



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

PODPORA DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY ŘÍZENÍM VÝKONU BATERIOVÝCH SYSTÉMŮ A NABÍJECÍCH SYSTÉMŮ PRO ELEKTROMOBILY

DISTRIBUTION SYSTEM SUPPORT BY POWER MANAGEMENT OF BATTERY SYSTEMS IN CHARGING
MODE AND CHARGING SYSTEMS FOR ELECTRIC VEHICLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vladislav Rodionov

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

BRNO 2021



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Vladislav Rodionov

ID: 221426

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Podpora distribuční soustavy řízením výkonu bateriových systémů a nabíjecích systémů pro elektromobily

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vliv a riziko vysoké penetrace bateriových systémů (BESS) a nabíjecích systémů (EVC) v NN síti na velikost napětí
2. Možnosti a módy řízení výkonů, činného a jalového v závislosti na velikosti napětí, nesymetrii napětí a frekvenci
3. Modelování síťové podpory měničů bateriových uložišť a nabíječek ve vhodném prostředí
4. Ověření funkce síťové podpory na existujícím laboratorním nabíjecím systému bateriového uložišť
5. Vymezení způsobu implementace pro "domácí" bateriové systémy a AC vs. DC nabíjecí systémy

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího diplomové práce

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá podporou DS NN řízením výkonu nabíjecích systémů pro EV a bateriové úložiště. Práce obsahuje přehled o DS České republiky, prostředcích pro regulaci napětí a o existujícím legislativním stavu při připojení nabíjecích systému. V práci jsou popsány způsoby řízení činného a jalového výkonu v závislosti na napětí a frekvenci. Praktická část je zaměřena na simulaci podpory sítě při různých úrovních penetrace BESS a EVC v prostředí MATLAB Simulink a ověření funkce podpory na laboratorním systému. V poslední části práce jsou vymezeny způsoby implementace řídicího systému pro BESS a EVC fungujících v soustavě NN.

Klíčová slova:

kvalita napětí, regulace napětí, bateriová úložiště, elektromobilita, řízení výkonu, MATLAB Simulink.

Abstract:

The thesis focuses on the power management support of battery systems in charging mode and charging systems for electric vehicles in the LV network. The thesis includes an overview of the distribution network of the Czech Republic, means of voltage regulation and the existing legislative framework for the connection of charging systems. The thesis describes the methods of active and reactive power control depending on the voltage and frequency. The practical part focuses on the simulation of grid support at different penetration levels of BESS and EVC in MATLAB Simulink and the verification of the support function on a laboratory system. In the last part, the methods of implementing the control system for BESS and EVC operating in the LV grid are specified.

Keywords:

power quality, voltage regulation, BESS, EV, power management, MATLAB Simulink.

Bibliografická citace

RODIONOV, Vladislav. Podpora distribuční soustavy řízením výkonu bateriových systémů a nabíjecích systémů pro elektromobily. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134914>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jiří Drápela.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Vladislav Rodionov*

VUT ID studenta: *221426*

Typ práce: *Diplomová práce*

Akademický rok: *2020/21*

Téma závěrečné práce: *Podpora distribuční soustavy řízením výkonu bateriových systémů a nabíjecích systémů pro elektromobily*

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma *Podpora distribuční soustavy řízením výkonu bateriových systémů a nabíjecích systémů pro elektromobily* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 24.05.2021

.....

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Drápelovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Michalu Vránovi za pomoc při laboratorním měření.

V Brně dne: 24.05.2021

podpis autora

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD.....	15
2 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA ČR.....	16
2.1 SOUČASNÝ STAV	16
2.2 DIMENZOVÁNÍ PRVKŮ DS NN	17
2.3 KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE	18
2.3.1 KMITOČET SÍTĚ	19
2.3.2 ODCHYLKY NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ	19
2.3.3 NESYMETRIE NAPĚTÍ.....	20
2.4 REGULACE NAPĚTÍ V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ	21
2.4.1 REGULACE NAPĚTÍ TRANSFORMÁTORY	22
2.5 PODMÍNKY PŘIPOJENÍ ZDROJŮ A NABÍJECÍCH STANIC	24
2.5.1 STATICKÉ ŘÍZENÍ NAPĚTÍ	25
2.5.2 DYNAMICKÁ PODPORA SÍTĚ.....	25
2.5.3 PŘIZPŮSOBENÍ ČINNÉHO VÝKONU	25
2.5.4 SNÍŽENÍ ČINNÉHO VÝKONU PŘI PODFREKVENCI	26
2.5.5 SNÍŽENÍ ČINNÉHO VÝKONU ZÁVISLÉ NA NAPĚTÍ –FUNKCE <i>PU</i>	27
2.5.6 ŘÍZENÍ ČINNÉHO VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA PROVOZNÍCH PODMÍNKÁCH	27
2.5.7 JALOVÝ VÝKON ZÁVISLÝ NA NAPĚTÍ –FUNKCE <i>QU</i>	27
2.5.8 PŘIPOJOVÁNÍ VÝROBEN SE STRÍDAČI NEBO MĚNIČI KMITOČTU	28
2.5.9 PŘIPOJENÍ ELEKTROMOBILŮ A NABÍJECÍCH STANIC.....	28
2.6 AKUMULACE ENERGIE.....	28
3 BESS.....	29
3.1 REŽIM NABÍJENÍ BATERIE	29
3.2 PŘIPOJENÍ DO DS	30
3.3 APLIKACE BESS V DS	32
4 ELEKTROMOBILITA	34
4.1 MÓDY NABÍJENÍ EV	35
4.2 TECHNOLOGIE V2G.....	37
4.3 DOPADY NA DS.....	38
5 CÍLE PRÁCE	40
5.1 SHRUTÍ PROBLEMATIKY.....	40
5.2 OČEKÁVANÉ VÝSLEDKY	40
5.3 ŘEŠENÍ.....	40
6 MÓDY ŘÍZENÍ VÝKONŮ	41
6.1 ŘÍZENÍ ČINNÉHO VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI	41

6.2 PRACOVNÍ PROSTOR PQ DIAGRAMU	41
6.3 ŘÍZENÍ ČINNÉHO VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA NAPĚTÍ	42
6.4 ŘÍZENÍ JALOVÉHO VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA NAPĚTÍ.....	42
7 MODELOVÁNÍ PODPORY SÍTĚ V MATLAB SIMULINK.....	43
7.1 POPIS MODELU	43
7.1.1 TOPOLOGIE SÍTĚ.....	43
7.1.2 ZDROJ NAPĚTÍ	43
7.1.3 TRANSFORMÁTOR VN/NN	45
7.1.4 VEDENÍ.....	46
7.1.5 ODBĚR.....	48
7.2 POPIS SCÉNÁŘŮ	56
7.3 VÝSLEDKY MODELOVÁNÍ	57
7.4 STOCHASTICKÉ MODELOVÁNÍ	73
8 OVĚŘENÍ FUNKCE PODPORY NA LABORATORNÍM SYSTÉMU	79
8.1 POPIS TESTOVACÍHO OBVODU.....	79
8.2 VÝSLEDKY LABORATORNÍHO MĚŘENÍ	81
9 VYMEZENÍ ZPŮSOBU IMPLEMENTACE PODPORY	85
10 ZÁVĚR.....	86
POUŽITÁ LITERATURA	87
SEZNAM PŘÍLOH.....	90
PŘÍLOHA A – PROFILY ODBĚRŮ	91
PŘÍLOHA B – VÝSLEDKY MODELOVÁNÍ.....	98

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1</i>	<i>Uspořádání elektrizační soustavy [1]</i>	16
<i>Obr. 2-2</i>	<i>Rozdělení distribučních sítí v ČR</i>	17
<i>Obr. 2-3</i>	<i>Regulace napětí pomocí řízení úbytku napětí [10]</i>	21
<i>Obr. 2-4</i>	<i>Přímá regulace napětí změnou poměru nebo superpozicí [10]</i>	22
<i>Obr. 2-5</i>	<i>Regulace napětí v distribučně soustavě [11]</i>	23
<i>Obr. 2-6</i>	<i>Požadavky na dodávku/odběr jalového výkonu při U_{nom} v síti NN [14]</i>	25
<i>Obr. 2-7</i>	<i>Rozsah jalového výkonu VM A1 pro $P=P_D$ [14]</i>	25
<i>Obr. 2-8</i>	<i>Snížení činného výkonu zdrojů při nadfrekvenci[13]</i>	26
<i>Obr. 2-9</i>	<i>Maximální snížení činného výkonu s klesajícím kmitočtem [13]</i>	26
<i>Obr. 2-10</i>	<i>Charakteristika funkce PU [13]</i>	27
<i>Obr. 2-11</i>	<i>Charakteristika funkce QU [13]</i>	28
<i>Obr. 3-1</i>	<i>Schematické znázornění BESS [17]</i>	29
<i>Obr. 3-2</i>	<i>Charakteristika nabíjení baterie CCCV [18]</i>	29
<i>Obr. 3-3</i>	<i>Topologie dvouúrovňových měničů pro připojení BESS k síti [19]</i>	30
<i>Obr. 3-4</i>	<i>Varianty připojení BESS k síti [17]</i>	31
<i>Obr. 3-5</i>	<i>Varianty připojení BESS k síti</i>	31
<i>Obr. 3-6</i>	<i>Přehled aplikace BESS v DS [17]</i>	32
<i>Obr. 4-1</i>	<i>Obecná konfigurace systému dobíjení EV [22]</i>	34
<i>Obr. 4-2</i>	<i>Módy nabíjení EV [23]</i>	35
<i>Obr. 4-3</i>	<i>Přehled používaných konektorů [24]</i>	37
<i>Obr. 4-4</i>	<i>Systém V2G [25]</i>	38
<i>Obr. 4-5</i>	<i>Rozdělení preferencí majitelů EV podle místa a času nabíjení [27]</i>	38
<i>Obr. 4-6</i>	<i>Diagram zatížení trafostanice (průměr 1.1. 2011 až 22.1.2011 Oblast malooběru – byty a RD) [31]</i>	39
<i>Obr. 6-1</i>	<i>Charakteristika funkce Pf</i>	41
<i>Obr. 6-2</i>	<i>PQ diagram a) omezení $\cos\varphi=0,90$, b) $Q=0$ [20]</i>	41
<i>Obr. 6-3</i>	<i>Charakteristika funkce PU při nabíjení</i>	42
<i>Obr. 6-4</i>	<i>Charakteristika funkce QU</i>	42
<i>Obr. 7-1</i>	<i>Topologie testovací sítě</i>	43
<i>Obr. 7-2</i>	<i>Zdroj napětí VN</i>	44
<i>Obr. 7-3</i>	<i>Napětí zdroje během simulace</i>	44
<i>Obr. 7-4</i>	<i>Blok „Nastavení frekvence“</i>	44
<i>Obr. 7-5</i>	<i>Maska bloku „Síť“, záložka „Nastavení“</i>	45

<i>Obr. 7-6 Frekvence během simulace</i>	45
<i>Obr. 7-7 Model transformátoru 22/0,4 kV</i>	45
<i>Obr. 7-8 Systém měření</i>	46
<i>Obr. 7-9 Blok „Merení U“</i>	46
<i>Obr. 7-10 Blok „Merení I“</i>	46
<i>Obr. 7-11 Model vedení</i>	47
<i>Obr. 7-12 Model OPM</i>	48
<i>Obr. 7-13 Blok „Domácnost“</i>	49
<i>Obr. 7-14 Blok „Load“</i>	49
<i>Obr. 7-15 TDD 4 10.03.2021</i>	50
<i>Obr. 7-16 Diagram zatížení domácnosti v OPM 1</i>	50
<i>Obr. 7-17 Připojení a maska bloku „OPM“</i>	50
<i>Obr. 7-18 Blok „EV“</i>	51
<i>Obr. 7-19 Maska bloku „OPM“, záložky BESS a EV</i>	51
<i>Obr. 7-20 Blok „BESS“</i>	52
<i>Obr. 7-21 Blok „Nastavení PQ“</i>	53
<i>Obr. 7-22 Blok „Nabíjení“</i>	53
<i>Obr. 7-23 Blok „State of charge“</i>	54
<i>Obr. 7-24 Blok „P(f)“</i>	54
<i>Obr. 7-25 Nastavení řízení pomocí masky bloku „Sít“</i>	54
<i>Obr. 7-26 Blok „PQ1“</i>	55
<i>Obr. 7-27 Blok „P(U)“</i>	55
<i>Obr. 7-28 Blok „Q(U)“</i>	55
<i>Obr. 7-29 Profil výkonu EV a napětí v OPM 20 pro scénář 9 bez podpory</i>	70
<i>Obr. 7-30 Profil výkonu EV a napětí v OPM 20 pro scénář 9 omezení 10 A</i>	71
<i>Obr. 7-31 Profil výkonu EV a napětí v OPM 20 pro scénář 9 s PU podporou</i>	71
<i>Obr. 7-32 Profil výkonu EV a napětí v OPM 20 pro scénář 9 s PU a QU podporou</i>	72
<i>Obr. 7-33 Poskytnutá podpora sítě při poklesu frekvence</i>	73
<i>Obr. 7-34 Grafy pravděpodobnosti výskytu 10 min. hodnot napětí při simulaci bez penetrace BESS a EV</i>	74
<i>Obr. 7-35 Grafy pravděpodobnosti výskytu 10 min. hodnot napětí při simulaci bez podpory</i>	75
<i>Obr. 7-36 Grafy pravděpodobnosti výskytu 10 min. hodnot napětí při simulaci s PU podporou</i>	76
<i>Obr. 7-37 Grafy pravděpodobnosti výskytu 10 min. hodnot nesymetrie při simulaci bez podpory</i>	77

<i>Obr. 7-38 Grafy pravděpodobnosti výskytu 10 min. hodnot nesymetrie při simulaci s PU podporou</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 8-1 Schéma testovacího obvodu</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 8-2 Průběh napětí a výkonu v místě připojení při symetrickém napájecím napětí, bez podpory</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 8-3 Průběh napětí a výkonu v místě připojení při symetrickém napájecím napětí a PU podpoře</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 8-4 Průběh napětí a výkonu v místě připojení při nesymetrickém napájecím napětí, bez podpory</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 8-5 Průběh napětí a výkonu v místě připojení při nesymetrickém napájecím napětí a PU podpoře (řízení podle minimální hodnoty napětí)</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 8-6 Průběh napětí a výkonu v místě připojení při nesymetrickém napájecím napětí a PU podpoře (řízení v jednotlivých fázích)</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 8-7 Průběh frekvence a výkonu v místě připojení při Pf podpoře</i>	<i>84</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Výkonové kategorie výroben [1]</i>	24
<i>Tab. 2-2 Provozní frekvenční rozsah výroben [13]</i>	24
<i>Tab. 4-1 Charakteristiky módů nabíjení EV</i>	35
<i>Tab. 7-1 Parametry transformátoru</i>	46
<i>Tab. 7-2 Parametry vedení</i>	47
<i>Tab. 7-3 Nastavení řídicích charakteristik</i>	56
<i>Tab. 7-4 Parametry scénářů</i>	56
<i>Tab. 7-5 Výsledky scénáře 1</i>	58
<i>Tab. 7-6 Výsledky scénáře 2</i>	59
<i>Tab. 7-7 Výsledky scénáře 3</i>	60
<i>Tab. 7-8 Výsledky scénáře 4</i>	60
<i>Tab. 7-9 Výsledky scénáře 5</i>	63
<i>Tab. 7-10 Výsledky scénáře 6</i>	64
<i>Tab. 7-11 Výsledky scénáře 7</i>	65
<i>Tab. 7-12 Nastavení řídicích charakteristik</i>	67
<i>Tab. 7-13 Výsledky scénáře 7 po úpravě řídicích charakteristik</i>	67
<i>Tab. 7-14 Výsledky scénáře 8</i>	68
<i>Tab. 7-15 Výsledky scénáře 9</i>	69
<i>Tab. 8-1 Parametry napájecího napětí během laboratorního měření, test 1, 2</i>	80
<i>Tab. 8-2 Parametry napájecího napětí během laboratorního měření, test 3, 4, 5</i>	80
<i>Tab. 8-3 Parametry napájecího napětí během laboratorního měření test 6</i>	80
<i>Tab. 8-4 Nastavení řídicích charakteristik během laboratorního měření</i>	80

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Popis
AC	alternating current (střídavý proud)
ARN	automatické regulace napětí
BESS	battery energy storage system (bateriový akumulací systém)
BEV	battery electric vehicle (bateriové elektrické vozidlo)
BMS	battery management systém (systém bateriového managementu)
CCCV	constant current constant voltage (konstantní proud konstantní napětí)
ČR	Česká republika
ČSN	česká technická norma
DC	direct current (stejnoseměrný proud)
DS	distribuční soustava
ERU	Energetický regulační úřad
EN	Evropská norma
ES	elektrizační soustava
EV	elektrické vozidlo
EVC	nabíjecí stanice EV
EVSE	napájecí zařízení elektrického vozidla
FV	fotovoltaika
HRT	hladinový regulátor transformátoru
IEC	International Electrotechnical Commission (Mezinárodní elektrotechnická komise)
LIN	Local Interconnect Network (komunikační protokol)
LIN-CP	řídící funkce používající LIN protokol
NN	nízké napětí
OPM	odběrné předávací místo
OZE	obnovitelný zdroj energie
PDS	provozovatel distribuční soustavy
PHEV	plug-in hybrid electric vehicle (hybridní vozidlo)
PPDS	pravidla provozování distribuční soustavy
PS	přenosová soustava
PVE	přečerpávací vodní elektrárna
PWM	pulsně šířková modulace
PWM-CP	řídící funkce používající signál PWM
qZSI	měníč kvazi Z-zdroje
SOC	state of charge (stav nabití baterie)

TDD	typový diagram dodávky
TMS	thermal management systém (systém tepelného managementu)
VN	vysoké napětí
VSC	měníč zdroje napětí
VVN	velmi vysoké napětí
V2G	vehicle to grid („vozidlo do sítě“)
ZSI	měníč Z-zdroje
ZVN	zvlášť vysoké napětí

$\cos\varphi$	účinník	(-)
f	frekvence	(Hz)
I_{nom}	nominální proud	(A)
L_t	indukčnost transformátoru	(H)
L_m	magnetizační indukčnost transformátoru	(H)
P	činný výkon	(W, kW)
p	činný výkon v poměrných jednotkách	(-)
P_{nom}	nominální činný výkon	(W, kW)
R_L	odpor fázového vodiče	(Ω)
R_m	magnetizační odpor transformátoru	(M Ω)
R_N	odpor nulového vodiče	(Ω)
R_t	odpor transformátoru	(Ω)
S_{nom}	nominální výkon	(VA, kVA)
Q	jalový výkon	(var, kvar)
q	jalový výkon v poměrných jednotkách	(-)
u	napětí v poměrných jednotkách	(-)
U_f	fázové napětí	(V)
U_{nom}	nominální napětí	(V, kV)
U_{tVN}	primární napětí transformátoru	(kV)
U_{tNN}	sekundární napětí transformátoru	(kV)
X_L	reaktance fázového vodiče	(Ω)
X_N	reaktance nulového vodiče	(Ω)

1 ÚVOD

V současné době v souvislosti se snahou společnosti snížit emise oxidu uhličitého do atmosféry dostala elektrická vozidla (EV) nový impuls k vývoji. S rostoucím počtem elektrických vozidel roste také zátěž na distribuční soustavu (DS), elektrické vozidlo je relativně velký spotřebič s dlouhodobým zatížením. V závislosti na režimu nabíjení je maximální nabíjecí výkon u AC nabíjecích stanic v rozmezí od 3,7 do 25 kW. Existuje řada koncepcí ke snížení negativního dopadu elektrických vozidel na síť, některé z nich obsahují možnost odpojení takové zátěže, pokud je to nutné, avšak náhlé odpojení velké zátěže je také potenciálním rizikem pro síť, jako například kolísání napětí a narušení výkonové rovnováhy. Je nutné regulovat nabíjecí výkon elektrických vozidel s co nejmenším negativním dopadem jak na síť, tak i na vlastníky elektrických vozidel. Tímto způsobem regulace může být regulace měničů nabíjecích stanic.

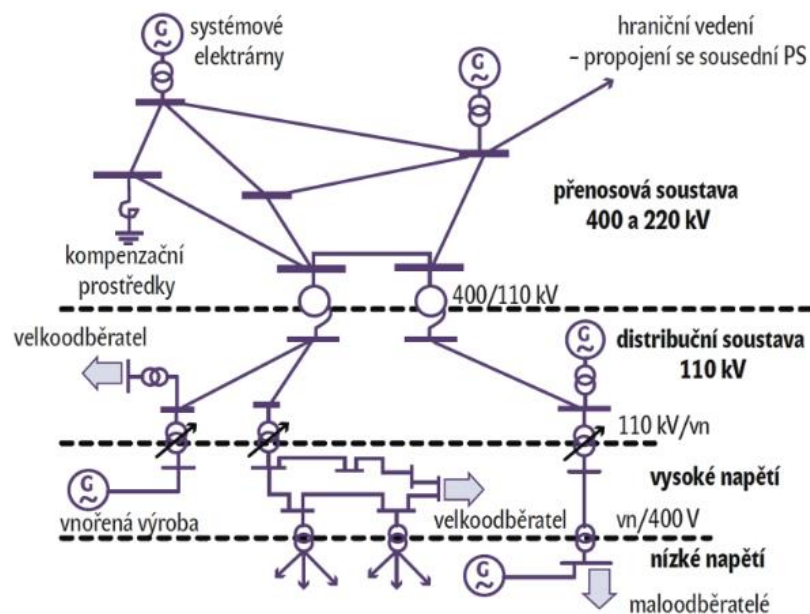
Pro výrazné snížení emisí je nutné získat elektřinu pro nabíjení EV z obnovitelných zdrojů energie (OZE). Obnovitelné zdroje samozřejmě v budoucnu porostou. K přizpůsobení stávajících sítí kolísáním generace OZE, zabránění přetokům energie ve vysokonapěťové síti a maximalizaci spotřeby energie v místech její výroby se často používají bateriové akumulční systémy (BESS). BESS lze použít nejen k ukládání energie z obnovitelných zdrojů energie, ale také k jiným účelům. Tyto systémy v sítích nízkého napětí obvykle mají kapacitu 2 až 100 kW a ve spotřebě mohou mít negativní dopad na síť, stejný jako elektrická vozidla.

Tato práce je věnována řízení nabíjení elektrických vozidel a BESS připojených k sítím nízkého napětí pomocí měničů za účelem udržení parametrů kvality elektrické energie v mezích stanovených normou.

2 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA ČR

2.1 Současný stav

Elektrizační soustava (ES) je systém, který zajišťuje výrobu, přenos, distribuci a spotřebu elektrické energie. Elektrizační soustava ČR se skládá ze dvou částí: přenosové a distribuční soustavy (DS). Uspořádání elektrizační soustavy je znázorněno na Obr. 2-1.

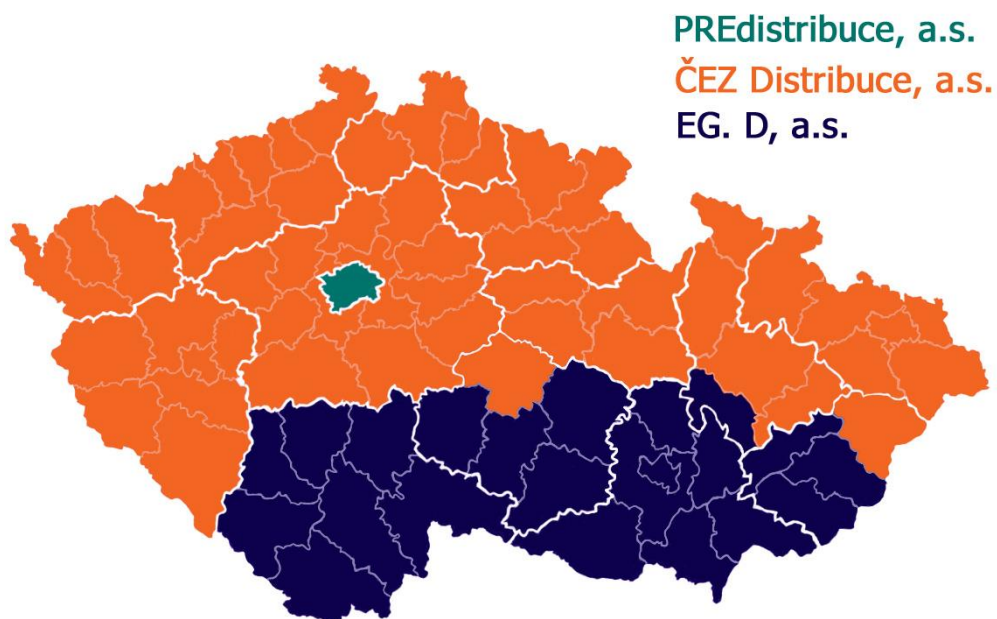


Obr. 2-1 Uspořádání elektrizační soustavy [1]

Přenosová soustava (PS) je soubor vedení a zařízení 400 kV, 220 kV, případně 110 kV, vzájemně propojených mezi sebou. Úkolem PS je zajištění přenosu elektrické energie v rámci ČR a propojení s ES sousedních států [1]. Přenosovou soustavu v ČR provozuje akciová společnost ČEPS a jejím vlastníkem je stát. Přes transformátory ZVN/110 kV a VVN/110 kV PS je spojena s distribuční soustavou.

Distribuční soustava je soubor vedení a zařízení do 110 kV vzájemně propojených mezi sebou, s výjimkou vedení a zařízení o napětí 110 kV, která jsou součástí přenosové soustavy. Úkolem DS je zajištění distribuce elektřiny na určeném území ČR. DS také zajišťuje provoz systému měření, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační zařízení [1].

Provozování DS provádí provozovatel distribuční soustavy (PDS), který se řídí především Pravidly provozování distribuční soustavy (PPDS) a další platnou legislativou [1],[2]. V současnosti na území ČR DS provozují tři společnosti (Obr. 2-2): akciová společnost PREdistribuce spravuje provoz distribučních sítí na území Hlavního města Prahy, EG.D, a.s. (do 31.12.2020 E.ON Distribuce, a.s.) spravuje DS Jižních Čech a Moravy, na zbylé části republiky provozuje DS akciová společnost ČEZ Distribuce.



Obr. 2-2 Rozdělení distribučních sítí v ČR

Základní částí distribuční soustavy je napěťová hladina 110 kV. Distribuční síť 110 kV slouží k zajištění přenosu elektřiny z PS pomocí transformoven ZVN(VVN)/110 kV do transformoven 110 /VN kV. Tato část DS má vysokou spolehlivost a téměř nezpůsobí přerušení dodávky elektrické energie odběratelům. Síť 110 kV jsou provozovány s účinně uzemněným uzlem transformátoru a zpravidla mají okružní, respektive i paprskové zapojení [2].

Další částí DS je soustava VN, základní napěťovou hladinou je 22 kV, respektive 35 kV. Také jsou v provozu sítě s napětím 3, 6 a 10 kV. Tato část DS je provozována s neúčinně uzemněným, většinou kompenzovaným uzlem transformátoru a má průběžné, paprskové nebo dvojpaprskové zapojení [2].

Poslední částí DS je soustava NN. Základní napěťovou hladinou je 0,4 kV, respektive 0,5 kV. Sítě DS NN mají většinou paprskové a průběžné zapojení, husté městské sítě mají mřížové zapojení. Tato část DS je provozována s účinně uzemněným uzlem transformátoru s vyvedeným středním vodičem v případě 0,4 kV a s izolovaným uzlem transformátoru v případě 0,5 kV pro zachování dodávky elektřiny při jednofázových poruchách [2].

2.2 Dimenzování prvků DS NN

Z důvodu nepoužití celkového instalovaného výkonu současně a náhodného charakteru spotřeby elektrické energie, dimenzování prvků v DS NN se provádí pomocí výpočtového zatížení. Pro stanovení výpočtového zatížení je potřeba vypočítat soudobý příkon P_b pro jednotlivé objekty podle následujícího vztahu:

$$P_b = P_i \cdot \beta (W; W, -), \quad (2.1)$$

kde P_i – je celkový instalovaný výkon spotřebičů objektu; β – je součinitel náročnosti.

V případě výpočtu pro bytovou zástavbu soudobý příkon bytu se určuje normou ČSN 33 2130 [1][3] podle stupně elektrizace:

- pro stupeň elektrizace A $P_b = 7$ kW,
- pro stupeň elektrizace B $P_b = 11$ kW.

K stupni A patří byty, ve kterých se elektrická energie používá k osvětlení a pro elektrické spotřebiče, přitom výkon žádného spotřebiče nepřesahuje 3,5 kW [3].

K stupni B patří byty, ve kterých se elektrická energie používá k osvětlení a pro elektrické spotřebiče, přitom výkon pro vaření přesahuje 3,5 kW [3].

K stupni C patří byty, ve kterých se pro vytápění nebo klimatizaci používají elektrické spotřebiče [3].

Pak výpočtové zatížení P_p pro skupinu bytů lze určit podle vztahu [3] :

$$P_p = \left(\sum_{n=1}^n P_b \right) \cdot \beta_n \quad (W; W, -), \quad (2.2)$$

kde n – je počet bytů; $\sum_{n=1}^n P_b$ – je součet soudobých příkonů všech bytů; β_n – je soudobost pro n bytů.

Soudobost pro n bytů β_n lze určit podle vztahu [3] :

$$\beta_n = \beta_{At} + \frac{(1 - \beta_{At})}{\sqrt{n}} \quad (-; -, -), \quad (2.3)$$

kde β_{At} – je soudobost pro nekonečný počet bytů ve skupině; n – je počet bytů ve skupině.

Podle ČSN 33 2130 [3] lze uvažovat $\beta_{At} = 0,15$.

V případě stanovení výpočtového zatížení pro výrobní provoz a veřejné objekty se používají různé metody pro určení součinitele náročnosti. Výběr konkrétního metodu závisí na základních údajích o objektu, které jsou k dispozici [4].

Z definovaného výpočtového zatížení se následně vypočítá proud, podle jeho tepelných účinků a jímž vyvolávaných úbytků napětí je prováděno dimenzování prvků DS.

2.3 Kvalita elektrické energie

Elektrická energie je zboží a jako každé jiné zboží musí splňovat příslušné kvalitativní požadavky. Pro správnou funkci elektrického zařízení musí mít napájecí napětí parametry, které splňují stanovené normy kvality. Požadované napěťové charakteristiky v místech připojení spotřebičů k DS jsou stanoveny normou ČSN EN 50160 [5]. Tyto požadavky jsou uvedeny pro normální provozní podmínky, abnormální provoz zahrnuje následující případy:

- a) dočasné zapojení sítě pro napájení během poruchy nebo údržby či výstavby sítě,
- b) nevyhovující stav instalace uživatele (neodpovídá podmínkám provozování distribuční sítě),
- c) výjimečné situace z důvodů:
 - mimořádných povětrnostních podmínek a přírodních katastrof,
 - cizího zavinění, nařízení úřadů,
 - průmyslové činnosti (např. stávka),
 - vyšší moci, nedostatku výkonu zaviněného vnějšími okolnostmi.

Z hlediska implementace BESS a nabíjecích stanic EV, jakož i z hlediska podpory sítě těmito zařízeními jsou nejdůležitější následující charakteristiky kvality napětí [6][7]:

- Kmitočet sítě
- Odchyly napájecího napětí
- Nesymetrie napětí
- Zkreslení napětí

Níže jsou podrobněji popsány charakteristiky, na které je zaměřena tato práce.

2.3.1 Kmitočet sítě

Kmitočet je globální parametr ES a je určen rovnováhou činného výkonu. Na úrovni propojené soustavy musí platit:

$$\sum P_g = \sum P_z + \Delta P \text{ (MW; MW, MW)}, \quad (2.4)$$

kde P_g – je generovaný činný výkon; P_z – je spotřebovaný činný výkon; ΔP – jsou ztráty činného výkonu.

Všechny tři členy v této rovnici se mohou měnit v závislosti na:

- diagramu zatížení
- poruchách v sítích
- výpadech výroby/spotřeby

Je zřejmé, že velká penetrace nabíjecích stanic a BESS může mít vliv, jak na diagram zatížení, tak i na generovaný výkon.

Dojde-li k deficitu generovaného výkonu vůči činnému výkonu spotřebovanému zařízeními, frekvence v systému se sníží na takovou hodnotu, při které se vytvoří nová rovnováha generovaného a spotřebovaného výkonu. S přebytkem generovaného výkonu se naopak frekvence zvýší. Proto všechny zdroje v soustavě musí mít možnost regulace frekvence/výkonu, k nim patří i BESS v režimu dodávky do sítě. Konkrétní podmínky připojení tohoto druhu zdrojů do soustavy budou probrané v kapitole 2.5.

V sítích NN a VN musí být u systému se synchronním připojením střední hodnota frekvence základní harmonické měřená v intervalu 10 s v následujících mezích [5]:

- 50 Hz \pm 1 %, 49,5 – 50,5 Hz během 99,5 % roku
- 50 Hz+ 4%, 50 Hz – 6 %, 47 – 52 Hz po 100 % času

K opatřením, které zajišťují kvalitu frekvence patří [8]:

- efektivní regulace toku výkonu
- nastavení regulátoru generátoru

2.3.2 Odchyly napájecího napětí

Další charakteristikou kvality elektrické energie jsou odchyly velikosti napájecího napětí. Napětí narozdíl od kmitočtu je lokální parametr. Napětí v uzlech sítě se může lišit od jmenovitého

napětí, což je určeno bilancí jalového výkonu, zatížením uzlu, poklesem napětí v úsecích sítě, transformačním poměrem transformátorů a provozním režimem kompenzačních prostředků jalového výkonu.

Přechod od konvenčních aut se spalovacím motorem k elektromobilům, může potenciálně vést k významnému nárůstu spotřebovaného výkonu, v závislosti na způsobu nabíjení se příkon jedné nabíječky nachází v rozsahu 2–20 kW. Připojení takového příkonu v DS NN může vést ke snížení napětí pod dovolenou mez.

Pro odchylky napájecího napětí jsou normou stanoveny následující podmínky [5]:

- S vyloučením přerušení napájení musí být během každého týdne 95 % průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut v rozsahu $U_{nom} \pm 10 \%$.
- Pro síť NN dále platí, že všechny průměrné efektivní hodnoty napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut musí být v rozsahu $U_{nom} +10 \%/ -15 \%$.

K opatřením, které zajišťují kvalitu velikosti napětí patří [8]:

- regulace napětí transformátory,
- nastavení regulátoru generátoru,
- linkový kondicionér,
- technologie akumulace energie,
- synchronní kompenzátory.

2.3.3 Nesymetrie napětí

Pokud amplitudy fázových (sdružených) napětí jsou stejné a úhel mezi nimi je také stejný, znamená to, že napětí je symetrické. Pokud je aspoň jedna z těchto podmínek porušena, napěťová soustava není symetrická.

Hlavní důvod vzniku nesymetrie napětí je nesymetrie proudu v síti, kvůli nerovnoměrnosti zatížení ve fázích. Významná část elektrických zařízení má jednofázové připojení k sítím NN.

Podle IEC 61851-1 [9] tři ze čtyř způsobů nabíjení elektromobilů mají možnost jednofázového připojení k síti, což s poměrně velkým výkonem nabíjení dělá EVC potenciálním zdrojem nesymetrie v soustavě NN. Módy nabíjení budou podrobně popsány v kapitole 4. Nesymetrii napětí lze také pozorovat v sítích VN v důsledku nesymetrie zátěže v sítích NN. Elektrické zařízení v sítích VN mají třífázové připojení, ale i mezi nimi existují takové, které jsou schopné vytvářet nesymetrie.

Pro posouzení nesymetrie napětí se používá metoda symetrických složek, podle které může být jakýkoli třífázový systém sinusových napětí reprezentován třemi symetrickými složkami: souslednou U_1 , zpětnou U_2 a netočivou U_0 .

Pro nesymetrii napětí jsou normou stanoveny následující podmínky [5]:

- Za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových středních efektivních zpětné složky napájecího napětí v rozsahu 0-2 % sousledné složky. Ve výjimečných případech 3 %

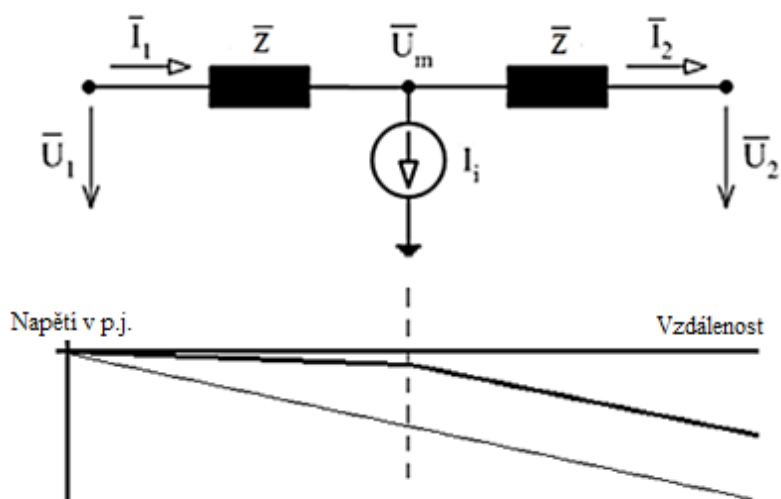
K opatřením, které zajišťují symetrie napětí patří [8]:

- symetrizace zátěže,
- linkový kondicionér.

2.4 Regulace napětí v distribuční soustavě

Cílem regulace napětí v DS je udržovat napětí v zadaných intervalech definovaných PDS ve vybraných uzlech DS [1] a udržovat napětí v předávacích místech v dovořených rozmezích zmíněných dříve.

Jsou dva základní způsoby regulace napětí v DS. První způsob je regulace napětí pomocí úbytků napětí, které lze řídit injektováním nebo odběrem proudu. Tím se budou měnit úbytky napětí v síti mezi místem spotřeby a zdrojem. Prostřednictvím injektáže nebo odběru proudu lze kompenzovat vliv spotřeby v závislosti na napětí daného úseku. Při tomto typu regulace se regulátor rozmísťuje co nejbliž k odběrnému místu, respektive k distribuovanému zdroji [10].

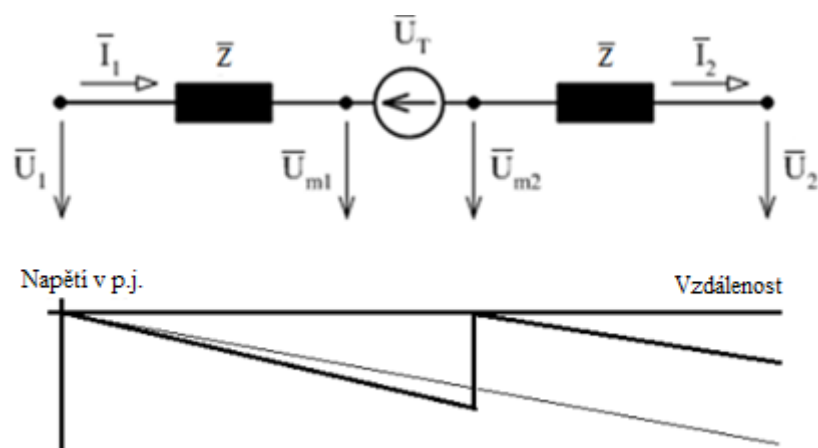


Obr. 2-3 Regulace napětí pomocí řízení úbytku napětí [10]

K regulátorům napětí v DS NN pomocí řízení úbytku napětí patří:

- pasívní prvky: reaktory a kondenzátory,
- tyristory spínané kondenzátory (Thyristor Switched Capacitor),
- tyristory řízené reaktory (Thyristor Controlled Reactor),
- aktivní paralelní filtry (Parallel Active Filter).

Druhý způsob je přímo regulovat velikost napětí pomocí závislých nebo nezávislých zdrojů napětí. Regulace napětí probíhá změnou poměrů mezi vstupem a výstupem regulátoru (přímé regulátory) nebo pomocí superpozice napětí (sériové regulátory), tak aby svým působením snížilo nebo zvýšilo hodnotu napětí na výstupu z regulátoru. Tímto způsobem lze regulovat parametry napětí v síti za místem instalace ve směru od napájecího uzlu [10].



Obr. 2-4 Přímá regulace napětí změnou poměru nebo superpozicí [10]

K regulátorům napětí v DS, které používají přímé regulace napětí patří:

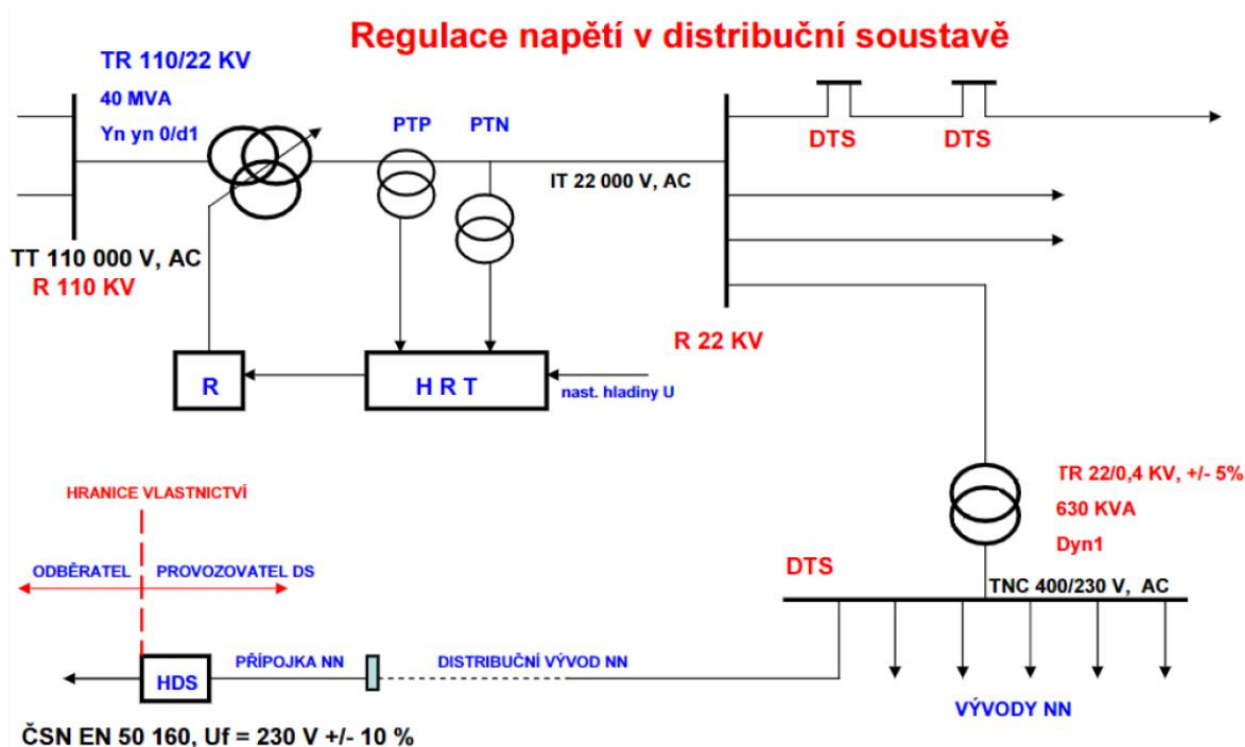
- transformátor s přepínačem odboček pod zatížení (On Load Tap Changer Transformer)
- transformátor konstantního napětí (Constant Voltage Transformer), má převod 1:1 a pracuje v saturačním režimu,
- elektronické regulátory napětí s dvojitou konverzí (Double Conversion – Electronic Voltage Regulator),
- krokový regulátor napětí (Step Voltage Regulator),
- tyristorový regulátor napětí (Thyristor Voltage Regulator),
- automatický stabilizátor napětí (Automatic Voltage Stabilizer),
- linkový kondicionér (sériový aktivní flitr).

Pro regulaci napětí se využívají prostředky, které jsou v DS dostupné. V současné době základním způsobem regulace napětí v DS je regulace odboček transformátoru, která patří k přímé regulaci napětí. Regulace napětí tímto způsobem je popsána dále.

2.4.1 Regulace napětí transformátory

Prvním regulačním prvkem v DS jsou transformátory VVN/VN. Tyto transformátory mají hladinový regulátor transformátoru (HRT), který umožňuje regulaci pod zatížením a obvykle má možnost přepínání odboček $\pm 8 \times 2 \text{ %/VN}$ nebo $\pm 8 \times 1,7 \text{ %/VN}$. V pilotních uzlech 110 kV napětí je regulováno pomocí systému automatické regulace napětí (ARN) [11].

Dalším prvkem jsou transformátory VN/NN, které zpravidla mají přepínač odboček bez zatížení s rozsahem $\pm 5 \text{ %/VN}$ nebo $\pm 2,5 \text{ %/VN}$. Odbočka transformátorů je nastavena dlouhodobě bez možnosti změny v zapnutém stavu. Existují transformátory VN/NN s přepínáním odboček pod zatížením, avšak téměř se nepoužívají z ekonomických důvodů. Žádný předpis v současné době nedefinuje, jaké napětí by mělo být na výstupu transformátoru VN/NN [12]. Proto se nastavení odbočky provádí z hlediska udržení napětí v předávacích místech v rozmezích stanovených normou ČSN EN 50160. Koncepce regulace napětí pomocí transformátorů je uvedena na Obr. 2-5.



Obr. 2-5 Regulace napětí v distribuční soustavě [11]

Napětí na sekundární straně transformátoru lze spočítat pomocí vzorce dle [11]:

$$u_2 = u_1 + \delta u_t - \Delta u_T \text{ (\%; \% , \% , \%)}, \quad (2.5)$$

kde u_1 je napětí na primární straně transformátoru,

u_2 je napětí na sekundární straně transformátoru,

δu_t je odchylka napětí daná pevně nastavenou odbočkou regulace,

Δu_T je úbytek napětí na transformátoru

Úbytek napětí na transformátoru je dán vzorcem dle [4]:

$$\Delta u_T = (r \cdot i \cdot \cos \varphi + x \cdot i \cdot \sin \varphi + \frac{1}{2} (x \cdot i \cdot \cos \varphi + r \cdot i \cdot \sin \varphi)) \cdot 100\% \text{ (\%; -, -, °, -)}, \quad (2.6)$$

kde r je poměrná podélná reaktance transformátoru,

x je poměrná podélná indukance transformátoru,

i je poměrná hodnota proudu,

φ je fázový posuv napětí a proudu

2.5 Podmínky připojení zdrojů a nabíjecích stanic

Požadavky na připojení zdrojů k DS NN jsou definovány v příloze 4 PPDS [13] a EN 50549-1 [14].

Podle přílohy 4 PPDS pro elektrická akumulční zařízení v režimu dodávky elektřiny platí stejná pravidla jak pro výrobní elektřiny. Za instalovaný výkon akumulčního zařízení se považuje výkon střídače [13]. Podle platné české legislativy, ověření shody s požadavky uvedenými dále se defacto neprovádí pro akumulční zařízení s výkonem do 10 kW pracující bez přetoku do DS.

Technické požadavky v NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/631 (RfG) jsou uspořádány pro čtyři typy zdrojů A-D na základě připojovacího napětí a výkonu. Výkonové pásmo výrobních modulů (VM) kategorie A a B se podle požadavků vyplývajících z české legislativy dělí podle Tab 2-1. V DS NN obvykle používají BESS s výkonem do 100 kW, proto další požadavky jsou uvedeny pro kategorie VM A1 a A2.

Tab. 2-1 Výkonové kategorie výroben [1]

Kategorie výrobního modulu	Podkategorie	Napětí	Výkon
A	A1	< 110 kV	≥ 800 W; ≤ 11 kW
	A2		> 11 kW; < 100 kW
B	B1	< 110 kV	≥ 100 kW; < 1 MW
	B2		≥ 1 MW; < 30 MW
C	-	< 110 kV	≥ 30 MW; < 75 MW
D	-	> 110 kV	≥ 75 MW

Provozní frekvenční rozsah

Při frekvenci v rozmezí od 49 do 51 Hz výrobní musí zachovat schopnost trvalého provozu. Při frekvenci v rozmezí od 47 do 52 Hz výrobní musí zůstat v provozu až po dobu uvedenou v Tab. 2-2.

Tab. 2-2 Provozní frekvenční rozsah výroben [13]

Rozsah frekvence	Doba trvání
47 – 47,5 Hz	20 s
47,5 – 48,5 Hz	30 min
48,5 – 49 Hz	90 min
49 – 51 Hz	neomezeně
51 – 51,5 Hz	30 min

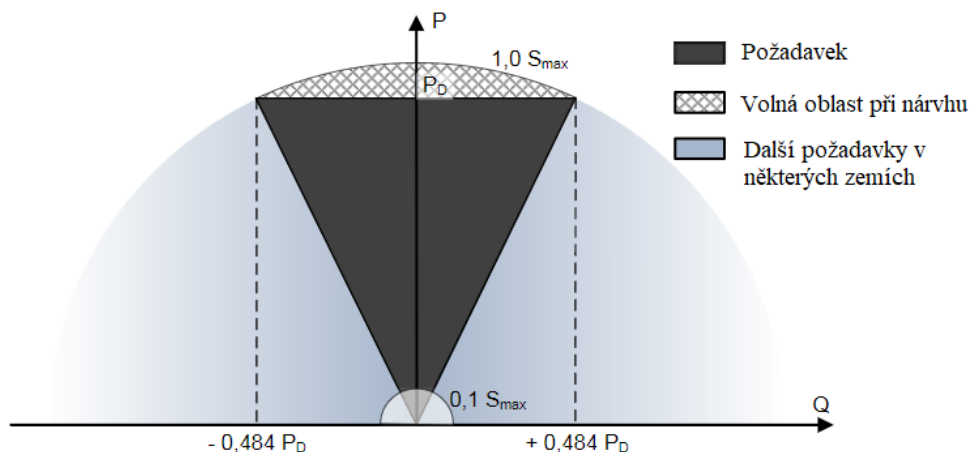
Rozsah trvalého provozního napětí

Při napětí v rozsahu od $U_{nom} - 15\%$ do $U_{nom} + 10\%$ v místě připojení výrobní musí zachovat schopnost trvalého provozu. Při poklesu napětí níže než U_{nom} výkon může být snížen na hodnotu shodnou s relativní změnou napětí $(U_{nom} - U) / U_{nom}$ [13].

Výrobní musí mít schopnost podpory napětí v síti. Podpora sítě se dělí na statickou a dynamickou [13].

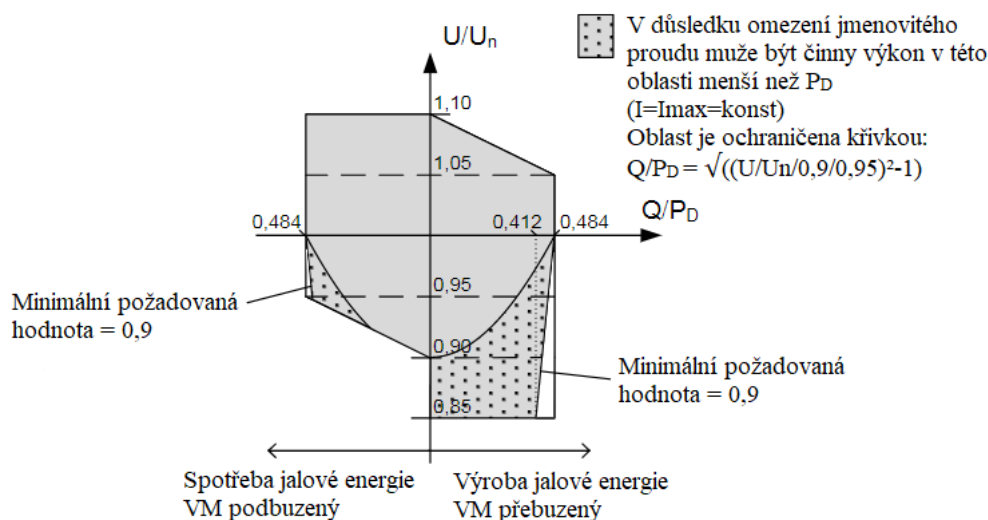
2.5.1 Statické řízení napětí

Statické řízení napětí je udržování napětí v domluvených intervalech při pomalých změnách a při normálním provozu sítě [13]. Na Obr. 2-6 jsou znázorněny minimální požadavky generace a spotřeby jalového výkonu pro podporu napětí v síti NN při U_{nom} . P_D je návrhový výkon výroby.



Obr. 2-6 Požadavky na dodávku/odběr jalového výkonu při U_{nom} v síti NN [14]

Při jiných napětích v rozsahu od $U_{nom} -15\%$ do $U_{nom} +10\%$, minimální požadavky jsou znázorněny na Obr. 2-7.



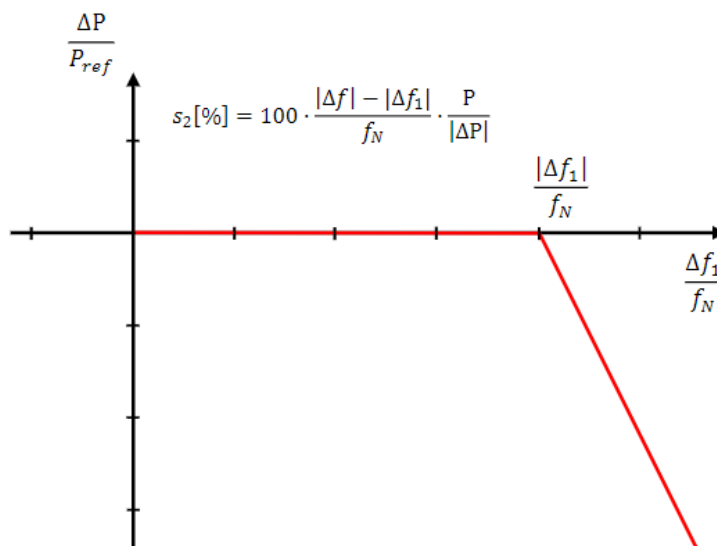
Obr. 2-7 Rozsah jalového výkonu VM A1 pro $P=P_D$ [14]

2.5.2 Dynamická podpora sítě

Dynamická podpora je udržování napětí při poklesech napětí v síti VVN a ZVN. Výrobní v sítích NN a VN musí mít schopnost zůstat v provozu při poklesech napětí vyvolávaných poruchami v síti [13].

2.5.3 Přizpůsobení činného výkonu

Výrobní připojené do DS musí mít schopnost automatického snižování činného výkonu v závislosti na frekvenci a podle povelů dispečinku PDS [13]. Frekvenční odezva činného výkonu VM je znázorněna na Obr. 2-8.



Obr. 2-8 Snížení činného výkonu zdrojů při nadfrekvenci [13]

Při nadfrekvencích výrobní modul musí být schopen snížit činný výkon podle statiky s_2 . Podle přílohy 4 PPDS [13] statika je 5 % a prahová hodnota frekvence je 50,2 Hz. Změnu činného výkonu lze stanovit podle následujícího vztahu:

$$\Delta P = 20 \cdot P_{max} \cdot \frac{50,2 - f}{50} \quad (\text{MW}; \text{MW}, \text{Hz}), \quad (2.7)$$

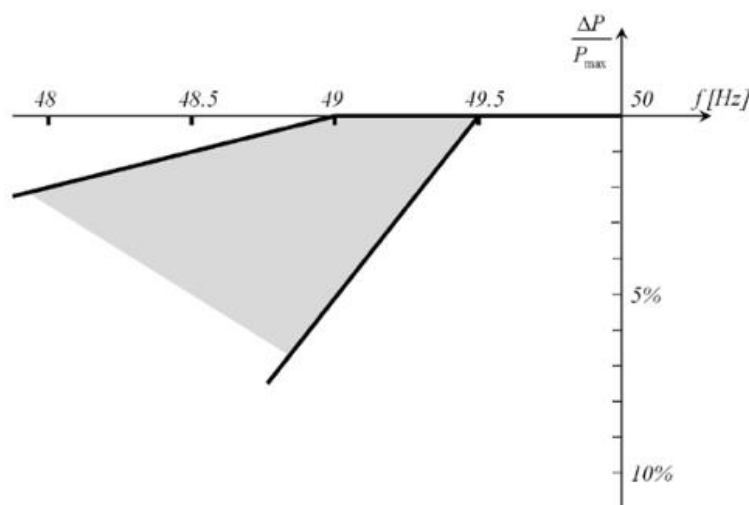
kde ΔP je snížení činného výkonu

P_{max} je maximální činný výkon

f je frekvence sítě

2.5.4 Snížení činného výkonu při podfrekvenci

PPS určuje dovolené snížení činného výkonu z maximální hodnoty při poklesu frekvence v rozsahu mezi plnými čarami na Obr. 2-9.

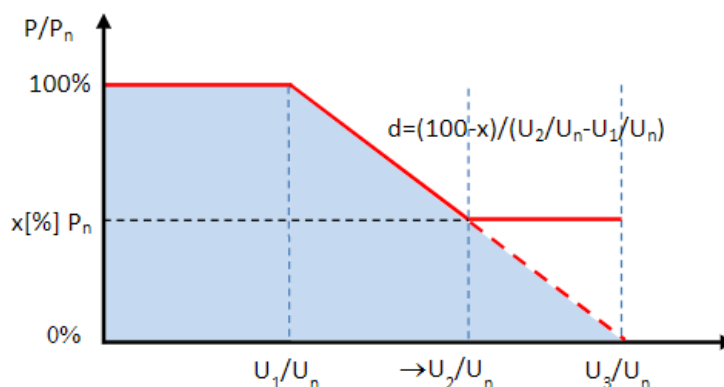


Obr. 2-9 Maximální snížení činného výkonu s klesajícím kmitočtem [13]

U BESS musí být frekvenční odezva poskytována jak v režimu dodávky, tak i v režimu nabíjení. Nastavení mezní frekvence f_l (minimálně mezi 49,8 a 49,5 Hz), statiky v rozsahu od 2 % do 12 % a přídatného zpoždění do 30 sekund definuje PDS, pokud nejsou definovány, funkce musí být zablokována [13]. Dostupný výkon BESS pro řízení počítá se stavem nabití (SOC) [14]. V případě poklesu frekvence na 49 Hz BESS musí automaticky přejít v režim dodávky, pokud BESS není schopno generovat výkon musí být odpojeno od sítě [13].

2.5.5 Snížení činného výkonu závislé na napětí – funkce PU

Všechny výrobní připojené pomocí střídače do DS na hladině NN musejí mít funkci řízení napětí činným výkonem. Hodnoty funkce PU (Obr. 2-10) definuje PDS podle síťových podmínek [13].



Obr. 2-10 Charakteristika funkce PU [13]

2.5.6 Řízení činného výkonu v závislosti na provozních podmínkách

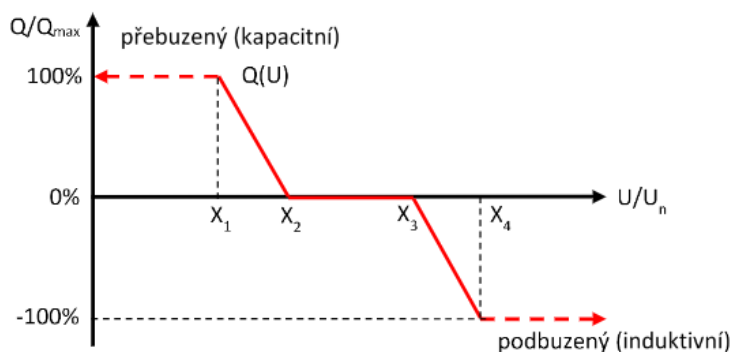
BESS musí být vybavena rozhraním, aby na pokyn mohl snížit činný výkon na výstupu jak v režimu dodávky, tak i v režimu nabíjení. Podle Energetického zákona PDS může žádat změnu činného výkonu v následujících případech [13]:

- potenciální ohrožení bezpečného provozu systému,
- nutné provozní práce, nebezpečí přetížení v síti PDS,
- nebezpečí vzniku ostrovního provozu,
- ohrožení statické nebo dynamické stability,
- vzrůst frekvence ohrožující systém,
- údržba nebo provádění stavebních prací na zařízení DS nebo v jeho blízkosti.

Podle RfG čas pro dosažení žádané hodnoty činného výkonu u nesynchronních VM je 1 minuta, rychlost změn činného výkonu musí být v intervalu od $\pm 2 \% P_{nom}/min$ do $\pm 40 \% P_{nom}/min$ [13].

2.5.7 Jalový výkon závislý na napětí – funkce QU

Bezpečný provoz funkce QU požaduje koordinaci zdrojů připojovaných do sítí NN. Charakteristická QU je znázorněna na Obr. 2-11. Nastavení charakteristiky definuje PDS podle místních síťových podmínek [13].

Obr. 2-11 Charakteristika funkce QU [13]

2.5.8 Připojování výroben se střídači nebo měniči kmitočtu

Střídače mohou být spínány pouze v případě, když je jejich AC strana bez napětí. U výroben schopných ostrovního provozu je potřeba dodržet následující podmínky pro synchronizaci [13]:

- rozdíl napětí $\Delta U < \pm 10 \% U_{\text{nom}}$,
- rozdíl frekvence $\Delta f < \pm 0,5 \text{ Hz}$,
- rozdíl fáze $< \pm 10^\circ$.

2.5.9 Připojení elektromobilů a nabíjecích stanic

Požadavky pro připojení elektromobilů a dobíjecích stanic k distribuční soustavě jsou popsány v příloze 6 PPDS: Standardy připojení zařízení k distribuční soustavě. Podle přílohy 6 PPDS jsou stanoveny tři kategorie nabíjecích stanic [15]:

- Kategorie DoS1 s výkonem do 3,7 kW na fázi. Stanice kategorie DoS1 mohou být připojeny bez ohlášení a za překročení hodnoty rezervovaného příkonu odpovídá zákazník.
- Kategorie DoS2 s výkonem od 3,7 do 22 kW. Zákazník má povinnost podat žádost o připojení k DS a uzavřít smlouvu o připojení s PDS, která stanovuje rezervovaný příkon, limity zpětných vlivů na DS a zajištění komunikačního rozhraní pro sledování a/nebo řízení nabíjení.
- Kategorie DoS3 s výkonem nad 22 kW. Zákazník má stejné povinnosti jako u kategorie DoS2. V případě nabíjecí stanice s více dobíjecími body a lokálním řídicím systémem je potřeba zajistit komunikace mezi lokálním řídicím systémem a řídicím systémem PDS pro sledování a/nebo řízení celkového odběru.

2.6 Akumulace energie

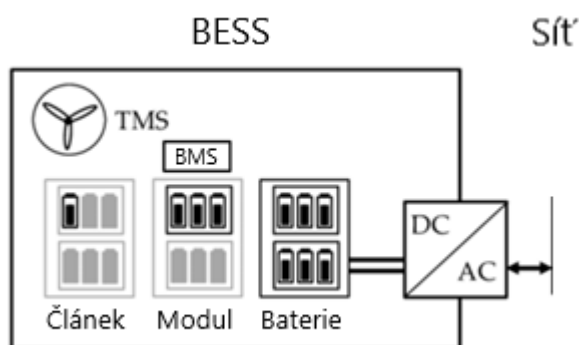
Pro provozování výroby elektrické energie je zpravidla nutné mít licenci na výrobu elektrické energie. Tuto licenci vydává Energetický regulační úřad. Avšak licence není nutná při splnění všech následujících podmínek [16]:

- Akumulátor neslouží k podnikání, ale pouze pro vlastní spotřebu.
- Akumulátor svým instalovaným výkonem nepřesahuje 10 kW.
- Ve stejném odběrném místě není připojena jiná výrobní držitelce licence.

Tímto způsobem vzniká riziko nekontrolovatelného připojení spotřebičů velkého výkonu v DS NN, což může způsobit problémy s kvalitou elektrické energie.

3 BESS

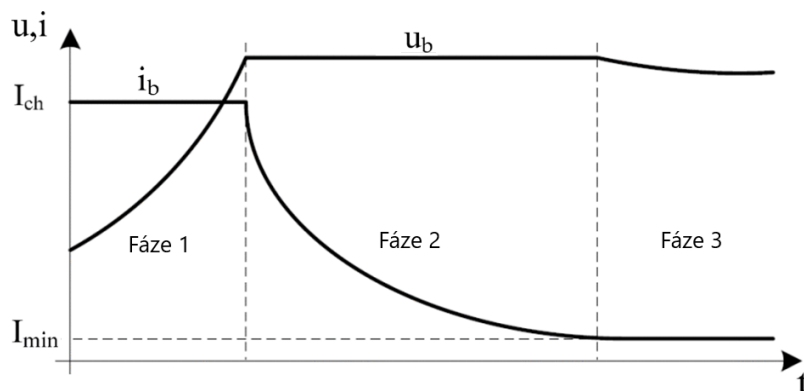
Bateriové akumulční systémy (BESS) akumulují energii v elektrochemické formě a jsou k dispozici v různých velikostech a výkonech od méně než 100 W do několika megawattů, pro DS NN se obvykle používají BESS s výkonem do 100 kW. BESS se skládá z baterie, jednoho nebo více měničů, systému bateriového managementu (BMS) a systému tepelného managementu (TMS) [17]. Na *Obr. 3-1* je schematicky znázorněn systém BESS s hlavními komponenty připojenými do DS. Přibližná celková účinnost BESS je v rozmezí od 60 % do 80 % v závislosti na provozním cyklu a typu elektrochemických článků uvnitř baterií. Hlavní typy úložišť vhodné pro implementace v sítích NN jsou olověné, nikl – železné (NiFe), nikl – kadmiové (NiCd), nikl – metal hydridové (NiMh), průtokové a lithium-iontové (Li-ion) baterie.



Obr. 3-1 Schematické znázornění BESS [17]

3.1 Režim nabíjení baterie

Důležitým aspektem v BESS je řízení nabíjení baterie. V závislosti na typu baterie je nutno splnit řadu podmínek, aby se prodloužila životnost baterie. Podmínky nabíjení jsou kritické a nabíječka baterií implementuje specifickou charakteristiku proudového napětí podle typu baterie. Algoritmus nabíjení baterie lze provádět různými způsoby. Nejrozšířenější způsob nabíjení baterie je nabíjení konstantním proudem a konstantním napětím (CCCV). Tento způsob má tři fáze, které jsou uvedeny na *Obr. 3-2*. V první fázi je baterie napájena jmenovitým nabíjecím proudem, dokud napětí baterie nedosáhne určité prahové hodnoty. Ve druhé fázi je napětí baterie udržováno konstantní, zatímco proud pomalu klesá, dokud není dosaženo minimální prahové hodnoty. V poslední fázi je baterie udržována plně nabitá dodáváním malého proudu v nedefinovaném čase, aby nedošlo k předčasnému stárnutí v důsledku přehřetí [18].

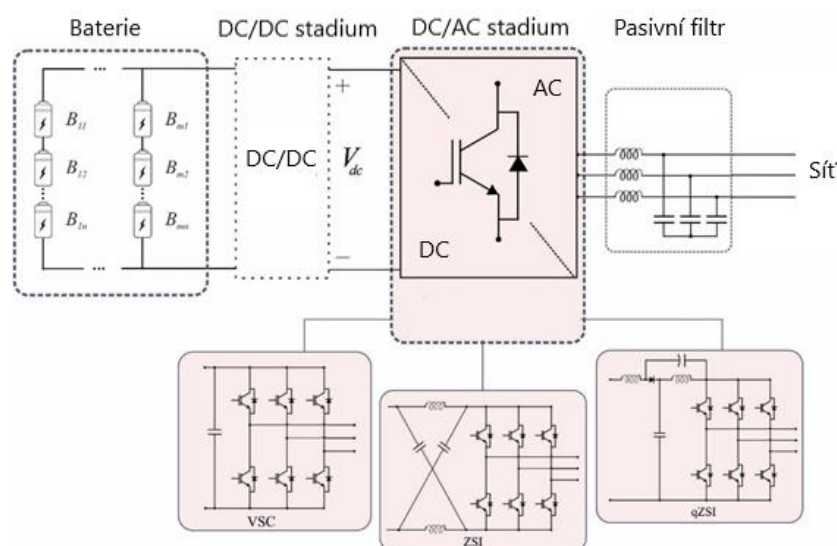


Obr. 3-2 Charakteristika nabíjení baterie CCCV [18]

3.2 Připojení do DS

Jmenovité napětí elektrochemických článků je mnohem nižší než připojovací napětí v síti. Například jmenovité napětí článku lithiové baterie se pohybuje mezi 3 a 4 V na článek, zatímco BESS jsou obvykle připojeny k distribuční síti. Proto články jsou zapojeny do série a tím pádem vytvoří baterii, která je schopna dodávat vhodné napětí na DC straně, obvykle do 1200 V. Pak pomocí měniče se toto napětí mění na střídavé. Pomocí pulzně šířkové modulace (PWM) lze regulovat tok výkonu.

Měnič zdroje napětí (VSC), ZSI (měnič Z-zdroje) a qZSI (měnič kvazi Z-zdroje) jsou tři tradiční dvouúrovňové měniče pro DC/AC stupeň BESS zobrazené na *Obr. 3-3*. Připojení k síti je obvykle prováděno přes pasivní filtr, aby se tlumily produkované harmonické. Obvykle se používají konfigurace filtrů LC nebo LCL [19].

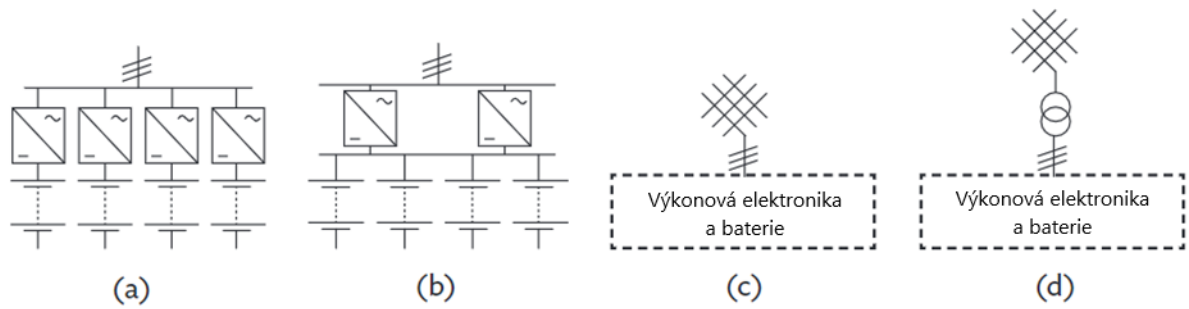


Obr. 3-3 Topologie dvouúrovňových měničů pro připojení BESS k síti [19]

V konfiguraci VSC lze baterie připojit přímo ke DC/AC stupni nebo přes DC/DC stupeň. Nevýhodou této topologie je možnost pracovat pouze jako snižující měnič. Proto musí být výstupní napětí nižší než stejnosměrné napětí. Kromě toho nelze aktivovat současně horní a dolní spínač každé fáze. Musí být tedy implementována mrtvá doba mezi otevřením a zavřením spínačů, která zkresluje výstupní vlnu [19].

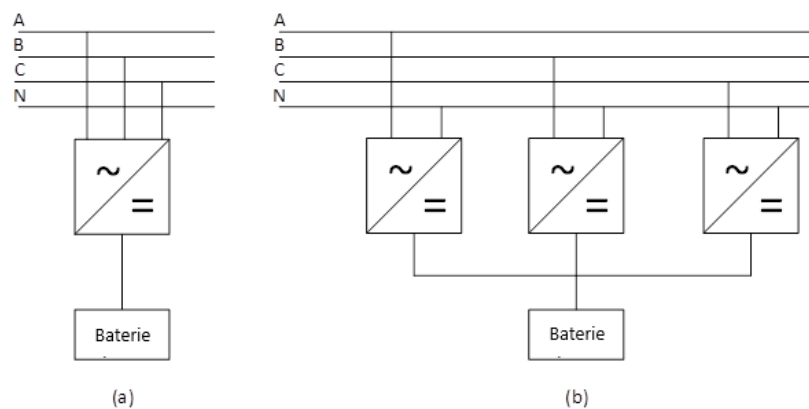
ZSI a qZSI jsou navrženy tak, aby překonaly nevýhody spojené s topologií VSC. V zásadě mohou tyto měniče pracovat v režimu zvýšení napětí kvůli další síti s kondenzátory a induktory ve stejnosměrném meziobvodu, což nevyžaduje použití dalšího DC/DC měniče a snižuje počet polovodičů v systému. Kvůli uvedeným charakteristikám se používá měnič qZSI k integraci obnovitelných zdrojů energie s bateriemi a k jejich připojení k síti. Nehledě na výhody ZSI a qZSI, běžněji se používá VSC díky své jednoduchosti [19].

Existuje několik variant připojení BESS k síti. Jednotky výkonové elektroniky mohou být instalovány buď pro každou baterii (*Obr. 3-4a*), nebo mohou být bateriové moduly připojeny paralelně ke společné sběrnici stejnosměrného proudu (*Obr. 3-4b*). Příklad připojení k síti NN je znázorněn na obrázku *Obr. 3-4c*, připojení k síti VN prostřednictvím transformátoru je znázorněno na obrázku *Obr. 3-4d*.



Obr. 3-4 Varianty připojení BESS k síti [17]

Existuje možnost připojení jak přes jeden měnič (Obr 3-5a), tak i pomocí třech připojených k jednotlivým fázím (Obr 3-5b). Poslední varianta umožňuje lepší regulace napětí v jednotlivých fázích, což vede k symetrizaci soustavy [20].

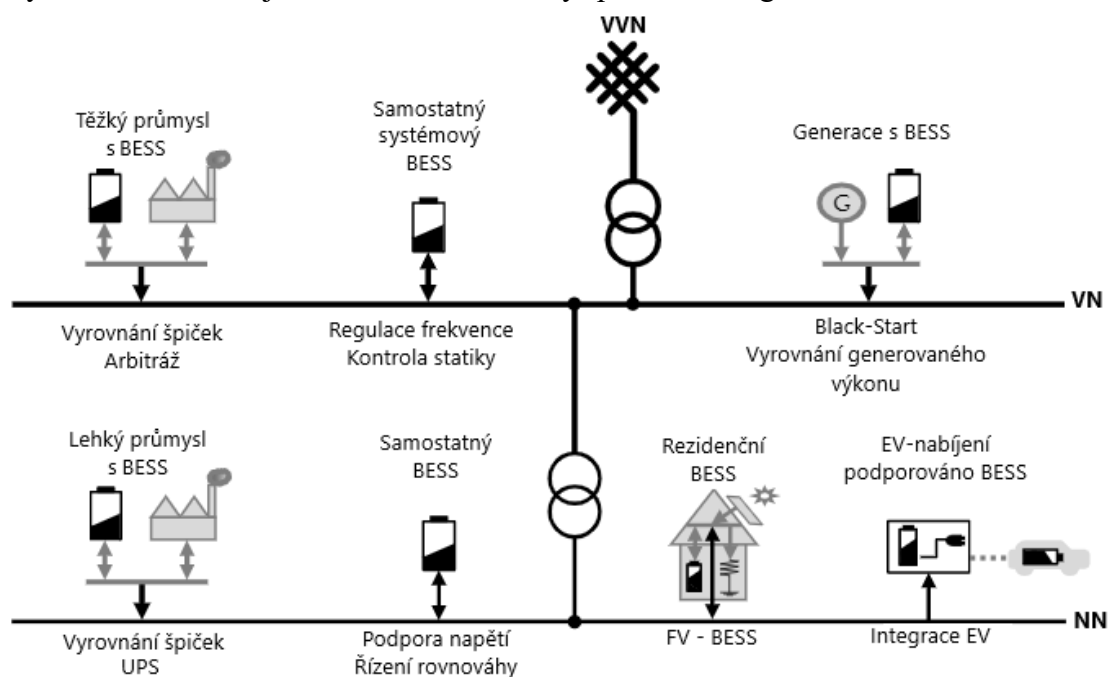


Obr. 3-5 Varianty připojení BESS k síti

BESS v závislosti na aplikaci v síti může být instalováno buď samostatně nebo jako součást výroby.

3.3 Aplikace BESS v DS

BESS může sloužit k několika úkolům v DS. Integrace úložišť také zahrnuje různé zúčastněné strany. Na Obr. 3-6 je uveden schematický přehled integrace BESS v sítích VN a NN.



Obr. 3-6 Přehled aplikace BESS v DS [17]

Podpůrná služba

Z pohledu systému je nutné neustále udržovat rovnováhu mezi výrobou energie a zátěží v rámci vzájemně propojené sítě. BESS jsou schopny reagovat na výkyvy v elektrické síti v milisekundovém časovém měřítku, což je důležitým úkolem kvůli náhodnému charakteru generace OZE. V případě výpadku napájení jednotlivé součásti nebo celé ES může dojít k blackoutu. V takových situacích může BESS usnadnit restart stávajících jednotek na výrobu energie. BESS mohou být poskytovány další služby: snižování/zvyšování výkonu v závislosti na napětí, proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy a proces náhrady záloh [17].

Aplikace u koncového uživatele

BESS může také sloužit různým aplikacím u koncového uživatele. Například kombinace lokální fotovoltaické generace s bateriovým úložištěm pro domácnosti (PV-BESS). PV-BESS může pomoci koncovému uživateli ušetřit tarifní náklady. Obvykle je výkon residenčních BESS 1-5 kW při kapacitě baterie 3-15 kWh. PV-BESS lze také použít k úspoře nákladů na elektřinu i pro průmyslové zákazníky s lokální výrobou [17].

Další aplikace BESS může být vyrovnání špiček (Peak Shaving). Průmyslovým zákazníkům se obvykle účtuje zvlášť spotřeba energie a špičkový výkon (špičkový tarif), nabíjením BESS mimo špičkových hodin a použitím uložené energie BESS ve špičkové hodiny mohou průmysloví zákazníci významně snížit svou špičkovou poptávku z trhu a následně i svoje náklady na elektřinu [17]. Tento princip může být použit i pro domácnosti při existenci dvou nebo více tarifových sazeb.

Vyrovnaní generovaného výkonu pro výrobní moduly se silnými kolísáními generovaného výkonu (např. větrné nebo fotovoltaické elektrárny) lze usnadnit také prostřednictvím BESS [17].

Arbitráž

Volatilita v nabídce a poptávce elektřiny může způsobit kolísání velkoobchodních cen elektřiny na devizových trzích. Obchodování s arbitrážemi v oblasti skladování je zaměřeno na nákup/prodej elektřiny v souladu s kolísáním tržních cen, což vede k cyklům nabíjení a vybíjení pro akumulací systém [17].

Podpora sítě a odložení investic

BESS může sloužit k několika úkolům pro podporu sítě a také jako odklad nebo dokonce alternativa k tradičním opatřením pro posílení sítě. Elektrické sítě potřebují řídicí schopnosti, aby se přizpůsobily změnám toku energie v místech odběru a dodávky. Modernizace elektrického vedení a transformátorů je nejpřímějším opatřením, aby se zabránilo přetížení jednotek v sítích se zvyšující celkovou poptávkou nebo nárůstem fluktuací. Proměnlivá generace OZE, jakož i změny v obytných a průmyslových zátěžích způsobují kolísání napětí. Integrace a odpovídající řízení BESS pro podporu napětí může pomoci snížit kolísání napětí prostřednictvím koordinovaného řízení činného a jalového výkonu v odběrném místě nebo na úrovni transformoven VN/NN [17].

Rozvoj elektromobility dále vyžaduje modernizaci dobíjecí infrastruktury a bude mít významný dopad na DS na všech úrovních. Existují příklady podpory dobíjecí stanice EV prostřednictvím BESS, který slouží ke zvýšení dostupného výkonu pro proces nabíjení vozidel. Ve větším měřítku (až do skladovací kapacity několika MWh) byla diskutována také integrace BESS pro usnadnění nabíjení elektrických autobusů v depech [17].

4 ELEKTROMOBILITA

Elektrická vozidla (EV) lze definovat jako vozidla, která jsou plně nebo částečně poháněna pomocí elektrického motoru. Systém elektrického vozidla obecně obsahuje baterii pro skladování energie, měnič, elektrický motor pro pohon, mechanický převod a systém řízení výkonu. Existuje několik různých technologií vozidel. Níže jsou uvedeny hlavní typy elektromobilů, které používají nabíjení z DS.

Plug-in hybridní elektrická vozidla (PHEV)

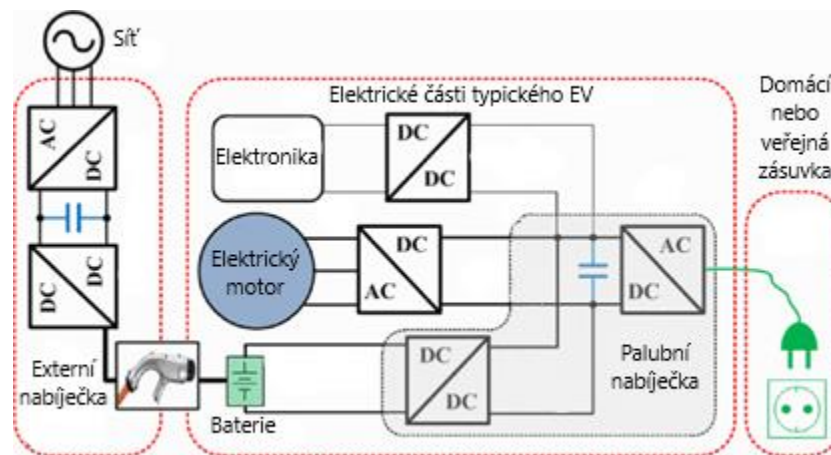
Součástí PHEV mohou zahrnovat akumulátor energie, elektrický motor a konvenční spalovací motor a systém řízení výkonu. Baterie lze dobít připojením zástrčky k externímu zdroji elektrické energie. Palivo je považováno za záložní zdroj, jímž lze PHEV pohánět na velké vzdálenosti. Obvykle mají kapacitu baterie do 5-15 kWh [21].

Bateriová elektrická vozidla (BEV)

Na rozdíl od hybridu nemá BEV žádný spalovací motor; je tedy zcela elektrický. Proto musí být připojen k elektrické síti pro dobíjení na konci omezeného počtu najetých kilometrů. Kompaktní BEV jsou dodávány s baterií, která má kapacitu 12–18 kWh, střední rodinný sedan s kapacitou 22–32 kWh a luxusní modely s baterií, která může dosahovat kapacity 60–100 kWh, aby poskytovala prodloužený dojezd a dosahovala vysokých výkonů [21].

Důležitou částí EV je baterie. Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, baterie je zařízení přeměňující uloženou chemickou energii na energii elektrickou. Baterie pro EV musí mít vysokou kapacitu v omezené velikosti a hmotnosti a rozumnou cenu. V EV se používají různé typy baterií. Jako příklady lze uvést sodíkovo-sírové (NaS), průtokové, Li-ion a NiMH baterie. Poslední dvě se většinou používají u všech dostupných elektrických vozidel z důvodu jejich nízké hmotnosti a vyšší účinnosti i kapacity. Nabíjení baterie je prováděno podobně jak u BESS podle způsobu nabíjení CCCV (viz. 3.1).

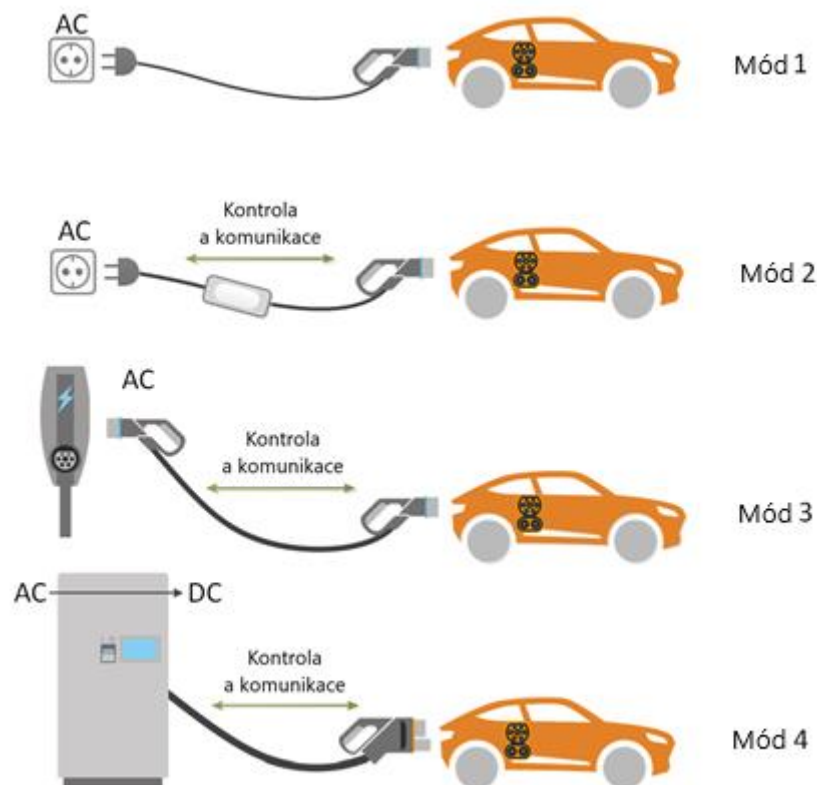
Charakteristiky PHEV a BEV jsou podobné, pokud jsou považovány za elektrické zátěže DS. Obecná konfigurace systému dobíjení EV je znázorněna na Obr 4-1. V módech 1 až 3 se přeměna na DC napětí provádí prostřednictvím měniče instalovaného ve vozidle (palubní nabíječka). V módu 4 je měnič instalován v nabíjecí stanici. Jednotlivé módy nabíjení jsou popsány v následující podkapitole.



Obr. 4-1 Obecná konfigurace systému dobíjení EV [22]

4.1 Módy nabíjení EV

Na dobu potřebnou k nabití baterií EV má vliv několik faktorů. První z nich je stav nabití baterie (SOC). SOC je veličinou určující aktuální podíl energie obsažené v baterii k celkové kapacitě baterie. Čím je nižší SOC, tím déle bude nabíjení baterie trvat. Dalším faktorem je proud nabíjení. Maximální proud závisí na módu nabíjení. Módy nabíjení jsou definovány normou IEC 61851 [9] a znázorněny na *Obr. 4-2*, jejich charakteristiky podle [9] jsou uvedeny v *Tab. 4-1*.



Obr. 4-2 Módy nabíjení EV [23]

Tab. 4-1 Charakteristiky módů nabíjení EV

Mód nabíjení	Napětí	Maximální proud (A)	Výkon (kW)	Čas nabíjení	Místo nabíječky
Mód 1	1f, AC	16	<3,7	4-8 h	Palubní
Mód 2	1f nebo 3f, AC	32	<7,36 (1f) <12,8 (3f)	2-4 h	Palubní
Mód 3	1f nebo 3f, AC	63 (1f) 63 (3f)	<16,1 (1f) <25,2 (3f)	1-2 h	Palubní
Mód 4	DC (max. 750 V při 250 A nebo 1000 V při 200 A)	250	<200	5-30 min	Externí

Mód 1

V módu 1 je připojení EV k síti NN prováděno prostřednictvím jednofázového kabelu s ochrannými zemnicími vodiči v závislosti na zemi a normách s použitím standartního systému zásuvek a zástrček. Proud v tomto režimu nepřesahuje 16 A. Tento mód nabíjení automobilu má relativně malý výkon, což způsobuje delší dobu nabíjení. Mód 1 se používá hlavně v domácnosti a kanceláři, jelikož není nutná žádná další infrastruktura. Mód 1 je nejjednodušší možný mód nabíjení a nepodporuje žádnou komunikaci mezi EV a nabíjecím bodem. Tento mód nabíjení je v několika zemích zakázán nebo omezen. Například při času nabíjení vyšším než 2 hodiny, je maximální proud limitován na hodnotě 10 A pro Norsko, 8 A pro Francii a 6 A pro Dánsko [9].

Mód 2

V módu 2 se používá speciální typ nabíjecího kabelu vybaveného ovládacím a ochranným zařízením v kabelu (IC-CPD). IC-CPD provádí požadované řídicí a bezpečnostní funkce. Maximální proud v tomto režimu je 32 A. Mód 2 lze použít s domácími a průmyslovými zásuvkami. Bezpečnostní funkce tohoto módu mohou detekovat a monitorovat připojení ochranného uzemnění. Nadproudová ochrana je další bezpečnostní funkce, kterou mód 2 podporuje. Také napájecí zařízení elektrického vozidla (EVSE) detekuje připojení k EV, analyzuje požadavek na nabíjecí výkon a může provádět spínání. Tento mód nabíjení je stejně jako mód 1 v několika zemích zakázán nebo omezen [9].

Mód 3

V módu 3 je EV připojeno přes kabel se speciální zásuvkou k nabíjecí stanici, která je pevně instalovaná a má řídicí a ochranné funkce. Prostřednictvím řídicího kabelu může nabíjecí stanice komunikovat s vozidlem a kontrolovat následující parametry [9]:



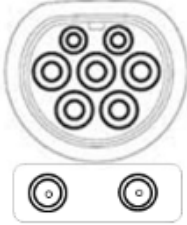


- správné připojení EV ke stanici,
- maximální nabíjecí proud,
- správné připojení uzemňovací soustavy vozidla k EVSE.

Tento mód nabíjení je typický pro veřejné nabíjecí stanice, ale může být používán i pro domácnosti, pomocí instalace wallboxu. Maximální proud v tomto módu nabíjení je 63 A při jednofázovém připojení a 63 A při třífázovém připojení. Podporuje se také provozní mód kompatibilní s režimem 2, kde je maximální proud omezen na 32 A pro jednofázové i třífázové připojení.

Mód 4

Mód 4 je jediný mód nabíjení, který obsahuje externí nabíječku se stejnosměrným výstupem. Stejnosměrný proud je dodáván přímo do baterie a palubní nabíječka je přemostěna. Tento mód může poskytovat 750 V DC s maximálním proudem 250 A [9]. Vysoká úroveň proudu tohoto módu vyžaduje vyšší úroveň komunikace a přísnější bezpečnostní prvky. Připojení k DS je obvykle prováděno přes samostatný transformátor z hladiny VN.

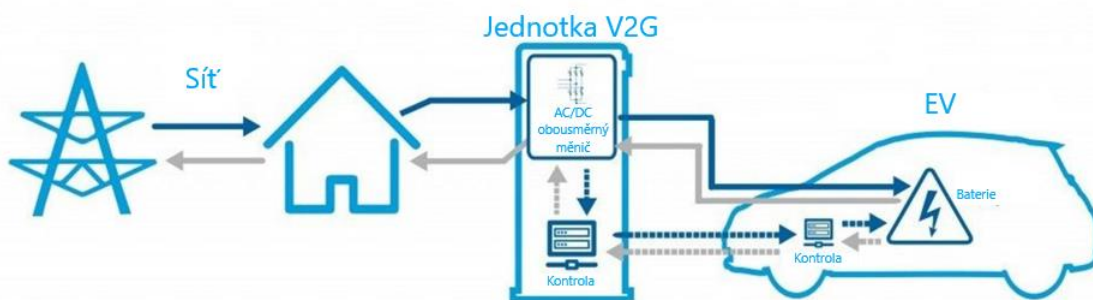
Přehled používaných konektorů pro nabíjení EV s krátkým popisem je reprezentován na *Obr. 4-3*.

Typ 1 (SAEJ1772)	
	Typ 1 je jednofázová zásuvka umožňující nabíjení střídavým proudem až do výše 7,4 kW (230 V, 32 A). Tento standard je využíván zejména v modelech vozidel pocházejících z Asie (Kia, Nissan) a v rámci Evropy jej využívají některé francouzské automobilky (Peugeot, Citroen). Využíván je také v modifikaci pro USA a Kanadu.
Typ 2 (IEC62196)	
	Typ 2 (někdy nazývaný též Mennekes) je třífázová zásuvka umožňující nabíjení střídavým proudem až do výše 43 kW (400 V, 63 A). Nejběžnější specifikací je výkon 22 kW (400 V, 32A). V současné době je standardem pro většinu evropských automobilek (BMW, Volkswagen, Mercedes).
CCS	
	CCS je kombinovaná zásuvka vycházející z Typu 2. Oproti Typu 2 umožňuje pomocí dvou spodních kontaktů i tzv. rychlonabíjení stejnosměrným proudem do výše 170kW (v praxi dosud nejběžněji do 50kW).
CHaDeMo	
	CHaDeMo je stejnosměrný dobíjecí systém vyvinutý v Japonsku umožňující rychlonabíjení stejnosměrným proudem do výše 50kW. Je podporován celou řadou automobilek, např. Citroën, Honda, Kia, Mazda, Mitsubishi, Nissan, Peugeot, Subaru, Tesla (s adaptorem) a Toyota.
Schuko – běžná evropská zásuvka 230 V	
	Schuko je běžná jednofázová zásuvka umožňující nabíjení střídavým proudem až do výše výkonu 3,7 kW (230 V, 16 A). Je využívána jako jeden z nejběžnějších typů zásuvek v evropských domácnostech.

Obr. 4-3 Přehled používaných konektorů [24]

4.2 Technologie V2G

EV mohou potenciálně pomoci udržovat stabilní napětí a frekvenci sítě a poskytnout zdroj výkonu, který může podpořit DS. Schematické znázornění systému V2G (vehicle to grid) je uvedeno na Obr. 4-4.



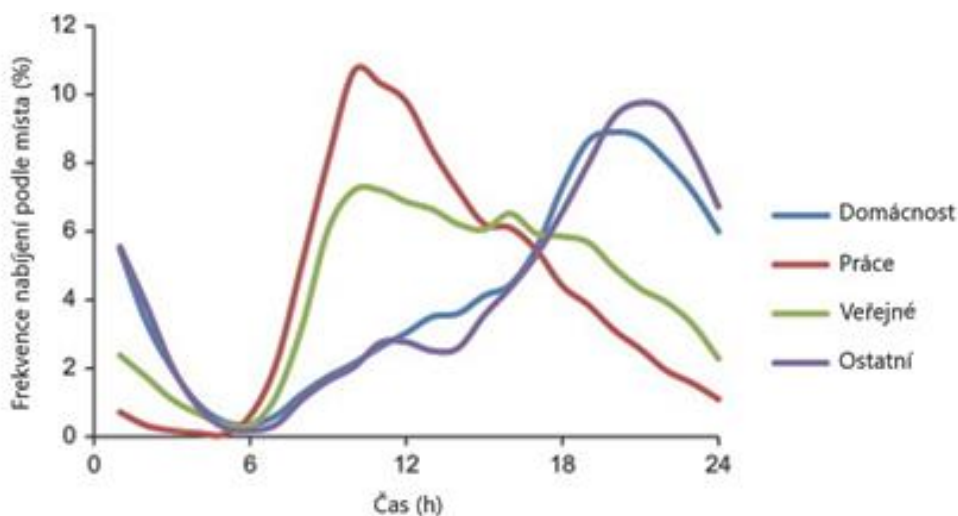
Obr. 4-4 Systém V2G [25]

Technologie V2G umožňuje dodávat energii z baterie elektromobilu zpět do elektrické sítě. Měnič vozidla nebo nabíjecí stanice musí být schopen obousměrného toku elektrické energie a splňovat podmínky pro připojení k DS zdrojů podle EN 50549, uvedených v kapitole 2.5. Majitele EV připojených do systému V2G definují úroveň SOC, při kterém lze dodávat energii do DS, tím pádem umožňují PDS použít EV pro regulaci v sítě. Celková koordinace se všech EV připojených do systému V2G provádí agregátorem. K hlavním nedostatkem této technologie patří náhodnost dostupné kapacity a zkrácení životnosti baterie dalšími nabíjecími cykly [26].

4.3 Dopady na DS

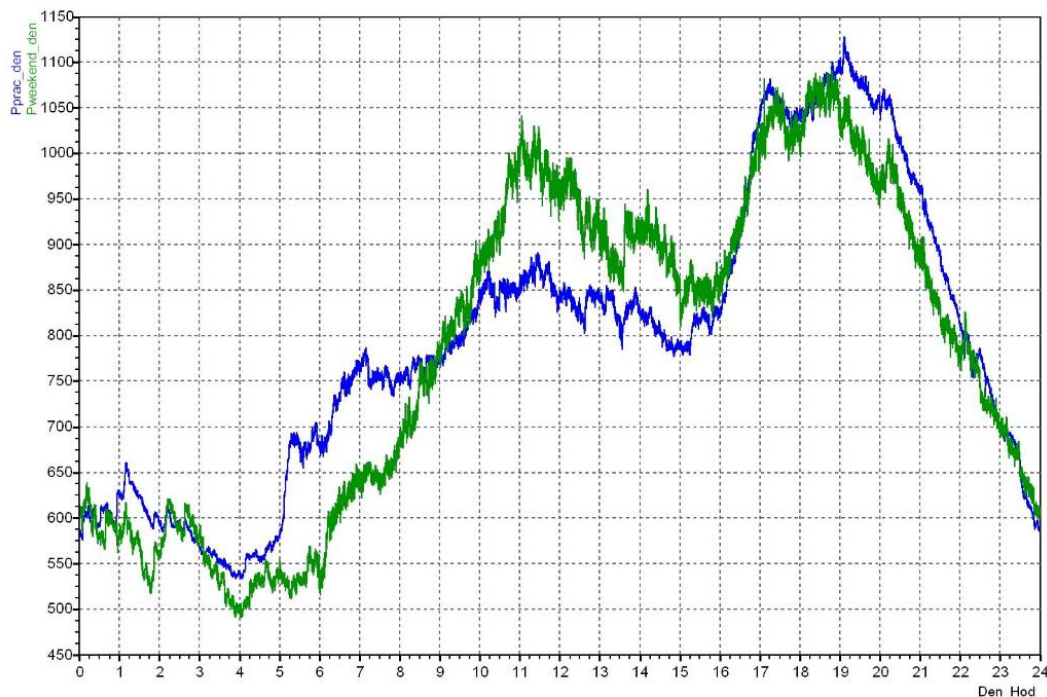
Jako každé jiné elektrické zařízení s širokým využitím EV mají dopad na schopnost stávajících sítí udržovat požadovanou úroveň kvality energie v místech připojení spotřebitelů.

Pro stanovení času nabíjení je nutné definovat model chování majitelů EV. Preference místa a času dobíjení EV pro Anglii jsou znázorněny na Obr. 4–5. Je zřejmé, že v každé zemi budou tyto preference upraveny v závislosti na místních podmínkách, ale tendence nabíjet elektrické vozidlo v určitých časových intervalech pokračuje [28],[29],[30]. Obvykle lidé preferují nabíjet svá vozidla v okamžik příjezdu do míst dlouhodobé činnosti. Těmito mohou být dům, práce, nákupní centra atp. Domácí nabíjení využívají majitele EV s přístupem k domácímu nabíjení, většina těchto uživatelů bude provádět dobíjení svého vozidla po příjezdu ze zaměstnání nebo jiné aktivity do svého bydliště. Nabíjení v zaměstnání především použijí uživatelé, které nemají možnost nabít EV doma.



Obr. 4-5 Rozdělení preferencí majitelů EV podle místa a času nabíjení [27]

Diagram zatížení trafostanice 22/0,4 kV bez připojených elektromobilů je reprezentován na Obr. 4-6. Z porovnání grafu z Obr. 4-5 a Obr. 4-6 vyplývá, že při nekontrolovaném nabíjení, největší počet EV provádějících nabíjení spadne na večerní a ranní špičkové zatížení, což s sebou nese riziko poklesu napětí pod hodnotu stanovenou v normě. Jak bylo uvedeno v předchozí podkapitole, všechny režimy AC nabíjení umožňují jednofázové připojení k DS, což nese riziko zvýšení nesymetrie.



- pracovní den - víkend

Obr. 4-6 Diagram zatížení trafostanice (průměr 1.1. 2011 až 22.1.2011 Oblast maloodběru – byty a RD) [31]

5 CÍLE PRÁCE

5.1 Shrnutí problematiky

V současnosti se společnost snaží o co nejekologičtější přístup k použití a generaci energie. Zvyšuje se zájem o OZE. Avšak růst využívání fotovoltaických a vetřených elektráren způsobuje řadu problémů v distribuční soustavě. Část z nich může řešit BESS, ale vysoká penetrace bateriových systému v DS NN může způsobit snížení napětí pod dovolenou mez při nabíjení ze sítě. Dalším trendem současnosti je elektromobilita. Vysoká penetrace EV přináší do DS zvýšení odběru, při neregulovatelném nabíjení může ve špičkové hodiny dojít k poklesu napětí pod minimální hodnotu stanovenou normou. Další riziko nesou jednofázové režimy nabíjení z hlediska nesymetrie.

5.2 Očekávané výsledky

Cílem práce je vymezením rizika snížení napětí pod dovolenou mez v profilech distribučních sítí NN v souvislosti s odběrem BESS a nabíječek pro elektromobily v odběrných a předávacích místech a navrhnout, analyzovat a ohodnotit možné způsoby podpory napětí těmito zařízeními a ochrany proti podpětí. Dalším úkolem je vymezením způsobu implementace pro "domácí" BESS a AC nabíjecí systémy. Podpora sítě měniči při nabíjení těchto zařízení by měla snížit negativní dopady na DS a uvést parametry kvality elektrické energie do mezí stanovených normou.

5.3 Řešení

Pro řešení výše definovaných cílů je nutné popsat existující možnosti a módy řízení výkonů, v závislosti na velikosti napětí, nesymetrii napětí a frekvenci. Dalším krokem řešení je modelování DS NN v prostředí MATLAB Simulink, modelování bude prováděno pro několik scénářů:

- 1) modelování sítě bez penetrace BESS a nabíječek EV,
- 2) modelování sítě při implementaci BESS a nabíječek EV s různými úrovněmi penetrace do DS NN bez podpory těmito zařízeními DS,
- 3) modelování sítě při implementaci BESS a nabíječek EV s různými úrovněmi penetrace do DS NN a podporou DS měniči těchto zařízení zvolenými způsoby.

Následně bude provedena analýza a porovnání výsledků scénářů. Také pro každý scénář bude ověřeno splňuje-li požadavky kvality elektrické energie podle ČSN EN 50160 [5].

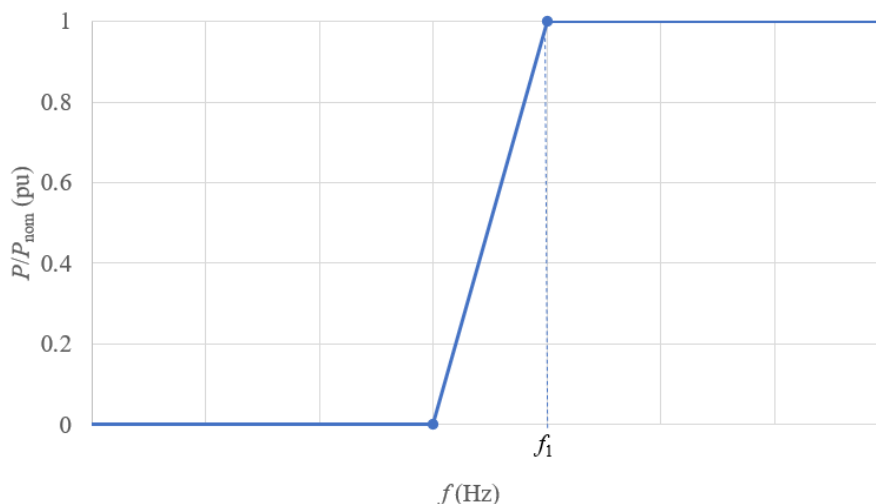
Finálním bodem řešení je ověření funkce podpory na existujícím laboratorním systému a vymezení způsobu implementace podpory.

6 MÓDY ŘÍZENÍ VÝKONŮ

V této a následujících kapitolách za kladný potok energie je považován směr od zdroje do zátěží.

6.1 Řízení činného výkonu v závislosti na frekvenci

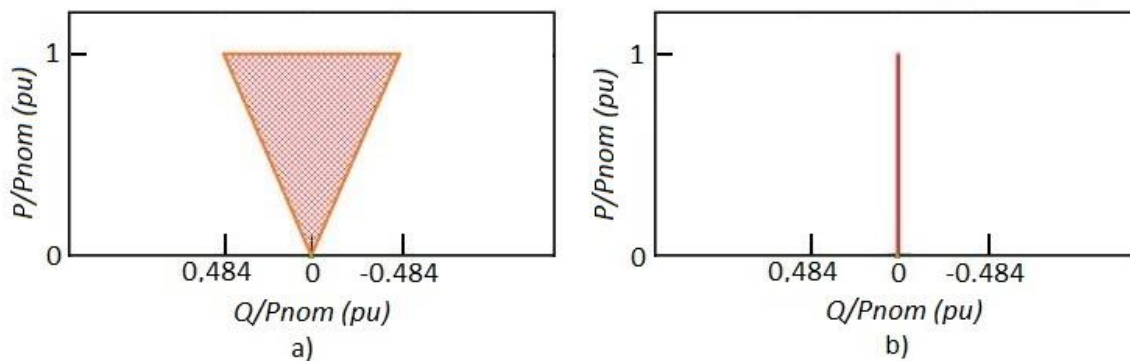
Při poklesu frekvence v síti pod prahovou úroveň EVC a BESS pracující v režimu nabíjení, měly by snižovat svůj příkon, až do úplného vypnutí. Prahovou hodnotu frekvence f_1 a statiku určuje PDS. Charakteristika regulace příkonu při podfrekvenci je uvedena na *Obr. 6-1*.



Obr. 6-1 Charakteristika funkce P_f

6.2 Pracovní prostor PQ diagramu

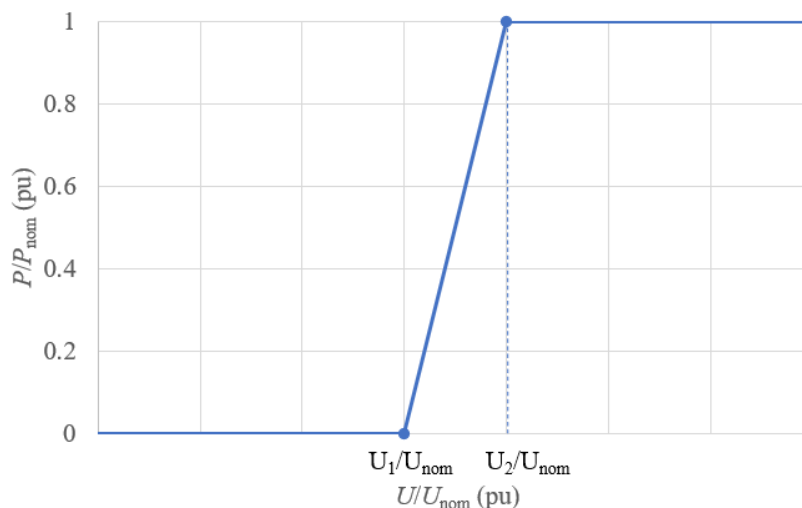
Pracovní prostor PQ diagramu (*Obr. 6-2a*) je omezen minimální hodnotou $\cos\varphi$ měniče. Při nabíjení BESS a EV úbytek napětí způsobený těmito zařízeními může být kompenzován injektáží jalového výkonu. Avšak venkovní sítě NN obvykle mají poměr R/X v rozsahu 1,5 až 2,5, proto efekt od injektáže jalového výkonu bude minimální [32]. Navíc implementace řízení PQ v palubních nabíječkách je složitější, proto bude stačit využívat pouze omezení činného výkonu (*Obr. 6-2b*) [20].



Obr. 6-2 PQ diagram a) omezení $\cos\varphi=0,90$, b) $Q=0$ [20]

6.3 Řízení činného výkonu v závislosti na napětí

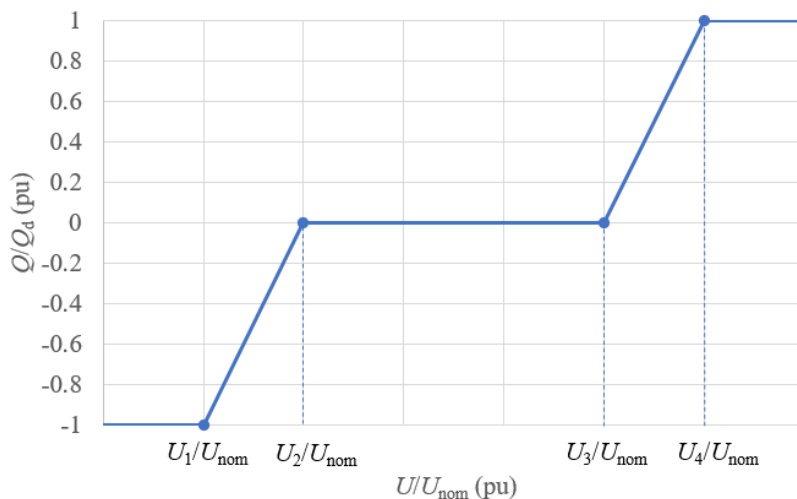
BESS a EVC v režimu nabíjení při poklesu napětí těsně před limitní úroveň by měly podpořit napětí v síti prostřednictvím omezení činného výkonu. Charakteristika omezení činného výkonu je uvedena na Obr. 6-3. Hodnota U_2 určuje napětí, při kterém funkce by měla být aktivována, hodnota U_1 napětí, při kterém spotřebovaný výkon bude roven nule. Hodnoty U_1 a U_2 by měl definovat PDS v závislosti na místní podmínky.



Obr. 6-3 Charakteristika funkce PU při nabíjení

6.4 Řízení jalového výkonu v závislosti na napětí

Jak bylo zmíněno v kapitole 6.2 řízení jalového výkonu má minimální efekt na podporu napětí v síti NN, nicméně vliv řízení jalového výkonu na podporu napětí bude ověřen během simulace. Řídicí charakteristika je znázorněna na Obr 6-4, hodnoty U_2 a U_3 definují začátek buď injeckáže jalového výkonu při nízkém napětí nebo spotřeby jalového výkonu při vysokém napětí v místě připojení. Hodnoty U_1 a U_4 určují napětí při kterém dodávka nebo spotřeba jalového výkonu bude maximální. Tyto hodnoty by také měl definovat PDS v závislosti na místních podmínkách. Při současném použití podpory pomocí funkce PU a QU charakteristiky by měly být nastaveny tak, aby první zafungovala funkce QU. Funkce PU by měla být aktivována po vypršení dostupného jalového výkonu pro podporu sítě.



Obr. 6-4 Charakteristika funkce QU

7 MODELOVÁNÍ PODPORY SÍTĚ V MATLAB SIMULINK

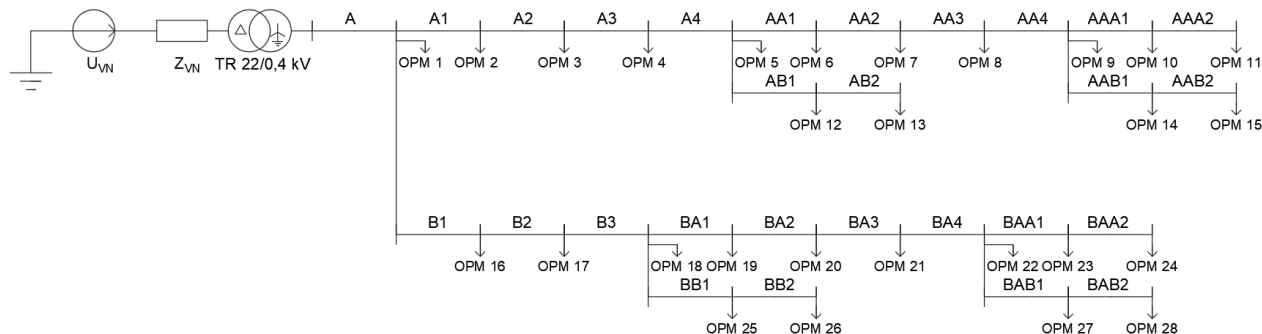
Pro modelování podpory sítě měniči BESS a EVC podle charakteristik uvedených v kapitole 6 byl zvolen program MATLAB Simulink. Dále na základě reálných charakteristik prvků DS NN byla vytvořena testovací síť a následně modelována pomocí standardní knihovny „Specialized Power Systems“ v prostředí Simulink. Podrobný popis modelu je uveden v následujících podkapitolách.

7.1 Popis modelu

Jelikož nabíjení baterie je poměrně zdlouhavý proces, za čas simulace bylo vybráno rozmezí 24 hodin. Moderní EV a BESS díky použití pasivních filtrů mají téměř ideální tvar sinusoidy, proto pro modelování podpory napětí a frekvence sítě lze vliv harmonických zanedbat a modelovat nabíjení BESS a EV zdrojem proudu. Tím pádem byla umožněna simulace pomocí fázorového výpočtu, který dává možnost výrazně snížit čas výpočtu. Výpočet byl proveden s časovým krokem 10 sekund.

7.1.1 Topologie sítě

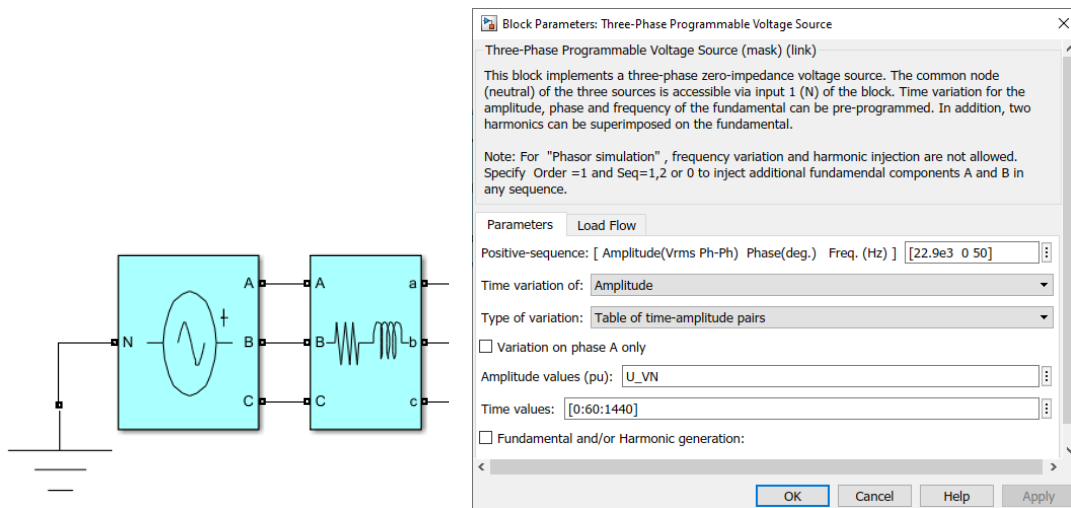
Testovací síť má paprskové zapojení a obsahuje zdroj napětí 22 kV, transformátor 22/0,4 kV, vedení vedoucích do 28 odběrných předávacích míst (OPM). Všechny úseky sítě budou venkovními vedeními, jelikož ve srovnání s kabely mají větší impedanci a mohou způsobit více problémů s kvalitou napětí. Přípojky k jednotlivým OPM obvykle bývají do 5 m, proto při sestavení modelu byly zanedbány. Topologie testovací sítě je znázorněna na *Obr. 7-1*.



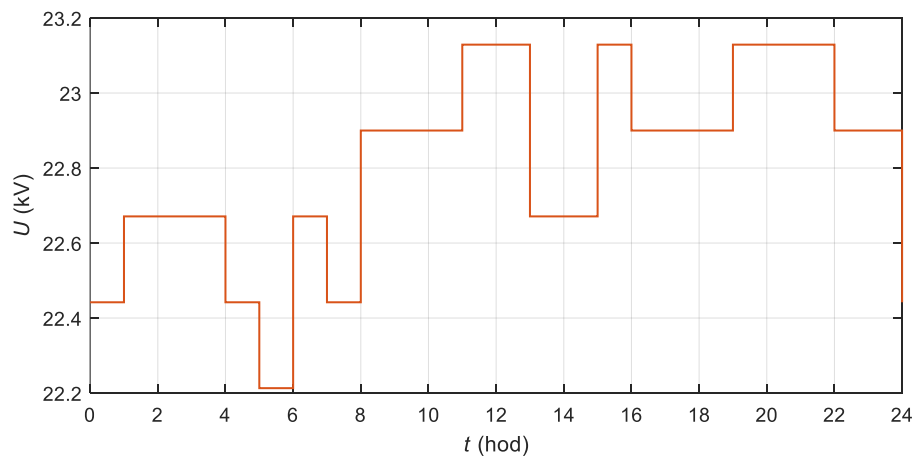
Obr. 7-1 Topologie testovací sítě

7.1.2 Zdroj napětí

Zdroj napětí VN byl modelován pomocí programovatelného zdroje napětí a sériové impedance (*Obr. 7-2*), což umožňuje provádět změny napětí na straně VN během simulace. Referenční velikost napětí je nastavena na úroveň 22,9 kV, odpor zdroje je 2,66 Ω , indukčnost je 0,01276 H. Velikost napětí zdroje během simulace je uvedena na *Obr. 7-3*.

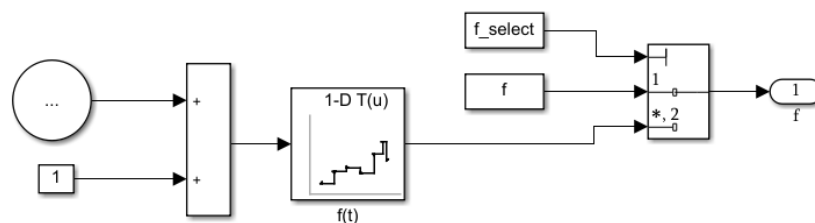


Obr. 7-2 Zdroj napětí VN



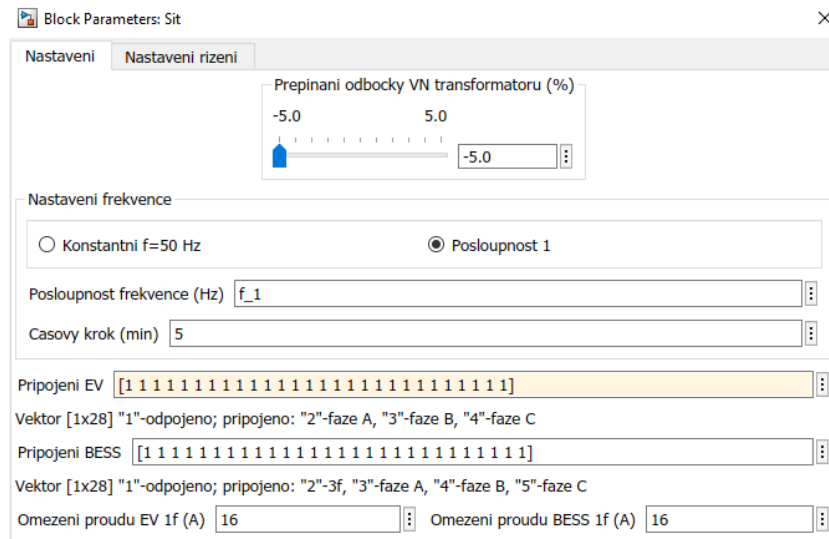
Obr. 7-3 Napětí zdroje během simulace

Narozdíl od změn napětí, MATLAB Simulink neumožňuje provedení změn frekvence během simulace při fázorovém výpočtu, proto pro ověření podpory při podfrekvenci byl vytvořen blok realizující fiktivní změny frekvenci (Obr. 7-4).

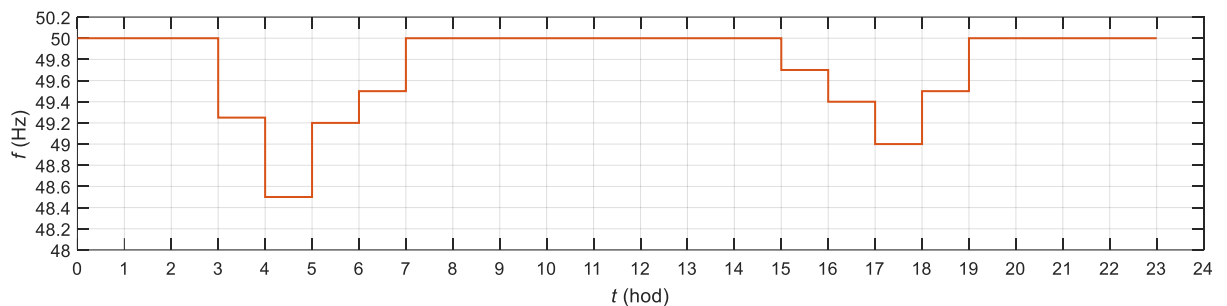


Obr. 7-4 Blok „Nastavení frekvence“

Nastavení frekvence je prováděno pomocí masky bloku „Sít“ (Obr. 7-5), také přes ní lze nastavit odbočku transformátoru, připojení BESS, připojení EV a stále omezení nabíjecího proudu těchto zařízení.



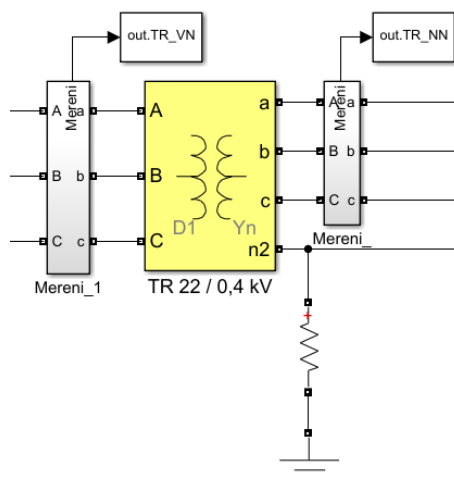
Obr. 7-5 Maska bloku „Sít“, záložka „Nastavení“



Obr. 7-6 Frekvence během simulace

7.1.3 Transformátor VN/NN

Transformátor 22/0,4 kV byl modelován pomocí standardního bloku trojfázového jádrového dvouvinutového transformátoru (Obr. 7-7), jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 7.1. Uzemnění strany NN transformátoru je provedeno v souladu s normou PNE 33 0000-1 [33], odpor uzemnění transformátoru je roven 5 Ω. Odbočka transformátoru během simulace je pevně nastavena a nachází se v poloze -5 % VN.

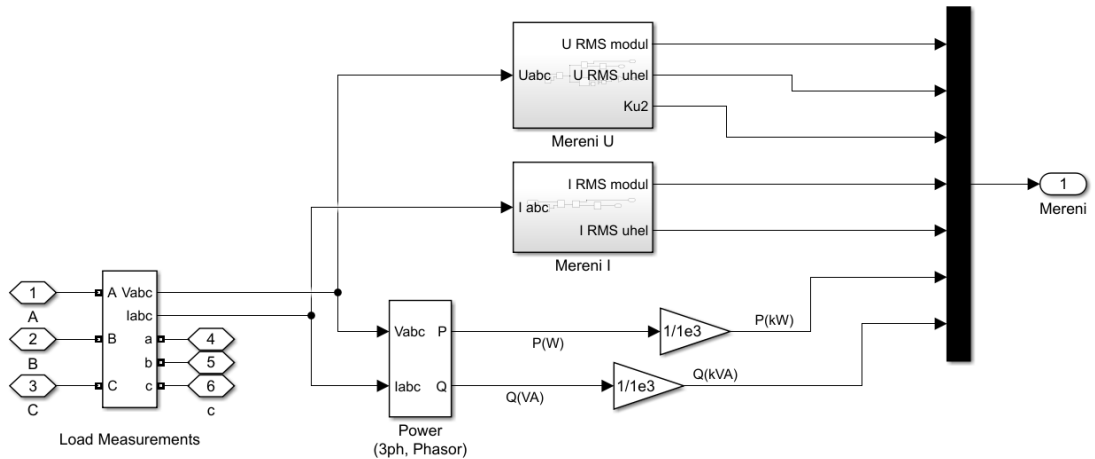


Obr. 7-7 Model transformátoru 22/0,4 kV

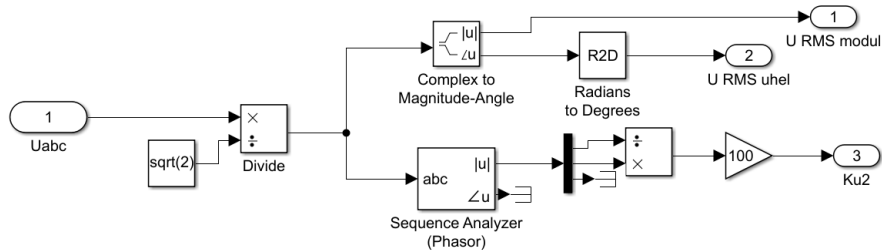
Tab. 7-1 Parametry transformátoru

S_{nom} (kVA)	U_{tVN} (kV)	U_{tNN} (kV)	R_t (Ω)	L_t (H)	R_m (M Ω)	L_m (H)
400	22	0,4	12,558	0,13317	7,5602	620,89

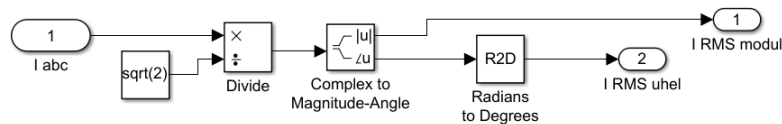
System měření (Obr. 7-8) je vytvořen ze standardního bloku trojfázového měření napětí a proudu, následně s amplitudových fázových hodnot tohoto bloku pomocí bloku „Měření U“ (Obr. 7-9) a „Měření I“ (Obr. 7-10) se vypočítají efektivní fázové hodnoty a úhly fázorů napětí a proudu, a koeficient nesymetrie napětí. Pomocí standartního bloku vypočítají hodnoty trojfázového činného a jalového výkonu.



Obr. 7-8 System měření



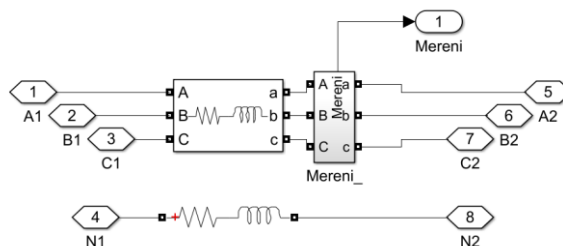
Obr. 7-9 Blok „Měření U“



Obr. 7-10 Blok „Měření I“

7.1.4 Vedení

Vedení testovací sítě jsou modelovány symetricky, pomocí standardního trojfázového RLC bloku (Obr. 7-11) jsou zadány podélné parametry vedení, příčné admittance jsou zanedbány. Nulový vodič je modelován pomocí standartního jednofázového RLC bloku. Parametry jednotlivých vedení jsou uvedeny v tabulce 7.2.



Obr. 7-11 Model vedení

Tab. 7-2 Parametry vedení

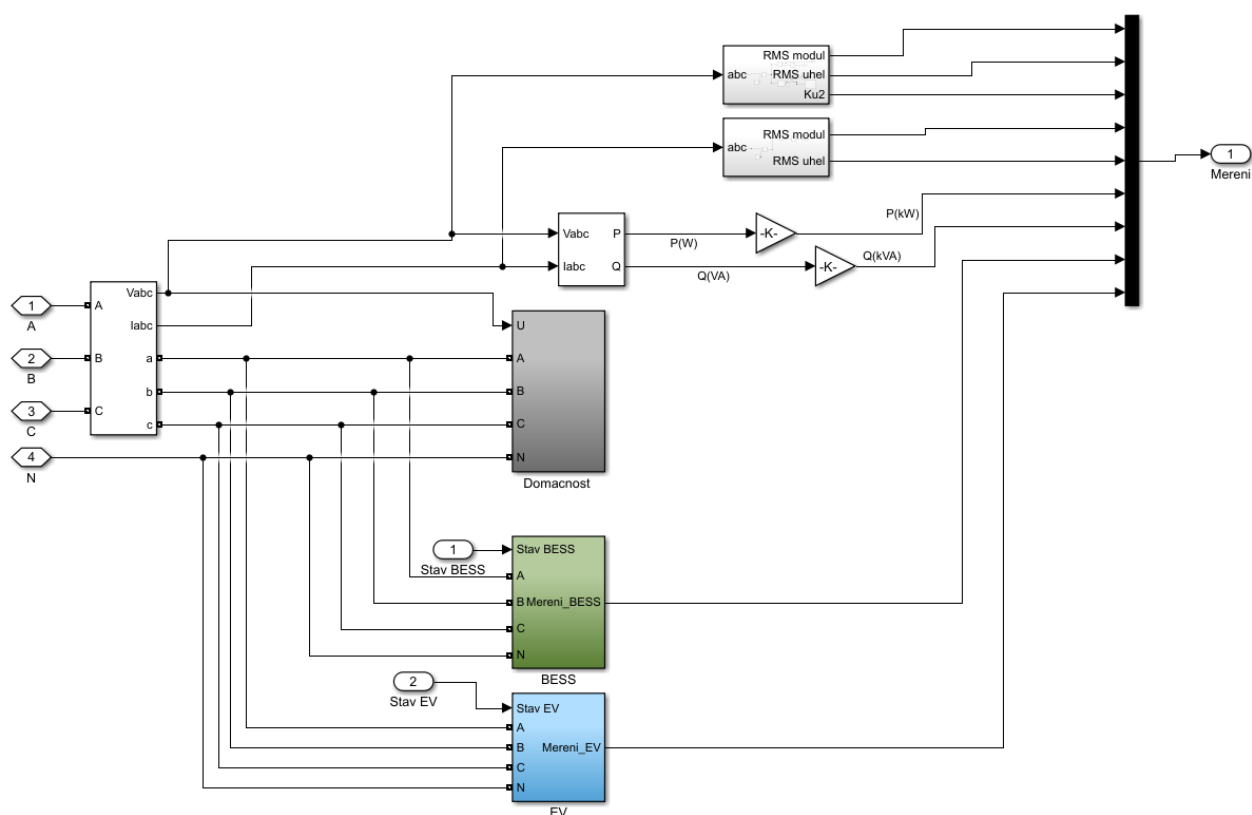
Usek	Typ vedení	Délka (m)	R_L (Ω)	X_L (Ω)	R_N (Ω)	X_N (Ω)
A	AES 4x120 mm ²	173	0,0438	0,0141	0,0438	0,0141
A1	AlFe 3x70+50 mm ²	31	0,0124	0,0086	0,0185	0,0088
A2	AlFe 3x70+50 mm ²	25	0,0100	0,0069	0,0149	0,0071
A3	AlFe 3x70+50 mm ²	23	0,0092	0,0063	0,0137	0,0066
A4	AlFe 3x70+50 mm ²	19	0,0076	0,0052	0,0113	0,0054
AA1	AlFe 4x35 mm ²	27	0,0210	0,0081	0,0210	0,0081
AA2	AlFe 4x35 mm ²	22	0,0171	0,0066	0,0171	0,0066
AA3	AlFe 4x35 mm ²	25	0,0195	0,0075	0,0195	0,0075
AA4	AlFe 4x35 mm ²	22	0,0171	0,0066	0,0171	0,0066
AB1	AlFe 4x25 mm ²	31	0,0374	0,0097	0,0374	0,0097
AB2	AlFe 4x25 mm ²	25	0,0302	0,0078	0,0302	0,0078
AAA1	AlFe 4x25 mm ²	21	0,0253	0,0066	0,0253	0,0066
AAA2	AlFe 4x25 mm ²	16	0,0193	0,0050	0,0193	0,0050
AAB1	AlFe 4x25 mm ²	23	0,0277	0,0072	0,0277	0,0072
AAB2	AlFe 4x25 mm ²	19	0,0229	0,0059	0,0229	0,0059
B1	AlFe 3x50+35 mm ²	31	0,0185	0,0088	0,0241	0,0093
B2	AlFe 3x50+35 mm ²	28	0,0167	0,0080	0,0218	0,0084
B3	AlFe 3x50+35 mm ²	29	0,0173	0,0083	0,0226	0,0087
BA1	AlFe 3x50+35 mm ²	25	0,0149	0,0071	0,0195	0,0075
BA2	AlFe 3x50+35 mm ²	25	0,0149	0,0071	0,0195	0,0075
BA3	AlFe 3x50+35 mm ²	24	0,0143	0,0068	0,0187	0,0072
BA4	AlFe 3x50+35 mm ²	25	0,0149	0,0071	0,0195	0,0075
BB1	AlFe 4x25 mm ²	33	0,0197	0,0094	0,0257	0,0099
BB2	AlFe 4x25 mm ²	21	0,0253	0,0066	0,0253	0,0066
BAA1	AlFe 4x25 mm ²	31	0,0374	0,0097	0,0374	0,0097
BAA2	AlFe 4x25 mm ²	21	0,0253	0,0066	0,0253	0,0066

Usek	Typ vedení	Délka (m)	R_L (Ω)	X_L (Ω)	R_N (Ω)	X_N (Ω)
BAB1	AlFe 4x25 mm ²	31	0,0374	0,0097	0,0374	0,0097
BAB2	AlFe 4x25 mm ²	19	0,0229	0,0059	0,0229	0,0059

V souladu s normou PNE 33 0000-1 [33] bylo provedeno uzemnění nulového vodiče, pro minimálně každých 200 m venkovního vedení. Hodnota odporu jednotlivých uzemňovačů je 15 Ω (maximální přípustná hodnota podle [33]).

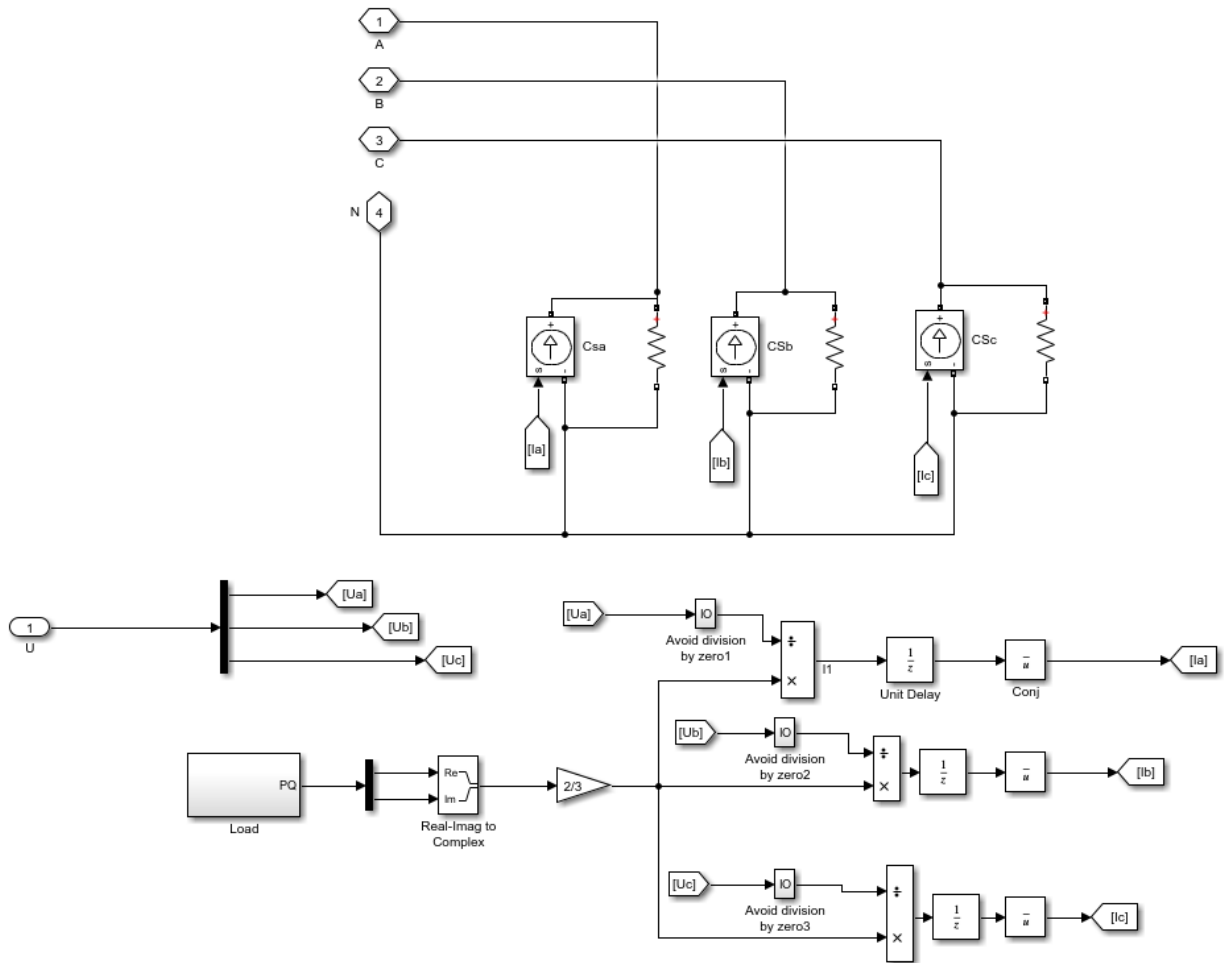
7.1.5 Odběr

Model OPM je znázorněn na Obr. 7-12. Systém měření je udělán podobně systému popsanému v podkapitole 7.1.3, navíc jsou přidány data o SOC a nabíjecích výkonech BESS a EV.

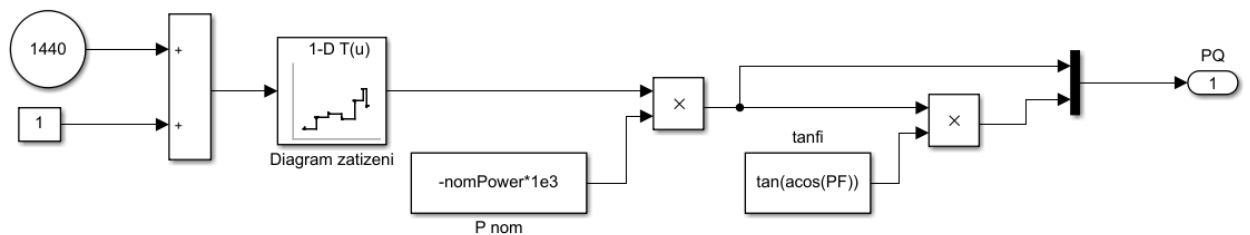


Obr. 7-12 Model OPM

Základní zatížení v OPM tvoří domácnost. Symetrický odběr byl modelován třemi zdroji proudu (Obr. 7-13). Z bloku „Load“ přichází hodnoty trojfázového činného a jalového výkonu, vypočtené z diagramu zatížení pro každý časový krok simulace (Obr. 7-14), dále jsou přepočítány na fázové amplitudové hodnoty proudu násobením koeficientu 2/3, dělením na jednotlivé fázové amplitudové hodnoty napětí a konjugací. Následně jsou tyto hodnoty posílány do zdrojů proudu. Blok „Unit delay“ je vložen pro řešení algebraické smyčky.

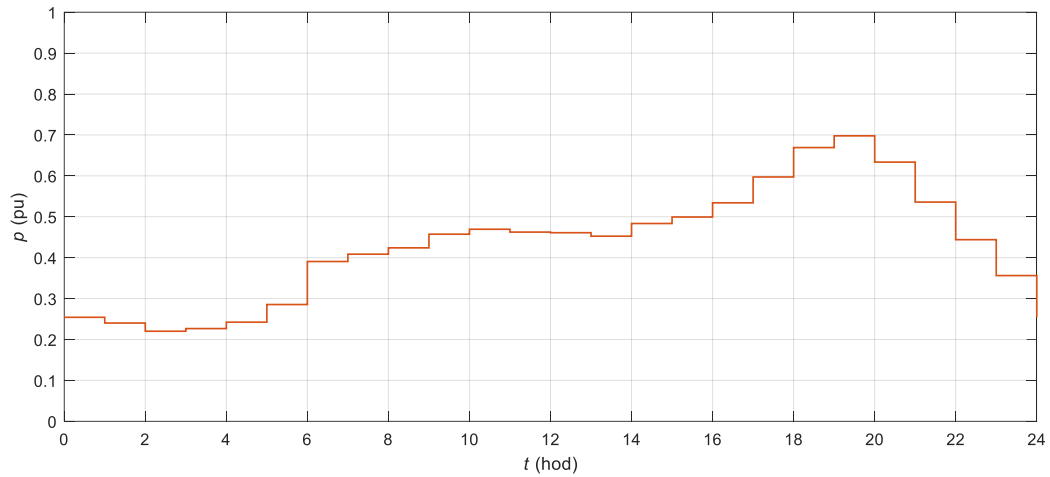


Obr. 7-13 Blok „Domácnost“

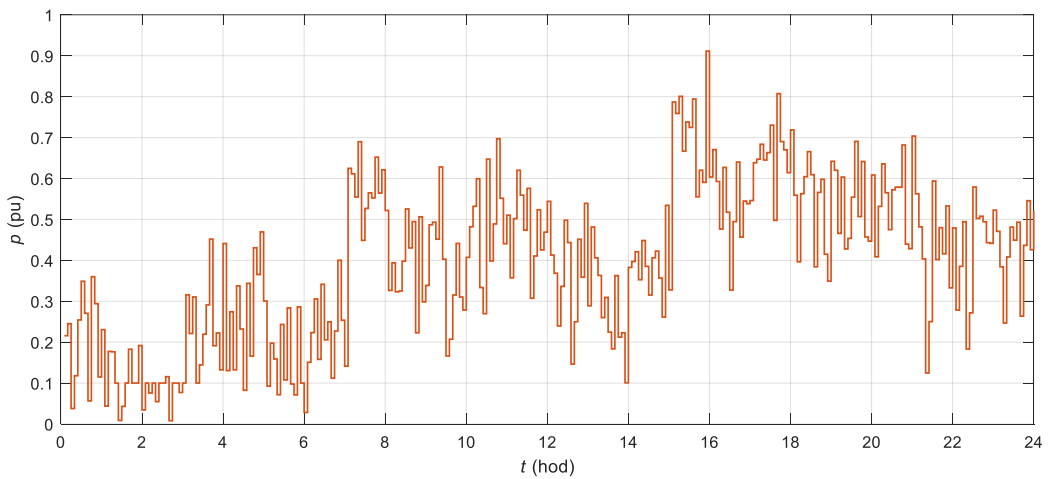


Obr. 7-14 Blok „Load“

Maximální výkon domácností je 17,25 kW a byl vypočten z nominálního napětí 230 V a proudu jističe 25 A. Diagramy zatížení domácností byly vygenerovány s časovým krokem 5 minut z přepočtených typových diagramu dodávky (TDD) elektřiny pro každé OPM pomocí funkce náhodného normálního rozdělení (normrnd) v prostředí MATLAB. TDD elektřiny pro 4. skupinu odběratelů je uveden na Obr. 7-15. Diagram zatížení pro OPM 1 je znázorněn na Obr. 7-16, diagramy zatížení ostatních domácností jsou uvedeny v příloze A.

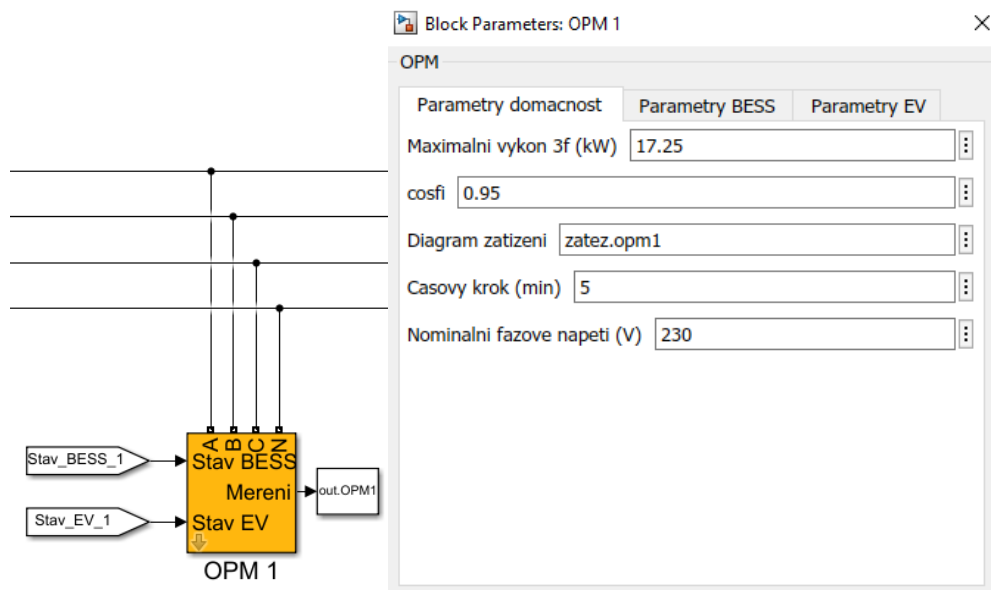


Obr. 7-15 TDD 4 10.03.2021



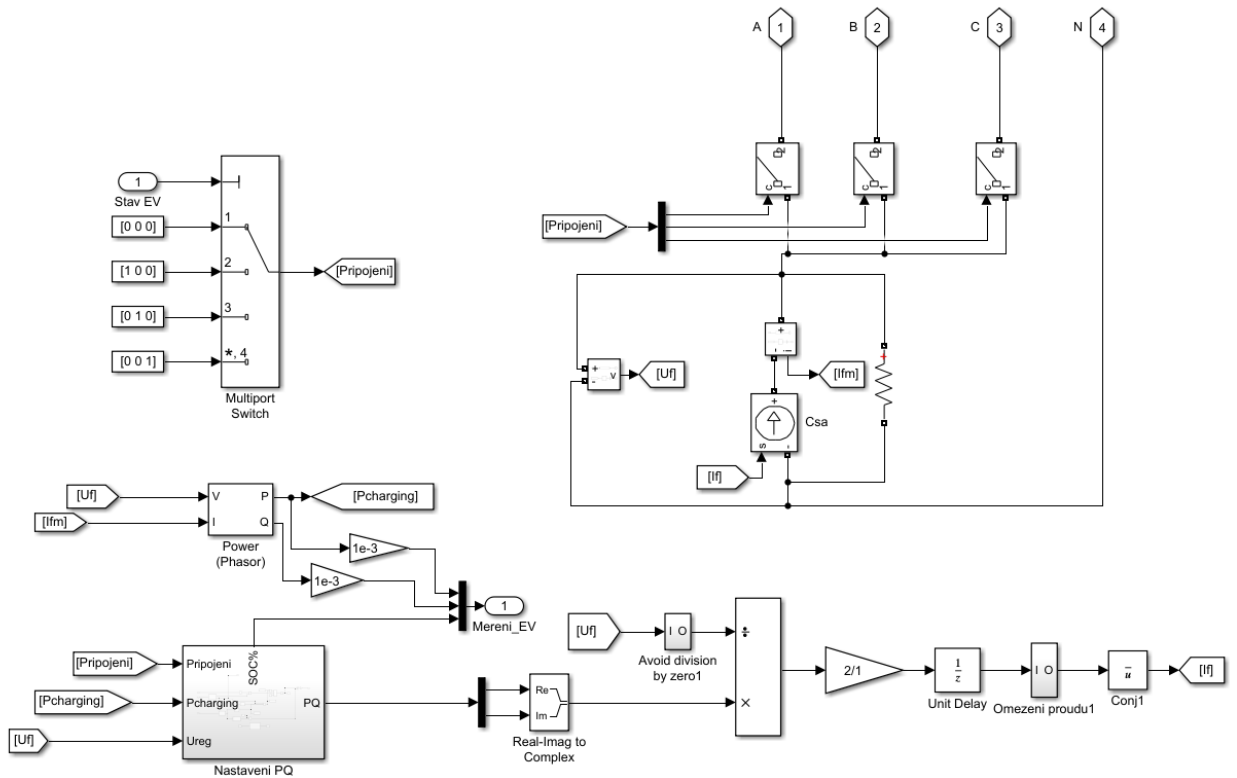
Obr. 7-16 Diagram zatížení domácnosti v OPM 1

Pro nastavení parametrů OPM byla vytvořena maska bloku, která je znázorněna spolu se zobrazením připojení na Obr. 7-17.

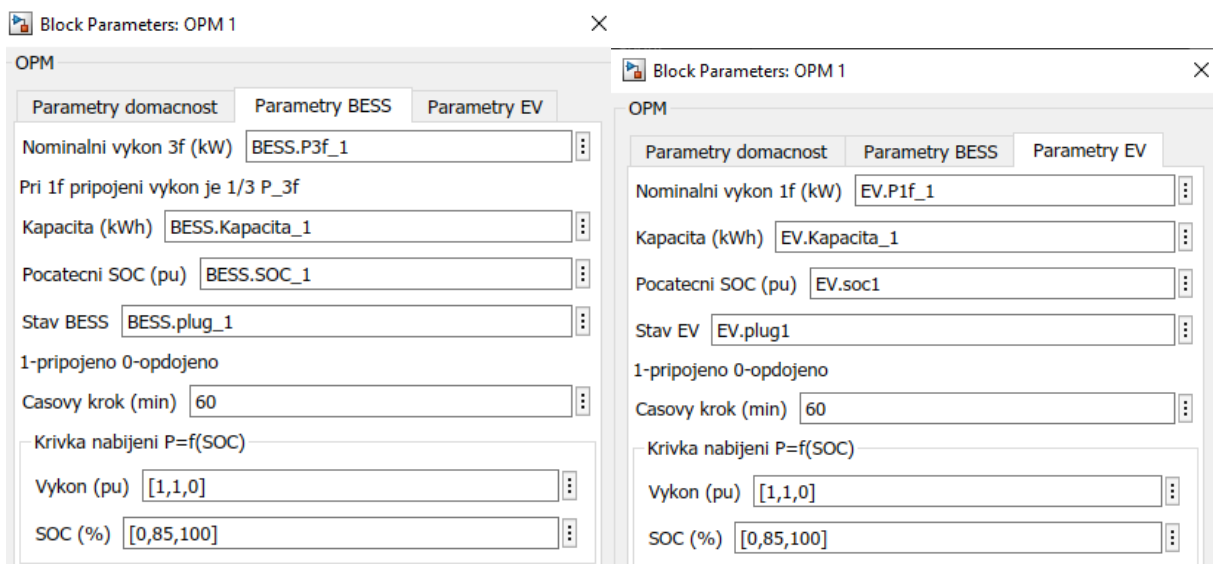


Obr. 7-17 Připojení a maska bloku „OPM“

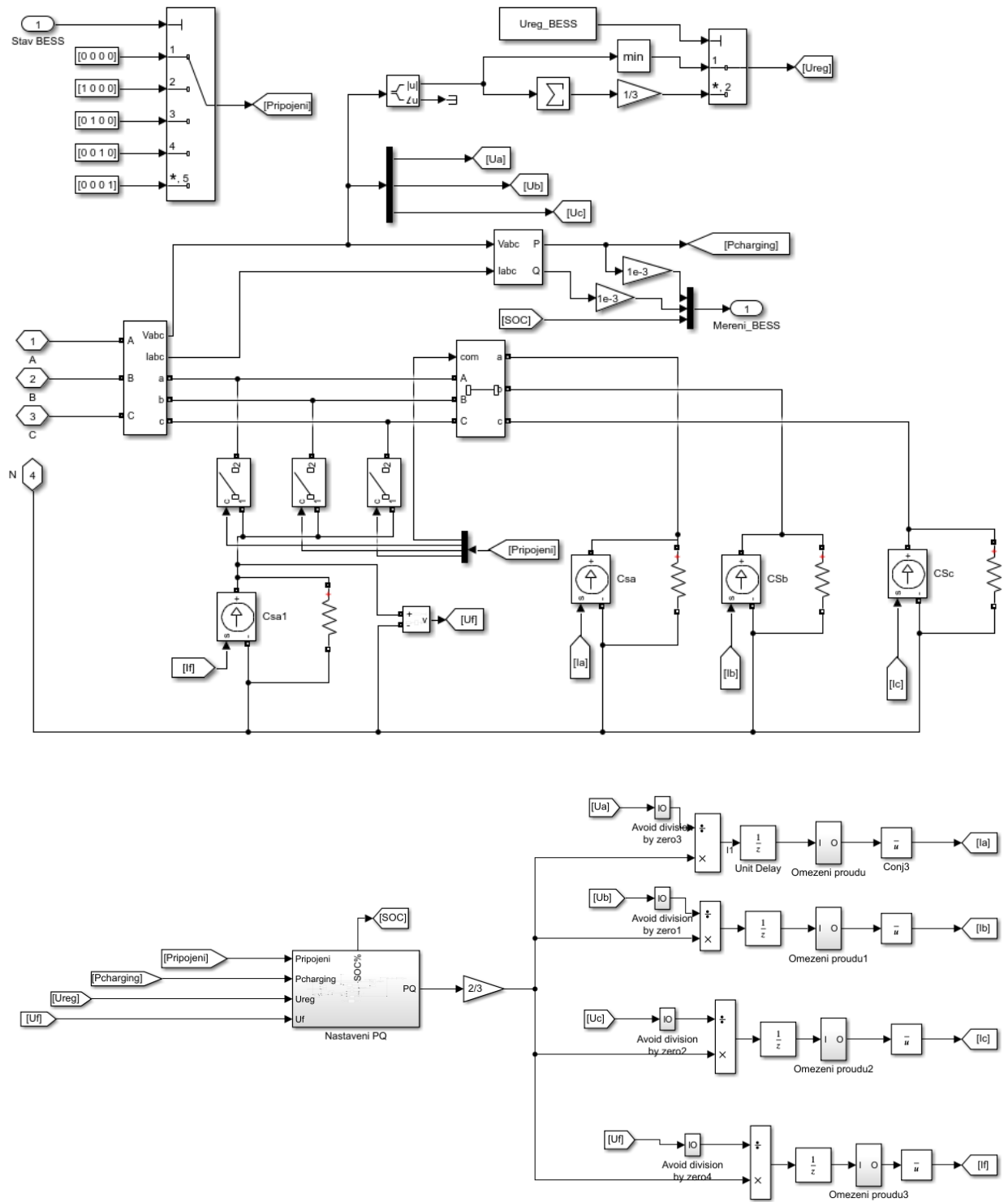
Nabíjení BESS (Obr. 7-18) a EV (Obr. 7-20) s funkcemi podpory sítě je modelováno pomocí zdrojů proudu. Pomocí masky bloku „OPM“ (Obr. 7-19) lze měnit nastavení parametrů EV a BESS. Blok „BESS“ umožňuje trojfázové a jednofázové připojení, zatímco blok EV pouze jednofázové připojení. Výpočet činného a jalového výkonu je prováděn pomocí bloku „Nastavení PQ“ (Obr. 7-21), který bude popsán jen pro EV, jelikož je téměř stejný u BESS a EV.



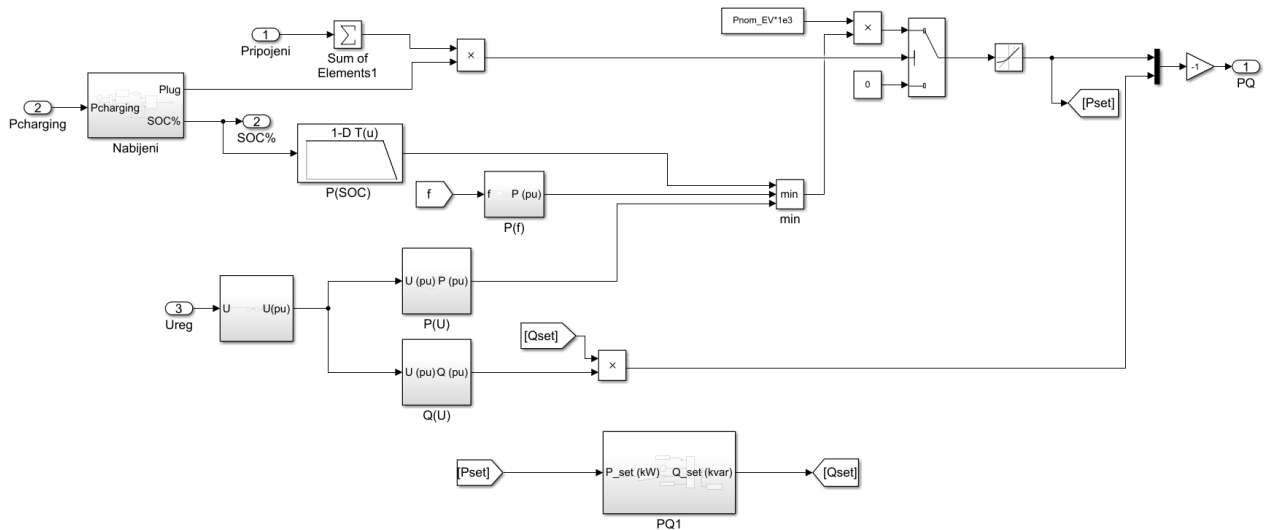
Obr. 7-18 Blok „EV“



Obr. 7-19 Maska bloku „OPM“, záložky BESS a EV

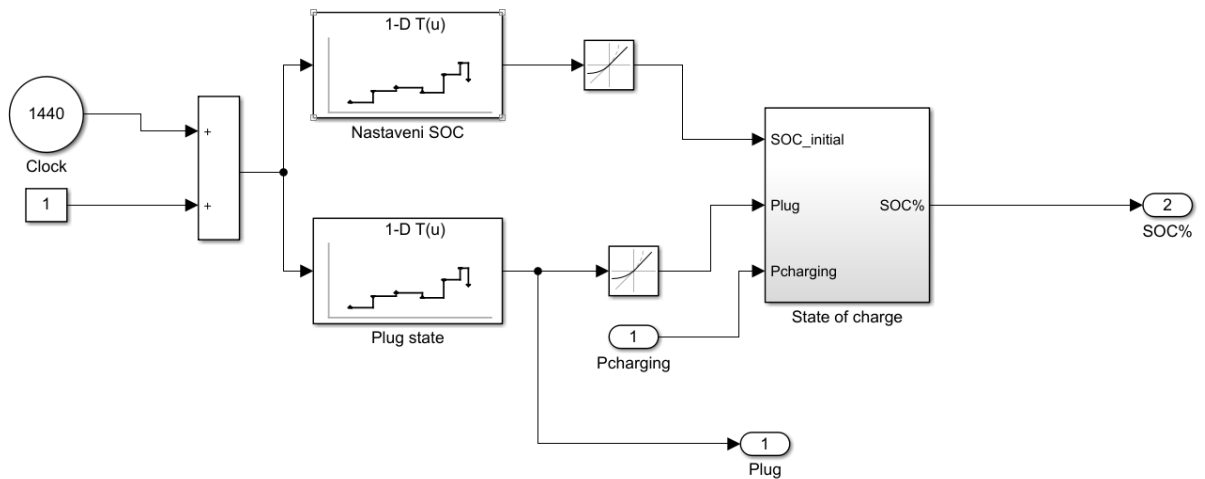


Obr. 7-20 Blok „BESS“



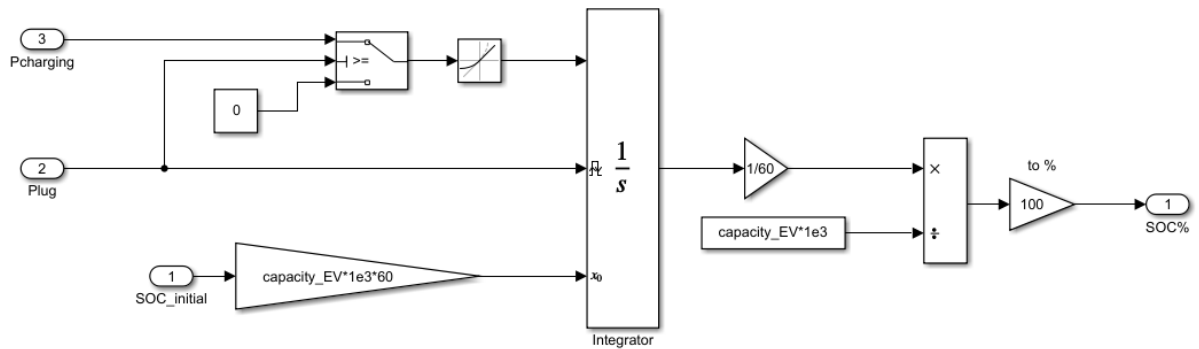
Obr. 7-21 Blok „Nastavení PQ“

Pro simulaci nabíjení baterie byl vytvořen blok „Nabíjení“ (Obr. 7-22). Vstupními hodnotami pro něj jsou činný výkon měřený v místě připojení („Pcharging“), diagram počátečního SOC („Nastavení SOC“) a diagram stavu připojení („Plug state“). Diagram počátečního SOC definuje hodnotu SOC na začátku nabíjení během simulace, hodnoty SOC diagramu jsou zadány v poměrných jednotkách s časovým krokem 60 minut. Diagram stavu připojení určuje, zda je EV připojeno, či nikoliv. Hodnoty diagramu jsou zadány ve tvaru „1“ nebo „0“ („1“ je připojeno, „0“ je odpojeno) s časovým krokem 60 minut. Celkem bylo vytvořeno 14 profilů pro BESS a 14 profilů pro EV, které jsou uvedeny v příloze A.



Obr. 7-22 Blok „Nabíjení“

Následně je pro každý krok simulace pomocí integrátoru v bloku „State of charge“ (Obr. 7-23) vypočítán SOC v procentech. Při změně vstupu „Plug“ z „1“ na „0“ probíhá restart integrátoru.

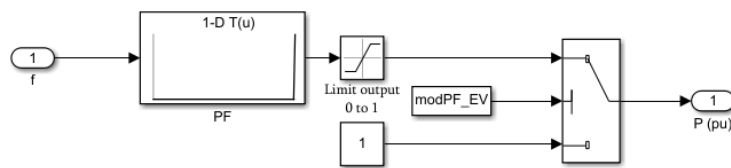


Obr. 7-23 Blok „State of charge“

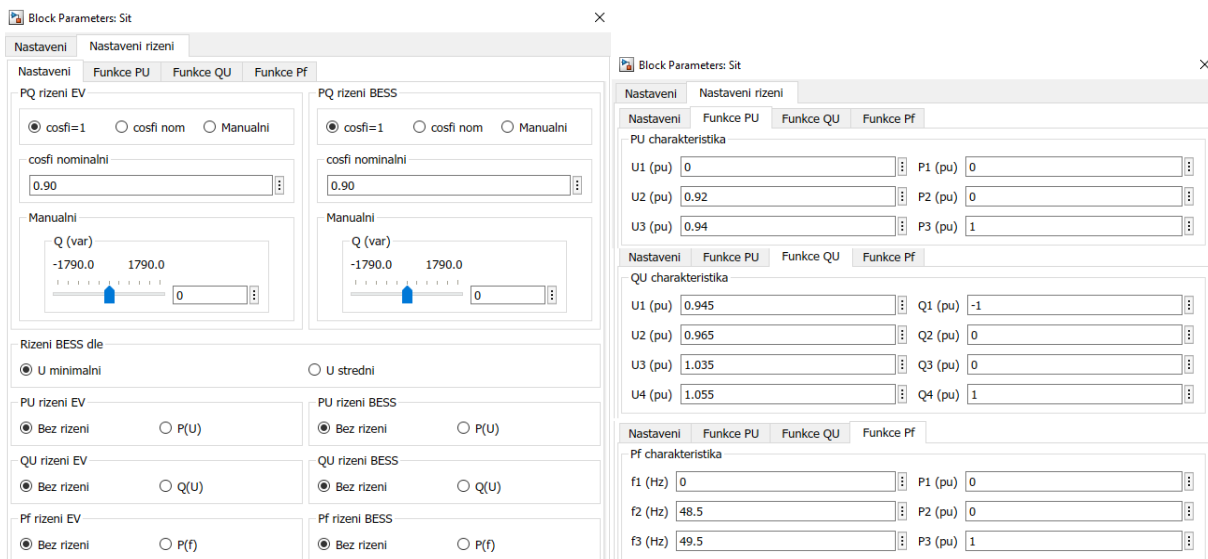
Dále vypočítaná hodnota SOC (Obr. 7-21) přeměňuje podle diagramu („P(SOC)“), odpovídajícího režimu nabíjení CCCV, na žádanou hodnotu výkonu v poměrných jednotkách.

Následně se pomocí standardního bloku „min“ mezi vstupními hodnotami z *Pf* řízení, *PU* řízení a žádanou hodnotou podle CCCV hledá minimální hodnota výkonů. Z této hodnoty jsou pak vypočítány činný výkon v kilowattech, jalový výkon podle PQ charakteristiky a proud pro nastavení proudového zdroje.

Pf řízení je realizováno podle Obr. 7-24. Ze vstupní hodnoty frekvence „*f*“ se podle diagramu („*Pf*“) vypočítá činný výkon v poměrných jednotkách. Řídicí charakteristiky se nastavují pomocí masky bloku „*Sít*“ (Obr. 7-25), také lze řízení podle jednotlivých charakteristik vypnout.

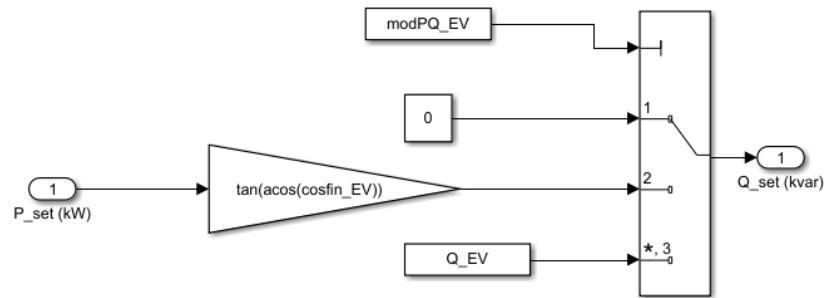


Obr. 7-24 Blok „P(f)“



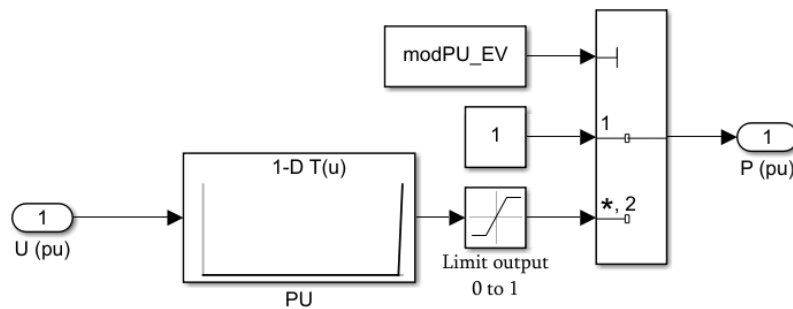
Obr. 7-25 Nastavení řízení pomocí masky bloku „*Sít*“

Pracovní prostor PQ diagramu je nastaven pomocí bloku „PQ1“ (Obr. 7-26). Jsou tři možnosti nastavení: $Q=0$ kvar ($\cos\varphi=1$), prostor omezený účíníkem a manuální nastavení.



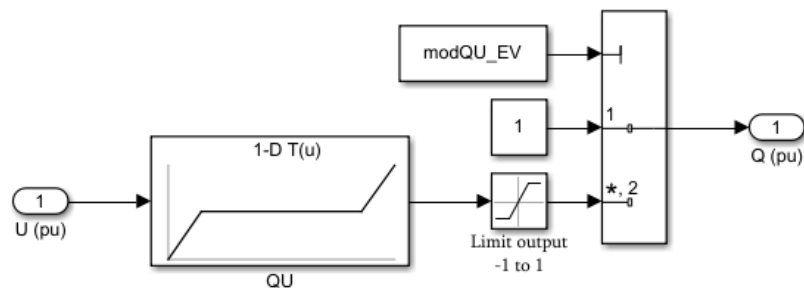
Obr. 7-26 Blok „PQ1“

P(U) řízení je realizováno podle Obr. 7-27. Ze vstupní hodnoty napětí „U(pu)“ se podle diagramu („PU“) vypočítá činný výkon v poměrných jednotkách. Nastavení řídicí charakteristiky se provádí pomocí masky bloku „Sít“ (Obr. 7-25).



Obr. 7-27 Blok „P(U)“

QU řízení je realizováno podle Obr. 7-28. Ze vstupní hodnoty napětí „U(pu)“ se podle diagramu („QU“) vypočítá jalový výkon v poměrných jednotkách.



Obr. 7-28 Blok „Q(U)“

7.2 Popis scénářů

Modelování bylo provedeno pro různé úrovně penetrace EV a BESS. Nominální trojfázový výkon nabíjení všech BESS je 10 kW, kapacita baterie všech BESS je 10 kWh. Nominální jednofázový výkon nabíjení všech EV je 3,68 kW, kapacita baterie všech EV je 40 kWh. Pro každou úroveň penetrace budou realizovány čtyři simulací: bez podpory, bez podpory s omezením nabíjecího proudu 10 A, s funkcí PU, s funkcí PU+QU (PQ prostor je omezen $\cos\varphi=0,9$). Pro poslední scénář bylo provedeno modelování s funkcí PU+Pf. Nastavení jednotlivých charakteristik funkcí je reprezentováno v Tab. 7-3.

Tab. 7-3 Nastavení řídicích charakteristik

Funkce PU		Funkce QU		Funkce Pf	
u (pu)	p (pu)	u (pu)	q (pu)	f (Hz)	p (pu)
0	0	0,93	-1	0	0
0,90	0	0,95	0	48,5	0
0,92	1	1,05	0	49,5	1
-	-	1,07	1	-	-

Parametry scénářů jsou uvedeny v Tab. 7-4. V scénáři 1 je modelováno základní zatížení v OPM bez penetrace EV a BESS. Ve scénářích 2 až 4 EV a BESS jsou připojené v různých kombinacích v koncových bodech sítě. Ve scénářích 5 a 6 je modelováno náhodné rozmístění BESS a EV při různých úrovních penetrace. Pro stanovení úrovně nesymetrie v scénáři 7 EV jsou připojena do fáze B nebo C, ve scénáři 8 EV jsou připojena jen do fáze A. Vysoká úroveň penetrace EV při náhodném rozmístění je modelovaná v scénáři 9.

Tab. 7-4 Parametry scénářů

Scénář	Penetrace BESS	Penetrace BESS (%)	Penetrace EV	Penetrace EV (%)	Řídicí funkce
1	-	0	-	0	Bez podpory
2	-	0	OPM 11 (A) OPM 15 (B) OPM 24 (C) OPM 28 (A)	14,3	Bez podpory Omezení 10 A PU PU+QU
3	-	0	OPM 11 (A) OPM 15 (A) OPM 24 (A) OPM 28 (A)	14,3	Bez podpory Omezení 10 A PU PU+QU
4	OPM 11 (3f) OPM 15 (3f) OPM 24 (3f) OPM 28 (3f)	14,3	-	0	Bez podpory Omezení 10 A PU PU+QU

Scénář	Penetrace BESS	Penetrace BESS (%)	Penetrace EV	Penetrace EV (%)	Řídící funkce
5	OPM 2 (3f) OPM 5 (3f) OPM 6 (3f) OPM 9 (3f) OPM 12 (3f) OPM 18 (3f) OPM 21 (3f) OPM 26 (3f)	28,6	OPM 2 (A) OPM 8 (C) OPM 13 (A) OPM 18 (A) OPM 26 (B)	17,9	Bez podpory Omezení 10 A PU PU+QU
6	OPM 2 (3f) OPM 3 (3f) OPM 8 (3f) OPM 10 (3f) OPM 11 (3f) OPM 15 (3f) OPM 17 (3f) OPM 18 (3f) OPM 20 (3f) OPM 24 (3f)	35,7	OPM 7 (A) OPM 12 (A) OPM 17 (B) OPM 21 (B) OPM 23 (C) OPM 28 (A)	21,4	Bez podpory Omezení 10 A PU PU+QU
7	OPM 1 (3f) OPM 2 (3f) OPM 4 (3f) OPM 9 (3f) OPM 10 (3f) OPM 13 (3f) OPM 15 (3f)	25,0	OPM 1 (C) OPM 5 (B) OPM 12 (C) OPM 16 (C) OPM 18 (B) OPM 19 (C) OPM 20 (B) OPM 26 (C)	28,6	Bez podpory Omezení 10 A PU PU+QU
8	OPM 4 (3f) OPM 12 (3f) OPM 17 (3f)	10,7	OPM 1 (A) OPM 3 (A) OPM 5 (A) OPM 7 (A) OPM 10 (A) OPM 11 (A) OPM 19 (A) OPM 23 (A) OPM 28 (A)	32,1	Bez podpory Omezení 10 A PU PU+QU
9	-	0	OPM 1 (B) OPM 3 (B) OPM 5 (A) OPM 8 (C) OPM 9 (B) OPM 10 (A) OPM 11 (C) OPM 13 (A) OPM 14 (A) OPM 15 (C) OPM 16 (C) OPM 18 (A) OPM 19 (A) OPM 20 (B) OPM 21 (B) OPM 22 (C) OPM 23(A) OPM 24 (B) OPM 25(B) OPM 28 (A)	71,4	Bez podpory Omezení 10 A PU PU+QU PU+Pf

7.3 Výsledky modelování

Testovací síť má paprskové zapojení, proto nejmenší napětí bude v koncových bodech sítě, kterými jsou OPM 11, OPM 15, OPM 24 a OPM 28. Největší nesymetrie bude v místech připojení jednofázové zátěže, proto následující analýza bude provedena pro ně a pro koncové body sítě.

Z hodnot zjištěných během simulace pro následující posouzení podle ČSN EN 50160 byly spočítány průměrné desetiminutové hodnoty napětí a nesymetrie. Dále z hodnot nabíjecích výkonů byla spočítána celková energie dodaná při nabíjení. Pro posouzení možného odpojení jističem v následujících tabulkách jsou uvedeny maximální zaznamenané jednodominutové hodnoty proudu

v jednotlivých fázích. Profily minimálních hodnot napětí a maximálních v testovací síti jsou uvedeny v příloze B.

Tab. 7-5 Výsledky scénáře 1

Scénář	1			
Podpora	Bez podpory			
OPM	11	15	24	28
U_{Amin} (V)	211,89	211,86	210,55	210,38
U_{Bmin} (V)	211,89	211,86	210,55	210,38
U_{Cmin} (V)	211,89	211,86	210,55	210,38
K_{U2max}	0	0	0	0
95% 10 min. hodnot $U \pm 10\%$ od U_{nom}	ano	ano	ano	ano
100% 10 min. hodnot $U +10/-$ 15% od U_{nom}	ano	ano	ano	ano
95% 10 min. hodnot $K_{U2} < 2\%$	ano	ano	ano	ano
I_{Amax} (A)	22,7	23,3	24,7	23,7
I_{Bmax} (A)	22,7	23,3	24,7	23,7
I_{Cmax} (A)	22,7	23,3	24,7	23,7

Z tabulky 7-5 vyplývá, že při základním zatížení se všechny parametry kvality napětí a hodnoty proudu nacházejí v přípustných intervalech.

Tab. 7-6 Výsledky scénáře 2

Scénář	2																
	Bez podpory				Omezení 10 A				PU				PU+QU				
Podpora	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28	
OPM																	
U_{Amin} (V)	206,27	206,96	207,65	207,48	208,39	208,81	208,75	208,58	209,67	209,93	208,87	208,70	209,85	210,11	208,98	208,81	
U_{Bmin} (V)	209,22	208,35	210,07	210,45	210,53	209,97	210,69	211,07	210,99	210,33	210,74	211,06	211,59	210,96	211,14	211,35	
U_{Cmin} (V)	212,50	212,47	211,14	210,97	212,26	212,24	210,91	210,74	212,12	212,09	210,88	210,71	211,84	211,81	210,46	210,29	
K_{U2max}	0,83	0,77	0,83	0,98	0,51	0,48	0,51	0,60	0,80	0,73	0,73	0,89	0,75	0,71	0,67	0,82	
95 % 10 min. hodnot $U_{+/-10}$ % od U_{nom}	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	
100 % 10 min. hodnot $U_{+10/-15}$ % od U_{nom}	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	
95 % 10 min. hodnot $K_{U2} < 2$ %	ano																
I_{Amax} (A)	38,8	23,8	25,0	38,0	32,7	23,6	24,9	31,7	35,3	23,5	24,8	34,4	33,9	23,5	24,8	34,0	
I_{Bmax} (A)	23,1	39,4	24,9	23,6	23,0	33,3	24,8	23,6	23,0	36,9	24,8	23,6	22,9	36,1	24,8	23,6	
I_{Cmax} (A)	22,5	23,1	26,9	23,9	22,6	23,2	26,0	24,0	22,6	23,3	26,9	23,9	22,6	23,3	26,4	23,9	
SOC při odpojení BESS (%)	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
SOC při odjezdu EV (%)	1	99,7	92,5	99,7	74,0	99,6	78,6	98,5	54,2	99,7	92,5	99,7	74,0	99,7	92,5	99,7	74,0
	2	95,8	92,9	-	83,9	78,6	86,0	-	65,3	88,3	91,1	-	80,0	88,8	91,6	-	78,7
	3	-	97,3	-	51,6	-	95,2	-	42,2	-	96,8	-	49,0	-	96,9	-	49,5
Celková energie dodaná při nabíjení (kWh)	138,2				102,6				131,7				131,9				

Tab. 7-7 Výsledky scénáře 3

Scénář	3															
	Bez podpory				Omezení 10 A				PU				PU+QU			
Podpora	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28
OPM																
U_{Amin} (V)	202,33	202,04	205,65	205,07	206,43	206,18	207,97	208,31	209,54	209,19	208,86	208,69	209,78	209,43	208,98	208,81
U_{Bmin} (V)	213,17	213,14	211,83	211,66	212,69	212,66	211,35	211,18	212,40	212,37	211,23	211,06	212,65	212,62	211,51	211,35
U_{Cmin} (V)	212,50	212,47	211,14	210,97	212,26	212,24	210,91	210,74	212,12	212,09	210,88	210,71	211,84	211,81	210,46	210,29
KU_{max}	1,59	1,61	1,27	1,32	0,98	0,99	0,82	0,82	1,25	1,28	1,27	1,27	1,19	1,20	1,25	1,25
95 % 10 min. hodnot $U \pm 10$ % od U_{nom}	ne (A)	ne (A)	ano	ne (A)	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
100 % 10 min. hodnot $U \pm 10$ / - 15 % od U_{nom}	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
95 % 10 min. hodnot $K_{U2} < 2$ %	ano															
I_{Amax} (A)	39,5	40,2	27,5	38,3	33,1	33,8	26,0	32,0	33,4	35,8	27,2	33,9	33,8	33,5	26,7	32,6
I_{Bmax} (A)	22,5	23,0	24,4	23,6	22,6	23,2	24,5	23,6	22,7	23,3	24,7	23,6	22,6	23,3	24,6	23,6
I_{Cmax} (A)	22,6	23,2	24,5	23,6	22,7	23,2	24,6	23,6	22,7	23,3	24,7	23,6	22,8	23,3	24,7	23,6
SOC při odpojení BESS (%)	1	100	-	100	100	-	-	100	100	-	-	100	100	-	-	100
	2	-	-	100	-	-	-	100	-	-	-	48,6	-	-	-	49
SOC při odjezdu EV (%)	1	99,7	91,9	99,7	99,6	77,9	98,4	53,6	99,7	91,9	99,7	72,6	99,7	91,7	99,6	72,2
	2	95,6	92,8	-	83,6	85,8	-	65,0	78,9	86,9	-	77,6	83,5	87,8	-	77,3
	3	-	97,2	-	51,4	-	-	42,1	-	93,9	-	47,8	-	95,1	-	48,3
Celková energie dodaná při nabíjení (kWh)	137				101,4				122,9				125,3			

Tab. 7-8 Výsledky scénáře 4

Scénář	4																							
	Bez podpory						Omezení 10 A						PU						PU+QU					
	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28				
Podpora																								
OPM	210,69	210,59	203,97	203,59	211,29	211,36	206,35	206,22	211,87	211,84	208,38	208,25	211,88	211,86	208,59	208,45	211,88	211,86	208,59	208,45				
U_{Amin} (V)	210,69	210,59	203,97	203,60	211,29	211,36	206,35	206,23	211,87	211,84	208,38	208,25	211,88	211,86	208,59	208,45	211,88	211,86	208,59	208,45				
U_{Bmin} (V)	210,69	210,59	203,97	203,60	211,29	211,36	206,35	206,23	211,87	211,84	208,38	208,25	211,88	211,86	208,59	208,45	211,88	211,86	208,59	208,45				
U_{Cmin} (V)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
KU_{max}	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano				
95 % 10 min. hodnot U +/-10 % od U_{nom}	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano				
100 % 10 min. hodnot U +10/-15 % od U_{nom}	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano				
95 % 10 min. hodnot $K_{U2} < 2$ %	ano																							
I_{Amax} (A)	22,8	27,4	33,9	36,5	22,7	23,3	27,9	31,8	22,7	27,4	25,7	28,0	22,7	27,4	28,8	28,5	22,7	27,4	28,8	28,5				
I_{Bmax} (A)	22,8	27,4	33,9	36,5	22,7	23,3	27,9	31,8	22,7	27,4	25,7	28,0	22,7	27,4	28,8	28,5	22,7	27,4	28,8	28,5				
I_{Cmax} (A)	22,8	27,4	33,9	36,5	22,7	23,3	27,9	31,8	22,7	27,4	25,7	28,0	22,7	27,4	28,8	28,5	22,7	27,4	28,8	28,5				
SOC při odpojení BESS (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100				
SOC při odjezdu EV (%)	-	-	-	100	-	-	-	100	-	-	-	100	-	-	-	100	-	-	-	100				
Celková energie dodaná při nabíjení (kWh)	32,7						32,6						32,7						32,7					

Připojení EV v koncových bodech sítě (*scénář 2*) způsobilo pokles napětí a zvýšení nesymetrie. Avšak požadavky normy ČSN EN 50160 na velikost napětí byly splněny. V OPM 11 a OPM 15 ve fázi došlo k poklesu napětí pod hodnotu 207 V ve 2 ze 144 případech. Hodnoty nesymetrie se také nacházejí v povolených intervalech. Avšak maximální zaznamenávaná desetiminutová hodnota nesymetrie je 0,98 % (OPM 28). Další problém může způsobit odpojení odběratele při překročení nominální hodnoty proudu jističe. Podle normy ČSN EN 60898-1 [34] při nadproudu $1,45 I_{nom}$ (36,25 A pro $I_{nom}=25$ A) tepelná spoušť jističe musí vypnout obvod za dobu menší než 1 hodina a při nadproudu $2,55 I_{nom}$ (63,75 A pro $I_{nom}=25$ A) čas vypnutí se nachází v intervalu od 1 do 60 sekund [34]. Při omezení proudu nabíjení 10 A všechny desetiminutové hodnoty napětí byly vyšší než $0,9U_{nom}$. Avšak došlo ke snížení dodané energie při nabíjení o 35,6 kWh. Hodnoty nesymetrie také klesly do 0,6 % v případě OPM 28. Při aplikaci podpory PU všechny desetiminutové hodnoty napětí byly vyšší než $0,9U_{nom}$, ale narozdíl od 10 A omezení celková dodaná energie při nabíjení klesla jen o 6,5 kWh. Došlo také ke zlepšení z hlediska nesymetrie. Při aplikaci podpory PU a QU podpory vzrostla dodaná energie při nabíjení oproti PU podpoře o 0,2 kWh, také stouply hodnoty napětí a klesla nesymetrie.

Při připojení EV na jednu fázi v koncových bodech sítě (*scénář 3*) došlo k poklesu napětí a zvýšení nesymetrie. Pro fáze A došlo k poklesu napětí pod hodnotu 207 V v OPM 11 (v 16 ze 144 případech), OPM 15 (v 16/144), OPM 28 (v 9/144) a nebyl splněn požadavek normy podle velikosti napětí. V OPM 24 ve fázi A došlo k poklesu napětí pod hodnotu 207 V (v 5/144), avšak požadavky normy byly splněny. Hodnoty nesymetrie se nacházejí v povolených intervalech. Avšak maximální zaznamenaná desetiminutová hodnota nesymetrie je 1,61 % (OPM 15), což při základním nesymetrickém zatížení může vést k překročení hodnoty 2 %. Při omezení proudu nabíjení na 10 A napětí ve fázi A v OPM 11, 15 (1/144) kleslo pod $0,9U_{nom}$, avšak požadavek byl splněn. Také došlo ke snížení energie dodané při nabíjení o 35,6 kWh. Hodnoty nesymetrie klesly do 0,99 % v případě OPM 15. Při aplikaci podpory PU všechny desetiminutové hodnoty napětí byly vyšší než $0,9U_{nom}$. Celková energie dodaná při nabíjení klesla o 14,1 kWh oproti simulaci bez podpory. Maximální zaznamenaná desetiminutová hodnota nesymetrie je 1,28 % (OPM 15). Při aplikaci podpory PU a QU podpory energie dodaná při nabíjení klesla o 11,7 kWh oproti simulaci bez podpory, nesymetrie klesla do 1,19 % (OPM 15). Ve všech případech ve fázi A došlo k překročení jmenovitého proudu jističe.

Připojení BESS v koncových bodech sítě (*scénář 4*) způsobilo pokles. Požadavky normy ČSN EN 50160 na velikost napětí byly splněny. V OPM 24 a OPM 28 ve všech fázích došlo k poklesu napětí v některých desetiminutových intervalech (2/144) pod hodnotu 207 V. Maximální zaznamenaná jednodeminutová hodnota proudu je 36,5 A (OPM 28). Při omezení proudu nabíjení na 10 A v OPM 24 a OPM 28 ve všech fázích došlo k poklesu napětí v některých desetiminutových intervalech (2/144) pod hodnotu 207 V. Maximální zaznamenaná jednodeminutová hodnota proudu je 31,8 A (OPM 28). Při aplikaci podpory PU a PU+QU všechny desetiminutové hodnoty napětí byly vyšší než $0,9U_{nom}$. Maximální zaznamenaná jednodeminutová hodnota proudu nepřekročila 28,8 A.

Tab. 7-9 Výsledky scénáře 5

Scénář	5															
	Bez podpory				Omezení 10 A				PU				PU+QU			
Podpora	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28
OPM	206,90	206,87	207,15	207,01	208,78	208,75	208,40	208,78	207,06	207,03	207,15	207,01	207,73	207,70	207,41	207,77
U_{Amin} (V)	208,88	208,77	205,50	205,34	210,42	210,32	208,16	207,95	209,18	209,07	206,58	206,42	209,78	209,67	207,21	207,05
U_{Bmin} (V)	210,65	210,48	210,14	209,98	212,56	212,39	210,92	210,76	210,91	210,74	209,95	209,78	211,82	211,65	210,68	210,52
U_{Cmin} (V)	0,59	0,59	0,58	0,58	0,37	0,37	0,38	0,38	0,58	0,59	0,58	0,58	0,54	0,55	0,54	0,54
K_{U2max}	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
95 % 10 min. hodnot $U_{+/-10}$ % od U_{nom}	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
100 % 10 min. hodnot $U_{+10/-15}$ % od U_{nom}	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
95 % 10 min. hodnot $K_{U2} < 2$ %	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
I_{Amax} (A)	23,2	23,9	25,3	23,6	23,1	23,7	25,1	23,7	23,2	23,9	25,3	23,6	23,2	23,8	25,2	23,6
I_{Bmax} (A)	23,1	23,4	24,9	23,6	22,9	23,4	24,8	23,6	23,0	23,4	24,9	23,6	23,0	23,3	24,8	23,6
I_{Cmax} (A)	22,7	23,1	24,5	23,9	22,6	23,2	24,6	23,8	22,8	23,1	24,5	23,9	22,7	23,2	24,6	23,9
SOC při odpojení BESS (%)	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOC při odjezdu EV (%)	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOC při odjezdu EV (%)	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Celková energie dodaná při nabíjení (kWh)	262,5				213,7				261,9				262,4			

Tab. 7-10 Výsledky scénáře 6

Scénář	6																							
	Bez podpory						Omezení 10 A						PU						PU+QU					
	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28				
Podpora																								
OPM	202,52	202,83	202,68	202,53	205,78	206,12	204,70	205,15	206,66	206,73	206,55	206,39	207,25	207,20	206,70	206,44	207,25	207,20	206,70	206,44				
U_{Amin} (V)	207,85	208,16	204,86	204,72	209,30	209,64	205,86	206,32	210,06	210,00	208,51	208,46	210,81	210,75	209,28	209,23	210,06	210,00	208,51	208,46				
U_{Bmin} (V)	210,21	210,52	208,60	208,47	211,12	211,46	208,75	209,21	211,80	211,87	211,53	211,41	211,37	211,43	211,14	211,02	211,80	211,87	211,53	211,41				
U_{Cmin} (V)	0,80	0,80	0,85	0,95	0,53	0,53	0,53	0,59	0,79	0,79	0,81	0,88	0,75	0,75	0,84	0,95	0,79	0,79	0,81	0,88				
KU_{2max}	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano				
95 % 10 min. hodnot $U_{+/-10}$ % od U_{nom}	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano				
100 % 10 min. hodnot $U_{+10/-15}$ % od U_{nom}	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano				
95 % 10 min. hodnot $K_{17} < \zeta$ %	ano																							
I_{Amax} (A)	23,7	27,5	34,0	37,9	23,3	23,5	28,2	31,7	23,3	27,5	29,4	34,3	23,2	27,5	30,8	33,9	23,3	27,5	29,4	34,3				
I_{Bmax} (A)	23,1	27,3	33,8	23,7	22,9	23,4	28,1	23,7	22,9	27,3	29,1	23,7	22,9	27,3	30,4	23,7	22,9	27,3	29,1	23,7				
I_{Cmax} (A)	22,8	27,4	33,3	23,7	22,7	23,3	27,8	23,7	22,6	27,4	28,9	23,7	22,6	27,4	30,3	23,7	22,6	27,4	28,9	23,7				
SOC při odpojení BESS (%)	1	100	100	-	100	100	100	-	100	100	99,6	-	100	100	100	-	100	100	100	100				
SOC při odjezdu EV (%)	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Celková energie dodaná při nabití (kWh)	310,2						245,8						306,2						306,5					

Tab. 7-11 Výsledky scénáře 7

Scénář	7																											
	Bez podpory								Omezení 10 A								PU								PU+QU			
	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28				
Podpora																												
OPM	213,22	213,17	213,88	213,50	212,84	212,97	212,35	212,18	213,22	213,17	213,33	213,16	213,22	213,17	213,17	213,63	213,22	213,17	213,17	213,63	213,22	213,17	213,17	213,63				
U_{Amin} (V)	205,32	205,44	204,30	204,12	207,85	207,82	206,69	206,72	205,88	205,91	205,89	205,71	206,06	206,09	205,72	205,91	206,06	206,09	205,72	205,91	206,06	206,09	205,72	205,91				
U_{Bmin} (V)	203,16	203,46	202,25	201,88	206,59	206,93	205,18	205,00	206,37	206,40	204,22	204,36	207,86	207,69	205,21	205,03	207,86	207,69	205,21	205,03	207,86	207,69	205,21	205,03				
U_{Cmin} (V)	1,06	1,06	1,28	1,27	0,68	0,68	0,86	0,86	0,98	0,98	1,20	1,19	0,89	0,89	1,13	1,12	0,89	0,89	1,13	1,12	0,89	0,89	1,13	1,12				
K_{U2max}	ne (C)	ne (C)	ne (B,C)	ne (B,C)	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano				
95 % 10 min. hodnot U +/- 10 % od U_{nom}																												
100 % 10 min. hodnot U +/- 15 % od U_{nom}																												
95 % 10 min. hodnot $K_{U2} < 2\%$																												
I_{Amax} (A)	22,5	27,6	24,2	23,7	22,5	23,0	24,3	23,6	22,3	27,6	24,3	23,7	22,3	26,7	24,2	23,7	22,3	26,7	24,2	23,7	22,3	26,7	24,2	23,7				
I_{Bmax} (A)	23,4	27,8	25,3	23,7	23,2	23,8	25,3	23,7	23,2	27,8	25,4	23,8	23,2	26,8	25,4	23,8	23,3	26,8	25,4	23,8	23,3	26,8	25,4	23,8				
I_{Cmax} (A)	23,7	28,2	25,9	23,8	23,2	23,9	25,4	23,8	23,6	28,2	25,5	23,8	23,4	27,0	25,4	23,7	23,4	27,0	25,4	23,7	23,4	27,0	25,4	23,7				
SOC při odpojení BESS (%)	1	100	-	-	-	100	-	-	-	100	-	-	-	100	-	-	-	100	-	-	-	100	-	-				
SOC při odjezdu EV (%)	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Celková energie dodaná při nabíjení (kWh)	326,3								264,3								323,7								324			

V scénáři 5 při náhodné penetraci BESS (28,6 %) a EV (17,9 %) v některých desetiminutových intervalech (1 až 3/144) došlo k poklesu napětí pod hodnotu 207 V. Požadavky normy ČSN EN 50160 na velikost napětí byly splněny. Maximální hodnota nesymetrie je 0,68 % (OPM 13). Při omezení proudu nabíjení 10 A všechny desetiminutové hodnoty napětí byly vyšší než $0,9U_{nom}$ a došlo ke snížení dodané energie při nabíjení o 48,8 kWh. Hodnoty nesymetrie klesly do 0,42 % v případě OPM 13. Při aplikaci podpory PU došlo k poklesu napětí (fáze B OPM 24, 28) v jednom desetiminutovém intervalu pod hodnotu 207 V. Nesymetrie klesla na úroveň 0,67 % (OPM 13). Při aplikaci podpory PU a QU podpory všechny desetiminutové hodnoty napětí byly vyšší než $0,9U_{nom}$. Při PU a PU+QU podpoře se energie dodaná při nabíjení téměř nezměnila oproti simulaci bez podpory, zatímco při 10 A omezení energie klesla o 48,8 kWh.

Ve scénáři 6 při náhodné penetraci BESS (35,7 %) a EV (21,4 %) v některých desetiminutových intervalech (3 až /144) došlo k poklesu napětí pod hodnotu 207 V. Požadavky normy ČSN 50160 na velikost napětí nebyly splněny pro fáze A v OPM 28. Maximální hodnota nesymetrie je 0,95 % (OPM 28). Při omezení proudu nabíjení na 10 A v některých desetiminutových intervalech (2 až 4/144) také došlo k poklesu napětí pod hodnotu $0,9U_{nom}$, ale požadavky na velikost napětí byly splněny. Došlo ke snížení dodané energie při nabíjení o 64,4 kWh. Hodnoty nesymetrie klesly do 0,59 % v případě OPM 28. Při aplikaci podpory PU došlo k poklesu napětí ve fázi A v některých desetiminutových intervalech (3 až 4/144) pod hodnotu 207 V, ale jen o 0,61 V. Při aplikaci podpory PU a QU také došlo k poklesu napětí ve fázi A (OPM 24,28), v některých intervalech (3 až 4/144) pod hodnotu $0,9U_{nom}$. Při PU a PU+QU podpoře energie dodaná při nabíjení byla 306,2 kWh (PU) a 306,5 kWh (PU+QU), což je poklesem oproti simulaci bez podpory o 4 kWh. Zatímco při 10 A omezení energie klesla o 64,4 kWh.

Ve scénáři 7 při náhodné penetraci BESS (25 %) a penetraci EV do fázi B a C (28,6 %) nebyly splněny požadavky na velikost napětí v OPM 24, 28 (fáze B a C) a v OPM 24, 28 (fáze C). Maximální hodnota nesymetrie je 1,28 % (OPM 24). Při omezení proudu nabíjení na 10 A v některých desetiminutových intervalech (2 až 7/144) také došlo k poklesu napětí pod hodnotu $0,9U_{nom}$, ale požadavky na velikost napětí byly splněny. Energie dodaná při nabíjení klesla o 64 kWh. Hodnoty nesymetrie klesly do 0,86 % v případě OPM 24. Při aplikaci podpory PU a PU+QU nebyly splněny požadavky na velikost napětí v OPM 24, 28 (fáze B a C). To je spojeno s tím, že při vysoké penetraci BESS a EV zařízení připojené v OPM na začátku vývodu fungují bez omezení, jelikož v těchto OPM napětí neklesá pod hranici aktivace podpory. Tim pádem BESS a EV v těchto OPM vyvolávají ubytky napětí na vedení, jejich vliv se následně projevuje v koncových bodech paprskové sítě. Proto je nutné posunout nastavení řídicích charakteristik. Pro tento a následující scénáře bude použito nastavení podle Tab. 7-12. Výsledky scénáře 7 po úpravě řídicích charakteristik jsou uvedeny v Tab. 7-13.

Tab. 7-12 Nastavení řídicích charakteristik

Funkce PU		Funkce QU		Funkce Pf	
u (pu)	p (pu)	u (pu)	q (pu)	f (Hz)	p (pu)
0	0	0,945	-1	0	0
0,92	0	0,965	0	48,5	0
0,94	1	1,035	0	49,5	1
-	-	1,055	1	-	-

Tab. 7-13 Výsledky scénáře 7 po úpravě řídicích charakteristik

Scénář	7								
Podpora	PU				PU+QU				
OPM	11	15	24	28	11	15	24	28	
U_{Amin} (V)	213,22	213,17	212,51	212,34	213,22	213,17	212,74	212,57	
U_{Bmin} (V)	207,57	207,54	207,27	207,66	207,62	207,59	207,30	207,69	
U_{Cmin} (V)	208,17	208,10	206,64	206,82	208,90	208,71	207,09	207,23	
K_{U2max}	0,85	0,85	1,06	1,06	0,80	0,80	1,02	1,01	
95 % 10 min. hodnot U +/- 10 % od U_{nom}	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	
100 % 10 min. hodnot U +10/-15 % od U_{nom}	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	
95 % 10 min. hodnot $K_{U2} < 2$ %	ano				ano				
I_{Amax} (A)	22,4	26,1	24,4	23,7	22,4	26,2	24,4	23,7	
I_{Bmax} (A)	23,2	26,3	25,2	23,7	23,2	26,3	25,2	23,7	
I_{Cmax} (A)	23,3	26,5	25,2	23,7	23,3	26,5	25,2	23,7	
SOC při odpojení BESS (%)	1	-	100	-	-	-	100	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-
SOC při odjezdu EV (%)	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
Celková energie dodaná při nabíjení (kWh)	306,5				309,5				

Při aplikaci podpory PU došlo k poklesu napětí v OPM 24,28 (fáze C) v 1 ze 144 desítiminutovém intervalu pod hodnotu $0,9U_{nom}$. Při PU a PU+QU podpoře energie dodaná při nabíjení byla 306,5 kWh (PU) a 309,5 kWh (PU+QU), což je poklesem oproti simulaci bez podpory o 19,8 kWh a 16,8 kWh. Zatímco při 10 A omezení energie klesla o 64 kWh. Nesymetrie také mírně klesla o 0,22 %.

Tab. 7-14 Výsledky scénáře 8

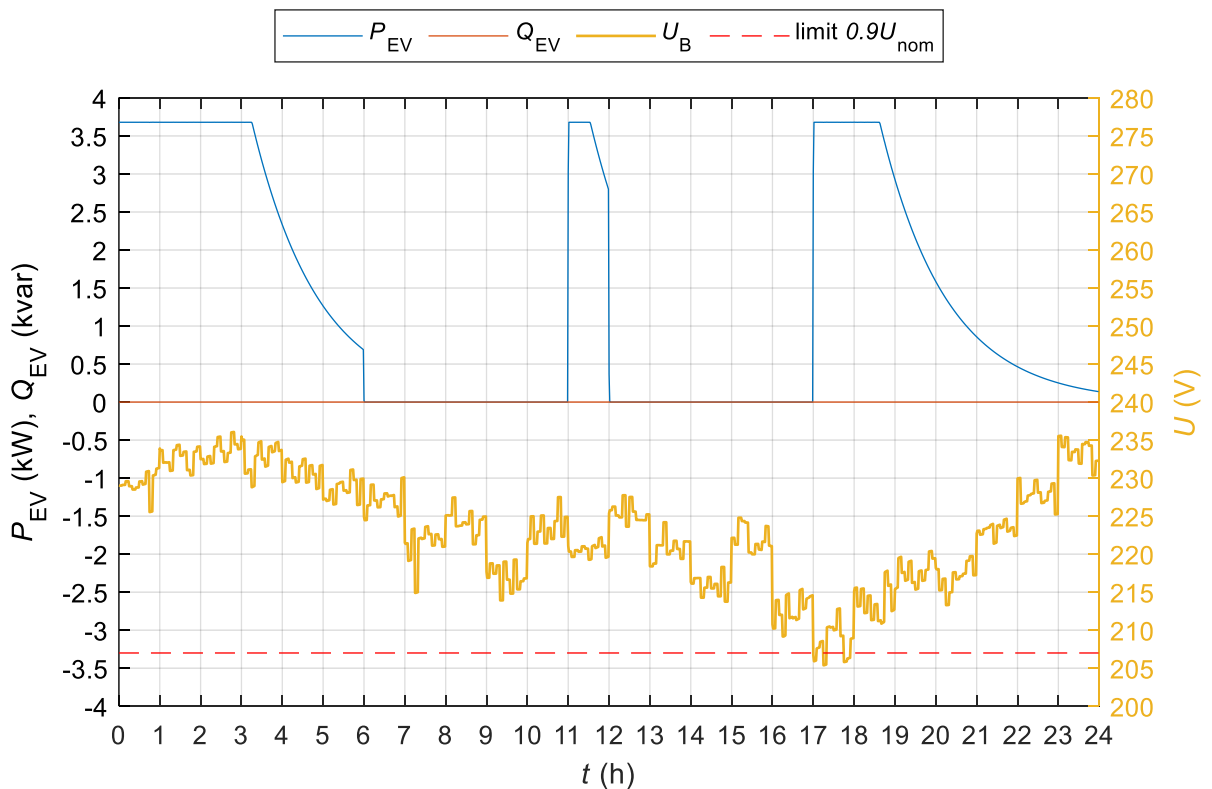
Scénář	8																								
	Podpora	Bez podpory						Omezení 10 A						PU						PU+QU					
		11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28				
OPM	197,32	197,91	198,83	198,66	202,42	202,84	203,29	203,11	207,25	207,22	206,38	206,38	207,75	207,72	206,73	206,65	213,87	213,81	212,51	212,35					
U_{Amin} (V)	215,21	215,05	214,38	214,21	214,48	214,42	213,23	213,06	213,43	213,40	212,01	211,84	213,87	213,81	212,51	212,35	211,86	211,83	210,62	210,45					
U_{Bmin} (V)	213,71	213,68	212,53	212,36	213,23	213,20	211,88	211,71	212,64	212,61	211,24	211,07	211,86	211,83	210,62	210,45	211,86	211,83	210,62	210,45					
U_{Cmin} (V)	2,08	1,96	2,00	2,16	1,29	1,22	1,26	1,35	1,31	1,23	1,39	1,43	1,34	1,25	1,34	1,39	1,34	1,25	1,34	1,39					
KU_{Umax}	ne (A)	ne (A)	ne (A)	ne (A)	ne (A)	ne (A)	ne (A)	ne (A)	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano					
95 % 10 min. hodnot U +/- 10 % od U_{nom}	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano					
100 % 10 min. hodnot U +10/-15 % od U_{nom}	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano					
95 % 10 min. hodnot $KU_2 < 2$ %	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano					
I_{Amax} (A)	40,0	24,9	26,2	39,1	33,3	24,3	25,6	32,4	26,8	23,9	25,3	32,0	27,1	23,9	25,2	31,4	23,9	23,1	24,5	23,6					
I_{Bmax} (A)	22,4	22,9	24,3	23,6	22,5	23,1	24,4	23,5	22,5	23,2	24,5	23,6	22,5	23,2	24,5	23,6	22,7	23,3	24,7	23,6					
I_{Cmax} (A)	22,5	23,1	24,5	23,6	22,6	23,2	24,6	23,6	22,6	23,2	24,6	23,6	22,7	23,2	24,7	23,6	22,7	23,3	24,7	23,6					
SOC při odpojení BESS (%)	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
SOC při odjezdu EV (%)	1	99,7	-	72,0	99,6	-	-	53,2	99,7	-	-	69,7	99,7	-	-	70,1	-	-	-	-					
	2	94,9	-	83,1	77,1	-	-	64,9	43,8	-	-	58,0	44,7	-	-	61,7	-	-	-	-					
	3	-	-	50,3	-	-	-	41,7	-	-	-	31,6	-	-	-	33,0	-	-	-	-					
Celková energie dodaná při nabíjení (kWh)	291,3						223,5						238,6						243,6						

Tab. 7-15 Výsledky scénáře 9

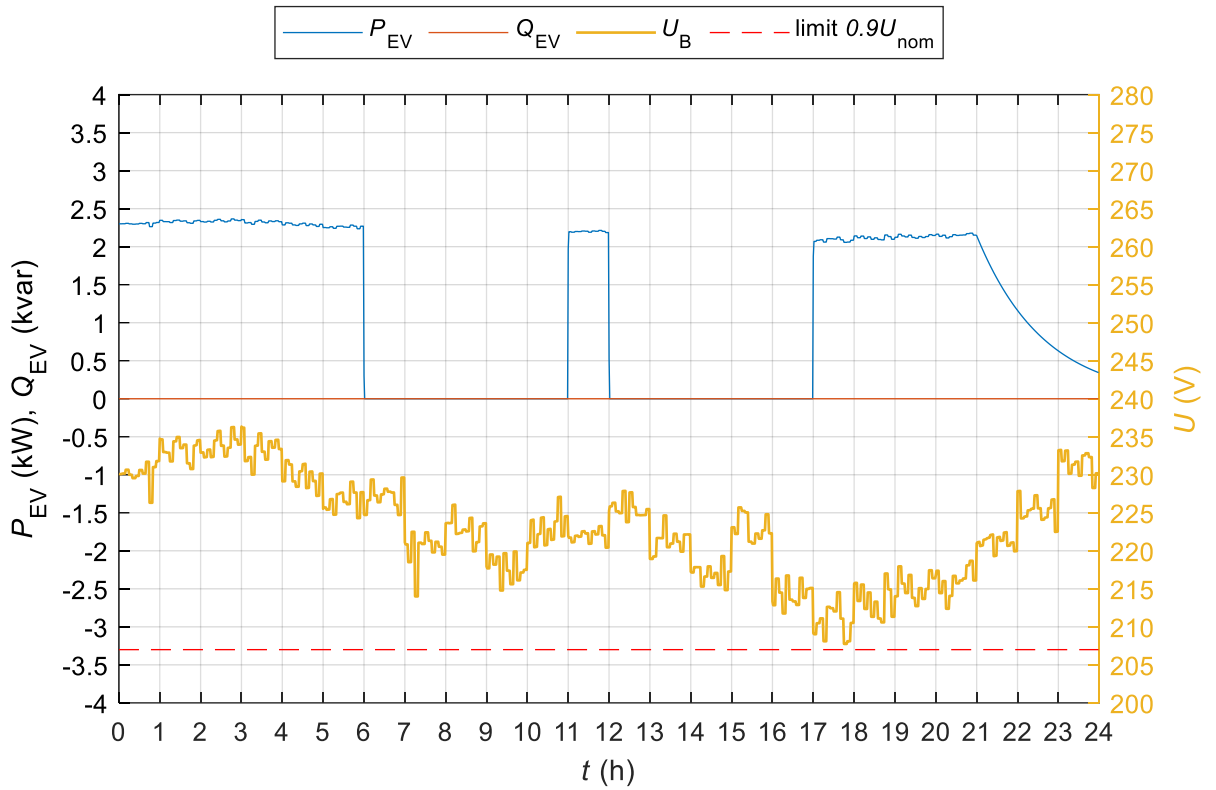
Scénář	9																							
	Bez podpory						Omezení 10 A						PU						PU+QU					
	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28	11	15	24	28				
Podpora																								
OPM	203,37	203,34	203,26	203,07	206,87	206,84	206,78	206,77	206,60	206,58	206,06	206,44	206,90	206,87	206,58	206,97	206,90	206,87	206,58	206,97				
U_{Amin} (V)	207,75	207,65	201,85	201,71	209,15	209,23	204,55	204,37	210,54	210,48	208,66	208,63	210,69	210,63	208,88	208,71	210,69	210,63	208,88	208,71				
U_{Bmin} (V)	206,41	206,12	209,35	209,74	209,36	209,12	210,91	210,96	212,14	211,98	211,15	210,98	212,56	212,39	211,29	211,12	212,56	212,39	211,29	211,12				
U_{Cmin} (V)	1,38	1,43	1,15	1,30	0,79	0,82	0,72	0,71	1,08	1,13	0,89	1,02	1,23	1,29	0,88	1,01	1,23	1,29	0,88	1,01				
KU_{max}	ne (A)	ne (A)	ne (A)	ne (A)	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano				
95 % 10 min. hodnot $U_{+/-10}$ % od U_{nom}	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano				
100 % 10 min. hodnot $U_{+10/-15}$ % od U_{nom}	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano				
95 % 10 min. hodnot $K_{U2} < \%$	ano						ano						ano											
I_{Amax} (A)	23,5	24,2	25,7	38,4	23,2	23,9	25,3	32,1	23,4	23,9	25,3	33,1	23,4	23,9	25,3	31,4	23,4	23,9	25,3	31,4				
I_{Bmax} (A)	23,1	23,4	26,3	23,7	22,9	23,5	26,1	23,9	23,0	23,5	26,4	23,7	22,9	23,5	25,9	23,8	22,9	23,5	25,9	23,8				
I_{Cmax} (A)	39,0	39,7	25,0	24,2	32,8	33,4	24,8	24,1	31,4	35,3	24,5	24,3	30,8	33,1	24,5	24,1	30,8	33,1	24,5	24,1				
SOC při odpojení BESS (%)	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
SOC při odjezdu EV (%)	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
3	99,7	91,9	99,7	72,7	99,6	78,0	98,5	53,5	99,7	91,3	99,6	72,5	99,7	91,3	99,6	71,8	99,7	91,3	99,6	71,8				
	95,8	93,0	-	83,6	78,4	86,0	-	65,2	69,3	84,9	-	66,8	69,8	84,7	-	67,5	69,8	84,7	-	67,5				
	-	97,2	-	50,9	-	95,0	-	42,0	-	91,5	-	36,6	-	91,6	-	39,4	-	91,6	-	39,4				
Celková energie dodaná při nabíjení (kWh)	634,4						478						575,3						581,1					

Při náhodné penetraci BESS (10,7 %) a náhodném připojení EV (32,1 %) na jednu fázi (*scénář 8*) došlo k poklesu napětí a zvýšení nesymetrie. Hodnoty nesymetrie v OPM 11, 24, 27, 28 překročily hranici 2 %, ale požadavek normy byl splněn. Pro fáze A v OPM 11, 15, 24, 28 nebyl splněn požadavek normy podle velikosti napětí ani při omezení proudu nabíjení na 10 A. Při aplikaci podpory PU a QU podpory požadavek normy byl splněn, k poklesu napětí pod 207 V došlo jen v jednom desetiminutovém intervalu (OPM 24, 28 fáze A). Maximální hodnoty nesymetrie klesly pod úroveň 1,43 %. Celková energie dodaná při nabíjení klesla o 52,7 kWh (PU) a o 47,7 kWh (PU+QU) oproti simulaci bez podpory

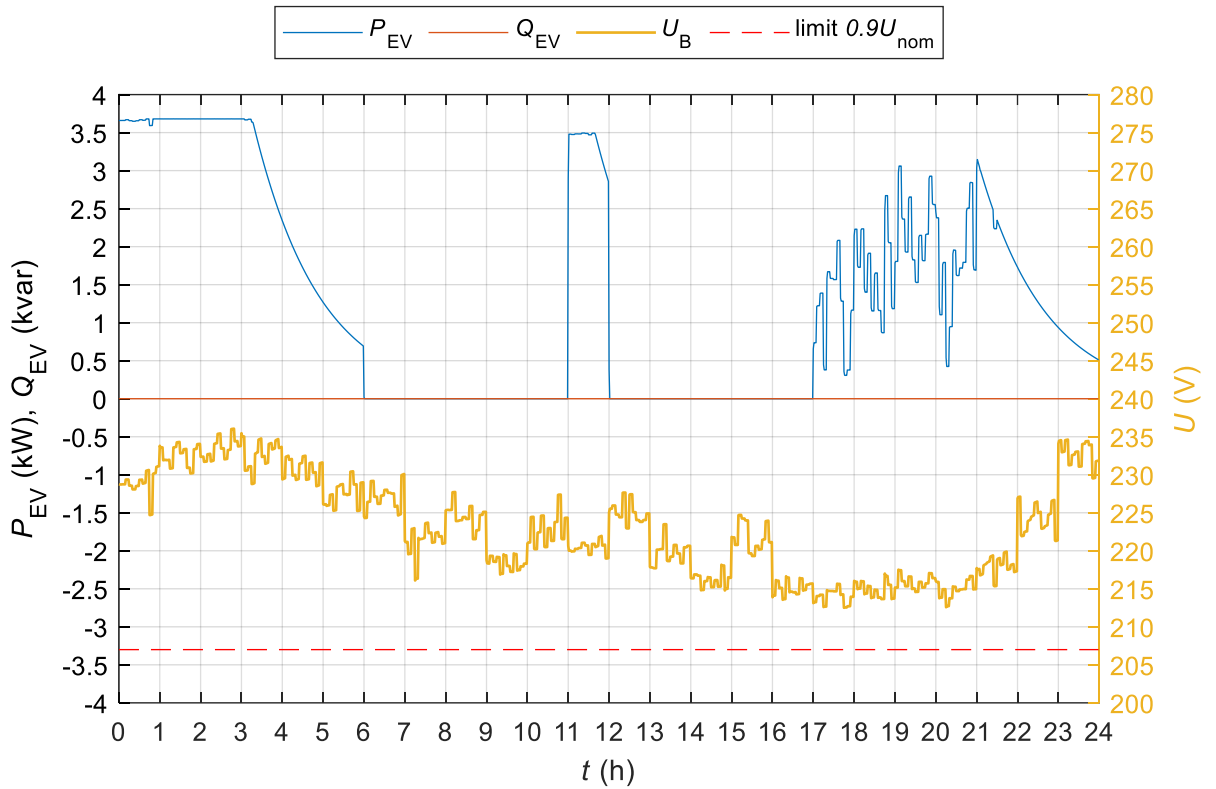
Při vysoké náhodné penetraci EV 71,4 % (*scénář 9*) došlo k poklesu napětí a zvýšení nesymetrie. Pro fáze A v OPM 11, 15, 24 a 28 nebyl splněn požadavek normy podle velikosti napětí. Hodnoty nesymetrie se nacházejí v povolených intervalech, avšak maximální zaznamenávaná desítiminutová hodnota nesymetrie je 1,43 % (OPM 15), což při základním nesymetrickém zatížení může vést k překročení hodnoty 2 %. Při omezení proudu nabíjení na 10 A napětí v fázi A (OPM 11, 15, 24, 28) a fázi B (OPM 24, 28) kleslo pod $0,9U_{nom}$, avšak požadavek normy byl splněn. Také došlo ke snížení energie dodané při nabíjení o 156,4 kWh. Hodnoty nesymetrie klesly do 0,82 % v případě OPM 15. Při aplikaci podpory PU a PU+QU napětí v fázi A (OPM 11, 15, 24, 28) v 1 z 144 desetiminutovém intervalu kleslo pod $0,9U_{nom}$. Celková energie dodaná při nabíjení klesla o 59,9 kWh (PU) a o 53,39 kWh (PU+QU) oproti simulaci bez podpory. Také došlo ke zlepšení z hlediska nesymetrie. Pro tento scénář bylo provedeno ověření podpory při poklesu frekvence, poskytnutý výkon celé testovací sítě byl vypočítán odečítáním od výkonu při PU podpoře výkonu při PU+Pf podpoře a je znázorněn na *Obr. 7-33*. Příklady profilů napětí a výkonu v OPM 20 pro scénář 9 při podpoře sítě řízením výkonu měniče a bez ní- jsou znázorněny na *Obr 7-29 – 7-32*.



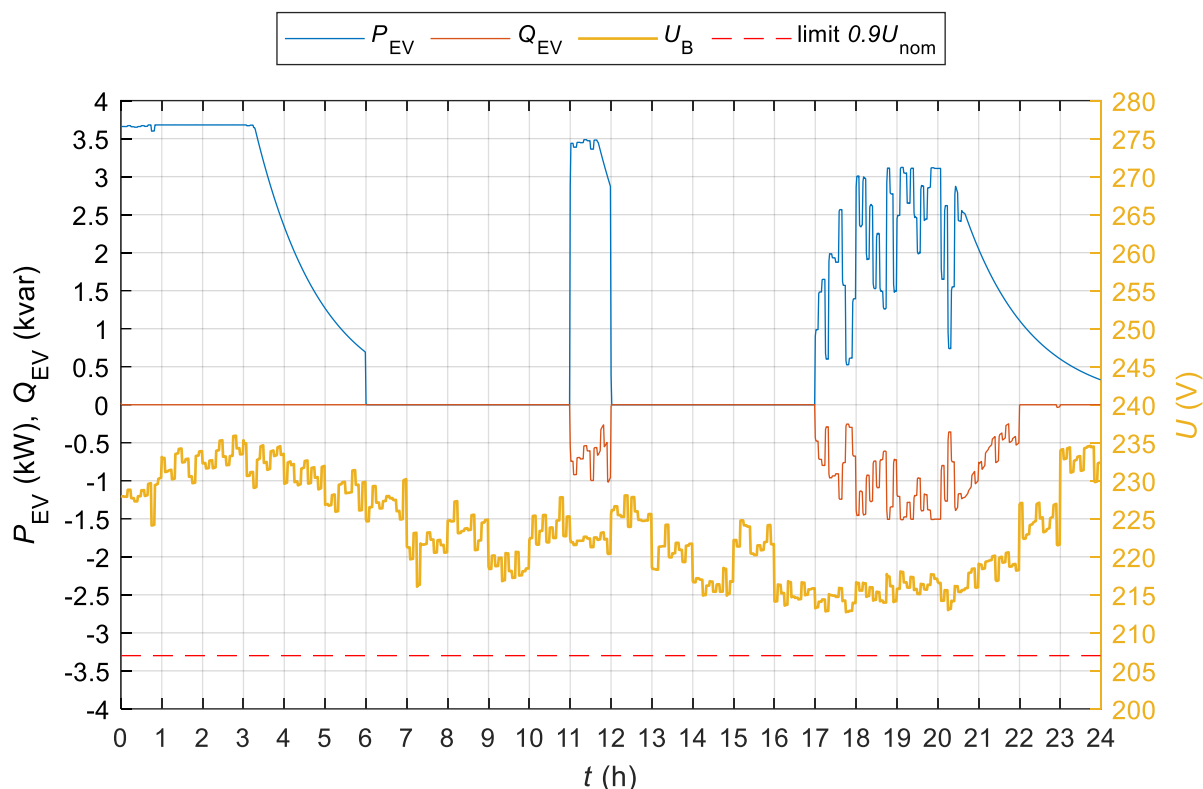
Obr. 7-29 Profil výkonu EV a napětí v OPM 20 pro scénář 9 bez podpory



Obr. 7-30 Profil výkonu EV a napětí v OPM 20 pro scénář 9 omezení 10 A

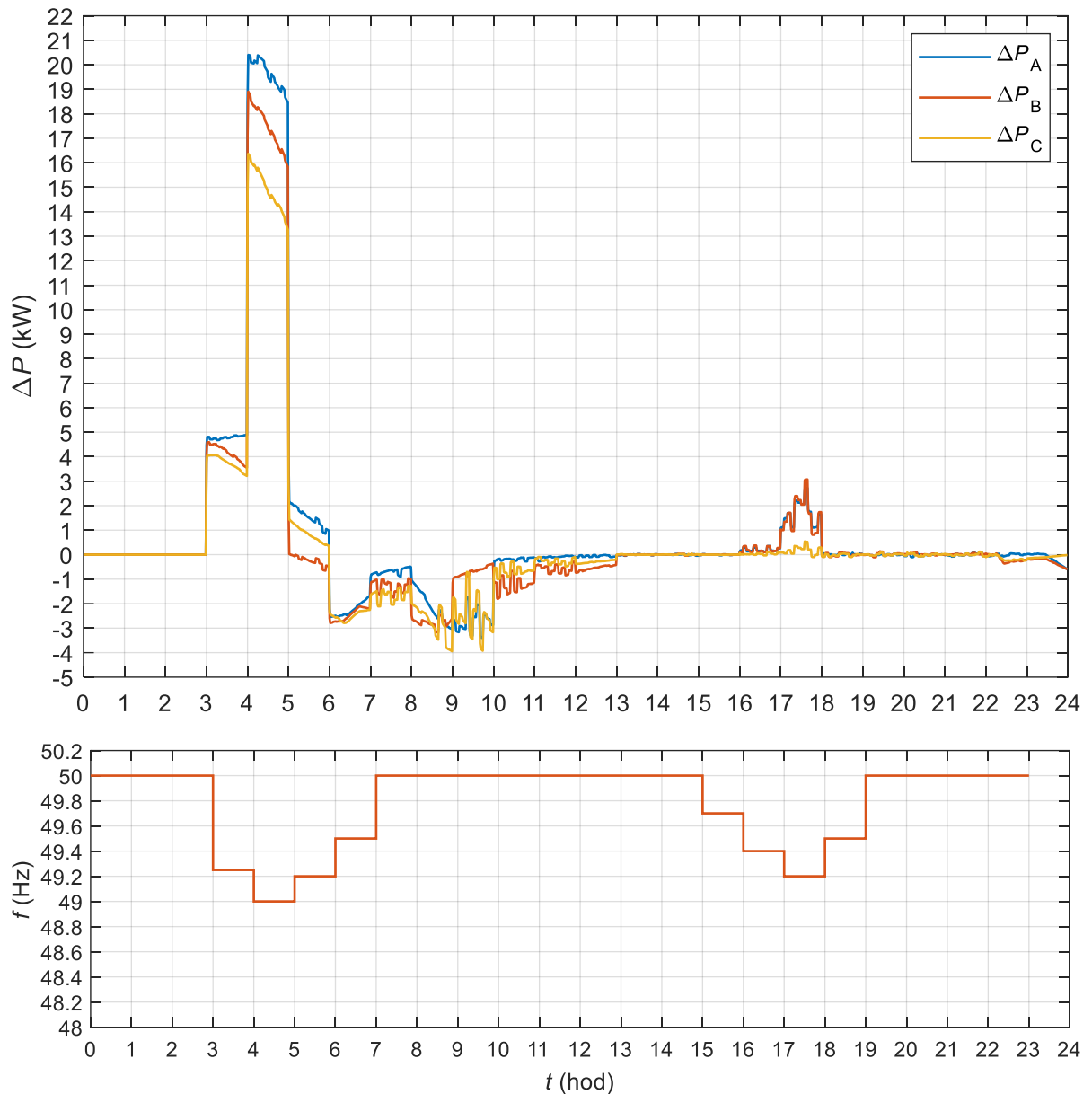


Obr. 7-31 Profil výkonu EV a napětí v OPM 20 pro scénář 9 s PU podporou



Obr. 7-32 Profil výkonu EV a napětí v OPM 20 pro scénář 9 s PU a QU podporou

V případě simulaci bez podpory (Obr. 7-29) od 17. do 18. hodiny došlo k poklesu napětí pod limitní hodnotu 207 V. Při omezení nabíjecího proudu na 10 A (Obr. 7-30) se napětí nacházelo nad limitní hodnotou, avšak konstantní limitace proudu nedává možnost spotřebovat energii v časový intervaly, v kterých je napětí relativně vysoké, především v noci. Při použití PU a PU+QU podpory se napětí také nacházelo nad limitní hodnotou 207 V, nicméně nedošlo ke snížení spotřeby energie EV v časový intervaly s vysokou úrovní napětí, což je jasné vidět na Obr. 7-31 a Obr. 7-32. Aktivace QU podpory umožnilo zvětšit spotřebu činného výkonu oproti použití pouze PU podpory, což potvrzuje správné nastavení a působení funkce podpory.



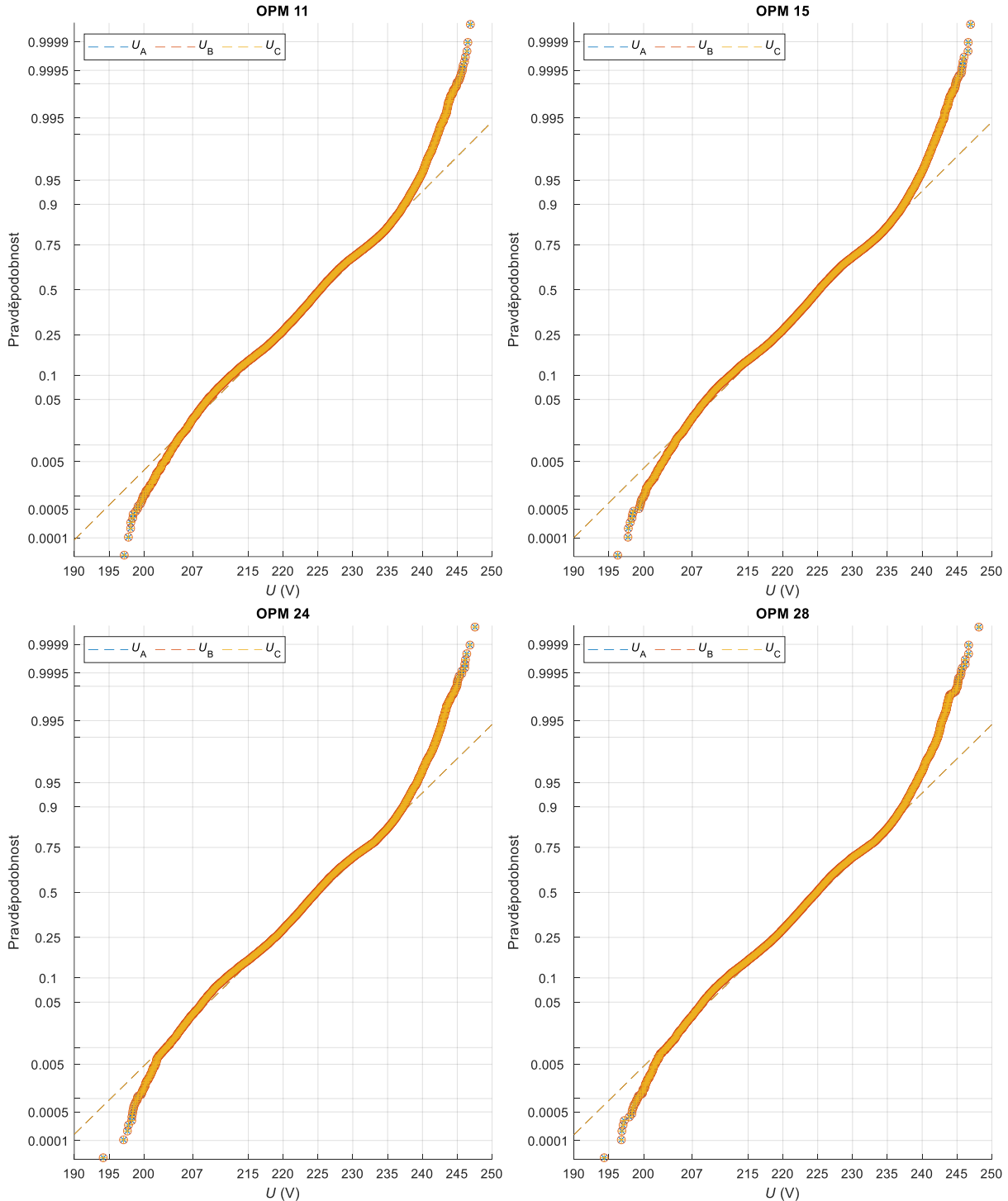
Obr. 7-33 Poskytnutá podpora sítě při poklesu frekvence

Při poklesu frekvence část EV se nacházela v režimu nabíjení na konstantní napětí a během podpory nabíjely méně, to vedlo k nárůstu příkonu po vracení frekvence na hodnotu 49,5 Hz, který lze jasně vidět od 6. do 13. hodiny.

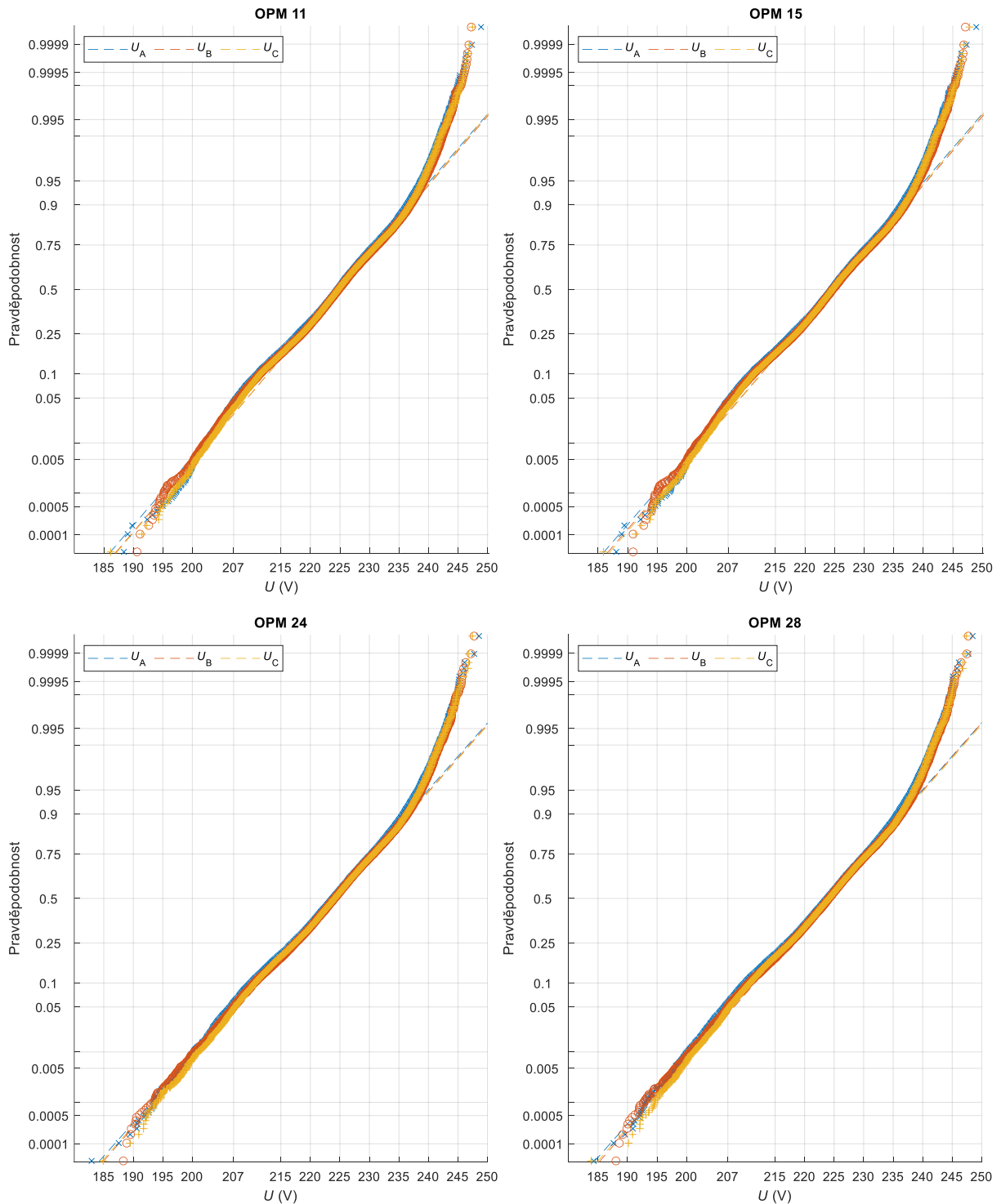
7.4 Stochastické modelování

Pro scénář 6 bylo provedeno modelování s náhodnými vstupními proměnnými. Počet simulací je 100 pro každý případ (bez podpory a s podporou). Pomocí funkce náhodného normálního rozdělení (normrnd) v prostředí MATLAB byly vygenerovány profily napětí VN zdroje a z TDD 4 (Obr.7-15) diagramy zatížení domácností s časovým krokem 5 minut. Připojení BESS a EV v jednotlivých fázích a hodnoty SOC byly určeny pomocí funkce náhodného generování (randi), v tomto případě EV a BESS mohly být i odpojeny a pro BESS bylo umožněno připojení do jednotlivých fází. Také pomocí funkce „randi“ byl stanoven okamžik připojení EV a BESS, minimální doba připojení těchto zařízení byla zvolena na úrovni 4 hodin. Nastavení řídicích charakteristik bylo provedeno podle Tab.7 -12. Pro stanovení základní úrovně napětí byl simulován stav sítě bez penetrace BESS a EV. Grafy pravděpodobnosti výskytu desítiminutových hodnot

napětí v koncových bodech sítě jsou uvedeny na Obr.7-34 – 7-36. Při simulaci bez penetrace BESS a EV 2,63-3,37 % (v závislosti na OPM) desetiminutových hodnot napětí byly menší než 207 V, V OPM 24 a 28 v jednom desítiminutovém intervalu došlo k poklesu napětí pod $0,85U_{nom}$ (195,5 V) - dovolenou normou ČSN EN 50160 hodnotu, což však při celkovém počtu hodnot rovným 14400 nemá zásadní význam.

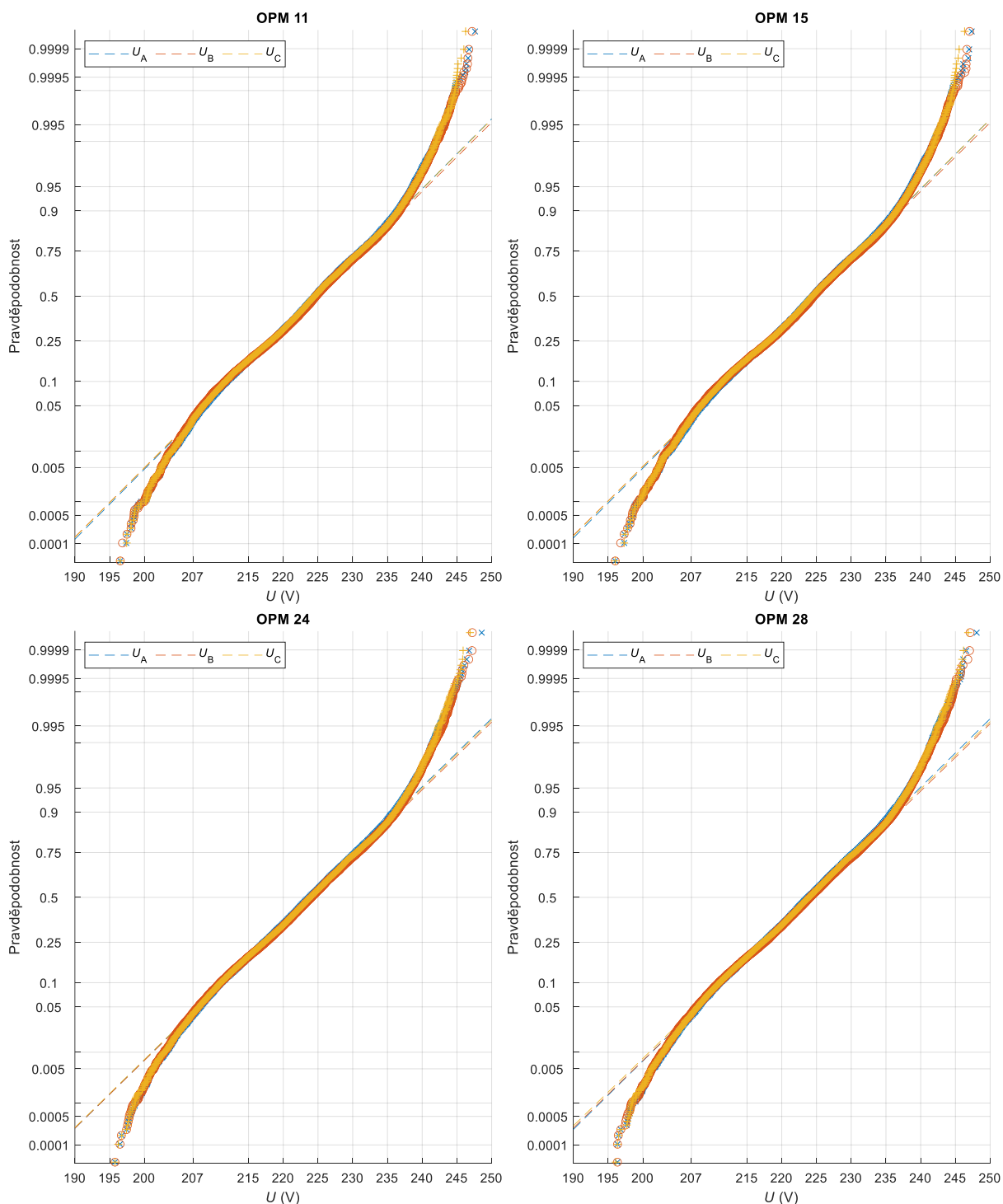


Obr. 7-34 Grafy pravděpodobnosti výskytu 10 min. hodnot napětí při simulaci bez penetrace BESS a EV



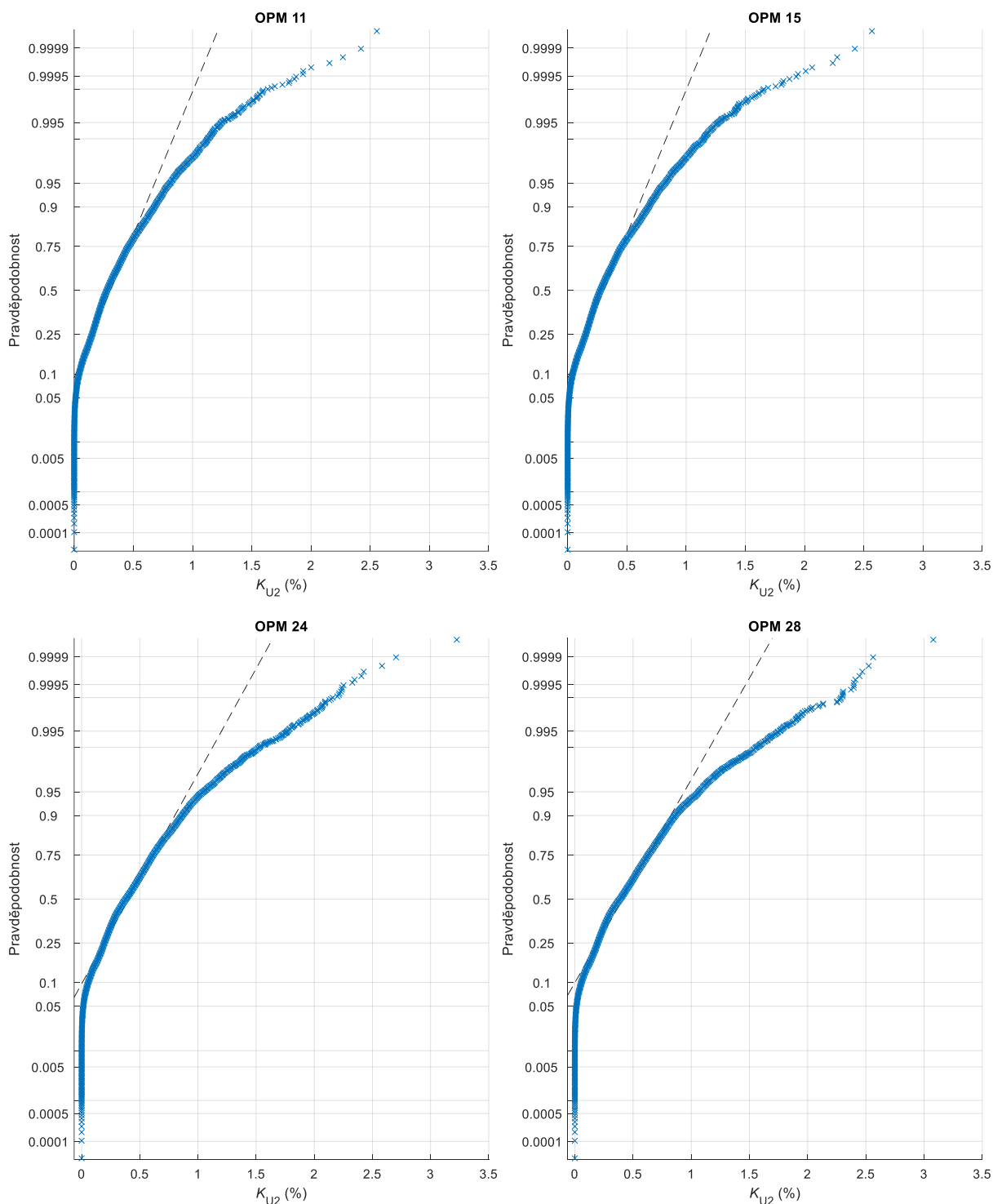
Obr. 7-35 Grafy pravděpodobnosti výskytu 10 min. hodnot napětí při simulaci bez podpory

Při simulaci bez podpory v OPM 11 3,61-4,36 % desítiminutových hodnot napětí byly menší než 207 V, v OPM 15 3,83-4,56 %, v OPM 24 4,69-5,71 % a v OPM 28 4,71-5,65 % desítiminutových hodnot napětí. Ve všech koncových OPM se desítiminutové hodnoty napětí nacházejí pod hodnotou 195,5 V. Pro OPM 11 počet nesplňujících normu hodnot je 18 (pro fázi B) a 9 (pro fázi A a C). Pro OPM 15 počet nevyhovujících normě hodnot je 22 (pro fázi B) a 11 (pro fázi A a C). Pro OPM 24 počet nesplňujících normu hodnot je 32 (pro fázi A a B) a 27 (pro fázi C). Pro OPM 28 počet nevyhovujících normě hodnot je 31 (pro fázi A a B) a 3 (pro fázi C).



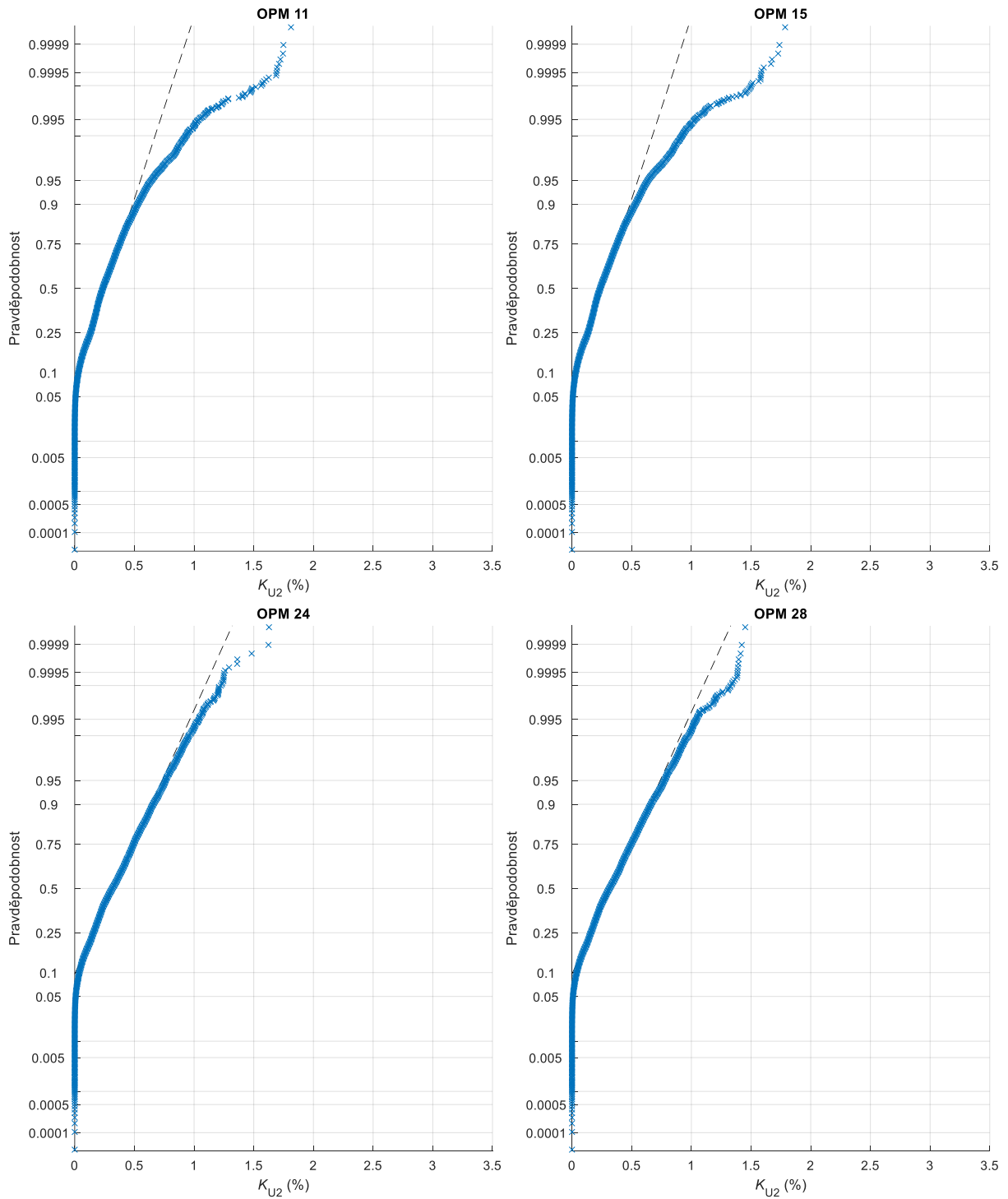
Obr. 7-36 Grafy pravděpodobnosti výskytu 10 min. hodnot napětí při simulaci s PU podporou

Při simulaci s PU podporou v OPM 11 3,01-3,36 % desítiminutových hodnot napětí byly menší než 207 V, v OPM 15 3,17-3,49 %, v OPM 24 3,84-4,12 % a v OPM 28 3,78-3,93 % desítiminutových hodnot napětí. Ve všech koncových OPM se desítiminutové hodnoty napětí nacházejí výše hodnoty 195,5 V.



Obr. 7-37 Grafy pravděpodobnosti výskytu 10 min. hodnot nesymetrie při simulaci bez podpory

Při simulaci bez podpory (Obr.7-37) ve všech koncových OPM desítiminutové hodnoty nesymetrie překročily hodnotu 2 %, však pravděpodobnost jejich výskytu menší než 0,5 %. Při použití PU podpory (Obr.7-38) v žádném případě nedošlo k překročení hodnoty 2 %. Maximální hodnota nesymetrie při pravděpodobnosti výskytu 5 % v tomto případě je 0,75 % (OPM 28), oproti 1,1 % při simulaci bez podpory.



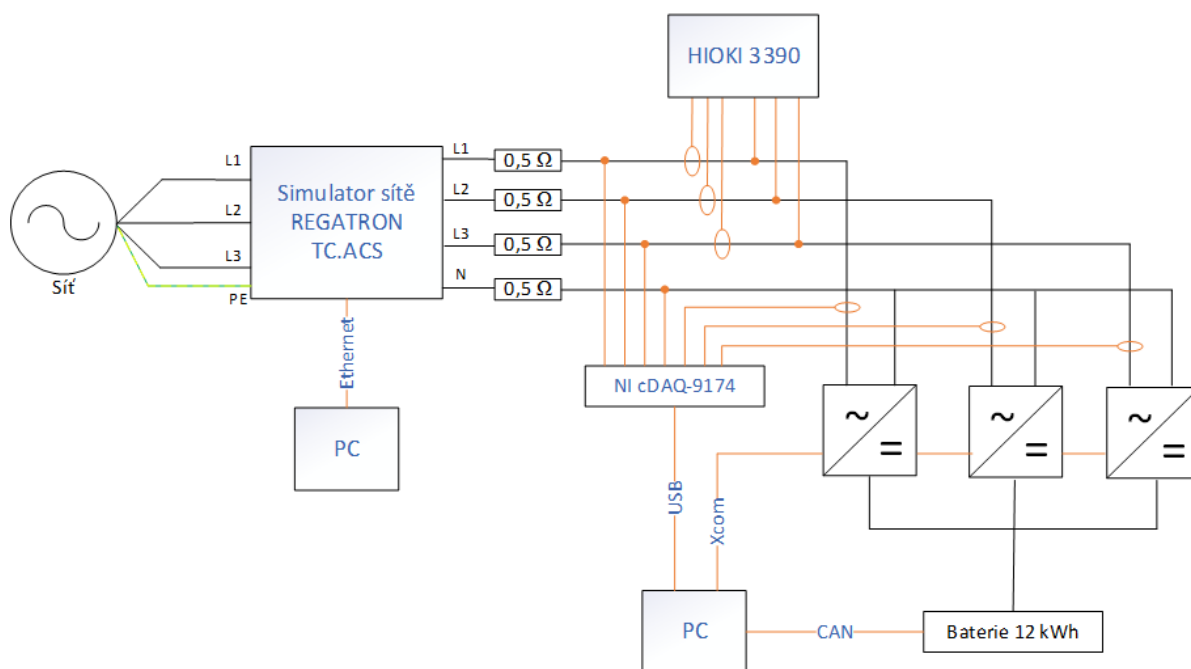
Obr. 7-38 Grafy pravděpodobnosti výskytu 10 min. hodnot nesymetrie při simulaci s PU podporou

8 OVĚŘENÍ FUNKCE PODPORY NA LABORATORNÍM SYSTÉMU

Cílem laboratorního měření bylo ověřit schopnost nabíjecích systému připojených v DS NN provádět podporu sítě.

8.1 Popis testovacího obvodu

Testovací obvod sestává z programovatelného simulátoru sítě, umělé sítě s vnitřním odporem, nabíjecího systému s řídicím obvodem a baterie s kapacitou 12 kWh. Simulátor sítě REGATRON TC.ACS umožňuje nastavení napájecího fázového napětí v rozsahu 0-305 V a frekvence v rozsahu 0-5 kHz. Nabíjecí systém sestává ze tří jednofázových měničů Studer XTM 4000-48, PC pro nastavení charakteristik, výpočet hodnot výkonu a posílání příkazů střídačům; systému NI cDAQ-9174 s modulem NI 9225 pro přímé měření napětí a modulem NI 9239 pro nepřímé měření proudu. Proudů byly měřeny pomocí proudových kleští Chauvin Arnoux C173. Schéma testovacího obvodu je znázorněno na Obr.8-1. Pro měření napětí, výkonů a frekvence byl použit měřicí přístroj HIOKI 3390 s proudovými kleštěmi HIOKI 9272-10.



Obr. 8-1 Schéma testovacího obvodu

Pro sledování odezvy umělé sítě na změny výkonu byl použit odpor o velikosti 0,5 Ω, což je charakteristickou hodnotou pro DS NN. Z důvodu závodního blokování injektáže/spotřeby jalového výkonu u měničů v režimu nabíjení (stále $\cos\varphi=1$) nebyla ověřena QU podpora sítě. Pro ověření PU a Pf podpory byly provedeny následující testy:

- při symetrickém napájecím napětí bez podpory (1),
- při symetrickém napájecím napětí s PU podporou (2),
- při nesymetrickém napájecím napětí bez podpory (3),
- při nesymetrickém napájecím napětí s PU podporou a řízením podle minimální hodnoty napětí (4),

- při nesymetrickém napájecím napětí s PU podporou a řízením v jednotlivých fázích (5),
- při symetrickém napájecím napětí s Pf podporou (6).

Napájecí napětí pro jednotlivé testy je uvedeno v následujících tabulkách. Nominální výkon při nabíjení je 2,1 kW pro každou fázi. Nastavení PU a Pf charakteristik reprezentováno v *Tab.8-4*. Časová konstanta τ pro PU podporu je 10 s, pro Pf podporu 2 s.

Tab. 8-1 Parametry napájecího napětí během laboratorního měření, test 1, 2

Test 1, 2	U_f (V)	236	214	207,5	215	236
	U_f/U_{nom} (pu)	1,03	0,93	0,90	0,93	1,03
	f (Hz)	50				
	Časový usek (s)	0-360	360-660	660-960	960-1260	1260-1620

Tab. 8-2 Parametry napájecího napětí během laboratorního měření, test 3, 4, 5

Test 3,4,5	U_A (V)	236	214	207,5	215	236
	U_B (V)	240	215	217	213,5	230
	U_C (V)	230	209	208	217	236
	U_A/U_{nom} (pu)	1,03	0,93	0,90	0,93	1,03
	U_B/U_{nom} (pu)	1,04	0,93	0,94	0,93	1,00
	U_C/U_{nom} (pu)	1,00	0,91	0,90	0,94	1,03
	f (Hz)	50				
	Časový usek (s)	0-360	360-660	660-960	960-1260	1260-1620

Tab. 8-3 Parametry napájecího napětí během laboratorního měření test 6

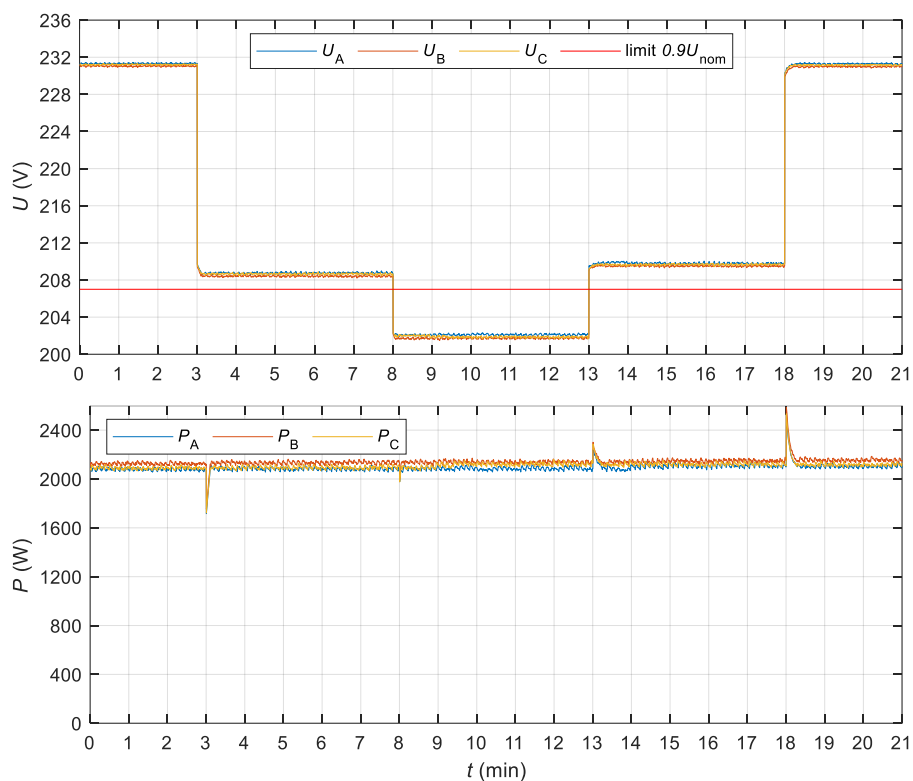
Test 6	U_f (V)	230				
	U_f/U_{nom} (pu)	1				
	f (Hz)	50	49,25	48,5	49,2	49,5
	Časový usek (s)	0-360	360-660	660-960	960-1260	1260-1620

Tab. 8-4 Nastavení řídicích charakteristik během laboratorního měření

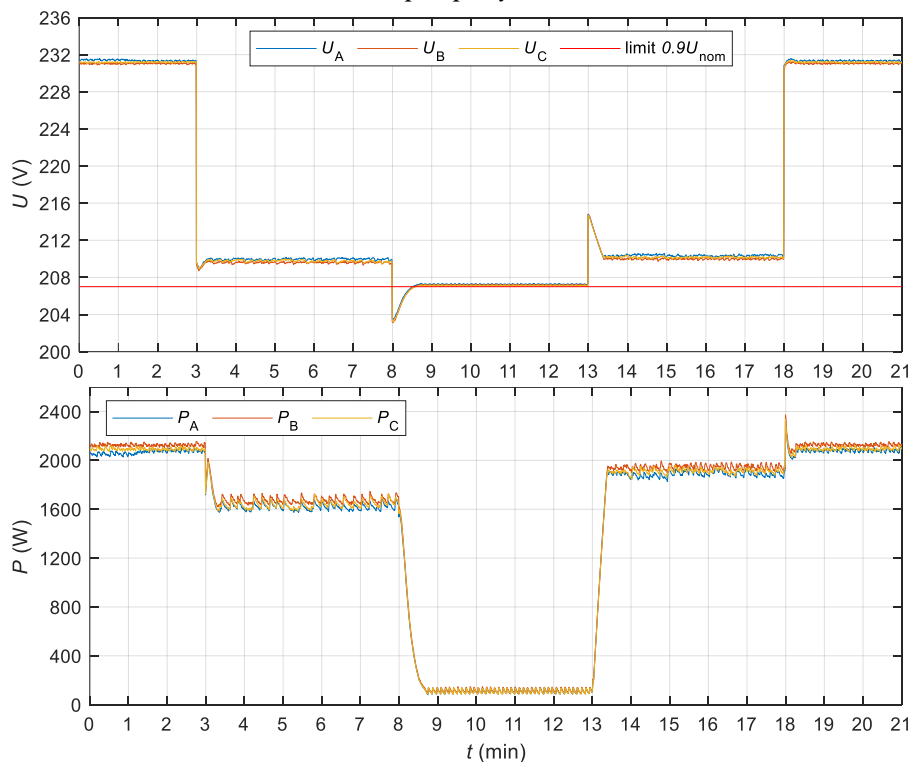
Funkce PU		Funkce Pf	
u (pu)	p (pu)	f (Hz)	p (pu)
0	0	0	0
0,90	0	48,5	0
0,92	1	49,5	1
-	-	-	-

8.2 Výsledky laboratorního měření

Průběhy napětí v místě připojení nabíjecího systému a výkonů v jednotlivých fázích pro testy 1 – 5 jsou znázorněny na Obr.8-2 – 8-6. Průběh frekvence a výkonu pro test 6 je uveden na Obr. 8-7.

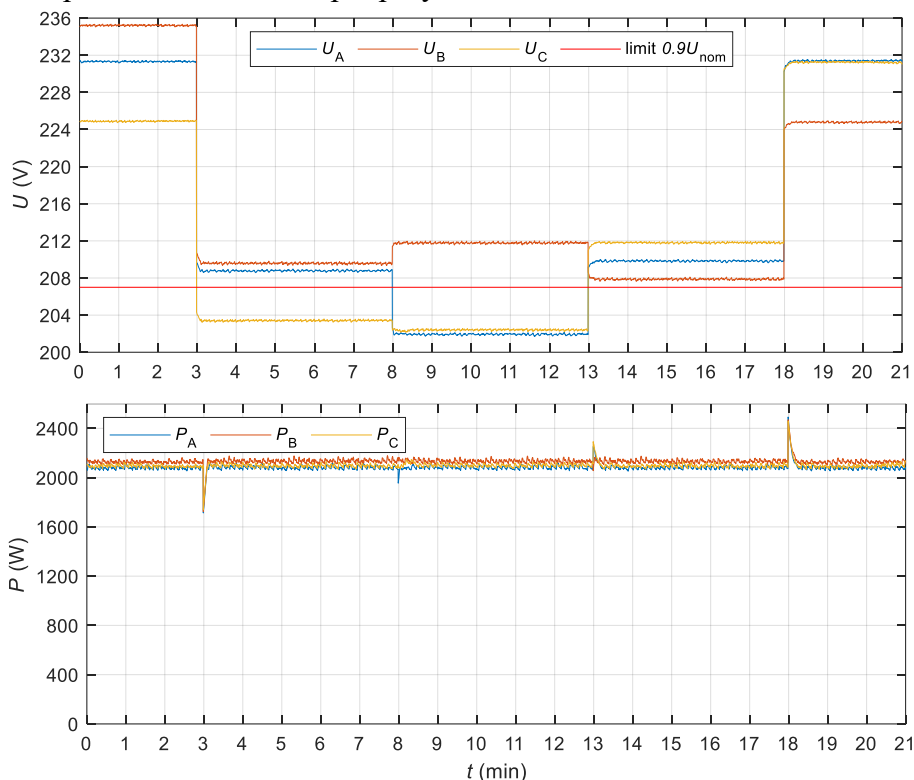


Obr. 8-2 Průběh napětí a výkonu v místě připojení při symetrickém napájecím napětí, bez podpory

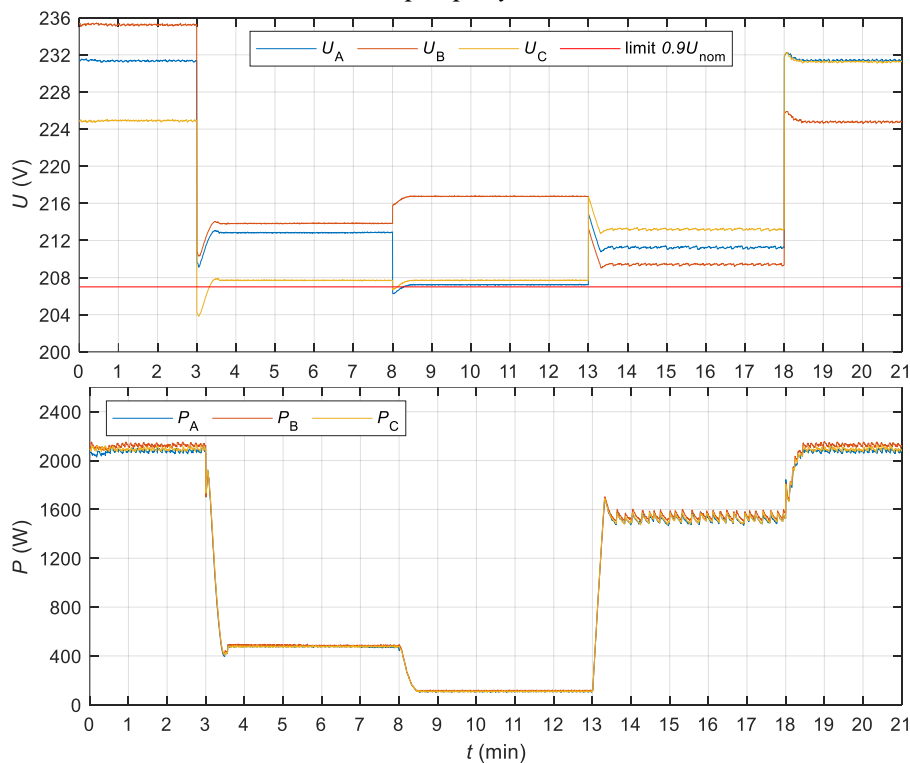


Obr. 8-3 Průběh napětí a výkonu v místě připojení při symetrickém napájecím napětí a PU podpoře

V případě testu bez podpory při snížení symetrického napájecího napětí došlo k poklesu napětí pod limitní hodnotu 207 V (Obr. 8-2). Při použití PU podpory, napětí se nacházelo pod limitní hodnotou jen v době snížení výkonu na novou hodnotu, vypočítanou podle řídicí charakteristiky, jakmile tato hodnota byla dosažena napětí ustálo na hodnotě vyšší než 207 V. Což potvrzuje správné nastavení a působení funkce PU podpory.

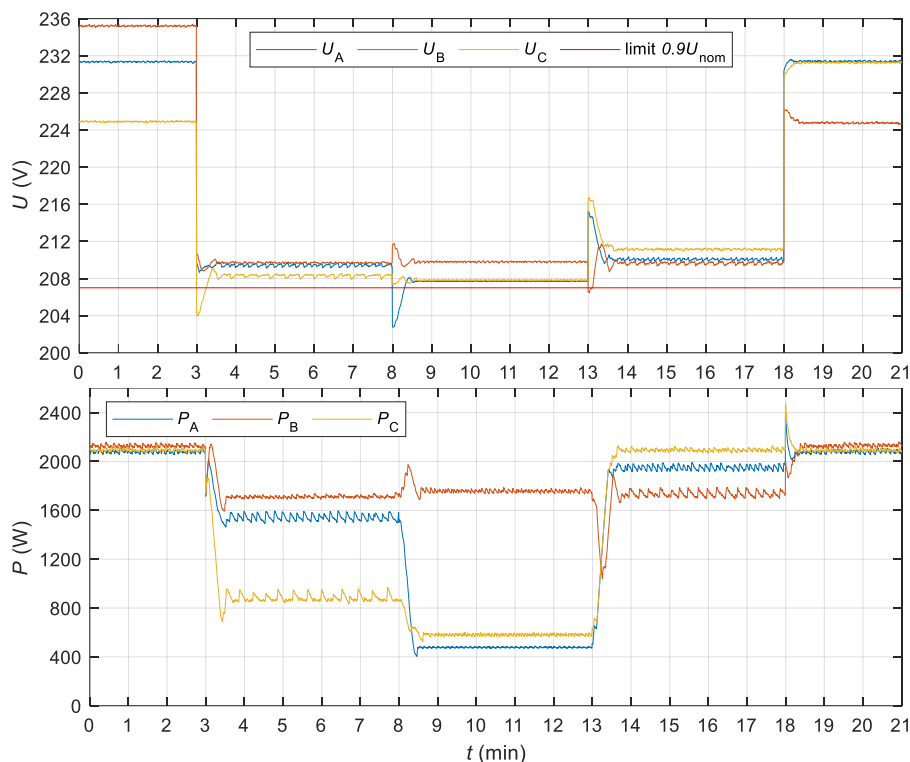


Obr. 8-4 Průběh napětí a výkonu v místě připojení při nesymetrickém napájecím napětí, bez podpory



Obr. 8-5 Průběh napětí a výkonu v místě připojení při nesymetrickém napájecím napětí a PU podpoře (řízení podle minimální hodnoty napětí)

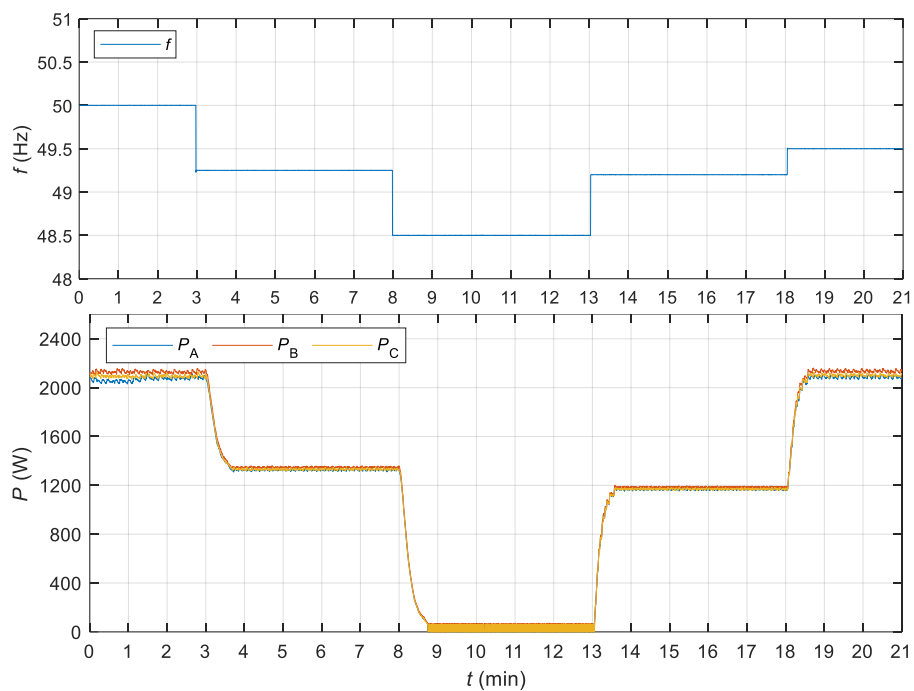
V případě testu bez podpory při snížení nesymetrického napájecího napětí došlo k poklesu napětí pod limitní hodnotu 207 V (Obr. 8-3) v fázích A a C. Při použití PU podpory, napětí se nacházelo pod limitní hodnotou jen v době snížení výkonu na novou hodnotu, vypočítanou podle minimálního fázového napětí, tímto v intervalu 3-8 min bylo napětí ve fázi C a v intervalu 8-13 min napětí ve fázi A. Po dosažení žádanou hodnoty výkonu napětí ustálilo na hodnotě vyšší než 207 V, což také potvrzuje správné nastavení a působení funkce PU podpory.



Obr. 8-6 Průběh napětí a výkonu v místě připojení při nesymetrickém napájecím napětí a PU podpoře (řízení v jednotlivých fázích)

Při použití PU podpory s řízením podle napětí v jednotlivých fázích, napětí se také nacházelo nad limitní hodnotou po dosažení žádaných hodnot výkonu. Z porovnání grafu z Obr. 8-5 a Obr. 8-6 je zřejmé, že řízení po fázích způsobilo symetrizaci napětí a zvětšilo dodávanou energii oproti řízení podle minimálního napětí. Tím pádem nejlepším způsobem PU řízení pro trojfázové nabíjecí systémy je řízení výkonu podle napětí v jednotlivých fázích.

Průběhy z testu podpory při podfrekvenci (Obr. 8-7) ověřují správnou regulaci činného výkonu podle nastavenou řídicí charakteristiky.



Obr. 8-7 Průběh frekvence a výkonu v místě připojení při Pf podpoře

9 VYMEZENÍ ZPŮSOBU IMPLEMENTACE PODPORY

V současné době nabíječky všechny domácí nabíječky a palubní nabíječky EV fungují se stálém $\cos\varphi=1$ a mají zablokovanou funkce generace/spotřeby jalového výkonu, což komplikuje implementace QU podpory sítě. Proto pro domácí BESS a EVC bude vhodné použít jen PU podporu. Implementace podpory sítě pomocí BESS a EV vyžaduje nastavení řídicích charakteristik podle lokálních podmínek v síti, legislativních rámců dané země a koordinace s jinými prostředky podpory v síti. Což vylučuje možnost stálého nastavení v palubních nabíječkách EV, která se mohou volně pochybovat mezi regiony a zemí. Tim pádem je potřeba zajistit komunikace mezi měničem a sítí v místě připojení. Jak bylo zmíněno v kapitole 4.1 při módu nabíjení 1 ze standartní zásuvky, neexistuje žádná komunikace mezi sítí a EV. Při nabíjení pomocí speciálního kabelu IC-CPD lze provádět jen jednoduché operace odpojení/připojení nebo stálé omezování proudu. Při módu 3 nabíjení komunikace mezi EV a nabíjecí stanicí (wallboxem) podle přílohy D IEC 61851[9] lze provádět pomocí buď řídicí funkce (LIN-CP) používající LIN (Local Interconnect Network) protokol nebo řídicí funkce používající signál PWM (PWM-CP). LIN-CP při standardní komunikační rychlosti 20 kbit/s může poskytovat následující důležité pro podporu sítě funkce [9]:

- Nabíjecí stanice odesílá maximální povolený proud pro každou fázi a pro nulový vodič. Tyto hodnoty lze dynamicky upravovat.
- EV může odesílat minimální/maximální napětí mezi fázemi a mezi fázemi a zemí.
- EV může odesílat minimální/požadovaný/maximální proud pro každou fázi a pro nulový vodič.
- EV může odesílat naměřené proudy pro každou fázi a pro nulový vodič.

Z tohoto vyplývá, že implementovat podporu sítě při použití řídicí funkcí LIN-CP lze pomocí instalace wallboxu s vhodným softwarem pro výpočet povolených hodnot proudu podle řídicích charakteristik. Řídicí charakteristiky by měly být nastavení při instalaci wallboxu podle požadavků PDS. Při použití snadnější funkce PWM-CP implementace podpory lze také provést instalaci wallboxu s měřícím systémem a softwarem pro nastavení a výpočet dovoleného proudu podle charakteristik. V současné době některé wallboxy již poskytují funkce dynamického řízení výkonu pro nepřekročení nominální hodnoty proudu hlavního jističe, což řeší problém s náhlým odpojením.

V případě implementaci podpory u DC nabíjecích stanic by řídicí systém měl být součástí nabíjecí stanice. V tomto případě lze implementovat i QU podporu sítě.

U existujících pevně instalovaných nabíječek pro domácí BESS je také potřeba instalace externího řídicího systému s měřením proudu a napětí a vymezení komunikace mezi externím řídicím systémem a měničem. V perspektivě lze implementovat řídicí systém uvnitř nabíječky.

10 ZÁVĚR

Cílem práce bylo vymezit riziko snížení napětí pod dovolenou mez v profilech distribučních sítí NN při penetraci bateriových systémů a nabíjecích systémů pro elektromobily. V první části práce je popsána distribuční soustava NN ČR, koncepce regulace napětí a současný legislativní stav v oblasti připojení BESS a EV. V následujících kapitolách jsou popsány režimy nabíjení a způsoby připojení těchto zařízení. Na základě analýzy současného technického a legislativního stavu bylo vymezeno riziko vysoké penetrace EV a BESS fungujících v režimu spotřeby. V kapitole 6 jsou popsány konkrétní možnosti řízení výkonu v závislosti na napětí a frekvenci v tomto režimu.

Pro ověření rizika snížení napětí pod dovolenou mez, správného fungování podpory sítě řízením výkonu a porovnání efektivnosti řízení se stálým omezením proudu při nabíjení byl vytvořen model testovací sítě v prostředí MATLAB Simulink. Modelování bylo provedeno pro několik scénářů s různými úrovněmi penetrace BESS a EV, také pro jeden ze scénářů bylo realizováno stochastické modelování ze 100 simulací. Z výsledků modelování je jasně vidět vhodnost použití řízení výkonu v závislosti na napětí. Při správném nastavení řídicích charakteristik napětí zůstalo v mezích povolených normou ČSN EN 50160 a celková dodaná energie při nabíjení byla vyšší o 7 až 25 %, než při stálém omezení nabíjecího proudu. Řízení výkonu také zlepšilo situaci z hlediska nesymetrie.

Ověření funkce síťové podpory měniči bateriových uložišť a nabíječek bylo provedeno na laboratorním nabíjecím systému bateriového uložišť. Výsledky z laboratorních testů ukázaly správnou funkčnost podpory sítě řízením výkonu při podfrekvenci, snížení napětí a nesymetrii.

V poslední části práce byly vymezeny možné způsoby implementace podpory sítě pro elektrická vozidla a bateriové systémy připojené v sítí NN. Analýza současného technického a legislativního stavu ukázala nutnost instalace wallboxu pro implementaci podpory řízením výkonu.

Z výše uvedeného vyplývá, že při narůstající úrovni penetrace EV a BESS připojených v distribučních sítích nízkého napětí je využití podpory sítě řízením jejich výkonu vhodným způsobem udržení napětí v povolených mezích a ve srovnání s jinými již použitelnými způsoby zvyšuje množství energie dodávané při nabíjení.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Pravidla provozování distribučních soustav [online]. 2016 [cit. 2020-11-1]. Dostupné z www.eru.cz
- [2] TOMAN, Petr a kol. Provoz distribučních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [3] ČSN 33 2130 ed. 3. Elektrické instalace nízkého napětí – Vnitřní elektrické rozvody. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [4] ELEKTRICKÉ STANICE A VEDENÍ [online]. BRNO: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D., VUT [cit. 2020-11-20].
- [5] ČSN EN 50160 ed. 3:2011 Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě, Český normalizační institut
- [6] L. Pinter and C. Farkas, "Impacts of electric vehicle chargers on the power grid," 2015 5th International Youth Conference on Energy (IYCE), Pisa, 2015, pp. 1-6, [cit. 2020-11-21]. Dostupné z <https://ieeexplore.ieee.org/document/7180811>
- [7] A. Broy and C. Sourkounis, "Influence of charging electric vehicles and on the quality of the distribution grids," 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Lisbon, 2011, pp. 1-4, [cit. 2020-11-21]. Dostupné z <https://ieeexplore.ieee.org/document/6128804>
- [8] Angelo Bagгинi. Handbook of Power Quality / Edited by Angelo Bagгинi. University of Bergamo, Italy, 2008. ISBN: 978-0-470-06561-7
- [9] IEC 61851-1:2017 - Electric vehicle conductive charging system – Part 1: General requirements
- [10] TOMAN, Petr. Možnosti regulace napětí v distribuční síti. Brno, 2012. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [11] UHLÍK, Stanislav. Regulace napětí v distribuční soustavě. Plzeň, 2011. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ZČU. Vedoucí práce Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.
- [12] VÁPENÍK, René. Regulace napětí v distribuční soustavě vn a nn. Elektrověst. 2011, 2011(3), 5. ISSN 1213-1539.
- [13] PŘÍLOHA 4 PPDS: PRAVIDLA PROPARALELNÍ PROVOZ VÝROBEN A AKUMULAČNÍCH ZAŘÍZENÍ SE SÍTÍ PROVOZOVATELE DISTRIBUTIVNÍ SOUSTAVY [online]. 2018 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z www.eru.cz
- [14] EN 50549-1:2019 Requirements for generating plants to be connected in parallel with distribution networks. Part 1: Connection to a LV distribution network – Generating plants up to and including Type B. BSI Standards Publication
- [15] PŘÍLOHA 6 PPDS: STANDARDY PŘIPOJENÍ ZAŘÍZENÍ K DISTRIBUTIVNÍ SOUSTAVĚ [online]. 2020 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z www.eru.cz
- [16] Možnosti využití akumulčních zařízení v české elektroenergetice [online]. 2019 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/18702-moznosti-vyuziti-akumulacnich-zarizeni-v-ceske-elektroenergetice>
- [17] Hesse, H.C.; Schimpe, M.; Kucevic, D.; Jossen, A. Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids. Energies. 2017 [online]. [cit. 2020-11-29]. Dostupné z <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/12/2107/htm>

- [18] I. Serban and C. Marinescu, "A look at the role and main topologies of battery energy storage systems for integration in autonomous microgrids," 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Basov, 2010, pp. 1186-1191, [online]. [cit. 2020-11-29]. Dostupné z <https://ieeexplore.ieee.org/document/5510532>
- [19] Xavier, L.S., Amorim, W.C.S., Cupertino, A.F. et al. Power converters for battery energy storage systems connected to medium voltage systems: a comprehensive review. *BMC Energy* 1, 7 (2019). <https://doi.org/10.1186/s42500-019-0006-5>
- [20] M. Vrana et al., "Battery Storage and Charging Systems Power Control Supporting Voltage in Charging Mode," 2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Dubai, United Arab Emirates, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICHQP46026.2020.9177889.
- [21] BU-1003: Electric Vehicle. Battery university. 2020 [online] [cit. 2020-12-16]. Dostupné z https://batteryuniversity.com/learn/article/electric_vehicle_ev
- [22] V. T. Tran, D. Sutanto and K. M. Muttaqi, "The state of the art of battery charging infrastructure for electrical vehicles: Topologies, power control strategies, and future trend," 2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Melbourne, VIC, 2017, pp. 1-6, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8282421>
- [23] Deltrix. Charging Modes [online] [cit. 2020-12-15]. Dostupné z <https://deltrixchargers.com/about-emobility/charging-modes/>
- [24] Dílčí studie pro pracovní tým A25 - Predikce vývoje elektromobility v ČR [online] [cit. 2020-12-15]. Dostupné z https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/konference-seminare/2018/11/Studie-NAPS-SG-A25_Elektromobilita.pdf
- [25] EV Charging: Software and Grid Services. Cleantech group. 2019 [online] [cit. 2020-12-15]. Dostupné z <https://www.cleantech.com/ev-charging-software-and-grid-services/>
- [26] Joachim Geske, Diana Schumann, Willing to participate in vehicle-to-grid (V2G)? Why not!, *Energy Policy*, Volume 120, 2018, Pages 392-401, ISSN 0301-4215, [online] [cit. 2020-12-16]. Dostupné z <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.05.004>.
- [27] A.P. Robinson, P.T. Blythe, M.C. Bell, Y. Hübner, G.A. Hill, Analysis of electric vehicle driver recharging demand profiles and subsequent impacts on the carbon content of electric vehicle trips, *Energy Policy*, Volume 61, 2013, Pages 337-348, ISSN 0301-4215, [online] [cit. 2020-12-16]. Dostupné z <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.074>.
- [28] J. A. P. Lopes, F. J. Soares and P. M. R. Almeida, "Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 168-183, Jan. 2011 [online] [cit. 2020-12-16]. Dostupné z <https://ieeexplore.ieee.org/document/5593864>
- [29] K. N. Hasan, K. M. Muttaqi, P. Borboa, J. Scira, Z. Zhang and M. Leishman, "Measurement-based Electric Vehicle Load Profile and Its Impact on Power System Operation," 2019 9th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), Perth, Australia, 2019, pp. 1-6 [online] [cit. 2020-12-16]. Dostupné z <https://ieeexplore.ieee.org/document/9105651>
- [30] James Dixon, Keith Bell, Electric vehicles: Battery capacity, charger power, access to charging and the impacts on distribution networks, *eTransportation*, Volume 4, 2020, 100059, ISSN 2590-1168 [online] [cit. 2020-12-16]. Dostupné z <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100059>
- [31] Vlastimil Novotný, František Žák. Ostrovní provozy. 2015 [online] [cit. 2020-12-16]. Dostupné z https://www.cez.cz/edee/content/file/o-spolecnosti/dcerine-spolecnosti/cds/pro_zakazniky/konference2015/15_ege_zak_dso_novotny_cz.pdf

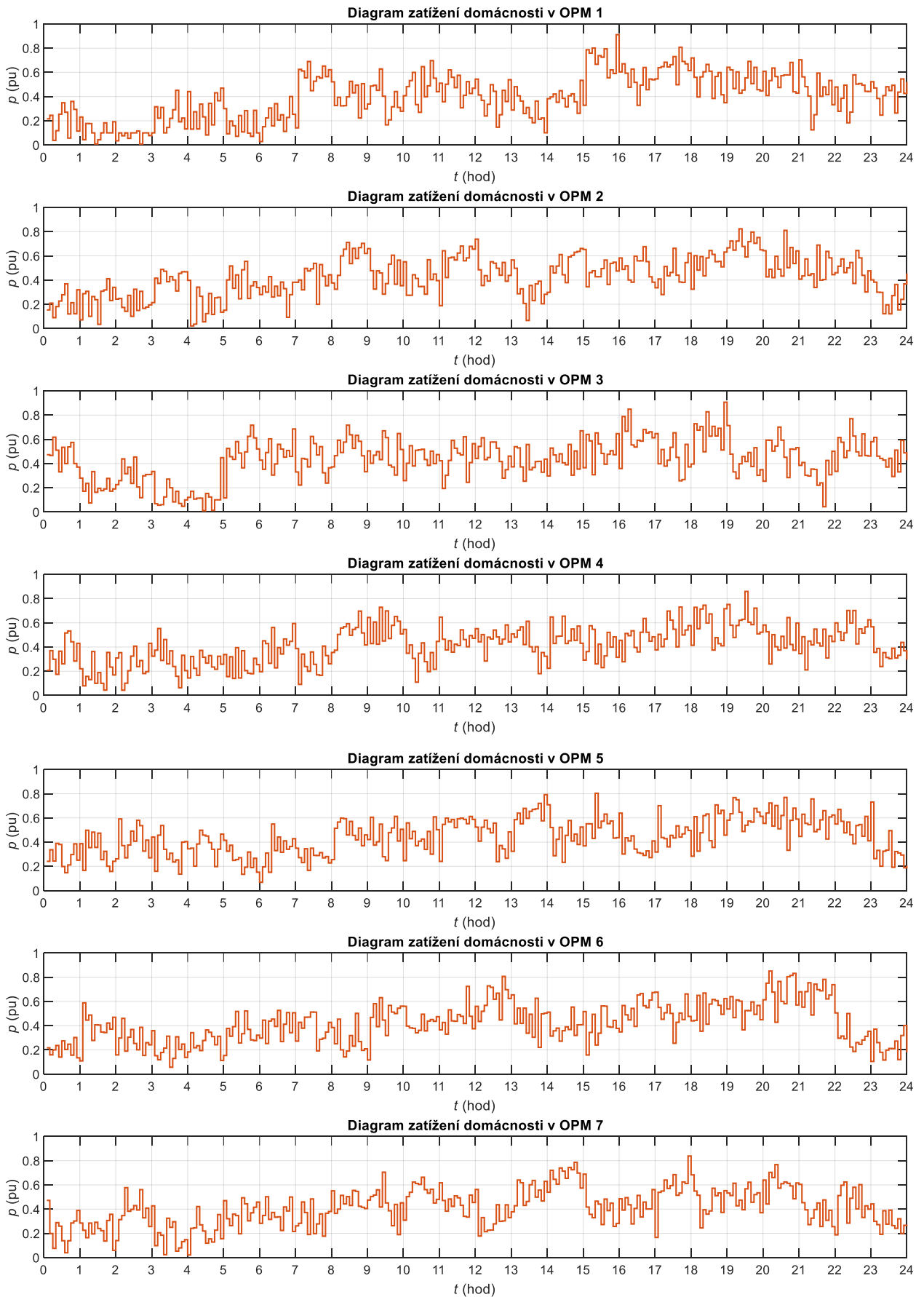
-
- [32] Jiří Drápela a kol., Michal Jurík a kol. OVĚŘENÍ PŘÍNOSU FVE KE STABILIZACI NAPĚTÍ V MEZNÍCH PROVOZNÍCH PODMÍNKÁCH SOUSTAVY NÍZKÉHO NAPĚTÍ. 2019
- [33] PNE 33 0000-1 ed. 6. Ochrana před úrazem elektrickým proudem v distribučních soustavách a přenosové soustavě. Praha: Česká energetická společnost, 2017.
- [34] ČSN EN 60898-1 ed. 2. Elektrická příslušenství – Jističe pro nadproudové jištění domovních a podobných instalací - Část 1: Jističe pro střídavý provoz, 2019.

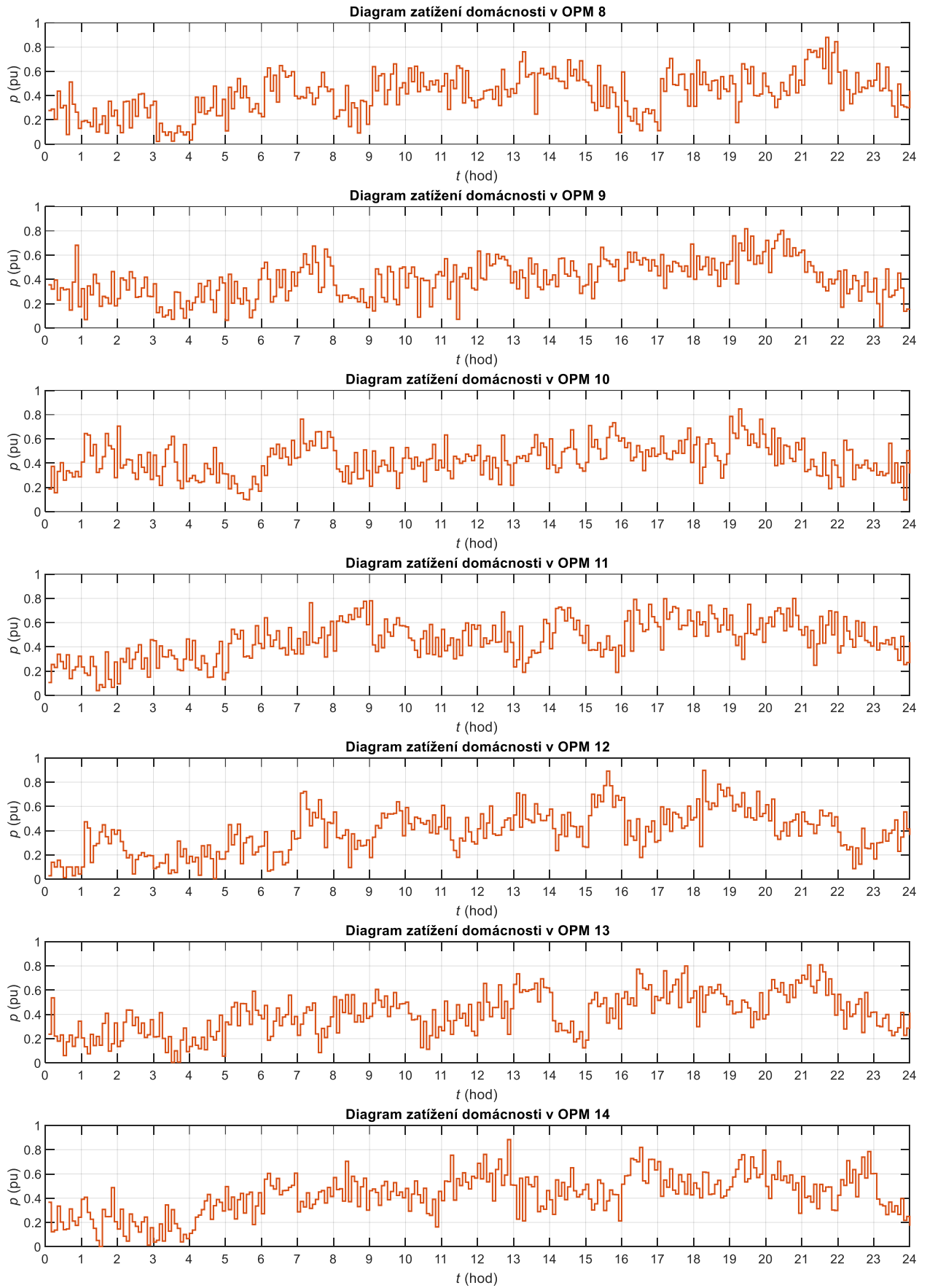
SEZNAM PŘÍLOH

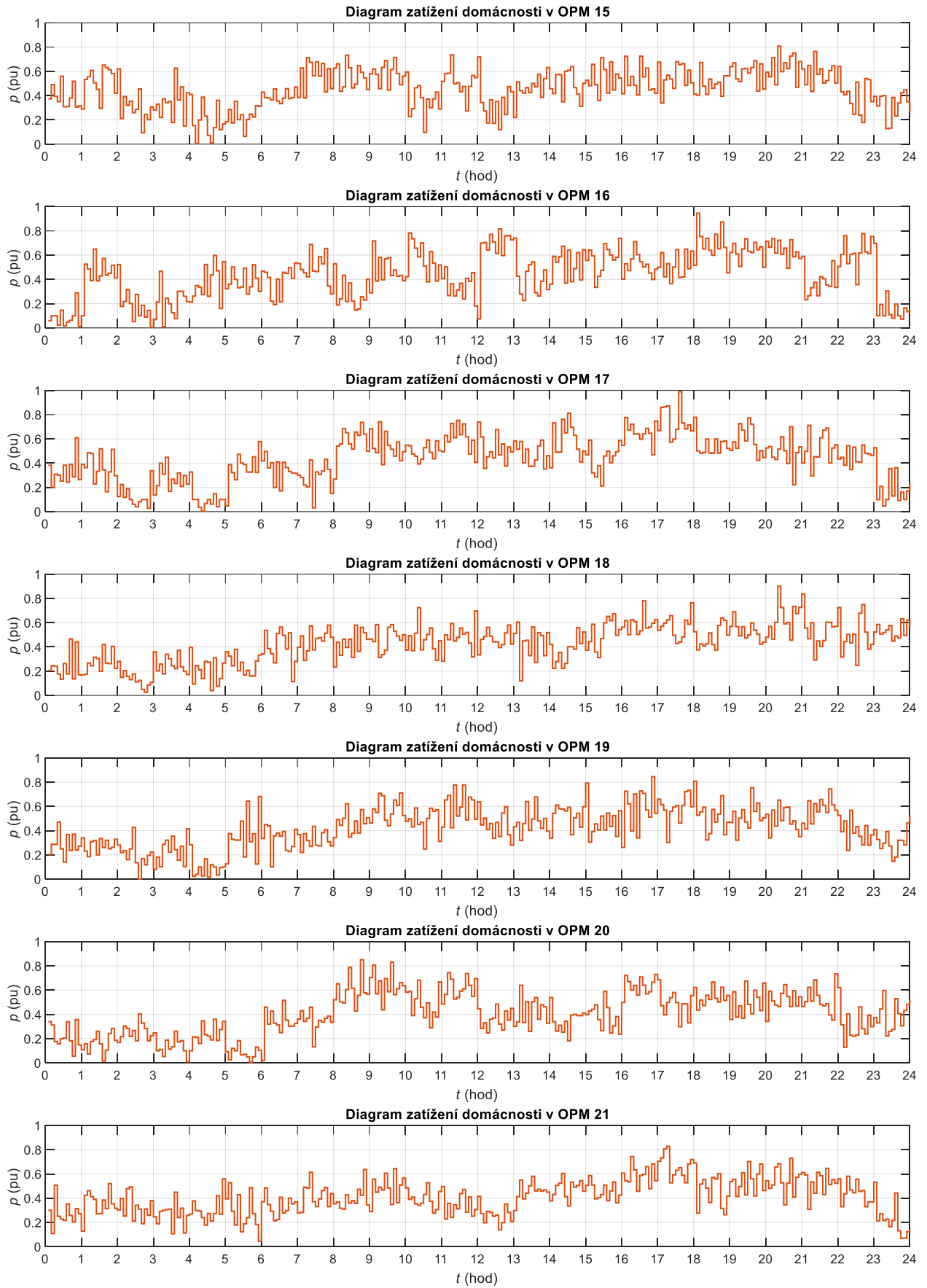
PŘÍLOHA A – PROFILY ODBĚRŮ91

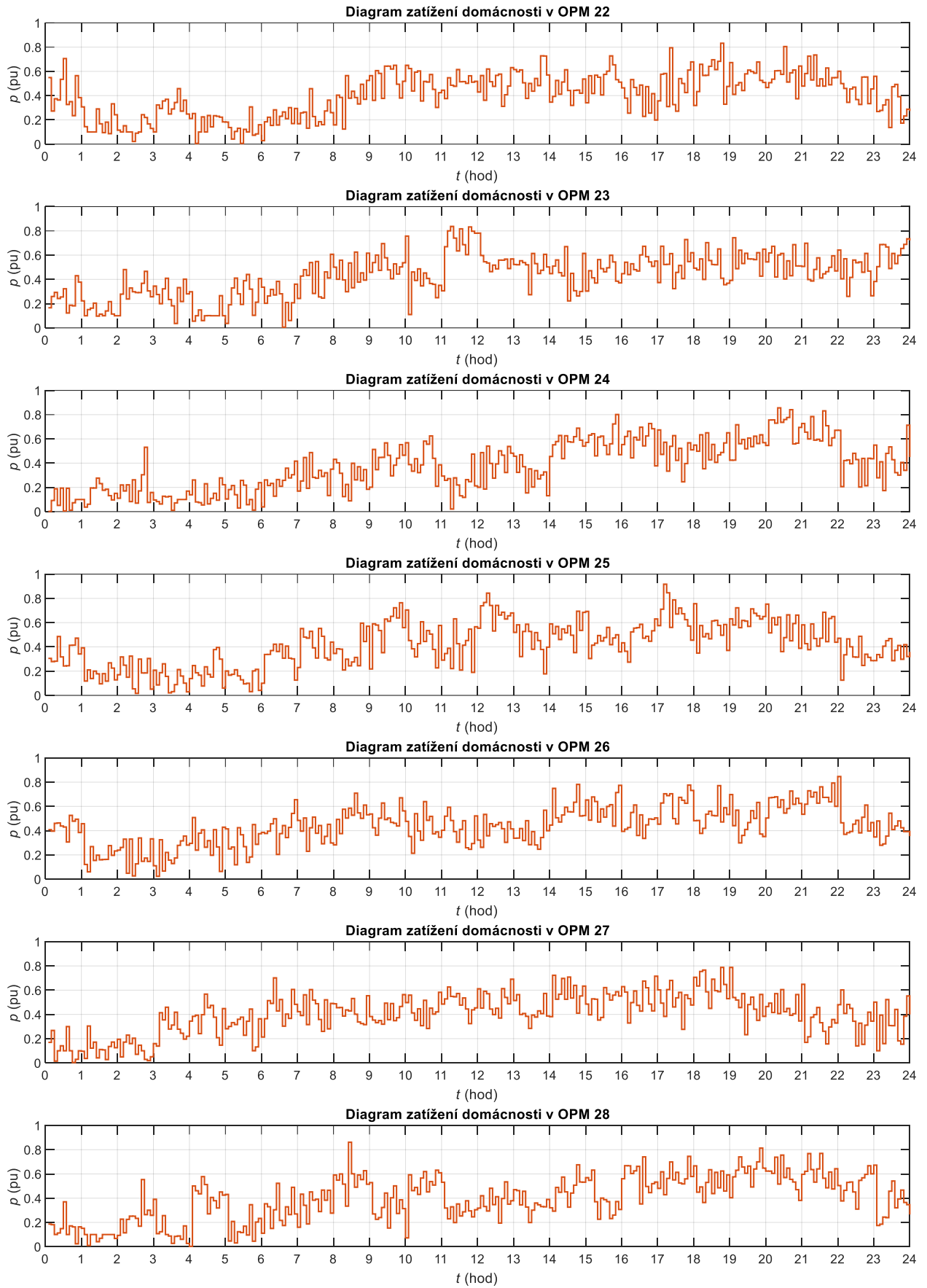
PŘÍLOHA B – VÝSLEDKY MODELOVÁNÍ98

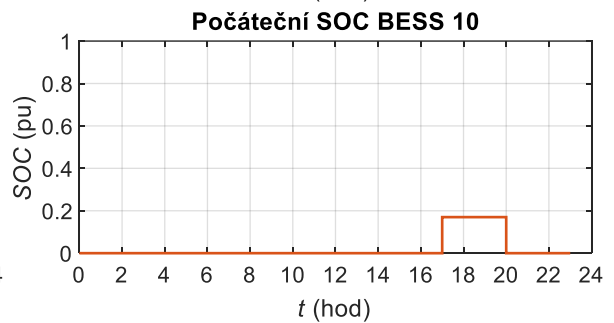
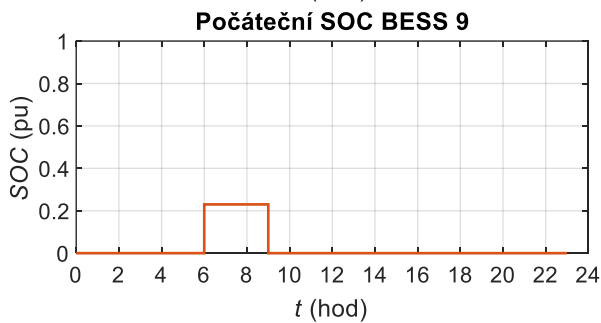
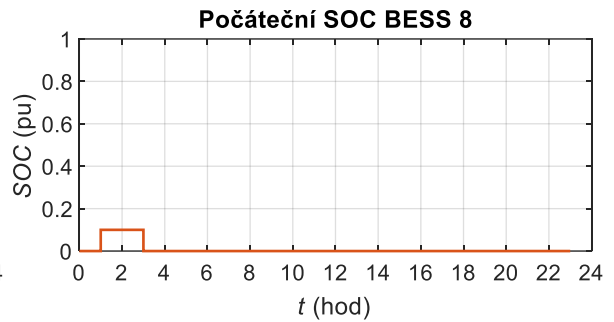
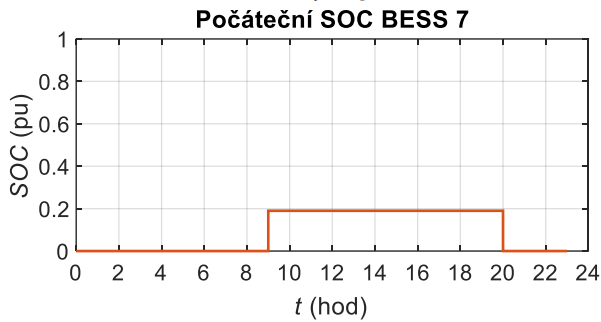
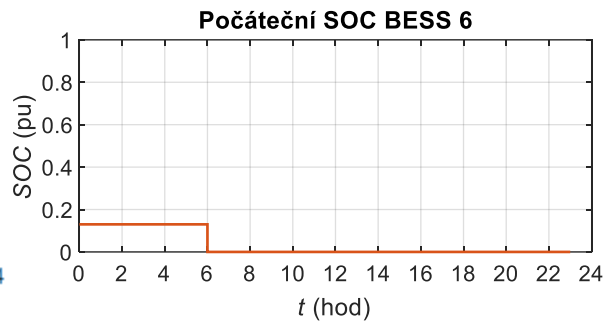
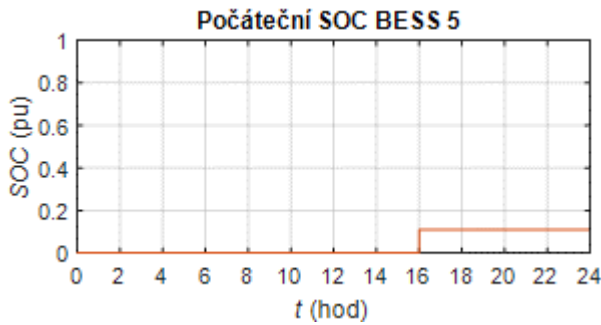
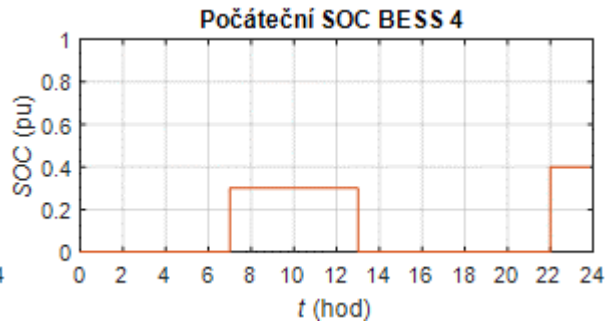
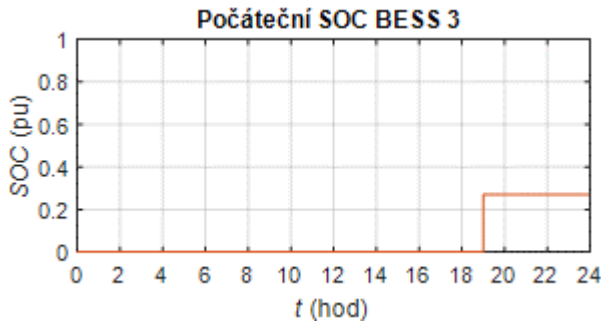
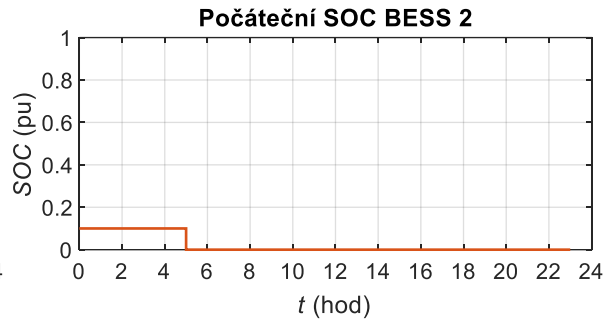
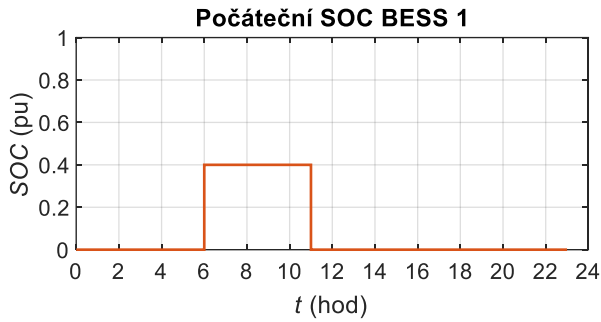
PŘÍLOHA A – PROFILY ODBĚRŮ

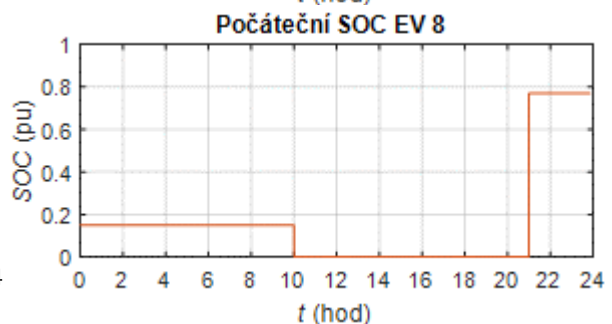
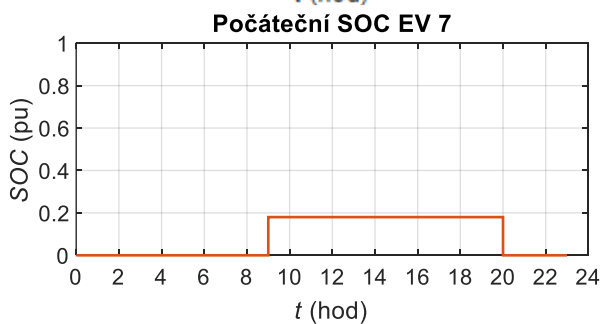
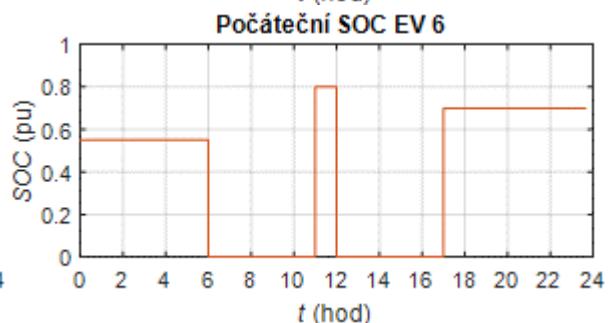
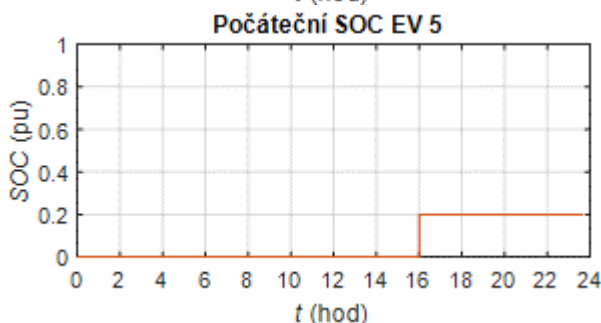
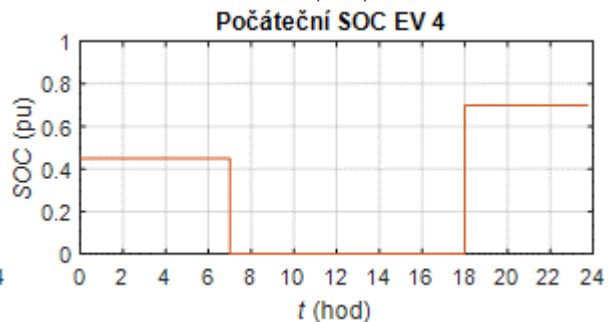
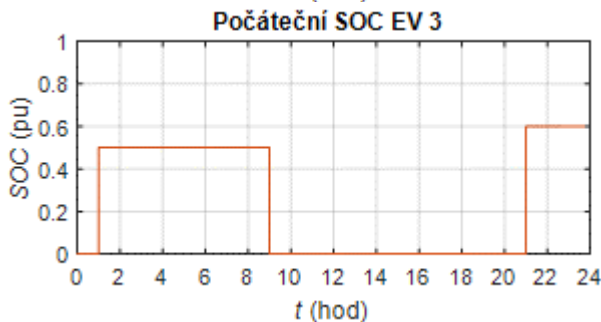
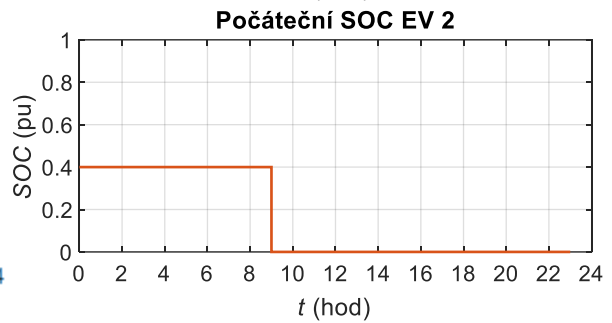
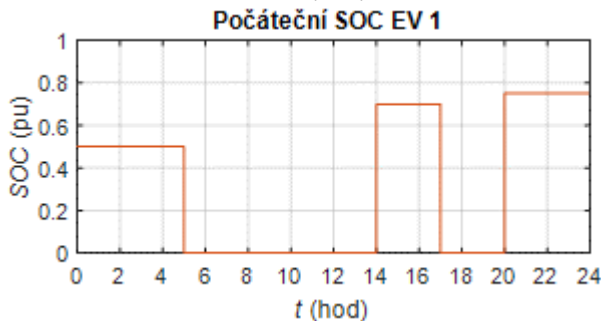
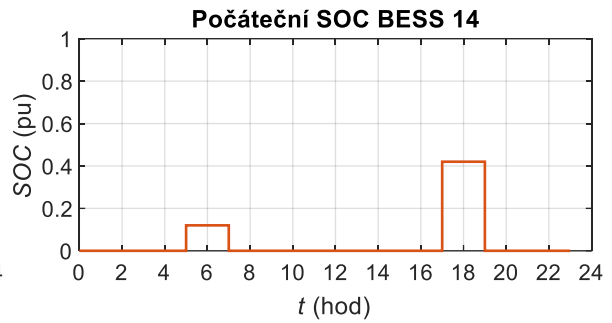
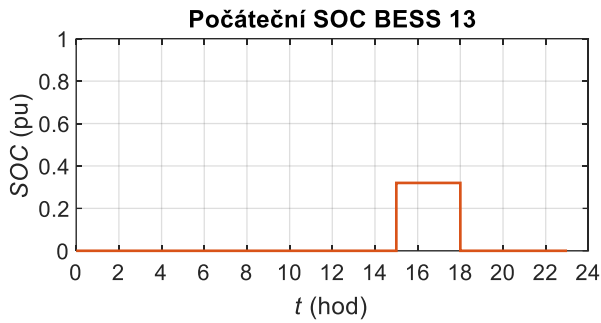
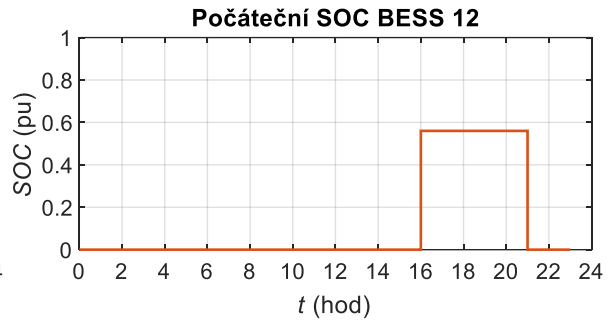
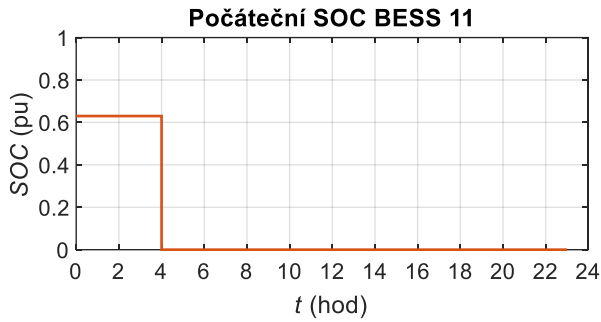


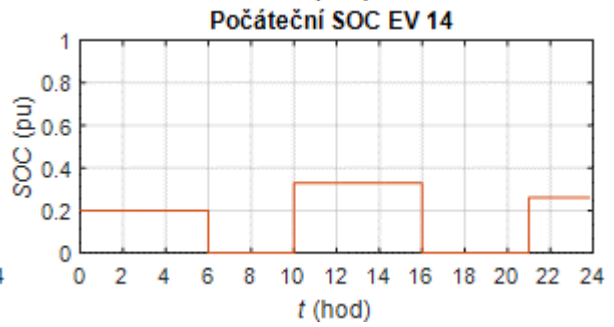
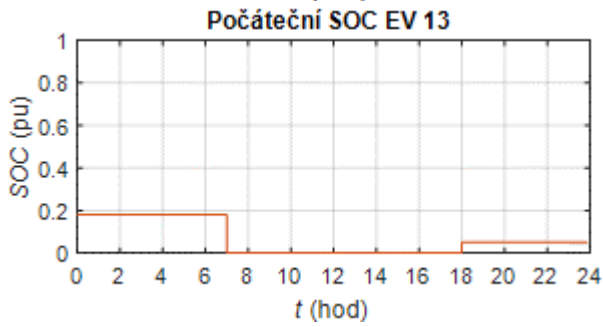
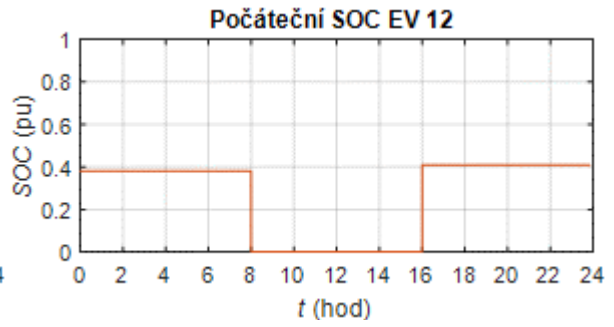
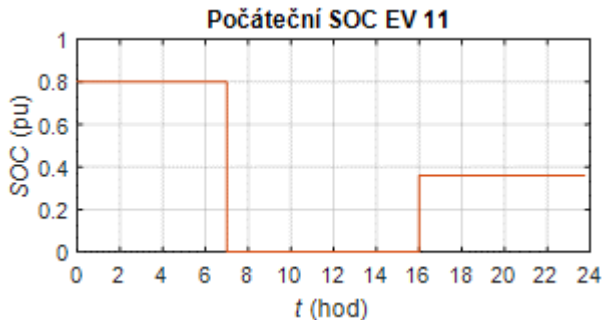
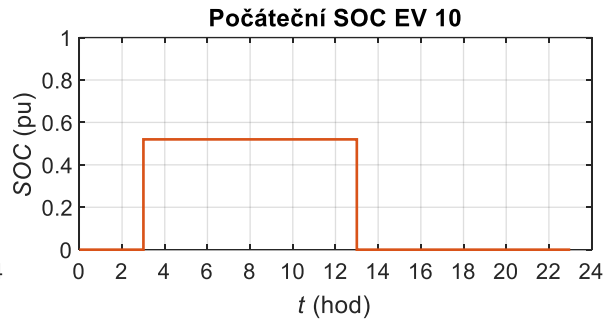
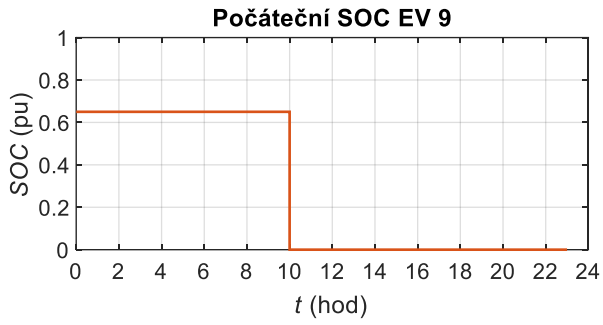












PŘÍLOHA B – VÝSLEDKY MODELOVÁNÍ

