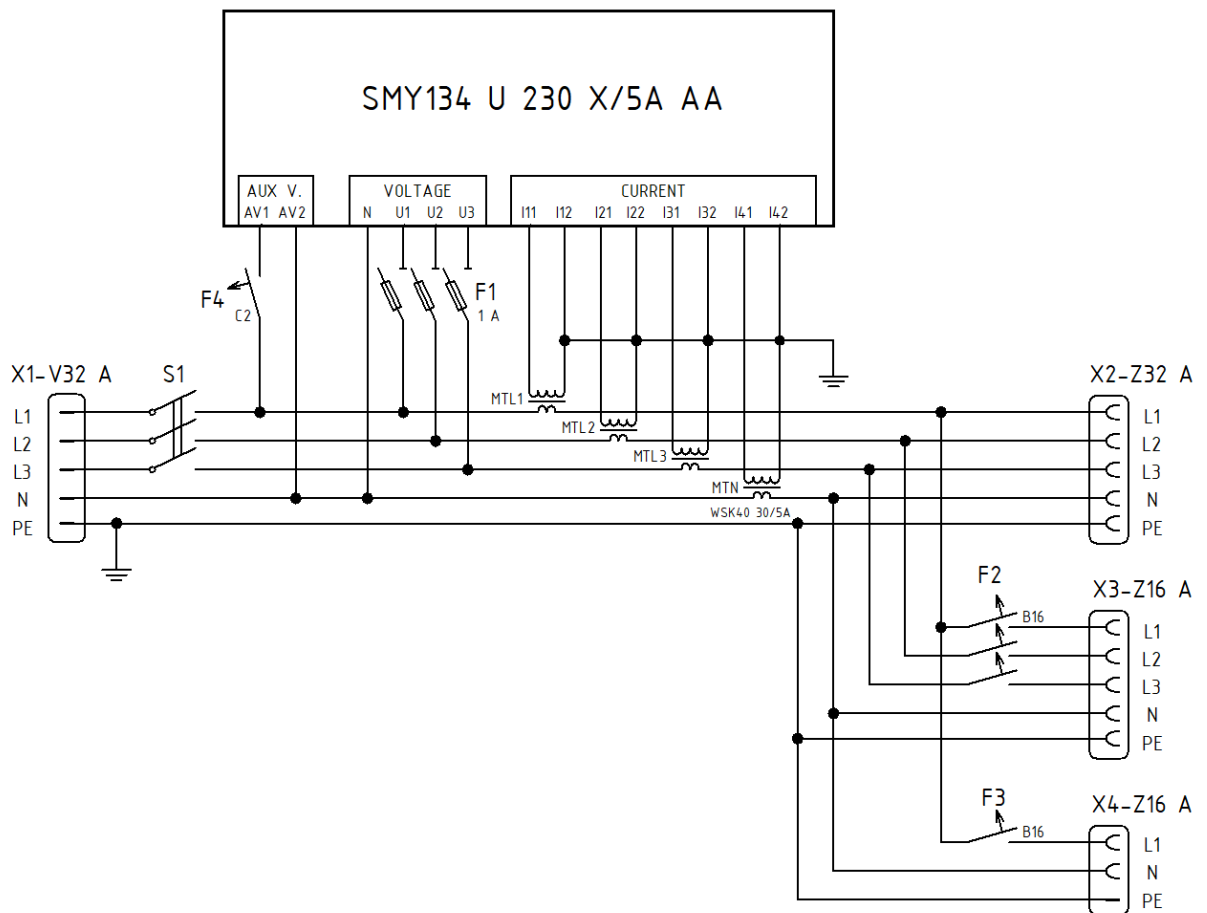
5.2.1 Schéma zapojení měřícího pracoviště

Schéma měřícího pracoviště vychází z katalogového zapojení SMY 134 doporučeného výrobcem. Je doplněno a uzpůsobeno pro uživatelské měření zpětných vlivů v síti TN-S do 32 A. Benefitem tohoto řešení je značná univerzálnost a umožnění analýzy sítě v rozličných aplikacích.

Na vstupu obvodu je umístěna 32A pětipólová přívodka X1, za níž následuje trojfázový vypínač, se stejným jmenovitým proudem, v montážním provedení na DIN lištu. Je umístěn uvnitř rozváděče, tudíž je provozně běžně nepřístupný. Na vnitřních komponentech rozváděče

umožňuje práci a údržbu bez napětí. Pro dálkové vypnutí vypínače by bylo možné použít externí proudovou spoušť, jež by byla ovládána STOP tlačítkem na vnější části rozváděče.

Analyzátor SMY 134 je napájen fázovým napětím z fáze L1 jištěn 2A jednopólovým jističem s charakteristikou C. Analyzátor ke své funkci informuje o aktuálních průbězích napětí a proudu. Napěťové vstupy jsou chráněny proti zkratu a přetížení pomocí trojfázového pojistkového odpínače s pojistkami s nominální hodnotou 1 A. Proudové vstupy analyzátoru jsou konstrukčně uzpůsobeny pro jmenovitý proud 5 A. Pro plné využití požadovaného proudového rozsahu 32 A je nezbytné použít měřicí transformátory proudu. Pro praktickou realizaci byly použity transformátory MBS WSK 40 s primárním proudem 30 A a sekundárním proudem 5 A, třída přesnosti 0,5.



Obr. 25: Schéma zapojení měřicího pracoviště se SMY 134

Měření proudu probíhá ve všech třech fázích. Je zajištěno měřicími proudovými transformátory MTL1, MTL2 a MTL3. Pro měření proudu středním vodičem, jehož hodnota je závislá především na míře symetrizace zátěže sítě, je určen transformátor MTN.

U měřících transformátorů proudu nízkého napětí do U_m 1,2 kV není zemnění sekundárních svorek povinné, ale pouze doporučené, pokud má transformátor na krytu velké kovové plochy, tj. neživé části. Použité transformátory MBS WSK 40 mají plastové krytí, nicméně z bezpečnostních důvodů, zejména s ohledem na riziko úrazu elektrickým proudem, je v tomto případě zemnění provedeno. V praxi se zemní standartně vždy svorka označená *S1*, dříve označovaná *k*, nicméně na základě manuálu výrobce analyzátoru SMY 134 je v tomto konkrétním případě uzemněna svorka *S2*, respektive *l*. [15]



Obr. 26: Měřící transformátor proudu MBS WSK 40 [15]

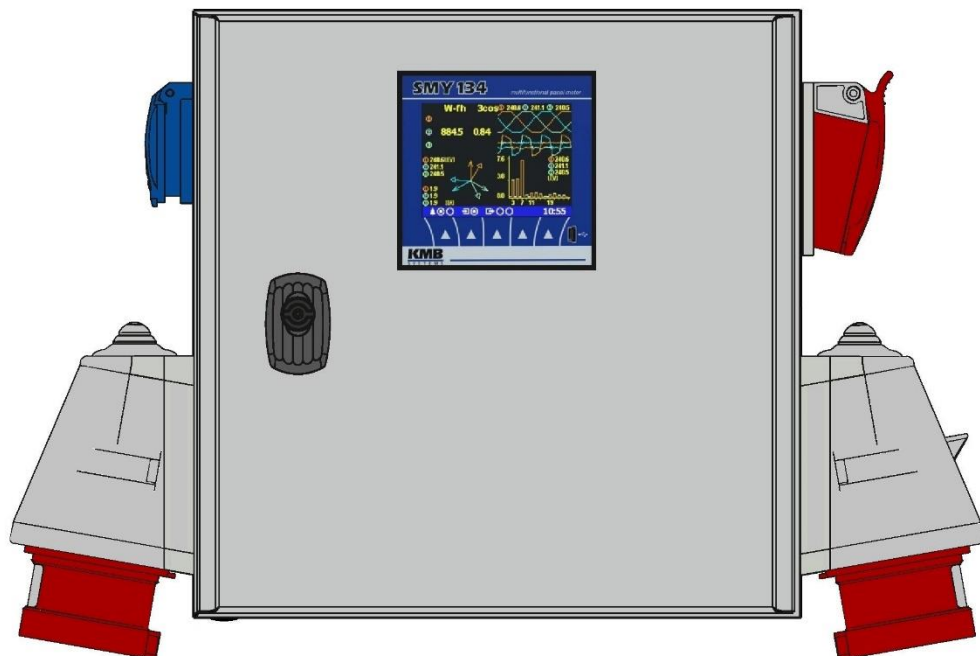
Za měřícími transformátory jsou situovány zásuvky. Kvůli zajištění selektivity jištění nemůže být trojfázová pětipólová 32A zásuvka X2 jištěna přímo v rozváděči, jelikož trojfázová přívodka má také nominální proud 32 A. Nadproudová ochrana této zásuvky je tedy fakticky suplována ochranným prvkem v místě připojení měřícího pracoviště do napájecí sítě. Daný místní ochranný prvek je tak společný pro celé měřící pracoviště.

Druhá trojfázová pětipólová zásuvka X3, s nominálním proudem 16 A, je již jištěna přímo v rozváděči. Toho je dosaženo trojfázovým jističem s patřičným jmenovitým proudem, s charakteristikou B. Napájení jednofázových zařízení je možné uskutečnit pomocí 16A zásuvky X4. Stejný jmenovitý proud má také předřazený jistič s charakteristikou B.

5.2.2 Mechanická konstrukce

Aby bylo umožněno měření zpětných vlivů nabíjení silničních vozidel i ve venkovním prostředí, jsou veškeré elektrické prvky a komponenty zapojení umístěny do univerzálního kovového rozváděče Spacial S3D, výrobce Schneider Electric. Ten disponuje krytím IP66 [16].

Na vnější straně rozváděčové skříně je na jejím levém boku umístěna trojfázová přívodka a jednofázová zásuvka. Na pravém boku se nachází trojfázové zásuvky se jmenovitým proudem 16 a 32 A. Veškeré komponenty jsou v provedení s odpovídajícím krytím pro venkovní prostředí, tedy minimálně IP44.



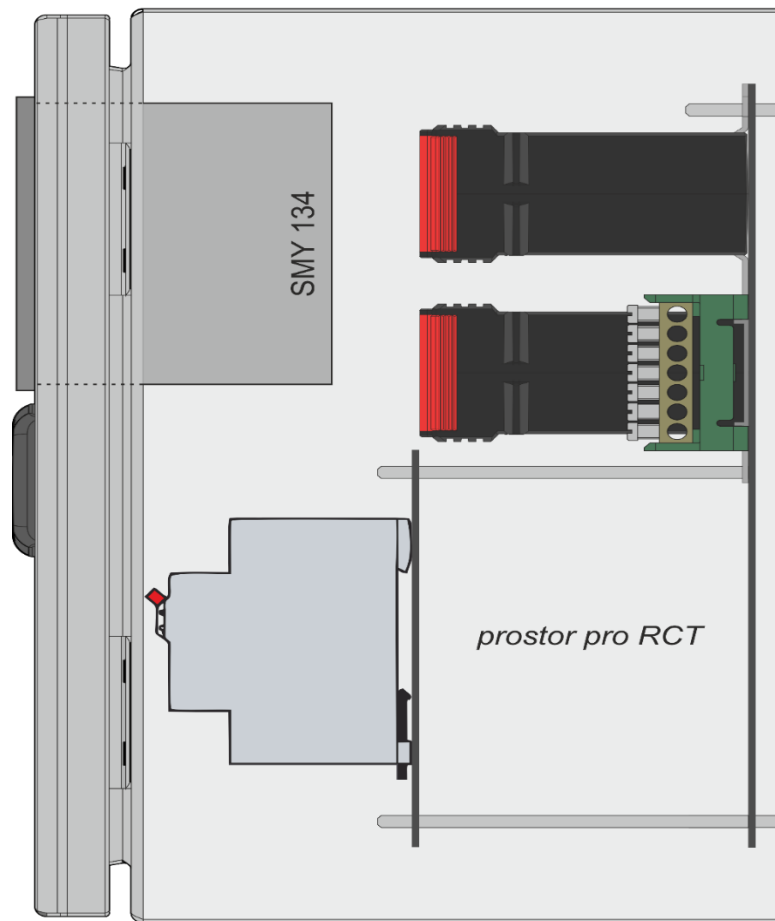
Obr. 27: Osazená vnější strana rozváděčové skříně

Ve dvířkách rozváděče je umístěn analyzátor SMY 134. Pro jeho přední panel je udáváno krytí pouze IP40. S krycím štítkem, jež je k analyzátoru dodáván jako příslušenství, pak IP54. [13]

Ve dvířkách rozváděče, v prostoru pod SMY 134, je dále počítáno s umístěním komunikačního ethernetového konektoru RJ45, švýcarského výrobce Harting, s krytím IP65. Tím by bylo umožněno měření a logování dat z analyzátoru bez nutnosti otevření dvířek rozváděče, jelikož komunikační Ethernetový konektor je umístěn na zadní straně analyzátoru.

Uvnitř rozváděče na montážní desce jsou umístěny zbylé elektrické přístroje, především vypínač, jističe, pojistkový odpojovač a měřicí transformátory. Veškeré jističe, třífázový pojistkový odpínač a 32A vypínač jsou v montážním provedení na DIN lištu. Ta je umístěna v dolní polovině montážní desky na vysazeném patře. Tímto konstrukčním řešením vznikne pod vysazeným patrem prostor pro případné budoucí rozšíření měřicího pracoviště o měřicí transformátory reziduálních proudů, tzv. RCT (residual current transformer). Pro vytvoření

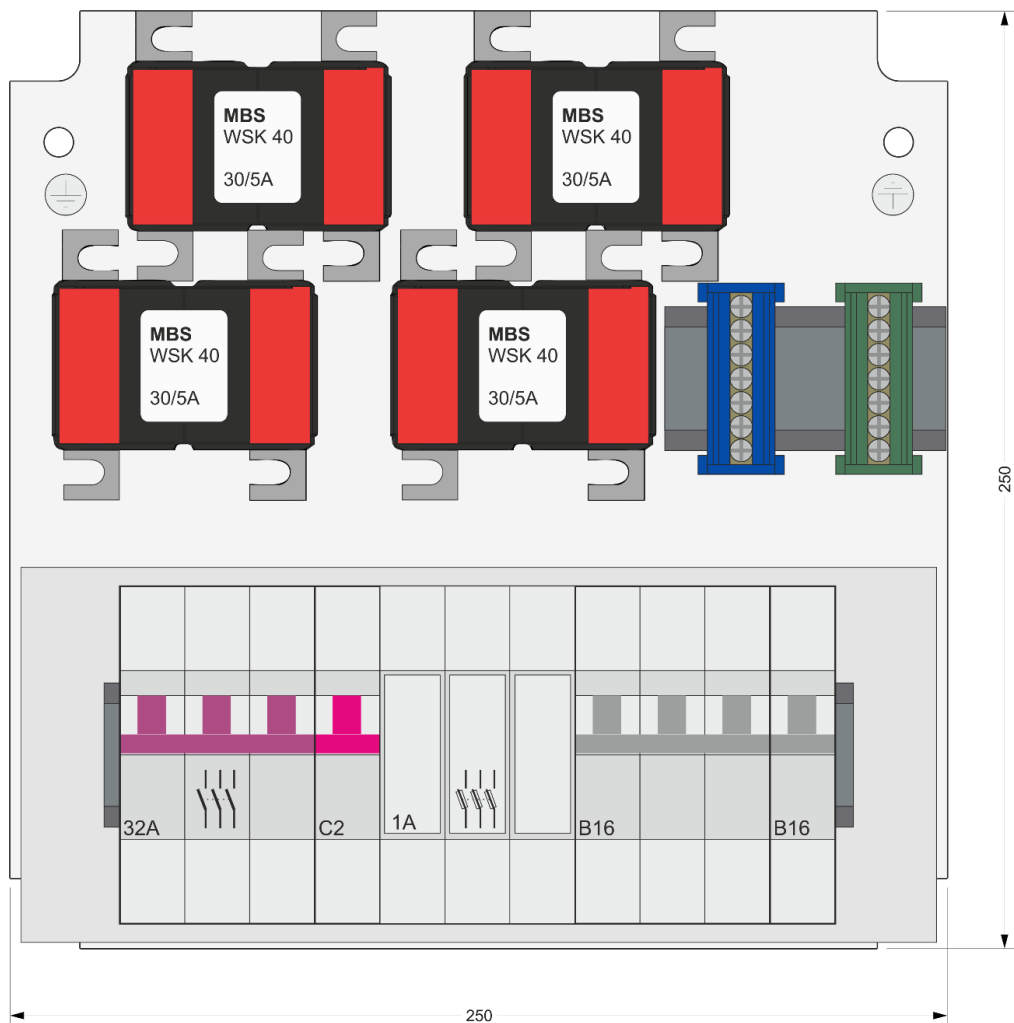
předsazeného patra byly použity mosazené distanční sloupky s délkou 75 mm. Veškeré neživé části konstrukce jsou propojeny s ochranným PE vodičem.



Obr. 28: Orientační nákres příčného řezu rozváděče

Pro případné rozšíření měřicího pracoviště o měření reziduálních proudů je nezbytné použít dva specifické RCT transformátory. Ty většinou, z konstrukčního hlediska, bývají v průvlečném provedení. Mají tedy de facto jen sekundární vinutí, primární vinutí představuje měřený vodič, provléknutý daným otvorem v RCT. Při měření reziduálních proudů prochází prvním RCT transformátorem veškeré pracovní vodiče, tedy všechny fázové vodiče a střední vodič. Druhým RCT transformátorem prochází pouze ochranný vodič. Na základě naměřených hodnot z RCT je v analyzátoru SMY 134 vyhodnocena velikost reziduálního proudu. Výrobce analyzátoru SMY 134 jsou doporučeny, a rozměrově vyhovují, například transformátory řady RCT MBS DACT. [13]

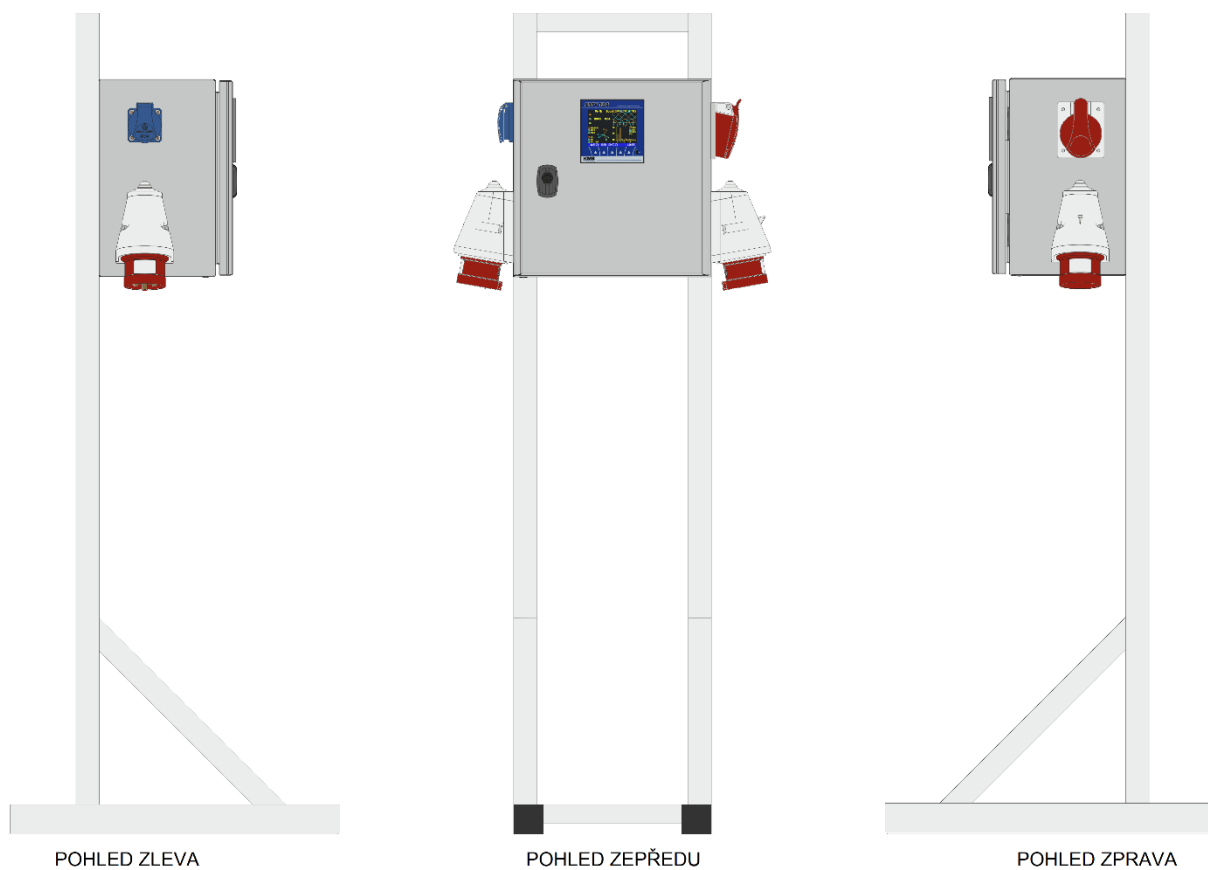
Pro měření fázových proudů a proudu středním vodičem jsou v horní polovině montážní desky situovány čtyři proudové měřicí transformátory. V jejich těsné blízkosti jsou také umístěny na DIN liště zemnicí PE můstek a rozbočovací N můstek.



Obr. 29: Rozmístění el. přístrojů na montážní desce rozváděče

Rozváděčová skříň je pro snazší přepravu, uživatelský přístup a obsluhu během měření připevněna na stojanu. Ten je svařen z uzavřených ocelových čtvercových profilů s rozměry 35x35x2 milimetrů a 45x45x3 milimetrů. Pro lepší manipulaci s celou sestavou jsou v horní a dolní části stojanu vloženy ocelové kulaté profily o průměru 28 milimetrů. Povrchová antikoroziční úprava je provedena nátěrem.

Orientační vizualizaci sestavy stojanu a měřicího rozváděče zobrazuje následující obrázek. Technický, okótovaný výkres stojanu je jednou z příloh této diplomové práce. Konstrukce vykazuje dobré vlastnosti po stránce odolnosti a stability.



Obr. 30: Kompletní sestava měřicího rozváděče a stojanu



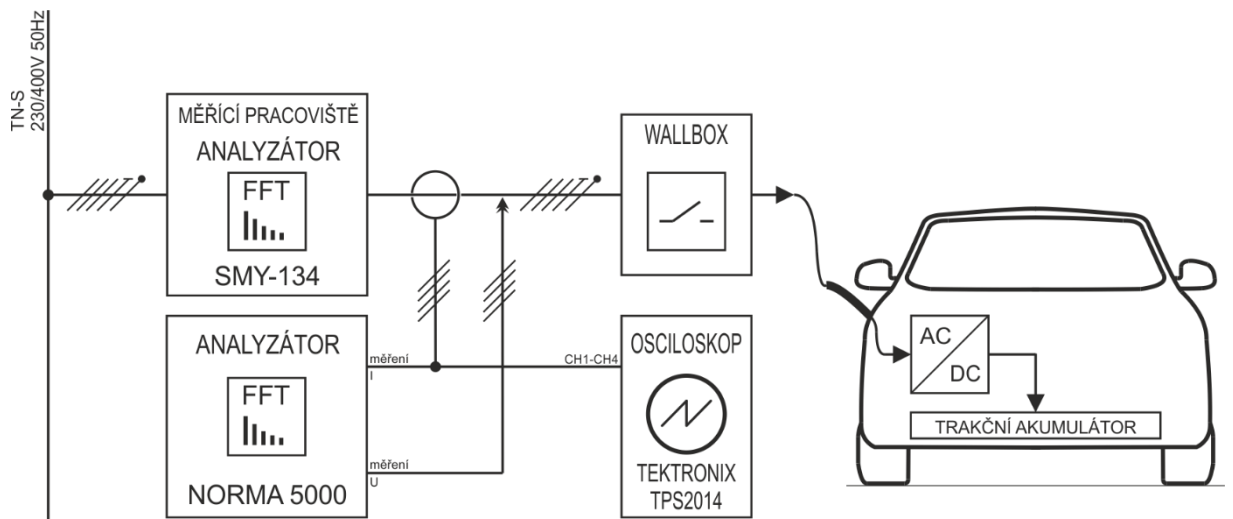
Obr. 31: Fotografie zapojeného rozváděče vzniklého měřicího pracoviště zpětných vlivů

5.2.3 Nabíjení vozidla Volkswagen e-Golf

Vůz e-Golf je druhým velkosériově vyráběným elektromobilem značky Volkswagen, který vychází z klasického s Golfu sedmé generace. Karoserie a interiéry obou vozů jsou prakticky totožné. [18]

K vyšetření zpětných vlivů během nabíjení vozu bylo použito měřicí pracoviště s analyzátelem SMY 134, jehož konstrukce a zapojení bylo jednou z náplní předchozích stránek.

Do trojfázové 32A zásuvky, již měřicí pracoviště disponuje, byl pro účely nabíjení připojen wallbox. Z něj bylo posléze vozidlo nabíjeno. Vůz Volkswagen e-Golf disponuje třemi možnými nabíjecími režimy s danými nabíjecími výkony. Wallbox, jež byl pro měření v rámci této diplomové práce použit, omezuje nabíjecí proud na přibližně 10 A. Z tohoto důvodu bylo provedeno měření pouze při nabíjení vozidla v režimu s minimálním výkonem a následně v režimu s maximálním výkonem, omezeným wallboxem.

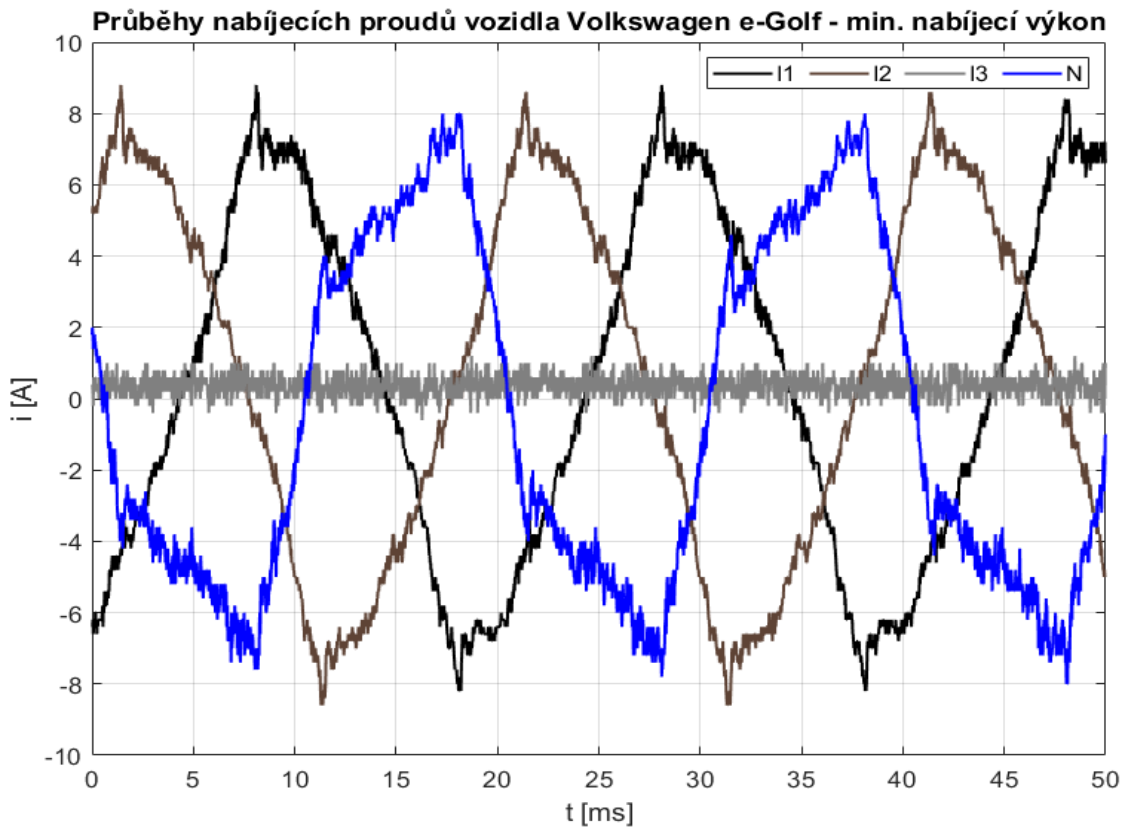


Obr. 32: Měření zpětných vlivů s analyzátelem SMY 134 a Fluke NORMA 5000

5.2.3.1 Režim minimálního nabíjecího výkonu

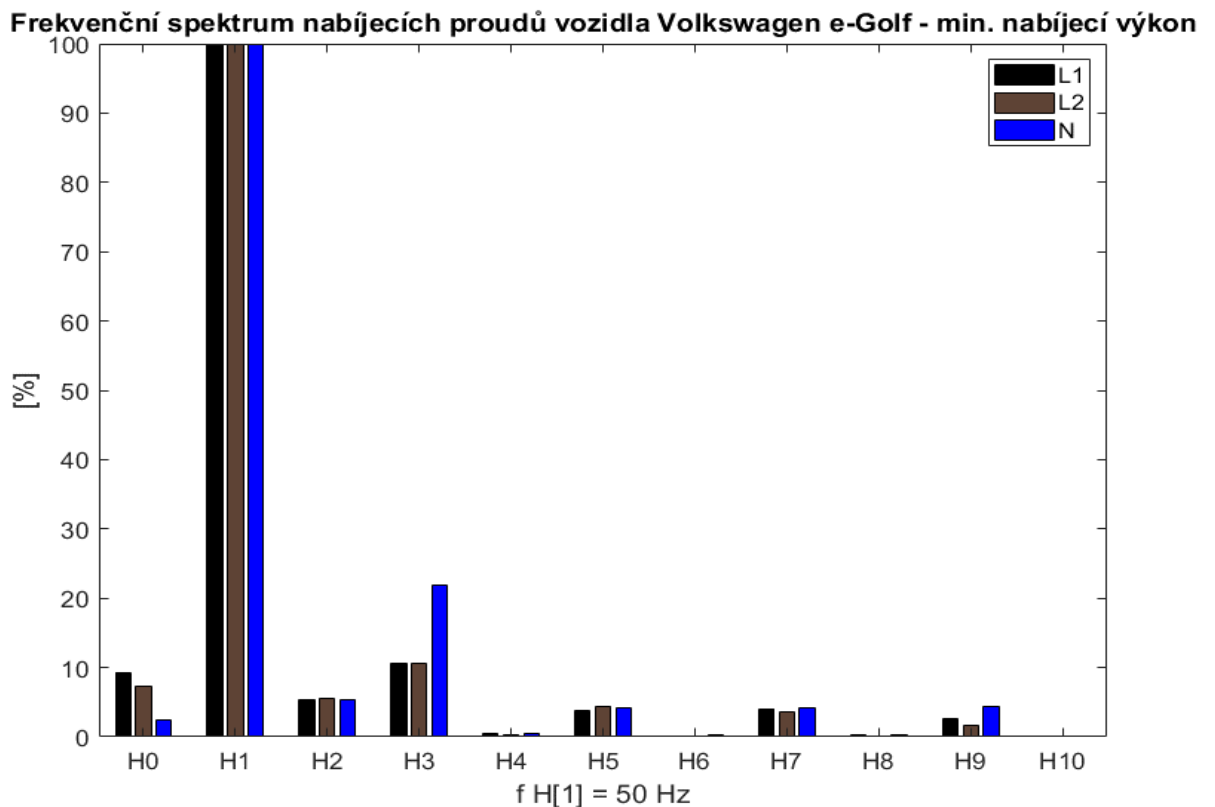
Pro první měření byl v palubním uživatelském rozhraní vozidla zvolen režim minimálního nabíjecího výkonu. Naměřené průběhy nabíjecího proudu ve všech fázích a středním vodiči zachycuje obrázek 33.

Je zřejmé, že se jedná, stejně jako v případě nabíjení vozu Škoda Citigo E, o nesymetrickou zátěž sítě. Zatěžovány jsou nesymetricky pouze fáze L1 a L2. Je patrný značný a zkreslený proud středním vodičem.



Obr. 33: Průběhy nabíjecích proudů vozidla Volkswagen e-Golf – min. nabíjecí výkon

Frekvenční spektrum nabíjecího proudu vozidla zachycuje obrázek 34.



Obr. 34: Frekvenční spektrum nabíjecích proudů vozidla Volkswagen e-Golf

1. harmonická fázových proudů je referenční, s hodnotou 100 %. Stejně jako u předchozích měření, i v tomto případě odpovídá jmenovité frekvenci napájecí sítě, tedy 50 Hz. V porovnání s vozem Škoda Citigo E, který také působí během nabíjení na síť jako nesymetrická zátěž, je obsah vyšších harmonických ve frekvenčním spektru nabíjecího proudu vozu Volkswagen e-Golf vyšší. Nejvyššího procentuálního zastoupení vyšších harmonických zde dosahuje především 3. harmonická ve obou fázích a středním vodiči.

Následující tabulka shrnuje naměřené hodnoty elektrických veličin při nabíjení vozidla Volkswagen e-Golf. V posledním sloupečku je uvedena relativní chyba. Ta je vyčíslena jako relativní chyba, tedy rozdíl hodnoty změřené analyzátozem SMY 134 a analyzátozem Fluke NORMA 5000, vztažená na hodnotu změřenou analyzátozem Fluke Norma 5000. Ten je, s ohledem na přesnost měření udávanou výrobcem přístroje, považován za referenční.

$$\delta_{X\%} = \frac{X_{SMY} - X_{NORMA}}{X_{NORMA}} [\%] \quad (13)$$

kde: $\delta_{X\%}$ relativní chyba [%],
 X_{SMY} hodnota veličiny změřená analyzátozem SMY 134,
 X_{NORMA} hodnota veličiny změřená analyzátozem Fluke NORMA 5000

Porovnání přesnosti výsledků obou navržených metodik, aplikované na měření zpětných vlivů rozličných zátěží na napájecí síť, je věnována samostatná, šestá kapitola této diplomové práce. Následující tabulka shrnuje naměřené hodnoty během nabíjení vozidla Volkswagen e-Golf v režimu minimálního nabíjecího výkonu.

Tab. 3: Naměřené hodnoty během nabíjení vozidla Volkswagen e-Golf – min. nabíjecí výkon

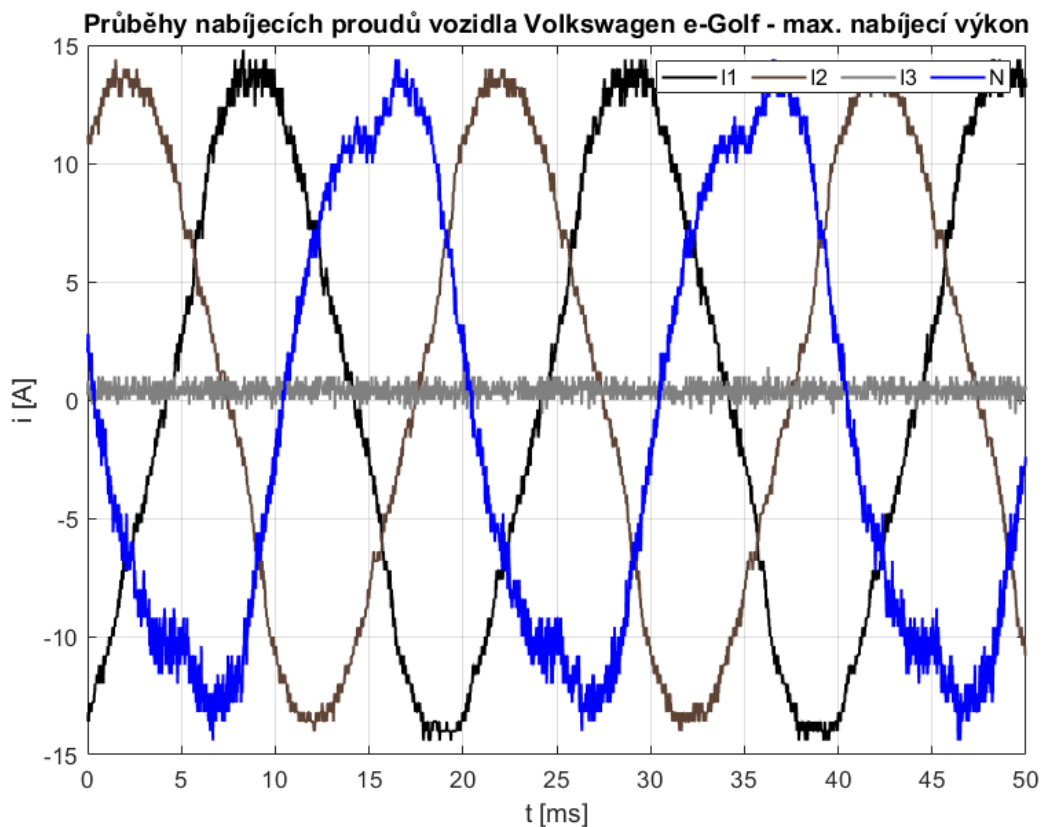
Měřená veličina	Fluke NORMA 5000				KMB SMY 134				δ_{AVG} [%]
	L1	L2	L3	AVG	L1	L2	L3	AVG	
U_f [V]	225,3	225,9	228,2	226,5	226,6	226,8	228,8	227,4	0,41
I_f [A]	4,875	4,835	0,199	3,30	4,78	4,76	0,04	3,18	-3,92
P_{3f} [kW]	2,136				2,108				-1,33
S_{3f} [kVA]	2,236				2,161				-3,47
Q_{3f} [kVar]	-0,512				-0,484				-5,79
PF_{3f} [-]	0,9558				0,976				2,07
f [Hz]	49,97				50,01				0,08

Z tabulky naměřených hodnot lze vyčíst, že největší relativní chyba se projevila u hodnot jalového výkonu. Konkrétně je absolutní hodnota relativní chyby 5,79 %.

5.2.3.2 Režim maximálního nabíjecího výkonu

V druhé části měření na vozidle Volkswagen e-Golf byl v palubním uživatelském rozhraní zvolen režim nabíjení s maximálním nabíjecím výkonem. V tomto režimu může probíhat nabíjení vozidla Volkswagen e-Golf proudem až 32 A. Nicméně nabíjecí výkon je limitován vlastnostmi použitého wallboxu na přibližně 10 A.

Naměřené průběhy nabíjecího proudu ve všech fázích a středním vodiči zobrazuje následující obrázek.

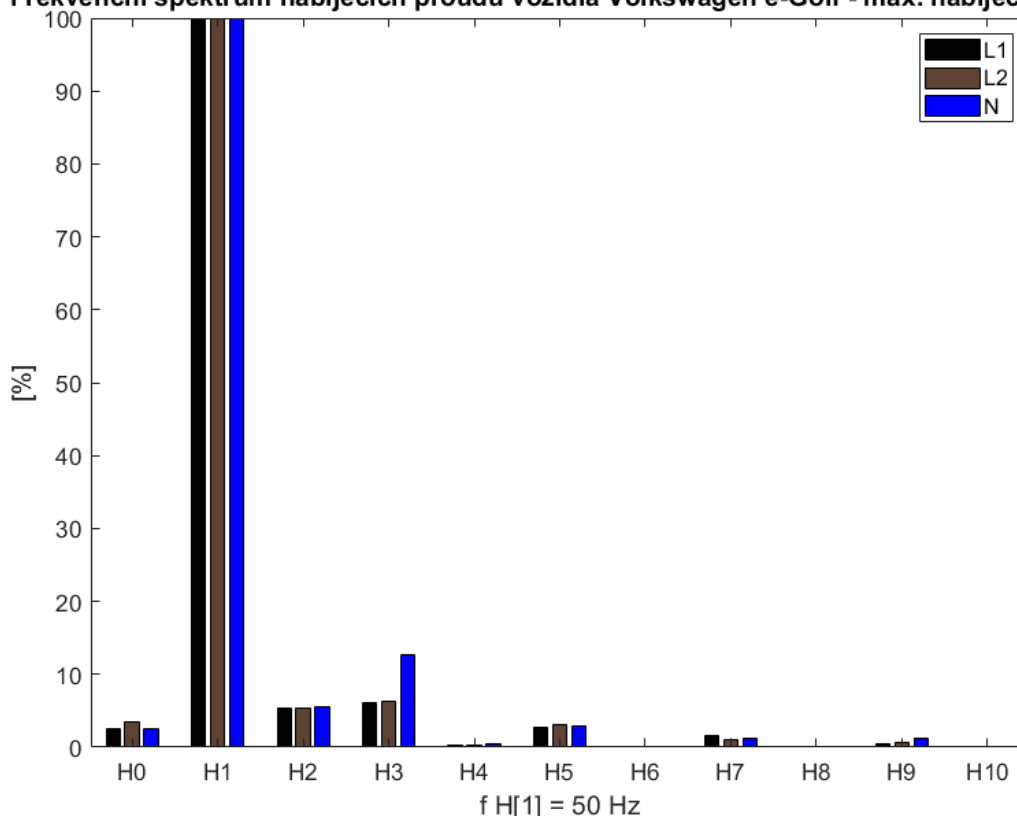


Obr. 35: Průběhy nabíjecích proudů vozidla Volkswagen e-Golf – max. nabíjecí výkon

Zobrazené průběhy fázových proudů mají, v porovnání s nabíjením vozidla v režimu s minimálním nabíjecím výkonem, relativně sinusový průběh. Nabíjení vozidla i nyní probíhá nesymetricky, pouze za pomoci dvou fází. To má za následek značný proud středním vodičem.

Obrázek 36 zachycuje frekvenční spektrum nabíjecího proudu vozidla v režimu nabíjení s maximálním nabíjecím výkonem.

Frekvenční spektrum nabíjecích proudů vozidla Volkswagen e-Golf - max. nabíjecí výkon



Obr. 36: Frekvenční spektrum nabíjecích proudů vozidla Volkswagen e-Golf

V porovnání s frekvenčním spektrem nabíjecího proudu vozidla Volkswagen e-Golf, nabíjeného v režimu s minimálním nabíjecím výkonem, je frekvenční spektrum při nabíjení vyšším nabíjecím proudem citelně nižší procentuální zastoupení vyšších harmonických. Dominantní zůstává 3. harmonická, pohybuje se ve všech fázích do 10 %. naměřené hodnoty jsou shrnuty v následující tabulce:

Tab. 4: Naměřené hodnoty během nabíjení vozidla Volkswagen e-Golf – max. nabíjecí výkon

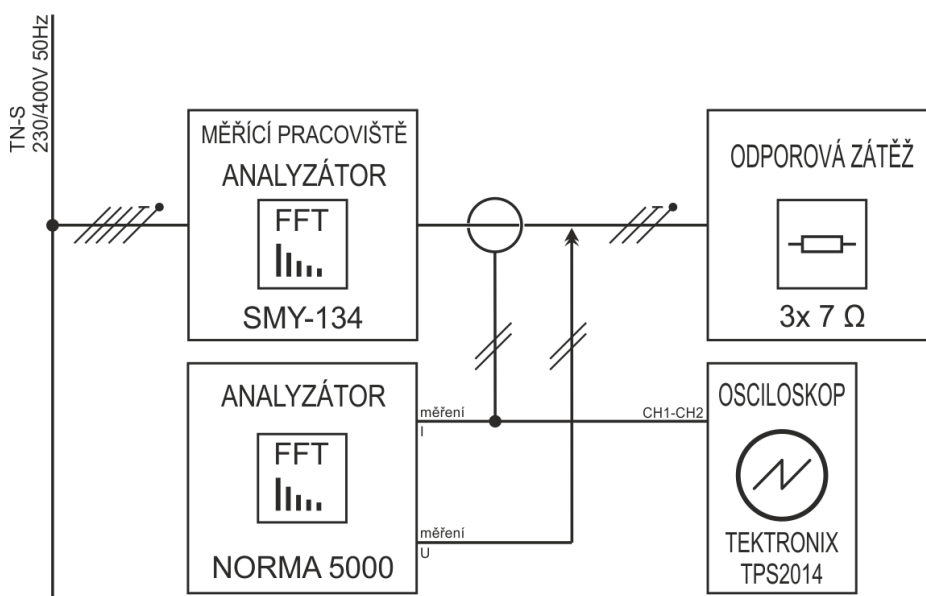
Měřená veličina	Fluke NORMA 5000				KMB SMY 134				δ_{AVG} [%]
	L1	L2	L3	AVG	L1	L2	L3	AVG	
U_f [V]	224,9	225,2	229,1	226,4	225,3	225,4	228,8	226,5	0,07
I_f [A]	9,82	9,77	0,22	6,61	9,68	9,68	0,02	6,45	-2,36
P_{3f} [kW]	4.33				4.33				0,00
S_{3f} [kVA]	4.422				4.366				-1,28
Q_{3f} [kVar]	-0.583				-0.533				-9,38
PF_{3f} [-]	0.9795				0.992				1,26
f [Hz]	50				50				0,00

6 SROVNÁNÍ KVALITATIVNÍCH VLASTNOSTÍ ANALYZÁTORŮ

Za účelem komparace naměřených hodnot a kvalitativních vlastností pomocí obou navržených měřících metod zpětných vlivů nabíjení elektrických silničních vozidel na napájecí síť bylo také v rámci této diplomové práce realizováno měření na jednofázové odporové zátěži a několika konkrétních průmyslových měničích. Konkrétně měření probíhalo na jednofázovém tyristorovém regulátoru výkonu a třífázovém frekvenčním měniči, kterým byl řízen asynchronní motor.

6.1 Jednofázová odporová zátěž

V rámci prvního komparativního měření byl jako jednofázová zátěž zvolen výkonový odporník, připojený přes měřící pracoviště, přímo do napájecí sítě. U tohoto typu zátěže se dá předpokládat jen minimální zpětné vlivy na napájecí síť, způsobené především indukčností, danou konstrukcí výkonového odporníku. Ten obsahuje tři sekce se jmenovitou hodnotou odporu 7Ω . Pro účely měření byly propojeny do série. Jmenovité trvalé zatížení sériové kombinace je 11,7 A.

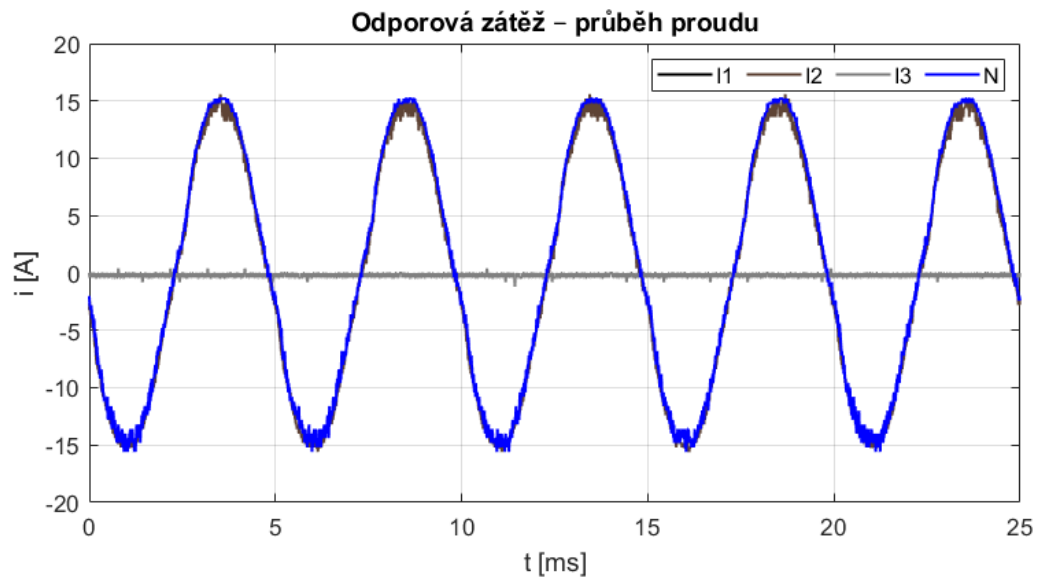


Obr. 37: Zapojení měřícího pracoviště jednofázové odporové zátěže

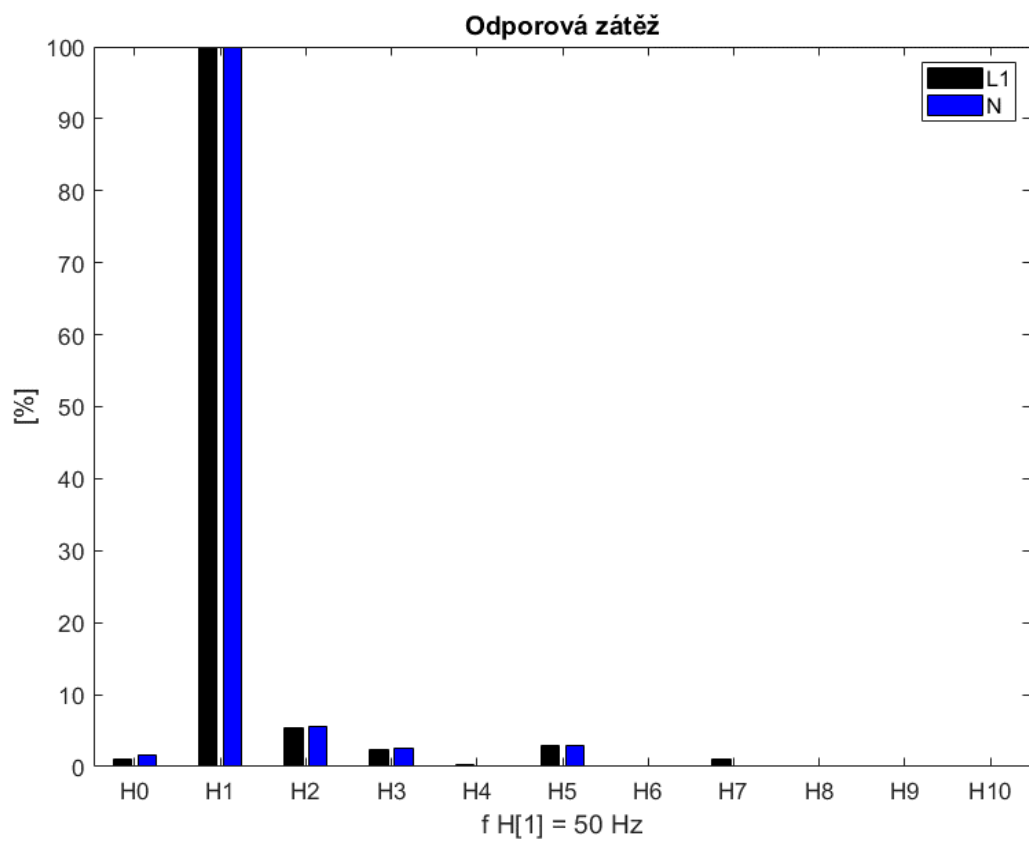
Do třífázové 32A přívodky dříve popsaného měřícího pracoviště s analyzátozem SMY 134, umístěného v rozváděči, je přivedeno síťové napětí. To je dále přivedeno přímo na výkonový odporník.

6.1.1 Naměřené hodnoty

Z časového průběhu na obrázku 38 je patrný prakticky nezkreslený průběh proudu, což podporuje i následná harmonická analýza.



Obr. 38: Odporová zátěž – průběh proudu



Obr. 39: Odporová zátěž – frekvenční spektrum proudu

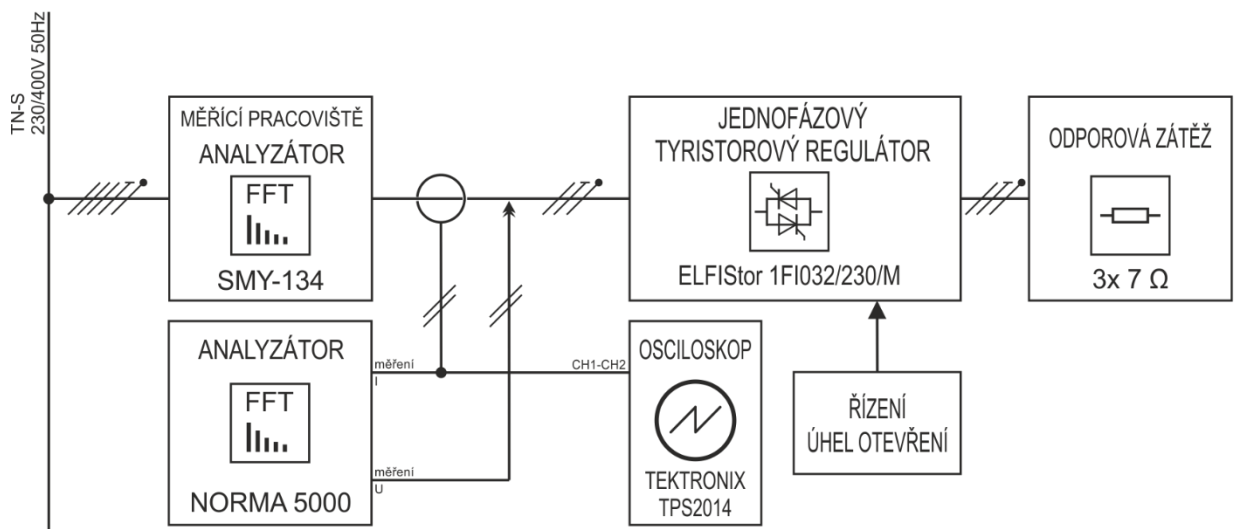
Následující tabulka shrnuje a porovnává naměřené hodnoty elektrických veličin pomocí analyzátoru SMY 134 a NORMA 5000. V posledním sloupci je uvedena relativní chyba naměřených hodnot, vztažená na hodnoty naměřené analyzátozem Fluke NORMA 5000.

Tab. 5: Naměřené hodnoty na jednofázové odporové zátěži

Měřená veličina	Fluke NORMA 5000	KMB SMY 134	δ [%]
U_f [V]	225.9	226.2	0.13
I_f [A]	10.57	10.47	-0.96
P [kW]	2.382	2.365	-0.72
S [kVA]	2.39	2.369	-0.89
Q [kVar]	0.15	0.14	-7.14
PF [-]	0.998	0.999	0.10
f [Hz]	50.008	49.99	-0.04

6.2 Jednofázový tyristorový regulátor

Pro simulaci vlivů jednofázového spotřebiče, s nesinusovým odebíraným proudem, na napájecí síť byl, v rámci tohoto měření, použit tyristorový regulátor výrobce ELFISor. Pro demonstrační účely vlivu vyšších harmonických byl regulátor provozován bez externího filtru. Schéma zapojení celého měřicího pracoviště zachycuje obrázek 40.



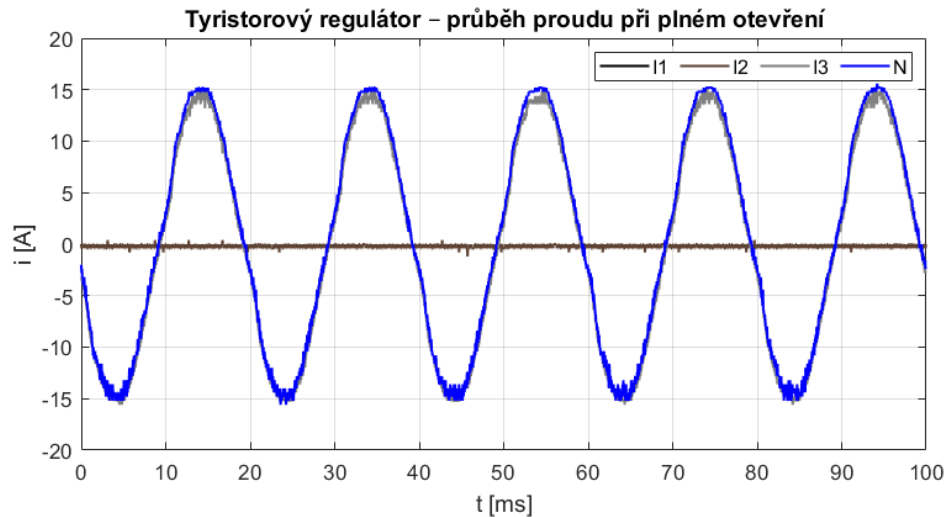
Obr. 40: Zapojení měřicího pracoviště jednofázového tyristorového regulátoru

Do třífázové 32A přívodky dříve popsaného měřicího pracoviště s analyzátozem SMY 134, umístěného v rozváděči, je opět přivedeno síťové napětí. To je dále přivedeno na svorky jednofázového tyristorového regulátoru. Na jeho výstup je připojen výkonový odporník.

Sítový analyzátor firmy Fluke – NORMA 5000, využívá pro měření proudu dvou měřících proudových sond, umístěných ve fázi L3 a v nulovém vodiči. Měření napětí probíhá přímo, jeho přivedením na vstupy analyzátoru.

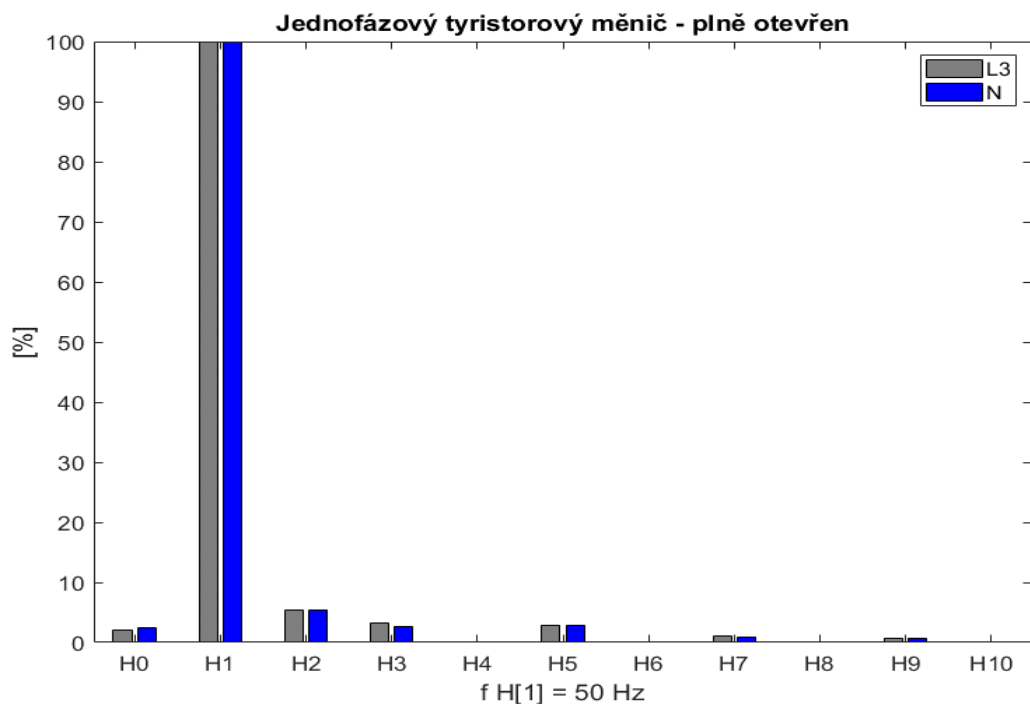
6.2.1 Naměřené hodnoty – regulátor plně otevřen

Tyristorový regulátor je plně otevřen, jeho vliv na průběh obvodových veličin je minimální, až zanedbatelný. Průběh proudu je takřka čistě sinusový, odpovídá odporové zátěži.



Obr. 41: Tyristorový regulátor – průběh proudu při plném otevření

S ohledem na sinusový průběh proudu je podíl vyšších harmonických v proudovém spektru značně eliminovaný, jak je patrné z následujícího obrázku.



Obr. 42: Tyristorový regulátor – frekvenční spektrum při plném otevření

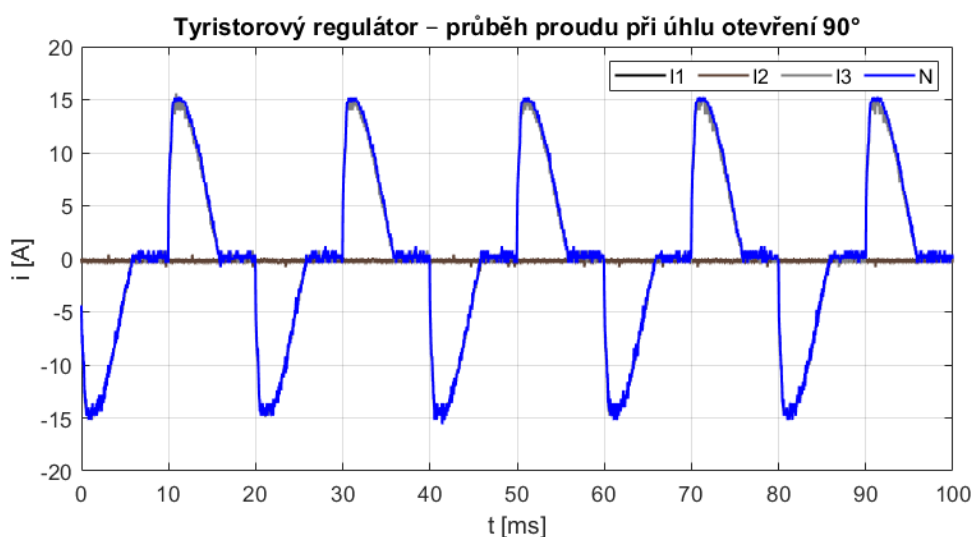
Podíl všech vyšších harmonických je výrazně nižší než 10 %. Následující tabulka shrnuje a porovnává naměřené hodnoty elektrických veličin pomocí analyzátoru SMY 134 a Fluke NORMA 5000. V posledním sloupci je uvedena relativní chyba naměřených hodnot, vztažená na hodnoty naměřené analyzátozem Fluke NORMA 5000.

Tab. 6: Naměřené hodnoty na tyristorovém regulátoru – při plném otevření

Měřená veličina	Fluke NORMA 5000	KMB SMY 134	δ [%]
U_f [V]	224.76	225.6	0.37
I_f [A]	10.66	10.44	-2.11
P [kW]	2.392	2.344	-2.05
S [kVA]	2.4	2.351	-2.08
Q [kVar]	0.14	0.13	-7,69
PF [-]	0.9982	0.998	-0.02
f [Hz]	50.003	50.01	0.01

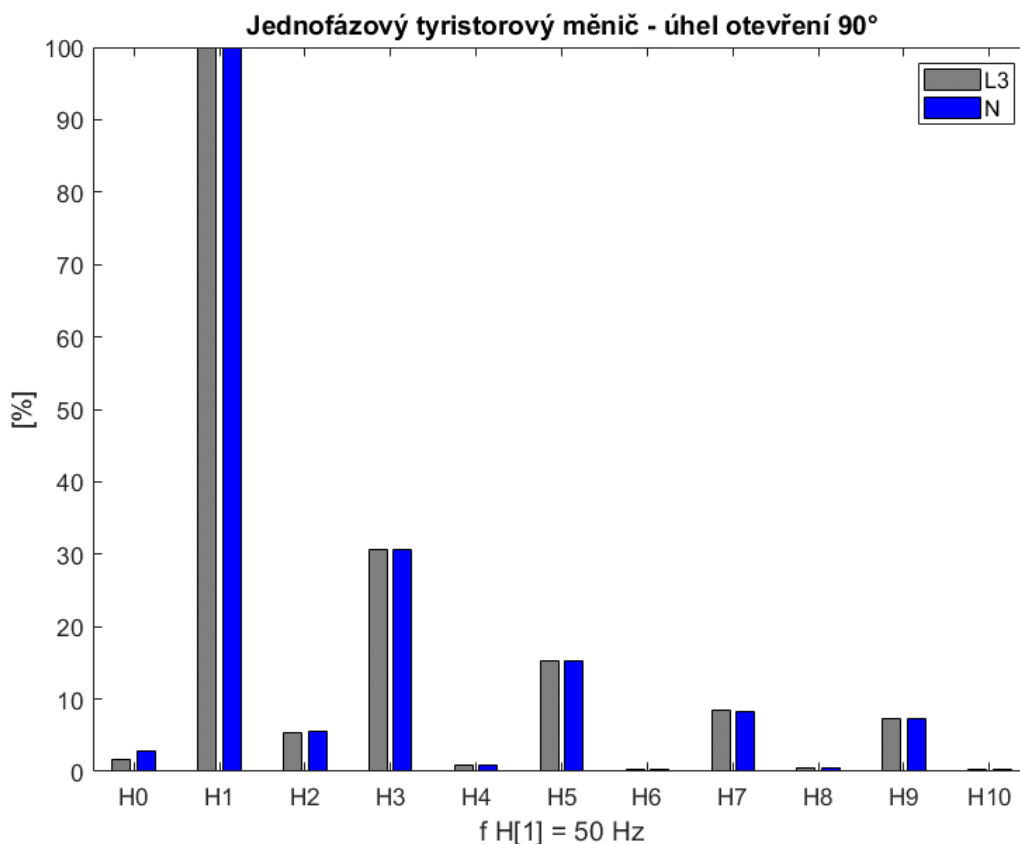
6.2.2 Naměřené hodnoty – řídicí úhel přibližně 90°

V tomto případě byl tyristorový regulátor otevřen částečně, s řídicím úhlem přibližně 90°. Průběh proudu je vlivem činnosti regulátoru značně deformovaný.



Obr. 43: Tyristorový regulátor – průběh proudu při úhlu otevření zhruba 90°

V proudovém spektru je již znatelný obsah vyšších harmonických. Výrazné jsou veškeré liché harmonické. Jejich podíl s rostoucím řádem, dle amplitudového zákona, klesá.



Obr. 44: Tyristorový regulátor – frekvenční spektrum při zhruba polovičním otevření

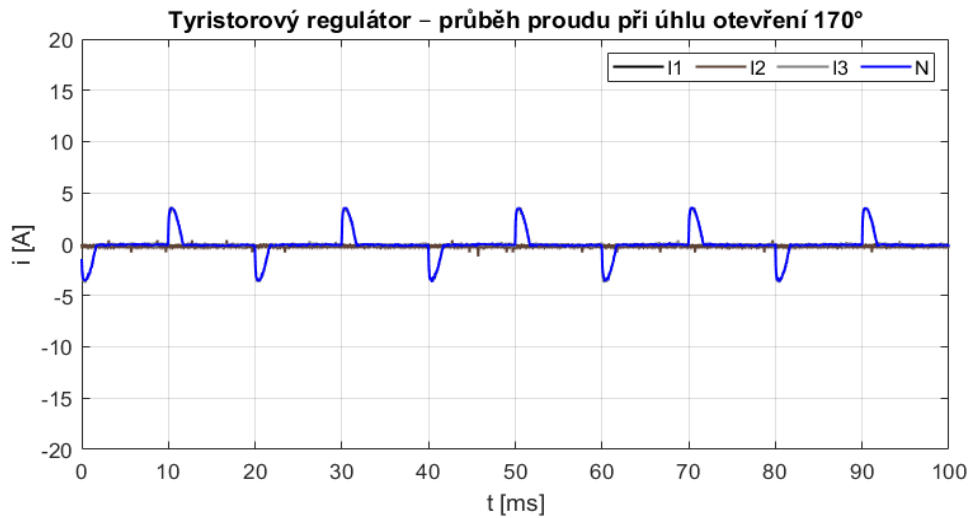
Následující tabulka opět shrnuje a porovnává naměřené hodnoty elektrických veličin pomocí analyzátoru SMY 134 a NORMA 5000. V posledním sloupci je uvedena relativní chyba naměřených hodnot, vztažená na hodnoty naměřené analyzátozem Fluke NORMA 5000.

Tab. 7: Naměřené hodnoty na tyristorovém regulátoru – při zhruba polovičním otevření

Měřená veličina	Fluke NORMA 5000	KMB SMY 134	δ [%]
U_f [V]	225,12	226,2	0,48
I_f [A]	8,27	8,134	-1,67
P [kW]	1,463	1,454	-0,62
S [kVA]	1,86	1,841	-1,03
Q [kVar]	0,755	0,744	-1,48
PF [-]	0,7859	0,791	0,64
f [Hz]	49,971	50,02	0,10

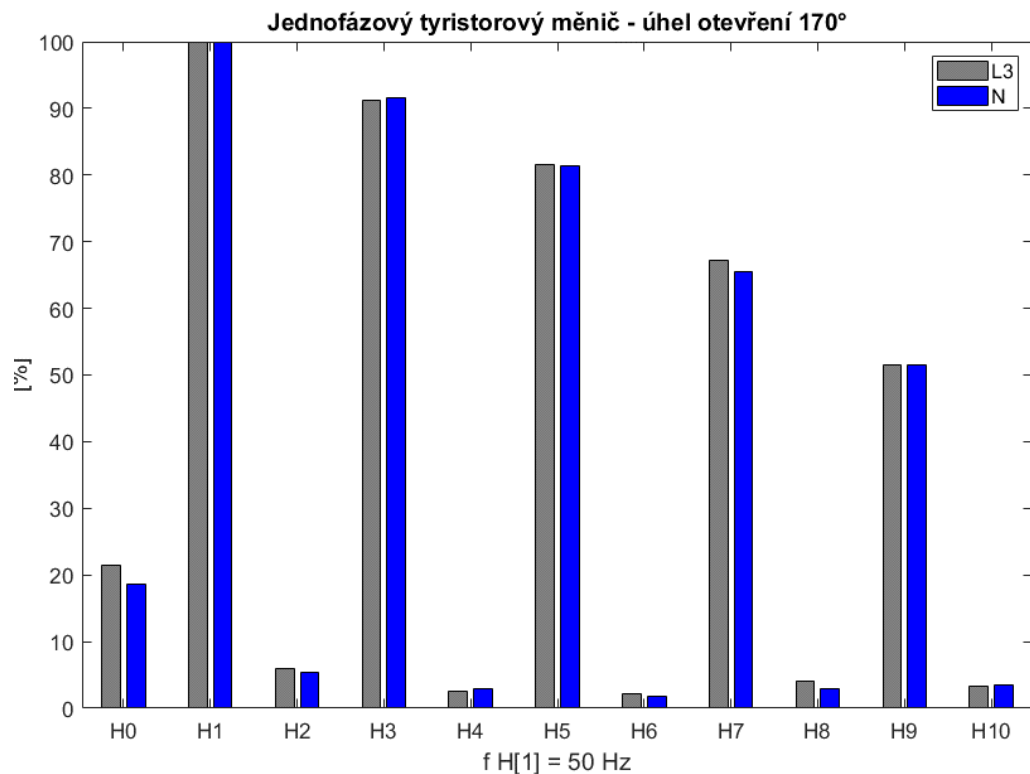
6.2.3 Naměřené hodnoty – řídicí úhel přibližně 170°

V tomto případě je tyristorový regulátor téměř uzavřený, proud je silně neharmonický a deformovaný.



Obr. 45: Tyristorový regulátor – průběh proudu při úhlu otevření přibližně 170°

V proudovém spektru jsou zcela dominantní liché vyšší harmonické. Je zde patrný i určitý podíl sudých vyšších harmonických, především 2. a 4. Výrazná je i stejnosměrná složka, respektive 0. harmonická.



Obr. 46: Tyristorový regulátor – frekvenční spektrum proudu při úhlu otevření přibližně 170°

Následující tabulka opět shrnuje a porovnává naměřené hodnoty elektrických veličin pomocí analyzátoru SMY 134 a NORMA 5000.

Tab. 8: Naměřené hodnoty na tyristorovém regulátoru – při úhlu otevření přibližně 170°

Měřená veličina	Fluke NORMA 5000	KMB SMY 134	δ [%]
U_f [V]	227,92	227,9	-0.01
I_f [A]	1,063	1,056	-0.66
P [W]	34,3	37,91	9.52
S [kVA]	0,2424	0,241	-0.58
Q [kVar]	0,2399	0,22	-9.05
PF [-]	0,1415	0,157	9.87
f [Hz]	50	50,01	0.02

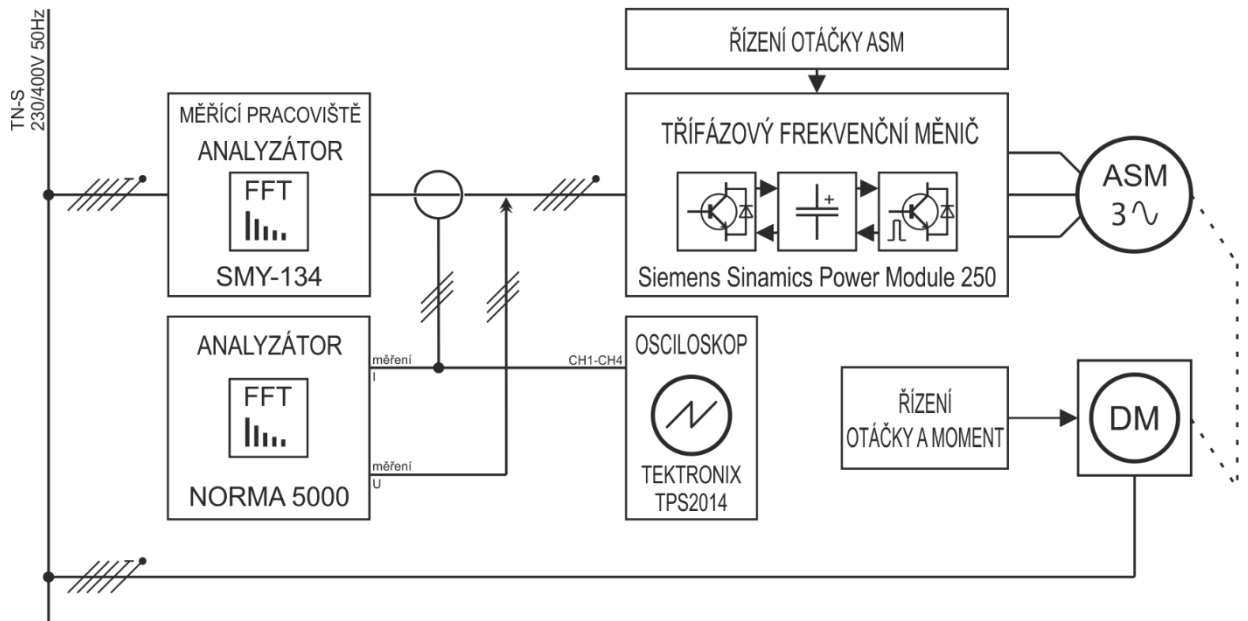
V porovnání s naměřenými hodnotami při vyšším proudu je zde patrná větší relativní chyba, především u hodnot činného a jalového výkonu, který oba analyzátory dopočítávají mimo jiné z naměřených hodnot napětí a proudu. Zde se již patrně více projevuje přesnost jednotlivých měřících proudových čidel, respektive transformátorů.

6.3 Třífázový frekvenční měnič s pulzním usměrňovačem

Druhým měničem, jenž byl pro ověření vlastností analyzátorů při měření zpětných vlivů použit, je frekvenční měnič Siemens Sinamics Power Module 250. Jedná se o trojfázový průmyslový frekvenční měnič, který disponuje na vstupu pulzním usměrňovačem. Umožňuje tedy rekuperaci energie vzniklé během brzdění motoru.

Obrázek 47 znázorňuje schéma zapojení kompletního měřícího pracoviště. Třífázový frekvenční měnič je napájen přes měřící pracoviště s analyzátozem SMY 134 a analyzátozem Fluke NORMA 5000. Na výstupu frekvenčního měniče je připojen asynchronní motor s kotvou nakrátko, se statorovým vinutím zapojeným do trojúhelníka. Motor disponuje cizím externím chlazením. Na hřídeli motoru je upevněn dynamometr, který umožňuje volbu zatěžovacího momentu.

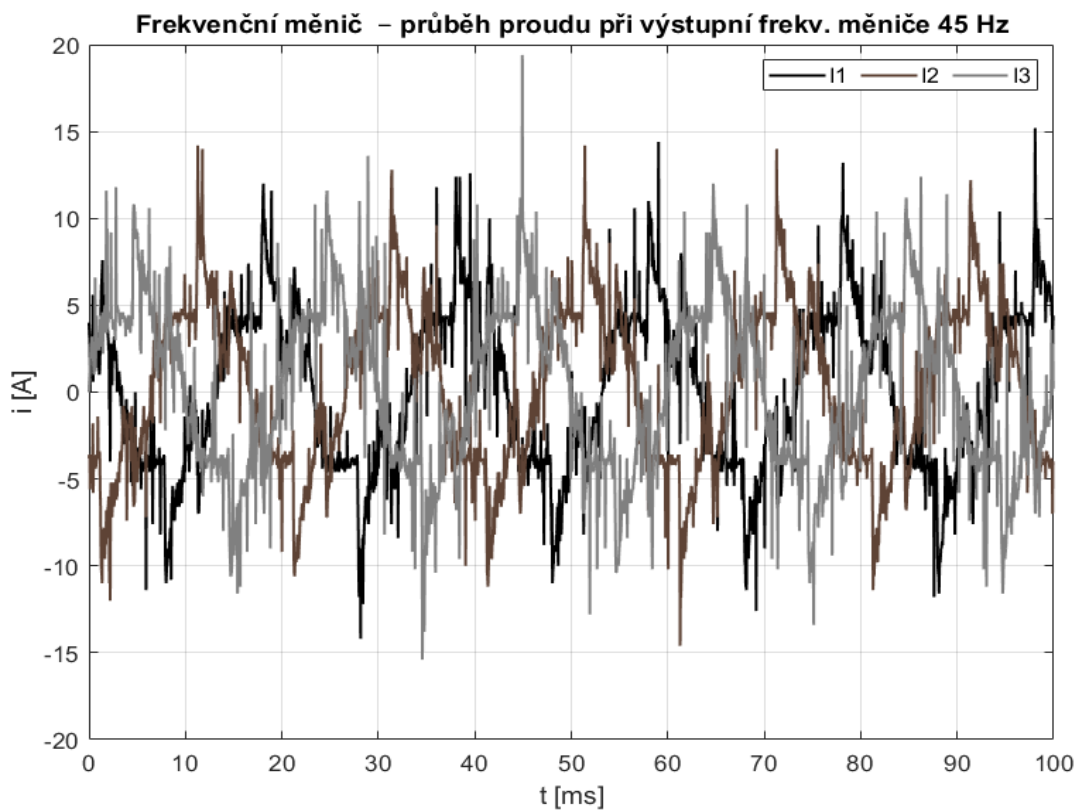
Měření probíhalo při dvou výstupních frekvencích měniče – při frekvenci 45 Hz a 55 Hz. Asynchronní motor byl za pomoci dynamometru nejprve zatěžován momentem 10 Nm. Posléze v další části měření pracoval v oblasti nadsynchronních otáček, v generátorickém režimu, s momentem 10 Nm. A vždy při obou zmíněných výstupních frekvencích.



Obr. 47: Zapojení měřícího pracoviště třífázového frekvenčního měniče s možností rekuperace

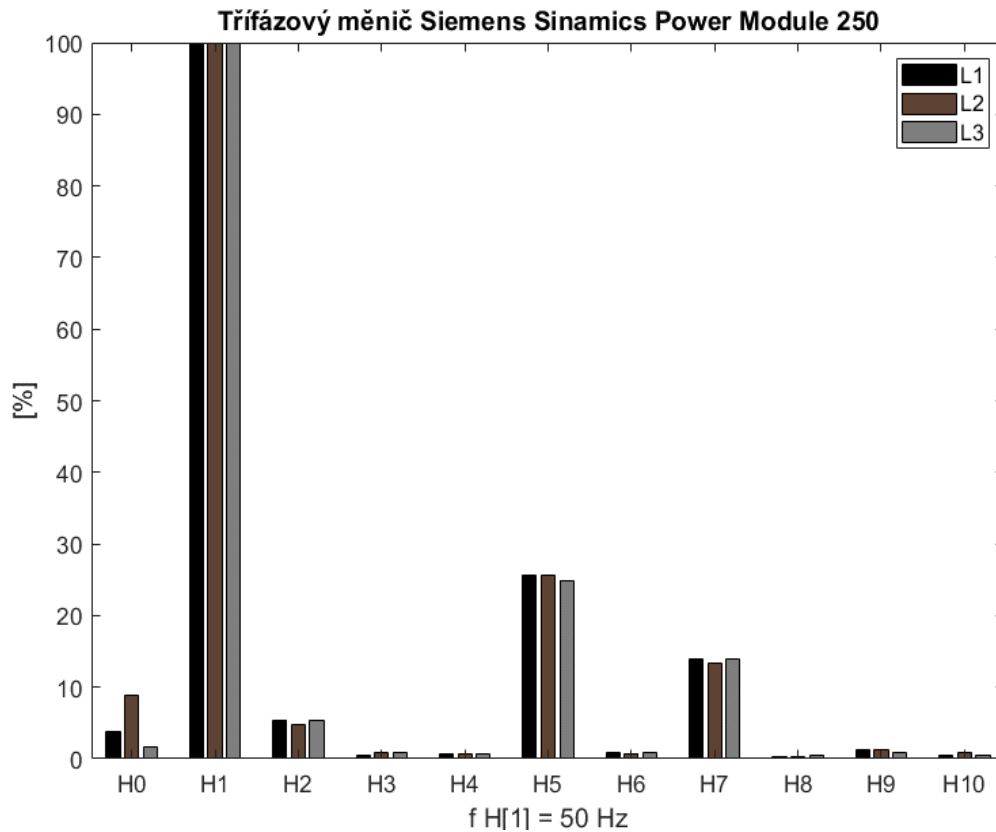
6.3.1 Naměřené hodnoty – frekvence měniče 45 Hz – motorický režim

Následující obrázek zachycuje průběhy proudů ve všech fázích na vstupu měniče. Je zřejmý náznak sinusového průběh proudů, díky vstupnímu, řízenému pulznímu usměrňovači.



Obr. 48: Frekvenční měnič – průběh proudu při výstupní frekv. měniče 45 Hz

Frekvenční spektrum vstupních proudů obsahuje především 5. a 7. harmonickou.



Obr. 49: Frekvenční měnič – frekvenční spektrum proudu při výstupní frekv. měniče 45 Hz

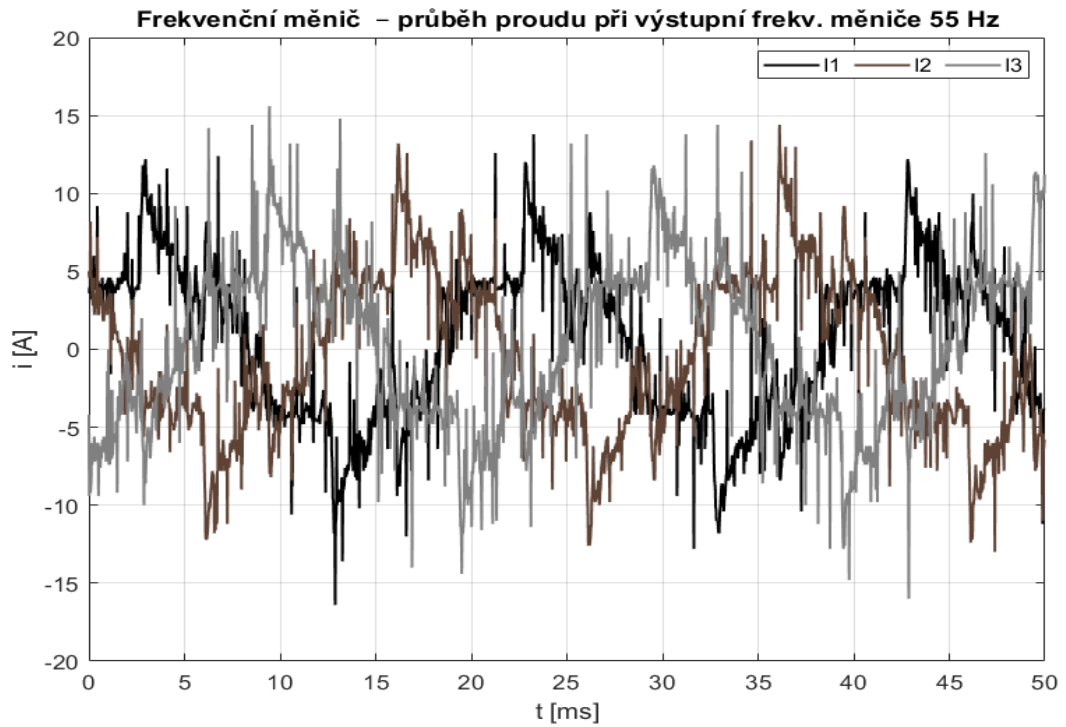
Následující tabulka opět shrnuje a porovnává naměřené hodnoty elektrických veličin pomocí analyzátoru SMY 134 a NORMA 5000. V posledním sloupci je uvedena relativní chyba, vztažená k naměřeným hodnotám analyzátoru Fluke NORMA 5000. V případě fázových napětí a proudů je relativní chyba počítána z aritmetického průměru AVG.

Tab. 9: Naměřené hodnoty na frekvenčním měniči – při výstupní frekv. měniče 45 Hz

Měřená veličina	Fluke NORMA 5000				KMB SMY 134				δ_{AVG} [%]
	L1	L2	L3	AVG	L1	L2	L3	AVG	
U_f [V]	228,61	229,32	229,19	229,04	228,6	229,2	229,4	229,4	-0,26
I_f [A]	4,53	4,54	4,52	4,52	4,38	4,42	4,40	4,39	-3,22
P_{3f} [kW]	1,759				1,708				-2,99
S_{3f} [kVA]	3,11				3,024				-2,84
Q_{3f} [kVar]	-2,57				-2,371				-8,39
PF_{3f} [-]	0,5651				0,565				-0,02
f [Hz]	19,985				49,99				0,01

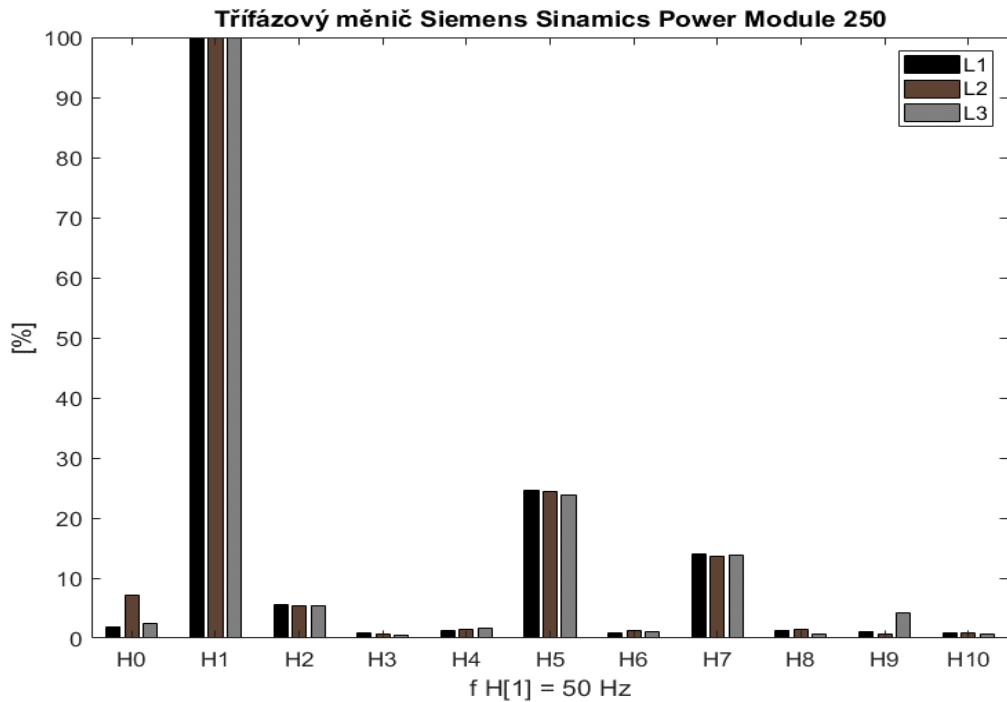
6.3.2 Naměřené hodnoty – frekvence měniče 55 Hz – motorický režim

Průběh proudu na vstupu frekvenčního měniče je zachycen na obrázku 50.



Obr. 50: Frekvenční měnič – průběh proudu při výstupní frekv. měniče 55 Hz

Ve frekvenčním spektru proudu jsou opět nejvýraznější liché harmonické, konkrétně 3. a 5.



Obr. 51: Frekvenční měnič – frekvenční spektrum proudu při výstupní frekv. měniče 55 Hz

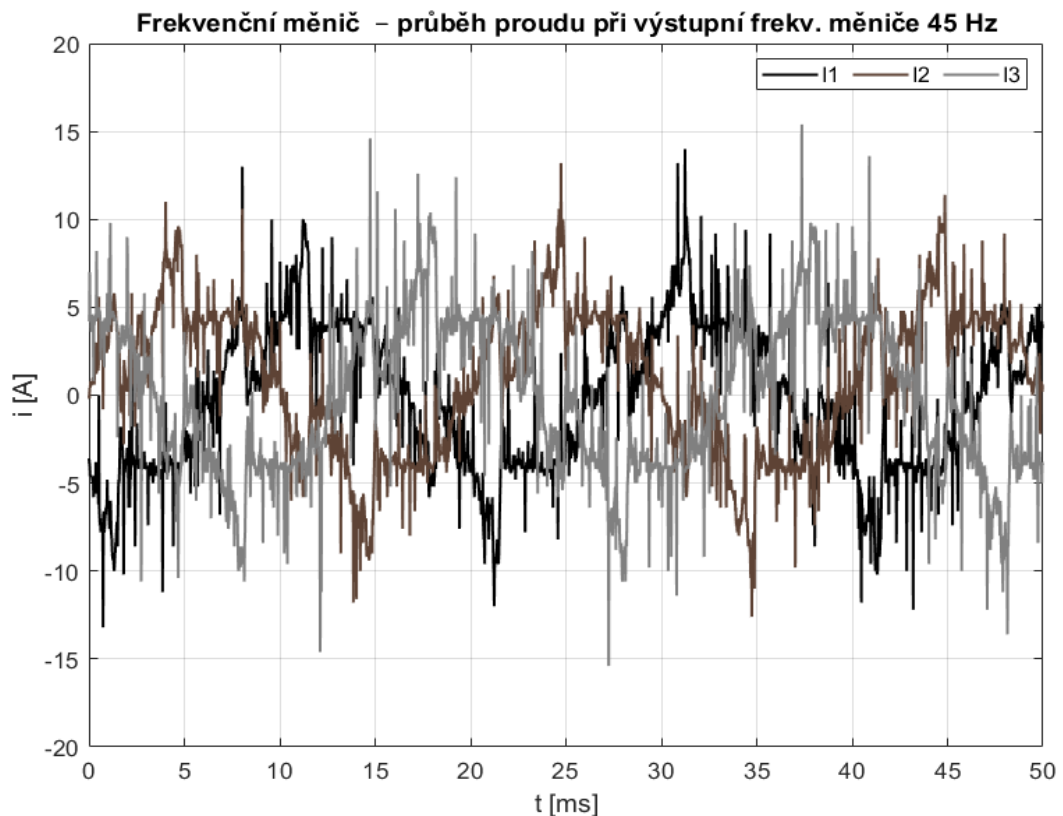
Následující tabulka opět shrnuje a porovnává naměřené hodnoty elektrických veličin pomocí analyzátoru SMY 134 a NORMA 5000.

Tab. 10: Naměřené hodnoty na frekvenčním měniči – při výstupní frekv. měniče 55 Hz

Měřená veličina	Fluke NORMA 5000				KMB SMY 134				δ_{AVG} [%]
	L1	L2	L3	AVG	L1	L2	L3	AVG	
U_f [V]	228,25	229,14	228,9	228,76	228,76	229,5	229,1	229,4	-0,18
I_f [A]	4,89	4,92	4,89	4,9	4,75	4,78	4,77	4,77	-3,06
P_{3f} [kW]	1,759				1,708				-3,04
S_{3f} [kVA]	3,11				3,024				-2,66
Q_{3f} [kVar]	-2,57				-2,371				-13,84
PF_{3f} [-]	0,5651				0,565				-0,27
f [Hz]	19,985				49,99				-0,06

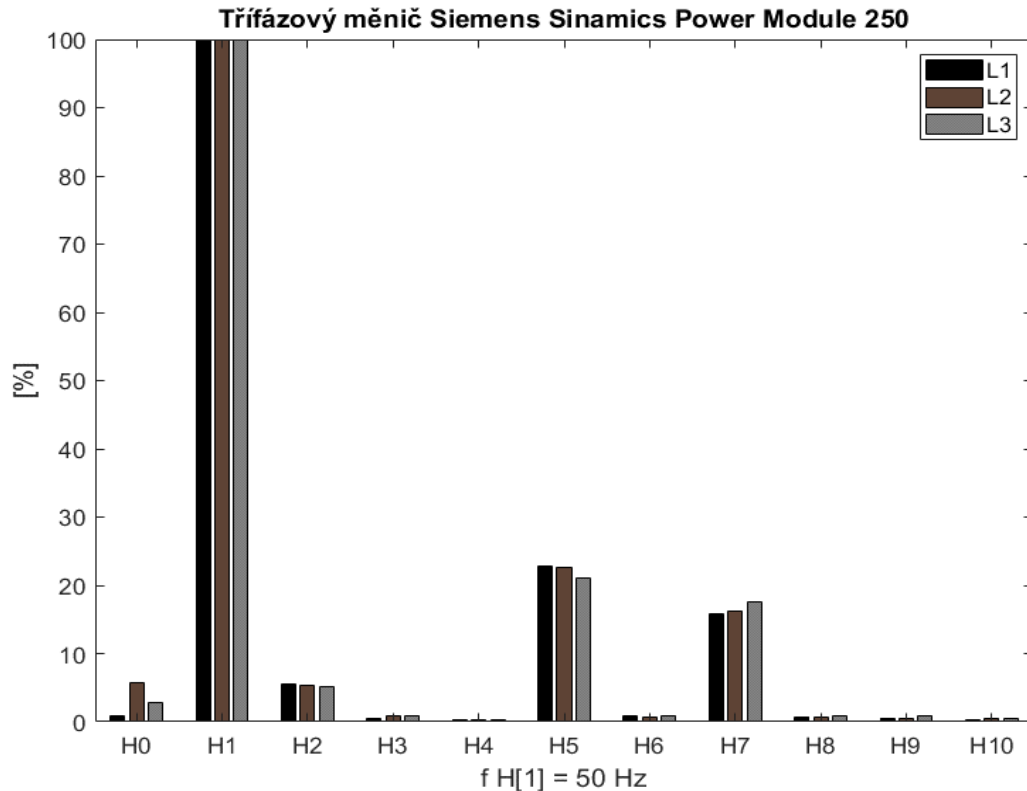
6.3.3 Naměřené hodnoty – frekvence měniče 45 Hz – generátorický režim

Při tomto měření je asynchronní motor provozován v generátorické části momentové charakteristiky. Tok energie je opačný, je dodávána do sítě.



Obr. 52: Frekvenční měnič – průběh proudu na síťové straně s frekv. měniče 45 Hz

Frekvenční spektrum, v tomto případě, dodávaného proudu frekvenčním měničem zpět do sítě je prakticky velmi podobné, jako v předchozích případech. Jsou opět patrné liché vyšší harmonické, především 5. a 7. harmonická.



Obr. 53: Frekvenční měnič – frekvenční spektrum proudu na síťové straně s frekv. měniče 45 Hz

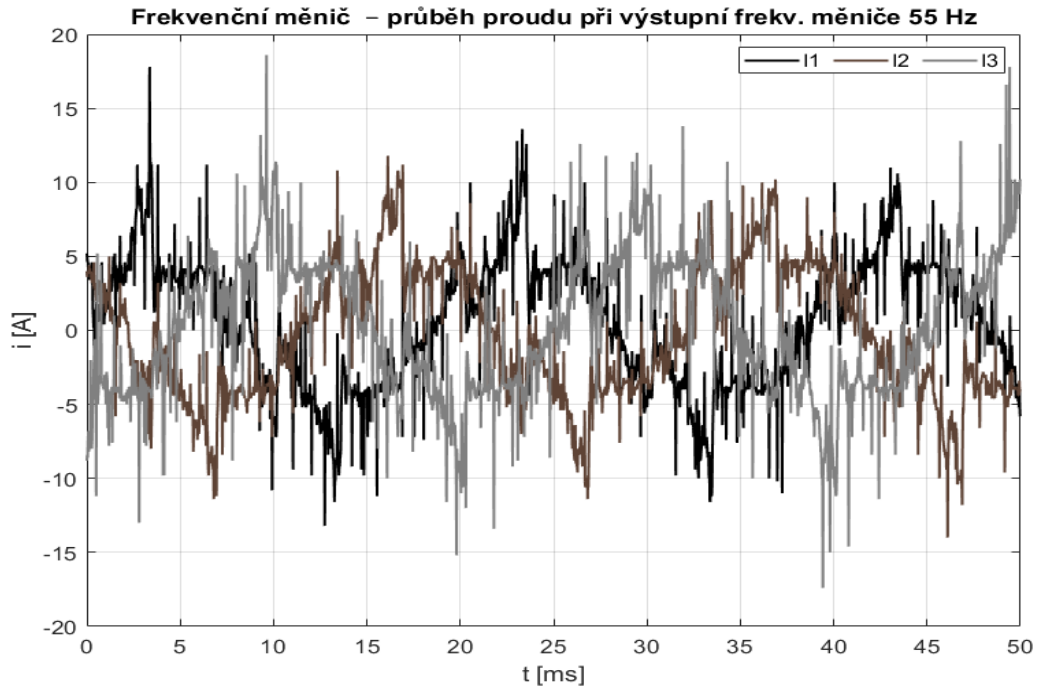
Následující tabulka opět shrnuje a porovnává naměřené hodnoty elektrických veličin pomocí analyzátoru SMY 134 a NORMA 5000. Zřejmý je opačný směr toku energie. Hodnota činného výkonu má záporné znaménko.

Tab. 11: Naměřené hodnoty na frekv. měniči – při výstupní frekv. měniče 45 Hz (generátor)

Měřená veličina	Fluke NORMA 5000				KMB SMY 134				δ_{AVG} [%]
	L1	L2	L3	AVG	L1	L2	L3	AVG	
U_f [V]	229,37	230,3	230,1	229,91	229,1	230	230,2	229,77	-0,41
I_f [A]	4,07	4,05	4,05	4,06	3,9	3,9	3,9	3,9	-3,61
P_{3f} [kW]	-1,177				-1,158				-1,64
S_{3f} [kVA]	2,8				2,7				-3,7
Q_{3f} [kVar]	-2,54				-2,251				-12,84
PF_{3f} [-]	-0,422				-0,459				8,06
f [Hz]	49,999				50,01				0,02

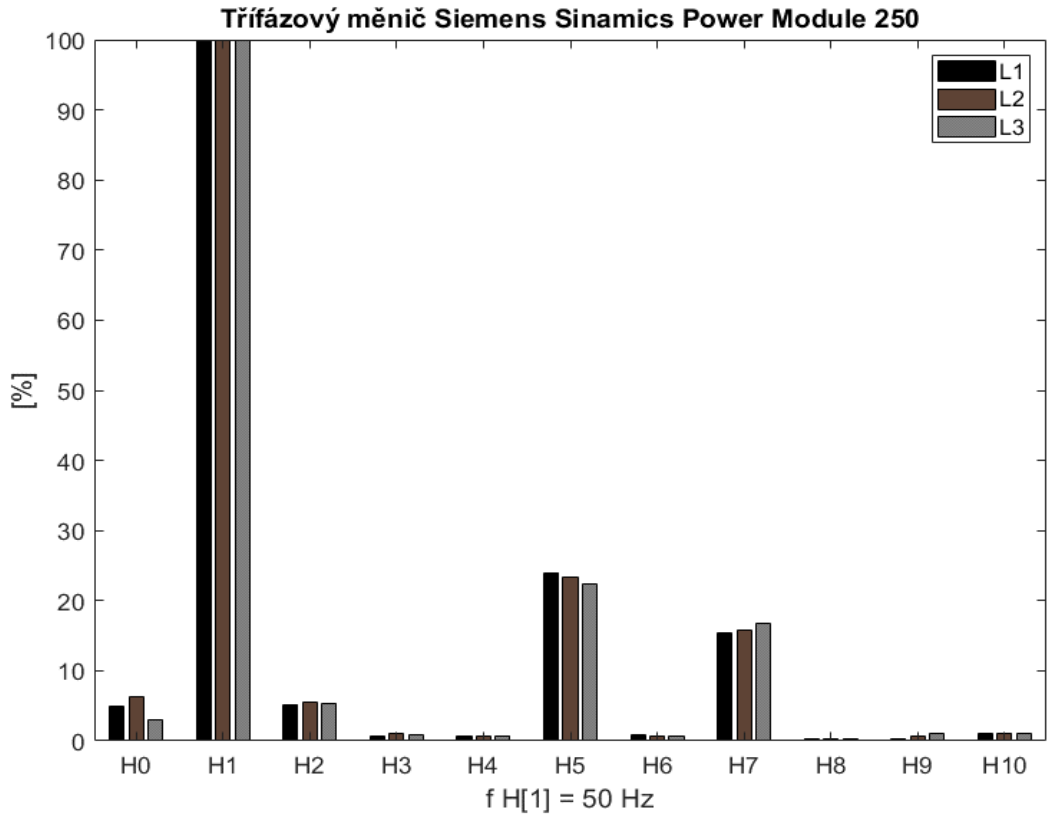
6.3.4 Naměřené hodnoty – frekvence měniče 55 Hz – generátorický režim

Průběh proudu na vstupu frekvenčního měniče je zachycen na obrázku 54.



Obr. 54: Frekvenční měnič – průběh proudu na síťové straně s frekv. měniče 55 Hz

V proudovém spektru je opět výrazná 5. a 7. harmonická proudu.



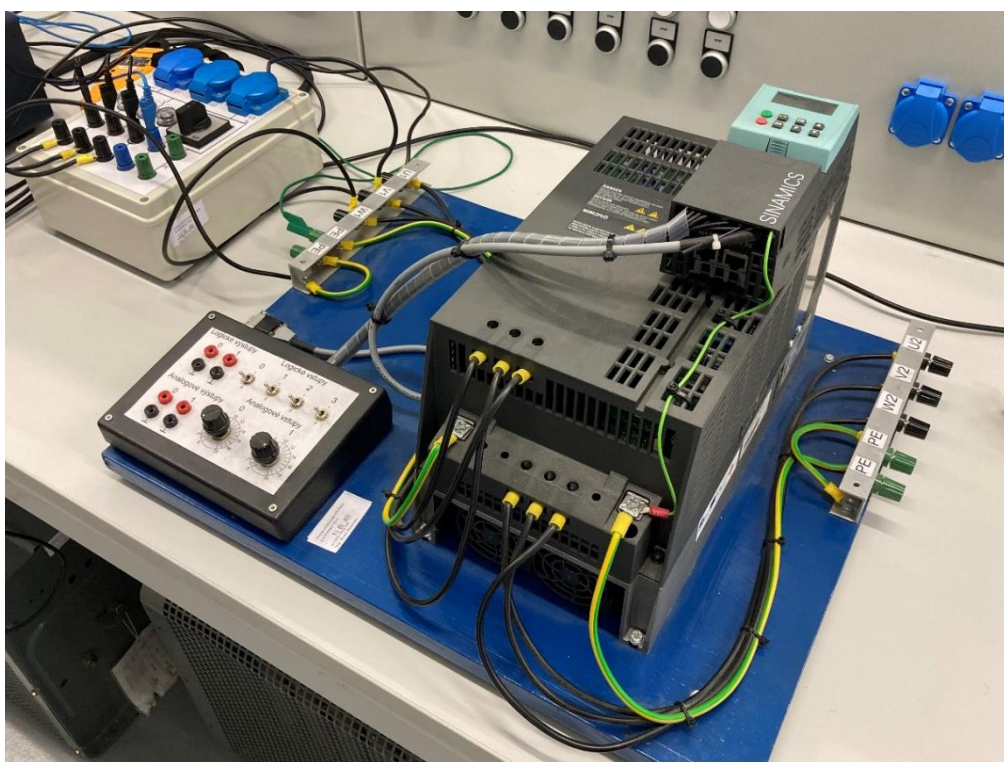
Obr. 55: Frekvenční měnič – frekvenční spektrum proudu na síťové straně s frekv. měniče 55 Hz

Následující tabulka opět shrnuje a porovnává naměřené hodnoty elektrických veličin pomocí analyzátoru SMY 134 a NORMA 5000. Opět záporné znaménko u činného výkonu udává směr toku elektrické energie z motoru, respektive generátoru, přes měnič do sítě.

Tab. 12 Naměřené hodnoty na frekv. měniči – při výstupní frekv. měniče 55 Hz (generátor)

Měřená veličina	Fluke NORMA 5000				KMB SMY 134				δ_{AVG} [%]
	L1	L2	L3	AVG	L1	L2	L3	AVG	
U_f [V]	229,06	230,0	229,85	229,63	228,8	229,6	229,9	229,43	-0,09
I_f [A]	4,29	4,25	4,27	4,27	4,13	4,14	4,13	4,14	-3,12
P_{3f} [kW]	-1,473				-1,448				-1,73
S_{3f} [kVA]	2,94				2,851				-3,12
Q_{3f} [kVar]	-2,54				-2,244				-13,19
PF_{3f} [-]	-0,5017				-0,508				1,24
f [Hz]	49,98				50,0				0,04

Největší relativní chybu vykazuje průřezově během měření údaj jalového výkonu. Nejvyšší zjištěná relativní chyba byla více než 13%. Odpovídá ji absolutní chyba jalového výkonu téměř 300 Var.



Obr. 56: Frekvenční měnič Siemens Sinamics Power Module 250

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byl návrh metodiky měření zpětných vlivů nabíjení elektrických silničních vozidel na napájecí síť. Za tímto účelem bylo navrženo měřicí pracoviště využívající laboratorní síťový analyzátor Fluke Norma, pomocí něhož byly ověřeny zpětné vlivy na napájecí síť během nabíjení několika konkrétních elektrických silničních vozidel.

Tento způsob měření je nicméně relativně nekompaktní. Aby bylo možné snadno a efektivně měřit zpětné vlivy během nabíjení elektrických vozidel i ve venkovním prostředí mimo laboratoř, bylo navrženo univerzální měřicí pracoviště založené na analyzátoru SMY 134. Měřením během nabíjení konkrétního silničního elektrického vozidla bylo ověřeno, že analyzátor umožňuje, ve srovnání s měřením za pomoci analyzátoru Fluke Norma, takřka plnohodnotné měření zpětných vlivů, a to v rozličných, nejen elektromobilních aplikacích.

Srovnávacím měřením na vybraných průmyslových jednofázových i třífázových měničích bylo zjištěno, že obě navržené metodiky měření zpětných vlivů výkonové spínací elektroniky vykazují prakticky srovnatelné výsledky. Nejvyšší relativní chyba byla u většiny měření zpravidla vykázána na hodnotách jalového výkonu. U ostatních měřených veličin se pohybovala řádově v nižších jednotkách procent. V rámci srovnávacího měření bylo provedeno měření vlivů nejen při toku elektrické energie ze sítě do měniče a dále do spotřebiče, ale také měření vlivů při toku elektrické energie zpět do sítě v rámci rekuperace. Na obrácený směr toku správně reagovaly oba analyzátoři záporným znamínkem u hodnoty činného výkonu.

Jak bylo během vícero měření v průběhu této diplomové práce zjištěno, při nabíjení elektrických silničních vozidel střídavým proudem působí na napájecí síť rozličné zpětné vlivy. U vyšetřovaných vozidel se jednalo především o nesymetrický odběr, který je, se všemi svými důsledky, v distribuční soustavě ve větší míře nežádoucí. V současné době se de facto veškeré nové distribuční transformátory v sítích distributorů ČEZ a EG.D instalují v zapojení Dyn1. Předmětem širší odborné diskuse by mělo být, zda by nebylo vhodné instalovat v oblastech s předpokládanou zvýšenou četností hromadného nabíjení elektrických silničních vozidel střídavým proudem distribuční transformátory se zapojeným vinutím do lomené hvězdy. Typicky by se mohlo jednat o oblasti městské zástavby a parkovací domy s dobíjecími místy pro elektrická vozidla.

V distribuční soustavě je v neposlední řadě zcela zásadní vliv vyšších harmonických, které při nabíjení elektrických silničních vozidel neoddiskutovatelně vznikají. Nejvýraznější jsou především liché násobky základní frekvence, přičemž z hlediska dimenzování středního vodiče

je kritická 3. harmonická. Z naměřených průběhů proudů během nabíjení všech vyšetřovaných vozidel lze vyzorovat trend zásadního snížení rozsahu účinků zpětných vlivů na napájecí síť s rostoucím nabíjecím proudem. Při vyšších nabíjecích proudech je v jejich frekvenčním spektru zásadně nižší procentuální zastoupení lichých vyšších harmonických.

Se všeobecným odklonem od fosilních paliv se dá předpokládat, že počet provozovaných elektrických silničních vozidel v tuzemsku poroste, přičemž jejich uživatelské nabíjení střídavým proudem hraje již v současnosti zcela nezastupitelnou roli. Především s ohledem na jednoduchost a dostupnost tohoto způsobu nabíjení přestává být míra vlivu na elektrizační soustavu zanedbatelná. Z toho důvodu bude zcela nezbytné věnovat zpětným vlivům nabíjení elektrických silničních vozidel na napájecí síť vyšší pozornost a jejich účinky, pokud možno, eliminovat.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KŮS, Václav, Jiří SKÁLA a Jiří HAMMERBAUER. *Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů*. Praha: BEN - technická literatura, 2013. ISBN 978-80-7300-476-7.
- [2] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita: principy a poznámky*. Brno: Vysoké učení technické, 2001. Připojujeme se k Evropské unii. ISBN 80-214-1873-7.
- [3] ČSN EN IEC 61851-1 ED. 3. *Systém nabíjení elektrických vozidel vodivým propojením*. 2020.
- [4] ČSN EN 61008-1 ED.3. *Proudové chrániče bez vestavěné nadproudové ochrany pro domovní a podobné použití (RCCB)*. 2013.
- [5] ČSN EN 61009-1 ED.3. *Proudové chrániče s vestavěnou nadproudovou ochranou pro domovní a podobné použití (RCBO)*. 2013.
- [6] ČSN 33 2000-7-722 ED.3. *Elektrické instalace nízkého napětí - Část 7-722: Zařízení jednoúčelová a ve zvláštních objektech - Napájení elektrických vozidel*. 2019.
- [7] ČSN EN 50160 ED.3. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*. Ed. 3. 2011
- [8] KOŠTÁL, Josef. Kompenzace elektrického jalového výkonu. *ELEKTRO*. 2009, (03), 3.
- [9] PNE 33 0000- 1. *Ochrana před úrazem elektrickým proudem v distribučních soustavách a přenosové soustavě*. 5. 2011.
- [10] TKOTZ, Klaus, Peter BASTIAN, Horst BUMILLER, et al. *Příručka pro elektrotechnika*. 2. doplněné vydání, dotisk. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2017. ISBN 978-3-8085-3034-4.
- [11] Navrhování vodičů s ohledem na vyšší harmonické, unikající proudy, požadavky na zemnění. *IN-EL.CZ* [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.in-el.cz/referat/103451/navrhovani-vodicu-s-ohledem-na-vyssi-harmonicke-unikajici-proudy-pozadavky-na-zemneni>
- [12] Fluke NORMA 5000: Návod k použití. *Fluke: Kvalita elektrické energie* [online]. [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.fluke.com/cs-cz/produkt/elektricke-testovani/kvalita-elektricke-energie/norma-5000>
- [13] SMY 134: Návod k použití. *KMB Systems: Měření a monitoring* [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.kmb.cz/produkty/kvalitomery-tridy-s/smy-134>
- [14] Škoda Citigo. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0koda_Citigo
- [15] Měřící transformátor proudu. In: *GHVtrading* [online]. [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.ghvtrading.cz/rozvadecove-pristroje/transformatory-proudu/merici-zavitove/wsk40.html>

- [16] Spacial S3D plné dveře s montážním panelem V300xŠ300xH200 IP66 IK10 RAL7035. In: *Schneider Electric* [online]. [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.se.com/cz/cs/product/NSYS3D3320P/spacial-s3d-pln%C3%A9-dve%C5%99e-s-mont%C3%A1%C5%BEEn%C3%ADm-panelem-v300x%C5%A1300xh200-ip66-ik10-ral7035/>
- [17] ING. SMETANA, Jaroslav. Měření při údržbě pohonů a motorů (2. část). *ELEKTRO* [online]. 29. 2. 2016 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/clanek/mereni-pri-udrzbe-pohonu-a-motoru-2-cast--1489>
- [18] Test ojetiny: Volkswagen e-Golf – Do práce a zpět za hubičku. *Garaz.cz* [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.garaz.cz/clanek/volkswagen-e-golf-21004660>
- [19] POHORSKÝ, Jiří. *HDO - hromadné dálkové ovládání*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-730-0054-7.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Odchylka jmenovité hodnoty napětí a doba přerušení.....	12
Obr. 2: Kolísání napětí – flicker.....	12
Obr. 3: Perioda sinusového napětí	13
Obr. 4: Grafické znázornění výkonů.....	16
Obr. 5: Průběh proudu transformátorem při chodu naprázdno	17
Obr. 6: Sčítání průběhů proudů třetí harmonické ve středním vodiči	19
Obr. 7 Schematické provedení pasivního filtru vyšších harmonických.....	22
Obr. 8 Fázorové diagramy vyvážené a nevyvážené soustavy	23
Obr. 9: Zapojení distribučního transformátoru Y_{zn1}	24
Obr. 10: Blokové schéma AC nabíjení elektrických silničních vozidel.....	26
Obr. 11: Konektor Mennekes – type 2.....	26
Obr. 12: Blokové schéma DC nabíjení elektrických silničních vozidel.....	27
Obr. 13: Konstrukce rychlonabíjecí stanice se síťovým transformátorem.....	28
Obr. 14: Konstrukce rychlonabíjecí stanice s VF transformátorem.....	28
Obr. 15: Konektor CHAdeMO.....	29
Obr. 16: Konektor CCS (Combined Charging System).....	29
Obr. 17: Obecné blokové znázornění metodiky měření zpětných vlivů	32
Obr. 18: Analyzátor sítě Fluke NORMA 5000 [12].....	33
Obr. 19: Schéma zapojení měřícího pracoviště s Fluke NORMA 5000	33
Obr. 20: Průběhy nabíjecích proudů vozidla Hyundai KONA Electric	34
Obr. 21: Frekvenční spektrum nabíjecích proudů vozidla Hyundai KONA Electric	35
Obr. 22: Průběhy nabíjecích proudů vozidla Škoda Citigo E	37
Obr. 23: Frekvenční spektrum nabíjecích proudů vozidla Škoda Citigo E.....	38
Obr. 24: Analyzátor SMY 134 KMB Systems [13].....	40
Obr. 25: Schéma zapojení měřícího pracoviště se SMY 134.....	41
Obr. 26: Měřicí transformátor proudu MBS WSK 40 [15].....	42
Obr. 27: Osazená vnější strana rozváděčové skříně	43
Obr. 28: Orientační nákres příčného řezu rozváděče	44
Obr. 29: Rozmístění el. přístrojů na montážní desce rozváděče	45
Obr. 30: Kompletní sestava měřícího rozváděče a stojanu	46
Obr. 31: Fotografie zapojeného rozváděče vzniklého měřícího pracoviště zpětných vlivů.....	46
Obr. 32: Měření zpětných vlivů s analyzátozem SMY 134 a Fluke NORMA 5000	47
Obr. 33: Průběhy nabíjecích proudů vozidla Volkswagen e-Golf – min. nabíjecí výkon.....	48
Obr. 34: Frekvenční spektrum nabíjecích proudů vozidla Volkswagen e-Golf.....	48
Obr. 35: Průběhy nabíjecích proudů vozidla Volkswagen e-Golf – max. nabíjecí výkon.....	50

Obr. 36: Frekvenční spektrum nabíjecích proudů vozidla Volkswagen e-Golf.....	51
Obr. 37: Zapojení měřicího pracoviště jednofázové odporové zátěže	52
Obr. 38: Odporová zátěž – průběh proudu.....	53
Obr. 39: Odporová zátěž – frekvenční spektrum proudu	53
Obr. 40: Zapojení měřicího pracoviště jednofázového tyristorového regulátoru	54
Obr. 41: Tyristorový regulátor – průběh proudu při plném otevření	55
Obr. 42: Tyristorový regulátor – frekvenční spektrum při plném otevření.....	55
Obr. 43: Tyristorový regulátor – průběh proudu při úhlu otevření zhruba 90°	56
Obr. 44: Tyristorový regulátor – frekvenční spektrum při zhruba polovičním otevření.....	57
Obr. 45: Tyristorový regulátor – průběh proudu při úhlu otevření přibližně 170°	58
Obr. 46: Tyristorový regulátor – frekvenční spektrum proudu při úhlu otevření přibližně 170°	58
Obr. 47: Zapojení měřicího pracoviště třífázového frekvenčního měniče s možností rekuperace	60
Obr. 48: Frekvenční měnič – průběh proudu při výstupní frekv. měniče 45 Hz.....	60
Obr. 49: Frekvenční měnič – frekvenční spektrum proudu při výstupní frekv. měniče 45 Hz.....	61
Obr. 50: Frekvenční měnič – průběh proudu při výstupní frekv. měniče 55 Hz.....	62
Obr. 51: Frekvenční měnič – frekvenční spektrum proudu při výstupní frekv. měniče 55 Hz.....	62
Obr. 52: Frekvenční měnič – průběh proudu na síťové straně s frekv. měniče 45 Hz.....	63
Obr. 53: Frekvenční měnič – frekvenční spektrum proudu na síťové straně s frekv. měniče 45 Hz.....	64
Obr. 54: Frekvenční měnič – průběh proudu na síťové straně s frekv. měniče 55 Hz.....	65
Obr. 55: Frekvenční měnič – frekvenční spektrum proudu na síťové straně s frekv. měniče 55 Hz.....	65
Obr. 56: Frekvenční měnič Siemens Sinamics Power Module 250	66

SEZNAM TABULEK

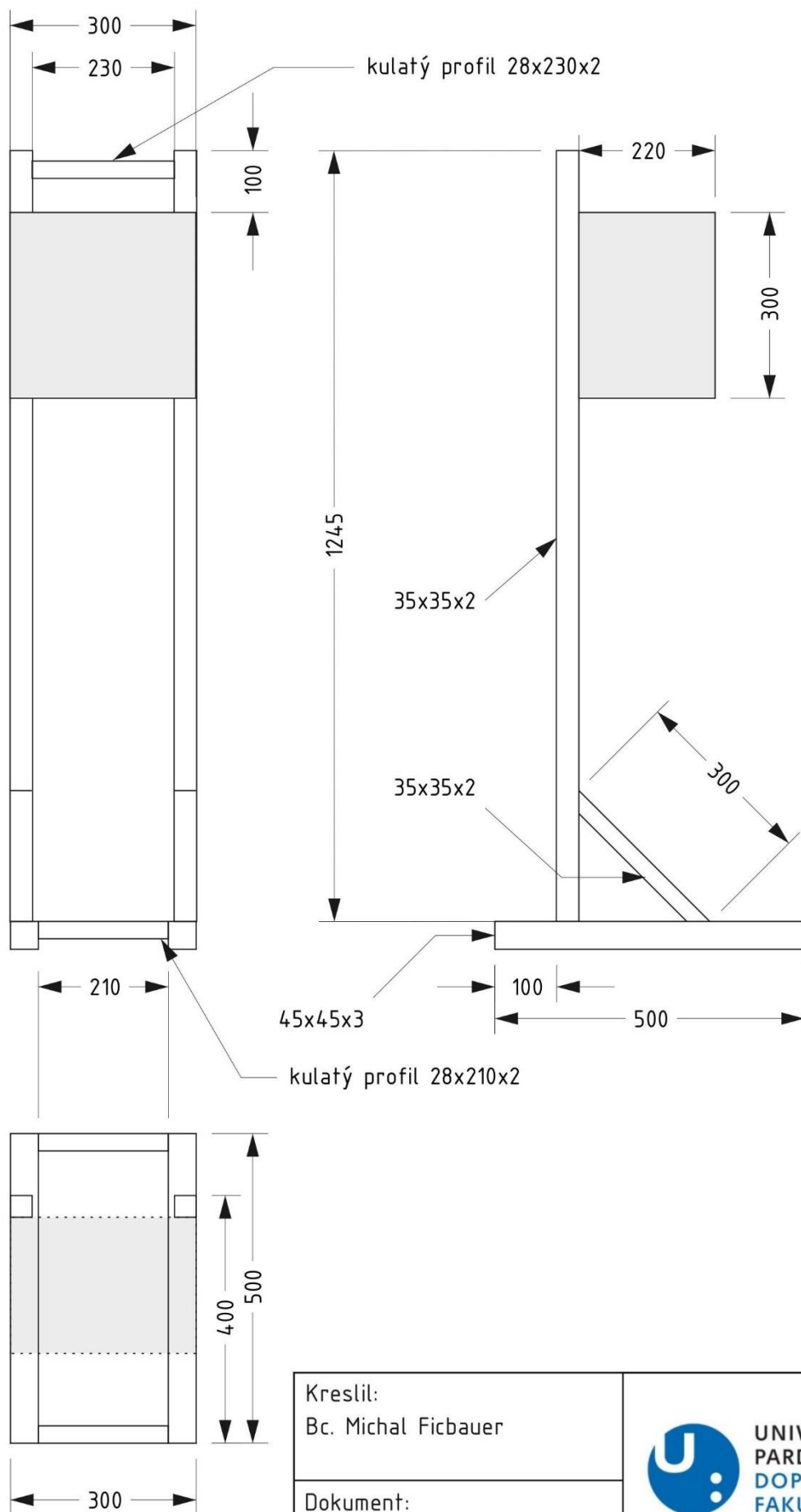
Tab. 1: Naměřené hodnoty během nabíjení vozidla Hyundai KONA Electric	36
Tab. 2: Naměřené hodnoty během nabíjení vozidla Škoda Citigo E	39
Tab. 3: Naměřené hodnoty během nabíjení vozidla Volkswagen e-Golf – min. nabíjecí výkon.....	49
Tab. 4: Naměřené hodnoty během nabíjení vozidla Volkswagen e-Golf – max. nabíjecí výkon.....	51
Tab. 5: Naměřené hodnoty na jednofázové odporové zátěži	54
Tab. 6: Naměřené hodnoty na tyristorovém regulátoru – při plném otevření.....	56
Tab. 7: Naměřené hodnoty na tyristorovém regulátoru – při zhruba polovičním otevření.....	57
Tab. 8: Naměřené hodnoty na tyristorovém regulátoru – při úhlu otevření přibližně 170°	59
Tab. 9: Naměřené hodnoty na frekvenčním měniči – při výstupní frekv. měniče 45 Hz	61
Tab. 10: Naměřené hodnoty na frekvenčním měniči – při výstupní frekv. měniče 55 Hz	63
Tab. 11: Naměřené hodnoty na frekv. měniči – při výstupní frekv. měniče 45 Hz (generátor)	64
Tab. 12: Naměřené hodnoty na frekv. měniči – při výstupní frekv. měniče 55 Hz (generátor).....	66


SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

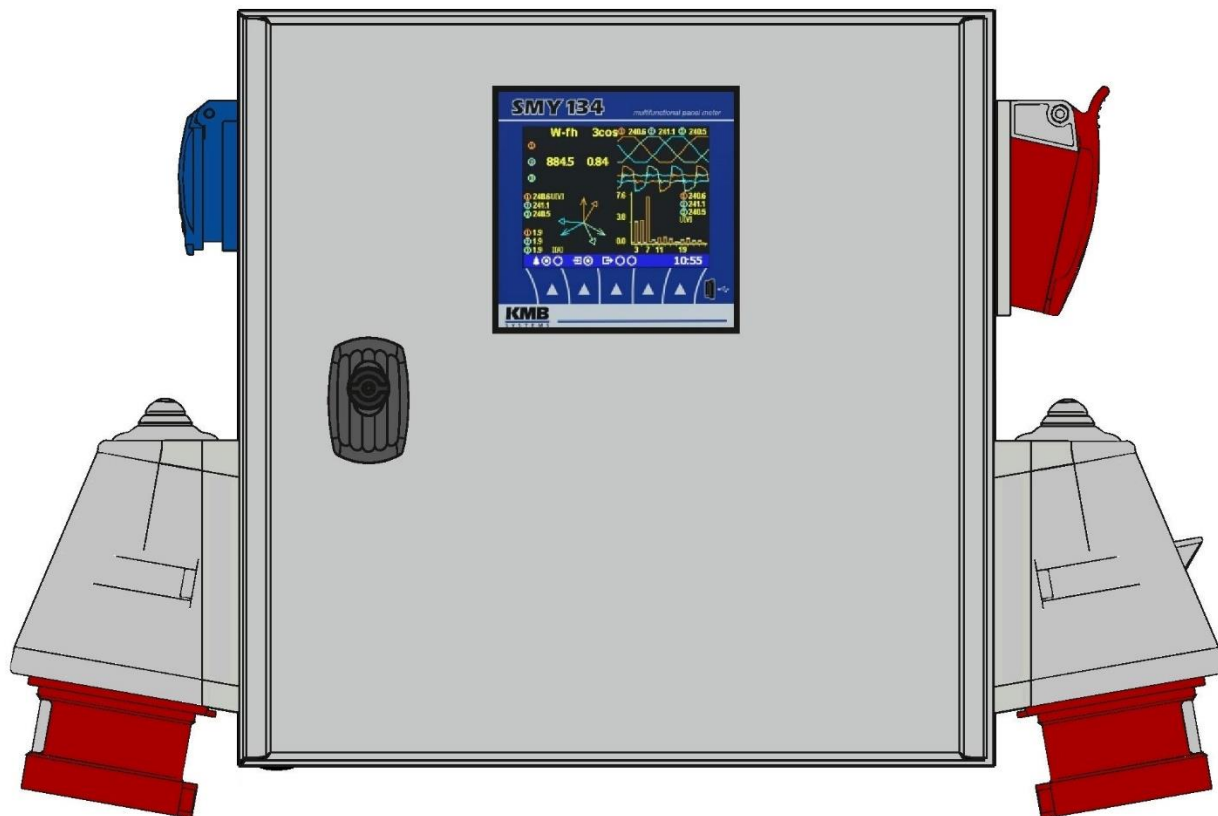
Symbol	Popis veličiny	Jednotka
AC	„alternating current“, střídavý proud	
C	kapacita	[F]
ČSN	chráněné označení českých technických norem	
DC	„direct current“, stejnosměrný proud	
DF	činitel harmonického zkreslení	
DPF	účinník základní harmonické	
Dyn1	označení zapojení distribučního transformátoru	
FKZ	filtračně-kompenzační zařízení	
h	řád vyšší harmonické	
HDO	hromadné dálkové ovládání	
I_0	stejnosměrná složka střídavého proudu	[A]
I_1	proud první (základní) harmonické	[A]
I_h	proud harmonické řádu – h	[A]
IPxx	stupeň krytí	
MTP	měřicí transformátor proudu	
NN	nízké napětí	
P	činný výkon	[W]
PF	reálný účinník	
P_k	k-tá harmonické činného výkonu	[W]
PNE	podnikové normy energetiky	
PWM	pulzně šířková modulace	
Q	jalový výkon	[VAr]
S	zdánlivý výkon	[VA]
t	čas	[s]
THD	celkový činitel zkreslení	
VN	vysoké napětí	
VVN	velmi vysoké napětí	
Yzn1	označení zapojení distribučního transformátoru	


SEZNAM PŘÍLOH

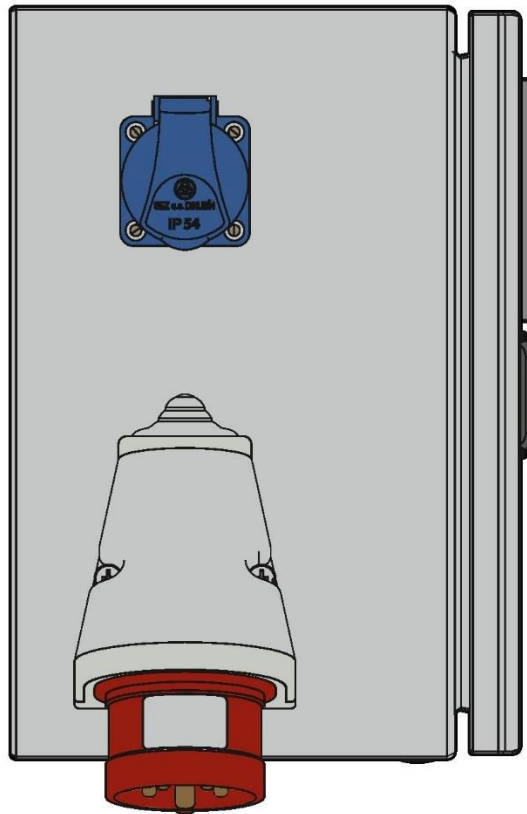
- Příloha A Výkres stojanu měřicího rozváděče (měřítko 1:10)
Příloha B Měřicí rozváděč – pohled zřředu (měřítko 1:3)
Příloha C Měřicí rozváděč – pohled zleva (měřítko 1:3)
Příloha D Měřicí rozváděč – pohled zprava (měřítko 1:3)
Příloha E Schéma zapojení měřicího pracoviště rozváděče SMY 134



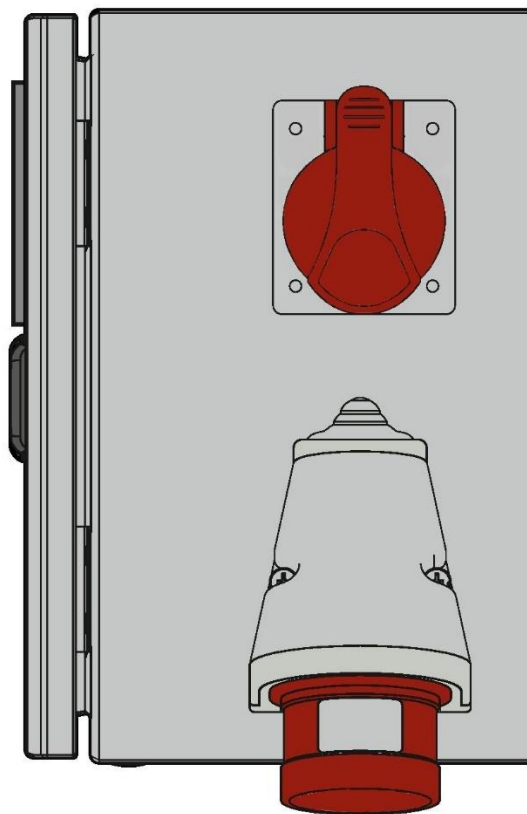
Kreslil: Bc. Michal Ficbauer	 UNIVERZITA PARDUBICE DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA	
Dokument: příloha diplomové práce Datum: 03/2022		
Název práce: Posouzení zpětných vlivů nabíjení elektrických silničních vozidel na napájecí síť Příloha A - Výkres stojanu měřícího rozváděče		Měřítko: 1:10




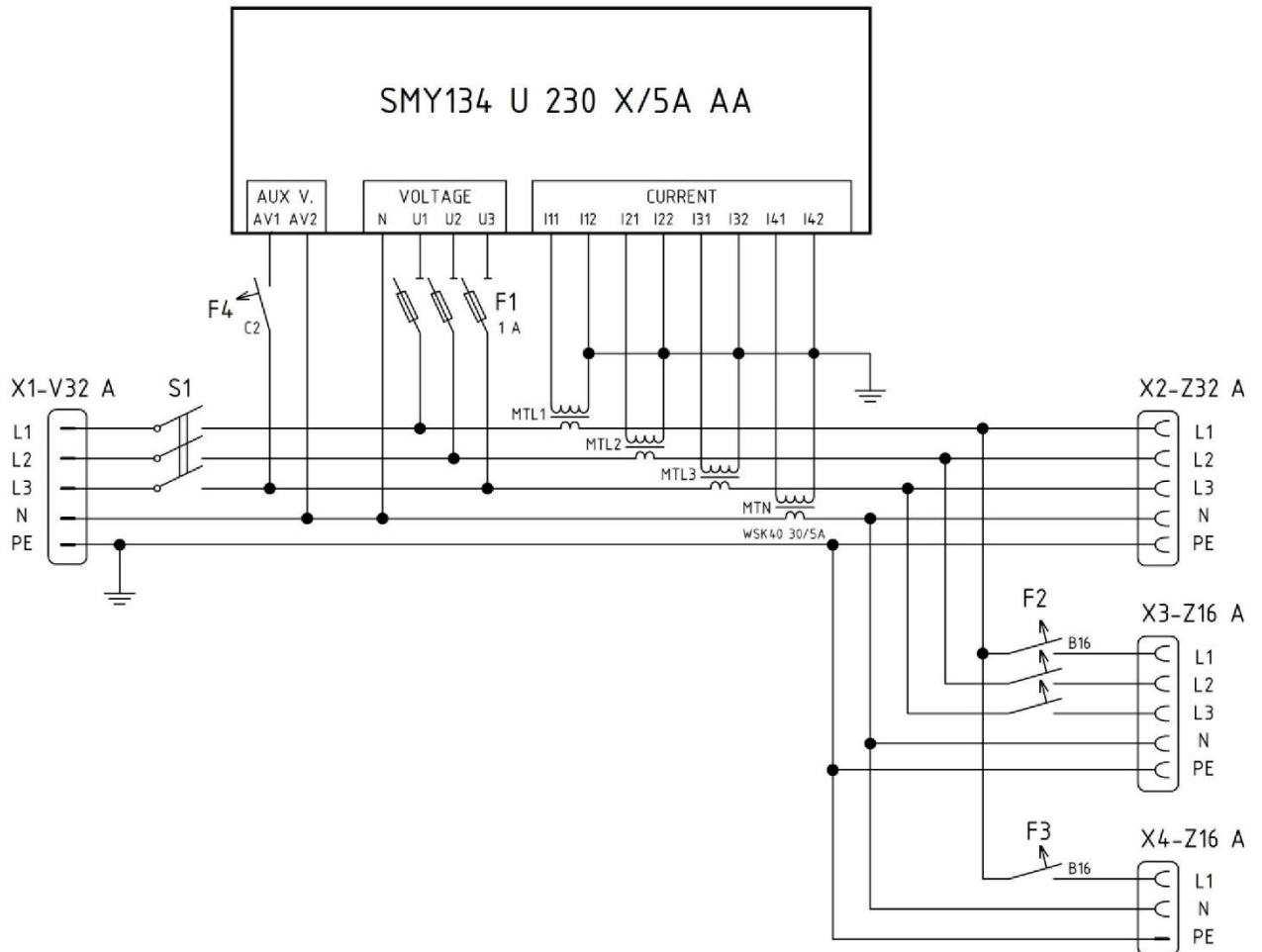
<p>Kreslil: Bc. Michal Ficbauer</p>	 <p>UNIVERZITA PARDUBICE DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA</p>	
<p>Dokument: příloha diplomové práce Datum: 04/2022</p>		
<p>Název práce: Posouzení zpětných vlivů nabíjení elektrických silničních vozidel na napájecí síť Příloha B - Měřicí rozváděč - pohled zepředu</p>		<p>Měřítko: 1:3</p>




Kreslil: Bc. Michal Ficbauer	 <p>UNIVERZITA PARDUBICE DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA</p>
Dokument: příloha diplomové práce Datum: 04/2022	
Název práce: Posouzení zpětných vlivů nabíjení elektrických silničních vozidel na napájecí síť Příloha C - Měřicí rozváděč - pohled zleva	Měřítko: 1:3



Kreslil: Bc. Michal Ficbauer	 <p>UNIVERZITA PARDUBICE DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA</p>
Dokument: příloha diplomové práce Datum: 04/2022	
Název práce: Posouzení zpětných vlivů nabíjení elektrických silničních vozidel na napájecí síť Příloha D - Měřicí rozváděč - pohled zprava	Měřítko: 1:3



Kreslil: Bc. Michal Ficbauer	 UNIVERZITA PARDUBICE DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA
Dokument: příloha diplomové práce Datum: 03/2022	
Název práce: Posouzení zpětných vlivů nabíjení elektrických silničních vozidel na napájecí síť Příloha E - Schéma zapojení měřícího rozváděče SMY134	