FAKULTA MECHATRONIKY,
INFORMATIKY A MEZIOBOROVÝCH
STUDIÍ TUL

Bakalářská práce

Vyhodnocení vlivu zákazníka na harmonické rušení pomocí elektrického výkonu

Studijní program: B0714A270001 Mechatronika
Autor práce: **Šimon Hlaváček**
Vedoucí práce: Ing. Leoš Kukačka, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Liberec 2024

FAKULTA MECHATRONIKY,
INFORMATIKY A MEZIOBOROVÝCH
STUDIÍ TUL

Zadání bakalářské práce

Vyhodnocení vlivu zákazníka na harmonické rušení pomocí elektrického výkonu

Jméno a příjmení:	**Šimon Hlaváček**
Osobní číslo:	M21000024
Studijní program:	B0714A270001 Mechatronika
Zadávající katedra:	Ústav mechatroniky a technické informatiky
Akademický rok:	2023/2024

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s definicemi elektrického výkonu dle std. IEEE 1459-2010 a CPC teorie, a s konceptem identifikace zdroje harmonického rušení.
2. Proveďte teoretickou analýzu elektrického výkonu v náhradním schématu pro identifikaci zdroje rušení v síti dle CPC teorie.
3. Navrhněte a proveďte simulace jednoduchých situací ve frekvenční i časové oblasti.
4. Analyzujte dodaná naměřená data, spočtěte elektrický výkon harmonických složek.
5. Vyhodnoťte dosažené výsledky a shrňte vhodnost elektrického výkonu k identifikaci zdroje harmonického rušení.

Rozsah grafických prací:	dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy:	30 až 40 stran
Forma zpracování práce:	tištěná/elektronická
Jazyk práce:	čeština

Seznam odborné literatury:

[1] IEEE, 2010. IEEE 1459-2010 IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. IEEE Std. 1459-2010.

[2] WILSUN XU, XIAN LIU a YILU LIU, 2003. An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination. IEEE Transactions on Power Delivery [online]. 18(1), 214-219. ISSN 1937-4208. Dostupné z: doi: 10.1109/TPWRD.2002.803842

[3] CZARNECKI, Leszek S. a Paul M. HALEY, 2016. Power Properties of Four-Wire Systems at Nonsinusoidal Supply Voltage. IEEE Transactions on Power Delivery [online]. 31(2), 513-521. ISSN 1937-4208. Dostupné z: doi: 10.1109/TPWRD.2015.2463253

[4] POURARAB, Morteza, Jan MEYER, Oliver DOMIANUS, Thomas NAEF, Max ULRICH a Roger RÖLLI, 2021. Assessment of Harmonic Contribution of Customer Installations Based on Field Measurements. In: CIRED 2021 – The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. s. 1-5.

[5] ŠPELKO, A., B. BLAŽIČ, I. PAPIČ, M. POURARAB, J. MEYER, X. XU a S. Z. DJOKIC, 2017. CIGRE/CIRED JWG C4.42: Overview of common methods for assessment of harmonic contribution from customer installation. In: 2017 IEEE Manchester PowerTech: 2017 IEEE Manchester PowerTech [online]. s. 1-6. Dostupné z: doi: 10.1109/PTC.2017.7981195

[6] POURARAB, Morteza, Jan MEYER, Mark HALPIN, Zafar IQBAL a Sasa DJOKIC, 2020. Interpretation of Harmonic Contribution Indices with respect to Calculated Emission Limits. In: 2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP): 2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP) [online]. s. 1-6. ISSN 2164-0610. Dostupné z: doi: 10.1109/ICHQP46026.2020.9177886

Vedoucí práce:	Ing. Leoš Kukačka, Ph.D. Ústav mechatroniky a technické informatiky
Datum zadání práce:	12. října 2023
Předpokládaný termín odevzdání:	14. května 2024

L.S.

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D.
garant studijního programu

V Liberci dne 12. října 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci 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.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

13. května 2024 Šimon Hlaváček

Vyhodnocení vlivu zákazníka na harmonické rušení pomocí elektrického výkonu

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je prozkoumat možnosti využití elektrického výkonu jako prostředku pro posouzení vlivu zákazníka na harmonické rušení v síti. V teoretické části je analyzováno několik přístupů zahrnujících standardní i pokročilejší definice výkonu, které jsou dále ověřeny za pomoci jak nasimulovaných, tak i reálných naměřených dat. Na základě výsledků je poté vyhodnocena vhodnost použití výkonu pro identifikaci zdroje harmonického rušení.

Klíčová slova: harmonické rušení, elektrický výkon, CPC teorie, IEEE 1459-2010, nelineární zátěž

Harmonic Contribution Assessment Based on Power Indices

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to explore the possibilities of assessing customer's harmonic contribution in the network based on power indices. In the theoretical part, several approaches involving standard and advanced definitions of electric power are analyzed, which are further verified using both simulated and real measured data. Based on the results, the suitability of using power for harmonic source identification is then evaluated.

Keywords: harmonic contribution, electric power, CPC theory, IEEE 1459-2010, non-linear load

Poděkování

Poděkování patří v první řadě panu Ing. Leoši Kukačkovi, Ph.D za cenné rady, odborné vedení práce a hlavně za spoustu jeho věnovaného času. Dále bych chtěl poděkovat panu Prof. Dr.-Ing. habil. Janu Meyerovi, panu M.Sc. Mortezovi Pourarabovi, paní Dr.-Ing. Aně Marie Blanco a potažmo celé TUD za jejich vstřícnost, pravidelné konzultace a poskytnutí prostředků k realizování praktické části práce.

Rád bych také poděkoval své rodině a přátelům za všemožnou podporu po celou dobu studia.

Obsah

Seznam obrázků 10
Seznam tabulek 11
Seznam zkratek 12
Seznam symbolů 13

Úvod **17**

1 Teoretická část **19**
1.1 Harmonické rušení v elektrické síti 19
1.1.1 Zdroje rušení 20
1.1.2 Účinky rušení 20
1.1.3 Omezení rušení 21
1.1.4 Kvalita elektrické energie 22
1.2 Emise 23
1.2.1 Měření 23
1.2.2 Emisní úroveň 23
1.2.3 Emisní limity 24
1.3 Definice pojmů 25
1.3.1 Fourierova transformace 25
1.3.2 Náhradní schéma 26
1.3.3 Total harmonic distortion - THD 27
1.3.4 Lineární a nelineární zátěž 27
1.3.5 Zkreslující a nezkreslující zátěž 28
1.3.6 Rezonance 28

1.4 Definice výkonu 29
1.4.1 Norma IEEE 1459-2010 29
1.4.2 Current's Physical Components Theory - CPC teorie 31
1.5 Referenční metody 33
1.5.1 Voltage Harmonic Vector metoda 33
1.5.2 IEC Voltage Phasor metoda 36
1.6 Metriky založené na výkonu 37
1.6.1 Harmonický činný výkon 37
1.6.2 Jalový fiktivní výkon 38
1.6.3 Roztroušený výkon 39
1.6.4 Původní záměr CPC teorie 41
1.6.5 Upravené použití CPC teorie 43
1.6.6 Upravené použití IEEE výkonů 44

2 Simulace **45**
2.2 Lineární zátěž 47
2.2.1 Rezistivní zátěž 47
2.2.2 Zátěž induktivního charakteru 49
2.2.3 Zátěž kapacitního charakteru 50
2.2.4 Paralelní RLC zátěž 52
2.2.5 Komplexnější induktivní zátěž 53
2.2.6 Komplexnější kapacitní zátěž 54
2.3 Modely nelineární zátěže 55
2.3.1 CFL 55
2.3.2 LED světlo 57

3 Analýza naměřených dat **59**
3.1 Seznámení s procesem měření 59
3.2 Analýza výsledků 60

Závěr **62**

Použitá literatura 66

Přílohy 67

A Výsledky simulace pro obvod s rezistivní zátěží 68

B Výsledky simulace pro obvod s induktivní zátěží 70

C Výsledky simulace pro obvod s kapacitní zátěží 72

D Výsledky simulace pro obvod s RLC zátěží 74

E Výsledky simulace pro komplexnější indukt. zátěž 76

F Výsledky simulace pro komplexnější kapacit. zátěž 78

G Výsledky simulace pro CFL 80

H Výsledky simulace pro LED světlo 82

I Výsledky pro naměřená data 84

Seznam obrázků

1.1 Ukázka harmonických frekvencí a zkresleného průběhu proudu 20
1.2 Znázornění vektoru $\hat{U}_{hi}$ 24
1.3 Náhradní schéma 26
1.4 Náhradní obvod pro metodu VHV 34
1.5 Náhradní obvod po uplatnění principu superpozice 34
1.6 Transformace reaktance na zdroj proudu [12] 35
1.7 Fázory napětí pro metodu IEC 36
1.8 a) Náhradní obvod pro harmonické $h \in D$ a b) náhradní obvod pro harmonické $h \in C$ [9] 42
1.9 Náhradní obvod s užitím CPC teorie 43

2.1 Simulační schéma pro rezistivní zátěž 47
2.2 Simulační schéma pro zátěž induktivního charakteru 49
2.3 Simulační schéma pro zátěž kapacitního charakteru 50
2.4 Simulační schéma pro paralelní RLC zátěž 52
2.5 Simulační schéma pro komplexnější induktivní zátěž 53
2.6 Simulační schéma pro komplexnější kapacitní zátěž 54
2.7 Simulační schéma pro model CFL 55
2.8 Simulační schéma pro model LED světla 57

3.1 Schématická reprezentace měření [18] 60

Seznam tabulek

1.1 Faktory proporcionality pro vybrané harmonické 24
1.2 Chování D_s při různých podmínkách [15] 40

2.1 Parametry napětí zdrojů v simulacích 46

3.1 Parametry aplikovaných harmonických napětí zdroje 59

Seznam zkratek

CFL	Compact fluorescent lamp
CPC	Current's Physical Components
DFT	Discrete Fourier Transform
FFT	Fast Fourier Transform
HMT	Harmonic Mitigating Transformers
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LED	Light Emitting Diode
NPFC	Non-Power Factor Correction
PCC	Point of Common Coupling
PFC	Power Factor Correction
POC	Point Of Connection
POE	Point Of Evaluation
RMS	Root Mean Square
THD	Total harmonic distortion
TUD	Technische Universität Dresden
VHV	Voltage Harmonic Vector

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
B_h	S	Susceptance harmonické
C	F	Kapacita
$D_{h\mathrm{s}}$	W	Roztroušený výkon harmonické
D_{I}	var	Deformační výkon proudu
D_{s}	W	Roztroušený výkon
D_{V}	var	Deformační výkon napětí
ΔG_h	S	Rozdíl vodivosti harmonické od ekvivalentní vodivosti
f	Hz	Frekvence
f_0	Hz	Rezonanční frekvence
G_{e}	S	Ekvivalentní vodivost
G_h	S	Vodivost harmonické
h	-	Řád harmonické
H	-	Počet harmonických
I	A	Elektrický proud
I_1	A	Fundamentální proud
$I_{1\mathrm{POC}}$	A	Fundamentální proud v POC
I_{a}	A	Činná složka proudu
$\hat{I}_h$	A	Proud harmonické
I_{H}	A	Efektivní hodnota harmonických složek proudu
$\hat{I}_{h\mathrm{a}}$	A	Činná složka proudu harmonické
$\hat{I}_{h\mathrm{C}}$	A	Zdroj proudu na straně odběratele
$I_{H\mathrm{POC}}$	A	Efektivní hodnota harmonických složek proudu v POC
$\hat{I}_{h\mathrm{POC}}$	A	Proud harmonické v POC
$\hat{I}_{h\mathrm{r}}$	A	Jalový proud harmonické
$\hat{I}_{h\mathrm{s}}$	A	Roztroušený proud harmonické
$\hat{I}_{\mathrm{P}h}$	A	Složka proudu dle činného výkonu harmonické

Symbol	Jednotka	Popis
I_{POC}	A	Efektivní hodnota proudu v POC
$\hat{I}_{\mathrm{Q}h}$	A	Složka proudu dle jalového výkonu harmonické
I_{r}	A	Jalový proud
I_{s}	A	Roztroušený proud
$\hat{I}_{\mathrm{S}h}$	A	Složka proudu dle zdánlivého výkonu harmonické
$i(t)$	A	Průběh proudu
L	H	Indukčnost
λ	-	Účiník
N	var	Neaktivní výkon
ω	$rad\, s^{-1}$	Úhlová rychlost
P	W	Činný výkon
P_1	W	Fundamentální činný výkon
P_h	W	Činný výkon harmonické
P_H	W	Harmonický činný výkon
p_h	-	Faktor proporcionality
$p(t)$	W	Okamžitý výkon
φ	rad	Úhel mezi fázory napětí a proudu/Fázový posun
φ_1	rad	Úhel mezi fázory fundamentálního napětí a proudu
$\varphi_{1\mathrm{POC}}$	rad	Úhel mezi fázory fundamentálního napětí a proudu v POC
$\varphi_{H\mathrm{POC}}$	rad	Úhel mezi fázory celkového napětí a proudu v POC
$\varphi_{h\mathrm{POC}}$	rad	Úhel mezi fázory napětí a proudu harmonické v POC
Q	var	Jalový výkon
Q_1	var	Fundamentální jalový výkon
$Q_{h\mathrm{X}}$	var	Jalový fiktivní výkon harmonické
Q_{X}	var	Jalový fiktivní výkon
R_{C1p}	Ω	Referenční impedance
S	VA	Zdánlivý výkon

Symbol	Jednotka	Popis
S_1	VA	Fundamentální zdánlivý výkon
S_A	VA	Sjednaný výkon instalace
S_H	VA	Harmonický zdánlivý výkon
S_N	VA	Nefundamentální jalový výkon
S_SC	VA	Zkratový výkon v POC
t	s	Čas
THD	%	Total harmonic distortion
U	V	Napětí
U_1	V	Fundamentální napětí
U_1POC	V	Fundamentální napětí v POC
$\hat{U}_h$	V	Napětí harmonické
U_H	V	Efektivní hodnota harmonických složek napětí
$\hat{U}_{h\mathrm{aC}}$	V	Činná složka napětí harmonické na impedanci sítě
$\hat{U}_{h\mathrm{bg}}$	V	Napětí v POC před připojením odběratele
$\hat{U}_{h\mathrm{C}}$	V	Zdroj napětí na straně odběratele
$\hat{U}_{h\mathrm{em}}$	V	Podíl odběratele na zkreslení
$\hat{U}_{h\mathrm{i}}$	V	Emisní úroveň instalace
$U_{h\mathrm{lim\ i}}$	V	Emisní limit napětí
$\hat{U}_{h\mathrm{POC}}$	V	Napětí harmonické v POC
U_HPOC	V	Efektivní hodnota harmonických složek napětí v POC
$\hat{U}_{h\mathrm{rC}}$	V	Jalová složka napětí harmonické na impedanci sítě
$\hat{U}_{h\mathrm{sC}}$	V	Roztroušená složka napětí harmonické na impedanci sítě
$\hat{U}_{h\mathrm{U}}$	V	Zdroj napětí na straně sítě
U_n	V	Jmenovité napětí sítě
$\hat{U}_{\mathrm{P}h\mathrm{C}}$	V	Napětí na impedanci sítě dle činného výkonu harmonické
$\hat{U}_{\mathrm{p}h\mathrm{U}}$	V	Podíl sítě na zkreslení

Symbol	Jednotka	Popis
$\hat{U}_{\mathrm{p}h\mathrm{C}}$	V	Podíl odběratele na zkreslení
U_{POC}	V	Efektivní hodnota napětí v POC
$\hat{U}_{\mathrm{Q}h\mathrm{C}}$	V	Napětí na impedanci sítě dle jalového výkonu harmonické
$\hat{U}_{\mathrm{S}h\mathrm{C}}$	V	Napětí na impedanci sítě dle zdánlivého výkonu harmonické
$u(t)$	V	Průběh napětí
$X_{\mathrm{C}h\mathrm{p}}$	Ω	Reaktance impedance na straně odběratele
$\hat{Y}$	S	Admitance
$\hat{Y}_h$	S	Admitance harmonické
$\hat{Z}$	Ω	Impedance
$\hat{Z}_{h\mathrm{C}}$	Ω	Impedance na straně odběratele
$\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$	Ω	Impedance sítě

Úvod

V dnešní době, kdy je lidstvo stále více závislé na elektronice, se stává kvalita elektrické energie důležitější než kdy jindy. Jedním z hlavních problémů, který ovlivňuje tuto kvalitu je harmonické rušení. Toto rušení může způsobovat problémy v elektrických zařízeních, snižovat jejich efektivitu a zkracovat jejich životnost. Kromě toho může negativně ovlivňovat bezpečnost a spolehlivost elektrických sítí. Aby se toto rušení omezilo, je před připojením velkého odběratele elektrické energie do sítě nutné provést posouzení jeho vlivu na úroveň harmonického zkreslení v rozvodné soustavě, aby nedošlo k překročení limitů přidělených operátorem sítě.

V současné době jsou pro rozlišení vlivu zákazníka a sítě nejběžněji používané metody založené na práci s napětím a proudem. Cílem této práce je prozkoumat možnosti využití různě definovaných výkonů v dané problematice, kde je největší pozornost upírána zejména na CPC teorii a výkony definované průmyslovým standardem IEEE. Prozkoumány jsou ovšem i další, odlišné přístupy.

V teoretické části je představena problematika harmonického rušení a jsou zde uvedeny příklady co za ním stojí, jaké jsou jeho následky a jak ho omezit. Dále je kapitola věnována posuzování harmonického rušení z hlediska emisí. Zde je popsáno co vlastně emise jsou, jak se měří a podle čeho se určuje jejich nejvyšší přípustná úroveň. Je popsána definice výkonů dle normy IEEE 1459-2010, která se zabývá standardním pojetím výkonů, a dle CPC teorie, která se zaměřuje zejména na různé druhy zkreslení. Na základě rešerše jsou jako vhodné porovnání pro metriky založené na výkonu vybrány dvě referenční metody, které jsou přesné, spolehlivé a v praxi využívané. Poté jsou popsány buď již existující anebo nová využití výkonů

se zaměřením buď na identifikaci zdroje harmonického rušení anebo na odhalení nelinearity zátěže.

V rámci praktické části jsou provedeny simulace různých druhů zátěží, na kterých jsou analyzovány popsané metody. Totéž je provedeno na dodaných naměřených datech. V závěru je na základě výsledků diskutována vhodnost použití jednotlivých metrik využívajících elektrický výkon pro posouzení vlivu odběratele na harmonické rušení.

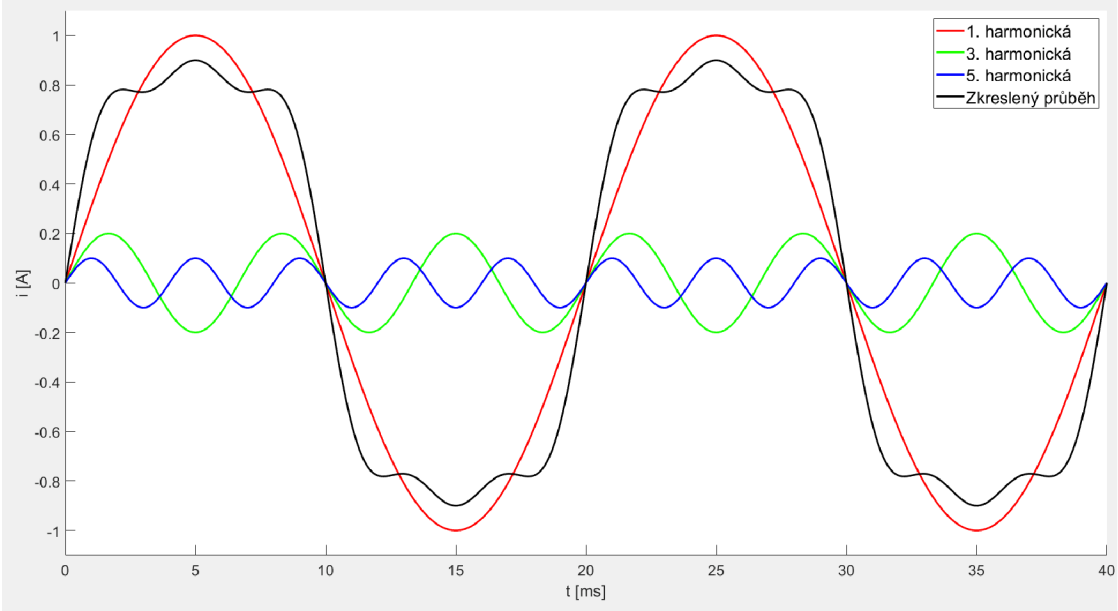
1 Teoretická část

Problematika harmonického rušení je široké téma, na které je vypracováno mnoho studií. Teoretická část práce se snaží o shrnutí všech podstatných informací a dále se zaměřuje na jádro této práce, což je použití elektrického výkonu.

Jelikož se v literatuře často používá odlišný matematický popis, je v této práci kvůli přehlednosti značení sjednoceno. Fázory veličin nebo komplexní čísla jsou značeny stříškou $\hat{X}$. Samotné velké písmeno X označuje efektivní hodnotu (RMS) veličiny, neboli magnitudu fázoru. Index veličiny s malým písmenem h značí příslušnost k individuální harmonické složce. Velké písmeno H znázorňuje buď všechny vyšší harmonické, což je používáno zejména jako index u efektivních hodnot, nebo reprezentuje počet harmonických složek.

1.1 Harmonické rušení v elektrické síti

Harmonické rušení je jev vyskytující se v elektrických sítích, který je způsoben nelinearitou elektrických zátěží. Je to zkreslení elektrického napětí a proudu, které je zapříčiněno přítomností frekvencí, které jsou celočíselnými násobky základní (fundamentální) frekvence sítě.



Obrázek 1.1: Ukázka harmonických frekvencí a zkresleného průběhu proudu

1.1.1 Zdroje rušení

Hlavními zdroji produkce harmonických složek jsou [1]:

- Zařízení výkonové elektroniky, např. frekvenční měniče, usměrňovače, LED světla, počítače nebo nabíjecí stanice pro elektromobily
- Průmyslová zařízení, např. elektrické pece, svařovací stroje a velké motory
- Zařízení se stejnosměrným napájením, např. televizní přijímače nebo fluorescenční zářivky s integrovaným elektrickým předřadníkem

1.1.2 Účinky rušení

Vysoký podíl harmonických složek v napájecím napětí může vést ke zhoršení jak provozu energetického systému, tak i přístrojů a instalací uživatelů sítě, které jsou na tvaru křivky napájecího napětí závislé. Problémy, jenž mohou nastat jsou např. [1]:

- Zkrácení životnosti kondenzátorů a motorů v důsledku zvýšeného tepelného namáhání

- Akustické rušení u zařízení s elektromagnetickými obvody, např. tlumivky, transformátory a motory
- Přenos harmonických složek do zařízení pro komunikaci a informační technologie
- Provozní závady v elektronických přístrojích
- Poruchy funkce přijímačů pro řízení sítě a ochranného vybavení
- Komplikace při odstraňování zemních poruch v elektrických sítích

1.1.3 Omezení rušení

Filtry

Jednou z nejběžnějších a nejúčinnějších metod prevence harmonického zkreslení je použití filtrů. Filtry jsou zařízení, která mohou blokovat nebo tlumit harmonické frekvence a umožňují průchod základní frekvence. Existují různé typy filtrů, jako jsou pasivní, aktivní a hybridní filtry, které lze navrhnout a instalovat podle charakteristik a požadavků systému.

HMT

Transformátory pro zmírnění harmonických (označovány HMT - Harmonic Mitigating Transformers) jsou speciální typy transformátorů, které jsou konstruovány s ohledem na snížení harmonického zkreslení. Základní princip, na kterém HMT pracují, spočívá v kombinaci průběhů tak, že kladná část harmonické složky z jedné zátěže přispívá k záporné části harmonické složky z jiné zátěže. Toto sčítání vede k úplnému vyrušení harmonických, když jsou zátěže zcela vyvážené, ale je možné dosáhnout výrazně nižšího zkreslení i u nevyvážených zátěží. Elektrická síť je tak izolována od harmonických složek, které jsou ale stále přítomné v sekundárních vinutích a na straně zátěže [2].

PFC

Snížení emisí harmonických u jednotlivých zařízení je možné dosáhnout také upravením tvaru proudu, který zařízení odebírá, za použití korektoru účiníku - PFC (Power Factor Correction). Ty jsou často používány u usměrňovačů napětí, kde by účiník bez korektivních opatření obvykle nebyl vyhovující. Korektory účiníku se dělí na pasivní a aktivní typy PFC.

1.1.4 Kvalita elektrické energie

Každý odběratel má právo na odběr elektrické energie o jasně specifikovaných parametrech, které udává norma ČSN EN 50160 [3]. Mezi základní parametry, které jsou indikátorem kvality dodávané elektrické energie, patří velikost napětí, frekvence, sinusový průběh a symetrie mezi jednotlivými fázemi v třífázovém systému.

U nízkonapěťových čtyřvodičových sítí by napětí mezi fázovým a středním vodičem mělo být 230 V, pro sdružené napětí mezi dvěma fázovými vodiči je požadovaná hodnota 400 V. Jelikož ale připojování a odpojování různých zátěží způsobuje kolísání velikosti napětí, je stanoveno, že pro sítě nízkého napětí 230 V proti zemi musí 95 % hodnot efektivního napájecího napětí měřeného v desetiminutových intervalech být v rozsahu 207 až 253 V. Tento rozsah odpovídá toleranci 10 %.

Síťová frekvence činí 50 Hz a po 99,5 % roku musí být v rozsahu 49,5 až 50,5 Hz. Kmitočet napětí však nikdy nesmí překročit rozmezí 47 až 52 Hz.

Pro správné fungování spotřebičů a zařízení připojených k síti musí být průběh jejich napájecího napětí co nejbližší tvaru průběhu na svorkách generátoru v elektrárně, který generuje sinusové napětí. Symetrií mezi fázemi se rozumí, že velikost napětí v každé ze tří fází je stejná a napětí v každé fázi jsou navzájem fázově posunuta o 120° [4].

1.2 Emise

Popis měření emisní úrovně a stanovení limitů slouží k lepší představě o problematice z praktického hlediska. Popsaný postup je v souladu s metodou IEC, která je detailněji popsána v kapitole 1.5.2.

1.2.1 Měření

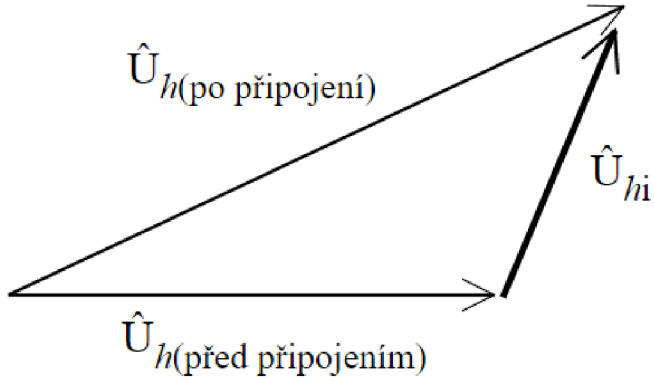
K měření se používají analyzátory kvality energie, které umožňují získat parametry jako napětí, proud a výkon, ale také harmonické složky těchto veličin, včetně jejich špiček a poklesů. Tyto přístroje mohou rovněž detekovat přerušení průběhu napětí, známé jako flikr (blikání).

Měření se obvykle provádí v desetiminutových intervalech, což umožňuje získat dostatečně reprezentativní data v různých provozních stavech. Pro detailnější analýzu mohou být intervaly zkráceny, zejména pokud je třeba identifikovat krátkodobé fluktuace nebo specifické události spojené s harmonickým rušením.

Typicky je měření prováděno v bodě POC, kde je instalace odběratele připojena k síti. To umožňuje sledovat, jak harmonické zkreslení generované odběratelem ovlivňuje celkovou síť. Pro výrobní zařízení nebo velké průmyslové zátěže, které jsou potenciálními zdroji rušení, může být měření rovněž provedeno přímo u těchto zátěží.

1.2.2 Emisní úroveň

Emisní úroveň harmonických složek, kterou instalace přispívá do elektrické sítě, je rovna magnitudě fázoru napětí nebo proudu pro každou vyšší harmonickou, která je způsobena danou instalací v bodě pro vyhodnocení (POE). Na obr. 1.2 je znázorněn tento fázor $\hat{U}_{hi}$ a jak přispívá, společně s napětím způsobeným všemi ostatními zdroji harmonických před připojením dané instalace k síti, k naměřenému harmonickému napětí po připojení instalace [5].



Obrázek 1.2: Znázornění vektoru $\hat{U}_{h\text{i}}$

1.2.3 Emisní limity

Dle technických pravidel DACHCZ [1] je emisní limit pro konkrétní harmonické napětí pro daného odběratele vypočítán:

$$U_{h\text{lim i}} = \frac{hp_h}{1000}\sqrt{\frac{S_\text{A}}{S_\text{SC}}}\frac{U_\text{n}}{\sqrt{3}}, \tag{1.1}$$

kde $U_{h\text{lim i}}$ je limit harmonické složky napětí způsobené danou instalací, h je řád harmonické, p_h je faktor proporcionality, který je určen dle tabulky 1.1, S_A je sjednaný výkon instalace, S_SC je zkratový výkon v POC a U_n je jmenovité napětí sítě.

h	3	5	7	9	11	13	15	17
p_h	5,7	13,1	7,8	1,2	5,1	3,7	0,3	2,6

Tabulka 1.1: Faktory proporcionality pro vybrané harmonické

1.3 Definice pojmů

Následující pojmy jsou důležité pro lepší pochopení problematiky a zároveň budou v této práci dále používány.

1.3.1 Fourierova transformace

Jelikož se práce věnuje veličinám výhradně ve frekvenční oblasti, je nutné popsat přechod mezi časovou a právě frekvenční oblastí. K tomu je používán matematický nástroj, nazývaný Fourierova transformace, používaný k analýze frekvencí obsažených v signálu nebo funkci. Jedná se o integrální transformaci, která je pro jakýkoli spojitý periodický signál definována vztahem:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} \, \mathrm{d}t \tag{1.2}$$

Pro praktické výpočty a analýzu digitálních signálů se častěji používá diskrétní Fourierova transformace (DFT):

$$F(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^{N} f(k) e^{i\omega kn/N} \tag{1.3}$$

Výsledkem DFT je sada komplexních čísel (fázorů), která reprezentují amplitudu a fázi pro každou frekvenci. Důležitým faktorem je vhodné stanovení vzorkovací frekvence F_s, která určuje maximální možnou detekovatelnou frekvenci. Pro ni dle Nyquistova teorému platí, že je rovna polovině F_s. U vyšších, nedetekovaných frekvencí potom dochází k aliasingu, čili přeložení do nižších frekvencí. Získané spektrum je rovněž ovlivněno počtem period signálu použitých pro DFT.

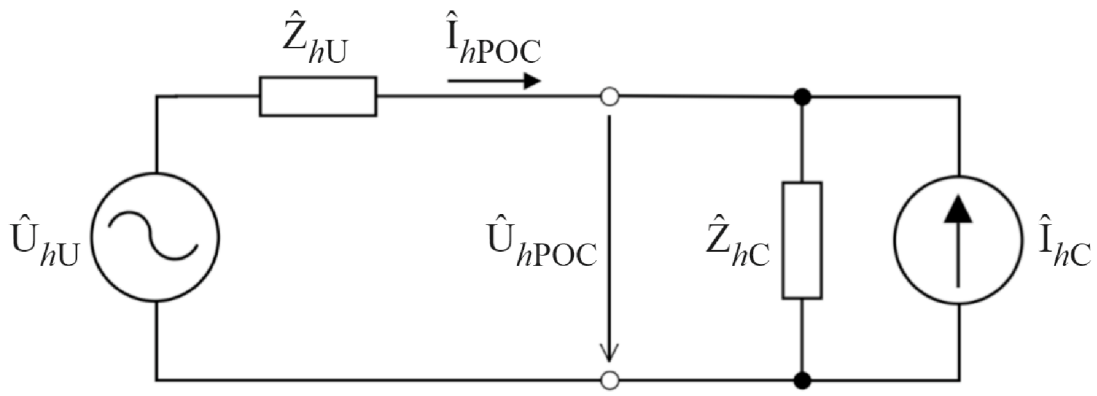
Spektrum získané prostřednictvím DFT se skládá ze stejného počtu prvků (N) jako byl počet vzorků ve zkoumaném signálu. Polovina těchto vzorků ale znázorňuje zápornou frekvenci a je komplexně sdruženou hodnotou jejich protějšku v kladné části spektra. Obě části spektra tak poskytují stejnou informaci, pouze rozdělenou do dvou komplexních čísel. V praxi se často používá tzv. jednostranné

spektrum, kde je vhodné amplitudy vynásobit dvěma, aby se započetly přínosy prvků ze záporné poloviny spektra.

Pro snížení časové složitosti DFT se často používá algoritmus, který zefektivňuje její výpočet, zvaný FFT (Fast Fourier Transform) [6].

1.3.2 Náhradní schéma

Náhradní schéma, které lze vidět na obr. 1.3, se používá k analýze vlivu harmonického rušení na elektrickou síť. Schéma zahrnuje Théveninův náhradní obvod, reprezentující rozvodnou síť, charakterizovaný zdrojem napětí $\hat{U}_{h\mathrm{U}}$ a sériovou impedancí $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$. Nortonův náhradní obvod reprezentuje stranu zákazníka a je charakterizovaný zdrojem proudu $\hat{I}_{h\mathrm{C}}$ a paralelní impedancí $\hat{Z}_{h\mathrm{C}}$. Tyto prvky jsou propojeny v bodě POC (bod připojení), kde se měří hodnoty napětí $\hat{U}_{h\mathrm{POC}}$ a proudu $\hat{I}_{h\mathrm{POC}}$. Kromě POC existuje také bod PCC (bod spojení), oba tyto body spadají pod označení POE (bod pro vyhodnocení). Pro různé metody posuzování vlivu obou stran na harmonické rušení je ale možné používat obdoby tohoto obvodu, kde se kombinuje Théveninův a Nortonův náhradní obvod.



Obrázek 1.3: Náhradní schéma

1.3.3 Total harmonic distortion - THD

THD vyjadřuje míru harmonického zkreslení přítomného v signálu a je definováno jako poměr efektivní hodnoty součtu všech harmonických složek až po určitý řád (H) a efektivní hodnoty fundamentální složky. Rozděluje se na $\mathrm{THD_u}$ a $\mathrm{THD_i}$ dle toho, zda se určuje zkreslení napětí nebo proudu. Pro obě možnosti obecně platí:

$$\mathrm{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H} X_h^2}}{X_1} \cdot 100, \tag{1.4}$$

kde X je buď napětí nebo proud a X_1 je fundamentální složka. Výsledek bývá vyjádřen v procentech.

1.3.4 Lineární a nelineární zátěž

Lineární a nelineární zátěže představují dva základní typy elektrických zátěží, které se liší svým chováním v reakci na aplikované napětí. Lineární zátěže, jako jsou rezistory, ideální induktory a kondenzátory, se vyznačují stálým vztahem mezi proudem a napětím, který je popsán Ohmovým zákonem:

$$\hat{I} = \frac{\hat{U}}{\hat{Z}}. \tag{1.5}$$

Tento lineární vztah znamená, že proud protékající těmito zátěžemi je přímo úměrný aplikovanému napětí. Na druhé straně, nelineární zátěže, které zahrnují mnoho moderních elektronických zařízení (viz kap. 1.1.1), mají proměnlivý vztah mezi proudem a napětím. Pracují tak, že odebírají proud v krátkých a rychlých pulzech, což zkresluje průběh proudu a vede k produkci harmonických složek.

1.3.5 Zkreslující a nezkreslující zátěž

Zátěž se obvykle rozděluje na lineární a nelineární, kde právě nelineární se považuje za zdroj produkce harmonických. Ale dle [7], pokud je u lineární zátěže zkreslený už průběh u napájecího zdroje, může i taková zátěž přispívat ke zkreslení. Za nezkreslující zátěž se považuje taková, která má na všech frekvencích konstantní fázový úhel impedance, což se prakticky nestává. Pokud se naopak fázový úhel s frekvencí mění, považuje se za zkreslující. Při ideálních napájecích podmínkách se tedy induktivní i kapacitní zátěž bude jevit jako nezkreslující, ale při už zkresleném průběhu bude dané zkreslení jen zesilovat anebo zmenšovat v závislosti na charakteru zátěže. Oproti tomu nelineární zátěž bude produkovat zkreslení bez ohledu na napájecí podmínky [7].

Některé metody pro identifikaci zdroje rušení tento rozdíl nezohledňují a následkem je, že i zátěž, která nezpůsobuje zkreslení se dle výsledků jeví, i když jen malou měrou, jako zkreslující.

1.3.6 Rezonance

K rezonanci v elektrickém obvodu s cívkou a kondenzátorem dochází, když jsou si reaktance cívky a reaktance kondenzátoru navzájem rovné. Tento stav vede k tomu, že je celková impedance obvodu minimální anebo čistě rezistivní. Pro nejjednodušší případ, tedy při sériovém zapojení je rezonanční frekvence f_0 určena vzorcem:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \tag{1.6}$$

kde L je indukčnost cívky a C kapacita kondenzátoru.

1.4 Definice výkonu

Tato část popisuje dva různé přístupy k definování výkonových veličin, z nichž první je norma IEEE 1459-2010 a druhý CPC teorie. Prvně jmenovaný se snaží o standardní definování základních i složitějších výkonů, zatímco CPC teorie se věnuje hlavně různému zkreslení a jeho propojení s fyzikálními jevy [6]. Jelikož se práce zabývá pouze jednofázovými systémy, jsou vynechány ty části definic, které se věnují těm třífázovým.

1.4.1 Norma IEEE 1459-2010

Tato norma [8] poskytuje souhrn tradičního přístupu k definici výkonů v systémech s jednou i třemi fázemi. Definuje výkonové parametry pro situace, kde se zohledňuje harmonické zkreslení, fázová nesymetrie, nebo jejich kombinace. S výjimkou okamžitého výkonu jsou všechny výkonové veličiny agregovány z analyzovaného časového intervalu.

Následující definice zůstávají ve všech dále uvedených případech stejné. Jedinou výjimkou v definicích IEEE je okamžitý výkon, který je pojat jako funkce času:

$$p(t) = u(t)i(t). \tag{1.7}$$

Činný výkon představuje průměrnou hodnotu okamžitého výkonu po dobu měřeného intervalu. Je definován skalárním součinem mezi napětím a proudem, přičemž čím více mají tyto dva průběhy společného, tím je činný výkon vyšší:

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p(t)\, dt, \quad k \in \mathbb{N}. \tag{1.8}$$

Zdánlivý výkon je nejobecnější výkon, který v sobě zahrnuje všechny ostatní činné i neaktivní složky. Je součinem efektivních hodnot napětí a proudu:

$$S = UI. \tag{1.9}$$

Poměr činného a zdánlivého výkonu je veličina zvaná účiník [6]:

$$\lambda = \frac{P}{S}. \tag{1.10}$$

IEEE: 1-fázový systém bez harmonického zkreslení

Pro harmonický průběh platí:

$$P = UI\cos\varphi, \tag{1.11}$$

$$Q = UI\sin\varphi, \tag{1.12}$$

kde φ je úhel mezi fázory napětí a proudu. Ze vztahů vyplývá, že zvětšováním tohoto úhlu bude činný výkon klesat a jalový naopak narůstat.

Pro vztah mezi činným, jalovým a zdánlivým výkonem potom platí [6]:

$$P^2 + Q^2 = U^2I^2(\sin\varphi^2 + \cos\varphi^2) = U^2I^2 = S^2. \tag{1.13}$$

IEEE: 1-fázový systém s harmonickým zkreslením

Pro tento případ se rozlišuje fundamentální činný výkon a harmonický činný výkon:

$$P_1 = U_1I_1\cos\varphi_1, \quad P_\mathrm{H} = \sum_{h\neq 1}^{H} U_hI_h\cos\varphi_h = P - P_1. \tag{1.14}$$

Dále je třeba rozlišovat i fundamentální jalový výkon a neaktivní výkon:

$$Q_1 = U_1I_1\sin\varphi_1, \quad N = \sqrt{S^2 - P^2}. \tag{1.15}$$

Zdánlivý výkon se dělí na fundamentální a nefundamentální zdánlivý výkon:

$$S_1 = U_1I_1, \quad S_\mathrm{N} = \sqrt{S^2 - S_1^2}. \tag{1.16}$$

Z nefundamentálního lze potom definovat ještě deformační výkon proudu, deformační výkon napětí a harmonický zdánlivý výkon:

$$S_{\mathrm{N}}^2 = D_{\mathrm{I}}^2 + D_{\mathrm{V}}^2 + S_{\mathrm{H}}^2, \quad D_{\mathrm{I}} = U_1 I_{\mathrm{H}}, \quad D_{\mathrm{V}} = U_{\mathrm{H}} I_1, \quad S_{\mathrm{H}} = U_{\mathrm{H}} I_{\mathrm{H}}. \tag{1.17}$$

Ze vztahů potom vyplývá [6]:

$$S^2 = S_1^2 + D_{\mathrm{I}}^2 + D_{\mathrm{V}}^2 + S_{\mathrm{H}}^2. \tag{1.18}$$

1.4.2 Current's Physical Components Theory - CPC teorie

CPC teorie, představená prof. L. S. Czarneckim [9], je pokročilým přístupem k pochopení fenoménů elektrického výkonu v elektrických systémech, zejména těch s nesinusovými napětími a proudy. Základem tohoto konceptu je, že se výskyt jednotlivých složek výkonů dá vysvětlit fyzikálně identifikovatelnými jevy, podle čeho je i odvozen jeho název [6].

Využívá se Fryzeho definic [10] činného a neaktivního výkonu pomocí rozkladu proudu. CPC teorie tento rozklad rozšiřuje a definuje tak další složky proudu popsané níže. Část teorie, která se přímo věnuje řešení pro zátěže generující harmonické složky je popsána v kapitole 1.6.4.

CPC: činný výkon

CPC teorie definuje činný výkon pomocí ekvivalentní vodivosti G_{e}, která slouží k dopočítání činné složky proudu. Tato vodivost vychází ze vztahu:

$$G_{\mathrm{e}} = \frac{P}{U^2}, \tag{1.19}$$

kde P je činný výkon z definice IEEE (1.14) a U je celková efektivní hodnota napětí.

Pro činnou složku proudu a následně samotný činný výkon platí:

$$i_{\mathrm{a}}(t) = \mathrm{Re}\left\{\sum_{h=1}^{H} G_{\mathrm{e}}\hat{U}_h e^{j\omega ht}\right\}, \quad P = UI_{\mathrm{a}}. \tag{1.20}$$

Tento výkon, ačkoli se shoduje s hodnotami činného výkonu dle IEEE, je vždy nezáporný [6].

CPC: jalový výkon

Jalový výkon, který je podobně jako u IEEE považován za neužitečný výkon, vzniká v případě, kdy mezi napětím a proudem existuje nenulový fázový posun. CPC ovšem zachází přímo k důvodu tohoto posunu - zátěži, se kterou se pracuje jako s komplexní admitancí:

$$\hat{Y}_h = \frac{\hat{I}_h}{\hat{U}_h} = G_h + jB_h. \tag{1.21}$$

Jalový proud a výkon jsou potom definovány takto:

$$i_{\mathrm{r}}(t) = \mathrm{Re}\left\{\sum_{h=1}^{H} jB_h\hat{U}_h e^{j\omega ht}\right\}, \quad Q = UI_{\mathrm{r}}. \tag{1.22}$$

Ze vztahu lze opět vyvodit, že jalový výkon nemůže vyjít záporný. Tím se ztrácí možnost určit, zda je charakter zátěže kapacitní nebo induktivní [6].

CPC: roztroušený výkon

Je to deformační složka, která vzniká pokud se reálná složka obecně komplexní admitance mění s frekvencí a závisí na tom, jak moc se liší od ekvivalentní vodivosti G_{e}, kolem které jsou její hodnoty roztroušeny:

$$i_{\mathrm{s}}(t) = \mathrm{Re}\left\{\sum_{h=1}^{H} (G_h - G_{\mathrm{e}})\hat{U}_h e^{j\omega ht}\right\}, \quad D_{\mathrm{s}} = UI_{\mathrm{s}}. \tag{1.23}$$

Pro všechny zmíněné proudy a výkony platí:

$$I^2 = I_\mathrm{a}^2 + I_\mathrm{r}^2 + I_\mathrm{s}^2, \quad S^2 = P^2 + Q^2 + D_\mathrm{s}^2. \tag{1.24}$$

Vztahy pro efektivní hodnoty

Při praktickém výpočtu výkonů dle CPC není nutné pracovat přímo s průběhy jednotlivých složek proudů, ale je možné odvodit vztahy pro efektivní hodnoty, které výpočty usnadňují [6]:

$$I_\mathrm{a} = G_\mathrm{e}\sqrt{\sum_{h=1}^{H} U_h^2}, \tag{1.25}$$

$$I_\mathrm{r} = \sqrt{\sum_{h=1}^{H} B_h^2 U_h^2}, \tag{1.26}$$

$$I_\mathrm{s} = \sqrt{\sum_{h=1}^{H} (G_h - G_\mathrm{e})^2 U_h^2}. \tag{1.27}$$

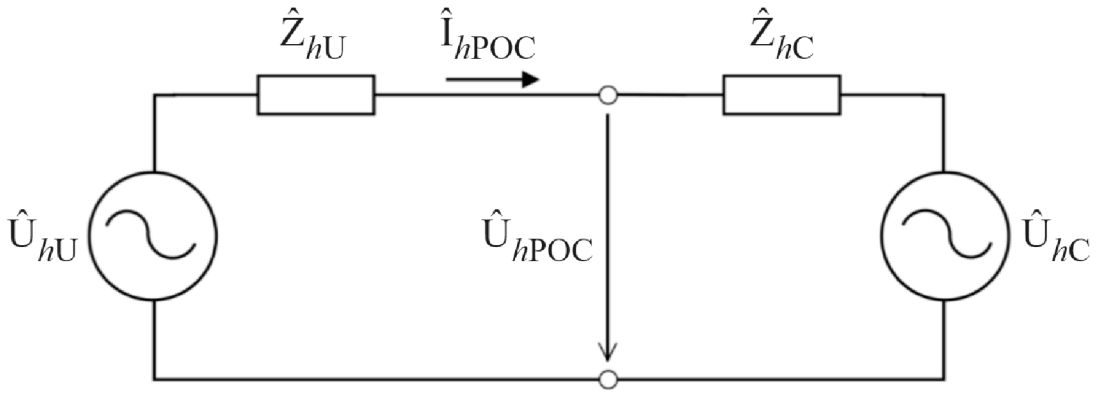
1.5 Referenční metody

Tato část popisuje používané a obecně nejpřesnější metody pro identifikaci zdroje harmonického rušení. Obě metody používají jako ukazatel výsledků napětí, ale každá z metod definuje tato napětí jinak. Liší se také svými požadavky na vstupní data, což znamená rozdíl v možnostech použití v různých situacích.

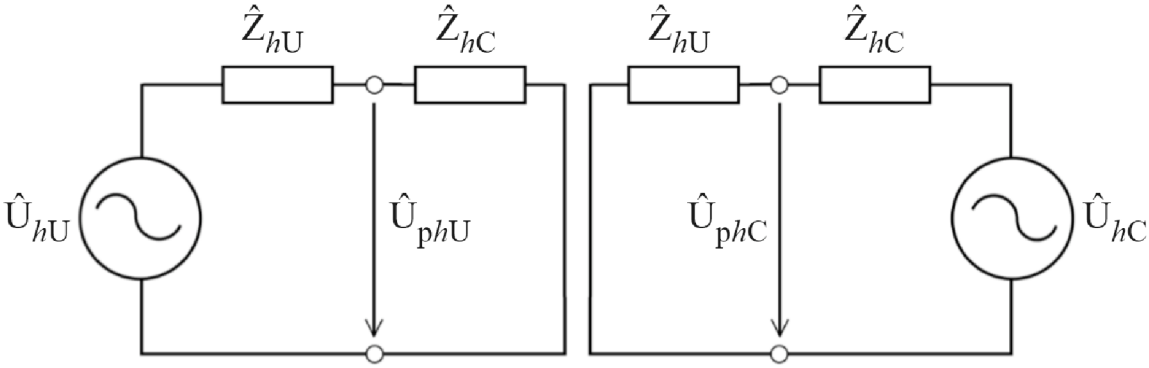
1.5.1 Voltage Harmonic Vector metoda

Voltage Harmonic Vector (VHV) metoda [11] je založena na práci s napětím v náhradním obvodu, kde jsou obě strany reprezentovány Théveninovým náhradním obvodem (viz obr. 1.4). Uplatňuje princip superpozice a rozděluje obvod na dvě části (viz obr. 1.5), kde levá část je použita pro výpočet podílu na rušení ze strany sítě a pravá strana pro výpočet podílu na rušení ze strany odběratele. Tento podíl ze strany sítě je vyjádřen jako pokles napětí na impedanci odběratele $\hat{Z}_{h\mathrm{C}}$, který je

způsoben zdrojem napětí na straně sítě. Stejně to platí i pro podíl odběratele, který je vyjádřen jako pokles napětí na impedanci sítě a je zapříčiněn zdrojem napětí na straně odběratele.



Obrázek 1.4: Náhradní obvod pro metodu VHV



Obrázek 1.5: Náhradní obvod po uplatnění principu superpozice

Hodnoty obou zdrojů napětí lze vypočítat pomocí údajů z POC a hodnot obou impedancí:

$$\hat{U}_{hU} = \hat{U}_{hPOC} + \hat{I}_{hPOC}\hat{Z}_{hU}, \tag{1.28}$$

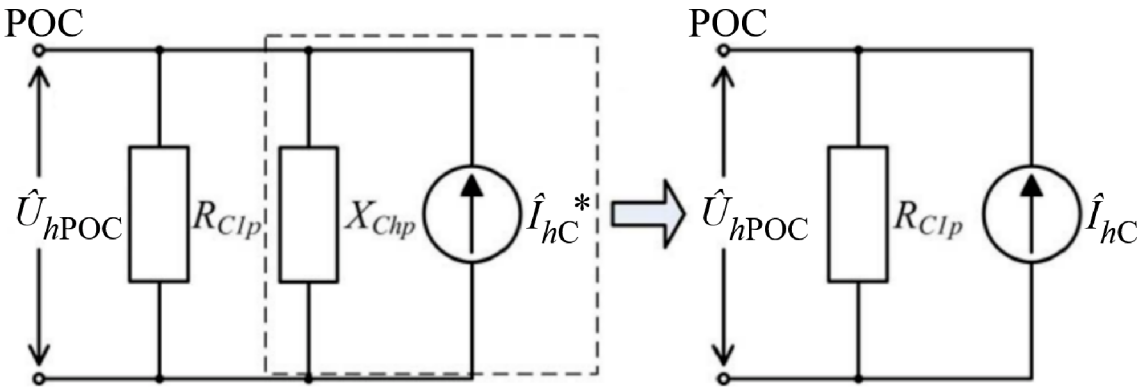
$$\hat{U}_{hC} = \hat{U}_{hPOC} - \hat{I}_{hPOC}\hat{Z}_{hC}. \tag{1.29}$$

Výsledné podíly obou stran na rušení jsou vypočítány jako:

$$\hat{U}_{\mathrm{p}h\mathrm{U}} = \frac{\hat{Z}_{h\mathrm{C}}}{\hat{Z}_{h\mathrm{U}} + \hat{Z}_{h\mathrm{C}}} \hat{U}_{h\mathrm{U}}, \tag{1.30}$$

$$\hat{U}_{\mathrm{p}h\mathrm{C}} = \frac{\hat{Z}_{h\mathrm{U}}}{\hat{Z}_{h\mathrm{U}} + \hat{Z}_{h\mathrm{C}}} \hat{U}_{h\mathrm{C}}. \tag{1.31}$$

Hlavní nevýhodou této metody je nutnost znát hodnoty impedancí jak na straně sítě, tak na straně odběratele. Pokud ale zjištění impedance odběratele není možné, lze použít tzv. referenční impedanci [12], kterou reprezentuje rezistivní komponenta, značící se R_{C1p}, již je možné vypočítat z naměřených dat. Využívá se toho, že se impedance dá rozložit jako paralelní spojení rezistoru a reaktance. Díky tomu je možné proud procházející reaktancí transformovat na zdroj harmonického proudu, jak lze vidět na obr. 1.6.



Obrázek 1.6: Transformace reaktance na zdroj proudu [12]

Referenční impedance se dá spočítat z fundamentální složky činného výkonu a napětí:

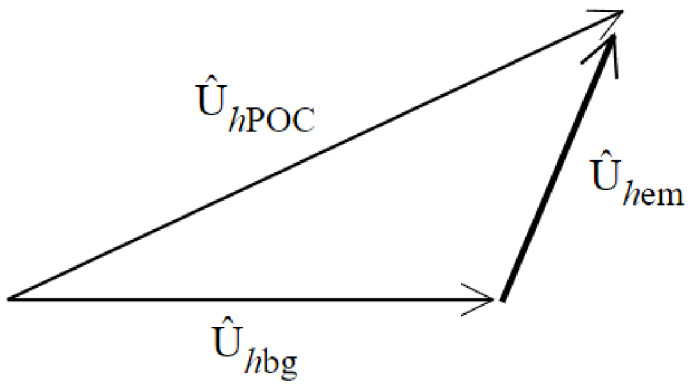
$$R_{\mathrm{C1p}} = \frac{U_{\mathrm{1POC}}^2}{P_1} = \frac{U_{\mathrm{1POC}}}{I_{\mathrm{1POC}} \cos \varphi_{\mathrm{1POC}}}. \tag{1.32}$$

Pomocí ní je potom možné dopočítat samotný zdroj proudu:

$$I_{h\mathrm{C}} = \frac{U_{h\mathrm{POC}}}{R_{\mathrm{C1p}}} - I_{h\mathrm{POC}}. \tag{1.33}$$

1.5.2 IEC Voltage Phasor metoda

Tato metoda, vycházející z [5], je založena na porovnání rozdílů v harmonickém zkreslení napětí před připojením a po připojení odběratele. I tato metoda využívá Théveninův náhradní obvod z obr. 1.4 s tím rozdílem, že vodivost (vycházející z impedance) na straně odběratele se uvažuje jako nulová. Fázor napětí $\hat{U}_{h\mathrm{POC}}$ (viz obr. 1.7) reprezentuje celkové zkreslení napětí v POC po připojení odběratele. $\hat{U}_{h\mathrm{bg}}$ reprezentuje zkreslení napětí před připojením odběratele a odpovídá zdroji napětí na straně sítě $\hat{U}_{h\mathrm{U}}$. Napětí $\hat{U}_{h\mathrm{em}}$ potom znázorňuje úbytek napětí na impedanci sítě a je považováno za míru harmonického zkreslení ze strany odběratele. Výhodou této metody oproti metodě VHV je, že nevyžaduje informaci o hodnotě impedance odběratele a je nutné znát pouze impedanci sítě, popřípadě použít referenční hodnotu dle příslušné normy.



Obrázek 1.7: Fázory napětí pro metodu IEC

Napětí zdroje na straně sítě lze vypočítat přímo z hodnot naměřených v POC:

$$\hat{U}_{h\mathrm{bg}} = \hat{U}_{h\mathrm{U}} = \hat{U}_{h\mathrm{POC}} - (-\hat{I}_{h\mathrm{POC}}\hat{Z}_{h\mathrm{U}}). \tag{1.34}$$

Úbytek napětí na impedanci sítě, reprezentující emise ze strany odběratele, je počítán jako:

$$\hat{U}_{h\mathrm{em}} = \hat{U}_{h\mathrm{POC}} - \hat{U}_{h\mathrm{bg}}. \tag{1.35}$$

Z předešlých vztahů lze vyčíst, že se proud $\hat{I}_{h\mathrm{POC}}$ při výpočtu $\hat{U}_{h\mathrm{em}}$ uvažuje ve směru od zátěže k síti.

Metoda IEC udává [11], že tyto emise existují pouze pokud je magnituda napětí naměřeného po připojení odběratele vyšší než magnituda napětí před připojením, čili musí platit:

$$U_{h\mathrm{POC}} > U_{h\mathrm{bg}}. \tag{1.36}$$

V opačném případě dochází ke kompenzaci napětí v POC, což je přípustné.

1.6 Metriky založené na výkonu

1.6.1 Harmonický činný výkon

Metoda založená na směru činného výkonu harmonické složky [11] je běžně používanou metodou pro určení zodpovědnosti za harmonické zkreslení v síti v POC. Směr harmonického činného výkonu je určen na základě měření harmonických složek napětí a proudu včetně jejich fázových úhlů. Pokud je činný výkon harmonické složky kladný, ukazuje to, že síť je hlavním zdrojem dané harmonické. Záporná hodnota naopak ukazuje, že za harmonické zkreslení odpovídá převážně odběratel. Vzorec pro výpočet harmonického činného výkonu je:

$$P_h = U_{h\mathrm{POC}} I_{h\mathrm{POC}} \cos \varphi_{h\mathrm{POC}}. \tag{1.37}$$

Přestože je tato metoda relativně jednoduchá a rychlá, tak má určitá omezení. Dle [13] totiž závisí hlavně na rozdílu fázových úhlů napětí a proudu $\varphi_{h\mathrm{POC}}$, i když by to měly být magnitudy zdrojů, které by měly mít největší vliv na posouzení zdroje rušení. To má, s přispěním možných chyb při měření, za důsledek, že se tato metoda nedá považovat za naprosto spolehlivou. Další nevýhodou je, že nespecifikuje podíl na harmonickém zkreslení zvlášť pro síť a odběratele, ale určuje pouze, která strana je za zkreslení zodpovědná.

1.6.2 Jalový fiktivní výkon

Metoda popsaná v [14] se zakládá na porovnávání tří různých jalových výkonů, z nichž každý obsahuje různý podíl harmonických složek. Jednotlivými výkony jsou fundamentální jalový výkon Q_1, tzv. fiktivní výkon Q_X a neaktivní výkon N:

$$Q_1 = U_\mathrm{1POC} I_\mathrm{1POC} \sin \varphi_\mathrm{1POC}, \tag{1.38}$$

$$Q_\mathrm{X} = U_\mathrm{POC} \sqrt{I_\mathrm{1POC}^2 \sin^2 \varphi_\mathrm{1POC} + I_\mathrm{HPOC}^2 \sin^2 \varphi_\mathrm{HPOC}}, \tag{1.39}$$

$$N = \sqrt{S^2 - P^2}, \tag{1.40}$$

kde I_HPOC je efektivní hodnota všech vyšších harmonických proudů. $\sin \varphi_\mathrm{HPOC}$ může být vyjádřeno pomocí harmonického činného výkonu a efektivních hodnot harmonických složek napětí a proudu jako:

$$\sin \varphi_\mathrm{HPOC} = 1 - \frac{P_\mathrm{H}^2}{U_\mathrm{HPOC}^2 I_\mathrm{HPOC}^2}. \tag{1.41}$$

Z definic potom vyplývá, že $Q_1 < Q_\mathrm{X} < N$, jelikož Q_1 obsahuje pouze hodnoty základní harmonické a má tak nejnižší hodnotu. N zahrnuje všechny neaktivní komponenty zdánlivého výkonu a proto má hodnotu nejvyšší. Q_X obsahuje Q_1, ale na rozdíl od N ne všechny neaktivní komponenty, jeho hodnota tak leží mezi Q_1 a N.

Při sinusovém průběhu jsou tyto tři hodnoty totožné, ale jinak rozdíly mezi nimi závisí na napájecích podmínkách a zátěži. V případě nesinusového napájení a lineární zátěže je zkreslení proudu nízké a je způsobeno zkreslením napájecího napětí. Zde je rozdíl mezi Q_1 a N nepatrný a Q_X je blíže ke Q_1 než k N. Při nelineární zátěži je zkreslení proudu vyšší a hodnoty Q_1 a N se výrazně liší. Navíc se podíl harmonických na Q_X zvyšuje a tím se přibližuje k N. Pokud je za zkreslení zodpovědná jak zátěž, tak napájení, budou rozdíly mezi jednotlivými výkony značné a Q_X nabývá střední hodnoty mezi Q_1 a N. Rozdíly potom závisí na úrovni zkreslení napětí a proudu, které čím vyšší bude, tím významnější bude podíl harmonických složek na výkonech a tak i rozdíl mezi výkony.

Výhodou této metody je možnost rozšíření pro 3-fázový systém a to tím způsobem, že se ze všech fází sečtou stejné výkony. Značnou nevýhodou naopak je, že výsledky nám udávají pouze podíl na zkreslení celého harmonického spektra a ne jednotlivých harmonických složek, což je pro tuto práci žádoucí. Dle vztahu pro výpočet Q_{X} (1.39) je ale patrné, že tento výkon je možné odvodit i pro každou frekvenci s tím, že by vždy obsahoval složku fundamentální frekvence a složku dané harmonické:

$$Q_{h\mathrm{X}} = U_{\mathrm{POC}} \sqrt{I_{1\mathrm{POC}}^2 \sin^2 \varphi_{1\mathrm{POC}} + I_{h\mathrm{POC}}^2 \sin^2 \varphi_{h\mathrm{POC}}}. \tag{1.42}$$

Pro určení vlivu dané harmonické složky by se postupovalo obdobně jako pro celé harmonické spektrum, tedy že by se $Q_{h\mathrm{X}}$ porovnávalo s fundamentálním jalovým výkonem a celkovým neaktivním výkonem, k tomu ale ještě s celkovou hodnotou Q_{X}, kde by mělo být vidět, jakou měrou se každá harmonická složka podílí na této hodnotě. Pro frekvence, u kterých se nelinearita zátěže vyznačuje nejvíce, by se měla hodnota $Q_{h\mathrm{X}}$ blížit k N a tím i Q_{X}. Tato tvrzení je ovšem potřeba ověřit pomocí simulací.

1.6.3 Roztroušený výkon

Metoda představená v [15] používá pro odhalení harmonického rušení roztroušený výkon vycházející z CPC teorie, který se počítá z naměřených hodnot napětí a proudu v POC. V publikaci je výkon počítán pro celé harmonické spektrum (1.23), nicméně i zde připadá v úvahu možné rozšíření pro každou frekvenci zvlášť.

Metoda uvažuje čtyři možné stavy, kdy je zátěž buď lineární anebo nelineární a kdy je napětí sinusové nebo nesinusové. Tabulka 1.2 ukazuje, jak se roztroušený výkon D_{s} v těchto stavech projevuje.

	Lineární zátěž	Nelineární zátěž
Sinusové napětí (nebo napětí s nízkým $\mathrm{THD_u}$)	D_s má zanedbatelnou hodnotu.	D_s má značnou hodnotu.
Nesinusové napětí (s přiměřenou hodnotou $\mathrm{THD_u}$)	D_s má zanedbatelnou hodnotu.	D_s má značnou hodnotu.

Tabulka 1.2: Chování D_s při různých podmínkách [15]

Pokud má napětí sinusový průběh nebo má nízké $\mathrm{THD_u}$, bude u lineární zátěže celkový zdánlivý výkon velmi podobný zdánlivému výkonu fundamentální složky kvůli tomu, že harmonické složky napětí a proudu jsou zanedbatelné. V důsledku toho má D_s při sinusovém napětí s lineární zátěží pouze nepatrnou hodnotu. Naopak u nelineární zátěže mají harmonické složky vodivosti zátěže podstatně vyšší hodnoty kvůli tomu, že zátěž produkuje harmonické proudy, které jsou výrazně vyšší než příslušná harmonická napětí. Proto nabývá v případě sinusového napětí a nelineární zátěže roztroušený proud I_s značné hodnoty.

Při nesinusovém napětí s přiměřenou hodnotou $\mathrm{THD_u}$ (danou emisními limity) a lineární zátěží nabývají harmonické složky vodivosti zátěže menších hodnot, jelikož jsou harmonické proudy nižší než příslušná napětí. V tomto případě bude tedy I_s a D_s mít pouze nepatrné hodnoty. Na druhou stranu u nelineární zátěže s nesinusovým napětím bude efekt stejný jako se sinusovým napětím a roztroušený výkon tedy bude vysoký.

Jelikož ze samotné hodnoty D_s je obtížné určit, zda ji považovat za vysokou či nízkou, je vhodné ji porovnávat s celkovým činným výkonem zátěže P [16].

Pro rozšíření této metody na každou z frekvencí se nabízí stejný postup jako u metody využívající jalový výkon, tedy určení hodnot $D_{h\mathrm{s}}$ všech harmonických složek a porovnaní s celkovou hodnotou D_s. Z toho by plynulo, která harmonická složka má na zkreslení největší vliv, nicméně i tento postup je třeba ověřit simulacemi. Vztah pro výpočet je následující:

$$I_{h\mathrm{s}} = (G_h - G_e)U_{h\mathrm{POC}}, \quad D_{h\mathrm{s}} = U_{h\mathrm{POC}} I_{h\mathrm{s}}. \tag{1.43}$$

V tomto případě i platí:

$$D_{\mathrm{s}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{H} D_{h\mathrm{s}}^2}. \tag{1.44}$$

1.6.4 Původní záměr CPC teorie

Část CPC teorie [9] se zvlášť zaměřuje na zátěže generující harmonické složky, jelikož lineární zátěž se za zdroj harmonických nepovažuje. Úvaha CPC teorie je v rámci náhradního obvodu (viz obr. 1.3) taková, že pokud je v zátěži generován harmonický proud, stává se zdrojem toku energie směrem od zátěže ke zdroji napájení (síti). V důsledku toho je v celkovém proudu I_{POC} přítomna složka, kterou nelze interpretovat jako jalový nebo roztroušený proud, ale která nepřispívá k činnému výkonu zátěže P a naopak tento výkon snižuje.

Přítomnost harmonických proudů generovaných v zátěži lze identifikovat měřením fázového úhlu $\varphi_{h\mathrm{POC}}$. Jelikož je činný výkon harmonické složky roven - viz vztah 1.37, tak jestliže platí

$$|\varphi_{h\mathrm{POC}}| < \frac{\pi}{2} => \cos\varphi_{h\mathrm{POC}} > 0,$$

má tok energie dané harmonické složky směr od sítě k zátěži a pokud

$$|\varphi_{h\mathrm{POC}}| > \frac{\pi}{2} => \cos\varphi_{h\mathrm{POC}} < 0,$$

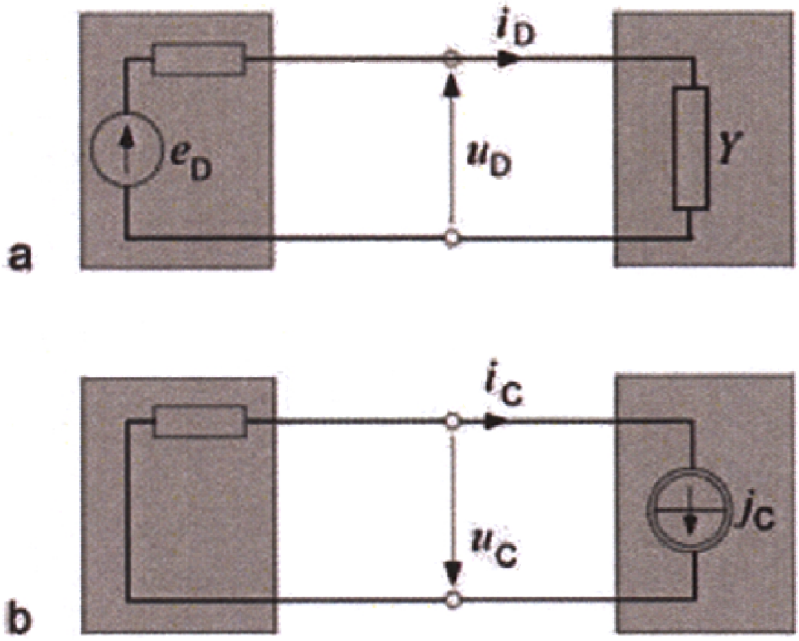
má tok energie opačný směr, tedy od zátěže k síti. Dle toho jsou harmonické složky roztříděny do množin (značené D a C):

$$\cos\varphi_{h\mathrm{POC}} < 0 \ \forall h \in C, \quad \cos\varphi_{h\mathrm{POC}} \geq 0 \ \forall h \in D. \tag{1.45}$$

Pro tyto množiny potom platí:

$$I_{\mathrm{POC}}^2 = I_{\mathrm{D}}^2 + I_{\mathrm{C}}^2, \quad U_{\mathrm{POC}}^2 = U_{\mathrm{D}}^2 + U_{\mathrm{C}}^2. \tag{1.46}$$

Po tomto rozkladu je možné rozdělit již zmíněný náhradní obvod superpozicí na dva obvody. U prvního (viz obr. 1.8a) je na straně odběratele pouze lineární zátěž a u druhého (viz obr. 1.8b) pouze zdroj proudu ale bez zdroje napětí na straně sítě.



Obrázek 1.8: a) Náhradní obvod pro harmonické $h \in D$ a b) náhradní obvod pro harmonické $h \in C$ [9]

Obvod s lineární zátěží je poté možné popsat standardním CPC přístupem:

$$\hat{Y}_h = \frac{\hat{I}_{h\mathrm{POC}}}{\hat{U}_{h\mathrm{POC}}} = G_h + jB_h, \tag{1.47}$$

$$G_{\mathrm{eD}} = \frac{P_{\mathrm{D}}}{U_{\mathrm{D}}^2}. \tag{1.48}$$

Po rozložení I_{D} na činnou, jalovou a roztroušenou složku platí:

$$I_{\mathrm{POC}}^2 = I_{\mathrm{a}}^2 + I_{\mathrm{r}}^2 + I_{\mathrm{s}}^2 + I_{\mathrm{C}}^2 \tag{1.49}$$

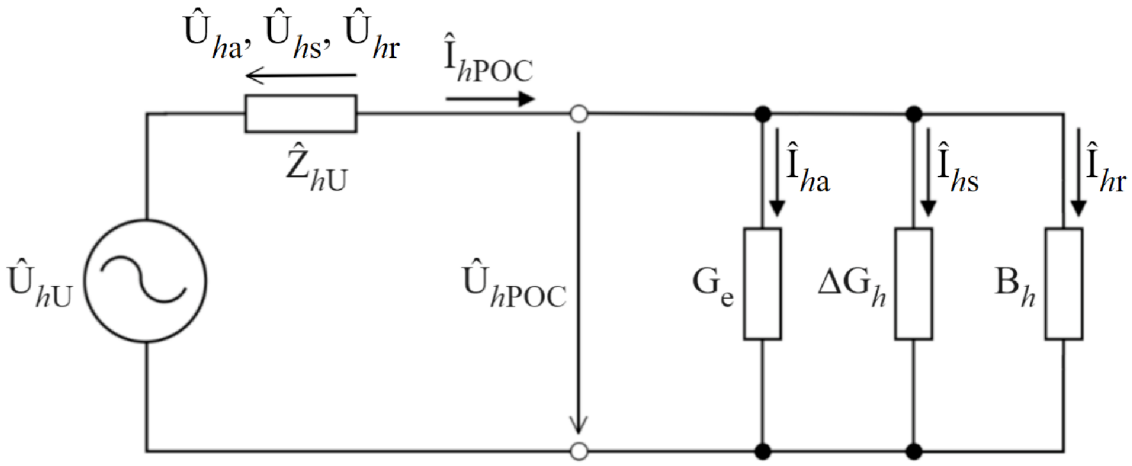
1.6.5 Upravené použití CPC teorie

I když je CPC teorie na první pohled zejména o výkonech, tak tyto výkony jsou závislé na rozkladu proudu, který je zase rozložen dle zátěže. A právě tento rozklad zátěže (1.50) bude sledován pro možnou identifikaci harmonického rušení v síti. Zde se tedy bude brát v úvahu pouze jeden z obvodů, který CPC teorie uvažuje, a to ten na obr. 1.8a. Sledovány budou všechny tři složky, tedy ekvivalentní vodivost G_e, rozdíl harmonické složky vodivosti od ekvivalentní vodivosti ΔG_h (1.51) a harmonická složka susceptance B_h:

$$\hat{Y}_h = \frac{\hat{I}_{h\mathrm{POC}}}{\hat{U}_{h\mathrm{POC}}} = G_\mathrm{e} + \Delta G_h + jB_h, \tag{1.50}$$

$$\Delta G_h = G_h - G_\mathrm{e}. \tag{1.51}$$

Jelikož porovnání těchto hodnot složek vodivosti s hodnotami napětí z referenčních metod není příliš vypovídající, je nutné zavést vhodné řešení. Z proudů pro každou příslušnou složku zátěže je možné vypočítat napětí na impedanci sítě, což je hlavním výstupem i obou referenčních metod. Pro výpočty je potřeba znát hodnoty napětí a proudu v POC a impedanci sítě.



Obrázek 1.9: Náhradní obvod s užitím CPC teorie

Výpočet složek proudu pro každou frekvenci:

$$\hat{I}_{h\mathrm{a}} = G_{\mathrm{e}}\hat{U}_{h\mathrm{POC}}, \quad \hat{I}_{h\mathrm{s}} = \Delta G_h \hat{U}_{h\mathrm{POC}}, \quad \hat{I}_{h\mathrm{r}} = jB_h\hat{U}_{h\mathrm{POC}}, \tag{1.52}$$

pomocí kterých je potom možné dopočítat napětí na impedanci sítě:

$$\hat{U}_{h\mathrm{aC}} = \hat{I}_{h\mathrm{a}}\hat{Z}_{h\mathrm{U}}, \quad \hat{U}_{h\mathrm{sC}} = \hat{I}_{h\mathrm{s}}\hat{Z}_{h\mathrm{U}}, \quad \hat{U}_{h\mathrm{rC}} = \hat{I}_{h\mathrm{r}}\hat{Z}_{h\mathrm{U}}. \tag{1.53}$$

1.6.6 Upravené použití IEEE výkonů

Aby bylo možné přímé porovnání mezi výkony a referenčními metodami, je možné použít obdobný postup jako při upravení CPC teorie. Harmonické složky jednotlivých výkonů zátěže lze přepočítat na složky proudu a z těch následně určit napětí na impedanci sítě:

$$\hat{I}_{\mathrm{P}h} = \frac{P_h}{\hat{U}_{h\mathrm{POC}}} =, \quad \hat{U}_{\mathrm{P}h\mathrm{C}} = \hat{I}_{\mathrm{P}h}\hat{Z}_{h\mathrm{U}}, \tag{1.54}$$

$$\hat{I}_{\mathrm{Q}h} = \frac{jQ_h}{\hat{U}_{h\mathrm{POC}}}, \quad \hat{U}_{\mathrm{Q}h\mathrm{C}} = \hat{I}_{\mathrm{Q}h}\hat{Z}_{h\mathrm{U}}, \tag{1.55}$$

$$\hat{I}_{\mathrm{S}h} = \frac{S_h}{\hat{U}_{h\mathrm{POC}}}, \quad \hat{U}_{\mathrm{S}h\mathrm{C}} = \hat{I}_{\mathrm{S}h}\hat{Z}_{h\mathrm{U}}, \tag{1.56}$$

kde P_h, Q_h a S_h značí harmonické složky činného, jalového a zdánlivého výkonu:

$$P_h = U_{h\mathrm{POC}} I_{h\mathrm{POC}} \cos\varphi_{h\mathrm{POC}}, \tag{1.57}$$

$$Q_h = U_{h\mathrm{POC}} I_{h\mathrm{POC}} \sin\varphi_{h\mathrm{POC}}, \tag{1.58}$$

$$S_h = U_{h\mathrm{POC}} I_{h\mathrm{POC}}. \tag{1.59}$$

I když by činné a jalové složky napětí z výkonů IEEE ($\hat{U}_{\mathrm{P}h\mathrm{C}}$, $\hat{U}_{\mathrm{P}h\mathrm{C}}$) a CPC teorie ($\hat{U}_{h\mathrm{aC}}+\hat{U}_{h\mathrm{sC}}$, $\hat{U}_{h\mathrm{rC}}$) měly z hlediska magnitudy vzájemně korelovat, tak jejich fáze by měla být odlišná, zejména kvůli přítomnosti komplexně sdruženého proudu (opačné znaménko u imaginární složky) při výpočtu výkonů. Výsledky obou postupů tedy udávají rozdílnou informaci.

2 Simulace

Pro ověření principů a výsledků jednotlivých metrik, je nutné je aplikovat při různých scénářích. K tomu slouží simulace, které jsou rozděleny na dvě části. První z nich se zabývá lineární zátěží v různých zapojeních, kde jsou případy pro jednoduchou rezistivní, induktivní a kapacitní zátěž a také jejich kombinaci, které slouží k demonstrování vlivu jalové složky zátěže na sledované veličiny. Následují komplexnější zapojení zátěže, které mají ukázat hlavně důsledky proměnlivosti reálné složky admitance. V těchto simulacích není opomenuta ani možnost přítomnosti rezonance. Druhá část simulací je věnována modelům nelineární zátěže, jimiž jsou kompaktní fluorescenční lampa a LED světlo, které byly poskytnuty Dr.-Ing. Anou Marií Blanco z TUD. V těchto simulacích je hleděno na posuzování vlivu jednotlivých harmonických složek na zkreslení pomocí všech sledovaných ukazatelů.

Zpracování simulací

Simulace byly zpracovány v programu MATLAB, který byl zvolen pro svou jednoduchost, rychlost, a hlavně kvůli prostředí Simulink a jeho snadné vizualizaci a realizaci systémů. Byla využita knihovna Specialized Power Systems, která nabízí specifické nástroje a bloky pro simulaci a analýzu elektrických obvodů. Pro numerické řešení rovnice modelu byly používány jak kontinuální, tak dle nutnosti i diskrétní solvery s dostatečnou vzorkovací frekvencí 1 MHz.

Do MATLAB skriptu byly načteny průběhy naměřeného napětí a proudu, na které byla aplikována Fourierova transformace, a data tak byla převedena do frekvenční oblasti. Pro všechny kalkulace byla vytvořena funkce, jejímž vstupem je naměřené napětí a proud v POC, impedance sítě a impedance zátěže.

Prezentace výsledků

Výsledné a jinak důležité hodnoty popsaných metod jsou prezentovány v tabulkách v příloze pro každou simulaci zvlášť. Fázory všech vypočtených napětí jsou následně různými barvami (dle legendy) vykresleny ve fázorových diagramech. Fázory jsou vždy poskládané dle pořadí v tabulce, tedy první v pořadí má počátek v nulovém bodě a jeho koncový bod je potom počátkem druhého fázoru v pořadí, atd. Jedinou výjimkou jsou napětí dle výkonů IEEE, kde je fázor napětí $\hat{U}_{ShC}$ výsledkem součtu zbylých dvou fázorů.

Společná část simulací

Část, která je pro všechna simulační schémata stejná, je strana reprezentující síť, tedy zdroje napětí a impedance sítě. Parametry pro zdroje napětí jsou následující:

h	f [Hz]	U [V]	φ [rad]
1	50	230	-0,5π
3	150	2	0,333π
5	250	1	-0,944π
7	350	0,5	-0,333π
9	450	0,2	0,389π
11	550	0,1	-0,389π
13	650	0,05	0,389π

Tabulka 2.1: Parametry napětí zdrojů v simulacích

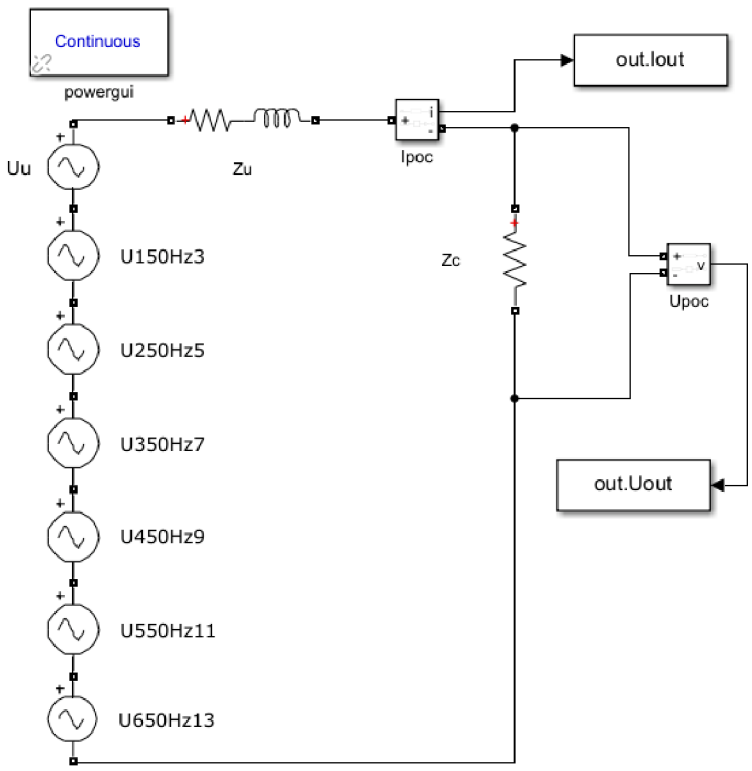
Pro hodnotu impedance byla použita referenční hodnota dle ČSN EN 61000-3-3 [17]: $0,4 + j0,25\ \Omega$, ale jelikož je tato impedance proměnná s frekvencí, je nutné imaginární složku pro každou frekvenci vynásobit řádem harmonické h.

2.2 Lineární zátěž

Tato část simulací je zaměřena hlavně na lepší poznání představených použití CPC teorie a IEEE výkonů v obvodech, kde se do určité míry dá předpokládat jejich chování. Výsledky dalších metod pro posouzení vlivu na harmonické rušení, které využívají výkon, nejsou ve výsledcích diskutovány. Je to z důvodu, že metody s roztroušeným a jalovým fiktivním výkonem nikterak nereagují na linearitu a vykazují tak nevypovídající výsledky. Směr harmonického činného výkonu je na tom stejně, jelikož v těchto simulacích záporný být nemůže.

2.2.1 Rezistivní zátěž

Cílem této simulace je ověřit výsledky pro obvod s čistě rezistivní zátěží, která je tím pádem neměnná s frekvencí a její impedance má pouze reálnou složku.



Obrázek 2.1: Simulační schéma pro rezistivní zátěž

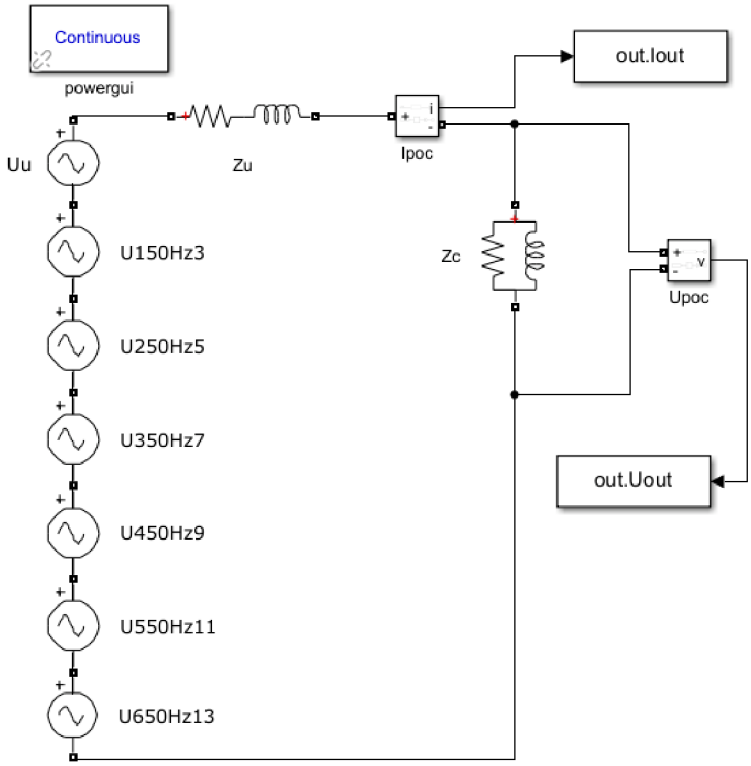
Při prvním pohledu na výsledky (viz příloha A) si lze všimnout, že u metody VHV vychází podíl odběratele $\hat{U}_{\mathrm{p}h\mathrm{C}}$ nulový. To je z toho důvodu, že pokud je u lineární zátěže použita při výpočtech skutečná impedance zátěže, vyjde zdroj proudu $\hat{I}_{h\mathrm{C}}$ pro všechny frekvence vždy nulový. Po uplatnění principu superpozice tak existuje pouze jeden obvod, což zároveň znamená, že se příspěvek sítě $\hat{U}_{\mathrm{p}h\mathrm{U}}$ rovná naměřenému napětí $\hat{U}_{h\mathrm{POC}}$.

Co se týče CPC, tak zde je přítomna pouze jedna ze složek napětí a to $\hat{U}_{h\mathrm{aC}}$. Ani jedna z dalších složek potom nepřipadá v úvahu, jelikož se reálná složka vodivosti zátěže nemění s frekvencí a imaginární je nulová. Protože jsou napětí $\hat{U}_{h\mathrm{aC}}$ a $\hat{U}_{h\mathrm{em}}$ interpretovány jako napětí na impedanci sítě, tak se v důsledku této absence dalších složek tyto hodnoty rovnají, tedy až na fázi lišící se o 180° (1π rad), což je zapříčiněno tím, jak je u IEC definován směr proudu (1.5.2).

Na vypočtených výkonech dle IEEE lze vidět, že všechen zdánlivý výkon je tvořen pouze činným výkonem, jelikož rezistivní zátěž jalový výkon nespotřebovává. To je přeneseno i do vypočteného napětí na impedanci $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ dle těchto výkonů.

2.2.2 Zátěž induktivního charakteru

Tato zátěž se vyznačuje tím, že její impedance roste s frekvencí, takže se dá předpokládat výskyt jalové složky napětí i výkonu. Výsledky simulace jsou obsaženy v příloze B.



Obrázek 2.2: Simulační schéma pro zátěž induktivního charakteru

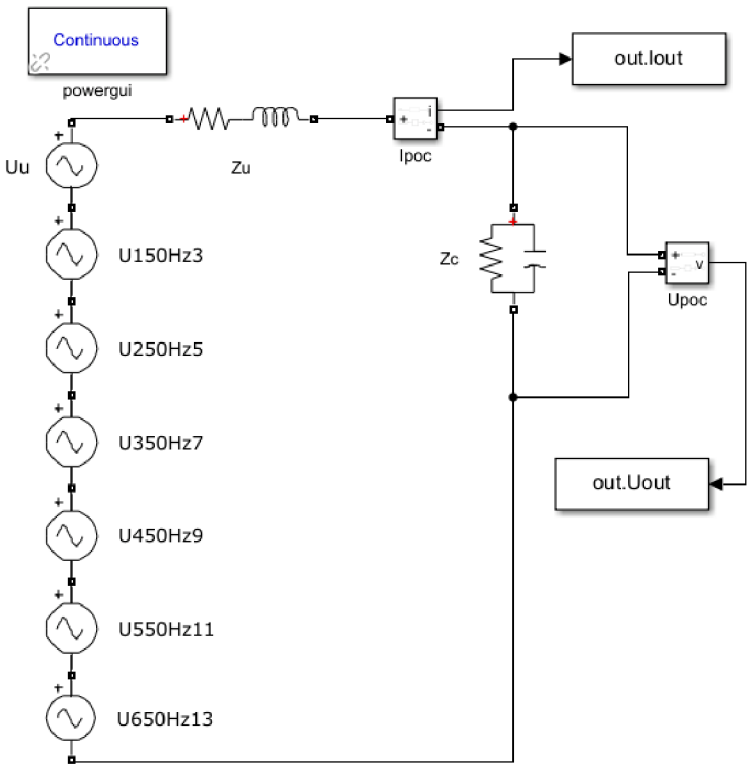
Zatímco u VHV vychází podíl odběratele opět nulový, u IEC se s frekvencí podíl na zkreslení jako takový sice zvětšuje, ale není závažný. Zároveň je u všech harmonických složek magnituda napětí před připojením zátěže vyšší než magnituda napětí po připojení, což značí, že zátěž ke zkreslení nepřispívá.

U CPC se výskyt jalové složky zátěže projevuje na napětí $\hat{U}_{h\mathrm{rC}}$ a to tak, že se s frekvencí vliv tohoto napětí zmenšuje. I u IEEE výkonů je patrné, že podíl jalového výkonu na zdánlivém se s každou frekvencí snižuje a převažuje tak výkon činný. Pro napětí, vycházející z těchto výkonů, lze vypozorovat, že magnituda vektorového součtu $\hat{U}_{\mathrm{P}h\mathrm{C}}$ a $\hat{U}_{\mathrm{Q}h\mathrm{C}}$ se rovná magnitudě $\hat{U}_{h\mathrm{em}}$:

$$\hat{U}_{\mathrm{P}h\mathrm{C}} + \hat{U}_{\mathrm{Q}h\mathrm{C}} = \hat{U}_{\mathrm{S}h\mathrm{C}}, \quad U_{\mathrm{S}h} = U_{h\mathrm{em}}. \tag{2.1}$$

2.2.3 Zátěž kapacitního charakteru

Pro kapacitní zátěž je naopak charakteristické, že impedance klesá s frekvencí, což by mělo zapříčinit větší vliv na vyšší harmonické složky. Výsledky jsou zahrnuty v příloze C.



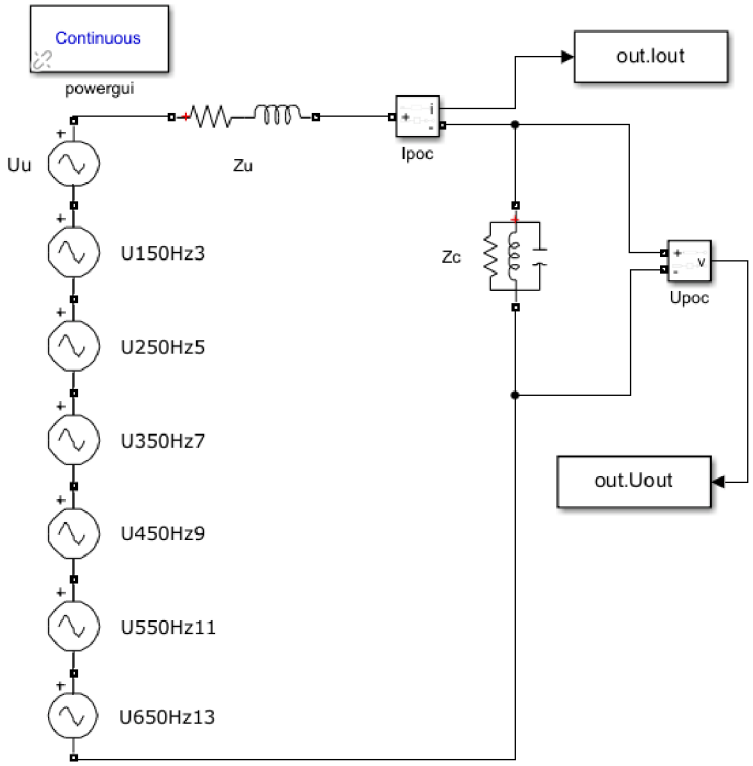
Obrázek 2.3: Simulační schéma pro zátěž kapacitního charakteru

Při porovnání napětí $\hat{U}_{h\mathrm{bg}}$ a $\hat{U}_{h\mathrm{em}}$ je patrné, že se podíl na zkreslení s každou harmonickou zvyšuje. Rovněž je na všech frekvencích napětí v POC po připojení zátěže vyšší než před připojením. Dle referenční metody IEC tedy tato zátěž značně přispívá ke zkreslení. Z CPC lze potom lépe vidět, co stojí za těmito zvýšenými hodnotami. Velkou část z celkového napětí totiž tvoří $\hat{U}_{h\mathrm{rC}}$, reprezentující jalovou složku zátěže, která je v tomto případě výrazně rostoucí.

K podobným závěrům lze dojít i při pohledu na výkony, kde má na zdánlivý výkon větší vliv jalový výkon a tento vliv se s každou vyšší frekvencí jen zvětšuje. Totéž reflektuje i jalová složka napětí $\hat{U}_{\mathrm{Q}h\mathrm{C}}$. Kvůli kapacitnímu charakteru zátěže vychází všechny jalové výkony záporné.

2.2.4 Paralelní RLC zátěž

Cílem této simulace je ověřit účinky rezonance, přítomné v zátěži. Rezonanční frekvence byla dle parametrů zátěže určena na 200 Hz. Výsledky lze vidět v příloze D.



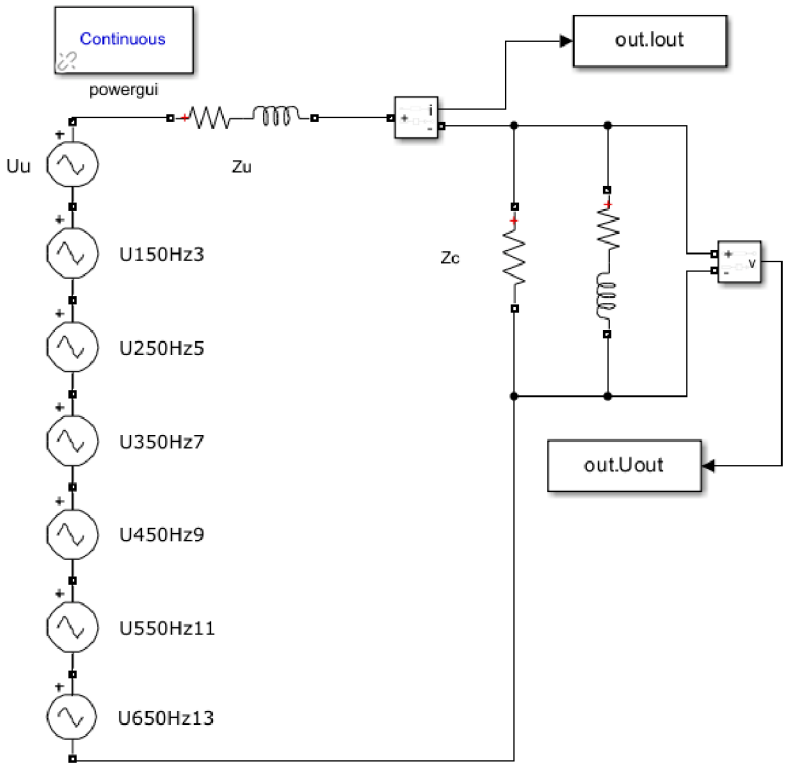
Obrázek 2.4: Simulační schéma pro paralelní RLC zátěž

Vliv rezonance je nejvíce patrný na hodnotách jalového výkonu a susceptance B_h. Na prvních dvou harmonických je jalový výkon kladný a susceptance záporná, na třetí až sedmé harmonické je tomu naopak. Z toho plyne, že pod rezonanční frekvencí se zátěž chová induktivně a po jejím překročení kapacitně.

U napětí dle CPC a IEEE výkonů se tento jev dá zpozorovat pouze na fázích napětí, kde je fáze jalové složky napětí oproti reálné otočena buď o $+90°$ $(0,5\pi$ rad) nebo $-90°$ $(-0,5\pi$ rad).

2.2.5 Komplexnější induktivní zátěž

Tato zátěž byla sestavena tak, aby byla reálná složka její komplexní admitance proměnná s frekvencí. Toho bylo docíleno paralelním zapojením rezistoru a induktoru s rezistorem v sérii. Výsledky jsou přiloženy v příloze E.



Obrázek 2.5: Simulační schéma pro komplexnější induktivní zátěž

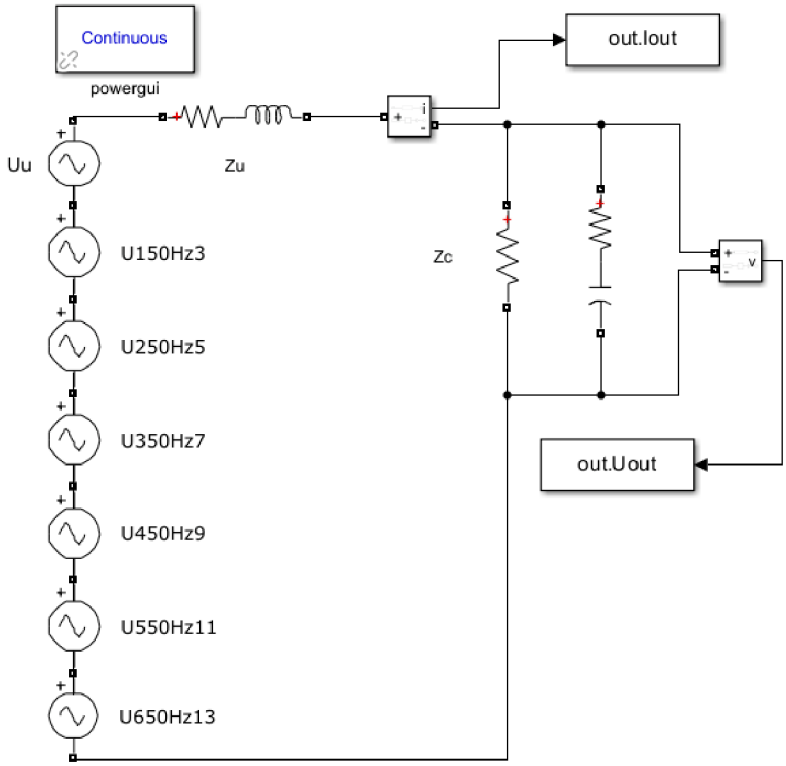
Z hodnot lze ovšem vyčíst, že i když se vodivost zátěže mění, tak ΔG_h nabývá pouze nepatrných hodnot. U napětí $\hat{U}_{h\mathrm{sC}}$ tomu je tím pádem stejně a stále převažuje složka $\hat{U}_{h\mathrm{aC}}$.

Podobně jako tomu je u napětí z IEEE výkonů, pro napětí dle CPC lze vyvodit, že jejich vektorový součet se rovná opačnému fázoru napětí $U_{h\mathrm{em}}$:

$$\hat{U}_{h\mathrm{aC}} + \hat{U}_{h\mathrm{sC}} + \hat{U}_{h\mathrm{rC}} = -\hat{U}_{h\mathrm{em}}. \tag{2.2}$$

2.2.6 Komplexnější kapacitní zátěž

Simulační schéma pro tuto zátěž je totožné jako předchozí s jediným rozdílem, že je induktor nahrazen kapacitorem. Tím, že je na straně sítě v impedanci přítomen induktor a v impedanci zátěže kapacitor, dá se i zde počítat s rezonancí, která je vypočtena na 500 Hz. Výsledky jsou k nalezení v příloze F.



Obrázek 2.6: Simulační schéma pro komplexnější kapacitní zátěž

Zde jsou hodnoty vodivosti pro každou frekvenci značně proměnné, což se projevuje na hodnotách ΔG_h, respektive $\hat{U}_{h\mathrm{sC}}$. Společně s $\hat{U}_{h\mathrm{rC}}$ tak tvoří většinu z celkového napětí $U_{h\mathrm{em}}$. Jelikož se dle IEC dá tato zátěž považovat za zkreslující, stojí za tímto zkreslením hlavně dvě zmíněné složky napětí.

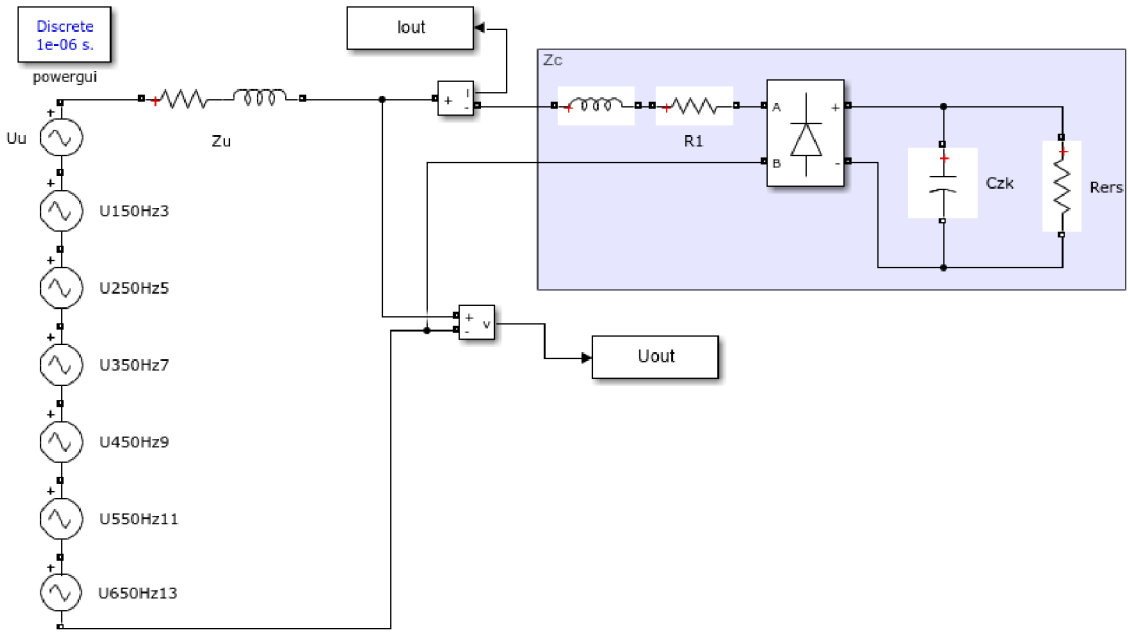
Co se týče rezonance, tak ta je ze samotných hodnot nezjistitelná, jelikož se nenachází v samotné zátěži, ale mezi sítí a zátěží.

2.3 Modely nelineární zátěže

Jedná se o dva modely lamp s NPFC topologií, čili bez korekce účiníku. První z nich je fluorescenční kompaktní lampa o výkonu 21 W a druhá LED o výkonu 3 W. Byly použity jako příklad elektronických zařízení, která generují harmonické proudy v důsledku své nelineární charakteristiky. Struktury obou modelů jsou v podstatě stejné, jen jsou parametry použitých prvků určeny tak, aby se docílilo jiného výkonu. Skládají se z jednoduchých elektrických prvků a můstkového usměrňovače, vstupy modelů jsou připojeny k napájecí části obvodu, reprezentující síť. K modelům byla zároveň dodána i data o impedanci zátěže, která byla využita pro přesnější výsledky VHV metody.

2.3.1 CFL

CFL by měla plnit roli více zkreslující zátěže, na které bude dobře vidět, jak jednotlivé veličiny posuzují nelinearitu. Výsledky lze vidět v příloze G.



Obrázek 2.7: Simulační schéma pro model CFL

Výsledky metod VHV a IEC vychází relativně podobně, což je způsobeno vysokou impedancí zátěže. Z fázorů napětí vyplývá, že u 5., 7. a 13. harmonické zátěž napětí v POC kompenzuje, tyto složky tedy ke zkreslení nepřispívají, ale naopak ho zmenšují. Pro 3., 9. a 11. harmonickou platí, že ke zkreslení naopak přispívají.

U CPC je největším faktorem velikost impedance hlavně u první harmonické, která z většiny ovlivňuje hodnotu ekvivalentní vodivosti G_e. Protože je tato hodnota nízká, je nízká i magnituda napětí $\hat{U}_{h\mathrm{aC}}$ z ní vyplývající. Veškeré zkreslení, respektive pro některé frekvence jeho kompenzace, se tak přisuzuje fázorům napětí $\hat{U}_{h\mathrm{sC}}$ a $\hat{U}_{h\mathrm{rC}}$. Jinak ale z fázorů napětí rozložených dle CPC a IEEE výkonů není patrná spojitost mezi mezi těmito fázory a referenčními metodami, co se týče kompenzace napětí v POC.

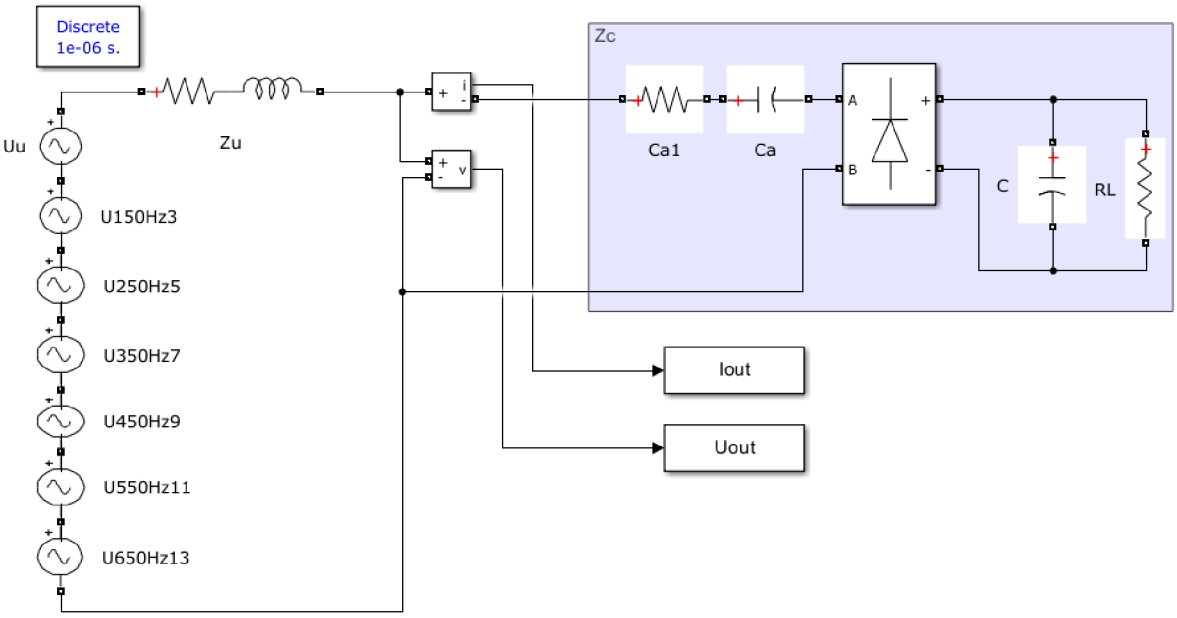
Určité úspěšnosti dosahuje metoda hledící na směr harmonického činného výkonu. U harmonických složek, kde zátěž ke zkreslení přispívá, vyšel činný výkon záporný, ale záporný vyšel také pro jednu frekvenci, na které zátěž zkreslující není.

Z metody využívající jalový fiktivní výkon plyne, že je celkové zkreslení přítomného napětí a proudu vysoké, jelikož je rozdíl mezi fundamentálním jalovým výkonem Q_1 a neaktivním výkonem N značný a hodnota Q_X je blíže k N. Hodnoty $Q_{h\mathrm{X}}$ potom ukazují, že na zkreslení mají větší vliv hlavně nižší řády harmonických, zatímco ty nejvyšší jsou pouze nepatrně vyšší než Q_1.

I roztroušený výkon ukazuje na to, že zkreslení je značné, jelikož rozdíl mezi celkovým činným výkonem P a roztroušeným výkonem D_s není vysoký. Při pohledu na hodnoty $D_{h\mathrm{s}}$, které D_s tvoří, je ale patrné že na zkreslení se podílí určitou měrou všechny harmonické složky.

2.3.2 LED světlo

Model LED světla je typově stejná nelineární zátěž jako předchozí model CFL, pouze s nižším výkonem. Nižší výkon by měl být ve výsledcích (viz příloha H) znát menší mírou zkreslení.



Obrázek 2.8: Simulační schéma pro model LED světla

I zde je impedance zátěže relativně vysoká, a tak vychází referenční metody téměř stejně. Z nich lze vyčíst, že zátěž napětí v POC kompenzuje u 3., 7., 9. a 13. harmonické složky s tím, že u prvních dvou zmíněných je kompenzace minimální. Zbylé harmonické sice ke zkreslení přispívají, ale nijak závažně.

Nižší výkon zátěže znamená ještě nižší hodnotu G_e a vliv napětí U_{haC}. Platí tedy totéž co u CFL, ale lze si všimnout, že u některých harmonických převažuje činná či jalová složka napětí. Tato informace by potenciálně mohla nést užitečnou informační hodnotu.

Směr harmonického činného výkonu pro tuto zátěž udává, že je zodpovědná za zkreslení u 3., 5. a 9. harmonické frekvence, čímž je v souladu s referenčními metodami pouze pro jednu z těchto frekvencí.

Rozdíl mezi Q_1 a N je znatelně menší než tomu bylo u CFL a Q_X je zde blíže ke Q_1, což indikuje, že ke zkreslení dochází, ale v menší míře. Dle hodnot $Q_{h\mathrm{X}}$ může za zkreslení nejvíce 3. harmonická, nejméně naopak 7. harmonická.

Metoda využívající roztroušený výkon je s výsledky ostatních metod v rozporu, jelikož hodnota D_s je pouze zhruba o třetinu nižší než P a to indikuje značné zkreslení. Z hodnot $D_{h\mathrm{s}}$ plyne, že za velkou částí roztroušeného výkonu stojí pouze 3. harmonická.

3 Analýza naměřených dat

Cílem této části práci je vyzkoušet všechny popisované metody na reálných naměřených datech, která byla poskytnuta TUD. Celý proces měření je detailně popsán v [18].

3.1 Seznámení s procesem měření

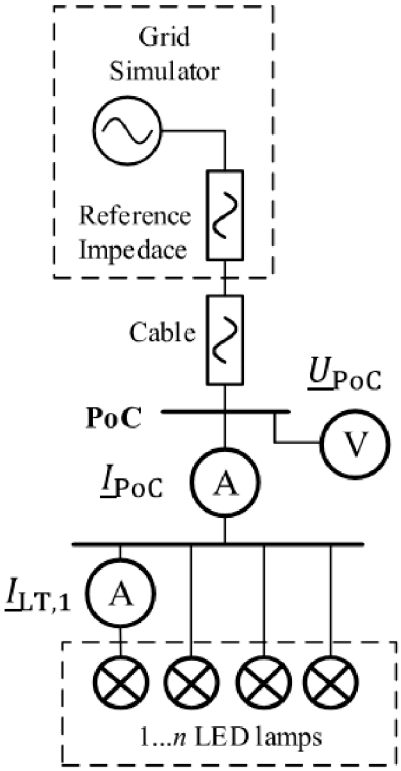
Jedná se o laboratorní měření, kde bylo několik LED světel připojeno k typické rozvodně síti. Tato rozvodná síť byla simulována prostřednictvím programovatelného zdroje napětí a referenční impedance dle ČSN EN 61000-4-7 [19]. Mezi zdrojem a zátěží byl rovněž přítomen kabel o délce 20 m. Aplikovaná napětí pro konkrétní harmonické jsou následující:

h	f [Hz]	U [V]	φ [rad]
1	50	229,9	0π
3	150	5,5	0π
5	250	3,8	1π
7	350	2	0π
9	450	0,6	1π
11	550	0,3	1π
13	650	0,6	0π

Tabulka 3.1: Parametry aplikovaných harmonických napětí zdroje

Pro měření byly použity dva různé druhy LED světel, buď s PFC anebo bez PFC. Oba typy byly paralelně zapojeny v různém počtu od 1 do 40. Pro účely této práce byla vybrána data s typem LED o výkonu 6,5 W bez PFC a v maximálním

počtu. Je to z důvodu, aby se dosáhlo významného zkreslení, které v tomto případě pro proud (THD_i) činí 145,3 %.



Obrázek 3.1: Schématická reprezentace měření [18]

Samotná výstupní data potom tvoří fázory harmonických složek napětí a proudu naměřené v POC spolu s hodnotami impedance sítě a zátěže.

3.2 Analýza výsledků

Fakt, že je zátěž vysoce zkreslující, lze dobře zpozorovat na výsledcích (viz příloha I) referenčních metod. Ty v tomto případě nevychází totožně, jelikož je velký počet LED světel připojen paralelně a tím pádem je impedance nižší. I když magnitudy napětí ukazujících míru zkreslení ze strany zátěže jsou na všech frekvencích relativně vysoké, tak u 3., 5., 7. a 13. harmonické se napětí ve skutečnosti kompenzuje. Vliv zbylých dvou harmonických složek na zkreslení je ovšem značný.

Jak už bylo zmíněno, impedance této zátěže je nižší, něž tomu bylo u modelů nelineární zátěže. Nižší impedance zejména u základní harmonické znamená větší vliv napětí $U_{h\mathrm{aC}}$. Ani zde ale není jasná spojitost mezi kompenzací dle referenčních metod a rozložením jednotlivých napětí. Napětí vycházející z IEEE výkonů naopak opět můžou prozradit, že např. u 13. harmonické tvoří celkové napětí $U_{\mathrm{S}h\mathrm{C}}$ výhradně jalová složka $U_{\mathrm{Q}h\mathrm{C}}$ odpovídající jalovému výkonu zátěže.

Směr harmonického činného výkonu rovněž ukazuje, že za zkreslením u 9. a 11. harmonické stojí zátěž. Stejné ale nesprávně tvrdí i o 3. harmonické, kde se napětí kompenzuje.

Neaktivní výkon N vychází více než čtyřikrát vyšší než fundamentální jalový výkon Q_1, což samo o sobě indikuje významnou přítomnost harmonických složek. Hodnota Q_{X} je blíže k N a nejvíce se na ní podílí 3. a 4. harmonická složka $Q_{h\mathrm{X}}$, nejméně naopak 11. a 13.

Také z roztroušeného výkonu D_{s} se dá zátěž prohlásit za značně nelineární, jelikož je jeho hodnota jen mírně pod úrovní činného výkonu P. Nejvyšších hodnot $D_{h\mathrm{s}}$ potom nabývá 3. a 7. harmonická. Oproti tomu 13. harmonická nemá na D_{s} vliv téměř žádný.

Závěr

V teoretické části práce byla uvedena problematika harmonického rušení v síti ve smyslu jeho příčin, následků, nebo možností jak mu předejít. Dále byla popsána více praktická stránka věci z hlediska emisí, tedy jak se určuje zda je odběratel za rušení zodpovědný, jaká je jeho emisní úroveň, jak se tato úroveň měří a co má vliv na určování emisních limitů. Následně byly vysvětleny některé důležité pojmy pro lepší pochopení problematiky. Byly popsány definice výkonu dle průmyslového standardu IEEE a dle CPC teorie, které byly dále využity pro popis metod pro posouzení vlivu zákazníka na harmonické rušení, založených na elektrickém výkonu. Na ně byla jednak zpracována rešerše, ale také byly představeny dva možné nové postupy. Pro porovnání těchto metod byly rovněž uvedeny referenční metody, které jsou považované za přesné a spolehlivé.

Pro ověření všech metod byly zpracovány simulace pro různé situace. Začalo se u jednoduché lineární zátěže a přešlo se přes složitější, až na závěr k modelům nelineární zátěže, kterou představovaly dva různé typy osvětlení. Metody byly rovněž analyzovány na dodaných naměřených datech.

První ze zkoumaných metod byla založena na sledování směru harmonického činného výkonu. Jak bylo popsáno, tato metoda bývá kritizována za svoji nespolehlivost, což se také potvrdilo na dostupných datech. Občas sice dokáže správně určit zodpovědnost za zkreslení, v mnoha dalších případech ovšem úspěšná není. Další nevýhodou je, že nehledí na velikost zkreslení, ale pouze na jeho zdroj.

Jalový výkon, respektive fundamentální, fiktivní a neaktivní, se ukázal jako relativně přesný pro odhalení nelinearity zátěže. To platí pro posuzování

celého harmonického spektra. Při sledování hodnot pro individuální harmonické, plynoucích z rozšíření této metody, není jasné, která je za zkreslení zodpovědná více či méně. Trend je dle hodnot totiž takový, že vliv na zkreslení klesá s vyššími harmonickými, což plyne z nižších magnitud napájecího napětí. To ve výsledku znamená, že např. 13. harmonická má vliv na zkreslení nízký, ale dle referenčních metod je patrné, že podíl zátěže pro tuto frekvenci je naopak vysoký.

Roztroušený výkon se jako ukazatel nelinearity zátěže projevil jako nekonzistentní, jelikož pro jednu ze simulací, kde bylo dle ostatních metod zkreslení nízké, vyšel vysoký a to hlavně kvůli jedné konkrétní harmonické. I když v dalších případech reflektoval nelinearitu zátěže dobře, nedá se tato metoda z uvedeného důvodu prohlásit za spolehlivou.

Upravené použití CPC teorie se zaměřovalo hlavně na snahu odhalit spojitost mezi tím, kdy je napětí v POC kompenzováno a kdy nikoli, a také která složka napětí je za zkreslení zodpovědná. To z výsledků ale není jednoznačné. Hlavním problémem tohoto postupu může být fakt, že na rozložení zátěže, respektive jednotlivých složek napětí na impedanci sítě, mají vliv ostatní frekvence, a to zejména základní harmonická. Snahou by mělo být jednotlivé harmonické složky posuzovat individuálně, což CPC teorie neumožňuje. I tak ale může tento postup být prospěšný např. pro lepší pochopení vlivu charakteru zátěže nebo proměnlivosti s frekvencí na zkreslení.

Pro upravené použití IEEE výkonů šlo de facto o to samé jako v předchozím případě. A i když jsou výsledky tohoto postupu v tuto chvíli neuspokojující, neznamená to, že by jich nešlo do budoucna využít. Metoda v její podstatě udává, jaký výkon je zodpovědný za zkreslení ve formě napětí na impedanci sítě. Mohlo by se tak jednat o potenciální doplněk pro metodu IEC s využitím např. při snaze o omezení rušení.

Použitá literatura

[1] D-A-CH-CZ. Technical Rules for the Assessment of Network Disturbances. 2007.

[2] RODERICK, Alex. *Five Ways to Reduce Harmonics in Circuits and Power Distribution Systems*. EEPower, 2021. Dostupné také z: https://eepower.com/technical-articles/ways-to-reduce-harmonics/.

[3] ČSN EN 50160 ED.3 Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí. 2011.

[4] ČERMÁK, Jiří. *Kvalita elektrické energie*. oEnergetice.cz, 2015. Dostupné také z: https://oenergetice.cz/elektrina/kvalita-elektricke-energie.

[5] IEC 61000-3-6 Ed.2 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-6: Assessment of harmonic emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems. 2008.

[6] KUKAČKA, L. Definice výkonů v elektrické síti a jejich praktické aplikace. diplomová práce. 2013.

[7] JOSHI, Pragya a Sachin K JAIN. An improved active power direction method for harmonic source identification. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2020, roč. 42, č. 13, s. 2569–2577. Dostupné z DOI: 10.1177/0142331220932638.

[8] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. *IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000)*. 2010, s. 1–50. Dostupné z DOI: 10.1109/IEEESTD.2010.5439063.

[9] CZARNECKI, Leszek S. Currents' Physical Components (CPC) concept: A fundamental of power theory. In: *2008 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*. 2008, s. 1–11. Dostupné z DOI: 10.1109/ISNCC.2008.4627483.

[10] CZARNECKI, L.S., BUDEANU a FRYZE. Two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents. 1997, s. 359–367. Dostupné z DOI: 10.1007/BF01232925.

[11] ŠPELKO, A. et al. CIGRE/CIRED JWG C4.42: Overview of common methods for assessment of harmonic contribution from customer installation. In: *2017 IEEE Manchester PowerTech*. 2017, s. 1–6. Dostupné z DOI: 10.1109/PTC.2017.7981195.

[12] PFAJFAR, Tomaz, Bostjan BLAZIC a Igor PAPIC. Harmonic Contributions Evaluation With the Harmonic Current Vector Method. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2008, roč. 23, č. 1, s. 425–433. Dostupné z DOI: 10.1109/TPWRD.2007.911165.

[13] XU, Wilsun, Xian LIU a Yilu LIU. An investigation on the validity of power--direction method for harmonic source determination. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2003, roč. 18, č. 1, s. 214–219. Dostupné z DOI: 10.1109/TPWRD.2002.803842.

[14] CATALIOTTI, Antonio a Valentina COSENTINO. Disturbing Load Identification in Power Systems: A Single-Point Time-Domain Method Based on IEEE 1459-2000. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2009, roč. 58, č. 5, s. 1436–1445. Dostupné z DOI: 10.1109/TIM.2009.2015180.

[15] BALCI, M. E., O. KARACASU a M. H. HOCAOGLU. A detection method for harmonic producing loads. In: *2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering - ELECO 2009*. 2009, s. I-149-I–153. Dostupné také z: https://www.emo.org.tr/ekler/e299bfe8609ee4d_ek.pdf.

[16] BAZINA, Mario a Tomislav TOMIŠA. Comparison of various methods for determining direction of harmonic distortion by measuring in point of common coupling. In: *2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*. 2014, s. 392–399. Dostupné z DOI: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850457.

[17] ČSN EN 61000-3-3 ED.3 Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 3-3: Meze - Omezování změn napětí, kolísání napětí a flikru v rozvodných sítích nízkého napětí pro zařízení se jmenovitým fázovým proudem <= 16 A, které není předmětem podmíněného připojení. 2014.

[18] MEINCK, Moritz et al. Harmonic interaction of LED lamps in islanded microgrids. In: *2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP)*. 2022, s. 1–6. Dostupné z DOI: 10.1109/ICHQP53011.2022.9808783.

[19] ČSN EN 61000-4-7 ED.2 Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-7: Zkušební a měřicí technika - Všeobecná směrnice o měření a měřicích přístrojích harmonických a meziharmonických pro rozvodné sítě a zařízení připojovaná do nich. 2003.

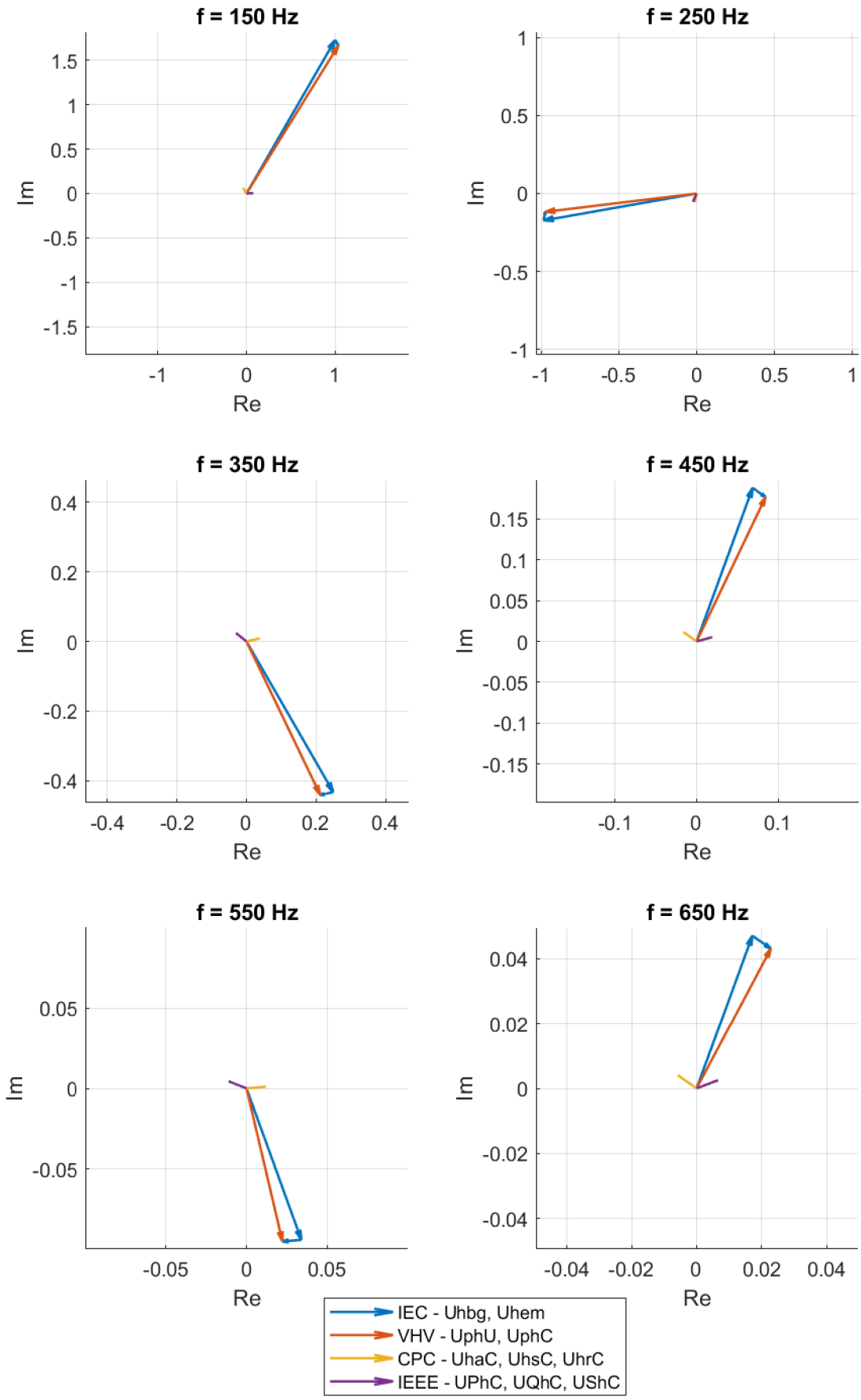
Přílohy

A Výsledky simulace pro obvod s rezistivní zátěží

f [Hz]	POC		VHV [mV]		IEC [mV]		CPC - napětí na $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ [mV]		
	$U_{h\mathrm{POC}}$ [mV]	$I_{h\mathrm{POC}}$ [mA]	$U_{\mathrm{ph}\mathrm{U}}$	$U_{\mathrm{ph}\mathrm{C}}$	$U_{h\mathrm{bg}}$	$U_{h\mathrm{em}}$	$U_{h\mathrm{aC}}$	$U_{h\mathrm{sC}}$	$U_{h\mathrm{rC}}$
50	$226,05e^{-0,503\pi j}$ V	$9,83e^{-0,503\pi j}$ A	$226,05e^{-0,503\pi j}$ V	$0e^{0,71\pi j}$ V	$230e^{-0,5\pi j}$ V	$4,64e^{0,674\pi j}$ V	$4,64e^{-0,326\pi j}$ V	$0e^{0,674\pi j}$ V	$0e^{0,174\pi j}$ V
150	$1965,51e^{0,323\pi j}$	$85,46e^{0,323\pi j}$	$1965,51e^{0,323\pi j}$	$0e^{-0,219\pi j}$	$2000,72e^{0,333\pi j}$	$72,64e^{-0,333\pi j}$	$72,64e^{0,667\pi j}$	$0e^{0\pi j}$	$0e^{-0,833\pi j}$
250	$981,45e^{-0,962\pi j}$	$42,67e^{-0,962\pi j}$	$981,45e^{-0,962\pi j}$	$0e^{0,424\pi j}$	$999,95e^{-0,945\pi j}$	$56e^{0,44\pi j}$	$56e^{-0,56\pi j}$	$0e^{0,44\pi j}$	$0e^{0\pi j}$
350	$489,79e^{-0,357\pi j}$	$21,3e^{-0,357\pi j}$	$489,79e^{-0,357\pi j}$	$0e^{-0,89\pi j}$	$499,7e^{-0,334\pi j}$	$38,23e^{-0,929\pi j}$	$38,23e^{0,071\pi j}$	$0e^{0,071\pi j}$	$0e^{0,571\pi j}$
450	$195,91e^{0,358\pi j}$	$8,52e^{0,358\pi j}$	$195,91e^{0,358\pi j}$	$0e^{-0,337\pi j}$	$200,24e^{0,389\pi j}$	$19,47e^{-0,198\pi j}$	$19,47e^{0,802\pi j}$	$0e^{0,802\pi j}$	$0e^{0,302\pi j}$
550	$97,42e^{-0,427\pi j}$	$4,24e^{-0,427\pi j}$	$97,42e^{-0,427\pi j}$	$0e^{0,907\pi j}$	$99,8e^{-0,389\pi j}$	$11,77e^{-0,973\pi j}$	$11,77e^{0,027\pi j}$	$0e^{0,027\pi j}$	$0e^{-0,473\pi j}$
650	$48,83e^{0,345\pi j}$	$2,12e^{0,345\pi j}$	$48,83e^{0,345\pi j}$	$0e^{-0,762\pi j}$	$50,16e^{0,389\pi j}$	$6,95e^{-0,194\pi j}$	$6,95e^{0,806\pi j}$	$0e^{-0,194\pi j}$	$0e^{0,306\pi j}$

f [Hz]	IEEE - napětí na $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ [mV]			CPC - admitance [mS]			IEEE-výkony		
	$U_{\mathrm{P}h}$	$U_{\mathrm{Q}h}$	$U_{\mathrm{S}h}$	G_{e}	ΔG_h	B_h	P_h [mW]	Q_h [mvar]	S_h [mVA]
50	$4,64e^{0,681\pi j}$ V	$0e^{0,181\pi j}$ V	$4,64e^{0,681\pi j}$ V		0,000	0,000	2221,8 W	0 var	2221,8 VA
150	$72,64e^{0,021\pi j}$	$0e^{-0,479\pi j}$	$72,64e^{0,021\pi j}$		0,000	0,000	167,967	0,000	167,967
250	$56e^{-0,637\pi j}$	$0e^{-0,137\pi j}$	$56e^{-0,637\pi j}$		0,000	0,000	41,881	0,000	41,881
350	$38,23e^{0,786\pi j}$	$0e^{0,286\pi j}$	$38,23e^{0,786\pi j}$	43,478	0,000	0,000	10,430	0,000	10,430
450	$19,47e^{0,086\pi j}$	$0e^{0,586\pi j}$	$19,47e^{0,086\pi j}$		0,000	0,000	1,669	0,000	1,669
550	$11,77e^{0,881\pi j}$	$0e^{-0,619\pi j}$	$11,77e^{0,881\pi j}$		0,000	0,000	0,413	0,000	0,413
650	$6,95e^{0,116\pi j}$	$0e^{0,616\pi j}$	$6,95e^{0,116\pi j}$		0,000	0,000	0,104	0,000	0,104

f [Hz]	Jalový fikt. výkon [var]				Roztr. výkon [W]		
	Q_1	$Q_{h\mathrm{X}}$	Q_X	N	P	$D_{h\mathrm{s}}$	D_{s}
50		X				0,000	
150		0,000				0,000	
250		0,000				0,000	
350	0,000	0,000	0,000	0,000	2221,997	0,000	0,000
450		0,000				0,000	
550		0,000				0,000	
650		0,000				0,000	

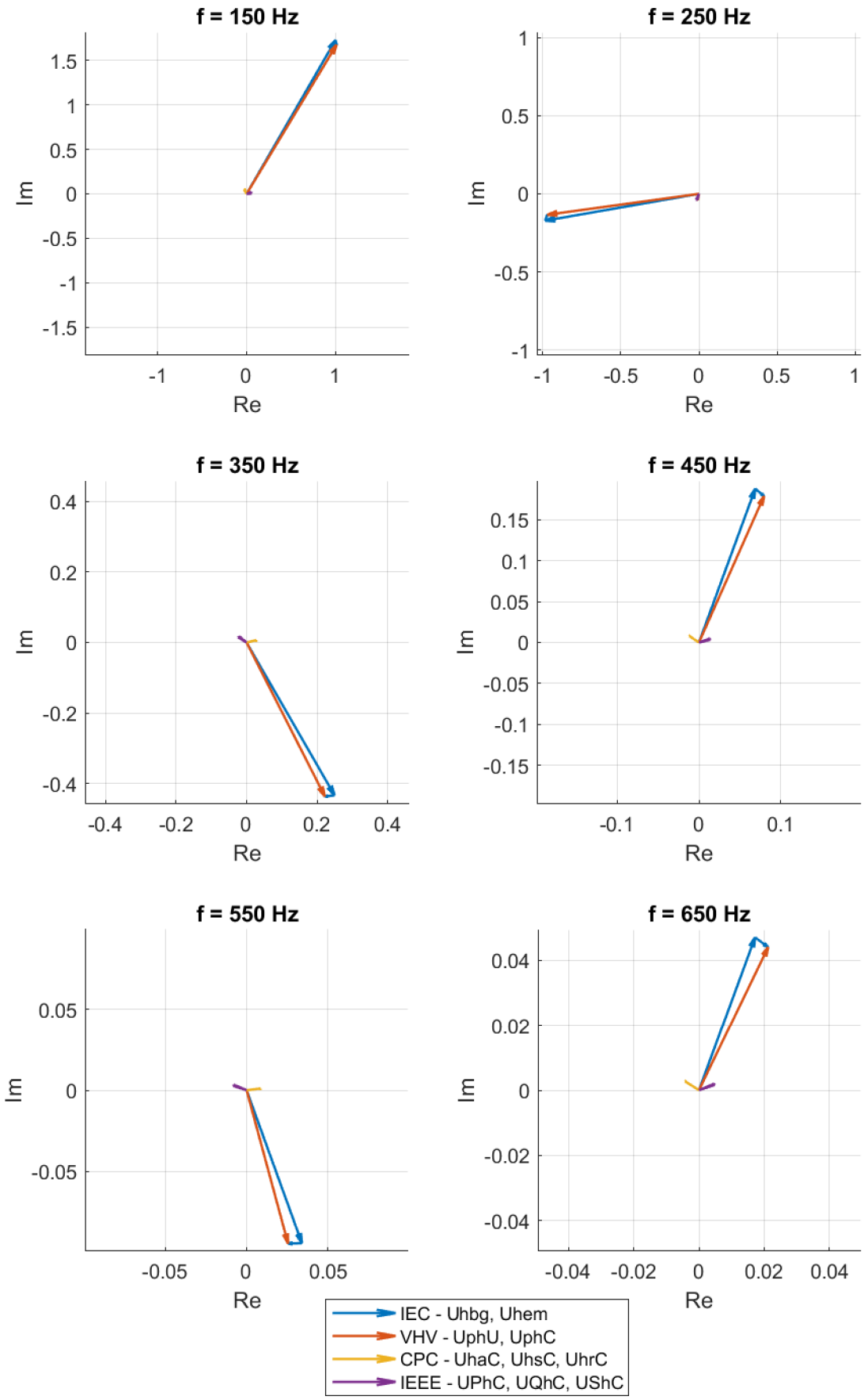

f = 150 Hz
f = 250 Hz
f = 350 Hz
f = 450 Hz
f = 550 Hz
f = 650 Hz
Im
Re
IEC - Uhbg, Uhem
VHV - UphU, UphC
CPC - UhaC, UhsC, UhrC
IEEE - UPhC, UQhC, UShC

B Výsledky simulace pro obvod s induktivní zátěží

f [Hz]	POC		VHV [mV]		IEC [mV]		CPC - napětí na $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ [mV]		
	$U_{h\mathrm{POC}}$ [mV]	$I_{h\mathrm{POC}}$ [mA]	$U_{\mathrm{ph}\mathrm{U}}$	$U_{\mathrm{ph}\mathrm{C}}$	$U_{h\mathrm{bg}}$	$U_{h\mathrm{em}}$	$U_{h\mathrm{aC}}$	$U_{h\mathrm{sC}}$	$U_{h\mathrm{rC}}$
50	$225,39e^{-0,499\pi j}$ V	$10,05e^{-0,751\pi j}$ A	$225,39e^{-0,499\pi j}$ V	$0e^{0,666\pi j}$ V	$230e^{-0,5\pi j}$ V	$4,74e^{0,426\pi j}$ V	$3,32e^{-0,321\pi j}$ V	$0e^{0,679\pi j}$ V	$3,38e^{-0,821\pi j}$ V
150	$1960,25e^{0,327\pi j}$	$64,7e^{0,223\pi j}$	$1960,26e^{0,327\pi j}$	$0,01e^{-0,336\pi j}$	$2000,71e^{0,333\pi j}$	$54,99e^{-0,433\pi j}$	$52,07e^{0,671\pi j}$	$0e^{0,671\pi j}$	$17,68e^{0,171\pi j}$
250	$979,25e^{-0,956\pi j}$	$31,23e^{0,98\pi j}$	$979,25e^{-0,956\pi j}$	$0e^{0,424\pi j}$	$999,92e^{-0,945\pi j}$	$40,99e^{0,381\pi j}$	$40,17e^{-0,555\pi j}$	$0e^{0,445\pi j}$	$8,18e^{0,945\pi j}$
350	$489,01e^{-0,35\pi j}$	$15,44e^{-0,396\pi j}$	$489,01e^{-0,35\pi j}$	$0e^{-0,935\pi j}$	$499,69e^{-0,334\pi j}$	$27,72e^{-0,968\pi j}$	$27,44e^{0,078\pi j}$	$0e^{-0,922\pi j}$	$3,99e^{-0,422\pi j}$
450	$195,76e^{0,367\pi j}$	$6,16e^{0,331\pi j}$	$195,77e^{0,367\pi j}$	$0e^{-0,204\pi j}$	$200,22e^{0,388\pi j}$	$14,07e^{-0,225\pi j}$	$13,98e^{0,811\pi j}$	$0e^{0,811\pi j}$	$1,58e^{0,311\pi j}$
550	$97,45e^{-0,416\pi j}$	$3,06e^{-0,445\pi j}$	$97,45e^{-0,416\pi j}$	$0e^{-0,98\pi j}$	$99,79e^{-0,39\pi j}$	$8,5e^{-0,991\pi j}$	$8,46e^{0,038\pi j}$	$0e^{-0,962\pi j}$	$0,78e^{-0,462\pi j}$
650	$48,91e^{0,357\pi j}$	$1,53e^{0,332\pi j}$	$48,91e^{0,357\pi j}$	$0e^{-0,193\pi j}$	$50,15e^{0,388\pi j}$	$5,02e^{-0,207\pi j}$	$5,01e^{0,818\pi j}$	$0e^{0,818\pi j}$	$0,39e^{0,318\pi j}$

f [Hz]	IEEE - napětí na $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ [mV]			CPC - admitance [mS]			IEEE-výkony		
	$U_{\mathrm{P}h}$	$U_{\mathrm{Q}h}$	$U_{\mathrm{S}h}$	G_{e}	ΔG_h	B_h	P_h [mW]	Q_h [mvar]	S_h [mVA]
50	$3,32e^{0,676\pi j}$ V	$3,38e^{-0,824\pi j}$ V	$4,74e^{0,929\pi j}$ V		0,000	-31,831	1587,6 W	1617 var	2266,1 VA
150	$52,08e^{0,017\pi j}$	$17,68e^{0,517\pi j}$	$54,99e^{0,121\pi j}$		0,000	-10,610	120,094	40,771	126,827
250	$40,17e^{-0,642\pi j}$	$8,18e^{-0,142\pi j}$	$40,99e^{-0,578\pi j}$		0,000	-6,366	29,970	6,105	30,585
350	$27,44e^{0,779\pi j}$	$3,99e^{-0,721\pi j}$	$27,72e^{0,825\pi j}$	31,253	0,000	-4,547	7,474	1,087	7,552
450	$13,98e^{0,077\pi j}$	$1,58e^{0,577\pi j}$	$14,07e^{0,113\pi j}$		0,000	-3,537	1,198	0,136	1,205
550	$8,46e^{0,87\pi j}$	$0,78e^{-0,63\pi j}$	$8,5e^{0,899\pi j}$		0,000	-2,894	0,297	0,027	0,298
650	$5,01e^{0,104\pi j}$	$0,39e^{0,604\pi j}$	$5,02e^{0,129\pi j}$		0,001	-2,448	0,075	0,006	0,075

f [Hz]	Jalový fikt. výkon [var]				Roztr. výkon [W]		
	Q_1	$Q_{h\mathrm{X}}$	Q_X	N	P	$D_{h\mathrm{s}}$	D_{s}
50		X				0,000	
150		1617,064				0,000	
250		1617,058				0,000	
350	1616,977	1617,058	1617,065	1617,065	1587,789	0,000	0,000
450		1617,058				0,000	
550		1617,058				0,000	
650		1617,058				0,000	

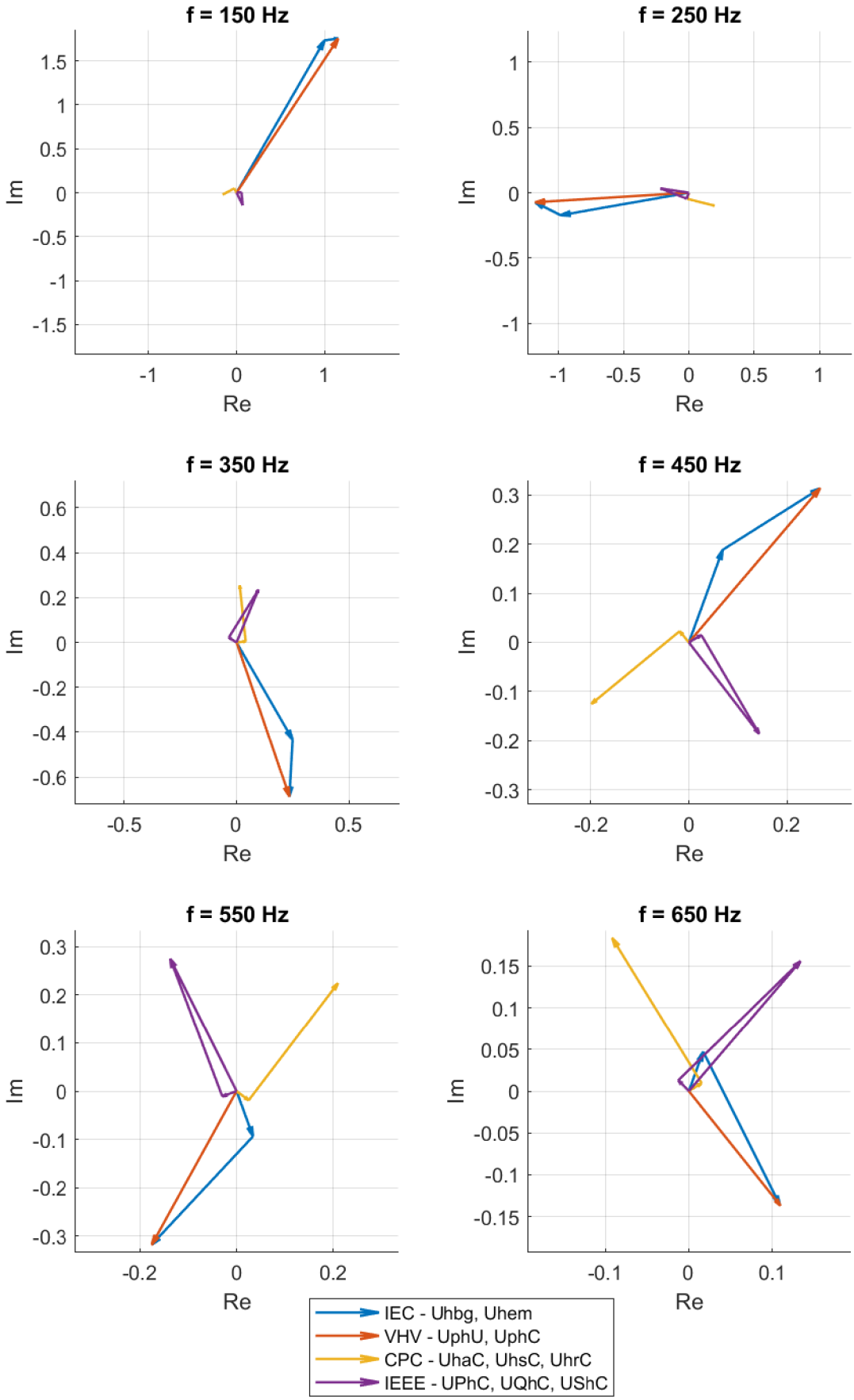

f = 150 Hz
f = 250 Hz
f = 350 Hz
f = 450 Hz
f = 550 Hz
f = 650 Hz
Im
Re
IEC - Uhbg, Uhem
VHV - UphU, UphC
CPC - UhaC, UhsC, UhrC
IEEE - UPhC, UQhC, UShC

C Výsledky simulace pro obvod s kapacitní zátěží

f [Hz]	POC		VHV [mV]		IEC [mV]		CPC - napětí na $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ [mV]		
	$U_{h\mathrm{POC}}$ [mV]	$I_{h\mathrm{POC}}$ [mA]	$U_{\mathrm{ph}\mathrm{U}}$	$U_{\mathrm{ph}\mathrm{C}}$	$U_{h\mathrm{bg}}$	$U_{h\mathrm{em}}$	$U_{h\mathrm{aC}}$	$U_{h\mathrm{sC}}$	$U_{h\mathrm{rC}}$
50	$228,67e^{-0,506\pi j}$ V	$9,52e^{-0,276\pi j}$ A	$228,67e^{-0,506\pi j}$ V	$0e^{-0,82\pi j}$ V	$230e^{-0,5\pi j}$ V	$4,49e^{0,901\pi j}$ V	$3,37e^{-0,328\pi j}$ V	$0e^{0,672\pi j}$ V	$2,97e^{0,172\pi j}$ V
150	$2100,83e^{0,314\pi j}$	$185,23e^{0,699\pi j}$	$2100,89e^{0,314\pi j}$	$0,06e^{-0,678\pi j}$	$2000,73e^{0,333\pi j}$	$157,45e^{0,043\pi j}$	$55,8e^{0,658\pi j}$	$0,03e^{0,658\pi j}$	$147,22e^{-0,842\pi j}$
250	$1182,09e^{-0,98\pi j}$	$166,61e^{-0,551\pi j}$	$1182,05e^{-0,98\pi j}$	$0,1e^{-0,629\pi j}$	$999,94e^{-0,945\pi j}$	$218,66e^{0,85\pi j}$	$48,48e^{-0,579\pi j}$	$0,08e^{0,421\pi j}$	$213,24e^{-0,079\pi j}$
350	$725,95e^{-0,395\pi j}$	$141,58e^{0,054\pi j}$	$725,83e^{-0,395\pi j}$	$0,16e^{-0,634\pi j}$	$499,71e^{-0,334\pi j}$	$254,16e^{-0,518\pi j}$	$40,72e^{0,034\pi j}$	$0,04e^{0,034\pi j}$	$250,87e^{0,534\pi j}$
450	$411,49e^{0,275\pi j}$	$102,57e^{0,735\pi j}$	$411,79e^{0,275\pi j}$	$0,3e^{-0,67\pi j}$	$200,24e^{0,389\pi j}$	$234,4e^{0,179\pi j}$	$29,39e^{0,719\pi j}$	$0,09e^{0,719\pi j}$	$232,54e^{-0,781\pi j}$
550	$363,64e^{-0,661\pi j}$	$110,59e^{-0,193\pi j}$	$363,08e^{-0,661\pi j}$	$0,64e^{-0,815\pi j}$	$99,8e^{-0,389\pi j}$	$307,34e^{-0,739\pi j}$	$31,58e^{-0,207\pi j}$	$0,09e^{0,793\pi j}$	$305,72e^{0,293\pi j}$
650	$174,51e^{-0,286\pi j}$	$62,65e^{0,186\pi j}$	$175,22e^{-0,285\pi j}$	$0,72e^{0,787\pi j}$	$50,16e^{0,389\pi j}$	$205,16e^{-0,353\pi j}$	$17,86e^{0,175\pi j}$	$0,13e^{0,175\pi j}$	$204,37e^{0,675\pi j}$

f [Hz]	IEEE - napětí na $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ [mV]			CPC - admitance [mS]			IEEE-výkony		
	$U_{\mathrm{P}h}$	$U_{\mathrm{Q}h}$	$U_{\mathrm{S}h}$	G_{e}	ΔG_h	B_h	P_h [mW]	Q_h [mvar]	S_h [mVA]
50	$3,37e^{0,684\pi j}$ V	$2,97e^{0,184\pi j}$ V	$4,49e^{0,454\pi j}$ V		0,000	27,489	1634,1 W	-1437,4 var	2176,3 VA
150	$55,83e^{0,03\pi j}$	$147,22e^{-0,47\pi j}$	$157,45e^{-0,355\pi j}$		0,017	82,441	137,995	-363,854	389,143
250	$48,4e^{-0,618\pi j}$	$213,24e^{0,882\pi j}$	$218,66e^{0,953\pi j}$		-0,054	137,447	43,592	-192,061	196,946
350	$40,76e^{0,823\pi j}$	$250,87e^{0,323\pi j}$	$254,16e^{0,375\pi j}$	31,250	0,028	192,504	16,484	-101,449	102,780
450	$29,48e^{0,169\pi j}$	$232,54e^{-0,331\pi j}$	$234,4e^{-0,291\pi j}$		0,100	247,282	5,308	-41,871	42,206
550	$31,49e^{-0,885\pi j}$	$305,72e^{0,615\pi j}$	$307,34e^{0,647\pi j}$		-0,085	302,529	4,121	-40,005	40,217
650	$17,99e^{0,747\pi j}$	$204,37e^{0,247\pi j}$	$205,16e^{0,275\pi j}$		0,226	357,639	0,959	-10,892	10,934

f [Hz]	Jalový fikt. výkon [var]				Roztr. výkon [W]		
	Q_1	$Q_{h\mathrm{X}}$	Q_X	N	P	$D_{h\mathrm{s}}$	D_{s}
50		X				0,000	
150		1438,067				0,008	
250		1438,002				-0,014	
350	-1437,430	1437,877	1439,381	1439,381	1634,302	0,005	0,023
450		1437,710				0,009	
550		1437,742				-0,007	
650		1437,592				0,009	

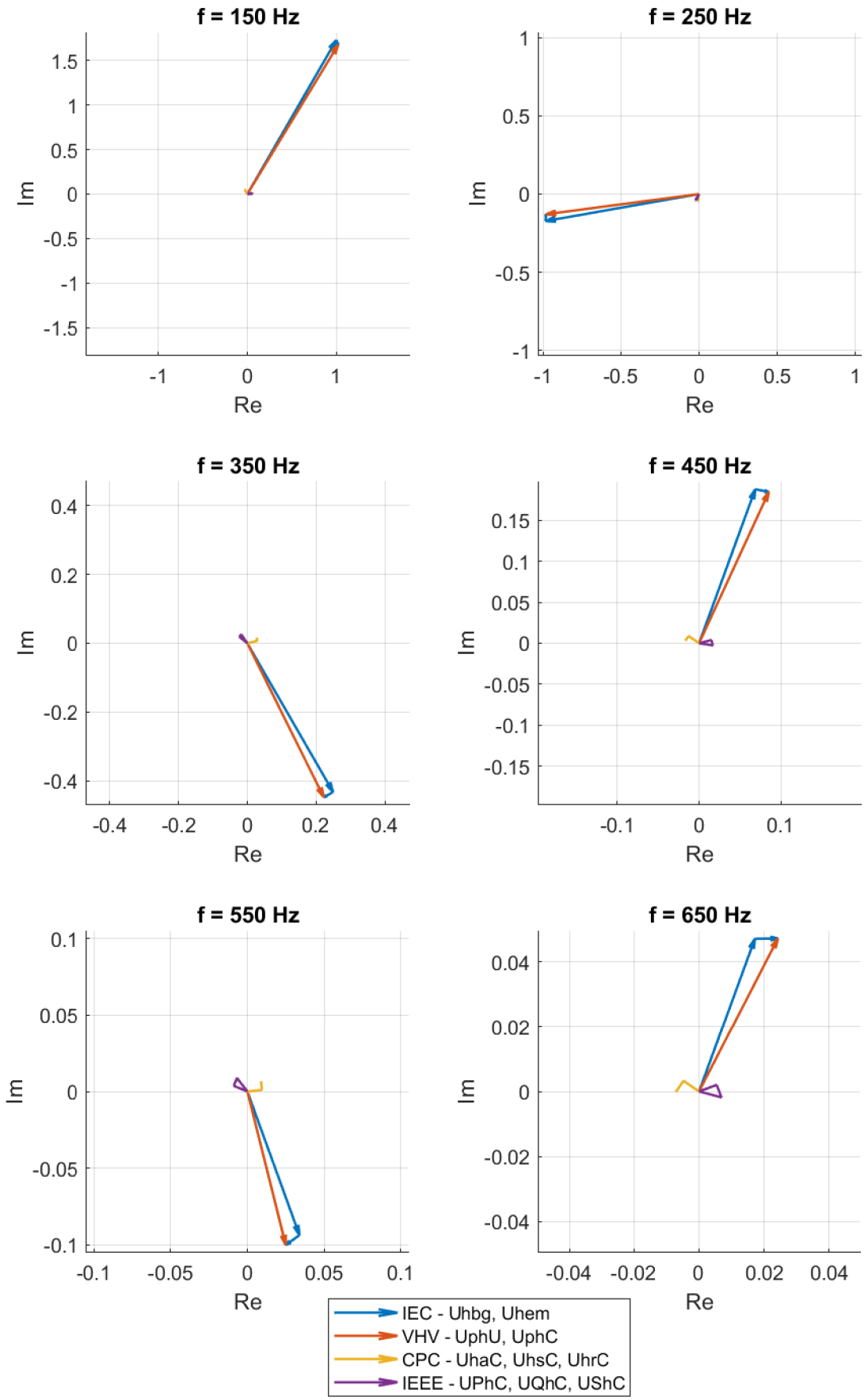

f = 150 Hz
f = 250 Hz
f = 350 Hz
f = 450 Hz
f = 550 Hz
f = 650 Hz
Im
Re
IEC - Uhbg, Uhem
VHV - UphU, UphC
CPC - UhaC, UhsC, UhrC
IEEE - UPhC, UQhC, UShC

D Výsledky simulace pro obvod s RLC zátěží

f [Hz]	POC		VHV [mV]		IEC [mV]		CPC - napětí na $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ [mV]		
	$U_{h\mathrm{POC}}$ [mV]	$I_{h\mathrm{POC}}$ [mA]	$U_{\mathrm{ph}\mathrm{U}}$	$U_{\mathrm{ph}\mathrm{C}}$	$U_{h\mathrm{bg}}$	$U_{h\mathrm{em}}$	$U_{h\mathrm{aC}}$	$U_{h\mathrm{sC}}$	$U_{h\mathrm{rC}}$
50	$225,31e^{-0,499\pi j}$ V	$10,08e^{-0,731\pi j}$ A	$225,31e^{-0,499\pi j}$ V	$0e^{0,178\pi j}$ V	$230e^{-0,5\pi j}$ V	$4,75e^{0,446\pi j}$ V	$3,54e^{-0,321\pi j}$ V	$0e^{0,679\pi j}$ V	$3,17e^{-0,821\pi j}$ V
150	$1967,15e^{0,326\pi j}$	$66,2e^{0,282\pi j}$	$1967,15e^{0,326\pi j}$	$0e^{-0,67\pi j}$	$2000,73e^{0,333\pi j}$	$56,27e^{-0,374\pi j}$	$55,74e^{0,67\pi j}$	$0e^{0,67\pi j}$	$7,74e^{0,17\pi j}$
250	$990,29e^{-0,958\pi j}$	$33,2e^{-0,924\pi j}$	$990,29e^{-0,958\pi j}$	$0,01e^{-0,591\pi j}$	$999,94e^{-0,945\pi j}$	$43,57e^{0,477\pi j}$	$43,32e^{-0,557\pi j}$	$0,01e^{0,443\pi j}$	$4,69e^{-0,057\pi j}$
350	$500,32e^{-0,353\pi j}$	$17,33e^{-0,266\pi j}$	$500,31e^{-0,353\pi j}$	$0,01e^{-0,594\pi j}$	$499,71e^{-0,334\pi j}$	$31,12e^{-0,837\pi j}$	$29,94e^{0,075\pi j}$	$0e^{0,075\pi j}$	$8,46e^{0,575\pi j}$
450	$203,44e^{0,362\pi j}$	$7,39e^{0,492\pi j}$	$203,45e^{0,362\pi j}$	$0,01e^{-0,582\pi j}$	$200,24e^{0,389\pi j}$	$16,88e^{-0,064\pi j}$	$15,5e^{0,806\pi j}$	$0e^{0,806\pi j}$	$6,69e^{-0,694\pi j}$
550	$103,31e^{-0,422\pi j}$	$3,97e^{-0,257\pi j}$	$103,3e^{-0,422\pi j}$	$0,01e^{-0,578\pi j}$	$99,8e^{-0,389\pi j}$	$11,03e^{-0,803\pi j}$	$9,57e^{0,032\pi j}$	$0e^{0,032\pi j}$	$5,48e^{0,532\pi j}$
650	$53,1e^{0,349\pi j}$	$2,16e^{0,544\pi j}$	$53,11e^{0,349\pi j}$	$0,02e^{-0,578\pi j}$	$50,16e^{0,389\pi j}$	$7,09e^{0,005\pi j}$	$5,8e^{0,81\pi j}$	$0,01e^{0,81\pi j}$	$4,07e^{-0,69\pi j}$

f [Hz]	IEEE - napětí na $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ [mV]			CPC - admitance [mS]			IEEE-výkony		
	$U_{\mathrm{P}h}$	$U_{\mathrm{Q}h}$	$U_{\mathrm{S}h}$	G_{e}	ΔG_h	B_h	P_h [mW]	Q_h [mvar]	S_h [mVA]
50	$3,54e^{0,677\pi j}$ V	$3,17e^{-0,823\pi j}$ V	$4,75e^{0,909\pi j}$ V		0,000	-29,836	1692,2 W	1514,7 var	2271,1 VA
150	$55,74e^{0,018\pi j}$	$7,74e^{0,518\pi j}$	$56,27e^{0,062\pi j}$		0,001	-4,628	128,994	17,908	130,231
250	$43,32e^{-0,64\pi j}$	$4,69e^{0,86\pi j}$	$43,57e^{-0,674\pi j}$		-0,004	3,609	32,685	-3,539	32,876
350	$29,94e^{0,782\pi j}$	$8,46e^{0,282\pi j}$	$31,12e^{0,694\pi j}$	33,333	0,004	9,425	8,345	-2,359	8,672
450	$15,5e^{0,082\pi j}$	$6,69e^{-0,418\pi j}$	$16,88e^{-0,048\pi j}$		0,009	14,397	1,380	-0,596	1,503
550	$9,57e^{0,876\pi j}$	$5,48e^{0,376\pi j}$	$11,03e^{0,711\pi j}$		0,010	19,092	0,356	-0,204	0,410
650	$5,8e^{0,112\pi j}$	$4,07e^{-0,388\pi j}$	$7,09e^{-0,083\pi j}$		0,039	23,411	0,094	-0,066	0,115

f [Hz]	Jalový fikt. výkon [var]				Roztr. výkon [W]		
	Q_1	$Q_{h\mathrm{X}}$	Q_X	N	P	$D_{h\mathrm{s}}$	D_{s}
50		X				0,000	
150		1514,747				0,001	
250		1514,746				-0,001	
350	1514,669	1514,746	1514,748	1514,748	1692,373	0,000	0,001
450		1514,746				0,000	
550		1514,746				0,000	
650		1514,746				0,000	

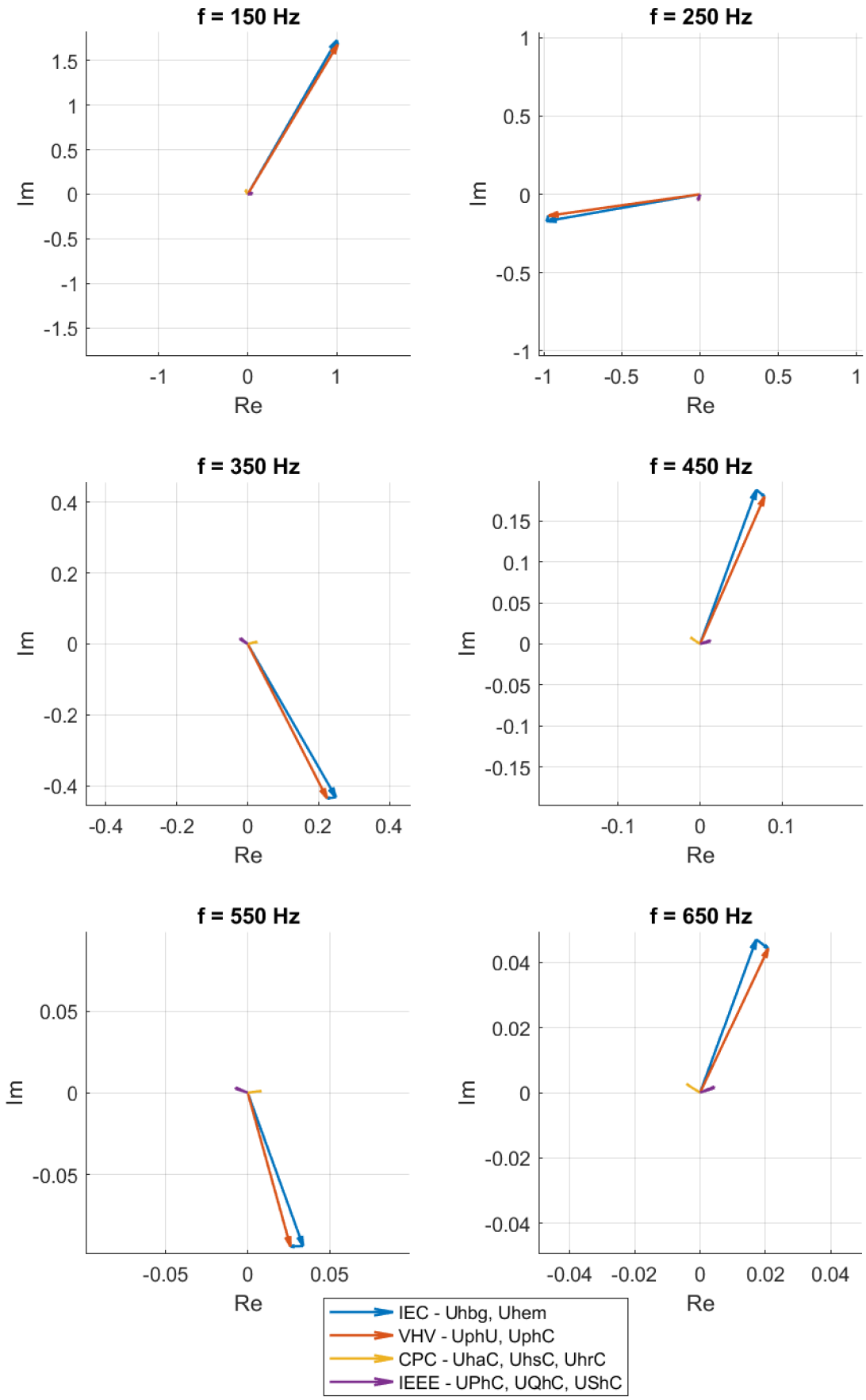

f = 150 Hz
f = 250 Hz
f = 350 Hz
f = 450 Hz
f = 550 Hz
f = 650 Hz
Im
Re
IEC - Uhbg, Uhem
VHV - UphU, UphC
CPC - UhaC, UhsC, UhrC
IEEE - UPhC, UQhC, UShC

E Výsledky simulace pro komplexnější indukt. zátěž

f [Hz]	POC		VHV [mV]		IEC [mV]		CPC - napětí na $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ [mV]		
	$U_{h\mathrm{POC}}$ [mV]	$I_{h\mathrm{POC}}$ [mA]	$U_{\mathrm{ph}\mathrm{U}}$	$U_{\mathrm{ph}\mathrm{C}}$	$U_{h\mathrm{bg}}$	$U_{h\mathrm{em}}$	$U_{h\mathrm{aC}}$	$U_{h\mathrm{sC}}$	$U_{h\mathrm{rC}}$
50	$225,45e^{-0,499\pi j}$ V	$9,93e^{-0,754\pi j}$ A	$225,45e^{-0,499\pi j}$ V	$0e^{0,707\pi j}$ V	$230e^{-0,5\pi j}$ V	$4,69e^{0,424\pi j}$ V	$3,25e^{-0,321\pi j}$ V	$0e^{-0,321\pi j}$ V	$3,37e^{-0,821\pi j}$ V
150	$1962,21e^{0,328\pi j}$	$60,22e^{0,215\pi j}$	$1962,21e^{0,328\pi j}$	$0,01e^{-0,292\pi j}$	$2000,71e^{0,333\pi j}$	$51,19e^{-0,441\pi j}$	$51,03e^{0,672\pi j}$	$2,99e^{-0,328\pi j}$	$17,69e^{0,172\pi j}$
250	$980,35e^{-0,955\pi j}$	$28,78e^{0,975\pi j}$	$980,35e^{-0,955\pi j}$	$0e^{0,347\pi j}$	$999,92e^{-0,945\pi j}$	$37,77e^{0,376\pi j}$	$39,36e^{-0,554\pi j}$	$2,49e^{0,446\pi j}$	$8,19e^{0,946\pi j}$
350	$489,63e^{-0,349\pi j}$	$14,19e^{-0,399\pi j}$	$489,63e^{-0,349\pi j}$	$0e^{-0,837\pi j}$	$499,69e^{-0,334\pi j}$	$25,47e^{-0,971\pi j}$	$26,89e^{0,08\pi j}$	$1,74e^{-0,92\pi j}$	$4e^{-0,42\pi j}$
450	$196,04e^{0,369\pi j}$	$5,65e^{0,33\pi j}$	$196,04e^{0,369\pi j}$	$0e^{-0,145\pi j}$	$200,23e^{0,388\pi j}$	$12,91e^{-0,226\pi j}$	$13,71e^{0,813\pi j}$	$0,89e^{-0,187\pi j}$	$1,58e^{0,313\pi j}$
550	$97,61e^{-0,414\pi j}$	$2,8e^{-0,446\pi j}$	$97,61e^{-0,414\pi j}$	$0e^{-0,265\pi j}$	$99,79e^{-0,39\pi j}$	$7,79e^{-0,992\pi j}$	$8,3e^{0,04\pi j}$	$0,54e^{-0,96\pi j}$	$0,78e^{-0,46\pi j}$
650	$49e^{0,36\pi j}$	$1,41e^{0,333\pi j}$	$49e^{0,36\pi j}$	$0e^{-0,108\pi j}$	$50,15e^{0,388\pi j}$	$4,6e^{-0,206\pi j}$	$4,91e^{0,821\pi j}$	$0,32e^{-0,179\pi j}$	$0,39e^{0,321\pi j}$

f [Hz]	IEEE - napětí na $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ [mV]			CPC - admitance [mS]			IEEE-výkony		
	$U_{\mathrm{P}h}$	$U_{\mathrm{Q}h}$	$U_{\mathrm{S}h}$	G_{e}	ΔG_h	B_h	P_h [mW]	Q_h [mvar]	S_h [mVA]
50	$3,25e^{0,676\pi j}$ V	$3,37e^{-0,824\pi j}$ V	$4,69e^{0,932\pi j}$ V		0,000	-31,702	1555 W	1611,4 var	2239,3 VA
150	$48,04e^{0,016\pi j}$	$17,69e^{0,516\pi j}$	$51,19e^{0,129\pi j}$		-1,792	-10,605	110,890	40,832	118,169
250	$36,87e^{-0,643\pi j}$	$8,19e^{-0,143\pi j}$	$37,77e^{-0,574\pi j}$		-1,937	-6,366	27,541	6,118	28,212
350	$25,15e^{0,777\pi j}$	$4e^{-0,723\pi j}$	$25,47e^{0,828\pi j}$	30,593	-1,978	-4,546	6,860	1,090	6,946
450	$12,81e^{0,075\pi j}$	$1,58e^{0,575\pi j}$	$12,91e^{0,114\pi j}$		-1,990	-3,535	1,099	0,136	1,108
550	$7,75e^{0,868\pi j}$	$0,78e^{-0,632\pi j}$	$7,79e^{0,9\pi j}$		-2,006	-2,892	0,272	0,028	0,274
650	$4,59e^{0,101\pi j}$	$0,39e^{0,601\pi j}$	$4,6e^{0,129\pi j}$		-1,999	-2,445	0,069	0,006	0,069

f [Hz]	Jalový fikt. výkon [var]				Roztr. výkon [W]		
	Q_1	$Q_{h\mathrm{X}}$	Q_X	N	P	D_{hs}	D_{s}
50		X				0,009	
150		1611,449				-0,793	
250		1611,443				-0,428	
350	1611,362	1611,443	1611,450	1611,450	1555,132	-0,218	0,933
450		1611,443				-0,088	
550		1611,443				-0,044	
650		1611,443				-0,022	

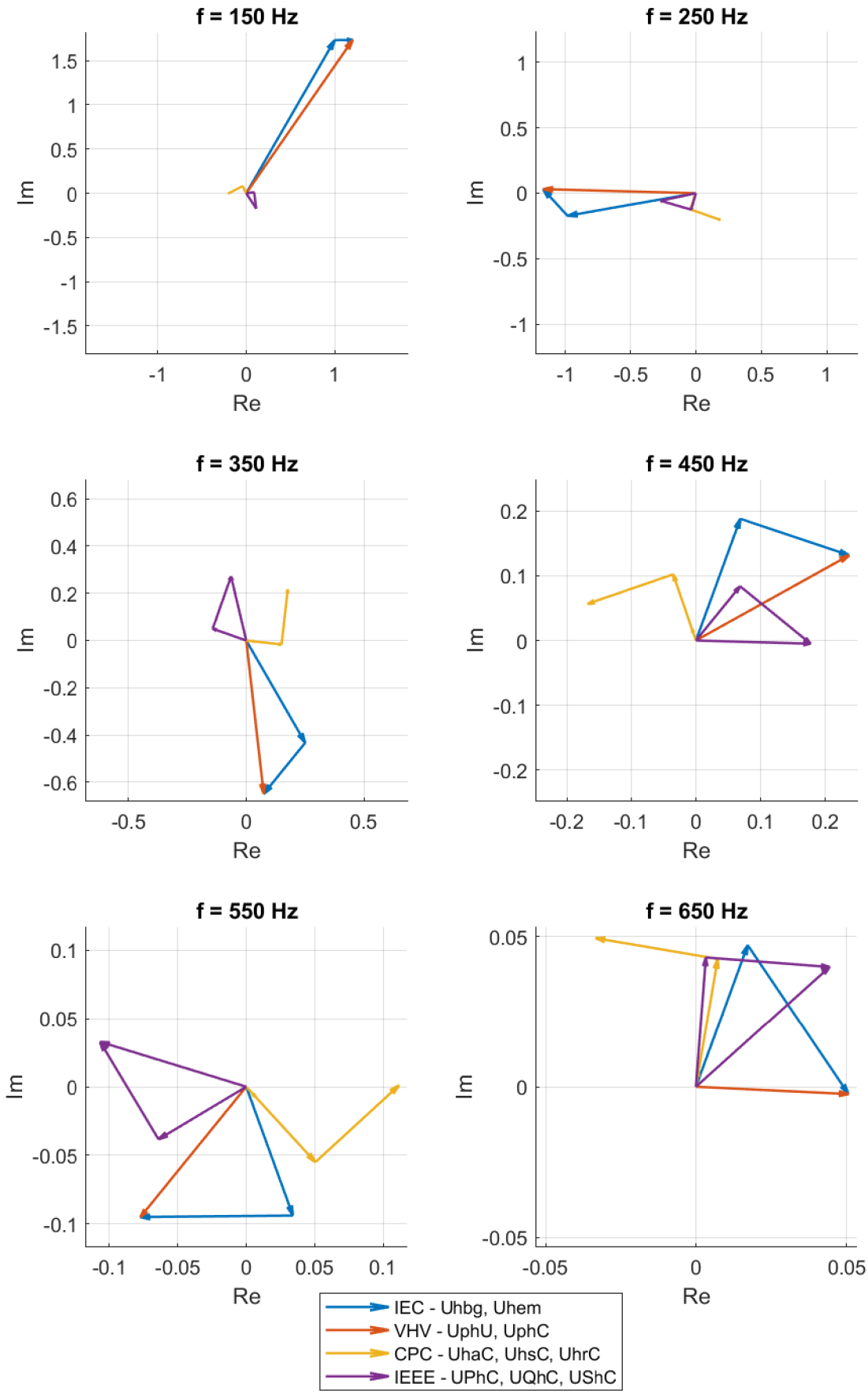

f = 150 Hz
f = 250 Hz
f = 350 Hz
f = 450 Hz
f = 550 Hz
f = 650 Hz
Im
Re
IEC - Uhbg, Uhem
VHV - UphU, UphC
CPC - UhaC, UhsC, UhrC
IEEE - UPhC, UQhC, UShC

F Výsledky simulace pro komplexnější kapacit. zátěž

f [Hz]	POC		VHV [mV]		IEC [mV]		CPC - napětí na $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ [mV]		
	$U_{h\mathrm{POC}}$ [mV]	$I_{h\mathrm{POC}}$ [mA]	$U_{\mathrm{ph}\mathrm{U}}$	$U_{\mathrm{ph}\mathrm{C}}$	$U_{h\mathrm{bg}}$	$U_{h\mathrm{em}}$	$U_{h\mathrm{aC}}$	$U_{h\mathrm{sC}}$	$U_{h\mathrm{rC}}$
50	$229,13e^{-0,507\pi j}$ V	$10,81e^{-0,236\pi j}$ A	$229,13e^{-0,507\pi j}$ V	$0e^{-0,815\pi j}$ V	$230e^{-0,5\pi j}$ V	$5,1e^{0,942\pi j}$ V	$3,36e^{-0,329\pi j}$ V	$0e^{0,671\pi j}$ V	$3,83e^{0,171\pi j}$ V
150	$2113,19e^{0,307\pi j}$	$240,97e^{0,661\pi j}$	$2113,26e^{0,307\pi j}$	$0,07e^{-0,753\pi j}$	$2000,73e^{0,333\pi j}$	$204,82e^{0,005\pi j}$	$55,87e^{0,651\pi j}$	$34,78e^{0,651\pi j}$	$183,67e^{-0,849\pi j}$
250	$1171,97e^{0,992\pi j}$	$210,42e^{-0,665\pi j}$	$1171,89e^{0,992\pi j}$	$0,12e^{-0,767\pi j}$	$999,94e^{-0,945\pi j}$	$276,16e^{0,736\pi j}$	$47,84e^{-0,607\pi j}$	$82,76e^{-0,607\pi j}$	$243,33e^{-0,107\pi j}$
350	$653,38e^{-0,464\pi j}$	$155,22e^{-0,146\pi j}$	$653,32e^{-0,464\pi j}$	$0,17e^{-0,848\pi j}$	$499,71e^{-0,334\pi j}$	$278,65e^{-0,717\pi j}$	$36,48e^{-0,036\pi j}$	$114,09e^{-0,036\pi j}$	$234,46e^{0,464\pi j}$
450	$270,92e^{0,162\pi j}$	$77,59e^{0,453\pi j}$	$271,11e^{0,161\pi j}$	$0,21e^{-0,966\pi j}$	$200,24e^{0,389\pi j}$	$177,32e^{-0,103\pi j}$	$19,26e^{0,606\pi j}$	$88,82e^{0,606\pi j}$	$140,58e^{-0,894\pi j}$
550	$122,41e^{-0,718\pi j}$	$40,08e^{-0,451\pi j}$	$122,32e^{-0,717\pi j}$	$0,22e^{0,916\pi j}$	$99,8e^{-0,389\pi j}$	$111,37e^{-0,997\pi j}$	$10,58e^{-0,264\pi j}$	$63,93e^{-0,264\pi j}$	$82,77e^{0,236\pi j}$
650	$50,58e^{-0,015\pi j}$	$18,21e^{0,228\pi j}$	$50,75e^{-0,015\pi j}$	$0,2e^{0,819\pi j}$	$50,16e^{0,389\pi j}$	$59,64e^{-0,311\pi j}$	$5,15e^{0,446\pi j}$	$38,01e^{0,446\pi j}$	$41,17e^{0,946\pi j}$

f [Hz]	IEEE - napětí na $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ [mV]			CPC - admitance [mS]			IEEE-výkony		
	$U_{\mathrm{P}h}$	$U_{\mathrm{Q}h}$	$U_{\mathrm{S}h}$	G_{e}	ΔG_h	B_h	P_h [mW]	Q_h [mvar]	S_h [mVA]
50	$3,36e^{0,685\pi j}$ V	$3,83e^{0,185\pi j}$ V	$5,1e^{0,414\pi j}$ V		-0,004	35,477	1632,8 W	-1862,5 var	2476,9 VA
150	$90,65e^{0,037\pi j}$	$183,67e^{-0,463\pi j}$	$204,82e^{-0,317\pi j}$		19,364	102,254	225,376	-456,626	509,217
250	$130,6e^{-0,59\pi j}$	$243,33e^{0,91\pi j}$	$276,16e^{-0,933\pi j}$		53,804	158,194	116,626	-217,283	246,604
350	$150,57e^{0,892\pi j}$	$234,46e^{0,392\pi j}$	$278,65e^{0,574\pi j}$	31,106	97,269	199,899	54,803	-85,337	101,419
450	$108,08e^{0,282\pi j}$	$140,58e^{-0,218\pi j}$	$177,32e^{-0,009\pi j}$		143,461	227,064	12,813	-16,666	21,022
550	$74,51e^{-0,828\pi j}$	$82,77e^{0,672\pi j}$	$111,37e^{0,905\pi j}$		187,928	243,327	3,282	-3,646	4,906
650	$43,16e^{0,476\pi j}$	$41,17e^{-0,024\pi j}$	$59,64e^{0,233\pi j}$		229,466	248,533	0,667	-0,636	0,921

f [Hz]	Jalový fikt. výkon [var]				Roztr. výkon [W]		
	Q_1	$Q_{h\mathrm{X}}$	Q_X	N	P	D_{hs}	D_{s}
50		X				-0,216	
150		1863,258				9,376	
250		1863,084				14,449	
350	-1862,487	1862,840	1864,050	1864,218	1633,198	14,563	24,960
450		1862,653				8,906	
550		1862,612				5,271	
650		1862,602				2,660	

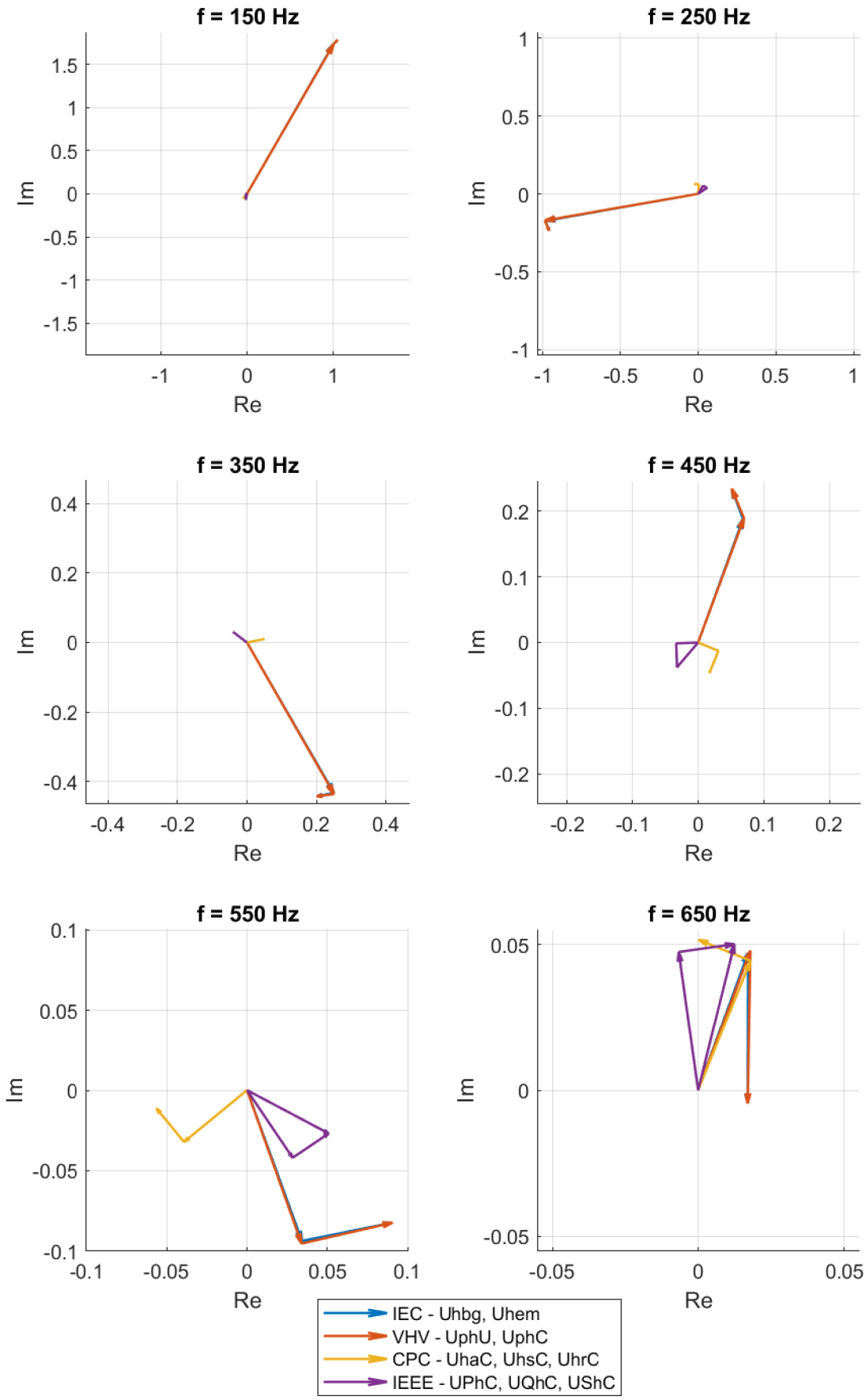

f = 150 Hz
f = 250 Hz
f = 350 Hz
f = 450 Hz
f = 550 Hz
f = 650 Hz
Im
Re
IEC - Uhbg, Uhem
VHV - UphU, UphC
CPC - UhaC, UhsC, UhrC
IEEE - UPhC, UQhC, UShC

G Výsledky simulace pro CFL

f [Hz]	POC		VHV [mV]		IEC [mV]		CPC - napětí na $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ [mV]		
	$U_{h\mathrm{POC}}$ [mV]	$I_{h\mathrm{POC}}$ [mA]	$U_{\mathrm{p}h\mathrm{U}}$	$U_{\mathrm{p}h\mathrm{C}}$	$U_{h\mathrm{bg}}$	$U_{h\mathrm{em}}$	$U_{h\mathrm{aC}}$	$U_{h\mathrm{sC}}$	$U_{h\mathrm{rC}}$
50	$229,97e^{-0,5\pi j}$ V	$101,06e^{-0,371\pi j}$	$229,97e^{-0,5\pi j}$ V	$2,57e^{0,175\pi j}$	$230e^{-0,5\pi j}$ V	$47,67e^{0,807\pi j}$	$43,64e^{-0,322\pi j}$	$0,16e^{-0,322\pi j}$	$18,8e^{0,178\pi j}$
150	$2066,68e^{0,331\pi j}$	$80,32e^{0,905\pi j}$	$2001,86e^{0,333\pi j}$	$66,54e^{0,259\pi j}$	$2000,74e^{0,333\pi j}$	$68,27e^{0,249\pi j}$	$0,71e^{0,675\pi j}$	$16,44e^{-0,325\pi j}$	$66,43e^{-0,825\pi j}$
250	$989,28e^{-0,923\pi j}$	$51,79e^{0,215\pi j}$	$1003,08e^{-0,945\pi j}$	$70,93e^{-0,372\pi j}$	$999,92e^{-0,945\pi j}$	$67,97e^{-0,384\pi j}$	$0,52e^{-0,522\pi j}$	$62,22e^{0,478\pi j}$	$28,52e^{0,978\pi j}$
350	$485,89e^{-0,364\pi j}$	$28,02e^{-0,366\pi j}$	$502,6e^{-0,334\pi j}$	$50,06e^{-0,957\pi j}$	$499,72e^{-0,333\pi j}$	$50,31e^{-0,937\pi j}$	$0,35e^{0,064\pi j}$	$49,96e^{0,064\pi j}$	$0,21e^{-0,436\pi j}$
450	$239,98e^{0,432\pi j}$	$21,59e^{-0,831\pi j}$	$201,97e^{0,387\pi j}$	$48,72e^{0,626\pi j}$	$200,24e^{0,389\pi j}$	$49,35e^{0,613\pi j}$	$0,22e^{0,876\pi j}$	$33,74e^{-0,124\pi j}$	$36,21e^{-0,624\pi j}$
550	$122,48e^{-0,235\pi j}$	$20,69e^{0,609\pi j}$	$101,27e^{-0,391\pi j}$	$58,11e^{0,072\pi j}$	$99,8e^{-0,389\pi j}$	$57,5e^{0,063\pi j}$	$0,14e^{0,219\pi j}$	$50,87e^{-0,781\pi j}$	$27,05e^{0,719\pi j}$
650	$17,58e^{-0,083\pi j}$	$15,79e^{0,038\pi j}$	$51,23e^{0,386\pi j}$	$52,54e^{-0,506\pi j}$	$50,17e^{0,389\pi j}$	$51,7e^{-0,501\pi j}$	$0,02e^{0,378\pi j}$	$47,96e^{0,378\pi j}$	$19,24e^{0,878\pi j}$

f [Hz]	IEEE - napětí na $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ [mV]			CPC - admitance [mS]			IEEE-výkony		
	$U_{\mathrm{P}h}$	$U_{\mathrm{Q}h}$	$U_{\mathrm{S}h}$	G_{e}	ΔG_h	B_h	P_h [mW]	Q_h [mvar]	S_h [mVA]
50	$43,8e^{0,678\pi j}$	$18,8e^{0,178\pi j}$	$47,67e^{0,549\pi j}$		0,001	0,173	21,4 W	-9,2 var	23,2 VA
150	$15,73e^{-0,987\pi j}$	$66,43e^{-0,487\pi j}$	$68,27e^{-0,561\pi j}$		-9,358	37,818	-38,252	-161,525	165,993
250	$61,7e^{0,325\pi j}$	$28,52e^{-0,175\pi j}$	$67,97e^{0,187\pi j}$		-47,921	-21,970	-46,505	21,501	51,235
350	$50,31e^{0,793\pi j}$	$0,21e^{-0,707\pi j}$	$50,31e^{0,794\pi j}$	0,402	57,273	-0,246	13,617	0,058	13,617
450	$33,52e^{-0,988\pi j}$	$36,21e^{-0,488\pi j}$	$49,35e^{-0,725\pi j}$		-61,529	66,028	-3,520	-3,803	5,182
550	$50,73e^{-0,311\pi j}$	$27,05e^{0,189\pi j}$	$57,5e^{-0,155\pi j}$		-149,454	79,481	-2,236	-1,192	2,534
650	$47,99e^{0,544\pi j}$	$19,24e^{0,044\pi j}$	$51,7e^{0,423\pi j}$		833,412	334,336	0,258	-0,103	0,278

f [Hz]	Jalový fikt. výkon [var]				Roztr. výkon [W]		
	Q_1	$Q_{h\mathrm{X}}$	Q_X	N	P	$D_{h\mathrm{s}}$	D_{s}
50		X				0,079	
150		20,178				-4,448	
250		10,442				-10,903	
350	-9,167	9,168	21,266	25,932	21,280	6,400	14,840
450		9,865				-3,396	
550		9,437				-4,210	
650		9,267				3,369	

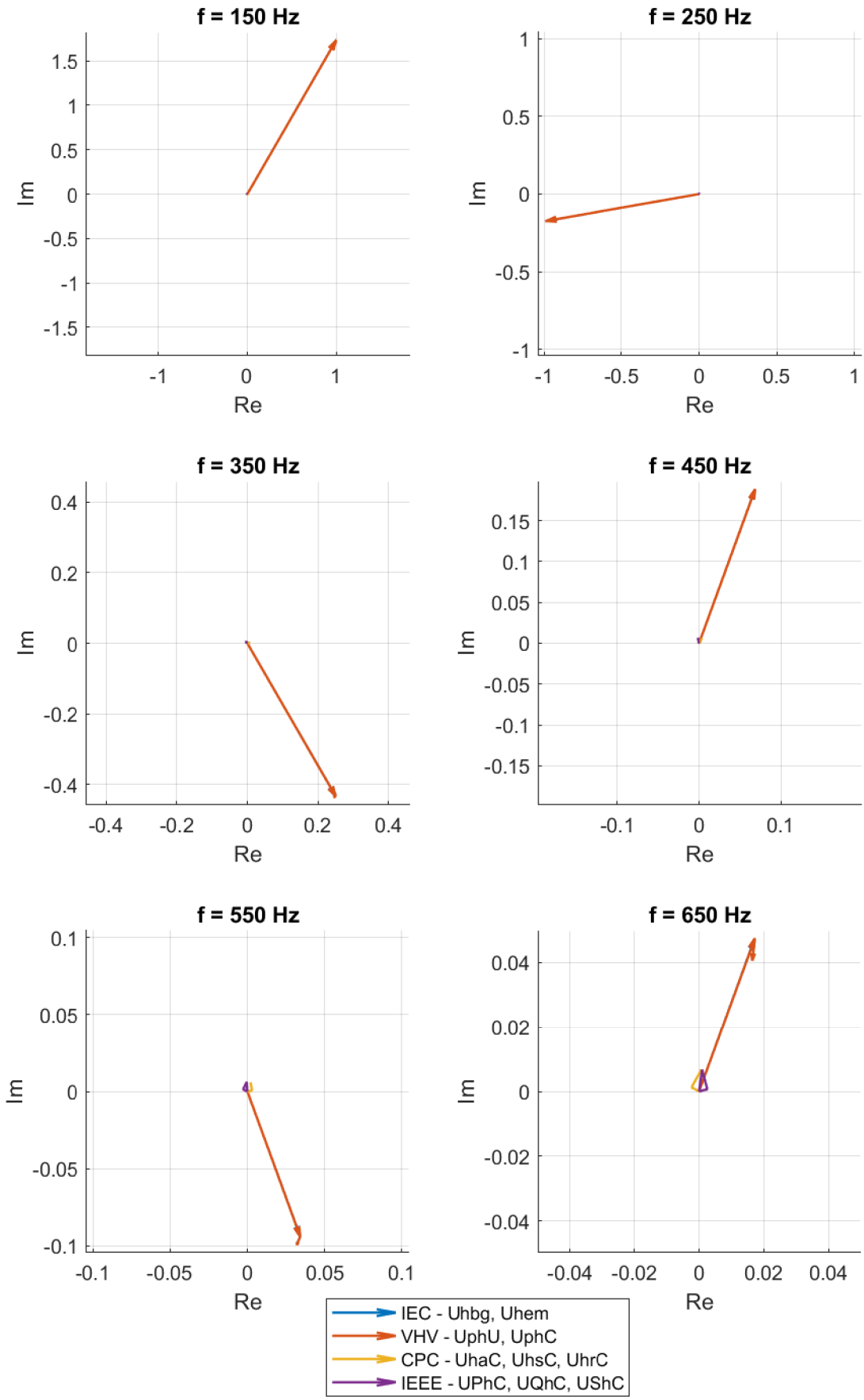

f = 150 Hz
f = 250 Hz
f = 350 Hz
f = 450 Hz
f = 550 Hz
f = 650 Hz
Im
Re
IEC - Uhbg, Uhem
VHV - UphU, UphC
CPC - UhaC, UhsC, UhrC
IEEE - UPhC, UQhC, UShC

H Výsledky simulace pro LED světlo

f [Hz]	POC		VHV [mV]		IEC [mV]		CPC - napětí na $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ [mV]		
	$U_{h\mathrm{POC}}$ [mV]	$I_{h\mathrm{POC}}$ [mA]	$U_{\mathrm{p}h\mathrm{U}}$	$U_{\mathrm{p}h\mathrm{C}}$	$U_{h\mathrm{bg}}$	$U_{h\mathrm{em}}$	$U_{h\mathrm{aC}}$	$U_{h\mathrm{sC}}$	$U_{h\mathrm{rC}}$
50	$230e^{-0,5\pi j}$ V	$27,38e^{-0,171\pi j}$	$229,97e^{-0,5\pi j}$ V	$38,61e^{-0,237\pi j}$	$230e^{-0,5\pi j}$ V	$12,91e^{-0,993\pi j}$	$6,57e^{-0,322\pi j}$	$0,04e^{-0,322\pi j}$	$11,1e^{0,178\pi j}$
150	$1998,59e^{0,335\pi j}$	$11,63e^{-0,44\pi j}$	$2001,16e^{0,333\pi j}$	$10,28e^{0,915\pi j}$	$2000,74e^{0,333\pi j}$	$9,89e^{0,904\pi j}$	$0,1e^{0,679\pi j}$	$7,62e^{-0,321\pi j}$	$6,42e^{0,179\pi j}$
250	$1006,01e^{-0,944\pi j}$	$4,85e^{-0,251\pi j}$	$1000,5e^{-0,945\pi j}$	$5,92e^{-0,826\pi j}$	$999,92e^{-0,945\pi j}$	$6,36e^{-0,85\pi j}$	$0,08e^{-0,543\pi j}$	$3,7e^{0,457\pi j}$	$5,23e^{-0,043\pi j}$
350	$499,62e^{-0,337\pi j}$	$3,67e^{-0,268\pi j}$	$500,25e^{-0,333\pi j}$	$6,41e^{-0,867\pi j}$	$499,72e^{-0,333\pi j}$	$6,6e^{-0,84\pi j}$	$0,05e^{0,091\pi j}$	$6,39e^{0,091\pi j}$	$1,42e^{0,591\pi j}$
450	$193,81e^{0,391\pi j}$	$2,88e^{-0,123\pi j}$	$200,61e^{0,389\pi j}$	$6,96e^{-0,68\pi j}$	$200,24e^{0,389\pi j}$	$6,59e^{-0,679\pi j}$	$0,03e^{0,835\pi j}$	$0,33e^{-0,165\pi j}$	$6,58e^{0,335\pi j}$
550	$104,49e^{-0,401\pi j}$	$2,19e^{-0,069\pi j}$	$100,08e^{-0,389\pi j}$	$5,83e^{-0,622\pi j}$	$99,8e^{-0,389\pi j}$	$6,09e^{-0,615\pi j}$	$0,02e^{0,053\pi j}$	$3,05e^{0,053\pi j}$	$5,26e^{0,553\pi j}$
650	$43,68e^{0,377\pi j}$	$2,05e^{0,006\pi j}$	$50,36e^{0,389\pi j}$	$6,89e^{-0,537\pi j}$	$50,17e^{0,389\pi j}$	$6,71e^{-0,533\pi j}$	$0,01e^{0,838\pi j}$	$2,63e^{0,838\pi j}$	$6,17e^{0,338\pi j}$

f [Hz]	IEEE - napětí na $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ [mV]			CPC - admitance [mS]			IEEE-výkony		
	$U_{\mathrm{P}h}$	$U_{\mathrm{Q}h}$	$U_{\mathrm{S}h}$	G_{e}	ΔG_h	B_h	P_h [mW]	Q_h [mvar]	S_h [mVA]
50	$6,6e^{0,678\pi j}$	$11,1e^{0,178\pi j}$	$12,91e^{0,349\pi j}$		0,000	0,102	3,2 W	-5,4 var	6,3 VA
150	$7,52e^{-0,991\pi j}$	$6,42e^{0,509\pi j}$	$9,89e^{0,784\pi j}$		-4,488	-3,776	-17,686	15,084	23,245
250	$3,62e^{0,345\pi j}$	$5,23e^{0,845\pi j}$	$6,36e^{0,653\pi j}$		-2,801	3,964	-2,773	-4,012	4,877
350	$6,44e^{0,766\pi j}$	$1,42e^{0,266\pi j}$	$6,6e^{0,697\pi j}$	0,061	7,120	1,585	1,792	-0,396	1,836
450	$0,3e^{-0,947\pi j}$	$6,58e^{0,553\pi j}$	$6,59e^{0,567\pi j}$		-0,739	-14,856	-0,025	0,558	0,559
550	$3,07e^{0,855\pi j}$	$5,26e^{0,355\pi j}$	$6,09e^{0,523\pi j}$		10,503	18,104	0,115	-0,198	0,229
650	$2,64e^{0,084\pi j}$	$6,17e^{0,584\pi j}$	$6,71e^{0,455\pi j}$		18,383	-43,148	0,035	0,082	0,090

f [Hz]	Jalový fikt. výkon [var]				Roztr. výkon [W]		
	Q_1	$Q_{h\mathrm{X}}$	Q_X	N	P	$D_{h\mathrm{s}}$	D_{s}
50		X				0,019	
150		5,683				-2,063	
250		5,488				-0,648	
350	-5,411	5,414	5,830	6,279	3,202	0,818	2,334
450		5,452				-0,033	
550		5,429				0,252	
650		5,428				0,185	

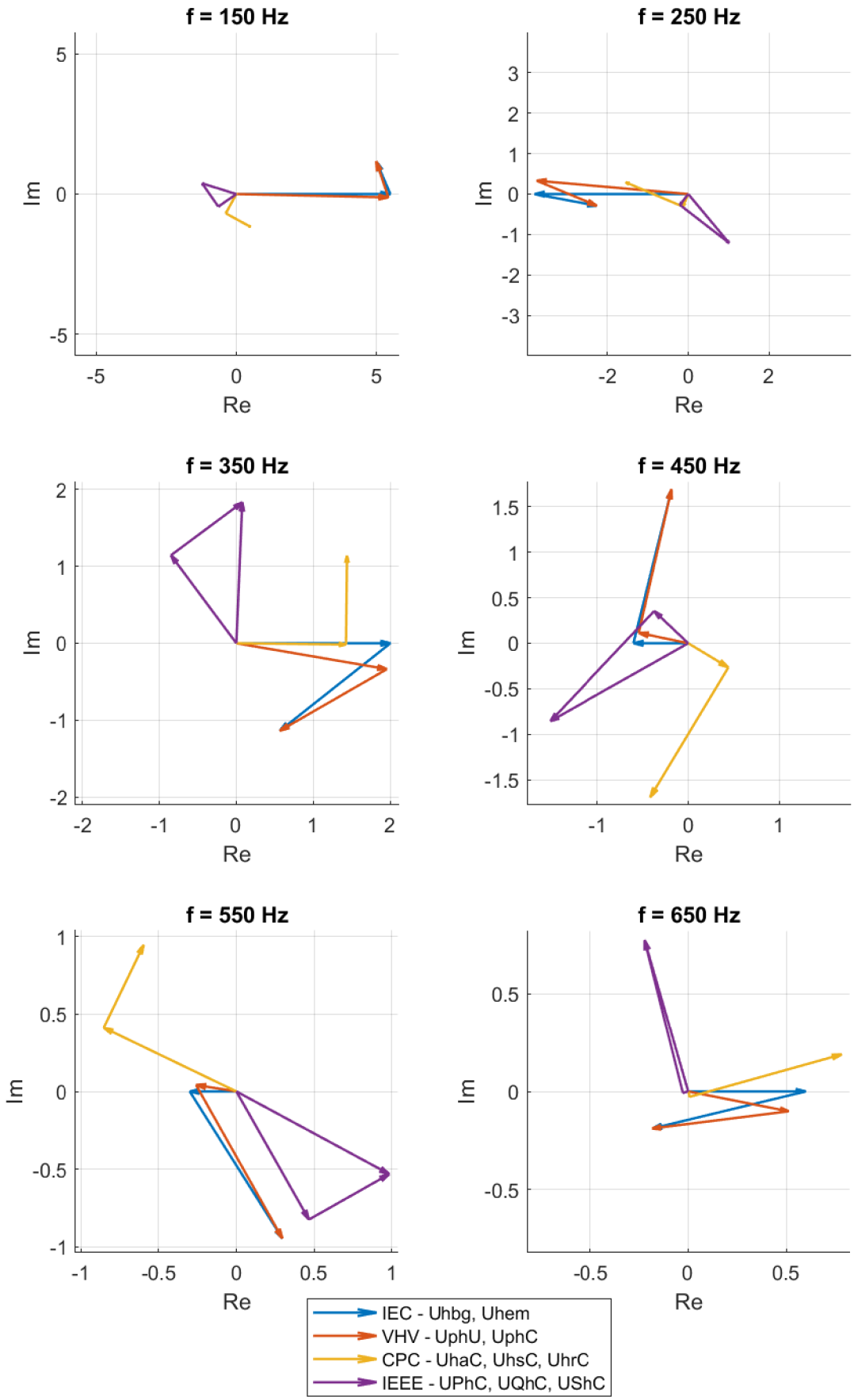

f = 150 Hz
f = 250 Hz
f = 350 Hz
f = 450 Hz
f = 550 Hz
f = 650 Hz
Im
Re
IEC - Uhbg, Uhem
VHV - UphU, UphC
CPC - UhaC, UhsC, UhrC
IEEE - UPhC, UQhC, UShC

I Výsledky pro naměřená data

f [Hz]	POC		VHV [mV]		IEC [mV]		CPC - napětí na $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ [mV]		
	$U_{h\mathrm{POC}}$ [mV]	$I_{h\mathrm{POC}}$ [mA]	$U_{\mathrm{ph}\mathrm{U}}$	$U_{\mathrm{ph}\mathrm{C}}$	$U_{h\mathrm{bg}}$	$U_{h\mathrm{em}}$	$U_{h\mathrm{aC}}$	$U_{h\mathrm{sC}}$	$U_{h\mathrm{rC}}$
50	$230,46e^{0\pi j}$ V	$1185,43e^{0,121\pi j}$	$230,25e^{0,003\pi j}$ V	$2025,46e^{-0,466\pi j}$	$229,9e^{0\pi j}$ V	$559,13e^{0\pi j}$	$513,31e^{0,879\pi j}$	$6,1e^{0,879\pi j}$	$206,97e^{-0,621\pi j}$
150	$5127,18e^{0,073\pi j}$	$1093,22e^{-0,637\pi j}$	$5428,37e^{-0,007\pi j}$	$1361,79e^{0,604\pi j}$	$5499,75e^{0\pi j}$	$1278,85e^{0,63\pi j}$	$28,32e^{0,34\pi j}$	$812,88e^{-0,66\pi j}$	$1009,91e^{-0,16\pi j}$
250	$2272,67e^{-0,959\pi j}$	$927,61e^{0,61\pi j}$	$3765,46e^{0,972\pi j}$	$1620,6e^{-0,125\pi j}$	$3800,09e^{1\pi j}$	$1573,26e^{-0,059\pi j}$	$18,2e^{-0,628\pi j}$	$319,03e^{-0,628\pi j}$	$1536,69e^{0,872\pi j}$
350	$1269,2e^{-0,354\pi j}$	$720,69e^{-0,137\pi j}$	$1984,21e^{-0,054\pi j}$	$1606,31e^{-0,834\pi j}$	$2000,24e^{0\pi j}$	$1832,35e^{-0,787\pi j}$	$15,24e^{-0,004\pi j}$	$1408,3e^{-0,004\pi j}$	$1153,7e^{0,496\pi j}$
450	$1698,12e^{0,534\pi j}$	$509,5e^{-0,87\pi j}$	$554,33e^{0,934\pi j}$	$1614,96e^{0,429\pi j}$	$599,94e^{1\pi j}$	$1738,76e^{0,423\pi j}$	$27,37e^{0,827\pi j}$	$540,81e^{-0,173\pi j}$	$1661,22e^{-0,673\pi j}$
550	$992,15e^{-0,403\pi j}$	$326,69e^{0,418\pi j}$	$262,82e^{0,949\pi j}$	$1134,11e^{-0,337\pi j}$	$299,91e^{1\pi j}$	$1118,93e^{-0,321\pi j}$	$16,05e^{-0,143\pi j}$	$964,09e^{0,857\pi j}$	$594,32e^{0,357\pi j}$
650	$263,87e^{-0,746\pi j}$	$193,03e^{-0,257\pi j}$	$522,9e^{-0,062\pi j}$	$702,4e^{-0,96\pi j}$	$600,07e^{0\pi j}$	$806,54e^{-0,925\pi j}$	$5,21e^{-0,413\pi j}$	$23,35e^{-0,413\pi j}$	$806,04e^{0,087\pi j}$

f [Hz]	IEEE - napětí na $\hat{Z}_{h\mathrm{U}}$ [mV]			CPC - admitance [mS]			IEEE-výkony		
	$U_{\mathrm{P}h}$	$U_{\mathrm{Q}h}$	$U_{\mathrm{S}h}$	G_{e}	ΔG_h	B_h	P_h [mW]	Q_h [mvar]	S_h [mVA]
50	$519,41e^{0,879\pi j}$	$206,97e^{0,379\pi j}$	$559,13e^{0,758\pi j}$		0,056	1,904	253,8 W	-101,1 var	273,2 VA
150	$784,56e^{-0,807\pi j}$	$1009,91e^{0,693\pi j}$	$1278,85e^{0,904\pi j}$		-135,531	-168,382	-3438,703	4426,410	5605,157
250	$337,23e^{-0,71\pi j}$	$1536,69e^{-0,21\pi j}$	$1573,26e^{-0,278\pi j}$		82,768	-398,672	451,889	2059,151	2108,152
350	$1423,54e^{0,703\pi j}$	$1153,7e^{0,203\pi j}$	$1832,35e^{0,487\pi j}$	4,722	436,423	357,525	710,625	-575,923	914,699
450	$513,44e^{0,759\pi j}$	$1661,22e^{-0,741\pi j}$	$1738,76e^{-0,837\pi j}$		-93,322	286,659	-255,485	-826,609	865,191
550	$948,04e^{-0,336\pi j}$	$594,32e^{0,164\pi j}$	$1118,93e^{-0,158\pi j}$		-283,714	174,897	-274,627	-172,161	324,128
650	$28,55e^{-0,922\pi j}$	$806,04e^{0,578\pi j}$	$806,54e^{0,589\pi j}$		21,177	731,080	1,803	-50,905	50,937

f [Hz]	Jalový fikt. výkon [var]				Roztr. výkon [W]		
	Q_1	$Q_{h\mathrm{X}}$	Q_X	N	P	$D_{h\mathrm{s}}$	D_{s}
50		X				2,980	
150		223,265				-160,201	
250		232,089				43,365	
350	-101,128	145,526	347,266	412,313	250,982	127,698	222,279
450		151,089				-36,534	
550		108,786				-64,894	
650		110,508				1,288	


f = 150 Hz
f = 250 Hz
f = 350 Hz
f = 450 Hz
f = 550 Hz
f = 650 Hz
Im
Re
IEC - Uhbg, Uhem
VHV - UphU, UphC
CPC - UhaC, UhsC, UhrC
IEEE - UPhC, UQhC, UShC