



# 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

## MOŽNOSTI PROVOZU SÍTĚ SE ZDROJI ROZPTÝLENÉ VÝROBY V OSTROVNÍM PROVOZU

OPTIONS OF NETWORK OPERATION WITH DISTRIBUTED GENERATION SOURCES IN ISLAND  
OPERATION

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Mareček

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Kopička

BRNO 2018

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**  
Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Tomáš Mareček

**ID:** 152867

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

## NÁZEV TÉMATU:

**Možnosti provozu sítě se zdroji rozptýlené výroby v ostrovním provozu**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Studium problematiky řízení sítí, distribuované výroby a ostrovních provozů
2. Návrh koncepce možnosti provozu ostrovní sítě s malými distribuovanými zdroji
3. Návrh algoritmů řízení
4. Ověření navrhnutých řešení počítačovou simulací

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 21.5.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Marek Kopička

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

## 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.

Bibliografická citace práce:

MAREČEK, T. *Možnosti provozu sítě se zdroji rozptýlené výroby v ostrovním provozu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marek Kopička.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Možnosti provozu sítě se zdroji rozptýlené výroby v ostrovním provozu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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: 22.05.2018

.....

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Marku Kopickevi za odborné vedení, cenné rady a připomínky k diplomové práci. Zároveň bych chtěl poděkovat rodičům za vytrvalou podporu během dlouhých let mého studia.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá řízením ostrovního provozu pomocí zdrojů distribuované výroby. V teoretické části práce je popsána elektrizační soustava České republiky, její předpokládaný vývoj a předpokládaný výkon instalovaného výkonu distribuované výroby. Tyto zdroje jsou následně popsány. V další části jsou uvedeny některé technologické části ostrovního provozu a zmíněny požadavky, které jsou na něj kladeny. Následující část práce zmiňuje plánovaný rozvoj chytrých sítí a některé její funkcionality. Praktická část práce popisuje vytvořené modely prvků v programu PSCAD. Z těchto prvků jsou vytvořeny dva mírně odlišné modely sítě. Na těchto modelech sítí jsou provedeny simulace, v kterých dojde k vytvoření ostrovního provozu. Během ostrovního provozu jsou testovány některé funkcionality sítě, např. reakce ostrovního provozu na nárůst zatížení, pokles zatížení a další.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

distribuovaná výroba, ostrovní provoz, chytré sítě, řízení ostrovního provozu, PSCAD

## **ABSTRACT**

This diploma thesis presents managing of the island mode using distributed generation. In the theoretical part of the thesis, the power system of the Czech Republic is described, together with its future development, and future development of installed capacity of distributed generation. Types of distributed generation are also mentioned. Next part of this work is focused on technological parts of islanding operation and its requirements. The following part describes components of the smart grids and mentions some of its functionalities. The practical part of the thesis describes the created models of components in PSCAD programme. From those components two slightly different grid models are created. On those grid models, simulations are made, during which island mode is created. Some of the grid functionalities are tested during those simulations, for example; reaction of the island mode for load increase, load decrease and others.

## **KEY WORDS**

distributed generation, island mode, smart grids, island mode control system, PSCAD

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>11</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>14</b>
<b>2 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA ČESKÉ REPUBLIKY .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 OČEKÁVANÝ ENERGETICKÝ VÝVOJ.....</b>	<b>15</b>
2.1.1 OČEKÁVANÝ VÝVOJ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY DO ROKU 2040.....	16
2.1.2 OČEKÁVANÝ VÝVOJ OZE DO ROKU 2040.....	17
<b>3 PROBLEMATIKA DISTRIBUOVANÉ VÝROBY (MALÉ ZDROJE, TOČIVÉ/INVERTOROVÉ) .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1 KOGENERAČNÍ JEDNOTKY .....</b>	<b>20</b>
<b>3.2 FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY .....</b>	<b>21</b>
<b>3.3 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY.....</b>	<b>21</b>
<b>3.4 VODNÍ ELEKTRÁRNY.....</b>	<b>23</b>
<b>3.5 AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE .....</b>	<b>23</b>
3.5.1 BATERIE .....	23
3.5.2 AKUMULACE ENERGIE PROSTŘEDNICTVÍM STLAČENÉHO VZDUCHU.....	24
3.5.3 SETRVAČNÍK .....	25
3.5.4 PRŮTOKOVÁ BATERIE .....	25
3.5.5 SUPERKAPACITOR .....	25
<b>3.6 MOŽNOSTI ŘÍZENÍ A ZAČLENĚNÍ DO SÍTĚ .....</b>	<b>26</b>
<b>4 OSTROVNÍ PROVOZ .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1 TECHNOLOGICKÉ PRVKY OSTROVNÍHO PROVOZU.....</b>	<b>27</b>
<b>4.2 POŽADAVKY NA OSTROVNÍ PROVOZ.....</b>	<b>28</b>
<b>5 CHYTRÉ SÍTĚ.....</b>	<b>29</b>
<b>5.1 PROJEKTY V EU .....</b>	<b>30</b>
5.1.1 GRID4EU .....	30
5.1.2 INTERFLEX.....	31
<b>5.2 PRVKY CHYTRÝCH SÍTÍ.....</b>	<b>31</b>
5.2.1 PŘENOSOVÁ SÍŤ .....	31
5.2.2 DISTRIBUČNÍ SÍŤ .....	32
5.2.3 AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE .....	32
5.2.4 ŘÍZENÍ VÝROBY A SPOTŘEBY.....	32
<b>5.3 VYBRANÉ TECHNICKÉ PROBLÉMY.....</b>	<b>32</b>
5.3.1 ZVÝŠENÍ INTEGRACE DISTRIBUOVANÝCH ZDROJŮ .....	32
5.3.2 INOVATIVNÍ MANAGEMENT VN A NN SÍTÍ .....	33
5.3.3 ANTI-OSTROVNÍ SYSTÉM .....	33
5.3.4 POKROČILÝ MONITORING NN SÍTÍ.....	33
5.3.5 OSTROVNÍ PROVOZ .....	34

---

<b>6 VYTVOŘENÉ MODEL Y V PROGRAMU PSCAD .....</b>	<b>35</b>
<b>6.1 MODEL DISTRIBUOVANÉHO ZDROJE .....</b>	<b>35</b>
6.1.1 MODEL DISTRIBUOVANÉHO ZDROJE MASTER .....	36
6.1.2 MODEL DISTRIBUOVANÉHO ZDROJE SLAVE.....	37
<b>6.2 MODEL AKUMULAČNÍHO ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>38</b>
<b>6.3 MODEL ODBĚRU .....</b>	<b>39</b>
<b>6.4 MODEL VEDENÍ .....</b>	<b>42</b>
<b>6.5 MODEL SÍŤE.....</b>	<b>42</b>
<b>6.6 MODEL VYPÍNAČE .....</b>	<b>42</b>
<b>6.7 MODEL DISPEČERSKÉHO ŘÍZENÍ.....</b>	<b>43</b>
<b>7 SIMULACE .....</b>	<b>44</b>
<b>7.1 SIMULACE Č. 1.....</b>	<b>45</b>
<b>7.2 SIMULACE Č. 2.....</b>	<b>48</b>
<b>7.3 SIMULACE Č. 3.....</b>	<b>50</b>
<b>7.4 SIMULACE Č. 4.....</b>	<b>53</b>
7.4.1 SIMULACE Č. 4.A .....	53
7.4.2 SIMULACE Č. 4.B .....	56
<b>7.5 SIMULACE Č. 5.....</b>	<b>58</b>
7.5.1 SIMULACE Č. 5.A .....	59
7.5.2 SIMULACE Č. 5.B .....	62
<b>8 ZÁVĚR.....</b>	<b>64</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>66</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3.1: Zapojení asynchronního generátoru s napájeným rotorem u větrné elektrárny [14] ....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3.2: Zapojení synchronního generátoru větrné elektrárny [15] .....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 6.1: Grafické zobrazení jednotlivých modelů .....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 6.2: Nastavení modulu synchronizace .....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 6.3: Schéma řízení master zdroje během simulace .....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 6.4: Nastavený výkon distribuovaného zdroje během simulace.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 6.5: Příklad nastavení samotného modulu zařízení pro akumulární zařízení.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 6.6: Nastavení jednotlivých kroků pro snížení/zvýšení spotřeby .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6.7: Snížení odběru při poklesu napětí .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6.8: Nastavení změny odebíraného výkonu v čase .....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 6.9: Příklad nastavení ochrany vypínače .....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 7.1: Model simulované sítě pro simulace č. 1 až č. 4 .....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 7.2: Simulace č. 1 – napětí sítě; napětí měřené u zdrojů, akumulárního zařízení a odběrů; výkony zdrojů a akumulárního zařízení; odebírané výkony u odběrů; výkon tekoucí do sítě přes vypínač; stupeň nabití akumulárního zařízení .....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 7.3: Simulace č. 2 – napětí měřené u zdrojů, akumulárního zařízení a odběrů; výkony zdrojů a akumulárního zařízení; odebírané výkony u odběrů; výkon tekoucí do sítě přes vypínač; stupeň nabití akumulárního zařízení.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 7.4: Simulace č. 3 – napětí měřené u zdrojů, akumulárního zařízení a odběrů; výkony zdrojů a akumulárního zařízení; odebírané výkony u odběrů; výkon tekoucí do sítě přes vypínač; stupeň nabití akumulárního zařízení.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 7.5: Simulace č. 4.a – napětí měřené u zdrojů, akumulárního zařízení a odběrů; výkony zdrojů a akumulárního zařízení; odebírané výkony u odběrů; výkon tekoucí do sítě přes vypínač; stupeň nabití akumulárního zařízení.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 7.6: Simulace č. 4.b – napětí měřené u zdrojů, akumulárního zařízení a odběrů; výkony zdrojů a akumulárního zařízení; odebírané výkony u odběrů; výkon tekoucí do sítě přes vypínač; stupeň nabití akumulárního zařízení.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 7.7: Model simulované sítě pro simulace č. 5.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 7.8: Simulace č. 5.a – napětí měřené u zdrojů, akumulárního zařízení a odběrů; výkony zdrojů a akumulárního zařízení; odebírané výkony u odběrů; výkon tekoucí do sítě přes vypínač; stupeň nabití akumulárního zařízení.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 7.9: Simulace č. 5.b – napětí měřené u zdrojů, akumulárního zařízení a odběrů; výkony zdrojů a akumulárního zařízení; odebírané výkony u odběrů; výkon tekoucí do sítě přes vypínač; stupeň nabití akumulárního zařízení.....</i>	<i>63</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2.1: Předpokládaný vývoj hrubé výroby elektrické energie [3]</i> .....	17
<i>Tab. 2.2: Předpokládaná hrubá výroba elektřiny z obnovitelných zdrojů energie do roku 2040 [3]</i> .....	19
<i>Tab. 3.1: Předpokládaný vývoj instalovaného výkonu distribuované výroby do roku 2040 [16]</i> .	20
<i>Tab. 3.2: Porovnání technologií skladování elektrické energie stlačeným vzduchem [19]</i> .....	24
<i>Tab. 5.1: Porovnání tradiční a chytré sítě dle [23]</i> .....	29
<i>Tab. 7.1: Parametry distribuovaného master zdroje pro simulace č. 1 až č. 4</i> .....	44
<i>Tab. 7.2: Parametry distribuovaného slave zdroje pro simulace č. 1 až č. 4</i> .....	44
<i>Tab. 7.3: Parametry akumulčního zařízení pro simulace č. 1 až č. 4</i> .....	44
<i>Tab. 7.4: Nastavení odběrů během simulace č. 1</i> .....	45
<i>Tab. 7.5: Nastavení odběrů během simulace č. 2</i> .....	48
<i>Tab. 7.6: Nastavení slave zdroje během simulace č. 2</i> .....	48
<i>Tab. 7.7: Nastavení odběrů během simulace č. 3</i> .....	50
<i>Tab. 7.8: Nastavení odběrů během simulace č. 4</i> .....	53
<i>Tab. 7.9: Parametry akumulčního zařízení v simulaci č. 5</i> .....	58
<i>Tab. 7.10: Nastavení odběrů během simulace č. 5</i> .....	58
<i>Tab. 7.11: Nastavení slave zdroje č. 1 v simulaci č. 5.a</i> .....	59
<i>Tab. 7.12: Nastavení slave zdroje č. 2 v simulaci č. 5.a</i> .....	59
<i>Tab. 7.13: Nastavení slave zdroje č. 1 v simulaci č. 5.b</i> .....	62
<i>Tab. 7.14: Nastavení slave zdroje č. 2 v simulaci č. 5.b</i> .....	62

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$\cos \varphi$	účinník	(-)
$\cos \varphi_{nom}$	nominální účinník	(-)
$df$	odchylka frekvence	(Hz)
$K_{Pf}$	citlivostní součinitel činného výkonu na kmitočtu	(-)
$K_{Qf}$	citlivostní součinitel jalového výkonu na napětí	(-)
$NP$	citlivostní součinitel činného výkonu na napětí	(-)
$NQ$	citlivostní součinitel jalového výkonu na napětí	(-)
$P$	činný výkon	(kW)
$P_{a1}$	činný výkon akumulčního zařízení	(kW)
$P_{c1}$	odbíraný činný výkon odběru č. 1	(kW)
$P_{c2}$	odbíraný činný výkon odběru č. 2	(kW)
$P_{c3}$	odbíraný činný výkon odběru č. 3	(kW)
$P_G$	sumární činný výkon dodávaný generátory	(kW)
$P_{grid}$	činný výkon sítě	(kW)
$P_{max}$	maximální dodávaný činný výkon	(kW)
$P_{min}$	minimální dodávaný činný výkon	(kW)
$P_{nom}$	nominální dodávaný činný výkon	(kW)
$P_S$	sumární činné zatížení ostrova včetně vlastní spotřeby elektráren	(MW)
$P_{s1}$	činný výkon zdroje č. 1	(kW)
$P_{s2}$	činný výkon zdroje č. 2	(kW)
$P_Z$	celkové ztráty v síti	(MW)
$P_0$	nastavená hodnota odběru činného výkonu	(kW)
$Q$	jalový výkon	(kVAr)
$Q_{a1}$	jalový výkon akumulčního zařízení	(kVAr)
$Q_{c1}$	odebíraný jalový výkon odběru č. 1	(kVAr)
$Q_{c2}$	odebíraný jalový výkon odběru č. 2	(kVAr)
$Q_{c3}$	odebíraný jalový výkon odběru č. 3	(kVAr)
$Q_{grid}$	jalový výkon sítě	(kVAr)
$Q_{max}$	maximální dodávaný jalový výkon	(kVAr)
$Q_{min}$	minimální dodávaný jalový výkon	(kVAr)
$Q_{nom}$	nominální dodávaný jalový výkon	(kVAr)
$Q_{s1}$	jalový výkon zdroje č. 1	(kVAr)

$Q_{s2}$	jalový výkon zdroje č. 2	(kVAr)
$Q_0$	nastavená hodnota odběru jalového výkonu	(kVAr)
$S_0$	nastavená hodnota odebíraného výkonu odběru	(kVA)
$SOC$	stupeň nabití akumulčního zařízení	(%)
$U$	napětí	(kV)
$U_{a1}$	napětí na akumulčním zařízení	(kV)
$U_{c1}$	napětí na odběru č. 1	(kV)
$U_{c2}$	napětí na odběru č. 2	(kV)
$U_{c3}$	napětí na odběru č. 3	(kV)
$U_{grid}$	napětí na modelu sítě	(kV)
$U_{s1}$	napětí na zdroji č. 1	(kV)
$U_{s2}$	napětí na zdroji č. 2	(kV)
$U_0$	nominální napětí zátěže	(kV)
$x$	parametr pro krokovou změnu zatížení	(-)
AMM	Automatické řízení měřidel, z angl. Automatic Meter Management	
AMI	Pokročilá infrastruktura měřidel, z angl. Advanced Meter Infrastructure	
ASS	Autonomní spínací systém, z angl. Autonomous Switching System	
DFIG	Asynchronní generátor s napájeným rotorem, Double-Fed Induction Generator	
DR	Reakce zátěže, z angl. Demand Response	
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity	
ES ČR	Elektrizační soustava České republiky	
FVE	Fotovoltaická elektrárna	
HDO	Hromadné dálkové ovládání	
NN	Nízké napětí	
OLTC	Transformátor se změnou napětí pod zatížením, z angl. On Load Tap Changer	
OZE	Obnovitelné zdroje energie	
PMU	Fázorová měřicí jednotka, z angl. Phasor Measurement Unit	
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna	
SCADA	Dispečerské řízení a sběr dat, z angl. Supervisory Control And Data Acquisition	
VE	Vodní elektrárna	
VN	Vysoké napětí	
VTE	Větrné elektrárny	

WAMS      Monitorování rozsáhlých elektrických sítí, z angl. Wide Area Monitoring System

# 1 ÚVOD

V poslední době dochází v elektrizační soustavě v České republice, ale i ve světě, ke značnému rozvoji. Dochází k připojování nových distribuovaných zdrojů elektrické energie, převážně využívající obnovitelné zdroje energie, a proto je jejich výroba obtížně predikovatelná. Podle Národního akčního plánu pro chytré sítě a Státní energetické koncepce České republiky bude tento trend v následujících desetiletích pokračovat. S nárůstem distribuované výroby vznikají pro provozovatele elektrizační soustavy nové výzvy, související především s kvalitou elektrické energie, stabilitou systému, systémem ochrany a další.

Chytré sítě by měly pomoci tyto zdroje integrovat a rozšiřovat nabídku služeb. Mohly by poskytovat více informací a přinášet více možností konečným spotřebitelům elektrické energie. V posledních letech probíhala v Evropě řada projektů, které se zabývaly chytrými sítěmi, a které si definovaly různé cíle. Nejaktivnějšími zeměmi jsou Německo, Spojené království a Francie. Mezi významné projekty, do kterých se zapojila Česká republika, můžeme zařadit GRID4EU nebo InterFlex.

Řada z těchto projektů měla za cíl vytvoření stabilního ostrovního provozu v určité části elektrizační soustavy. Ostrovní provoz může vzniknout plánovaně nebo při poruše, kdy postižená část sítě ztrácí synchronní spojení se zbytkem soustavy, nebo při obnově soustavy ze tmy (najezení zdroje bez podpory vnější sítě). Ostrovní provoz se vyznačuje značnými nároky na regulační schopnosti, protože dochází ke značným změnám systémových veličin. Požadavky na ostrovní provoz pro provozovny připojené k distribuční soustavě jsou uvedeny v Pravidlech provozování distribučních soustav v příloze číslo 7: Pravidla pro podpůrné služby zdrojů připojených k sítím provozovatele distribuční soustavy.

Práce se zabývá provozem zdrojů rozptýlené výroby v ostrovním provozu. Pro vytvoření modelů a samotných simulací slouží program PSCAD. Cílem práce je vytvořit model elektrizační soustavy s distribuovanými zdroji v programu PSCAD a navrhnout algoritmus řízení v ostrovním provozu. Navržené řešení ověřit počítačovými simulacemi, během kterých lze testovat vybrané funkcionality navržené sítě.

## 2 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA ČESKÉ REPUBLIKY

Základ elektrizační soustavy České republiky (ES ČR) tvoří přenosová soustava. Tato soustava je řešena okružním rozvodem a zajišťuje přenosy na velké vzdálenosti i ve velkých objemech. Je tvořena sítí s napětím 400 kV, 220 kV a vybranými vedeními a zařízeními s napětím 110 kV. Do této soustavy jsou vyvedeny výkony velkých tzv. systémových elektráren a pomocí této soustavy jsme propojeni se sítěmi dalších členů ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity). Provozovatelem této soustavy je společnost ČEPS a.s., která dispečersky zajišťuje rovnováhu mezi výrobou a spotřebou elektrické energie v každém okamžiku. ČEPS a.s. spravuje celkem 5717 km vedení.

Na přenosovou soustavu navazuje distribuční soustava, kterou tvoří několik napěťových úrovní od 110 kV až po síť nízkého napětí. Distribuční soustava 110 kV je provozována jako okružní a tvoří základní pilíř distribuční soustavy a zajišťuje tranzit elektřiny z uzlových transformoven 400/110 kV a 220/110 kV do transformoven 110/vn kV. Do těchto sítí je vyveden výkon řady elektráren o výkonech desítek MW. Největší provozovatelé distribučních soustav jsou společnosti ČEZ Distribuce a.s., E.ON Distribuce a.s. a PREdistribuce, a.s.

Distribuční soustavy nebyly obecně projektovány pro připojení distribuovaných zdrojů, ale pro jednosměrné toky od nadřazené soustavy k pasivním odběratelům. Zvyšování výkonu distribuovaných zdrojů v distribučních soustavách by umožňovalo obousměrné toky energií a podporu přenosové soustavy. Při připojení většího množství nestabilních distribuovaných zdrojů, např. fotovoltaické elektrárny nebo větrné elektrárny, musí být schopna soustava tyto výkyvy regulovat. Vhodně distribuované zdroje elektrické energie mohou zvyšovat spolehlivost dodávek tím, že v případě výpadku nadřazené soustavy mohou fungovat v ostrovním provozu a zajišťovat energii pro svůj vlastní provoz a pro spotřebitele v okolí [1].

Ke konci roku 2016 byl celkový instalovaný výkon v ES ČR 21 989 MW. Instalovaný výkon jaderných elektráren činil 4 290 MW, parních elektráren 10 850 MW, paroplynových elektráren 1363,5 MW, plynových a spalovacích elektráren 874 MW, vodních elektráren (VE) 1090,2 MW, přečerpávacích vodních elektráren (PVE) 1171,5 MW, větrných elektráren (VTE) 282 MW a fotovoltaických elektráren (FVE) 2067,9 MW. Celková výroba elektřiny brutto klesala již čtvrtým rokem a dosáhla 83301,9 GWh, což představuje pokles o 586,4 GWh proti roku 2015. Tuzemská brutto spotřeba elektřiny již druhým rokem rostla na 72412,3 GWh a byla největší za posledních 10 let. Podíl výroby elektřiny brutto z obnovitelných zdrojů energie (OZE) na tuzemské brutto spotřebě klesl z 13,27 % pro rok 2015 na 12,97 % pro rok 2016. Tento pokles je zapříčiněn především růstem tuzemské brutto spotřeby a velice mírným poklesem výroby z OZE [2].

### 2.1 Očekávaný energetický vývoj

Dne 18. května 2015 byla schválena vládou ČR aktualizovaná Státní energetická koncepce na následujících 25 let. Tato koncepce stanovuje strategické cíle energetiky ČR a definuje strategické priority. Jejím posláním je zajistit spolehlivou, bezpečnou a k životnímu prostředí šetrnou dodávku energie pro potřeby obyvatelstva a ekonomiky ČR, a to za konkurenceschopné a přijatelné ceny za standardních podmínek. V krizových situacích musí zabezpečit nepřerušované dodávky energie v rozsahu nezbytném pro fungování nejdůležitějších složek státu a přežití obyvatelstva.

Domácí zdroje pokrývají v České republice téměř 50 % spotřeby primárních energetických zdrojů, hlavně díky využití domácího černého a hnědého uhlí. Ukazatel dovozní energetické

závislosti je tak jeden z nejnižších v celé EU, kde je průměr na úrovni cca 60 %. V následujících letech by měla závislost na primárních energetických zdrojích mírně stoupat. V roce 2030 by výše dovozní energetické závislosti ČR neměla přesáhnout 65 % do roku 2030 a 70 % do roku 2040.

Podle predikcí ENTSO-E bude v následujících desetiletích docházet ke snižující se výkonové rezervě v okolních státech i v celé Evropě a je pravděpodobné, že hlavně stabilní zdroje dodávky energie budou v budoucnu chybět. Pro zajištění energetické bezpečnosti a soběstačnosti je proto rozumné zajistit určitou rezervu produkce elektřiny a zejména dostatek výrobních kapacit a jejich vhodný mix [3].

### 2.1.1 Očekávaný vývoj elektrizační soustavy do roku 2040

Celková výroba elektřiny v predikovaném období by měla mít vzestupnou tendenci. To odpovídá předpokladu postupného zvyšování spotřeby elektřiny ve všech sektorech národního hospodářství, s výjimkou spotřeby domácností.

České energetice dominují uhelné zdroje, které dodávají téměř 60 % elektrické energie a velkou část tepla prostřednictvím dálkového vytápění. Velká část těchto zdrojů se blíží hranici ekonomické a fyzické životnosti. Spotřeba hnědého a černého uhlí by měla plynule klesat a zbývající uhelné zásoby by se měly využívat co možná nejefektivnějším a nejekologičtějším způsobem.

Druhým nejvýznamnějším zdrojem energie v České republice, využívaným v současné době hlavně pro výrobu elektřiny, jsou jaderné zdroje. Jaderné elektrárny Temelín a Dukovany vyrábějí přibližně 30 % elektrické energie v České republice.

Velkou strategickou výhodou jaderných elektráren je vysoká koncentrace paliva, která umožňuje vytvoření strategických zásob na několik let provozu. Variabilita cen paliva se jen mírně promítá do ceny produkované elektrické energie, a proto je její cena lépe předvídatelná. Objem počáteční investice a délka investičního horizontu předurčuje jaderné elektrárny jen pro velké a dlouhodobé investory. Statní energetická koncepce předpokládá dostavbu dalších jaderných bloků s výrobou přibližně 20 TWh ročně do roku 2035, prodloužení životnosti stávajících čtyř bloků v elektrárně Dukovany na 50 až 60 let a později případná stavba dalšího bloku v horizontu odstavení stávajících bloků této jaderné elektrárny. Jaderná energie by dlouhodobě mohla přesáhnout 50% podíl na výrobě elektřiny a nahradit tak významnou část uhelných zdrojů. Dále je vhodné zvýšení využití produkované tepelné energie z jaderných zdrojů k vytápění větších městských aglomerací.

V tab. 2.1 je předpokládaný vývoj hrubé výroby elektrické energie dle zdrojů do roku 2040. Hlavními změnami v bilanci výroby elektřiny je postupný pokles výroby elektrické energie z černého a hnědého uhlí a předpoklad výstavby nového jaderného zdroje mezi lety 2033 až 2037 a tedy nárůst výroby z jaderných elektráren. Mělo by také dojít k nárůstu výroby elektrické energie ze zemního plynu, a to zejména v kogeneraci a ve špičkových zdrojích. Výkonová bilance ES ČR by měla zůstat trvale přebytková, nicméně zejména mezi roky 2020 a 2025 by se měla dostat významně pod cílové hodnoty (10 až 15 %). V případě zpoždění ve výstavbě a následného uvedení do provozu nových jaderných bloků by se energetika ČR měla dostat do stavu výkonově mírně deficitního a energeticky dovozního [3].



Tab. 2.1: Předpokládaný vývoj hrubé výroby elektrické energie [3]

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
černé uhlí (GWh)	6052,0	5832,4	4198,4	4134,3	2824,0	2745,0	1989,1
hnědé uhlí (GWh)	42936,1	40389,6	36951,3	29167,5	27947,7	23366,2	13497,2
zemní plyn (GWh)	1125,7	3624,6	3914,4	3973,4	4043,5	4126,6	7101,1
ostatní plyny (GWh)	1080,4	1130,5	1130,5	1130,5	1130,5	1130,5	1130,5
jádro (GWh)	27998,2	31495,1	31495,1	30384,2	31495,1	41177,9	43204,5
ostatní paliva (GWh)	814,8	846,6	917,4	1294,5	1446,3	1446,3	1446,3
OZE (GWh)	5902,8	10122,3	11548,8	13742,0	15125,6	17638,7	20173,0
celkem (GWh)	85910,0	93443,2	90156,0	83826,4	84012,7	91631,2	88541,7

Za problematický stav z pohledu zajištění bezpečného a spolehlivého provozu ES ČR lze označit situaci, kdy by útlum výroby z uhlí byl doprovázen snížením výroby z jaderných elektráren. Postupně se rozvíjející decentrální výroba elektrické energie svým potenciálem plně nenahradí stávající výrobu z konvenčních zdrojů z hlediska provozních charakteristik, příspěvků do bilance ČR a ani výkonové přiměřenosti [16].

### 2.1.2 Očekávaný vývoj OZE do roku 2040

Potenciál energie z obnovitelných zdrojů je omezen přírodními podmínkami a požadavky na ochranu životního prostředí. Obnovitelné zdroje energie snižují závislost na dovozu a ve většině případů jsou šetrné k životnímu prostředí. Je však vhodné zmínit, že obnovitelný zdroj energie neznamená automaticky zdroj ekologický. Do roku 2020 se Česká republika zavázala, že 13 % hrubé konečné spotřeby energie bude kryto z obnovitelných zdrojů energie.

**Celková výroba elektřiny z obnovitelných zdrojů** dle státní energetické koncepce by měla trvale růst. Je snaha využít co nejvíce tento tuzemský energetický zdroj za předpokladu jeho konkurenceschopnosti.

**Vodní energie** je díky více než stoletému rozvoji vodních elektráren na našem území téměř vyčerpána a nepředpokládá se žádný další zásadní rozvoj. Důležitá je pružnost těchto zdrojů, protože mohou do určité míry vykrývat rozdíly mezi spotřebou a výrobou. Přecherčovací vodní elektrárny, které máme, jsou jedinými zdroji akumulárního typu v ČR. Spolu s ostatními vodními zdroji se jedná o zdroje pro špičkovou spotřebu.

Největší potenciál **větrné energie** je v oblastech Krušných hor, Vysočiny a Jeseníků. Tyto oblasti s pravidelným, dostatečně silným a stabilním větrem jsou však limitovány krajinným reliéfem, sídelními celky, chráněnými přírodními oblastmi a dalšími. Dle studie Ústavu fyziky

atmosféry je realistický potenciál ve středním scénáři 2300 MW instalovaného výkonu ve větrných elektrárnách [30]. Tento potenciál je však realizovatelný pouze při vstřícném přístupu místních komunit v rámci povolovacích procesů a jeho naplnění v plném rozsahu je tedy nepravděpodobné.

Potenciál **sluneční energie** je limitován především klimatickými podmínkami ČR. Využití sluneční energie pro výrobu elektřiny, vzhledem k nepřiměřené podpoře, zaznamenalo prudký nárůst instalovaného výkonu mezi lety 2008 a 2010. Tento nárůst naráží na limity sítí a ochranu zemědělské půdy a vyústil v omezení nákladů na podporu. V budoucnu bude především možné a vhodné využít solární energii jako zdroj malých výkonů na střeších budov. Dle referenčního scénáře Národního akčního plánu Smart Grids je výkonový potenciál přibližně 5800 MW.

Dle Akčního plánu pro biomasu je potenciál využití **energie z biomasy** v rozmezí 160 až 217 PJ, a to bez ohrožení potravinové bezpečnosti. V současné době je využití energie z biomasy přibližně 90 PJ ročně.

**Geotermální energie** má v ČR zatím neověřený potenciál, a to jak v oblasti vytápění a klimatizace, tak v oblasti výroby elektřiny. Tento potenciál však může být podle předběžných analýz významný [3].

Energetické využití účelově selektovaného komunálního odpadu může být potenciální náhradou primárních energetických zdrojů (výroba elektrické energie a tepla) a zároveň řešení k odstranění nevyužití složky odpadu. Ve světě již existují vyspělé technologie, vyhovující všem technickým i enviromentálním požadavkům. V České republice jsou pouze tři zařízení na energetické využití odpadu, a to v Praze, v Liberci a v Brně. Většina komunálního odpadu tedy končí na skládkách [29].

V tab. 2.2 je předpokládaná výroba elektrické energie dle typu obnovitelného zdroje do roku 2040.

Tab. 2.2: Předpokládaná hrubá výroba elektřiny z obnovitelných zdrojů energie do roku 2040 [3]

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
biomasa (GWh)	1492,0	1878,9	2331,0	2540,6	3243,4	3946,1	4648,8
bioplyn (GWh)	634,6	2754,0	3121,2	3416,0	3696,0	3976,0	4256,0
biologicky rozl. část tuhého komunálního odpadu (GWh)	35,6	91,2	138,1	310,0	425,2	425,2	425,2
vodní elektrárny (GWh)	2789,5	2475,6	2522,7	2524,5	2526,2	2528,0	2529,7
větrné elektrárny (GWh)	335,5	647,2	1013,8	1328,4	1598,4	1945,8	2291,4
fotovoltaické elektrárny (GWh)	615,7	2275,5	2403,6	3567,4	3567,4	4725,7	5883,9
geotermální elektrárny (GWh)	0,0	0,0	18,4	55,2	69,0	92,0	138,0
celkem (GWh)	5902,8	10122,3	11548,8	13742,0	15125,6	17638,7	20173,0
podíl OZE na hrubé konečné spotřebě (%)	8,68	11,98	14,17	15,82	17,30	19,09	21,07

### 3 PROBLEMATIKA DISTRIBUOVANÉ VÝROBY (MALÉ ZDROJE, TOČIVÉ/INVERTOROVÉ)

Distribuované zdroje jsou modulární a decentralizované zdroje elektrické energie, které jsou umístěny blíže k zátěži. Tyto systémy mívají výkon 10 MW a nižší. Zdroje distribuované výroby většinou využívají obnovitelné zdroje energie, např. menší vodní elektrárny, elektrárny na biomasu, elektrárny na bioplyn, fotovoltaické elektrárny, větrné elektrárny a další. Jedná se však i o kogenerační jednotky menších výkonů a v neposlední řadě i o zařízení pro akumulaci elektrické energie. Tyto zdroje mají stále důležitější roli v distribučním systému elektrické energie.

V tab. 3.1 je předpokládaný vývoj distribuované výroby v České republice, dle Národního akčního plánu pro chytré sítě, do roku 2040.

Tab. 3.1: Předpokládaný vývoj instalovaného výkonu distribuované výroby do roku 2040 [16]

rok	VE bez PVE (MW)	FVE (MW)	VTE (MW)	mikrokogenerace (MW)	bioplyn a skládkový plyn (MW)	geotermální zdroje (MW)	celkem (MW)
2019	1097	2404	507	303	534	4	4849
2024	1098	2986	653	455	554	8	5753
2029	1098	3566	799	607	574	12	6656
2040	1100	5884	1146	910	604	23	9667

#### 3.1 Kogenerační jednotky

Kogenerační jednotky slouží ke společné výrobě tepla a elektřiny. Jedná se o říditelný zdroj energie, který má možnost poskytovat některé systémové služby. Kogenerační jednotky jsou vhodné v místech s celoročním odběrem tepla i elektřiny. Může se jednat, např. o nemocnice, školy, sportovní areály, ubytovací zařízení, obchodní domy, ale i chemický, petrochemický, papírenský, textilní, keramický a stavební průmysl. Základem kogenerační jednotky je soustrojí motor-generátor. Motor je upraven na spalování zemního plynu a je upraven z koncepce pístového motoru. Motor i generátor produkují teplo, které je odváděno do topného systému přes oddělovací výměník. Pro zvýšení využití tepla se instalují vhodné akumulární nádrže. Dominantním palivem pro pohon kogeneračních jednotek je zemní plyn. V posledních letech však roste počet zařízení využívajících pro svůj provoz bioplyn, skládkový plyn, kalový plyn nebo jiná alternativní paliva, jako např. důlní plyn [10] a [11].

Významnou podskupinou kogenerace je tzv. mikrokogenerace. Jde o zařízení s výkonem menším než 30 kW (dle [16] menším než 50 kW). Tyto jednotky by měly najít využití především v malých hotelech, živnostenských dílnách a domácnostech. Pro jednotky o výkonu menším než 20 kW přestávají být zážehové motory s vnitřním spalováním ekonomicky výhodné. Zde se otevírá prostor pro Stirlingův motor s vnějším spalováním, díky jeho jednoduché údržbě a provozu [11].

Trigenerace je kombinovaná výroba elektřiny, tepla a chladu. Technologicky se jedná o spojení kogenerační jednotky s absorpční chladicí jednotkou. Hlavní výhodou je z pohledu provozu kogenerační jednotky, protože umožňuje využít teplo i v létě, a tím dosáhnout většího chodu

jednotky. Častým příkladem trigenerace je výroba tepla v zimních měsících a výroba chladu v letních měsících. Trigenerace je však investičně velmi nákladná [11].

Příkladem výrobce kogeneračních jednotek je firma Tedom, která nabízí instalace kogeneračních jednotek na zemní plyn od výkonu 6,5 kW do 10,426 MW. Tento výrobce také nabízí kogenerační jednotky na bioplyn a LPG [12].

### 3.2 Fotovoltaické elektrárny

Fotovoltaické elektrárny můžeme rozdělit z hlediska aplikace na 3 systémy:

- autonomní systémy,
- hybridní systémy s akumulací,
- systémy přímo spojené se sítí bez akumulace.

Autonomní systémy se využívají převážně v místech, kde není dostupná veřejná elektrorozvodná síť. Jedná se, např. o zdroj elektrické energie pro chaty, napájení dopravní signalizace, telekomunikačních zařízení a další. Nevyužitá elektrická energie se může ukládat do baterií nebo jiných zařízení k tomu vhodných.

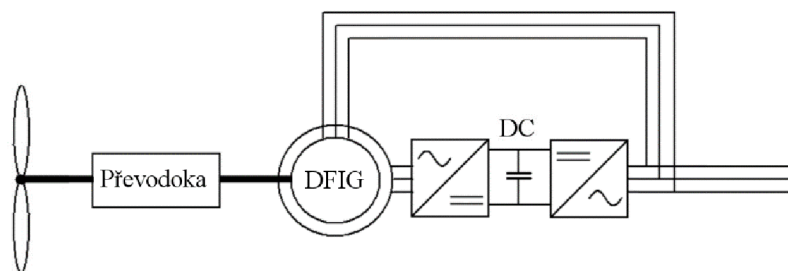
Hybridní fotovoltaické systémy jsou kombinací autonomního systému (Grid-off) a systému připojeného k síti (Grid-on). Tento systém má snahu omezit přetok elektrické energie do distribuční sítě a snaží se všechnu vyrobenou elektrickou energii spotřebovat v místě výroby. Přebytková energie ve výkonových špičkách může být využita do předem určených spotřebičů nebo k nabíjení baterií.

Naprostá většina FVE je připojena k distribuční síti (Grid-on). Většina těchto systémů byla postavena v režimu zeleného bonusu nebo výkupního tarifu. V režimu zeleného bonusu se velká část elektrické energie spotřebuje přímo v místě výroby. Tyto elektrárny dosahují menších výkonů a převážně jsou instalovány na střechách budov. Systém výkupního tarifu se využívá v případě, kdy veškerá elektrická energie je dodána výrobcem do elektrizační soustavy. Jedná se především o větší elektrárny [13].

V České republice byl ke konci roku 2016 instalovaný výkon FVE 2067,9 MW. Dominantní podíl na instalovaném výkonu mají elektrárny s instalovaným výkonem od 1 do 5 MW včetně. Dle [16] by se měl instalovaný výkon do roku 2040 téměř ztrojnásobit a dosáhnout hodnoty 5884 MW. Počítá se s rozvojem především menších elektráren instalovaných na střechách budov [2].

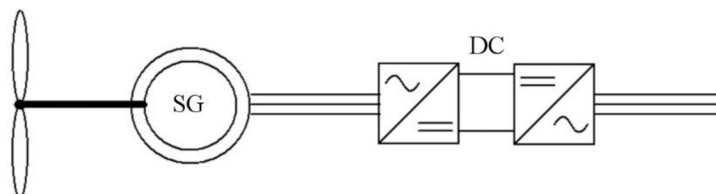
### 3.3 Větrné elektrárny

Pro výrobu elektrické energie se ve větrných elektrárnách používají asynchronní a synchronní generátory. Asynchronní generátor je v porovnání se synchronním jednodušší a finančně méně náročný a z hlediska provozu je spolehlivější. Jeho nevýhodou je malé rozpětí otáček. Asynchronní motory s kotvou nakrátko, pracující v generátorickém chodu, se používají na větrných elektrárnách středních a velkých výkonů. Asynchronní generátor s napájeným rotorem (DFIG – Double-Fed Induction Generator) zvyšuje regulační rozpětí otáček a umožňuje maximální využitelnost větru při nízkých rychlostech větru a minimalizuje mechanické namáhání při výkyvech větru. Zjednodušené schéma DFIG je na obr. 3.1[13].



Obr. 3.1: Zapojení asynchronního generátoru s napájeným rotorem u větrné elektrárny [14]

Toto řešení využívá například dánská firma Vestas, která má největší podíl na instalovaném výkonu v České republice.



Obr. 3.2: Zapojení synchronního generátoru větrné elektrárny [15]

Synchronní generátory pracují pouze při synchronních otáčkách větrné turbíny. Aby mohly pracovat v širším rozmezí otáček, je potřeba vyrobenou elektrickou energii nejdříve usměrnit a následně opět s využitím střídače převést na frekvenci sítě. Synchronní generátory s permanentními magnety jsou využívány pro malé větrné elektrárny s výkonem do 10 kW. Vyráběny jsou také synchronní generátory pro velké instalované výkony. Velmi se využívají synchronní generátory s budícím vinutím na rotoru, poháněné přímo přes turbínu bez převodovky. Výhodou tohoto řešení je snížení hmotnosti gondoly větrné elektrárny, hlukové emise, možnosti potenciálních poruch a ztrát v převodovce. Dle rychlosti otáčení rotoru se zapínají jednotlivé pólové dvojice. Takto vyrobená elektrická energie se upraví výkonovou elektronikou, při čemž vznikají dodatečné ztráty. Větrná elektrárna díky tomu dokáže pracovat v širokém rozpětí otáček turbíny. Tento princip využívá německý ENERCON, který má druhý největší podíl na instalovaném výkonu v České republice [15].

V České republice byl ke konci roku 2016 instalovaný výkon VTE 282 MW. Dominantní podíl na instalacích mají elektrárny s instalovaným výkonem větším než 1 MW. Největší instalovaný výkon je v Ústeckém, Karlovarském a Olomouckém kraji [2]. Dle [16] by se měl instalovaný výkon do roku 2040 téměř zčtyřnásobit a dosáhnout hodnoty 1146 MW.

### 3.4 Vodní elektrárny

Vodní elektrárny představují levný zdroj elektrické energie. Nezatěžují životní prostředí odpady a mají významný vodohospodářský význam, avšak narušují přirozené životní prostředí. Tento typ elektráren dokáže velmi pohotově reagovat na okamžitou spotřebu elektrické energie v energetické soustavě. Hydroelektrická energie je nejrozšířenější využívaný obnovitelný zdroj elektrické energie [17]. Dle [16] je potenciál využití VE téměř vyčerpán a již se nepředpokládá žádný významný nárůst instalovaného výkonu.

Ke konci roku 2016 mají VE v České republice instalovaný výkon 1090,2 MW. Z toho malé vodní elektrárny (instalovaný výkon do 10 MW) mají celkový instalovaný výkon 337,4 MW, ale vyrobily více energie než elektrárny nad 10 MW s instalovaným výkonem 752,8 MW [2].

Nejmenší výkony jsou připojovány v rámci objektu a vyrobená elektrická energie je určena pro vlastní spotřebu objektu. Přebytek elektrické energie se dodává do místní distribuční sítě. Malé vodní elektrárny o výkonech od 300 do 1000 kW lze připojit do distribuční sítě nn, vyšší výkony se zpravidla připojí do sítě vn [13].

PVE mají instalovaný výkon v České republice 1171,5 MW a jsou zatím jediným nástrojem, jak uchovat větší množství přebytečné elektrické energie po delší dobu. Je tedy zřejmé, že tyto zdroje plní velmi důležitou funkci v elektrizační soustavě [2].

### 3.5 Akumulace elektrické energie

Skladování elektrické energie pomáhá vyrovnávat rozdíl mezi výrobou a spotřebou elektrické energie. Nejvyužívanějším typem jsou přečerpávací vodní elektrárny, které mají z pravidla velké výkony a jsou většinou připojeny k přenosové soustavě. V distribuční síti může být skladování elektrické energie využito především na zlepšení kvality elektrické energie nebo pro napájení ostrovního provozu. Skladování elektrické energie je však nyní velmi drahé a neefektivní. V současné době je vynakládáno velké úsilí na zlepšení zařízení pro akumulaci elektrické energie. Jedná se například o skladování elektrické energie v bateriích, v stlačeném vzduchu, setrvačnicích atd.

#### 3.5.1 Baterie

Bateriové systémy mají výkon od několika kWh až po stovky MWh. Baterie jsou založeny na elektrochemickém principu a využívají přeměny elektrické energie na energii chemickou. Jsou zdrojem stejnosměrného proudu, proto je nutný invertor.

Během posledních dekád se významně používaly nikel-kadmiové a sodíkovo-sírové baterie. Poslední dobou se také stále více využívají lithium-iontové baterie, hlavně díky poklesu ceny nahaným automobilovým průmyslem.

**Sodíkovo-sírové baterie** umožňují velmi rychlé dobíjení a krátkodobé přetížení. Nedochází u nich k samovybíjení ani paměťovému efektu. Svým provozem neznečišťují životní prostředí, nevypouštějí do svého okolí žádné znečišťující látky, nezpůsobují hluk, ani vibrace. Nevýhodou je, že nemůžou být provozovány s vibracemi kvůli vnitřním roztaveným složkám, které musí zůstat v klidu.

**Nikel-kadmiové baterie** mají výborné mechanické vlastnosti a široký rozsah provozních teplot. Odolnost vůči nárazům a vibracím je předurčuje pro použití v náročných provozech. Další výhodou je vysoká spolehlivost a životnost. Umožňují odběr velmi vysokých proudů a vyznačují

se schopností velmi rychlého nabíjení. Při vybití dochází k malé změně napětí. Jejich nevýhodou je jedovatost kadmia a nižší měrná kapacita.

Hlavní předností **lithium-iontových baterií** je velmi malá hmotnost na instalovanou kWh. Tyto baterie umožňují rychlé vybití i nabíjení. Nedochází u nich k samovybití a samotné články je možné skoro úplně vybit bez ztráty. Jejich výroba i recyklace je velmi šetrná k životnímu prostředí. Jejich nevýhodou je pořizovací cena [13].

Malé baterie jsou většinou používány v kombinaci se solárním systémem podobného výkonu. Ke konci roku 2017 činí největší instalovaná kapacita bateriového systému 129 MWh a má výkon 100 MW. Jedná se o lithium-iontové baterie v Austrálii instalované firmou Tesla [18].

### 3.5.2 Akumulace energie prostřednictvím stlačeného vzduchu

Zařízení se nabíjí tím, že se elektrická energie přemění na energii stlačeného vzduchu. Energie se uloží ve formě potenciální energie a v případě potřeby je využita na generování elektrické energie skrz turbínu pohánějící generátor.

Dnes existuje celá řada konceptů v různém stádiu vývoje. Základní dělení této technologie je na adiabatickou, diabatickou a izotermální. Liší se v tom, jak je nakládáno s teplem během stlačování a expanze vzduchu.

Při diabatickém procesu je teplo, generované kompresí vzduchu, vypouštěno do okolí. Pro vybíjecí proces je nutný externí zdroj tepla, aby se zabránilo kondenzaci a zamrzání v expanzní části stroje. Tento systém je prozatím jediný, který byl komerčně realizován. Při adiabatickém procesu je teplo, vytvořené při kompresi, skladováno a je využito při expanzi vzduchu, díky tomu není potřeba žádný další zdroj tepla během fáze vybití. V izotermálním konceptu je snaha minimalizovat teplo vytvořené během komprese.

Různé koncepty se velmi liší v účinnosti cyklu, hustotě energie, době rozběhu, stavu vývoje a použití. V tab. 3.2 jsou uvedeny důležité parametry těchto konceptů [19].

Tab. 3.2: Porovnání technologií skladování elektrické energie stlačeným vzduchem [19]

	diabatická	adiabatická	izotermální
efektivita cyklu nyní (cíl)	0,54 (0,6)	- (0,7)	0,38 (0,8)
hustota energie (kWh/m <sup>3</sup> )	2-15	0,5-20	1-25
rozběhový čas (min)	10-15	5-15	< 1
rozsah výkonu	5 MW – 1 GW	1 MW – 1 GW	5 kW- 1 GW
status vývoje	aplikace/demonstrace	výzkum/demonstrace	výzkum/demonstrace

Ve světě již běží úspěšné projekty (McIntosh, USA; Huntorf, Německo). Oba pracují se systémem, kdy je stlačený vzduch přiváděn do spalovací komory, je spalován se zemním plynem a díky tomu se zvýší entalpie fluida, které je následně hnáno do turbíny, kde dochází k vytvoření točivého momentu. Tlakovým vzduchem se dosahuje úspory energie k pohonu kompresoru [13]. Na následujícím obrázku je schématický princip adiabatické komprese vzduchu.



### 3.5.3 Setrvačnick

Při nabíjení elektrická energie proudí do motoru a ten urychluje těžký rotující disk. Pokud je tok elektrické energie obrácený, motor působí jako generátor a disk zpomaluje, a tím produkuje elektřinu. Elektrická energie je uchovávána jako kinetická energie disku. Pro zvýšení doby skladování se musí minimalizovat tření. Toho se dosáhne většinou tak, že se rotující disk umístí ve sníženém tlaku okolního média (blížícímu se vakuu) a použitím magnetických ložisek, což zvyšuje cenu. Pro supravodivé magnety na ložiska se používají např. texturované bloky  $YBa_2Cu_3O_y$ , které při teplotě 29 K dosahují magnetické indukce téměř 17 T [13]. Větší rychlosti disku umožňují větší uloženou energii, ale vyžadují pevné materiály jako ocel, nebo kompozitní materiály k odolání odstředivé síly.

Hlavní výhodou této technologie je v aplikacích, kde je potřeba velmi často velmi mnoho energie po krátký čas. Nízko rychlostní setrvačnick jsou postaveny ze železa a rotují rychlostí kolem 10 000 otáček za minutu. Pokročilé setrvačnick pro ukládání elektrické energie mají rotor ze silných uhlíkových kompozitních vláken a rotují ve sníženém tlaku blízkému vakuu rychlostí až 100 000 otáček za minutu. Mezi přednosti patří velmi rychlá odezva, rychlost náběhu a vysoká účinnost setrvačnicku.

Systémy o výkonu 2 kW a kapacitě 6 kWh jsou nyní používány pro telekomunikační aplikace. [20]. Na ostrově Aruba, který leží severně od pobřeží Venezuely, se připravuje výstavba 5 MW setrvačnicku. Tento setrvačnick by měl spolupracovat s obnovitelnými zdroji elektrické energie [21].

### 3.5.4 Průtoková baterie

Elektrolyt proudí elektrochemickým článkem a reverzibilně mění chemickou energii na energii elektrickou. Skládá se z kladné a záporné elektrody, elektrolytu a iontoměničové membrány. Elektrolyt je skladován v externích zásobnících a obvykle se pumpuje čerpadlem. Kapacita průtokové baterie je závislá na množství elektrolytu, zatímco výkon je závislý na velikosti reaktoru [22].

V současnosti existuje několik typů průtokových baterií pracujících na principech [13]:

- elektrochemické oxidace a redukce vanadu – VRB,
- uskladnění pomocí halogenu Br – ZnBr,
- na roztoku Polysulfid Bromidu (PSB, Br/S),
- CeZn (cér/zinek) – zatím ve vývoji.

Svémi provozními parametry, zejména bezprostřední přechod z režimu nabíjení na vybíjení, zanedbatelným samovybíjením, nízkými provozními náklady a výbornou životností jsou vhodné i pro dlouhodobou akumulaci elektrické energie [22].

### 3.5.5 Superkapacitor

Hlavní myšlenkou superkapacitoru je zásobník s kapacitou baterie a s operativními vlastnostmi kondenzátoru. Superkapacitor je složen z kladné a záporné elektrody z hliníkové fólie, dvou vrstev aktivního uhlíku a mezi nimi se nachází separátor. Mezi elektrodami se nachází tekutý nebo gelový elektrolyt, v němž jsou v nenabitěm stavu rovnoměrně rozloženy částice s nenulovým nábojem. Po přiložení napětí se záporné ionty pohybují ke kladné elektrodě a kladné ionty k záporné elektrodě. Na obou elektrodách se tak vytvoří dvouvrstva se zrcadlovým rozložením

elektrického náboje. Průrazné napětí elektrické dvouvrstvy je velmi nízké a typické provozní napětí superkondenzátorové buňky nepřesahuje 2,3 V.

Mezi hlavní výhody patří nízký vnitřní odpor, vysoká účinnost, vysoká efektivita při nabíjení a možnost velmi častého nabíjení a vybíjení (mnoho cyklů). Mezi nevýhody patří nižší množství uložené energie na jednotku váhy a závislost napětí na množství uložené energie [13].

### **3.6 Možnosti řízení a začlenění do sítě**

V dnešní době je řízení rovnováhy elektrizační soustavy plně pokryto nákupem rezervního výkonu z velkých klasických zdrojů. V případě předpokládaného rozvoje decentrální výroby je nezbytné zapojit do problematiky i tyto zdroje a stranu spotřeby. To vyvolává nutnost technologické změny v oblasti přenosových i distribučních sítí a změnu modelu řízení elektrizačních soustav. Navíc značná část zdrojů bude obtížně predikovatelná a to bude mít značný vliv na říditelnost při jejich maximálním možném využití. Také je pravděpodobné, že se bude zvětšovat poměr zdrojů statických (se střídači) oproti zdrojům točivým (v distribuční soustavě může být připojeno až 70 % instalovaného výkonu ve statických zdrojích) [16].

## 4 OSTROVNÍ PROVOZ

Ostrovní provoz je podle [8], jako stabilní, mimořádný provoz části elektrizační soustavy, který vzniká jejím oddělením od zbytku sítě. Tento provoz se vyznačuje značnými nároky na regulační schopnosti zdroje, protože dochází ke značným změnám systémových veličin.

Ostrovní provoz může vzniknout plánovaně nebo při poruše, kdy postižená část sítě ztrácí synchronní spojení se zbytkem soustavy, nebo při obnově soustavy za tmy (najetí zdroje bez podpory vnější sítě). Zdroj musí být schopný pracovat v ostrovním režimu minimálně 2 hodiny [8] [9]. Ostrovní provoz je ukončen synchronizací a přifázováním ke zbytku soustavy. Přifázování se provádí pomocí automatických synchronizačních zařízení, která kontrolují plnění fázovacích podmínek (dovolený rozdíl napětí, fází a kmitočtů).

V ostrovním provozu se regulační oblast nemůže spoléhat na výpomoc ostatních regulačních oblastí a platí pro ni bilanční rovnice:

$$\sum P_G = \sum P_S + \sum P_Z \quad (4.1)$$

- kde  $\sum P_G$  představuje sumární činný výkon dodávaný generátory (MW),  
 $\sum P_S$  představuje sumární činné zatížení ostrova včetně vlastní spotřeby elektráren (MW),  
 $\sum P_Z$  představuje celkové ztráty v sítích (MW).

Sumární členy této rovnice se mohou náhodně měnit, např. změnou zatížení, výpadků bloků, neregulovatelné dodávky atd. Při vzniku ostrovního provozu převezmou bilanční nerovnováhu všechny generátory ostrovního provozu a nastává elektromechanický vyrovnávací děj, který způsobí změnu otáček soustrojí, a tudíž změnu frekvence ostrovního provozu [4].

### 4.1 Technologické prvky ostrovního provozu

Mezi nejdůležitější technologické prvky, pro správnou funkci ostrovního provozu, patří rozpadová automatika, bilanční automatika, frekvenční relé, výkonová automatika, měřící automatika a převodníky elektrických veličin, přenosové sdělovací cesty a komunikační jednotky, koncentrátoři, frekvenční regulátory, otáčkoměr generátoru, registr mimořádných kmitočtů generátoru a další [5].

**Rozpadová automatika** má za úkol rozpoznat poruchový stav v nadřazené soustavě a ve velmi krátkém časovém intervalu automaticky odepnout část distribuční sítě. Mezi možnosti detekce ostrovního provozu patří metody pasivní, aktivní a komunikační [7].

**Pasivní metody** jsou jednoduše implementovatelné, ale nejsou spolehlivé v případě, kdy výroba elektrické energie je blízká spotřebě v ostrovním provozu. Dochází k monitorování síťových parametrů pomocí algoritmu. Většina pasivních metod je zaměřena na mimořádnou změnu frekvence, napětí, fázového úhlu, specifických harmonických nebo činitele harmonického zkreslení. Pokud monitorující algoritmus detekuje náhlé nebo velké změny těchto veličin, dochází k rozpojení soustavy.

**Aktivní metody** zvyšují spolehlivost detekce ostrovního provozu v případě, kdy výroba elektrické energie je blízká spotřebě. Tyto metody jsou založeny na injektáži menších rušení do

sítě, a na základě odezvy se rozhodnou, zda byl nebo nebyl vytvořen ostrovní provoz. Může se jednat o změnu amplitudy napětí, frekvence nebo fázového úhlu. Tato rušení by měla být opravena skrz napěťovou a frekvenční kontrolu sítě. Pokud však dané veličiny sledují změny daného generátoru, je pravděpodobné, že byl vytvořen ostrovní provoz.

**Komunikační metody** jsou založeny na komunikaci mezi sítí a distribuovaným zdrojem. Tato metoda je využívána velmi zřídka kvůli vysokým nákladům [6].

**Bilanční automatika** neustále sleduje výkonovou bilanci pro předpokládaný ostrovní provoz. V dělicím místě sleduje dodávaný nebo odebíraný výkon pro plánovanou oblast a dostává vstupní informace o okamžitém výkonu vlastních zdrojů plánované oblasti. Hlavním úkolem je, při vzniku ostrovního provozu, možnost rychlého odpínání zátěže na základě měření výkonové rovnováhy.

Mechanismus pro řízení spotřeby elektřiny slouží k přednostnímu napájení pro vybrané objekty kritické infrastruktury. Jednou z možností je dispečerská změna konfigurace napájecí sítě, další možností je omezení spotřeby odběrných míst. K tomu můžeme využít systém hromadného dálkového ovládání (HDO) pro vysílání spínacích a odpínacích povelů po síti vn (pouze pokud je vysílač v oblasti daného ostrovního provozu). Další možností je využití inteligentních elektroměrů a jejich možnosti dálkového omezení proudové hodnoty jističe daného odběrného místa [7].

## 4.2 Požadavky na ostrovní provoz

Požadavky na ostrovní provoz pro provozovny připojené k distribuční soustavě jsou uvedeny v Pravidlech provozování distribučních soustav v příloze číslo 7: Pravidla pro podpůrné služby zdrojů připojených k sítím provozovatele distribuční soustavy [9]. Požadavky na ostrovní provoz pro přenosové sítě jsou uvedeny v části II Kodexu přenosové soustavy [8].

V obou dokumentech jsou také popsány periodické certifikační testy. ČEPS nebo provozovatel distribuční soustavy má právo požadovat na poskytovateli možnost inspekce připravenosti k plnění této podpůrné služby způsobem, který neovlivní provoz výroby. Vzhledem k velké variabilitě technologického a technického zařízení elektráren, řídicích systémů a způsobu realizace regulačních obvodů ostrovního provozu je nutné, před vlastním měřením, vypracovat podrobný postup měření. Certifikace se skládá ze dvou základních testů. Jedná se o Test dynamického chování bloku simulací otáček, jehož cílem je ověřit dynamické chování bloku při skokových a plynulých změnách otáček. A o Test chování bloku při vypínací zkoušce "ostrov", který má za úkol ověřit dynamické chování bloku při klasické vypínací zkoušce "ostrov" [8] [9].

## 5 CHYTRÉ SÍŤ

V současné době je řízení rovnováhy elektrizační soustavy plně pokryto nákupem rezervního výkonu z velkých klasických zdrojů. Stávající podpora obnovitelných zdrojů energie deformuje trh s elektřinou a znevýhodňuje nepodporované zdroje. Důsledkem tohoto vývoje je snižování výroby v klasických zdrojích, pokles jejich rentability a neochota investorů investovat do nových klasických elektráren. Navíc rozvoj decentralizované výroby ovlivňuje způsob výroby v klasických elektrárnách, protože musí flexibilně reagovat na výrobu z FVE, VTE. V případě předpokládaného rozvoje decentralní výroby je potřeba zapojit do problematiky řízení rovnováhy soustavy i decentralní zdroje a stranu spotřeby. Tyto změny vyvolávají nutnost technologický změn v oblasti přenosových i distribučních soustav, např. sofistikovanější řešení jak hardwaru, tak softwaru a stejně tak i změnu modelu řízení elektrizační soustavy [16]. Jedna z možností, jak nahlížet na rozdíly mezi tradiční a chytrou sítí, je znázorněna v tab. 5.1.

Tab. 5.1: Porovnání tradiční a chytré sítě dle [23]

tradiční síť	chytrá síť
jednosměrná a lokálně obousměrná komunikace	globální obousměrná komunikace
především centralizovaná výroba	centralizovaná i decentralizovaná výroba
manuální obnova	automatická obnova
kontrola zařízení manuálně	monitorování zařízení vzdáleně
odhadovaná spolehlivost	predikovatelná spolehlivost

S rozvojem říditelných i neříditelných distribuovaných zdrojů, menších zdrojů, akumulčních zařízení a elektromobility se dají očekávat zvýšené nároky na říditelnost soustavy. Probíhající a předpokládaný rozvoj měřicích, komunikačních, energetických a informačních technologií nabízí celou řadu možných technických řešení pro vytvoření chytré sítě s různou úrovní kvality a spolehlivosti. Chytré sítě se skládají z přenosových a distribučních soustav vybavených určitým stupněm inteligence (automatizace, komunikace, regulace a další). Je přirozené, že míra inteligence těchto sítí bude narůstat spolu s technologickým rozvojem.

Národní akční plán pro chytré sítě předpokládá postupné zavedení chytrých sítí a dalších opatření v několika etapách. Investice do chytrých sítí jsou investicemi do infrastruktury a promítnou se do regulované složky ceny za elektřinu. Proto je potřeba přizpůsobit způsob a rychlost zavedení chytrých sítí přínosům pro spotřebitele. Plán realizace je rozčleněn do několika období.

První období do roku 2019 lze charakterizovat jako období přípravné. Budou dokončeny potřebné analýzy, dokončeny a vyhodnoceny pilotní projekty a navržen a odsouhlasen cílový model realizace chytrých sítí v ČR. Součástí tohoto procesu by mělo být i zpracování projektu na implementaci obousměrné komunikace mezi výrobou, spotřebou a distribucí (AMM – Automatic Meter Management).

V období 2020–2024 bude podle schváleného projektu řízeně pokračovat realizace odsouhlaseného modelu chytrých sítí. Na konci tohoto období by mělo být přibližně 30 %

odběrných míst v sítích nn osazeno technologií AMM, s komunikačním pokrytím cca 60 % sítí nn, a v sítích vn všechna.

V období 2025–2029 bude ukončena realizace odsouhlaseného modelu chytrých sítí (s časovou rezervou do roku 2035). Na konci tohoto období by měla být téměř všechna odběrná místa vybavena technologií AMM. Dále se předpokládá relevantní rozvoj akumulace a elektromobility.

K roku 2030 má být vyhodnocena realizace cílového modelu chytrých sítí a odsouhlaseny možné korekce. Nejpozději do roku 2035 je systém chytrých sítí plně funkční a plní následující funkce [16]:

- Zapojení decentralizované výroby a spotřeby do řízení rovnováhy systému.
- Model provozování trhu a energetického systému odpovídá novým potřebám ES ČR.
- Klasická výroba, akumulace a významná část spotřeby automaticky reaguje na výrobu z obnovitelných zdrojů energie a potřeby ES ČR a situaci v jednotném energetickém trhu.
- Významný indikátor řízení ES ČR je cena elektřiny na krátkodobém trhu odrážející velikost výroby z VTE a FVE.
- Implementace dynamického tarifního systému, který umožňuje spotřebiteli využívat informace o ceně silové elektřiny na trhu.

## 5.1 Projekty v EU

Během posledních let významně rostly investice do výzkumu a vývoje chytrých sítí. Dle [27] jsou EU, Švýcarsko a Norsko zapojeny přibližně do 950 projektů v 50 zemích. Z tohoto celkového množství je 540 projektů ve formě výzkumu a vývoje a zbylých 410 projektů je demonstračních. 308 projektů stále běží a celkově do těchto projektů bylo investováno téměř 5 miliard eur. Největší investice probíhají v Německu, Spojeném království a Francii. V ČR celkem probíhalo nebo probíhá 9 projektů demonstračních a 13 projektů ve formě výzkumu a vývoje. Celkově se v ČR investovalo do těchto projektů 43,1 milionů euro [27].

### 5.1.1 GRID4EU

Projekt GRID4EU byl financovaný Evropskou komisí a jeho účelem je položit základy pro moderní elektrické sítě budoucnosti. Tento projekt běžel od září 2011 do ledna 2016 a přijal systematický přístup k testování některých inovativních technologií a konceptů ve větším rozsahu. Hlavním účelem je překonání některých problémů rozvinutí chytrých sítí, ať už se jedná o problémy technické, ekonomické, sociální, environmentální nebo regulační. Tento projekt ověřuje, jak do sítě začlenit výrobu z obnovitelných zdrojů, hledá koncept pro rozšíření elektromobility a zjišťuje, jak efektivněji využívat energii a snižovat její spotřebu. Projekt se zaměřuje i na oblast automatizace řízení sítí a možnosti skladování energie. Testovaná řešení by měla zvýšit spolehlivost, pružnost a odolnost sítě.

Technický, ekonomický, sociální a regulační kontext v distribučních sítích je v členských zemích EU značně rozdílný. Díky této skutečnosti bylo vybráno 6 různých zemí, které poskytují různé podmínky, ať už se jedná o charakteristiku sítě, regulační podmínky nebo klima. Na projektu GRID4EU se podílelo 6 evropských distribučních společností (ERDF – Francie, Enel Distribuzione – Itálie, Iberdrola – Španělsko, ČEZ Distribuce – Česko, Vattenfall Eldistribution – Švédsko a RWE – Německo). Tyto společnosti na projektu spolupracovaly s maloobchodníky s elektřinou, výrobci a výzkumnými organizacemi [28].

### 5.1.2 InterFlex

Projekt Inteflex, který začal 1. ledna 2017, je zaměřený na zvyšování flexibility evropských distribučních sítí. Tento projekt vede francouzský distributor elektrické energie společnost Enedis a dále se ho účastní 4 provozovatelé distribučních soustav (Avacon – Německo, ČEZ Distribuce – Česko, Enexis – Nizozemsko a EON – Švédsko), dodavatelé a obchodníci s elektrickou energií a výzkumné organizace. InterFlex se skládá z celkem devíti pracovních úkolů: pět demonstračních (každý distributor má jeden) a čtyři obecné pracovní úkoly (management, technická specifikace, analýza využitelnosti a publicita).

Partnery demonstračního projektu vedeného společností ČEZ Distribuce jsou Austrian Institute of Technology, ČEZ Solární, Fronius, Schneider Electric a Siemens. Projekt je zaměřen na integraci obnovitelných a decentralních zdrojů do distribuční soustavy, akumulaci elektrické energie a integraci dobíjecích stanic pro elektromobily do distribuční soustavy [25].

## 5.2 Prvky chytrých sítí

Prvky chytrých sítí lze dělit dle řady kritérií. Dají se rozdělit například dle jejich zařazení do přenosové nebo distribuční sítě.

### 5.2.1 Přenosová síť

V energetice se běžně využívá jako zdroj měřených hodnot systém určený pro operátorské řízení a sběr dat (SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition). Tento systém v energetice funguje již dlouhou dobu a uchovává a poskytuje efektivní hodnotu napětí, efektivní hodnotu proudu, činný výkon a jalový výkon. Velká nevýhoda toho systému je vzájemná nesoudobost měření. Naměřená data neobsahují informace o času, kdy byla konkrétní hodnota naměřena a časovou značku opatří až řídicí systém při jejím zpracování.

Nesoudobost vzniká dvojím způsobem. Odesílání naměřené hodnoty nemusí být pravidelné, ale může být řízeno takzvaným delta kritériem, který o odeslání naměřené hodnoty rozhoduje na základě vyhodnocení rozdílu mezi aktuální a předchozí naměřenou hodnotou. Pokud je rozdíl větší než dané kritérium, dojde k odeslání naměřené hodnoty. V opačném případě nikoli. Dále je třeba brát v úvahu, že čas potřebný pro přenos naměřené hodnoty od měřicího přístroje není konstantní, a v případě velkého vytižení komunikačních kanálů může docházet ke značnému zpoždění.

Fázorové měřicí jednotky (PMU – Phasor Measurement Unit), řeší jak nedostatky nesoudobého měření, tak i absenci dat měření fázových úhlů v systému SCADA. Tyto jednotky jsou určeny k měření fázorů napětí a proudu. Časovou synchronizaci PMU jednotek zajišťuje signál GPS. Tyto hodnoty jsou využívány pro monitorování rozsáhlých elektrických sítí, (WAMS – Wide Area Monitoring System). Nedílnou součástí tohoto systému je i estimace stavu [24]. Provozovatel přenosové soustavy ČEPS disponuje 36 PMU instalovaných na 10 rozvodnách. Měřeny jsou fázory napětí, fázory proudů, frekvence a derivace frekvence. Vzorkovací frekvence odesílaných dat je 50 vz/s. Tato data jsou využívána např. pro detekci ostrovního provozu.

Strategie pro dosažení chytrých sítí na přenosových systémech zahrnují analytické nástroje, které budou schopny analyzovat např. optimální dynamický tok výkonu, robustní stavovou estimaci, hodnocení stability a spolehlivosti v reálném čase a nástroje pro simulaci trhu [23].

### 5.2.2 Distribuční síť

Distribuční síť zajišťuje přenos elektrické energie koncovým zákazníkům. Mezi její funkce by časem měly patřit moduly pro detekci poruchy, napěťová a výkonová optimalizace, automatická fakturace, obnova a rekonfigurace přípojnic a informace zákazníkům o aktuální ceně elektrické energie. Významnou součástí distribuční sítě budou tvořit smart metry, které budou nejen měřit spotřebu, ale budou schopny i obousměrné komunikace.

Smart metry mohou sloužit, na rozdíl od klasických měřičů, jako senzory po celé distribuční síti. Smart metry mohou zaznamenávat a měřit spotřebu elektrické energie, kvalitu elektrické energie a posílat tato data bezdrátově do centrálního úložiště dat. Tato data mohou být využita k rychlejší detekci poruch a zkrácení potřebného času pro obnovení napájení, a díky tomu zlepšit kvalitu napájení. Zákazníci mohou být lépe informováni o stavu sítě, např. o důvodu výpadku napájení, předpokládané doby opravy atd. Zákazníci dále získají lepší informaci o své spotřebě a mohou změnit své energetické návyky, a díky tomu snížit platbu za elektrickou energii.

Pro sběr a zpracování dat ze smart metrů slouží systém pokročilé infrastruktury měřidel (AMI – Advanced Meter Infrastructure). Energetické společnosti vynakládají značné úsilí na vytvoření AMI systému, který zlepší zákaznický servis a sníží náklady na odečty [23]. Tento systém se skládá ze třech základních komponent: smart metrů, obousměrné komunikace a operačního centra s automatickým softwarem pro zpracování dat. AMI systémy musí zajistit spolehlivou, cenově přijatelnou a obousměrnou komunikaci a kontrolu smart metrů pomocí bezdrátové sítě. AMI systém může posílat různé příkazy smart metrům. Může se, např. jednat o časově orientované ceny, řízení spínání zásuvek (spotřebičů) nebo vzdáleného odpojení [26].

### 5.2.3 Akumulace elektrické energie

Vzhledem k nepředvídatelnosti obnovitelné energie a nesouladu mezi vrcholem dostupnosti a špičkové spotřeby, je důležité najít způsoby, jak ukládat vyrobenou energii pro pozdější využití. Způsobu pro skladování elektrické energie je celá řada. Jedná se, např. o baterie, energie uložená ve formě stlačeného vzduchu, setrvačníky, průtokové baterie, superkapacitory a další. Některé systémy pro skladování elektrické energie byly popsány v kapitole 3.5 [23].

### 5.2.4 Řízení výroby a spotřeby

Při předpokládaném rozvoji distribuovaných zdrojů elektrické energie může generovaný výkon výrazně kolísat a nerovnováha mezi spotřebou a výrobou může způsobit kolísání frekvence systému. V distribučních sítích navíc bude stále obtížnější splnit napěťová a proudová omezení. Tyto jevy mohou negativně ovlivňovat připojená zařízení.

Řízení výroby a spotřeby zvyšuje spolehlivost dodávky elektrické energie a snižuje její náklady. Řízení spotřeby efektivně upravuje poptávku zákazníků a umožňuje větší sladění výroby a spotřeby. Řízení zdrojů bude nutné nejen u generátorů elektrické energie, ale také u baterií a dalších zařízení pro skladování elektrické energie [23].

## 5.3 Vybrané technické problémy

### 5.3.1 Zvýšení integrace distribuovaných zdrojů

Mezi hlavní problémy při integraci distribuovaných zdrojů do distribučních sítí patří napěťové nebo proudové omezení. Jednou z možností, jak zvýšit tuto integraci je využití autonomního



spínacího systému (ASS – Autonomous Switching System), transformátoru se změnou napětí pod zatížením (OLTC – On Load Tap Changer), bateriových uložišť, řízení jalového výkonu generátorů třetích stran, kogeneračních jednotek a další.

Autonomní přepínací systém se skládá z modulů, které díky algoritmům jednají samostatně a automaticky. Měřicí zařízení a spínací moduly měří danou síť a posuzují její stav. Stav ohrožení nastane při naměření mezních hodnot (např. kritické napětí nebo kritické zatížení). V takovém případě systém analyzuje topologii sítě a pokusí se zjistit stav, při kterém nedojde k žádným omezením. Systém vytvoří vhodný program pro změnu topologie sítě, který spínací moduly vykonají. Tímto lze dosáhnout dle typu sítě navýšení hostující kapacity distribuovaných zdrojů. V projektu GRID4EU tento systém zvýšil integraci distribuovaných zdrojů průměrně o 17 % u německého distributora RWE v oblasti v Severní Porýní-Vestfálsku[28].

OLTC dokáže měnit napětí pod zatížením, a díky tomu jsou schopné regulovat napětí na sekundární straně. Jejich funkce však může být omezena, pokud je k danému OLTC připojeno více odboček s rozdílným napěťovým profilem. Např. pokud je transformátor připojen k více odbočkám a na jedné odbočce je přepětí vlivem distribuované výroby a na jiné podpětí vlivem velké zátěže.

Připojení zařízení pro skladování elektrické energie může pomoci s regulací, a tím zvýšit hostitelskou kapacitu. Jeho efektivita je silně ovlivněna jeho velikostí, elektrickou pozicí a místní výrobou a spotřebou [28].

### 5.3.2 Inovativní management vn a nn sítí

Inovativní management vn a nn sítí spočívá v co nejrychlejší a nejpřesnější lokalizaci poruchy a následně v jejím nejrychlejším odstranění. Další funkcí je algoritmus, který mění topologii sítě k dosažení co nejnižších ztrát.

Při poruše v síti má ASS za úkol přesně lokalizovat poruchu, izolovat ji od zbytku sítě a obnovit napájení pro zdravou část sítě. Mezitím je o chybě informována operační četa, která poruchu lokalizuje a opraví. Toto řešení by mělo zvýšit kvalitu dodávek elektrické energie.

Další možností tohoto systému je snížení ztrát v síti pomocí změny topologie sítě podle jejího aktuálního stavu. Činný a jalový výkon je měřen a zaznamenáván na sekundárních rozvodnách. Z těchto hodnot se spočítá 15 minutová průměrná hodnota. Z těchto dat se den předem určuje předpokládaná zátěž. Následně dojde k výpočtu algoritmu na snížení ztrát. Algoritmus pro snížení ztrát v síti je tedy založen na předpokládané zátěži pro daný den a naplánované rekonfiguraci sítě. Je vhodné najít správný poměr mezi spínacími akcemi (které opotřebovávají spínací zařízení) a snížením ztrát na vedení [28].

### 5.3.3 Anti-ostrovní systém

Při poruše nebo údržbě části sítě se zdroji distribuované výroby může vzniknout nechtěný ostrovní systém, pokud napětí a frekvence zůstane v povolených mezích. Generátory by zůstaly připojeny k síti a vytvořily by nechtěný ostrov. Pro tento případ byl vytvořen tzv. anti-ostrovní systém, který pošle pomocí komunikačního protokolu IEC 61850 informaci, zda je nutné generátory odpojit od sítě nebo ne. Každý generátor má vlastní identifikátor [28].

### 5.3.4 Pokročilý monitoring nn sítí

Pokročilý monitoring nn sítí umožňuje analýzu sítě a získání informací o jejím stavu v reálném čase. Může se jednat o zobrazení účinníků u sekundárních transformovných, nerovnováhy mezi

jednotlivými fázemi, odchylky napětí jednotlivých fází, zobrazení denní spotřeby, zobrazení spotřeby činného a jalového výkonu, spotřeby proudu, velikosti napětí ve vybraných částech nn sítě a další.

### 5.3.5 Ostrovní provoz

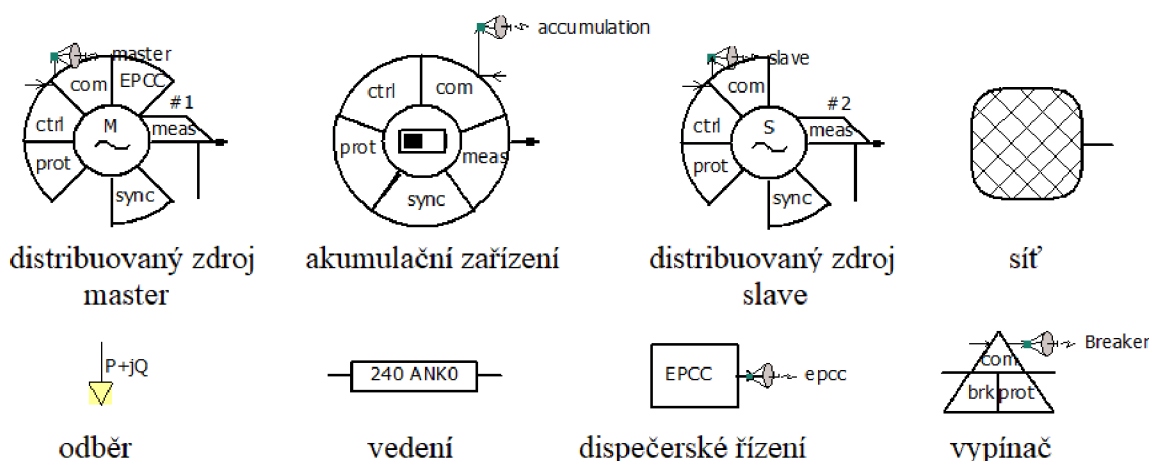
Kontrolovaný ostrov může být dobrý prostředek ke zlepšení obrany a plánů obnovy, umožňující kompletně zamezit přetoku výkonu mezi hlavní sítí a ostrovem, například při extrémních klimatických podmínkách nebo při údržbách. Ostrovní provoz navíc zvyšuje dostupnost elektrické energie pro koncové zákazníky. V projektu GRID4EU se testoval ostrovní provoz pro kogenerační jednotku a FVE se zařízením pro skladování elektrické energie.

Při řízení ostrovního provozu pomocí kogenerační jednotky se testoval start ze tmy a plánované odpojení od zbytku sítě. Při plánovaném odpojení od zbytku sítě došlo k významnému poklesu frekvence. To bylo způsobeno omezenou výkonovou regulací kogenerační jednotky, která je určována dle rychlosti změny tlaku plynu na vstupu do motoru. Oba testy byly úspěšné a došlo ke splnění standardu EN 50160 pro kvalitu napětí a frekvence.

Při druhém testu byly v ostrovním provozu připojeny 3 fotovoltaické elektrárny (3 x 430 kWp), 8 zákazníků se špičkovým odběrem až 100 kW během dne a baterie s parametry 250 kW/600 kWh. Během dne došlo k plánovanému odpojení od zbytku sítě na přibližně 5 hodin. Baterie se nabíjely a vybíjely během testu dle dostupného výkonu z FVE a zatížení od zákazníků. Test byl úspěšný a nikterak se nedotkl zákazníků [28].

## 6 VYTVOŘENÉ MODELY V PROGRAMU PSCAD

Pro účely této diplomové práce byly vytvořeny v programu PSCAD následující modely: model distribuovaného zdroje master, model akumulčního zařízení, model distribuovaného zdroje slave, model sítě, model odběru, model vedení, model dispečerského řízení a model vypínače (obr. 6.1). Každý model představuje funkční celek, který disponuje širokými možnostmi nastavení. Jednotlivé modely prvků spolu vzájemně komunikují a jsou propojeny na různých úrovních řízení, od konfigurací ochran, dispečerských povelů až po řízení výroby a spotřeby, dle jejich režimů a aktuálního stavu sítě. Řada funkcionalit modelů je uvažována v souladu s konceptem chytrých sítí.



Obr. 6.1: Grafické zobrazení jednotlivých modelů

V Modelech, vytvořených v programu PSCAD, jsou použita některá zjednodušení, např. jako zdroje jsou použity ideální napěťové zdroje. Z tohoto důvodu nejsou modely vhodné pro zkoumání kvality elektrické energie, harmonické analýzy nebo frekvenční analýzy. Modely jsou především vhodné pro zkoumání výkonových a napěťových poměrů v síti.

### 6.1 Model Distribuovaného zdroje

Model distribuovaného zdroje tvoří jeden z nejkompexnějších modelů. Může simulovat provozní vlastnosti některých typů uvedených v kap. 3. Je tvořen jednotlivými moduly, které mají širokou škálu konfigurovatelných možností. Základním dělením tohoto modelu, které určuje jeho chování v síti, je volba režimu řízení zdroje v provozu do sítě či vyčleněného ostrova. Pro tuto volbu byly vytvořeny dva mírně odlišné modely – master a slave.

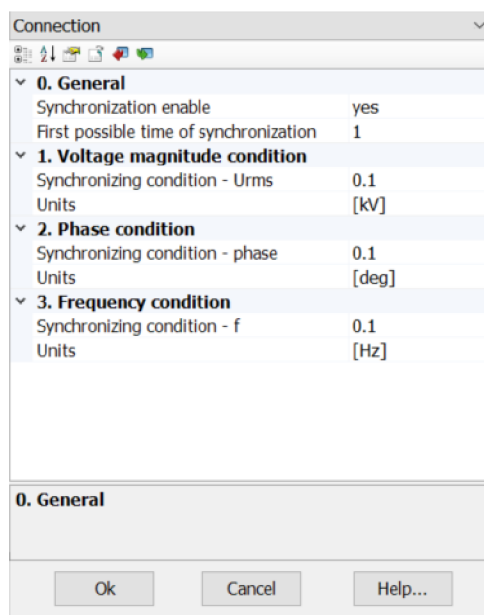
Modul samotného zdroje (*source*) je tvořen napěťovým zdrojem, algoritmem pro výpočet impedance zdroje a vypínačem. Významově a funkčně je důležité propojení tohoto modulu s modulem řízení (*control*) a fázování (*synchronization*).

Modul řízení je hlavním řídicím modulem zdroje. Zde se vyhodnocuje požadované schéma řízení zdroje, regulace atd. Model distribuovaného zdroje pracuje buď v režimu PQ, kdy dodává zadaný činný a jalový výkon, nebo v režimu U $\delta$ . O režimu zdroje rozhoduje algoritmus řízení. Výstupem jsou parametry, které jsou nutné pro řízení samotného zdroje. Tento modul je značně rozdílný pro distribuovaný zdroj master a distribuovaný zdroj slave. Koncepte tohoto dělení zdrojů

je uvedena v [36] a v [37] a schémata řízení těchto zdrojů budou dále rozepsána v navazující části práce.

Modul ochran (*protection*) obsahuje dvoustupňovou napěťovou ochranu zdroje. Uživatel může definovat meze působení a zpoždění, po kterém dojde k odpojení zdroje od sítě, pokud je napětí stále mimo nastavené meze. Tento modul lze vypnout, čímž se ochrany stanou neaktivní.

Modul synchronizace umožňuje nastavení podmínek pro přiřazování zdroje k síti a čas, kdy je přiřazování nejdříve umožněno (obr. 6.2). Tento modul je propojen s moduly měření (*measurement*) a ochran. Tento modul lze vypnout, čímž nenastane přiřazování k síti.



Obr. 6.2: Nastavení modulu synchronizace

Modul měření zpracovává data z měření. Modul dále distribuuje potřebná data do dalších modulů, které tyto data s elektrickými parametry sítě potřebují pro svoji funkci.

Modul komunikace (*communication*) umožňuje komunikaci s dalšími modely. Vzájemná komunikace mezi jednotlivými modely je nezbytná a esenciální pro správné řízení sítě.

Modul dispečerského řízení (*EPCC*) zpracovává a dále distribuuje informace pokynů z nadřazeného dispečerského systému, kterým může uživatel jednoduše simulovat roli dispečerského řízení. Jedná se o povel pro přípravu na vznik ostrovního provozu a povel pro připojení ostrovního provozu zpět k síti. Tento modul nalezne uplatnění pouze u distribuovaného zdroje master.

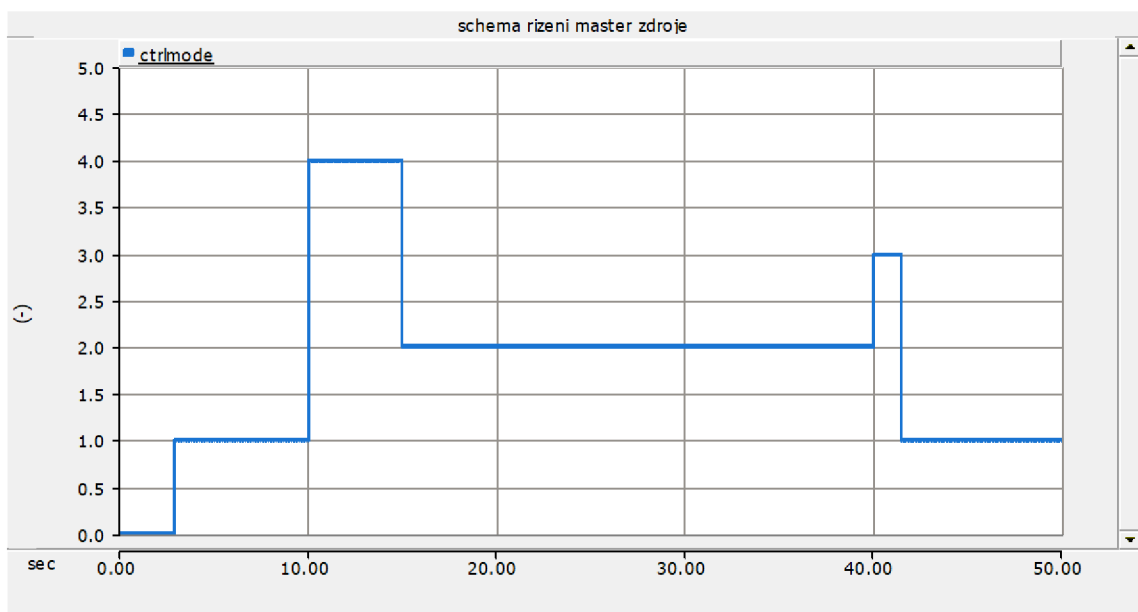
### 6.1.1 Model distribuovaného zdroje master

Distribuovaný zdroj v režimu master má v závislosti na stavu sítě a pokynů od nadřazeného dispečerského řízení několik schémat řízení, která jsou vyhodnocována v modulu řízení:

0. Regulace U<sub>δ</sub> – příprava na přiřazování a samotné fázování zdroje.
1. Regulace PQ – síť se nenachází v ostrovním režimu a zdroj dodává požadovaný činný a jalový výkon.

2. Regulace  $U\delta$  – regulace napětí v zadaném místě sítě v ostrovním provozu.
3. Regulace  $U\delta$  – aktivní při pokynu na přifázování ostrovního provozu zpět k síti. Jedná se o regulaci odchylek parametrů na vypínači.
4. Regulace  $U\delta$  – příprava na přechod do ostrovního provozu (regulace výkonové bilance).
5. Zapůsobení ochran – okamžité odpojení zdroje od sítě (schéma řízení č. 5 je stejné u všech modelů, které pracují s režimy řízení, a znamená reakci ochran).

Na obr. 6.3 je vyhodnocení řízení master zdroje během jedné ze simulací. Zpočátku je aktivní regulace pro přifázování a samotné fázování zdroje na síť. V čase 2,89 s dojde k přifázování a zdroj najíždí podle rampy na požadovaný činný a jalový výkon. Od 10. s je v režimu přípravy na přechod do ostrovního provozu. Od 15. s řídí ostrovní síť jako master zdroj. Ve 40. s dostává pokyn na připojení ostrovního provozu k síti, a tak začíná regulovat odchylky parametrů na vypínači. V čase 41,43 s se ostrovní provoz připojuje zpět k síti. Následně se vrací do režimu, kdy dodává požadovaný činný a jalový výkon.



Obr. 6.3: Schéma řízení master zdroje během simulace

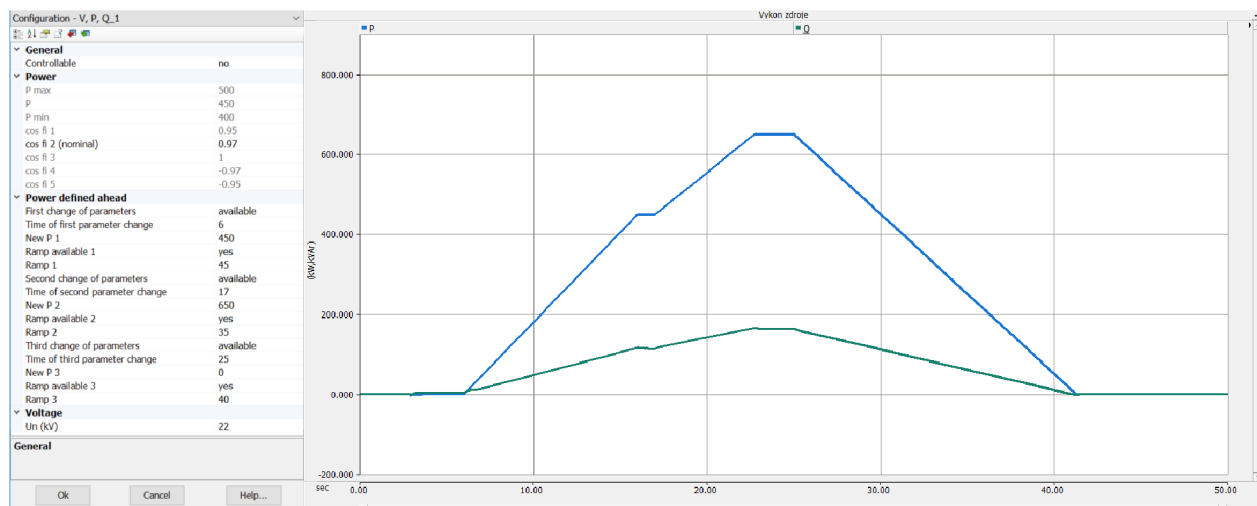
Tento model může také v ostrovním provozu ovlivňovat dodávaný výkon slave zdroje, v případě nutnosti ho může odpojit i od sítě. Další funkcí je možnost selektivního odpojování odběrů v krajních podmínkách ostrovního provozu a vzájemně komunikovat a částečně řídit akumulační zařízení elektrické energie.

### 6.1.2 Model distribuovaného zdroje slave

Distribuovaný zdroj v režimu slave má několik schémat řízení, která se stejně jako pro distribuovaný zdroj master vyhodnocují v modulu řízení:

0. Regulace  $U\delta$  – příprava na přifázování a samotné fázování zdroje.
1. Regulace PQ

- a. Říditelný zdroj – dodává požadovaný činný a jalový výkon, v případě ostrovního provozu mění dodávaný výkon dle požadavků master zdroje a dle možností svého provozního diagramu.
  - b. Neříditelný zdroj – před simulací lze nastavit dodávaný výkon v čase, a tím simulovat neříditelný zdroj elektrické energie (obr. 6.4).
2. Regulace PQ – pokyn od master zdroje pro sjíždění s dodávaným výkonem po předem definované rampě a následným odpojením od sítě.
  5. Zapůsobení ochran – okamžité odpojení zdroje od sítě.



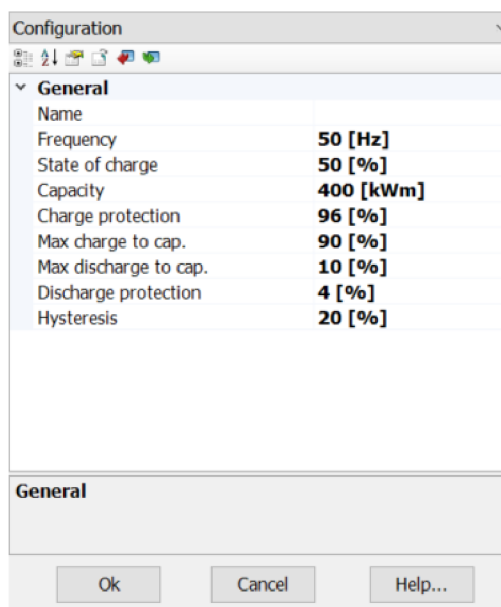
Obr. 6.4: Nastavený výkon distribuovaného zdroje během simulace

## 6.2 Model Akumulačního zařízení

Tento model reprezentuje zařízení, které dokáže skladovat elektrickou energii. Některé typy těchto zařízení byly popsány v kapitole 3.5.

Tento model se skládá celkem z 6 modulů. Moduly komunikace (*communication*), měření (*measurement*), synchronizace (*synchronization*) a ochran (*protection*) jsou velice podobné těm v modelu distribuovaného zdroje, a proto nebudou dále popisovány. Moduly synchronizace a ochran lze nastavit jako neaktivní.

Modul samotného akumulčního zařízení (*source*) je stejně jako u modulu distribuovaného zdroje tvořen napětovým zdrojem, algoritmem pro výpočet impedance a vypínačem. Tento modul také disponuje nastavením celkové kapacity, počátečního stavu nabití a ochran proti přebití a vybití (obr. 6.5). Jsou definovány dvě meze proti přebití a vybití, pokud dojde k překročení prvních mezí (na obr. 6.5 se jedná o meze 90 a 10 %), dochází k postupnému snižování odebíraného/dodávaného výkonu na nulu, pokud dojde během snižování k překročení druhých mezí (na obr. 6.5 se jedná o meze 96 a 4 %), změna výkonu na nulu proběhne skokově. Během simulace zde dochází k výpočtu aktuálního stupně nabití a následně k určení stavu zařízení podle nastavených prvních mezí (normální stav, stav nabití a stav vybití). Aby se akumulční zařízení vrátilo do normálního stavu, musí se změnit jeho stupeň nabití o definovanou hranici a zadanou hysterezi (podle nastavení obr. 6.5 by se jednalo o 70 a 30 %). Tento modul komunikuje především s modulem řízení (*control*) a modulem synchronizace.



Obr. 6.5: Příklad nastavení samotného modulu zařízení pro akumulční zařízení

Modul řízení je hlavním řídicím modulem tohoto modelu. Zde jsou obsaženy všechny regulace výkonu s možností nastavení potřebných parametrů, meze dodávaných a odebíraných výkonů atd. Výstupem jsou především parametry nutné pro řízení samotného zdroje.

Pro správně navržený algoritmus, který bude řídit akumulční zařízení v síti a potenciálním ostrovním provozu je nutné vzít v úvahu následující faktory: celková kapacita, maximální možný dodávaný a odebíraný výkon akumulčního zařízení, počet a výkon dalších říditelných a neříditelných zdrojů, velikost odběrů, délka plánovaného ostrovního provozu, předpokládaná výkonová bilance ostrovního provozu, předpokládaný diagram zatížení atd. S tímto vědomím jsem vytvořil několik schémat řízení pro akumulční zařízení:

0. Regulace  $U\delta$  – příprava na přifázování a samotné fázování zařízení.
1. Regulace PQ – akumulční zařízení se snaží nezapojovat do chodu sítě. Toto schéma řízení nastane, pokud není síť v ostrovním provozu nebo se změnil stav zařízení z normálního stavu na stav nabití/vybití a dochází k postupnému snižování odebíraného/dodávaného výkonu (pokud je překročena hranice ochrany, dojde ke skokové změně výkonu).
2. Omezená regulace  $U\delta$  – regulace v ostrovním provozu na vybraný bod sítě (tato regulace je omezena tím, že nemůže dodávat jiný typ jalového výkonu než zdroj v režimu master). Také nastane, pokud je akumulční zařízení v nabitém/vybitém stavu a napětí na vybraném bodu sítě je o nastavenou hodnotu nižší/vyšší než jmenovité.
3. Omezená regulace  $U\delta$  – aktivní na pokyn master zdroje. Akumulční zařízení reguluje odchylky parametrů na vypínači. Má stejná omezení jako schéma řízení č. 2.
5. Zapůsobení ochrany – okamžité odpojení modelu od sítě.

### 6.3 Model odběru

Model odběru zohledňuje možnosti nastavení samotného odběrného místa nebo skupiny odběrů. Do jeho nastavení se zadávají standardní parametry. Odběr lze také nastavit jako napěťově

a frekvenčně závislý. Tyto závislosti jsou reprezentovány parametry  $NP$  a  $NQ$  v případě napěťové závislosti a parametry  $K_{PF}$  a  $K_{QF}$  v případě frekvenční závislosti. Skutečná velikost odběru se následně spočítá z následujících rovnic [34]:

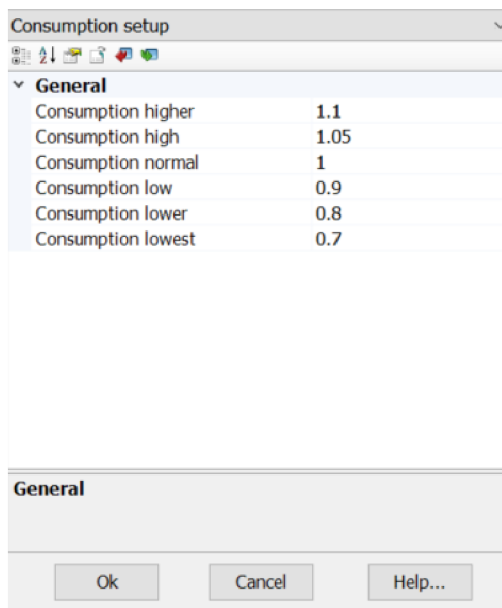
$$P = x \cdot P_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0}\right)^{NP} (1 + K_{PF} \cdot df) \quad (6.1)$$

$$Q = x \cdot Q_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0}\right)^{NQ} (1 + K_{QF} \cdot df) \quad (6.2)$$

kde $P$	skutečná hodnota odběru (kW)
$Q$	skutečná hodnota odběru (kVAr)
$x$	parametr pro krokovou změnu zatížení při zvýšení/snížení napětí nad/pod nastavené meze (-)
$P_0$	nastavená hodnota odběru (kW)
$Q_0$	nastavená hodnota odběru (kVAr)
$U$	napětí na zátěži (kV)
$U_0$	nominální napětí zátěže (kV)
$NP, NQ$	citlivostní součinitele pro napětí (-)
$K_{PF}, K_{QF}$	citlivostní součinitele na kmitočet (-)
$df$	odchylka frekvence (Hz)

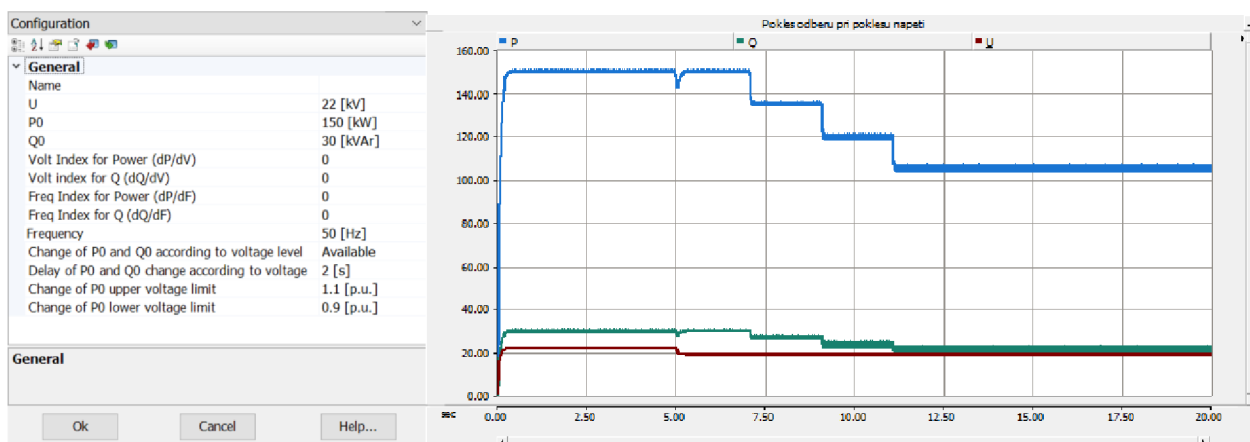
Model má implementovanou funkci, kterou lze klasifikovat jako jednu z funkcí chytré sítě. Jedná se o reakci odběru na napětí sítě. Při poklesu/zvýšení napětí pod/nad určitou mez, odběr sníží/zvýší svoji spotřebu o jeden krok. Měření napětí probíhá na vstupu modelu. Model umožňuje nastavení času pro vyhodnocení. Pokud nedojde během tohoto nastaveného času ke zlepšení situace, krok se provede. Lze nastavit tři kroky pro snížení a dva kroky pro zvýšení odběru (obr. 6.6). Tato funkce je v předchozích rovnicích reprezentována parametrem  $x$ . Tuto funkci lze vypnout (poté  $x = 1$ ).





Obr. 6.6: Nastavení jednotlivých kroků pro snížení/zvýšení spotřeby

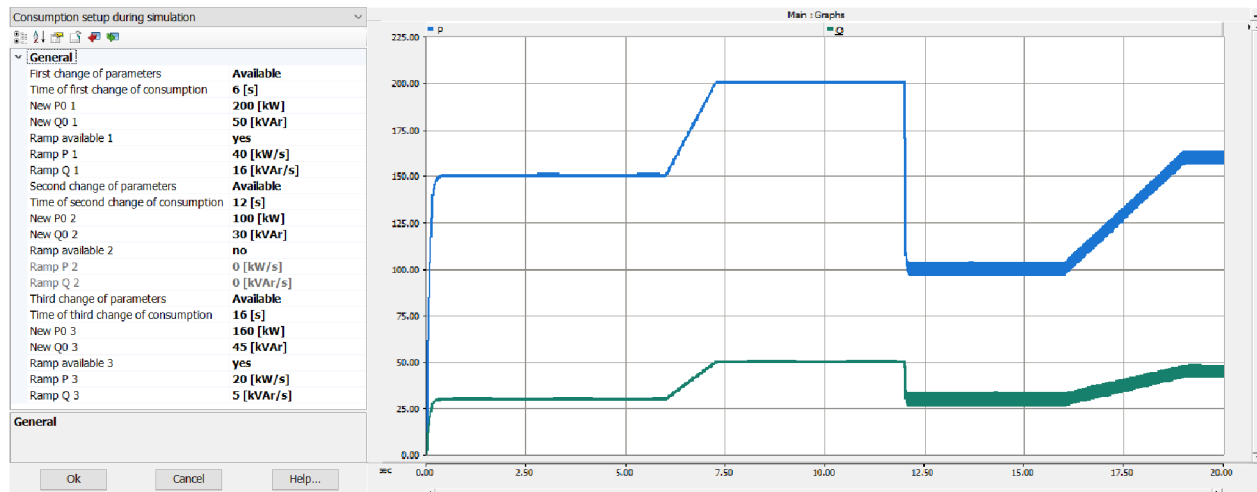
Příklad této funkce při poklesu napětí pod nastavenou úroveň je na obr. 6.7. V čase 5. s dojde k poklesu napětí v síti pod nastavenou mez a odběr sníží svoji spotřebu ve třech krocích ( $x = 0,9; 0,8; 0,7$ ) po předem definovaném zpoždění (v tomto případě po 2 s). Pro názornost byly nastaveny napěťové a frekvenční závislosti odběru na 0.



Obr. 6.7: Snížení odběru při poklesu napětí

Toto zvýšení/snížení odběru v závislosti na stavu sítě můžeme označit jako reakci zátěže (DR – Demand Response). Jednou z možností, jak uplatnit tuto funkci, je řízení kontrolovatelné zátěže jako je např. elektrický ohříváč vody, tepelné čerpadlo, elektromobily, osvětlení [31]. Další z možností je zvýšení/snížení aktuální ceny elektřiny [32]. Dále se může jednat o spolupráci s budovami, které disponují kontrolovatelnou zátěží, instalací menších fotovoltaických elektráren nebo zařízením pro akumulaci elektrické energie [33]. Jednotlivé uzlové odběry mohou být nastaveny na jiné meze změny napětí např. dle priority napájení, dále mohou reagovat s různým časovým zpožděním a velikost jednotlivých kroků může být určena dle výskytu výše zmíněných prvků v dané uzlové oblasti.

Další funkcí je změna parametrů odběru  $P_0$  a  $Q_0$  během simulace. Tato změna může nastat skokově nebo postupně. Lze nastavit až 3 změny odebíraného výkonu v simulaci. Příklad nastavení změny odběru v čase je na obr. 6.8.



Obr. 6.8: Nastavení změny odebíraného výkonu v čase

## 6.4 Model vedení

Model nahrazuje úsek vedení pomocí jednoduchého RL článku. Uživatel zadá délku vedení a vybere typ vedení z nabídky nebo zadá rezistenci a induktivní reaktanci vedení na 1 kilometr délky. Kvůli časové náročnosti simulace nebyla vytvořena obsáhlá databáze typů vedení. Na výběr jsou jen na dva definované typy vedení (240 ANK0 22 kV a 150 AlFe6 22 kV) [35]. O výpočet samotných hodnot se postará výpočetní algoritmus modelu.

## 6.5 Model sítě

Model sítě reprezentuje spojení namodelované části sítě se zbytkem soustavy. Jedná se o napěťový zdroj, kterému lze zadat impedanci, nominální napětí a frekvenci. Modul má možnost také simulovat poruchový stav na straně sítě. Lze definovat změnu napětí během simulace (skokově nebo rampou) a tím simulovat stav, např. přepětí, podpětí nebo výpadek napájení ze strany tohoto modelu.

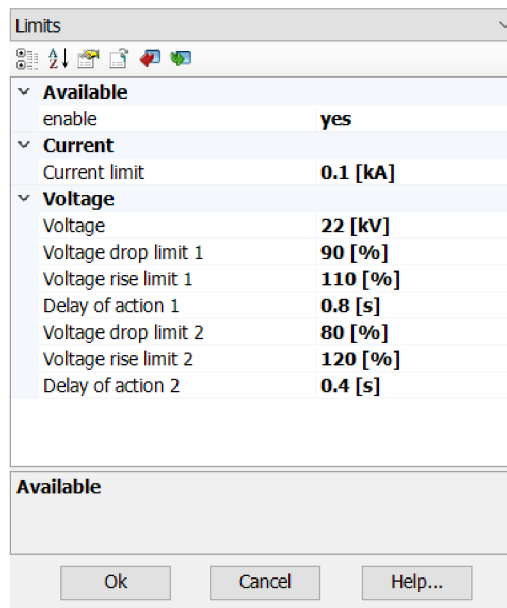
## 6.6 Model vypínače

Tento model dokáže svým vybavením odpojit, připojit, měřit parametry elektrické energie, komunikovat s dalšími prvky modelu a data použít ve svých vlastních výpočtech a řídicích funkcích. Skládá se ze 3 dílčích modulů.

Modul vypínače (*breaker*) reprezentuje silovou část modelu. Obsahuje měření pro vyhodnocení splnění fázovacích podmínek a logiku pro řízení vypínače. Vypínač slouží k odpojení namodelované části sítě od zbytku soustavy nebo připojení ostrovního provozu zpět k síti. Odpojení může vzniknout neplánovaně při poruše nebo plánovaně. Pro zpětné přifázování ostrovního provozu k síti musí být splněny předem nastavené fázovací podmínky. Jedná se o splnění nastavených odchylek rozdílů napětí, frekvencí a fázového posunu.

Modul komunikace (*communication*) je výstupem dat reprezentujících aktuální stav vypínače. Tato data jsou posílána do dalších prvků v síti a jsou klíčová pro jejich správnou funkci.

Modul ochran (*protection*) obsahuje napěťovou a nadproudovou ochranu. Napěťovou ochranu lze nastavit jako dvoustupňovou s časovým zpožděním, nadproudová ochrana reaguje okamžitě po překročení zadané meze. Pokud ochrana zapůsobí, silová část dostane pokyn k odpojení. Příklad nastavení je uveden na obr. 6.9. Tento modul lze nastavit i jako neaktivní.



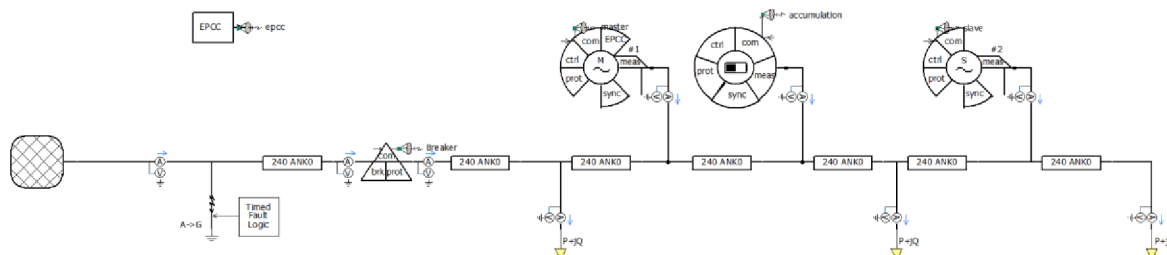
Obr. 6.9: Příklad nastavení ochran vypínače

## 6.7 Model dispečerského řízení

Tento model není jako jediný silově spojen s dalšími modely. Jedná se o zařízení, které distribuuje zadané informace vybraným modelům pomocí komunikace. Tento model umožňuje zvolit plánovaný nebo neplánovaný přechod do ostrovního režimu, čas přechodu do ostrovního režimu, čas přípravy na ostrovní provoz a definovat čas pro vyslání signálu, který informuje o pokynu připojení ostrovního provozu zpět k síti. V případě neplánovaného vzniku ostrovního režimu může vzniknout zkrat v zadaném čase na předem definovaném místě v síti. Nastavení tohoto modulu tedy značně ovlivňuje simulaci.

## 7 SIMULACE

Z modelů prvků popsaných v předchozí kapitole byl sestaven model části sítě (obr. 7.1). Skládá se z distribuovaného zdroje master, distribuovaného zdroje slave, akumulčního zařízení, modelu sítě, vypínače, třech odběrů, sedmi vedení a modelu dispečerského řízení. Simulace č. 1 až č. 4 jsou provedeny na modelu této sítě.



Obr. 7.1: Model simulované sítě pro simulace č. 1 až č. 4

Odběry, které jsou číslovány zleva, mají různá nastavení odebíraných výkonů v jednotlivých simulacích. Odebírané výkony odběrů jsou uvedeny před každou simulací. Pokud není uvedeno jinak, je u všech simulací zapnuta funkce, která umožňuje reakci odběru na pokles nebo zvýšení napětí. Čas zpoždění této funkce je 0,5 s a odběr může měnit svoji spotřebu v následujících krocích:  $x = 1,1; 1,05; 1; 0,9; 0,8$  a  $0,7$ .

Zdroje a akumulční zařízení mají v simulacích nastaveny stejné provozní diagramy, pouze u simulace č. 2 je slave zdroj nastaven jako neřiditelný a dodává předem definovaný výkon. Provozní diagramy zdrojů a akumulčního zařízení jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 7.1: Parametry distribuovaného master zdroje pro simulace č. 1 až č. 4

$P_{\max}$ (kW)	$Q_{\max}$ (kVAr)	$P_{\text{nom}}$ (kW)	$Q_{\text{nom}}$ (kVAr)	$P_{\min}$ (kW)	$Q_{\min}$ (kVAr)
800	200	700	100	600	-200

Tab. 7.2: Parametry distribuovaného slave zdroje pro simulace č. 1 až č. 4

$P_{\max}$ (kW)	$P_{\text{nom}}$ (kW)	$\cos \varphi_{\text{nom}}$ (-)	$P_{\min}$ (kW)	$\cos \varphi$ (-)
500	450	0,97	400	0,95; 1; -0,97; -0,95

Tab. 7.3: Parametry akumulčního zařízení pro simulace č. 1 až č. 4

$P_{\max}$ (kW)	$Q_{\max}$ (kVAr)	$P_{\min}$ (kW)	$Q_{\min}$ (kVAr)	kapacita (kWh)	výchozí stupeň nabití (%)
300	80	-300	-80	200	50

Některé další upřesňující informace jsou popsány v jednodolných simulacích. Nastavení ochran, limitů a další podrobnější nastavení je možné zjistit otevřením modelu dané simulace v programu PSCAD.

## 7.1 Simulace č. 1

V této simulaci nastane postupný pokles napětí ze strany modelu sítě. Ochrany vypínače zaznamenají pokles a vytvoří ostrovní provoz.

Oba zdroje se přifázují po splnění fázovacích podmínek a najíždí s rampou na svoje nominální výkony. Akumulační zařízení se přifazuje a prozatím se aktivně nezapojuje do chodu sítě. V 10. s je simulován pokles napětí v síti a časem vzniká podpětí. Ochrany detekují pokles napětí pod nastavené meze a ochrany vypínače, které mají nastavený nejmenší reakční čas, zapůsobí a vznikne ostrovní provoz. Odběry sníží během podpětí svůj odběr o jeden krok.

Napětí v ostrovním provozu vzroste na nominální hodnotu dříve než stihnout zareagovat ochrany dalších modelů. Po vzniku ostrovního provozu začne regulovat napětí zdroj master společně s akumulacním zařízením. Zdroj master v ostrovním provozu řídí dodávaný činný a jalový výkon slave zdroje. Během simulace se akumulacní zařízení začne nabíjet. V 35. s je vyslána informace z nadřazeného dispečerského řízení pro opětovnou resynchronizaci ostrovního provozu se sítí. Tento pokyn je splněn, když jsou odregulovány odchylky parametrů na vypínači. Zdroje sjíždí na svoji nominální výrobu. Baterie, která byla aktivní v ostrovním provozu, postupně sjíždí se svým výkonem na nulu.

Tab. 7.4: Nastavení odběrů během simulace č. 1

	odběr č. 1	odběr č. 2	odběr č. 3
$\overline{S_0}$ (kVA)	490 + j80	460 + j70	410 + j50

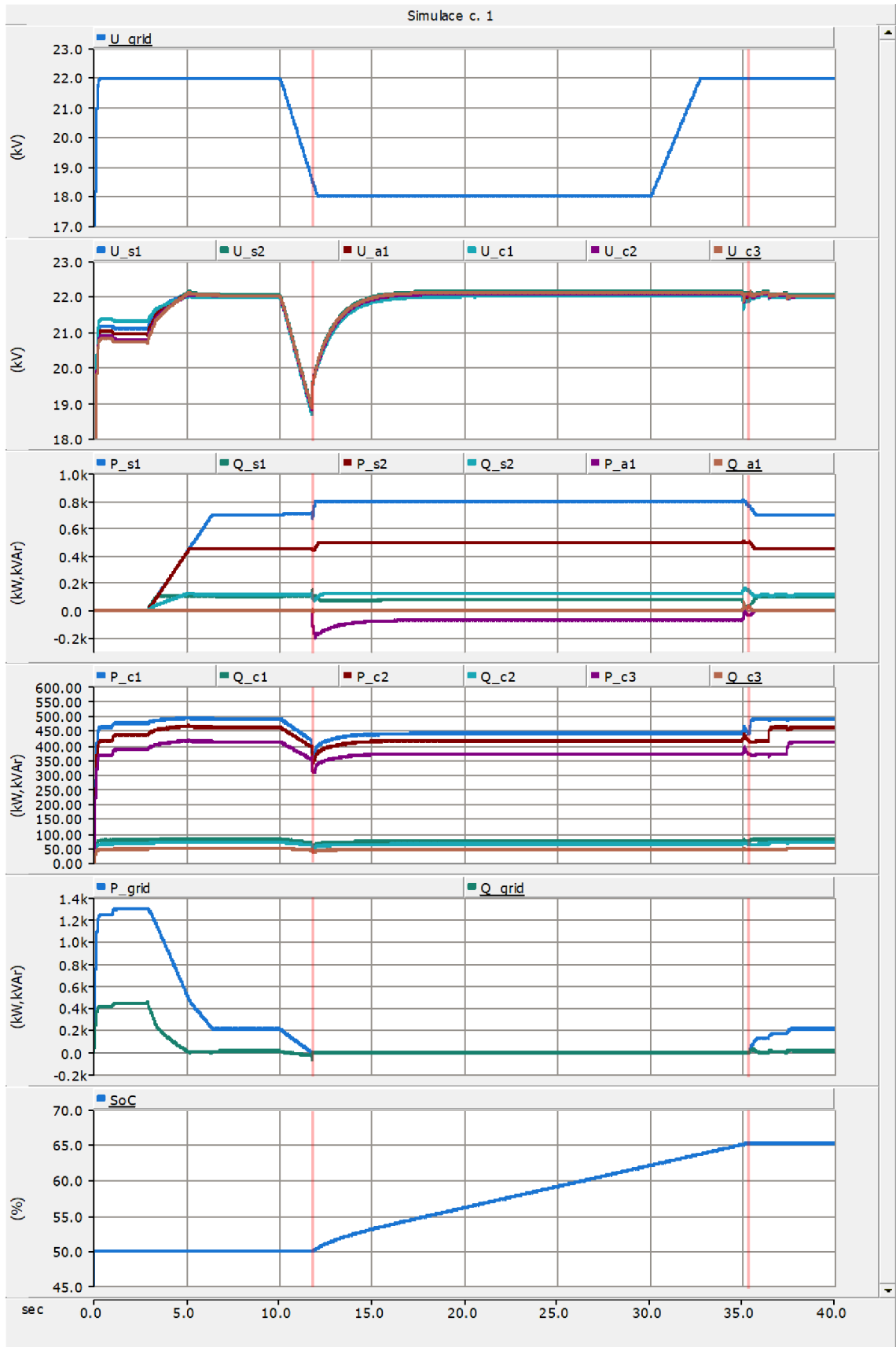
**Popis událostí během simulace:**

- 2,89 s – přifázování zdrojů a najíždění na nominální výkony
- 6,48 s – přifázování akumulčního zařízení
- 10 s – začátek poklesu napětí v síti
- 11,71 s – snížení odběru č. 1 o jeden krok
- 11,76 s – snížení odběru č. 2 o jeden krok
- 11,77 s – reakce ochrany vypínače a vznik ostrovního provozu (vyznačeno)
- 11,78 s – snížení odběru č. 3 o jeden krok
- 35 s – signál pro resynchronizaci ostrovního provozu se sítí
- 35,39 s – splnění parametrů pro zpětné připojení ostrovního provozu k síti (vyznačeno)
- postupné navrácení odběrů do výchozího kroku

Průběhy měřených veličin jsou na obr. 7.2. Jedná se o veličiny:

- $U_{grid}$  – napětí měřené na modelu sítě (v dalších simulacích již není uváděno).
- $U_{s1}, U_{s2}, U_{a1}, U_{c1}, U_{c2}, U_{c3}$  – napětí měřené na master zdroji, slave zdroji, akumulčním zařízením a jednotlivých odběrech.
- $P_{s1}$  a  $Q_{s1}, P_{s2}$  a  $Q_{s2}, P_{a1}$  a  $Q_{a1}$  – výkony master zdroje, slave zdroje a akumulčního zařízení.
- $P_{c1}$  a  $Q_{c1}, P_{c2}$  a  $Q_{c2}, P_{c3}$  a  $Q_{c3}$  – velikost odebíraných výkonů na jednotlivých odběrech.
- $P_{grid}$  a  $Q_{grid}$  – výkon tekoucí do sítě přes vypínač.
- $SOC$  – stupeň nabití akumulčního zařízení.

Označení měřených veličin je v dalších simulacích stejné, proto již nebude dále uváděno.



Obr. 7.2: Simulace č. 1 – napětí sítě; napětí měřené u zdrojů, akumulčního zařízení a odběřů; výkony zdrojů a akumulčního zařízení; odebírané výkony u odběřů; výkon tekoucí do sítě přes vypínač; stupeň nabití akumulčního zařízení

## 7.2 Simulace č. 2

V této simulaci vznikne plánovaný ostrov a slave zdroj je definován jako zdroj, který není možné řídit a dodává předem nastavený výkon. Nastavení dodávaného výkonu tohoto zdroje je zobrazeno v tab. 7.6.

Ostrovní provoz vznikne plánovaně v 15. s. Master zdroj dostane pokyn na přípravu ostrovního provozu v 10. s a začne regulovat výkonovou bilanci ostrovního provozu. Po vzniku ostrovního provozu začne regulovat napětí master zdroj společně s akumulacním zařízením. Obě tyto zařízení reagují na změnu dodávaného výkonu u slave zdroje. Během simulace se mění stupeň nabití akumulacního zařízení. Pokyn pro zpětné přifázování k síti je vyslán ve 40. s a po splnění odchylek parametrů na vypínači dojde ke zpětnému připojení ostrovního provozu k síti. Master zdroj se vrátí na svoji nominální výrobu a akumulacní zařízení snižuje svůj dodávaný výkon na nulu. Průběhy měřených veličin jsou na obr. 7.3.

Tab. 7.5: Nastavení odběrů během simulace č. 2

	odběr č. 1	odběr č. 2	odběr č. 3
$\overline{S_0}$ (kVA)	350 + j70	340 + j70	360 + j70

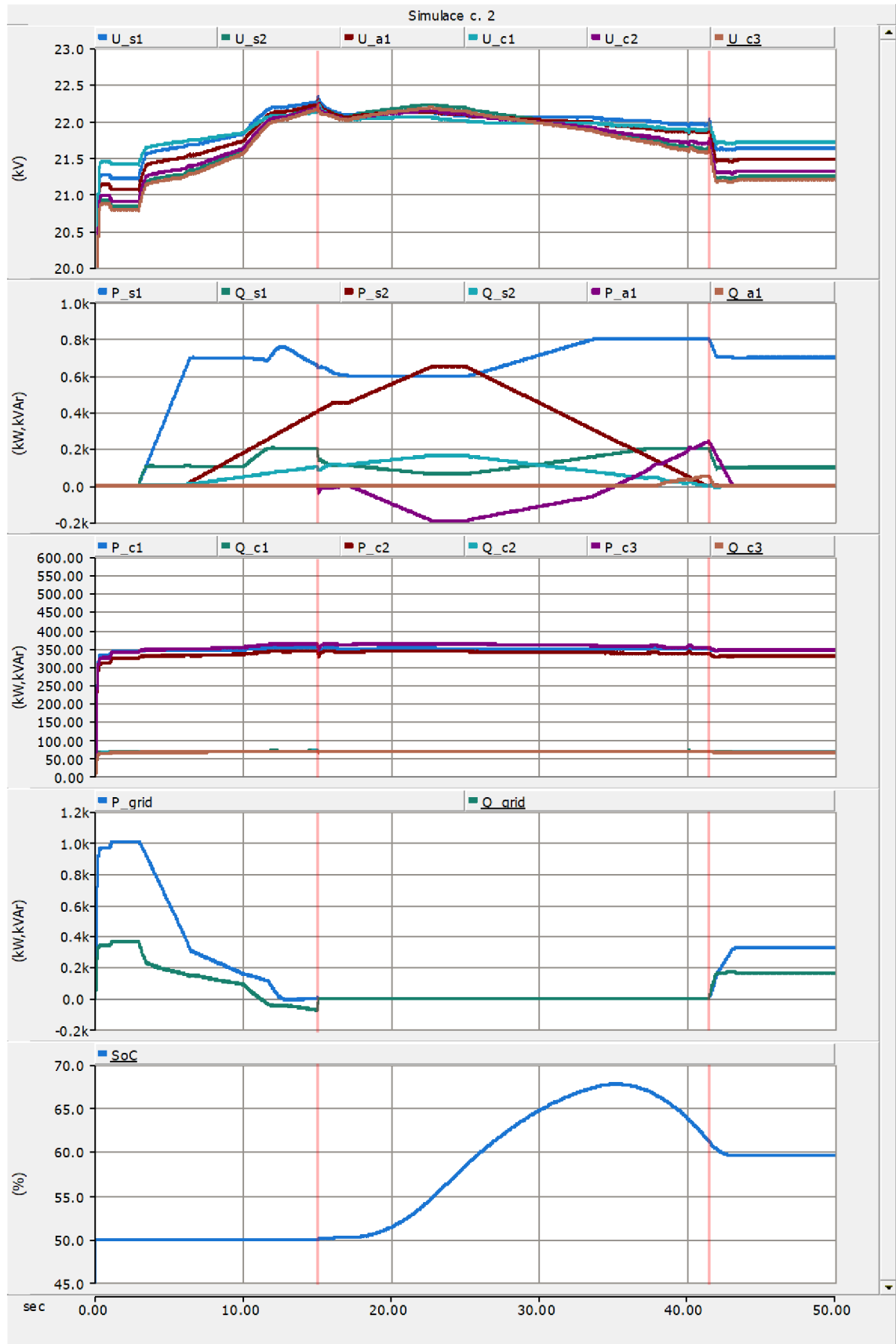
Tab. 7.6: Nastavení slave zdroje během simulace č. 2

	změna č. 1	změna č. 2	změna č. 3
čas změny (s)	6	17	25
$P_0$ (kW)	450	650	0
rampa (kW/s)	45	35	40
$\cos \varphi$ (-)	0,97		

### Popis událostí během simulace:

- 2,9 s – přifázování zdrojů, master zdroj najíždí na nominální výkon
- 6 s – slave zdroj začíná dodávat výkon dle nastavení
- 6,57 s – přifázování akumulacního zařízení
- 10 s – signál pro přípravu na ostrovního provozu
- 15 s – vznik plánovaného ostrovního provozu (vyznačeno)
- 40 s – signál pro resynchronizaci ostrovního provozu se sítí
- 41,44 s – splnění parametrů pro zpětné připojení ostrovního provozu k síti (vyznačeno)





Obr. 7.3: Simulace č. 2 – napětí měřené u zdrojů, akumulčního zařízení a odběrů; výkony zdrojů a akumulčního zařízení; odebírané výkony u odběrů; výkon tekoucí do sítě přes vypínač; stupeň nabití akumulčního zařízení

### 7.3 Simulace č. 3

V této simulaci vznikne plánovaný ostrov v 15. s a během simulace dochází ke značnému snížení spotřeby (tab. 7.7).

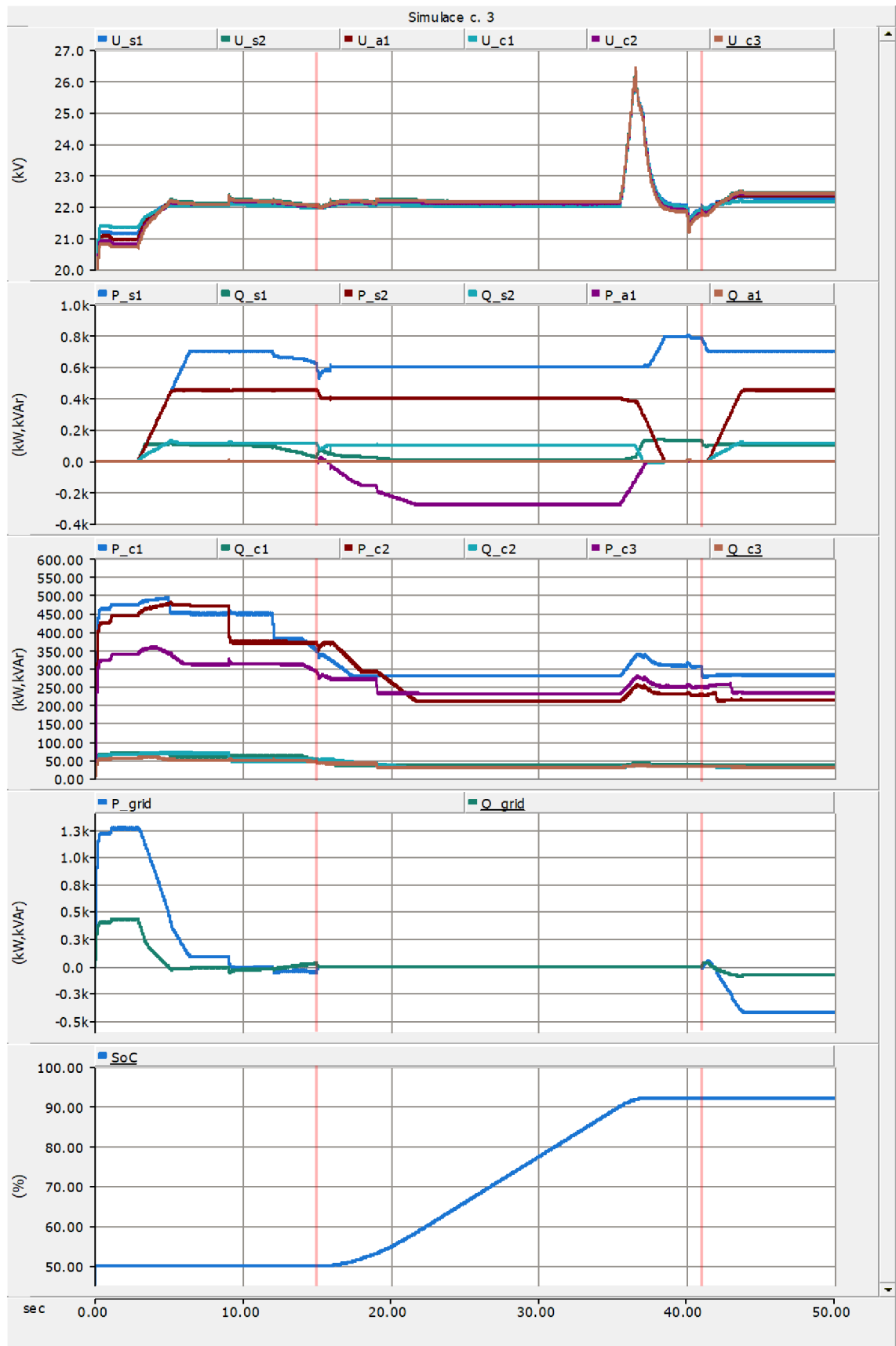
Master zdroj začne v 10. s regulovat výkonovou bilanci ostrovního provozu. Po vzniku ostrovního provozu začne regulovat napětí zdroje v režimu master společně se zařízením pro akumulaci elektrické energie. Ostrovní provoz je přebytečný a oba zdroje dodávají minimální výkon. Baterie se začne nabíjet, až dosáhne stavu nabití a začne sjíždět s odebíraným výkonem. V důsledku poklesu spotřeby se zvýší napětí v síti a vzniká přepětí. Z tohoto důvodu je vydán pokyn na odpojení slave zdroje, který postupně sjíždí s dodávaným výkonem a následně dojde k jeho odpojení od sítě. Ve 40. s je vydán pokyn na připojení ostrovního provozu zpět k síti. Po splnění fázovacích podmínek na vypínači dojde k připojení ostrovního provozu zpět k síti. Zdroji č. 2 je povoleno opětovné přifázování k síti a začne postupně najíždět na svůj nominální výkon. Průběhy měřených veličin jsou na obr. 7.4.

Tab. 7.7: Nastavení odběrů během simulace č. 3

	odběr č. 1	odběr č. 2	odběr č. 3
$\overline{S_0}$ (kVA)	490 + j70	470 + j70	360 + j60
čas změny (s)	5	9	4
$\overline{S_0}$ (kVA)	450 + j60	370 + j50	310 + j50
rampa	ne	ne	25 (kW/s) 10 (kVAr/s)
čas změny (s)	12	16	14
$\overline{S_0}$ (kVA)	380 + j60	290 + j40	270 + j40
rampa	ne	40 (kW/s) 5 (kVAr/s)	20 (kW/s) 5 (kVAr/s)
čas změny (s)	14	19	19
$\overline{S_0}$ (kVA)	280 + j35	210 + j30	230 + j30
rampa	30 (kW/s) 10 (kVAr/s)	30 (kW/s) 5 (kVAr/s)	ne

**Popis událostí během simulace:**

- 2,89 s – přifázování zdrojů a najíždění na nominální výkony
- 6,48 s – přifázování akumulčního zařízení
- 10 s – signál pro přípravu na ostrovní provoz
- 15 s – vznik plánovaného ostrovního provozu (vyznačeno)
- 35,44 s – akumulční zařízení je nabité a sjíždí s odebíraným výkonem
- 36,51 s – pokyn pro slave zdroj na sjíždění s výkonem
- 36,53 s – navýšení odběru č. 3 o jeden krok (další navýšení v čase 37,03 s)
- 36,54 s – navýšení odběru č. 2 o jeden krok (další navýšení v čase 37,04 s)
- 36,56 s – navýšení odběru č. 1 o jeden krok (další navýšení v čase 37,06 s)
- 38,44 s – odpojení slave zdroje
- 40 s – signál pro resynchronizaci ostrovního provozu se sítí
- 40,95 s – splnění parametrů pro zpětné připojení ostrovního provozu k síti (vyznačeno)
- 41,39 s – opětovné přifázování slave zdroje a následné najíždění na nominální výkon



Obr. 7.4: Simulace č. 3 – napětí měřené u zdrojů, akumulčního zařízení a odběru; výkony zdrojů a akumulčního zařízení; odebírané výkony u odběru; výkon tekoucí do sítě přes vypínač; stupeň nabití akumulčního zařízení

## 7.4 Simulace č. 4

Tato simulace byla rozdělena do dvou podobných simulací, které mají téměř stejné nastavení. Jediný rozdíl je ten, že v simulaci č. 4.b není umožněna funkce pro krokové snížení/zvýšení odběru a možnost selektivního odpojení odběru. Nastavení zdrojů, akumulačního zařízení a nastavení velikostí odběrů během simulací jsou stejná.

Během této simulace dojde ke zkratu, vytvoření ostrovního provozu a značnému navýšení odebíraného výkonu (tab. 7.8).

Tab. 7.8: Nastavení odběrů během simulace č. 4

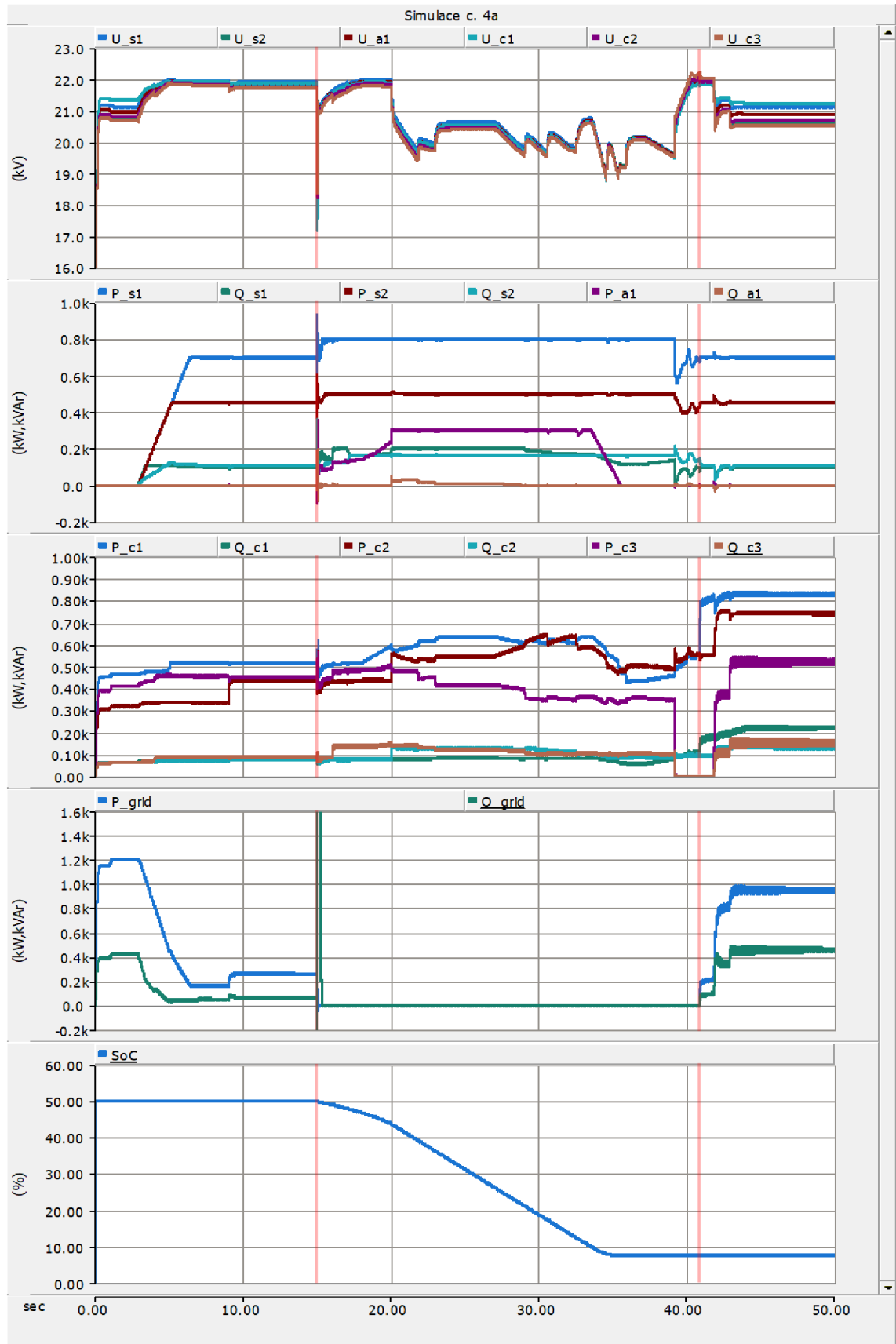
	odběr č. 1	odběr č. 2	odběr č. 3
$\overline{S_0}$ (kVA)	480 + j70	340 + j70	440 + j70
čas změny (s)	5	9	4
$\overline{S_0}$ (kVA)	520 + j80	440 + j80	460 + j90
rampa	ne	ne	ne
čas změny (s)	18	20	16
$\overline{S_0}$ (kVA)	680 + j90	590 + j140	490 + j140
rampa	40 (kW/s) 2 (kVAr/s)	ne	ne
čas změny (s)	37	27	19
$\overline{S_0}$ (kVA)	860 + j230	790 + j140	560 + j165
rampa	30 (kW/s) 20 (kVAr/s)	40 (kW/s) 10 (kVAr/s)	20 (kW/s) 10 (kVAr/s)

### 7.4.1 Simulace č. 4.a

Po zkratu v 15. s vzniká ostrovní provoz. Master zdroj společně s akumulačním zařízením řídí ostrovní provoz. Akumulační zařízení během simulace dodává výkon a vybíjí se. Až se dostane do stavu vybití, začne postupně snižovat svůj dodávaný výkon. V závislosti na napětí v místě odběrů dochází k postupnému krokovému snižování odběrů až na minimum. Vzniká podpětí v síti, následkem čehož je vyslán signál na odpojení odběru č. 3. Ve 40. s je dán pokyn pro připojení ostrovního provozu zpět k síti. Po splnění fázovacích podmínek je pokyn splněn. Po připojení ostrovního provozu zpět k síti dochází k postupnému navrácení odběrů do výchozích stavů a připojení odběru č. 3. Průběhy měřených veličin jsou na obr. 7.5.

**Popis událostí během simulace:**

- 2,89 s – přifázování zdrojů a najíždění na nominální výkony
- 6,48 s – přifázování akumulčního zařízení
- 15 s – zkrat v síti a následný vznik ostrovního provozu (**vyznačeno**)
- 21,77 s – snížení odběru č. 3 o jeden krok (další snížení v časech 22,97 a 29,02 s)
- 30,51 s – snížení odběru č. 2 o jeden krok (další snížení v časech 32,5 a 34,55 s)
- 33,51 – akumulční zařízení je vybité a sjíždí s dodávaným výkonem
- 34,55 s – snížení odběru č. 1 o jeden krok (další snížení v časech 35,36 a 35,86 s)
- 39,14 s – odpojení odběru č. 3
- 40 s – signál pro resynchronizaci ostrovního provozu se sítí
- 40,81 s – splnění parametrů pro zpětné připojení ostrovního provozu k síti (**vyznačeno**)
- 41,81 s – připojení odběru č. 3 a postupné navrácení odběrů do výchozího kroku



Obr. 7.5: Simulace č. 4.a – napětí měřené u zdrojů, akumulčního zařízení a odběrů; výkony zdrojů a akumulčního zařízení; odebírané výkony u odběrů; výkon tekoucí do sítě přes vypínač; stupeň nabití akumulčního zařízení

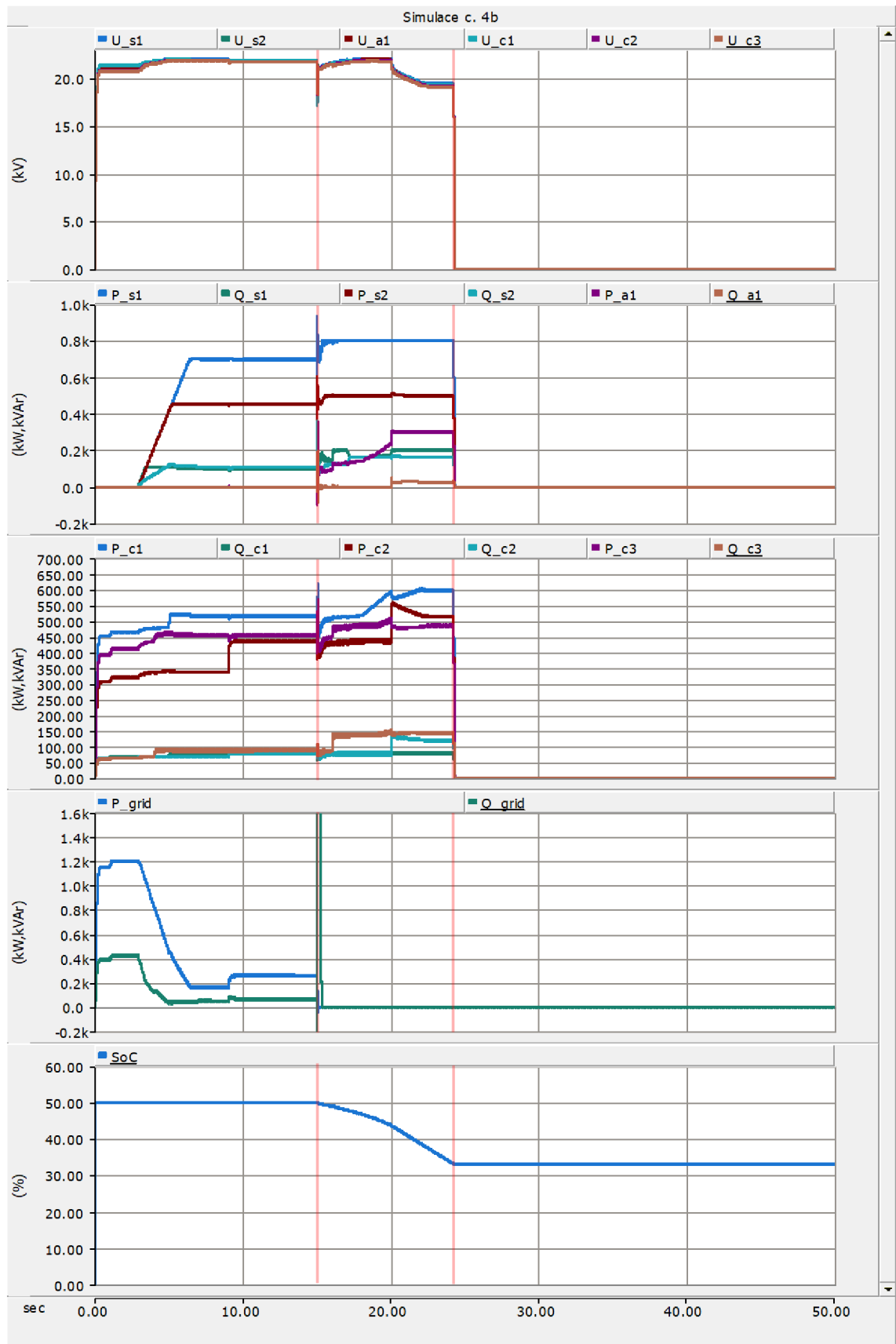
### 7.4.2 Simulace č. 4.b

Jak již bylo zmíněno, tato simulace má téměř identické nastavení. Jediný rozdíl je v možnosti snížení/zvýšení velikosti odběru při snížení/zvýšení napětí pod/nad nastavenou mez a možnost selektivního odpojení odběrů. Rozdíl mezi výslednými simulacemi je značný. U předchozí simulace stačily jednotlivé kroky pro pokles hodnot odběrů na udržení ostrovního provozu, a až po vybití baterie bylo nutné odpojit odběr č. 3. Ostrovní provoz byl poté úspěšně připojen k síti. V této simulaci nemají zdroje dostatečný výkon na udržení napětí v přípustných mezích a dojde k poměrně rychlému ukončení ostrovního provozu. Akumulační zařízení se ani nestihne vybit. Průběhy měřených veličin jsou na obr. 7.6.

#### **Popis událostí během simulace:**

- 2,89 s – přifázování zdrojů a najíždění na nominální výkony
- 6,48 s – přifázování akumulčního zařízení
- 15 s – zkrat v síti a následný vznik ostrovního provozu (**vyznačeno**)
- 24,21 s – zapůsobení ochran zdrojů a akumulčního zařízení a následné odpojení od sítě (**vyznačeno**)

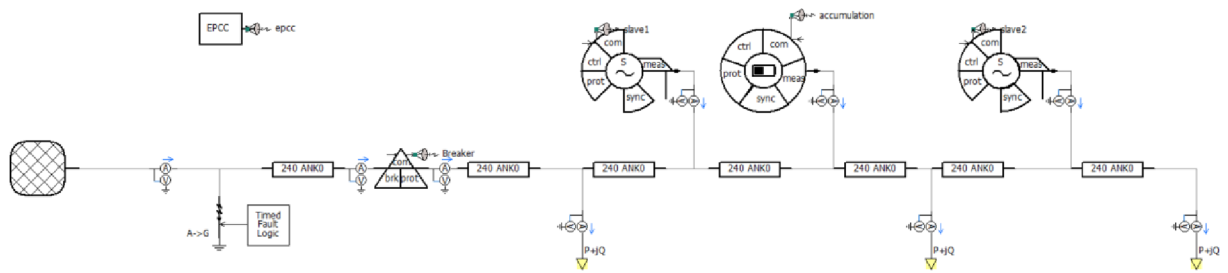




Obr. 7.6: Simulace č. 4.b – napětí měřené u zdrojů, akumulčního zařízení a odběrů; výkony zdrojů a akumulčního zařízení; odebírané výkony u odběrů; výkon tekoucí do sítě přes vypínač; stupeň nabití akumulčního zařízení

## 7.5 Simulace č. 5

Tato simulace je provedena na mírně odlišné síti než předchozí simulace. Její model je na obr. 7.7. Modely slave zdroje a akumulčního zařízení byly mírně upraveny. Master zdroj byl nahrazen dalším slave zdrojem. Akumulační zařízení řídí ostrovní provoz a jeho regulace již není omezená. Akumulační zařízení má stejně jako master zdroj možnost na přípravu pro přechod do ostrovního režimu (schéma řízení č. 4), ale není vybavené možností selektivního odpojování zátěží nebo slave zdrojů. Slave zdroje (číslovány zleva) jsou nastavené jako neřiditelné.



Obr. 7.7: Model simulované sítě pro simulace č. 5

Tato simulace byla rozdělena do dvou podobných simulací, které mají téměř stejná nastavení. Jediný rozdíl mezi simulacemi je nastavení dodávaných výkonů u slave zdrojů. Nastavení akumulčního zařízení a nastavení velikostí odběrů během simulaci je stejné (tab. 7.9 a tab. 7.10).

Tab. 7.9: Parametry akumulčního zařízení v simulaci č. 5

$P_{\max}$ (kW)	$Q_{\max}$ (kVAr)	$P_{\min}$ (kW)	$Q_{\min}$ (kVAr)	kapacita (kWm)	výchozí stupeň nabití (%)
400	200	-400	-200	200	50

Tab. 7.10: Nastavení odběrů během simulace č. 5

	odběr č. 1	odběr č. 2	odběr č. 3
$\overline{S_0}$ (kVA)	$270 + j80$	$230 + j70$	$250 + j80$

Podobný reálný test kdy byl vytvořen plánovaný ostrovní provoz, kde akumulční zařízení tento ostrovní provoz řídilo a reagovalo na výrobu s neřízených zdrojů byl proveden v [28].

### 7.5.1 Simulace č. 5.a

Slave zdroje mají předem definovaný dodávaný výkon (tab. 7.11 a tab. 7.12). Dle nastavených dodávaných výkonů lze soudit, že se jedná o zdroje, které pracují na různém principu výroby elektrické energie, a díky tomu je jejich výkon více rozprostřen během simulace.

Plánovaný ostrov vzniká v 15. s a akumulční zařízení se chová jako master a reguluje ostrovní provoz. V závislosti na dodávaných výkonech slave zdrojů se během simulace akumulční zařízení nabíjí a vybíjí. Ve 40. s dostane akumulční zařízení pokyn na přifázování zpět k síti. Tento pokyn je splněn po odregulování parametrů na vypínači. Průběhy měřených veličin jsou na obr. 7.8.

Tab. 7.11: Nastavení slave zdroje č. 1 v simulaci č. 5.a

	změna č. 1	změna č. 2	změna č. 3
čas změny (s)	4	18	35
$P_0$ (kW)	600	100	300
rampa (kW/s)	60	50	20
$\cos \varphi$ (-)	0,97		

Tab. 7.12: Nastavení slave zdroje č. 2 v simulaci č. 5.a

	změna č. 1	změna č. 2	změna č. 3
čas změny (s)	6	17	25
$P_0$ (kW)	350	720	0
rampa (kW/s)	45	55	25
$\cos \varphi$ (-)	0,97		

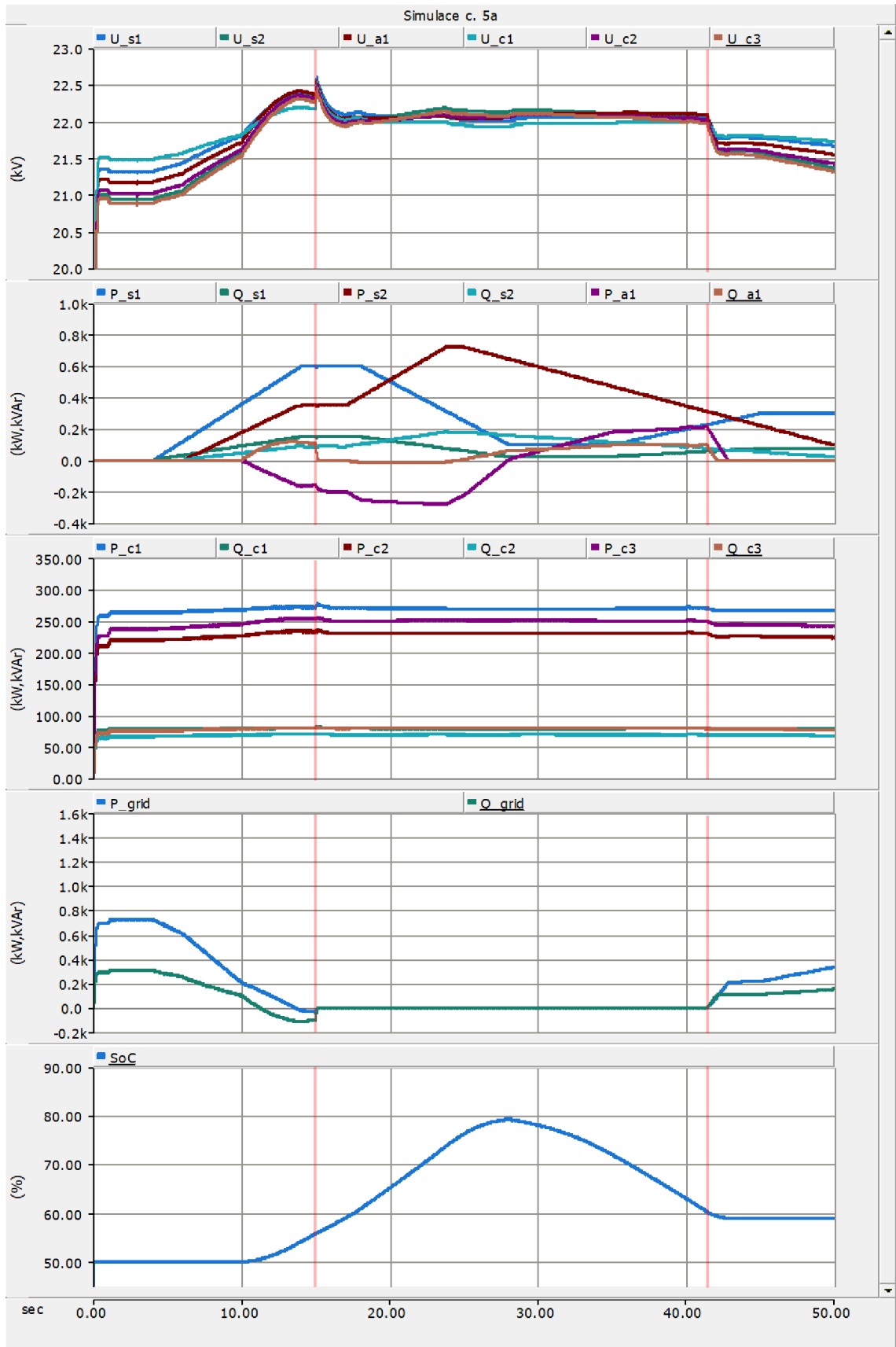
**Popis událostí během simulace:**

- 2,9 s – přifázování zdrojů a najíždění na nominální výkony
- 4 s – přifázování akumulčního zařízení
- 4 s – slave zdroj č. 1 začíná dodávat výkon dle nastavení
- 6 s – slave zdroj č. 2 začíná dodávat výkon dle nastavení
- 10 s – signál pro přípravu na ostrovní provoz
- 15 s – vznik plánovaný ostrovní provoz (**vyznačeno**)
- 40 s – signál pro resynchronizaci ostrovního provozu se sítí
- 41,34 s – splnění parametrů pro zpětné připojení ostrovního provozu k síti (**vyznačeno**)

Průběhy měřených veličin jsou na obr. 7.8. Jedná se o tyto veličiny:

- $U_{s1}$ ,  $U_{s2}$ ,  $U_{a1}$ ,  $U_{c1}$ ,  $U_{c2}$ ,  $U_{c3}$  – napětí měřené na slave zdroji č. 1, slave zdroji č. 2, akumulčním zařízením a jednotlivých odběrech.
- $P_{s1}$  a  $Q_{s1}$ ,  $P_{s2}$  a  $Q_{s2}$ ,  $P_{a1}$  a  $Q_{a1}$  – výkony slave zdroje č. 1, slave zdroje č. 2 a akumulčního zařízení.
- $P_{c1}$  a  $Q_{c1}$ ,  $P_{c2}$  a  $Q_{c2}$ ,  $P_{c3}$  a  $Q_{c3}$  – velikost odebíraných výkonů na jednotlivých odběrech.
- $P_{grid}$  a  $Q_{grid}$  – výkon tekoucí do sítě přes vypínač.
- $SOC$  – stupeň nabití akumulčního zařízení.

Označení měřených veličin je v dalších simulacích stejné, proto již nebude dále uváděno.



Obr. 7.8: Simulace č. 5.a – napětí měřené u zdrojů, akumulčního zařízení a odběrů; výkony zdrojů a akumulčního zařízení; odebírané výkony u odběrů; výkon tekoucí do sítě přes vypínač; stupeň nabití akumulčního zařízení

### 7.5.2 Simulace č. 5.b

Slave zdroje mají předem definovaný dodávaný výkon (tab. 7.13 a tab. 7.14). Dle nastavených dodávaných výkonů lze soudit, že se jedná o zdroje, které pracují na velmi podobném principu výroby elektrické energie, a díky tomu je jejich dodávaný výkon velice málo rozprostřen během simulace.

Plánovaný ostrov vzniká v 15. s a akumulční zařízení se chová jako master a reguluje ostrovní provoz. V závislosti na dodávaných výkonech slave zdrojů se během simulace akumulční zařízení nabíjí a vybíjí. Přibližně v půlce simulace dochází k poklesu dodávaného výkonu obou slave zdrojů. Pokles výkonu je tak značný, že ani krokové snižování odběrů nepomůže, vznikne podpětí, na které zareagují ochrany zdrojů a ochrany akumulčního zařízení a ostrovní provoz přestane fungovat. Průběhy měřených veličin jsou na obr. 7.9.

Tab. 7.13: Nastavení slave zdroje č. 1 v simulaci č. 5.b

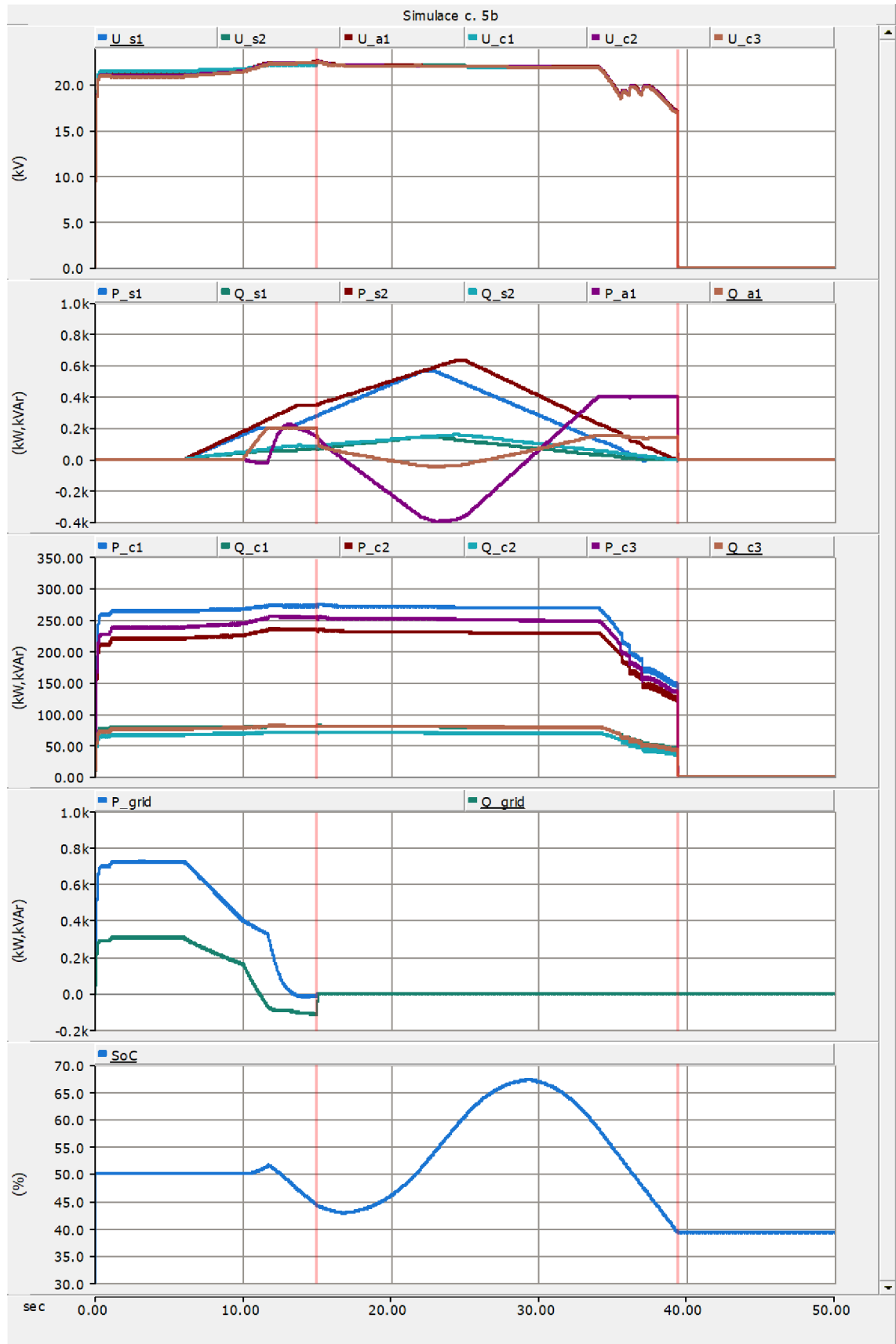
	změna č. 1	změna č. 2	změna č. 3
čas změny (s)	6	13	23
$P_0$ (kW)	200	560	0
rampa (kW/s)	40	40	40
$\cos \varphi$ (-)	0,97		

Tab. 7.14: Nastavení slave zdroje č. 2 v simulaci č. 5.b

	změna č. 1	změna č. 2	změna č. 3
čas změny (s)	6	15	25
$P_0$ (kW)	350	630	0
rampa (kW/s)	45	30	45
$\cos \varphi$ (-)	0,97		

#### **Popis událostí během simulace:**

- 2,9 s – přiřazování zdrojů a najíždění na nominální výkony
- 4 s – přiřazování akumulčního zařízení
- 6 s – slave zdroj začínají dodávat výkon dle nastavení
- 10 s – signál pro přípravu na ostrovní provoz
- 15 s – vznik plánovaného ostrovního provozu (**vyznačeno**)
- 35,53 s – snížení odběru č. 3 o jeden krok (další snížení v časech 36,03 a 36,89 s)
- 35,55 s – snížení odběru č. 1 o jeden krok (další snížení v časech 36,05 a 36,93 s)
- 35,56 s – snížení odběru č. 2 o jeden krok (další snížení v časech 36,06 a 36,96 s)
- 39,32 s – zapůsobení ochran zdrojů a akumulčního zařízení a následné odpojení od sítě (**vyznačeno**)



Obr. 7.9: Simulace č. 5.b – napětí měřené u zdrojů, akumulčního zařízení a odběrů; výkony zdrojů a akumulčního zařízení; odebírané výkony u odběrů; výkon tekoucí do sítě přes vypínač; stupeň nabití akumulčního zařízení

## 8 ZÁVĚR

Teoretická část práce se zabývala budoucím vývojem elektrizační soustavy ČR, očekávaným vývojem obnovitelných zdrojů energie a předpokládaným vývojem instalovaného výkonu distribuované výroby v ČR dle Národního akčního plánu pro chytré sítě. Instalovaný výkon distribuované výroby by se měl do roku 2040 výrazně zvýšit a dosáhnout 9667 MW. Tyto zdroje většinou využívají obnovitelné zdroje energie, např. malé vodní elektrárny, fotovoltaické elektrárny, větrné elektrárny a další. Jejich výroba je obtížně predikovatelná. Jedná se však i o kogenerační jednotky menších výkonů a v neposlední řadě i o zařízení pro akumulaci elektrické energie. Navazující část práce se zabývala technologickými prvky ostrovního provozu a zmiňovala požadavky, které jsou na něj kladené.

S rozvojem říditelných i neříditelných distribuovaných zdrojů, menších zdrojů, akumulačních zařízení a elektromobility se dají očekávat zvýšené nároky na říditelnost soustavy. Tyto změny vyvolávají nutnost technologických změn, jak v oblasti přenosové, tak distribuční soustavy. Tyto technologické změny jsou někdy označovány pojmem chytré sítě. Je přirozené, že míra inteligence těchto sítí bude narůstat spolu s technologickým rozvojem. Jednou z funkcí těchto sítí může být vytvoření plánovaného nebo neplánovaného ostrovního provozu v části sítě, např. při poruchách nebo plánovaných opravách.

Praktickou část práce lze rozdělit na dvě části. V první části byly vytvořeny modely prvků distribuční soustavy v programu PSCAD. Jedná se o model distribuovaného zdroje master, model akumulačního zařízení, model distribuovaného zdroje slave, model sítě, model odběru, model vedení, model dispečerského řízení a model vypínače. Jednotlivé modely byly popsány a uvedeny možnosti jejich nastavení a funkcí. Modely distribuovaných zdrojů a model akumulačního zařízení mají několik schémat řízení v závislosti na jejich stavu a stavu sítě. Master zdroj dodává zadaný činný a jalový výkon, v případě ostrovního provozu řídí síť a hradí výkonovou nerovnováhu. Slave zdroj lze rozdělit na říditelný a neříditelný. Říditelný slave zdroj dodává zadaný činný a jalový výkon, v případě ostrovního provozu mění svůj dodávaný výkon dle požadavků master zdroje a dle možností svého provozního diagramu. Neříditelnému slave zdroji lze nastavit výkon, který bude dodávat během simulace. Akumulační zařízení se aktivně zapojuje do chodu sítě pouze v ostrovním provozu, kdy má omezené regulační schopnosti.

Ve druhé části byl z jednotlivých modelů sestaven model části sítě, na kterém byly provedeny simulace. Během simulací vznikl plánovaný nebo neplánovaný ostrovní provoz. První simulace se zabývala reakcí namodelované soustavy při značném poklesu napětí ze strany modelu vnější sítě. V druhé simulaci byl testován plánovaný ostrovní provoz a slave zdroj byl nastaven jako neříditelný. Ve třetí simulaci vznikl plánovaný ostrovní provoz a během simulace došlo ke značnému poklesu odebíraných výkonů. Ostrovní provoz těchto simulací byly úspěšně přifázovány zpět k síti. Čtvrtá simulace se zabývala vytvořením neplánovaného ostrovního provozu a během simulace došlo ke značnému nárůstu odebíraných výkonů. Tato simulace byla rozdělena na dvě. Simulace č. 4.a měla možnost reakci odběru na pokles napětí a dále selektivní odpojení odběru v krajních podmínkách, simulace č. 4.b těmito možnostmi nedisponovala. Simulace č. 4.a skončila úspěšným přifázováním ke zbytku sítě, u simulace č. 4.b nastalo podpětí a po reakci ochran byl ostrovní provoz ukončen.

Simulace č. 5 byla provedena na mírně odlišném modelu sítě. Modely slave zdroje a akumulačního zařízení byly mírně upraveny. Model master zdroje byl nahrazen dalším slave zdrojem, proto v této simulaci zastává roli mastera akumulační zařízení. Oba slave zdroje byly



---

nastaveny jako neřiditelné a dodávaly předem nastavený výkon. Tato simulace byla také rozdělena na dvě a u obou vznikl plánovaný ostrovní provoz. Jediný rozdíl mezi jednotlivými simulacemi byl v nastavených dodávaných výkonech slave zdrojů. V simulaci č. 5.a byl dodávaný výkon od slave zdrojů rozprostřen rovnoměrněji během simulace, z toho lze soudit, že se jedná o zdroje, které pracují na různém principu výroby elektrické energie. V simulaci č. 5.b byl dodávaný výkon slave zdrojů během simulace velice podobný, proto lze soudit, že se jedná o zdroje, které pracují na velice podobném principu výroby elektrické energie. Ostrovní provoz č. 5.a byl úspěšně přifázován k síti, u ostrovního provozu č. 5.b došlo během simulace k podpětí a po reakci ochran byl ostrovní provoz ukončen.

**POUŽITÁ LITERATURA**

- [1] TOMAN, P., DRÁPELA, J., MIŠÁK, S., ORSÁGOVÁ J., PAAR M., TOPOLÁNEK D., a kol. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 265 str., ISBN 978-80-01-04935-8.
- [2] *Roční zpráva o provozu ES ČR: 2016*. Energetický regulační úřad. Praha: Oddělení statistiky a sledování kvality ERÚ, 2017, 37 str.
- [3] *Státní energetická koncepce České republiky*. Aktualizovaná. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky, 2014, 145 str.
- [4] *Regulace frekvence – bilance činných výkonů v ostrovním provozu (OP)* [online]. 21 str. [cit. 2017-10-12]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/15369188-Regulace-frekvence-bilance-cinnnych-vykonu-v-ostrovnim-provozu-opprednaska-k-predmetu-rizeni-es-1-uvod.html>
- [5] RICHTEROVÁ, L. *Specifika ostrovního provozu a projekt Smart Region Vrchlabí*. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014, 118 str. Dostupné z: <http://docplayer.cz/44415295-Specifika-ostrovnio-provozu-a-projekt-smart-region-vrchlabi-specifics-of-island-operation-and-the-smart-region-vrchlabi-project.html>
- [6] TIMBUS, A, OUDALOV, A., HO N. M., C., *Islanding detection in smart grids* [online]. IEEE, 7 str. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5618306>
- [7] *Územní energetická koncepce hlavního města Prahy. Příloha č.9 Spolehlivost zásobování, energetická bezpečnost* [online]. ENVIS – Informační servis, 43 str. [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: [http://envis.praha-mesto.cz/UEK\\_2013/data/pdf/AUEKhlmlPhy-2013-Priloha9.pdf](http://envis.praha-mesto.cz/UEK_2013/data/pdf/AUEKhlmlPhy-2013-Priloha9.pdf)
- [8] *Kodex přenosové soustavy Část II. Podpůrné služby (PpS) Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy*. Revize 14. Praha: ČEPS, 2014, 230 str.
- [9] *Pravidla provozování distribučních soustav příloha 7. Pravidla pro podpůrné služby (PpS) zdrojů připojených k sítím provozovatele distribuční soustavy*. 2011, 36 str.
- [10] *Jak funguje kogenerační jednotka* [online]. ČEZ ENERGO, [cit. 2017-10-12]. Dostupné z: <http://www.cezenergo.cz/cs/o-kogeneraci/jak-funguje-kogenerace.html>
- [11] *Perspektivní způsoby využití zemního plynu* [online]. Ústav plyných a pevných paliv a ochrany ovzduší VŠCHT PRAHA, 87 str. [cit. 2017-10-12]. Dostupné z: [http://upkoo.vscht.cz/files/uzel/0023451/Perspektivni\\_zpusoby\\_vyuziti\\_ZP.pdf?redirected](http://upkoo.vscht.cz/files/uzel/0023451/Perspektivni_zpusoby_vyuziti_ZP.pdf?redirected)
- [12] *Přehled kogeneračních jednotek TEDOM* [online]. TEDOM Kogenerační jednotky [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: <https://www.tedom.com/wp-content/uploads/2017/12/P%C5%99ehled-kogenera%C4%8Dn%C3%ADch-jednotek-TEDOM.pdf>
- [13] MASTNÝ, P., DRÁPELA, J., MIŠÁK, S., MACHÁČEK J., PTÁČEK M., RADIL L., BARTOŠÍK T., PAVELKA T. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 257 str., ISBN 978-80-01-04937-2.
- [14] *Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator (Phasor Type)* [online]. MathWorks [cit. 2017-11-06]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/windturbinedoublyfedinductiongeneratorphasortype.html#bqs2x4j>

- [15] *Strojovna větrné elektrárny bez převodovky s multipólovým synchronním generátorem (výrobce ENERCON)* [online]. Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2017-11-06]. Dostupné z: [http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-bez-prevodovky-s-multipolovym-synchronnim-generatorem-\(vyrobce-enercon\)/333](http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-bez-prevodovky-s-multipolovym-synchronnim-generatorem-(vyrobce-enercon)/333)
- [16] *Národní akční plan pro chytré sítě (NAP SG)*. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, 2015, 140 s.
- [17] *The world's most used renewable power sources* [online]. Power technology [cit. 2017-11-06]. Dostupné z: <http://www.power-technology.com/features/featurethe-worlds-most-used-renewable-power-sources-4160168/>
- [18] *Tesla actually built the world's biggest battery. Here's how it works* [online]. Popular science [cit. 2017-11-09]. Dostupné z: <https://www.popsci.com/tesla-building-worlds-biggest-battery-how-it-will-work>
- [19] BUDT, M., WOLF, D., SPAN, R., YAN J. *A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments* [online]. ScienceDirect, 19 str. [cit. 2017-11-09]. Dostupné z: [https://ac.els-cdn.com/S0306261916302641/1-s2.0-S0306261916302641-main.pdf?\\_tid=9d48af24-ed7e-11e7-84de-00000aab0f01&acdnat=1514651552\\_d50950e0903ceb9491e6e50d61af3954](https://ac.els-cdn.com/S0306261916302641/1-s2.0-S0306261916302641-main.pdf?_tid=9d48af24-ed7e-11e7-84de-00000aab0f01&acdnat=1514651552_d50950e0903ceb9491e6e50d61af3954)
- [20] *Flywheels*, Energy Storage Association [online]. Energy Storage Association [cit. 2017-11-09]. Dostupné z: <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/flywheels>
- [21] *WEB Aruba and Temporal Power Announce First Energy Storage Project* [online]. Temporal [cit. 2017-11-09]. Dostupné z: <http://temporalpower.com/news/web-aruba-and-temporal-power-announce-first-energy-storage-project/>
- [22] *Průtoková baterie* [online]. O ENERGETICE [cit. 2017-11-09]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/prutokova-baterie/>
- [23] HOSSAIN M. R., AMANULLAH M.T. O., SHAWKAT A. A. B. M. *Smart grids Opportunities, Developments and Trends 2013* [online]. Springer, 23 str. [cit. 2017-12-09]. Dostupné z: [https://www.springer.com/cda/content/document/cda\\_downloaddocument/9781447152095-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1406312-p175138227](https://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9781447152095-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1406312-p175138227)
- [24] NOVÁČEK J. *Numericky stabilní estimace stavu elektrických sítí s využitím fázorových měření*. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Disertační práce, 99 str., Plzeň 2014.
- [25] HOLINGEROVÁ S. *Zástupci ČEZ Distribuce a Enedis jednali v Praze o smart grid projektu INTERFLEX, který odstartuje v lednu 2017* [online]. ČEZ [cit. 2017-11-09]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/5805.html>
- [26] BARAI R. G., KRISNAN S., VENKATESCH B. *Smart metering and Functionalities of Smart Meters in Smart Grid – A review* [online]. IEEE, 8 str. [cit. 2017-11-09]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7379940>
- [27] GANGALE F., VASILJEVSKA J., COVRIG C. F., MENGOLINI A., FULLI G. *Smart grid projects outlook 2017* [online]. Joint Research Centre 91 str. Dostupné z: [https://ses.jrc.ec.europa.eu/sites/ses.jrc.ec.europa.eu/files/u24/2017/sgp\\_outlook\\_2017-online.pdf](https://ses.jrc.ec.europa.eu/sites/ses.jrc.ec.europa.eu/files/u24/2017/sgp_outlook_2017-online.pdf)

- [28] *GRID4EU, Final Report* [online]. GRID4EU 246 str. Dostupné z: [http://grid4eu.blob.core.windows.net/media-prod/29375/grid4eu-final-report\\_normal-res.pdf](http://grid4eu.blob.core.windows.net/media-prod/29375/grid4eu-final-report_normal-res.pdf)
- [29] HOLÍNEK T. *Zařízení pro energetické využití odpadu* [online]. O ENERGETICE [cit. 2017-11-09]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/teplarenstvi/zarizeni-pro-energeticke-vyuziti-odpadu-spalovny/>
- [30] TRNAVSKÝ J. *Větrná energetika ve světě kráčí dál. A v České republice?* [online]. Energie 21 [cit. 2017-12-29]. Dostupné z: <http://energie21.cz/vetrna-energetika-ve-svete-kraci-dal-a-v-ceske-republice/>
- [31] BUNGO A., TOMONORI G., KOSUKE U., ATSUSHI Y., TOMONOBU S., TOSHIHISA F., CHUL-HWAN K., *Optimal Operation of Smart Grid in Isolated Island* [online]. IEEE, 6 str. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5696987>
- [32] YANAN T., SRINIVASAN D., TRIVEDI A., *Multi Objective Optimal Energy Consumption Scheduling in Smart Grids* [online]. IEEE, 6 str. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8252970>
- [33] MORVAJ B., JURISIC B., HOLJEVAC N., *Stochastic Simulation of the Smart Grid and Demand Response Implementations on a Citywide Scale* [online]. IEEE, 6 str. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6596447>
- [34] *Fixed Load (1 and 3-Phase, LG)*, program PSCAD, On-Line Help System.
- [35] *Knihovna dyn\_mod*, knihovna programu PSCAD.
- [36] GARDE R., CASADO S.; SANTAMARIA M., AGUADO M., *Power quality and stability analysis during islanded mode operation in a microgrid based on master-slave configuration* [online]. IEEE, 8 str. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7449288>
- [37] XIN M., ZENG L., JINJUN L. TENG W., SHIKE W., BAOJIN L., *A seamless transfer strategy based on special master and slave DGs* [online]. IEEE, 6 str. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7992277>