

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti využití setrvačníků při řízení provozu elektrizační
soustavy

Autor práce: **Bc. Tereza Krejnická**
Vedoucí práce: **Doc. Ing. Emil Dvorský, CSc.**

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Tereza KREJNICKÁ**
Osobní číslo: **E21N0055P**
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**
Specializace: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Možnosti využití setrvačníků při řízení provozu elektrizační soustavy**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

1. Vysvětlíte stávající metodiku řízení a provozu elektrizační soustavy pro zachování její frekvenční a napěťové stability.
2. Posudíte teoretické možnosti využití velkokapacitních baterií a setrvačníků, jako podpůrných prostředků, pro zajištění setrvačnosti elektrizační soustavy s ohledem na její předpokládaný budoucí vývoj.
3. Ve vhodném softwaru navrhnete a sestavte zjednodušený model části elektrizační soustavy obsahující velkokapacitní baterii a setrvačnick.
4. Na základě výsledků simulací různých provozních stavů analyzujete a porovnejte možnosti a vhodnost využití setrvačníků oproti velkokapacitním bateriím, jako budoucích potencionálních podpůrných regulačních prostředků.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Máslo, Karel a kolektiv. Řízení a stabilita elektrizační soustavy. Praha: AEM, 2013. ISBN 97880260446711.
2. Kodex PS, ČEPS, a.s, v platném znění.
3. Dvorský E., Hejtmánková, P., Raková L. Grid Frequency Regulation by Recycling Electrical Energy in Flywheels: Power Engineering 2017, Kosice, Technical University.
4. E. Spahic, D. Varma, G. Beck, G. Kuhn and V. Hild. Impact of reduced system inertia on stable power system operation and an overview of possible solutions, 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2016.7741714.
5. J. Liu and X. Zhao. Estimation of Inertia Response Power and Primary Frequency Modulation Response Power Considering the Equivalent Inertia of Multi-machine Power Grid, 2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), 2021, pp. 535-539, doi: 10.1109/AEEES51875.2021.9403038.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Emil Dvorský, CSc.**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**


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



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

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Tato práce se zabývá rozbořem v současnosti používaného řízení elektrizační soustavy a návrhem řešení ke zlepšení její stability, jejíž snižování v důsledku poklesu přirozené setrvačnosti se stává s rozvojem obnovitelných zdrojů energie aktuálním problémem. Navrhovaným řešením je instalace setrvačnickového úložiště, popř. kapacitní baterie do sítě a tím zvýšení setrvačnosti soustavy. V praktické části je vytvořen model sítě nízkého napětí ve dvou variantách – se setrvačnickem a s bateriovým úložištěm. V software MATLAB Simulink je provedena simulace různých provozních stavů, jako je změna zatížení nebo změna výkonu zdroje nacházejícího se v síti. Následně jsou porovnány výsledky pro jednotlivé varianty a je posouzena vhodnost navrhovaných řešení a jejich potenciální přínos v oblasti stability elektrizační soustavy.

Klíčová slova

Řízení elektrizační soustavy, frekvenční stabilita, napěťová stabilita, setrvačnick, kapacitní baterie

Abstract

This paper deals with analysis of currently used method for transmission system control and proposes a design of means of improving the grid stability. The stability is continually dropping because of increasing number of renewable resources installed and it causes a decrease in inertia, which is slowly becoming a problem. The proposed solution is to add either a flywheel or a battery to the grid and thus to increase the systems inertia. A model of low voltage network is created in two variant – grid with flywheel and grid with battery. The simulation is carried out in MATLAB Simulink and the result of different operating statuses are compared between both types of model. Finally, an evaluation of suitability of proposed solution is made, based on the obtained results.

Key Words

Transmission System Control, Frequency Stability, Voltage Stability, System Inertia, Flywheel, Battery Storage

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 25. 5. 2023

Tereza Krejnická

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Emilovi Dvorskému, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych také chtěla poděkovat Ing. Lence Rakové, Ph.D. za neocenitelnou pomoc při přípravě a realizaci praktické části. V neposlední řadě pak děkuji i své rodině za podporu v průběhu celého studia.

Obsah

Úvod	- 1 -
1 Stávající provoz elektrizační soustavy v ČR	- 2 -
1.1 Popis elektrizační soustavy.....	- 2 -
1.1.1 Zdrojový mix.....	- 3 -
1.1.2 Předpokládaný budoucí vývoj.....	- 4 -
1.1.3 Dispečerské řízení	- 6 -
1.1.4 Propojení TSO v rámci ENTSO-E.....	- 8 -
1.2 Kodex přenosové soustavy	- 9 -
1.2.1 Systémové a podpůrné služby	- 9 -
2 Řízení provozu elektrizační soustavy v ČR.....	- 13 -
2.1 Shrnutí současně používaných metod řízení ES.....	- 13 -
2.1.1 Frekvenční stabilita ES.....	- 13 -
2.1.2 Napěťová stabilita ES.....	- 15 -
2.1.3 Regulace na straně výroby	- 16 -
2.1.4 Regulace na straně spotřeby.....	- 18 -
2.1.5 Spolehlivost ES a řízení soustavy při mimořádných stavech.....	- 19 -
3 Setrvačnost a úhlová stabilita ES.....	- 22 -
3.1 Princip zachování úhlové stability.....	- 25 -
3.2 Hodnocení setrvačnosti ES.....	- 26 -
3.3 Riziko ztráty setrvačnosti ES a možnosti jejího zvýšení.....	- 29 -
4 Možnosti využití setrvačnicků a baterií pro zajištění setrvačnosti ES	- 33 -
4.1 Možnosti využití setrvačnicků	- 33 -
4.1.1 Setrvačnickové úložiště (FESS).....	- 33 -
4.1.2 Struktura a komponenty setrvačnickového úložiště.....	- 33 -
4.1.3 Vlastnosti.....	- 35 -
4.1.4 Řízení	- 38 -

4.1.5	Použití FESS	- 39 -
4.2	Možnosti využití velkokapacitních baterií	- 42 -
4.2.1	Bateriové úložiště (BESS).....	- 42 -
4.2.2	Vlastnosti.....	- 42 -
4.2.3	Řízení	- 42 -
4.2.4	Použití BESS	- 44 -
4.2.5	Bateriové úložiště v elektrárně Tušimice II	- 45 -
5	Návrh modelu části ES se setrvačником a baterií.....	- 48 -
5.1	Model ES se setrvačником	- 49 -
5.1.1	Výpočet potřebného výkonu	- 49 -
5.1.2	Rozhodování o dodávce	- 53 -
5.2	Model ES s velkokapacitní baterií.....	- 55 -
6	Analýza výsledků simulací provozu modelu ES	- 56 -
6.1	Model ES se setrvačником	- 56 -
6.1.1	Změna zatížení	- 56 -
6.1.2	Změna výkonu FVE	- 58 -
6.2	Model ES s velkokapacitní baterií.....	- 61 -
6.2.1	Změna zatížení	- 61 -
6.2.2	Změna výkonu FVE	- 63 -
7	Porovnání vhodnosti použití setrvačníků a baterií pro řízení ES.....	- 66 -
	Zhodnocení a závěr.....	- 69 -
	Literatura	- 71 -
	Přílohy	I

Seznam symbolů a zkratk

Řízení soustavy

BS	Black Start = start ze tmy
DS	distribuční soustava
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity = propojené soustavy v rámci Evropy
ERÚ	energetický regulační úřad
ES	elektrizační soustava
FCR	Frequency Containment Reserve = automatická regulace frekvence
aFRR	Automatic Frequency Restoration Reserve = regulace výkonové rovnováhy s automatickou aktivací (primární regulace)
mFRR	Manual Frequency Restoration Reserve = regulace výkonové rovnováhy s manuální aktivací (sekundární regulace)
FVE	fotovoltaická elektrárna
HDO	hromadné dálkové ovládání
JE	jaderná elektrárna
MPO	ministerstvo průmyslu a obchodu
OP	ostrovní provoz
OZE	obnovitelné zdroje energie
PPDS	pravidla provozování distribuční soustavy
PpS	podpůrné služby
PS	přenosová soustava
PřS	přenosové služby
RR	regulační záloha
SRQ	sekundární regulátor jalového výkonu
SRUQ	sekundární regulace U/Q
SVC	Static Var Compensator = statický kompenzátor jalového výkonu
SVR	služby výkonové rovnováhy
TSO	Transmission System Operator = provozovatel přenosové soustavy
VTE	větrná elektrárna

Setrvačníky a baterie

BESS	Battery Energy Storage System = bateriové úložiště
DFS	Dynamic Frequency Support = dynamická podpora frekvence
DVS	Dynamic Voltage Support = dynamická podpora napětí
FESS	Flywheel Energy Storage System = setrvačnickové úložiště
PWM	pulzně šířková modulace
SOC	State of Charge = stav nabití
UPS	Uninterruptible Power System = záložní zdroj
VSC	Voltage Source Converter = převodník napětí

Základní veličiny

f	(HZ)	frekvence
P	(W)	činný výkon
Q	(Var)	jalový výkon
S	(VA)	zdánlivý výkon
U	(V)	efektivní hodnota napětí
X	(Ω)	reaktance
δ	(rad)	zátěžný úhel
J	($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	moment setrvačnosti
H	(s)	konstanta setrvačnosti
K_0	(-)	konverzní momentový faktor

Úvod

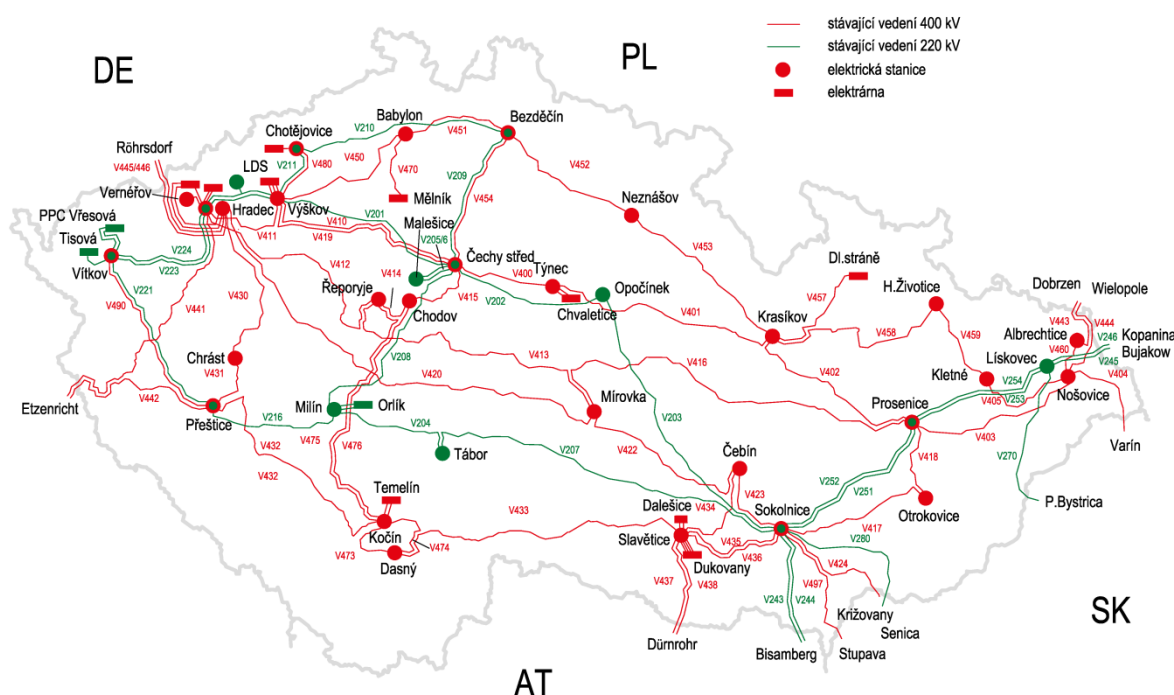
Moderním trendem v dnešní době je připojovat do elektrizační soustavy (ES) stále více obnovitelných zdrojů energie a tím dochází ke změně složení výroben v síti. Tato změna má bohužel za následek ovlivňování stability elektrizační soustavy, jejímiž hlavními parametry jsou frekvence a napětí. Stabilita je dnes zajišťována převážně synchronními stroji klasických tepelných elektráren, které díky svému charakteru točivého stroje poskytují soustavě určitou setrvačnost, jež pomáhá překlenout krátkodobé výkyvy napětí a frekvence. Některé obnovitelné zdroje energie (OZE), větrné elektrárny (VTE) a fotovoltaické elektrárny (FVE) jsou však připojeny do sítě přes střídač, který neobsahuje žádnou mechanickou část schopnou zajistit potřebnou setrvačnost. Dalším znakem FVE a VTE je i nestálost dodávaného výkonu do ES. Tato proměnlivost generovaného výkonu je způsobená závislostí jejich pracovního režimu na atmosférických podmínkách, což může mít za následek kolísání napětí a frekvence v ES. Toto v kombinaci s plánovaným ukončením provozu tepelných elektráren může způsobit významné zhoršení stability ES, které v nejhorším případě může vyústit až v její rozpad. Možným řešením zmíněného problému by mohlo být instalování setrvačnicků, jež by mohly částečně nahradit funkci synchronních generátorů a podpořit stabilitu ES svojí setrvačností. Cílem této práce je shrnout základní principy provozu a řízení ES a na jejich základě navrhnout možné řešení, jak zvýšit její stabilitu a zlepšit její řízení v případě, že by došlo k úbytku klasických tepelných elektráren a zároveň by se zvýšil výkon instalovaných OZE (především FVE).

Text je rozdělen na čtyři části a sedm kapitol. V prvních dvou kapitolách je popsána elektrizační soustava ČR a shrnuty v současnosti běžně používané metody řízení a provozu ES a způsoby regulace napětí a frekvence. Další kapitoly se zabývají stabilitou a setrvačností soustavy a možnostmi aplikace setrvačnicků a velkokapacitních baterií pro zvýšení zmíněných parametrů, která je následně ověřena simulací v software MATLAB Simulink. Stěžejní částí této práce je návrh regulátoru setrvačnicku. Na závěr jsou shrnuty poznatky o navrhovaných akumulacích zařízeních a na základě výsledků simulace zhodnocena vhodnost jejich použití k dosažení požadovaného zvýšení setrvačnosti soustavy a tím i její stability.

1 Stávající provoz elektrizační soustavy v ČR

1.1 Popis elektrizační soustavy

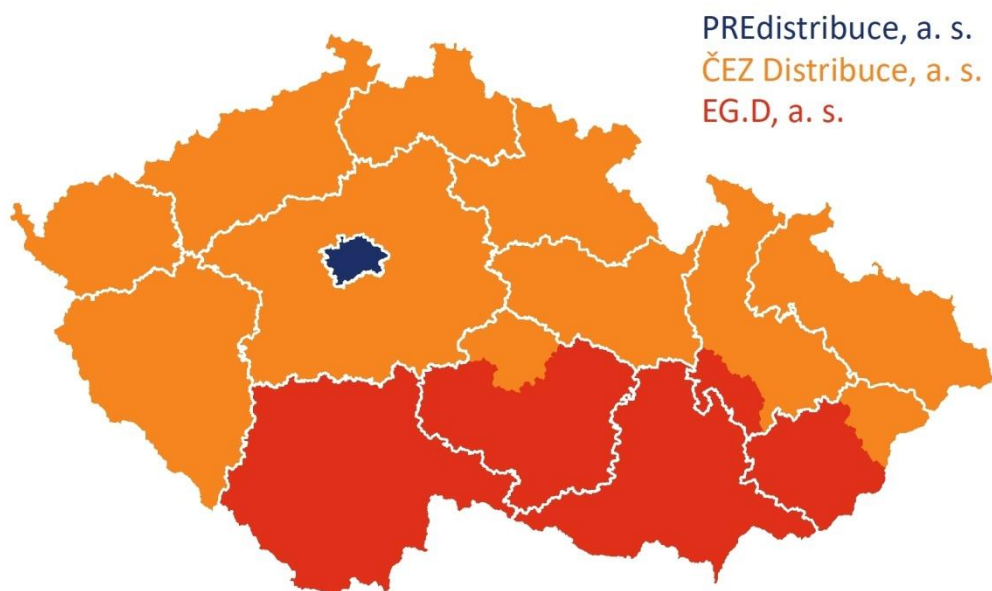
Elektrizační soustava České republiky se skládá z přenosové soustavy (PS) a distribuční soustavy (DS). Přenosová soustava je páteřní soustava ČR, která je provozována společností ČEPS, a.s. na napěťových hladinách 400 kV a 220 kV (schéma je uvedeno na Obr. 1). Jejím úkolem je rozvádět výkon z velkých elektráren po celém území České republiky a zároveň ji propojovat s elektrizačními soustavami okolních států v rámci mezinárodní spolupráce. Dále také slouží k napájení distribuční soustavy. Důvody pro zavedení vyšších napěťových hladin jsou zmenšení ztrát (protože podle Ohmova zákona při vyšším napětí protéká menší proud, na němž ztráty především závisí) a zvýšení přenosové schopnosti. Dnes se proto vedení 220 kV postupně nahrazují vedeními 400 kV. V současné době se v PS v ČR vyskytuje 43 rozvodn s celkem 78 transformátory [1].



Obr. 1 Schéma přenosové soustavy ČR [2]

Distribuční soustava je provozována několika distributory, mezi největší patří ČEZ Distribuce, a.s., EG.D, a.s. a PREdistribuce, a.s., kteří mají jasně rozdělené oblasti působnosti v rámci ČR. Toto rozdělení je zobrazeno na Obr. 2. Provoz DS probíhá na napěťových hladinách 110 kV, 22 kV a 0,4 kV. Napájení je zajištěno především z

nadřazené PS, z výroben příslušných distributorů a z jiných lokálních zdrojů [3]. Všechny distribuční společnosti se musí řídit Pravidly provozování distribuční soustavy (PPDS). Ta jsou vytvářena každý rok a schvalována Energetickým regulačním úřadem (ERÚ). PPDS stanovují minimální technické, provozní a jiné požadavky pro připojení uživatelů a základní pravidla pro spolupráci mezi jednotlivými účastníky trhu s elektřinou [4]. Charakter soustav jednotlivých distributorů se liší v závislosti na tom, na jakém území je síť provozována. Příkladem může být mnohem větší podíl kabelových vedení a vedení nižších napěťových hladin u společnosti PRedistribuce, a.s., protože její spravovaná oblast se skládá téměř výhradně z městské zástavby [5].



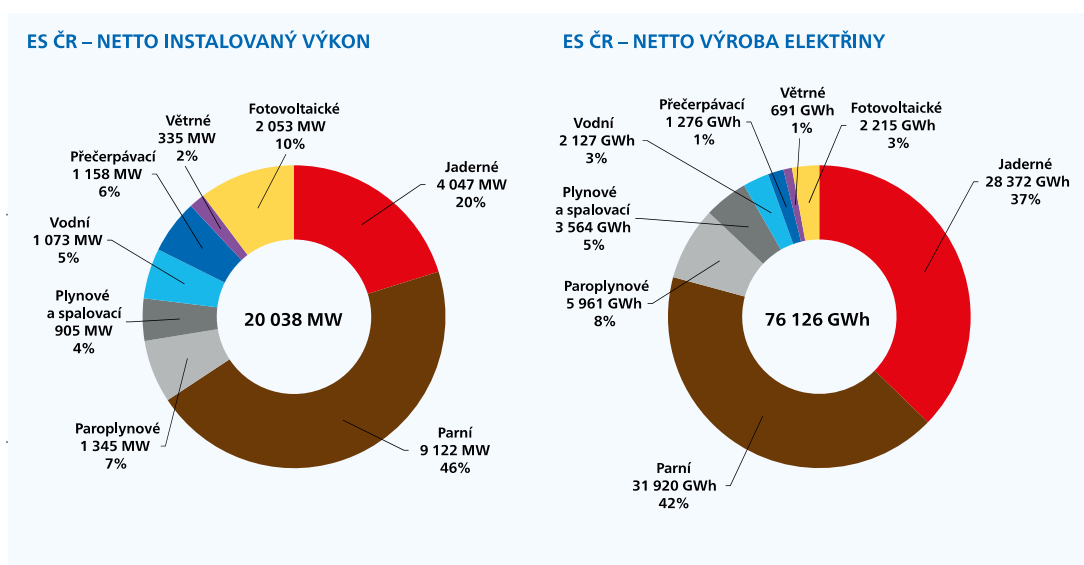
Obr. 2 Rozdělení oblastí jednotlivých distributorů [5]

1.1.1 Zdrojový mix

Národní energetický mix je určen podílem jednotlivých typů zdrojů energie v elektrizační soustavě a dává nám představu o tom, jaké zdroje tvoří základ této soustavy. Dodavatelé elektřiny využívají energetický mix k určení podílů jednotlivých zdrojů, které pak uvádí ve zprávě pro své zákazníky k prokázání původu energie podle Vyhlášky o vyúčtování dodávek č. 70/2016 Sb.

Česká energetika je založena především na fosilních a jaderných zdrojích. Podíl fosilních zdrojů je celkem 54,03 % s převahou zdrojů na hnědé uhlí (43,89 %). Z dalších

paliv je dále významný zemní plyn, jenž představuje 10 %, černé uhlí a ostatní ropné produkty jsou zanedbatelné (dohromady netvoří ani 1 %). Dva největší zdroje, kterými jsou jaderné elektrárny Temelín a Dukovany, představují 40,41 % energetického mixu. Obnovitelným zdrojům energie, které jsou podle plánů Evropské Unie budoucností evropské energetiky, patří pouhých 5,56 %. Z těchto údajů je patrné, že klasické tepelné a jaderné elektrárny jsou úplným základem výroby elektřiny v České republice a bude velice obtížné, ne-li nemožné, je v budoucnosti nahradit obnovitelnými zdroji energie. [6]



Obr. 3 Zdrojový mix ČR [7]

1.1.2 Předpokládaný budoucí vývoj

Stávající zdrojový mix a jeho předpokládaný vývoj jsou každoročně shrnuty v tzv. Hodnocení zdrojové přiměřenosti, které je z nařízení EU povinen zpracovávat každý provozovatel v rámci propojených soustav ENTSO-E. Hodnocení na úrovni ČR je prováděno společností ČEPS, a.s., jejímž cílem je určení rizik a jejich možných příčin a následně i návrh nápravných opatření. [8]

Podle nejnovějšího Hodnocení zdrojové přiměřenosti z roku 2021 se předpokládá postupný úbytek zdrojů využívajících uhlí jako palivo a zároveň se plánuje zvýšení celkového instalovaného výkonu díky plánovanému uvedení do provozu nového bloku jaderné elektrárny Dukovany v roce 2036. Rozvoj v nejbližší době však bude postaven především na rozšíření decentralizované výroby, protože do roku 2030 není plánovaná žádná výstavba většího zdroje. Uhelné elektrárny představují nejvýznamnější složku zdrojového mixu a jsou důležité i při pokrývání výkyvů zatížení a udržení výkonové

rovnováhy v ES. Tyto zdroje zajišťují 90 % automatické regulace frekvence a 80 % dostupného výkonu pro regulaci výkonové rovnováhy. Nicméně se tyto výroby však potýkají i s různými potížemi. Nejvýznamnější z nich jsou vysoké emise CO₂, jež jsou nežádoucí pro Evropskou Unii stanovené cíle dekarbonizace, a s nimi související emisní povolenky. Cena emisních povolenek každý rok stoupá a jejich množství je naopak redukováno, což může vést k odstavení některých uhelných elektráren z ekonomických důvodů. S uhlím jako palivem se tedy v budoucnosti nepočítá. EU navíc vydala nezávazný cíl ukončení užívání uhlí do roku 2038. To může vyústit v problémy s pokrytím spotřeby i zajištěním podpůrných služeb. [7]

Plánovanou náhradou za uhelné elektrárny jsou elektrárny plynové, jejichž produkce CO₂ je přibližně o polovinu menší. To znamená, že cena emisních povolenek na ně nemá takové dopady, nevýhodou je však vysoká cena zemního plynu. Přesto se počítá se zvýšením jejich počtu během příštích 10 let. V teplárenství, kde se uhlí dnes také hojně využívá, se hledají náhradní zdroje, mezi něž patří např. biomasa nebo spalování odpadu. Investuje se také do vývoje nových technologií. [7]

Činnost jaderných elektráren, jakožto významného zdroje energie v ČR (Temelín má dva bloky o instalovaném výkonu 1 069 MW, Dukovany disponují čtyřmi bloky o výkonu 477 MW), bude prodloužena na hranici 60 let provozu. Temelín bude fungovat přibližně do roku 2060. Dukovany skončí zhruba o 15 let dříve kolem roku 2045. Navíc se počítá s výstavbou nového bloku v Dukovanech o instalovaném výkonu 1 140 MW, který by měl být uveden do provozu v roce 2036. [7]

V případě vodních elektráren se neplánuje žádná větší změna. Částečně i proto, že veškerá vodní díla a lokality na území ČR připadající v úvahu k výstavbě vodní elektrárny jsou už vyčerpány. Proto hlavní funkce vodních elektráren v ČR bude i nadále převážně regulační. Největší rozvoj se předpokládá v oblasti obnovitelných zdrojů energie, predikovaný nárůst instalovaného výkonu do roku 2040 je podle realistického scénáře cca 8 000 MW (ze současných 2 000 MW na 10 000 MW). Podle progresivního scénáře pak dokonce až 11 000 MW (na 13 000 MW). Zároveň je důležitý vývoj bateriové akumulace, bez které by provozování ES s takto velkým množstvím OZE nebylo možné [7]. Elektrická energie totiž musí být spotřebována v momentě výroby. To by v případě obnovitelných zdrojů energie mohl být problém, protože v závislosti na počasí může být v daný moment elektriny přebytek nebo nedostatek. Plánovaná změna energetického mixu bude také

pravděpodobně znamenat, že už někdy kolem roku 2030 bude muset Česká republika elektřinu dovážet, protože vyrobená energie nebude postačující k pokrytí spotřeby [9].

1.1.3 Dispečerské řízení

Každý provozovatel elektrické sítě (ať přenosové nebo distribuční) musí mít vytvořený technický dispečink, který má na starosti řízení provozované části elektrizační soustavy, přičemž dispečinky přenosové soustavy jsou nadřazené dispečinkům patřícím distributorům. Dispečerské řízení patří mezi systémové služby (více se jim věnuje kapitola 1.2.1). Činnosti prováděné dispečinky se dají rozdělit do několika kategorií [10]:

- příprava provozu ES,
- operativní řízení ES,
- hodnocení provozu ES.

Kromě řízení elektrizační soustavy zahrnující mimo jiné i manipulace, spolupráci s výrobny elektrické energie a ostatními dispečinky a spolupráci s provozovateli propojených elektrizačních soustav v rámci ENTSO-E, má dispečink na starosti i udržování rovnováhy mezi vyrobeným a spotřebovaným výkonem, zajišťování přenosu elektrické energie v určité kvalitě a prevenci a řešení poruchových stavů. K správnému plnění cílů slouží dispečerům několik prostředků, mezi něž patří dispečerské pokyny (soubor provozních instrukcí a operativních pokynů pro dispečery), technické prostředky (řídící systémy, telekomunikace, systémy ochrany) a obchodní postupy (podpurné služby, nákup energie, přerozdělování výkonu mezi zdroji). [11]

Do **přípravy provozu** spadá plánování provozu s ohledem na plán údržby a vypínání zařízení, plán provozu výrobních modulů a přípravu provozu připojených DS. Dále bere v potaz další aspekty, jako např. předpokládaný průběh zatížení, bilanci toků energie a výkonu nebo využití napěťové regulace (regulace jalových výkonů). V neposlední řadě také zajišťuje kontrolu spolehlivosti provozu DS, plán vynuceného provozu zdrojů elektrické energie a plán vynucených ostrovních provozů spojených s importem energie ze zahraničí. Příprava je zpracovávána s výhledem na 10 let (plánovaný rozvoj soustavy) a dále pak roční, měsíční týdenní a denní. Údaje potřebné pro vypracování přípravy provozu jsou distributorovi poskytnuty provozovatelem PS, ostatními provozovateli DS, výrobci energie připojenými do dané sítě, zákazníky s odběrnými zařízeními o napětí vyšším než

1 kV, poskytovateli podpůrných služeb a držiteli licence pro obchod s elektrickou energií. [12]

Do **operativního řízení** DS patří řízení zapojení prvků soustavy zajišťující distribuci elektřiny a řízení toku energie v DS a jejím propojení s PS, řízení napětí a jalového výkonu u zařízení 110 kV a méně, řešení poruchových stavů, opatření proti vzniku nouzového stavu (popř. jeho řešení), správa povolení k zahájení prací na zařízení soustavy a náležité předávání směny pro zajištění nepřetržitého řízení. Pokud je při řízení DS nutná kooperace s provozovatelem PS a/nebo jinými distributory, je operativní řízení dále rozšířeno o respektování toků výkonů z propojených soustav při řízení, snahu o co nejrychlejší obnovení stabilního provozu při mimořádných provozních stavech, vypínání/zapínání zařízení vzájemně propojující soustavy, regulaci napětí a jalového výkonu také v zařízeních patřících do připojených sítí, ostrovní provoz části sítě a správu změn zapojení řízené DS s ohledem na provoz ostatních připojených soustav. [13]

Hodnocení provozu provádí dispečink provozovatele PS pravidelně v předem daných intervalech a vyhodnocují se nejdůležitější veličiny, mezi něž patří mimo jiné kmitočet, výroba, saldo PS, zatížení, napětí, rozdíl mezi plánovanými a skutečnými přenosy, poruchovost zdrojů a výkon dodaný v rámci služby výkonové rovnováhy. Dále se také vyhodnocují bilance výkonu, provozní rizika a výpadky zdrojů a sítí. Vyhodnocení probíhá v následujících intervalech [14]:

- týdenní hodnocení – obsahuje informace o zatížení ES a jejich srovnání s predikcí, data o zahraniční spolupráci s uvedením nejdůležitějších událostí a poruchovosti za uplynulý týden a grafické a statistické vyhodnocení sledovaných veličin,
- měsíční hodnocení – základ tvoří denní a týdenní hodnocení, navíc je uvedena bilance energie a využití vnitrostátních i přeshraničních vedení a dále pak spotřeba v rámci ČR,
- roční zpráva o kvalitě – musí být zpracována každý rok a předložena Ministerstvu průmyslu a obchodu (MPO) a Energetickému regulačnímu úřadu.

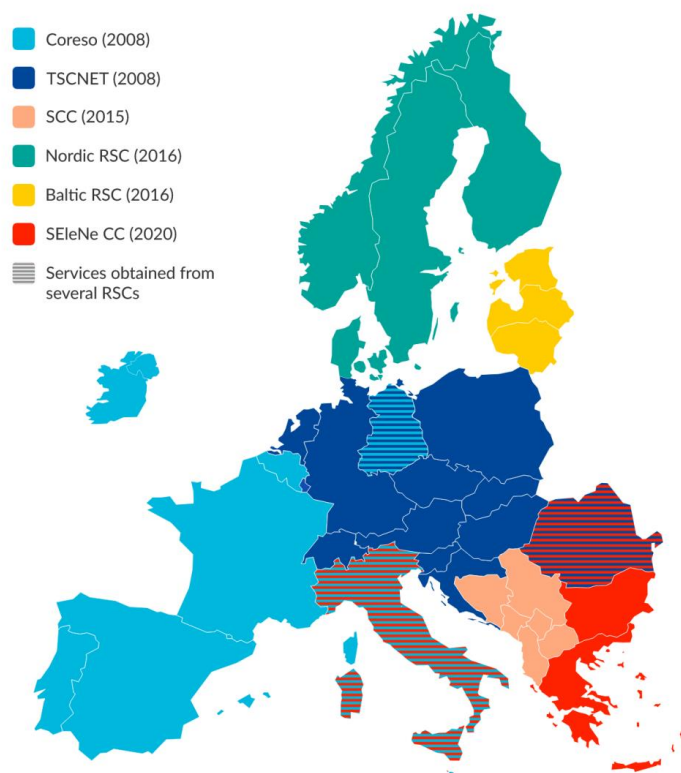
Dispečerský řídicí systém

Řídicí systém je prostředek umožňující dispečerům dálkově ovládat rozvodny v síti a provádět manipulace během standardního provozu i při poruchách v soustavě. Zároveň

slouží i k automatickému vyrovnávání odchylky mezi vyrobenou a spotřebovanou energií a může být využit dispečerem jako nástroj pro simulaci plánovaných manipulací. Navíc sám navrhne řešení v případě potřeby zásahu do konfigurace sítě (např. vhodné zapojení vedení při přetížení nebo přerozdělení výkonu mezi výrobny). [15]

1.1.4 Propojení TSO v rámci ENTSO-E

ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) je uskupení zajišťující kooperaci mezi provozovateli přenosových soustav (TSO – Transmission System Operator) v Evropě. V současné době má 39 členů z 35 různých států, kteří mají na starosti bezpečný a koordinovaný přenos elektrické energie v rámci Evropy, jejíž elektrizační soustava je nejrozsáhlejší propojená soustava na světě. Hlavním úkolem této organizace je tedy zajištění bezpečnosti propojených evropských sítí a optimálního fungování mezinárodního trhu s elektřinou. Dalším cílem je také zapojení většího množství OZE a nově vznikajících technologií, to vše s ohledem na legislativu Evropské Unie (EU) [16]. Mezi důležité činnosti ENTSO-E patří vytváření a implementace kodexů přenosových sítí, které se stávají závaznými dokumenty a jsou přijímány jako součást oficiální legislativy EU [17].



Obr. 4 Mapa propojených soustav ENTSO-E [18]

1.2 Kodex přenosové soustavy

Kodex přenosové soustavy je dokument zpracováváný provozovatelem přenosové soustavy (ČEPS, a.s.), který obsahuje informace pro účastníky trhu a definuje pravidla a požadavky pro připojení a užívání přenosové soustavy a dále podmínky poskytování podpůrných služeb (PpS) a přenosových služeb (PřS). Podmínky jsou určovány s ohledem na charakteristiku PS a mezinárodní spolupráci v rámci ENTSO-E. Kodex PS je rozdělen do několika částí, z nichž každá se soustředí na jinou oblast provozování PS. Základem je část I., kde je specifikována přenosová soustava a příslušná nařízení EU a části Energetického zákona. Nejdůležitější z hlediska řízení soustavy jsou část II. zabývající se podpůrnými službami, část III. popisující systémové a přenosové služby a část VI., která se věnuje dispečerskému řízení. [19]

1.2.1 Systémové a podpůrné služby

Systémové služby

Elektrická energie musí být spotřebiteli dodávána s určitou spolehlivostí a v předepsané kvalitě dané především frekvencí a napětím. Dodávka navíc musí probíhat v souladu s pravidly zahraniční spolupráce. K tomu slouží společnosti ČEPS tzv. systémové služby, což je soubor činností zabezpečující splnění všech požadavků ohledně spolehlivosti a kvality elektřiny. Za jejich poskytování platí všichni spotřebitelé (jako součást ceny za elektřinu) i výrobci připojení do ES a cena se každý rok stanovuje Energetickým regulačním úřadem (ERÚ). Mezi systémové služby se řadí [20]:

- udržování kvality elektřiny – udržování rezervovaných záloh pro automatickou regulaci frekvence, automatické a manuální obnovení frekvence a výkonové rovnováhy, sekundární a terciární regulace napětí, zajištění kvality průběhu napětí a stability přenosu,
- udržování výkonové rovnováhy v reálném čase – využívá následující technicko-organizační prostředky: automatické a manuální obnovení frekvence a výkonové rovnováhy, snížení výkonu (vhodné je použít PI regulátor pro omezení kmitání),
- obnovení provozu – hlavním prostředkem je plán obnovy a dále podpůrné služby ostrovní provoz a start ze tmy,

- dispečerské řízení – sem spadá zajišťování bezpečnosti provozu a řízení toků činných výkonů (více o této službě bylo zmíněno v kapitole 1.1.3).

Podpůrné služby

Systémové služby jsou zajišťovány tzv. podpůrnými službami, které si provozovatel ČEPS, a.s. sjednává u tzv. poskytovatelů podpůrných služeb. Jedná se o činnosti osob (fyzických i právnických) pro zajištění spolehlivosti a kvality dodávané elektřiny, které umožňují korigovat rozdíly mezi výrobou a spotřebou změnou jejich výkonů [21]. Poskytovatelem se může stát jakýkoliv účastník trhu, který vlastní zdroj splňující podmínky dané v Kodexu. Každá služba musí odpovídat určitým požadavkům, mezi které patří připojení do PS (při poskytování SRUQ), měřitelnost, garantovaná dostupnost služby (může zkoumat inspekce), certifikovatelnost (provádění periodických testů) a možnost průběžné kontroly poskytování. Dále rozlišujeme dva typy PpS – služby výkonové rovnováhy (SVR), do kterých patří FCR, aFRR, mFRR, mFRR₅ a RR (vysvětleno dále) a ostatní podpůrné služby (SRUQ, OP a BS) [22].

Služby výkonové rovnováhy (SVR)

- Zálohy pro automatickou regulaci frekvence (FCR)

FCR je automatická funkce, která má na starosti automatickou změnu výkonu výroby v závislosti na odchylce frekvence. Změnu výkonu provádí proporcionální regulátor na základě regulační rovnice:

$$\Delta P_{KORf} = -\frac{100}{s} \cdot \frac{P_n}{f_n} * \Delta f \quad resp. \quad \Delta P_{KORf} = -K \cdot \Delta f, \quad (1.1)$$

kde ΔP_{KORf} (MW) je požadovaná změna výkonu, P_n (MW) je nominální výkon jednotky, Δf (Hz) je odchylka frekvence, s (%) je statika korektoru frekvence, K (MW/Hz) je zesílení korektoru frekvence a f_n (Hz) je jmenovitá hodnota frekvence. Maximum rezervované hodnoty FCR je použito při odchylce frekvence 200 mHz. Každá jednotka musí být schopna uvolnit 100 % rezervovaného výkonu do 30 s od vzniku odchylky a 50 % výkonu do 15 s. Reakce na odchylku pak musí být bez umělého zpoždění kratší než 2 s. [22]

- Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s automatickou aktivací (aFRR)

PpS aFRR je prováděno změnou výkonu regulovaného zdroje v závislosti na požadavku regulátoru frekvence. Využití aFRR závisí na algoritmu dispečinku ČEPS. Tuto službu nakupuje provozovatel PS na denním trhu a poskytovateli platí za rezervovaný výkon za hodinu poskytnuté zálohy a za dodanou energii. Minimální hodnota rezervovaného výkonu je 1 MW a standardní doba dodání je až 7,5 minuty. [22]

- Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací (mFRR)

Služba mFRR je realizována změnou výkonu na základě požadavku dispečinku ČEPS. Stejně jako aFRR je i mFRR nakupováno na denním trhu a taktéž je poskytovateli placeno za rezervovaný výkon a dodanou energii. Běžná doba plné aktivace je až 12,5 minuty, existuje však specifický produkt mFRR₅, který zajišťuje dobu plné aktivace do 5 minut. [22]

- Zálohy pro náhradu (RR)

Regulační záloha je služba poskytující sjednaný výkon do 30 minut od požadavku z dispečinku ČEPS. Aktivace je prováděna na pevnou čtvrt hodinu nebo její násobek. [22]

Ostatní podpůrné služby

- Sekundární regulace U/Q (SRUQ)

Jedná se o automatickou funkci, která má na starosti udržení velikosti napětí v pilotních uzlech pomocí celého regulačního rozsahu jednotky. Dalším úkolem je i rozdělování vyrobeného jalového výkonu rovnoměrně na všechna zařízení. Přejídný děj, který nastane během regulace, má mít aperiodický charakter s jedním překmitem a neměl by trvat déle než 2 minuty. Zároveň je požadována spolupráce s primární a terciární regulací. Danou službu mohou poskytovat výrobní jednotky a kompenzační zařízení zapojená do pilotních uzlů PS. [22]

- Schopnost ostrovního provozu (OP)

Ostrovní provoz znamená, že zdroj pracuje do oddělené (izolované) části sítě (ostrova), a jsou při něm kladeny vysoké nároky na regulaci. Schopnost ostrovního provozu je důležitá v případě stavu nouze, protože ostrovní provoz nastává, pokud frekvence překročí stanovené meze (poklesne pod 49,8 Hz nebo překročí 50,2 Hz).

V ostrovním provozu dochází k velkým změnám napětí a frekvence způsobeným proměnným zatížením, které musí být schopna pokrýt autonomní regulace výrobní jednotky. Při přechodu do ostrovního provozu musí výrobní zajistit změnu režimu regulace na proporcionální regulaci otáček, odpojení dálkové regulace, stabilní změnu otáček na novou hodnotu, odpojení od vnější sítě a nastavení důležitých regulací pro režim OP. Během OP musí jednotka spolupracovat s ostatními zdroji a poskytovat potřebnou odezvu činného a jalového výkonu na frekvenční a napěťové změny. V ostrovním provozu musí zdroj zvládnout pracovat alespoň 2 hodiny a po jeho skončení musí být schopen opětovného připojení k okolní síti. [22]

- Schopnost startu ze tmy (BS)

Tato schopnost znamená, že zdroj dokáže sám bez vnější pomoci najet na jmenovité otáčky a jmenovité napětí a po připojení k síti napájet vzniklý ostrov. To je důležité zejména po výpadku sítě (ať úplném nebo jen částečném) během její obnovy. Vhodné zdroje jsou vybírány v závislosti na topologii soustavy přímo jejím provozovatelem (ČEPS) [22]. Takovými zdroji jsou u nás např. přečerpávací vodní elektrárny Dalešice (resp. její pomocná MVE Mohelno) a Dlouhé stráně. Dalešice jsou po obdržení dostatečného napětí z Mohelna schopny dále napájet JE Dukovany, Dlouhé stráně po svém najetí z diesel generátoru mohou pomocí ferorezonance na vedení nabudit Elektrárnu Chvaletice [23], [24].

2 Řízení provozu elektrizační soustavy v ČR

2.1 Shrnutí současně používaných metod řízení ES

Elektrizační soustava funguje na základě fyzikálních principů, nejdůležitějšími jsou Kirchhoffovy zákony. Toky výkonů v soustavě se řídí zmíněnými zákony, a proto se skutečné hodnoty liší od těch, které byly smluvně sjednané. Tím vznikají odchylky, které reprezentují rozdíly mezi skutečností a smluvenými hodnotami. Dále se tvoří tzv. kruhové toky (paralelní toky od výroby ke spotřebě). Kruhové toky jsou nežádoucí z důvodu snižování kapacity přenosového vedení, zvyšování ztrát v síti a případnému narušení stability soustavy [15]. Stabilita ES udává její schopnost se po ukončení přechodného děje vrátit zpět do ustáleného stavu, přičemž soustava musí zůstat neporušena. Zmíněné přechodné děje mohou být vyvolány různými vlivy vnitřního i vnějšího charakteru. Těmito vlivy mohou být například i změny zatížení nebo výkonu zdrojů, které nastávají právě při přítomnosti OZE v síti a jejich proměnlivé dodávce elektrické energie. Nejdůležitějšími sledovanými parametry jsou napětí a frekvence, jejichž stabilita umožňuje soustavě udržet rovnováhu mezi činnými a jalovými výkony výroby a spotřeby [25].

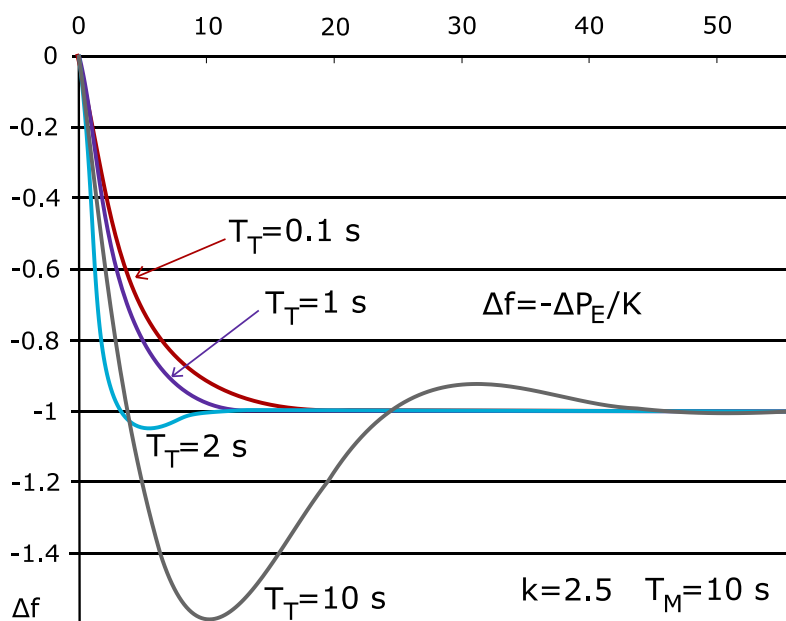
2.1.1 Frekvenční stabilita ES

Frekvenční stabilita sítě je dána rovnováhou mezi činnými výkony zdrojů a spotřebičů. Výkonová rovnováha může být porušena např. výpadkem zdroje, který způsobí pokles dodávaného výkonu, nebo připojením nového spotřebiče, které způsobí nárůst odebíraného výkonu. Frekvenční stabilita tedy souvisí s činným výkonem a může být porušena výkonovým rázem při změnách zatížení (dodávky a spotřeby) v síti. Výkonový ráz si zdroje rozdělí v poměru svých výkonových čísel [26]. K udržení frekvenční stability je potřeba mít dostatečnou výkonovou rezervu poskytovanou zdroji energie nebo omezením spotřeby. Proto se musí udržovat co nejmenší regulační výkonová odchylka ACE (Area Control Error) daná v MW a popsána následující rovnicí [45]:

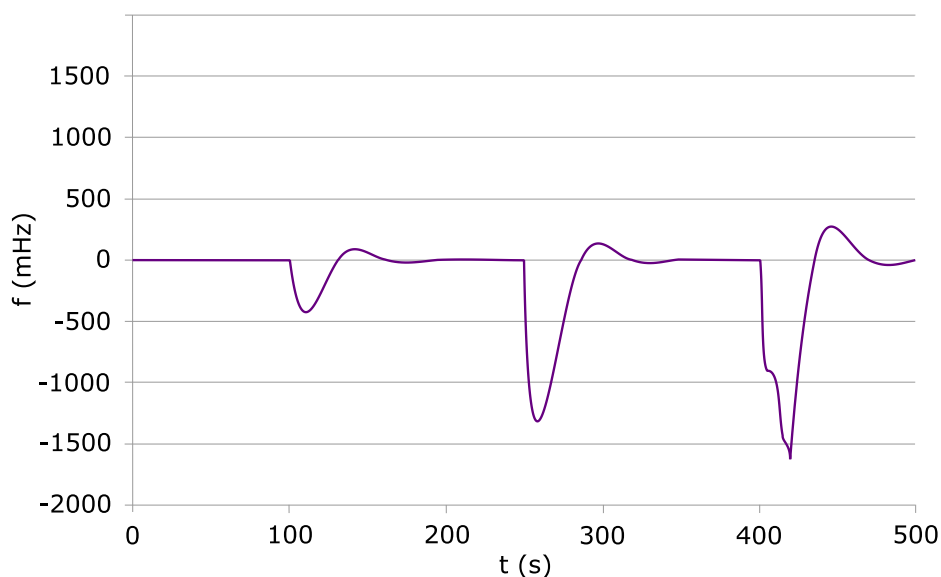
$$ACE = \Delta P - K \cdot \Delta f \quad (2.1)$$

kde ΔP (MW) je celková změna činného výkonu, K (MW/Hz) je zesílení primární regulace (výkonové číslo zdrojů) a Δf (Hz) je změna frekvence způsobená změnou bilance činného výkonu.

Na Obr. 5 je ukázána odezva frekvence při výpadku zdroje (nedostatku činného výkonu) v synchronně propojených soustavách a na Obr. 6 je zobrazen průběh frekvence během spouštění velkých pohonů.



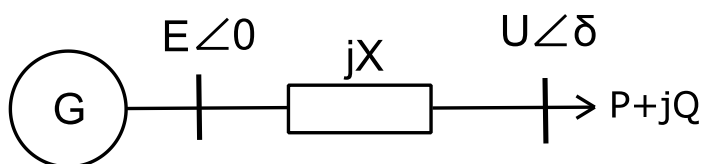
Obr. 5 Průběh frekvence – odezva na výpadek zdroje [45]



Obr. 6 Průběh frekvence při spouštění velkých pohonů [37]

2.1.2 Napěťová stabilita ES

Napěťová stabilita souvisí s maximálním přenositelným činným výkonem P_{max} . Při zvyšování odběru činného výkonu dochází k poklesu napětí, jinak také nazývanému napěťový kolaps, který nám udává právě velikost P_{max} . Tato hodnota se navíc snižuje s odebíraným jalovým výkonem induktivního charakteru. Další vliv na stabilitu napětí má také přepínání odboček transformátoru, zapínání a vypínání vedení, elektrárenských bloků nebo kompenzačních zařízení, odběr jalového výkonu asynchronními motory nebo poruchy a tranzitní toky v síti [26]. Na Obr. 7 je znázorněno zjednodušené schéma sítě s jedním zdrojem s vyznačenými veličinami, které se vyskytují v používaných vzorcích.



Obr. 7 Zjednodušené schéma sítě pro popis napěťové stability [36]

Přenos činného výkonu můžeme vyjádřit jako [36, 45]:

$$P = -\frac{EU}{X} \sin \delta \quad (2.2)$$

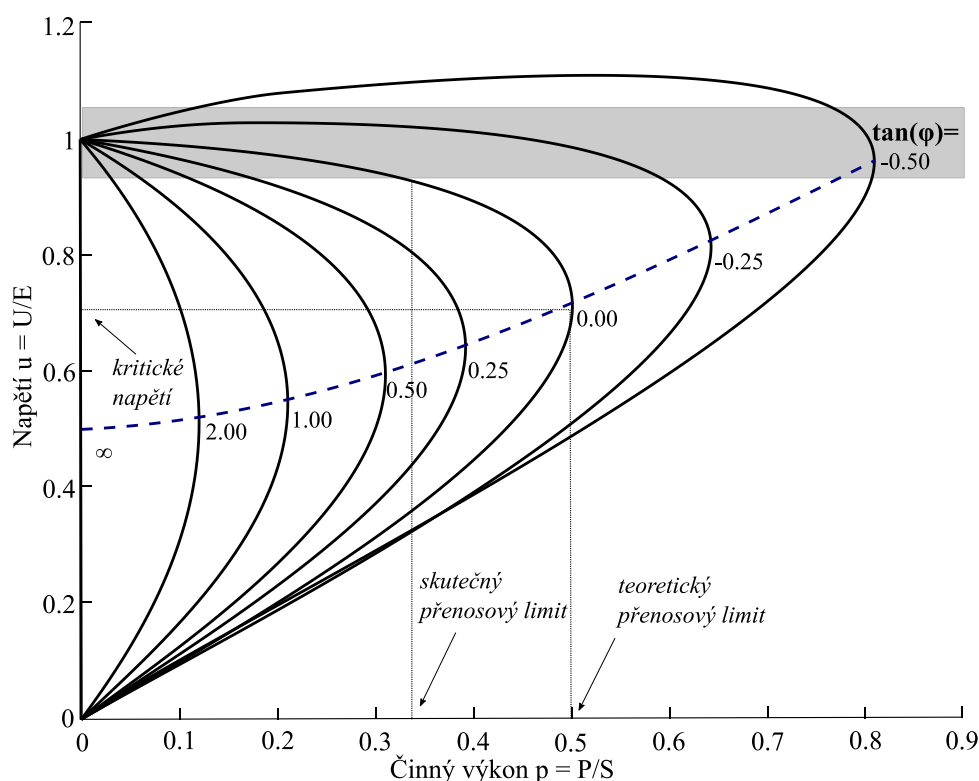
kde P (MW) je činný výkon přenesený po vedení, E (kV) je vnitřní napětí alternátoru, U (kV) je napětí sítě, X (Ω) je celková reaktance a δ (rad) je zátěžný úhel. Obdobně lze napsat rovnici i pro jalový výkon [36]:

$$Q = -\frac{EU}{X} \cos \delta - \frac{U^2}{X} \quad (2.3)$$

kde Q (MVar) je přenos jalového výkonu po vedení. Výkon zátěže lze pak vyjádřit následovně [36]:

$$P + jQ = U^2 G (1 + \tan \delta) \quad (2.4)$$

Závislost výkonu na napětí lze zobrazit pomocí tzv. nosových křivek, jejichž průběh je na Obr. 8.



Obr. 8 křivky závislosti činného výkonu na napětí [36]

2.1.3 Regulace na straně výroby

Regulace frekvence

Regulace frekvence probíhá na několika úrovních většinou automaticky. Základní úroveň je primární regulace, při které dojde k rozdělení vzniklého výkonového rázu mezi soustrojí. Tento způsob regulace je nejrychlejší. Na primární regulaci pak dále navazuje sekundární regulace, po které přijde na řadu regulace terciární. Všechny stupně regulace jsou prováděny pomocí PpS, které již byly podrobněji rozepsány v kapitole 1.2. [27]

- **Primární regulace** frekvence (zajištěna pomocí FCR) probíhá na úrovni elektrárenských bloků a spočívá ve změně dodávaného činného výkonu jednotlivých zdrojů připojených do soustavy na základě změny frekvence. V případě porušení rovnováhy výkonů mezi výrobou a spotřebou např. v důsledku

poruchy některého zdroje nebo změny zatížení dojde ke změně frekvence, na kterou zdroje reagují změnou dodávaného činného výkonu tak, aby udržely výkonovou bilanci soustavy. To znamená, že v případě snížení frekvence zdroje zvýší svůj činný výkon a naopak. Do této regulace se zapojují všechny výrobní připojené do sítě v dané regulační oblasti a funguje na tzv. „principu solidarity“. Odezva tohoto typu regulace se pohybuje v řádech jednotek sekund, celý proces by měl být dokončen do 30 s. [28]

- **Sekundární regulace** frekvence a výkonu (zajištěná funkcemi aFRR a mFRR) je na rozdíl od primární regulace centralizovaná, tzn., existuje jeden centrální regulátor napojený na řízení bloků jednotlivých výroben. Jejím úkolem je nahradit činný výkon poskytnutý elektrárenskými bloky při primární regulaci. Obnovení frekvence a rovnováhy výkonů by nemělo v tomto případě přesáhnout 15 minut od vzniku nerovnováhy v síti. Do sekundární regulace se nezapojují všechny zdroje v síti, ale pouze ty výrobní, u kterých má provozovatel danou službu sjednanou. [29]
- **Terciární regulace** výkonu má za úkol nahradit činný výkon použitý v průběhu sekundární regulace a je prováděna prostřednictvím točivé rezervy na blocích výroben.

Regulace napětí

Řízení napětí a jalových výkonů je prováděno pomocí zdrojů jalového výkonu, kterými mohou být synchronní stroje (elektrárenské bloky, dříve rotační kompenzátory), kondenzátorové baterie, transformátory s přepínáním odboček pod zatížením, tlumivky, nebo také polovodičové měniče, např. frekvenční měniče fotovoltaických elektráren nebo statické kompenzátory SVC (z anglického Static Var Compensator). V případě synchronních strojů je nejdůležitějším prvkem regulace primární regulátor napětí a jeho omezovače. Regulační oblast synchronních generátorů je omezena především jejich P-Q diagramem, existují však ještě další omezující podmínky (např. napětí generátoru), proto musí být každý generátor na podpůrné služby certifikován. Polovodičové měniče nebo asynchronní stroje mají pracovní diagramy odlišné, jejich regulační oblast je však také ohraničena různými podmínkami. [30]

Při regulaci napětí prostřednictvím primárního regulátoru elektrárenského bloku (resp. generátoru) by bylo pro provozovatele PS obtížné ovládat zdroje jednotlivě, protože změny

se zadávají nejlépe ručně. Pro zjednodušení a lepší koordinaci je tedy soustava uspořádána do uzlových oblastí a regulace je prováděna v tzv. pilotních uzlech. To má za následek její hierarchické uspořádání. V pilotních uzlech se nachází sekundární regulátory jalového výkonu (SRQ), které mají na starosti koordinaci primárních regulátorů příslušných bloků. Jejich úkolem je zjistit odchylku napětí v síti a vypočítat potřebný jalový výkon k vyrovnání této odchylky. Dále také zajišťují rozdělení potřebného jalového výkonu mezi jednotlivé bloky, aby měl každý z nich dostatečnou rezervu výkonu pro případnou další regulaci. [31]

Stejně jako v případě regulace frekvence i zde existuje další stupeň řízení – terciární regulace. Tu provádí přímo provozovatel soustavy ve svém řídicím centru a jejím úkolem je udržování napětí v přípustných mezích a tím i kvality elektrické energie a snížení technických ztrát v příslušné uzlové oblasti sítě. Dalším prvkem využívaným k automatické regulaci napětí jsou transformátory s regulací odboček pod zatížením, čímž je zajištěno přerozdělování jalových výkonů a následně i udržování napěťových poměrů v soustavě. Nejrychlejší regulátory odboček jsou instalovány na nejvyšších hladinách napětí, směrem k nižším úrovním napětí se čas reakce postupně prodlužuje. [32]

2.1.4 Regulace na straně spotřeby

Hromadné dálkové ovládání (HDO)

Hromadné dálkové ovládání je systém, jenž zajišťuje spínání (vypínání nebo zapínání) určitých spotřebičů v předem stanovený čas. Tento systém se skládá z několika prvků, ke kterým patří např. vysílač, přijímač, přenosová cesta nebo centrální automatika. Ty dohromady mají za úkol ovládat připojené spotřebiče pomocí kódovaných signálů [33]. To umožňuje distributorovi lépe ovládat soustavu a omezovat výkyvy při změně zatížení. Pro zákazníky je HDO taktéž výhodné, protože jim díky přepínání vysokého a nízkého tarifu může pomoci ušetřit za elektřinu. Časy spínání jsou předem určené provozovatelem konkrétní distribuční soustavy a platí pro normální (bezporuchový) provoz [34].

Princip HDO

K ovládání spotřebičů je používán nízkonapěťový signál o frekvenci vyšší než základní frekvence sítě. Tento signál je generován ve vysílačích HDO, které se nachází nejčastěji v rozvodnách 110/22 kV. Ovládací informace se šíří prostřednictvím vedení do

celé sítě, proto je nutné zvolit vhodnou frekvenci, aby ji mohl přijímač správně identifikovat a vyhodnotit. V České republice je základní frekvence určena 50 Hz a její harmonické (zejména liché) mohou způsobit rušení, z tohoto důvodu je u nás nejpoužívanější frekvence 216,6 Hz. Méně často se pak můžeme setkat i s hodnotami 183,3 a 283,3 Hz.

V dřívějších dobách sloužily jako vysílače rotační měniče kmitočtu, jejich frekvence však dosahovala pouze určitých hodnot v závislosti na počtu pólů stroje. Proto se dnes používají statické polovodičové měniče kmitočtu založené na řízených tyristorových střídačích, které umožňují snadnou regulaci frekvence a její stabilitu. Další výhodou je i snazší údržba a menší rozměry.

Přijímače se nacházejí v rozvaděčích odběratelů u elektroměru a jsou zapojeny mezi jednu z fází a nulový vodič. Na vstupu do přijímače nalezneme rezonanční obvod naladěný na frekvenci signálu, za ním se nachází logický člen sloužící k dekodování a na výstupu je akční člen, jenž slouží k ovládní spínání spotřebiče. [35]

2.1.5 Spolehlivost ES a řízení soustavy při mimořádných stavech

Jedním z důležitých faktorů spolehlivosti dodávky elektrické energie je její bezpečnost. Ta je dána schopností soustavy dodávat elektřinu nepřetržitě a v dostatečné kvalitě. Hlavní způsoby zajištění bezpečnosti dodávky jsou popsány v tzv. Plánu obrany proti šíření poruch v přenosové soustavě. I přes dodržování pravidel bezpečného provozu však může dojít k poruše a následné ztrátě napájení, pro takový případ pak musí mít provozovatelé vypracovaný Plán obnovy. [25]

Plán obrany proti šíření poruch

Základem koncepce dodržování bezpečného provozu je kritérium N-1, podle kterého je PS schopna udržet normální parametry i při výpadku jednoho prvku (nevylučuje se krátkodobé lokální omezení spotřeby). Pokud je kritérium dodrženo, soustava je v normálním provozu, při jeho porušení nastává mimořádný stav a je potřeba obnovit normální chod soustavy. Plán obrany sestává z několika preventivních opatření, mezi ně patří řízení propustnosti sítě a opatření proti přetížení, opatření proti kaskádovitému šíření poruchy, opatření proti zvýšení a poklesu frekvence, opatření proti zvýšení a poklesu napětí, opatření proti kývání a opatření proti ztrátě synchronismu. Při výpadku jednoho

prvku a hrozbě přetížení ostatních prvků soustavy provádí dispečer nápravná opatření, ke kterým patří mimo jiné i rekonfigurace sítě. Koncepce pro obnovu v dnešní době počítají i se zahraniční spoluprací v rámci propojených soustav ENTSO-E. [25]

Plán obnovy

Jak již bylo zmíněno dříve, při provozování ES se dodržuje kritérium N-1, v případě vedení spojených s jadernými elektrárnami dokonce N-2. Z tohoto důvodu je porušení normálního provozu soustavy v důsledku poruchy nepravděpodobné, ale nedá se úplně vyloučit. Pokud by došlo k náhodnému souběhu několika jevů, který by vyústil v rozsáhlou poruchu, mohla by nastat i úplná ztráta napětí, tzv. blackout. Proto musí mít provozovatelé vypracovanou strategii obnovy po poruše. V případě České republiky se při vytváření této strategie počítá jednak s propojením se soustavami okolních států, tak i s několika vodními elektrárnami nacházejícími se na jejím území, jež jsou schopny poskytnout start ze tmy.

Během obnovy jsou nejdříve vypnuty všechny vypínače v postižené oblasti a tím se nastaví jasně dané podmínky, ze kterých následně dispečeri mohou vycházet. Dále se k soustavě postupně znovu připojí jednotlivé bloky jejich postupným zatěžováním a následně i ostatní prvky PS. Během obnovy napájení je jasně definovaná prioritou připojení jednotlivých oblastí v následujícím pořadí [36]:

- vlastní spotřeba jaderných elektráren,
- vlastní spotřeba systémových klasických elektráren,
- hlavní město Praha,
- velké městské aglomerace,
- ostatní spotřebitelé.

Vysoká prioritou jaderných elektráren je dána především nebezpečím jaderné havárie způsobené kompletní ztrátou napájení vlastní spotřeby. Tato ztráta je z hlediska jaderné bezpečnosti nepřijatelná, proto je zavedeno několik požadavků, které zajistí trvalé napájení [36]:

- odolnost blokové linky proti výpadku přípojnice,

- zajištění dynamické stability bloků,
- topologické zapojení sítí 110 a 400 kV,
- zabezpečení komunikace mezi JE a připojenou rozvodnou,
- okamžitá dostupnost provozních činností během provádění prací na zařízení v rozvodně.

Pokud by došlo k místnímu blackoutu v jaderné elektrárně, je nutné obnovit napájení do 1 hodiny, což je čas, za který dojde po ztrátě napájení k vysušení parogenerátoru a nárůstu teploty primárního okruhu. Obnova soustavy může být provedena dvěma způsoby: pomocí sousedních PS nebo pomocí elektráren schopných startu ze tmy. Z těchto dvou způsobů je upřednostňováno využití sousedních soustav, protože umožňuje velice rychle získat stabilní napětí. Dispečer ČEPS komunikuje s dispečerem sousední PS a společně provádějí potřebné manipulace. Provozovatelé mají pro tento případ zpracovány provozní instrukce s přesně definovanými podmínkami a postupy. Obnova napájení z elektráren schopných startu ze tmy slouží zejména k zajištění napájení vlastní spotřeby jaderných elektráren a také v případě, že není možné poskytnutí napětí ze sousedních soustav. Na dispečinku ČEPS se určí pořadí míst pro obnovení a probíhá koordinace fázování a kruhování již obnoveným oblastí. Pořadí závisí na současném stavu soustavy a bere ohled na priority stanovené v Plánu obnovy. [36]

3 Setrvačnost a úhlová stabilita ES

Úhlová stabilita soustavy znamená schopnost synchronních generátorů setrvat v synchronním provozu se sítí i po ukončení přechodového děje v dané síti. Jde tedy o možnost zachovat rovnováhu mezi elektrickým a mechanickým momentem (jedná se o momenty generátoru a turbíny nebo jiného hnacího stroje). Z tohoto důvodu nás řešení úhlové stability zajímá zejména při elektromechanických přechodových dějích. Mezi nejdůležitější parametry ovlivňující úhlovou stabilitu patří zkratový výkon soustavy a vlastnosti generátoru. Dosažení ustáleného stavu pak závisí především na buzení generátoru a dále i na regulaci turbíny. [37]

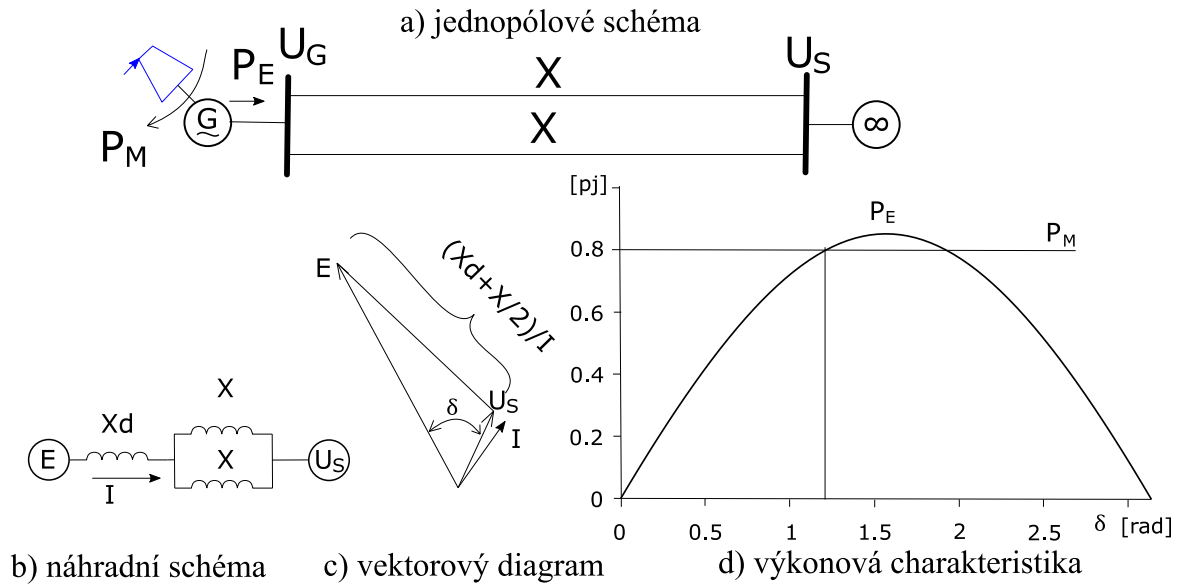
Úhlová stabilita se dělí na dva základní typy: stabilita malých kyvů (statická) a přechodná stabilita (dynamická). Základním rozdílem mezi těmito dvěma druhy jsou metody, které je možné použít k jejich analýze. Pro řešení stability malých kyvů se využívají lineární diferenciální rovnice, protože se soustava dá zjednodušeně považovat za lineární. To u přechodné stability neplatí a pro výpočet se používají síťové simulátory, protože neexistuje analytické řešení. Zmíněné simulátory vytváří časové průběhy fyzikálních veličin soustavy. U obou typů úhlové stability se jedná o krátkodobý děj, jehož trvání se běžně uvažuje kratší než 10 s. Tento čas je tak pro vyšetřování daných dějů postačující. Z tohoto důvodu se někdy používá pro úhlovou stabilitu pojem krátkodobá dynamika. [25]

- Přechodná stabilita

K vysvětlení úhlové stability se používá model soustavy s jedním strojem. Na Obr. 9 a) je zobrazeno jeho jednopólové schéma se základním uspořádáním. Synchronní generátor je nahrazen svým elektromotorickým napětím E a synchronní reaktancí X_d , které jsou součástí náhradního schématu viz Obr. 9 b), z něhož je vytvořen fázorový diagram zobrazený na Obr.9 c). Činný elektrický výkon P_E (W) vyrobený generátorem a následně přenesený vedením se pak vypočítá podle následujícího vztahu [25]:

$$P_E = \frac{E \cdot U_S}{X_\Sigma} \cdot \sin(\delta) \quad (3.1)$$

kde E (V) je elektromotorické napětí generátoru, U_S (V) je konstantní napětí tvrdé sítě, X_Σ (Ω) je celková reaktance (součet synchronní reaktance generátoru X_d a reaktance sítě X) a δ (rad) je zátěžný úhel.

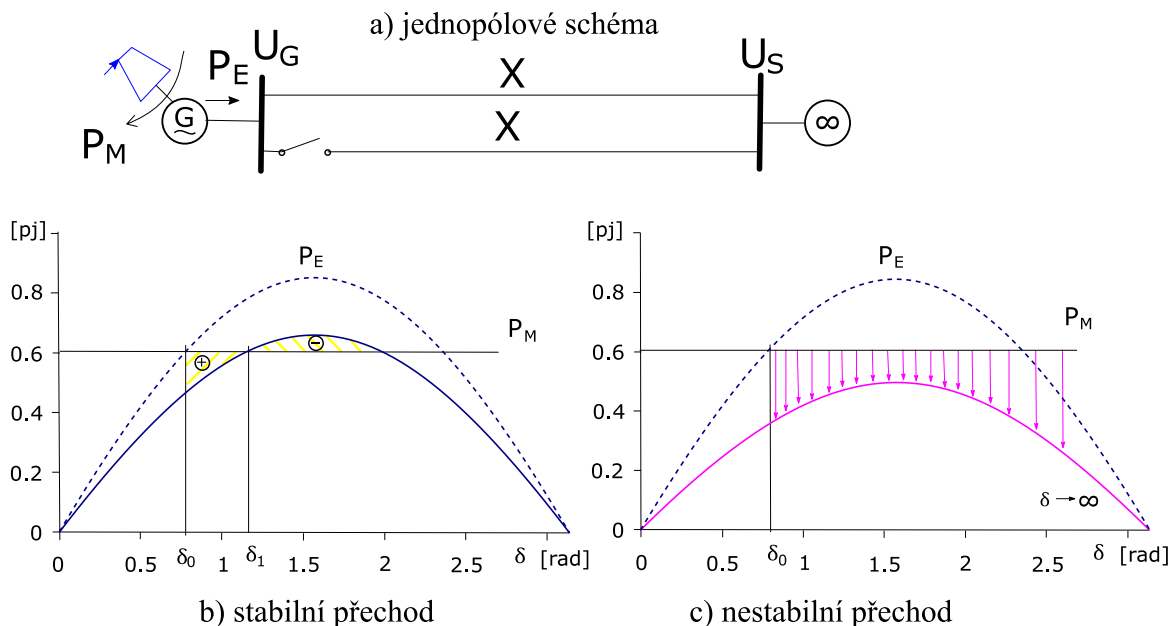


Obr. 9 Jednopólové schéma a), náhradní schéma b), vektorový diagram c) a výkonová charakteristika d) používané k popisu přechodné stability [25]

Výkonová charakteristika má tvar sinusovky a zobrazuje se v poměrných jednotkách. Stabilní pracovní bod se nachází v průsečíku této charakteristiky s křivkou mechanického výkonu turbíny (přímka P_M). Při výpadku jednoho z vedení nastane přechodný děj, jehož projev na výkonových charakteristikách je ukázán na Obr. 6. Stabilní přechod b) nastane v případě, že reaktance vedení je oproti synchronní reaktanci generátoru dostatečně malá. Původní charakteristika je zobrazena tečkovanou čarou, nový stav je zobrazenou čarou plnou. Během přechodného děje nastane změna úhlu δ podle pohybové rovnice [25]:

$$\frac{T_M}{\omega_{MS}} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = M_M - M_E \approx P_M - P_E \quad (3.2)$$

kde T_M (s) je mechanická časová konstanta, ω_{MS} (rad) je synchronní úhlová rychlost, P_M (W) je mechanický výkon turbíny a P_E (W) je elektrický výkon generátoru. Záměna momentů za výkony je možná díky tomu, že v poměrných jednotkách a při malých otáčkách jsou obě veličiny téměř totožné.

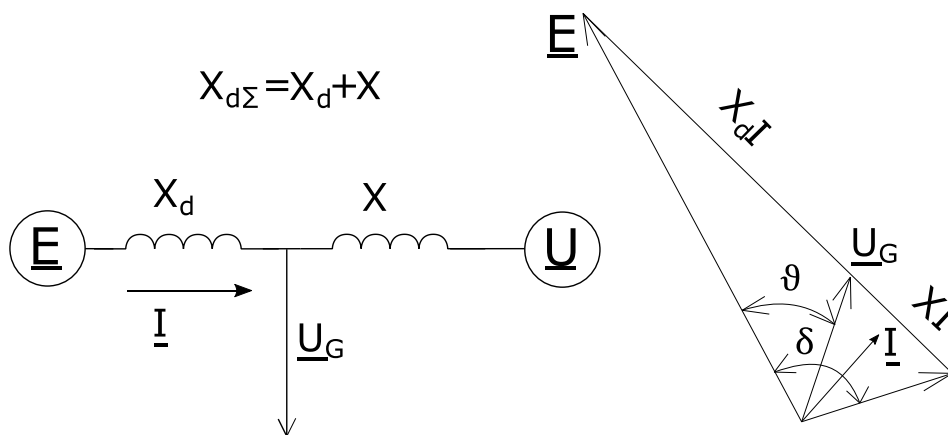


Obr. 10 Výkonová charakteristika během přechodného děje [25]

Pokud jedno z vedení vypadne, elektrický výkon generátoru je menší než mechanický výkon turbíny, čímž dojde ke zvyšování zátěžného úhlu a tím k urychlování rotoru. V bodě δ_1 dojde k vyrovnání výkonů, rotor však vlivem setrvačnosti pokračuje v pohybu. Plocha označená znaménkem + reprezentuje kinetickou energii, kterou rotor získal a říká se jí akcelerační plocha. Plocha označená symbolem – je tzv. brzdící plocha. Pokud je její velikost větší nebo stejná, rotor se postupně zpomalí a ustálí v nové rovnovážné poloze δ_1 . Pokud je však brzdící plocha menší, rotor neustále zrychluje až do ztráty stability. Ta může nastat také v případě, že vedení je dlouhé (má velkou reaktanci) a vrchol výkonové charakteristiky je tak nízko, že přímku mechanického výkonu vůbec neprotne. Tato situace je zobrazena na Obr. 6 b) a dochází při ní k urychlování rotoru akceleračním výkonem (fialové šipky) až do té doby, než přejde do asynchronního chodu (vypadnutí ze synchronismu). Během něj dochází k rázům činného výkonu, které namáhají hřídel a mohou být prostřednictvím elektromagnetického pole přeneseny přes stator na soustrojí, proto musí být tento stav včas zachycen ochranami a vypnut. [25]

- Stabilita malých kyvů

Pro popis se opět používá jednostrójový model s generátorem pracujícím do tvrdé sítě, který je společně s fázorovým diagramem na Obr. 7. Odvození vychází z rovnic generátoru po Parkově transformaci. Z řešení těchto rovnic vyplývá, že v případě neregulovaného stroje je soustava stabilní při splnění podmínky $\delta_0 < \pi/2$. Pokud je tato hodnota překročena, stroj ztratí stabilitu a dojde k nárůstu zátěžného úhlu. Rozsah stabilní oblasti lze rozšířit regulací svorkového napětí, při které může úhel δ_0 přesáhnout hodnotu $\pi/2$. Stroj pak pracuje v oblasti tzv. umělé stability.



Obr. 11 Model sítě a fázorový diagram pro popis stability malých kyvů [25]

Do stability malých kyvů je počítána i oscilační stabilita, jež se vyskytuje v soustavách, které jsou protáhlé nebo obsahují slabá spojení. V nich dochází ke kývání skupin synchronních generátorů proti sobě. Do takových soustav spadají i propojené soustavy ENTSO-E. Vzhledem k značnému počtu uzlů a bloků je výpočet oscilační stability v takové soustavě složitý, proto se k analýze používá zjednodušené jednopólové schéma dvou sítí propojených slabým vedením. [25]

3.1 Princip zachování úhlové stability

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, rozlišujeme dva typy úhlové stability podle linearity děje: stabilitu malých kyvů a přechodnou stabilitu. Při vyšetřování přechodné stability se uvažuje stav, kdy je spotřebovávaný výkon větší než výkon vyráběný. Pokud dojde ke ztrátě stability, synchronní generátor pracuje v asynchronním chodu, což způsobuje výkonové rázy. Udržení stability může být problém, především

pokud dojde v síti ke zkratu a po jeho vypnutí nastane změna přenosových parametrů vedení. Proto je důležité zkrat co nejdříve detekovat a vypnout, aby nebyla doba jeho trvání příliš dlouhá. Dalším pomocným prostředkem k udržení stability může být i rychlá změna výkonu turbíny, která vyrovná snížený výkon generátoru. Změna může být provedena např. elektrickým urychlovačem nebo rychlým řízením ventilů. [38]

3.2 Hodnocení setrvačnosti ES

Vysvětlení setrvačnosti

Setrvačnost sítě označuje kinetickou energii, která je uložena v rotujících generátorech. Její celková velikost v rámci sítě je odvozena od všech generátorů v této síti pracujících synchronně, tzn., rotujících stejnou rychlostí na shodné frekvenci. Všechny generátory současně v provozu tedy přispívají k setrvačnosti sítě svojí rotující hmotou. Setrvačnost je velmi důležitá, protože brání změně frekvence během změny zatížení nebo např. při výpadku zdroje a tím dává možnost ostatním systémům zareagovat a vyrovnat výkonovou bilanci. [39]

Definice setrvačnosti vychází přímo z 2. Newtonova zákona a dá se vyjádřit následující rovnicí:

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (3.3)$$

kde F (N) je síla působící na hmotu m (kg) a tím produkující zrychlení a (m/s^2). Pokud se tento vzorec aplikuje na elektrické systémy, jedná se o popis mechanické hmoty rotující s určitou úhlovou rychlostí a vzorec lze přepsat následovně:

$$T_m(t) - T_e(t) = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.4)$$

kde $T_m(t) - T_e(t)$ (N·m) je rozdíl mezi vstupním mechanickým a výstupním elektrickým momentem. Pokud výsledný moment není nulový, způsobí odchylku v úhlové rychlosti $d\omega$ (rad/s). Při uvažování nulových ztrát lze předpokládat, že setrvačnost je efekt úměrný rozdílu momentů a nepřímo úměrný změně úhlové rychlosti. To vyjadřuje rovnice (3.4) přeepsaná do následujícího tvaru:

$$J = \frac{T_m(t) - T_e(t)}{\frac{d\omega}{dt}} \quad (3.5)$$

kde J ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$) je celkový moment setrvačnosti systému.

Ke stejné rovnici je možné dospět pomocí vyjádření kinetické energie rotující hmoty tímto vzorcem:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (3.6)$$

Při změně výkonu v systému dojde i ke změně kinetické energie a dá se vyjádřit vztah mezi rovnováhou činného výkonu a změnou rychlosti:

$$P_m(t) - P_e(t) = \frac{dE_{kin}}{dt} = \omega \cdot J \cdot \frac{d\omega}{dt} \cong \omega_r \cdot J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.7)$$

kde je úhlová rychlost ω aproximována jmenovitou hodnotou ω_r (314 rad/s).

Pro lepší vyjádření se používá tzv. ekvivalentní setrvačnost systému H (s), jež je definována jako poměr kinetické energie rotující hmoty a jmenovitého výkonu synchronně rotujících strojů S (MVA):

$$H = \frac{E_{kin}}{S} = \frac{J \cdot \omega_r^2}{2 \cdot S} \quad (3.8)$$

Dosazením do rovnice (3.2.5) vznikne tento vztah:

$$P_m(t) - P_e(t) = \frac{2 \cdot S \cdot H}{\omega_r} \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.9)$$

který po převedení do poměrných jednotek získá následující tvar:

$$p_m(t) - p_e(t) = 2 \cdot H \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.10)$$

a ten následně po zavedení konstanty reprezentující počáteční čas $T = 2 \cdot H$ (s) vypadá následovně:

$$p_m(t) - p_e(t) = T \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.11)$$

Při uvažování skupiny N synchronních generátorů zapojených do ostrovní sítě, kde jsou jedinými zdroji pro spotřebu, lze jejich konstantu setrvačnosti H_{syn} (s) vyjádřit touto rovnicí:

$$H_{syn} = \frac{\sum_i^N H_i \cdot S_{G,i}}{\sum_i^N S_{G,i}} \quad (3.12)$$

Po zahrnutí vlivu zdrojů připojených přes střídač se tvar této rovnice změní následovně:

$$H_{synch}^{gen} = \frac{\sum_i^N H_i \cdot S_{G,i}}{P_{LOAD}} \quad (3.13)$$

Do rovnice vyjadřující celkovou setrvačnost systému H_T (s) je nutné uvažovat i vliv rotující zátěže ($H^{load} = \sum_i^M H_i^{load}$):

$$H_T = H_{synch}^{gen} + H^{load} \quad (3.14)$$

Celková kinetická energie KE_T (MW·s) uložená v točivých strojích (zdrojích i spotřebičích) je dána vztahem:

$$KE_T = H_T \cdot P_{LOAD} \quad (3.15)$$

V některých případech stačí pro vyjádření celkové kinetické energie systému počítat pouze se synchronními stroji:

$$KE_T = \sum_i^N H_i \cdot S_{G,i} \quad (3.16)$$

Pro zjednodušení se používá k označení celkové setrvačnosti elektrické sítě pouze písmeno H . [40]

Hodnocení setrvačnosti se provádí pomocí tzv. náhradní setrvačnosti energetického systému, kterou lze vyjádřit tímto vzorcem [41]:

$$H_Q = \frac{\sum_{i=1, i \neq k}^N H_i S_i}{\sum_{i=1, i \neq k}^N S_i} \quad (3.17)$$

3.3 Riziko ztráty setrvačnosti ES a možnosti jejího zvýšení

Výkonová bilance ES s FVE a VTE

Synchronní generátory mají už z principu svojí činnosti schopnost zpomalovat nebo úplně potlačovat odchylky frekvence v síti. S rostoucím množstvím instalovaných FVE a VTE, které tuto přirozenou schopnost nemají, klesá celková setrvačnost rotujících hmot a tím se stává obtížnější zajistit primární regulaci v ES. Při jejich provozu je také potřeba zařídit, aby při změnách dodávaného výkonu nedocházelo k výraznějším odchylkám frekvence. Aby bylo možné soustavu s FVE a VTE provozovat, je potřeba do ní vnést tzv. umělou setrvačnost, která nahradí chybějící přirozenou setrvačnost generátorů. Základní rovnice rovnováhy pak má následující tvar:

$$P_T - P_L - P_W + P_{FW} + P_V - P_S = 0 \quad (3.18)$$

kde P_T (W) je celkový mechanický výkon turbín synchronních generátorů, P_L (W) je celkový činný odběr, P_W (W) je celkový činný výkon mezi systémy, $P_{FW} + P_V$ (W) je celkový výkon vyrobený obnovitelnými zdroji (VTE a FVE) a P_S (W) jsou celkové činné ztráty. V případě nerovnováhy se rovnice změní na tento tvar:

$$P_T - P_L - P_W + P_{FW} + P_V - P_S = \Delta P \quad (3.19)$$

kde ΔP (W) je rozdíl mezi generovaným a spotřebovaným výkonem. Tento rozdíl je vyjádřen v rovnici (3.7) a rovná se skokové změně výkonu. Na tomto skoku pak závisí časová změna frekvence, která je podrobněji rozepsána v následující podkapitole. [41]

Časová změna frekvence (RoCoF)

Rate of change of frequency (RoCoF) je časová derivace frekvence soustavy (df/dt). U systému založených především na synchronních generátorech nebyl tento ukazatel příliš důležitý v důsledku jejich vysoké setrvačnosti, která dokázala veškeré změny zatížení tlumit a omezit změnu frekvence. S větším množstvím střídačů v síti však dochází k nárůstu hodnot RoCoF a je potřeba na tyto změny reagovat např. vhodným řídicím algoritmem měničů. Vysoké hodnoty RoCoF mohou mimo jiné způsobovat spouštění ochran u zařízení, která mají určitá mechanická omezení, a mohlo by dojít k jejich poškození. Teoreticky k největší hodnotě df/dt dochází při odpojení zdroje nebo zátěže před tím, než zareagují řídicí systémy. Průměrná hodnota pro N synchronních generátorů a zátěží se dá vypočítat podle následujícího vzorce [42]:

$$\left. \frac{d\Delta f}{dt} \right|_{t=0^+} = \frac{f_n P_k}{2 \sum_{i=1, i \neq k}^N H_i S_i} \quad (3.20)$$

kde Δf (Hz) je odchylka frekvence od jmenovité hodnoty, f_n (Hz) je jmenovitá hodnota frekvence sítě, 0^+ je okamžik těsně po odpojení generátoru/zátěže, $P_k = \Delta P$ (W) je hodnota ztraceného výkonu (index k označuje odpojený synchronní stroj), H_i (s) je setrvačnost ostatních generátorů v síti a S_i (VA) je jejich jmenovitý výkon.

Tuto rovnici lze také vyjádřit následovně [41]:

$$\left. \frac{d\Delta f}{dt} \right|_{t=0^+} = \frac{f_n P_k}{2 H_Q \sum_{i=1, i \neq k}^N S_i} \quad (3.21)$$

Současný limit RoCoF stanovený ENTSO-E je 1 Hz/s, protože vyšší hodnoty by mohly ohrozit vytvořené plány při poruše určené pro stabilizaci ES. Činnosti obsažené v daných plánech totiž nejsou dostatečně rychlé, aby při větších změnách stihly pokrýt dodávku potřebného množství činného výkonu, aniž by frekvence klesla pod hodnotu, při které se již některé zdroje začínají odpojovat, což dále vede k blackoutu. Velikost RoCoF se obvykle snižuje s rostoucí rozlohou systému, do budoucna se však předpokládá zvyšování df/dt ve všech systémech bez ohledu na jejich velikost, a to až nad hladinu 1 Hz/s [43]. V České republice se nesmí výrobní moduly odpojit od sítě do časové změny frekvence ± 2 Hz/s od základní frekvence 50 Hz. Změna frekvence se měří po dobu 500 ms jako střední derivace průběhu. [44]

Plánované řešení na úrovni ENTSOE-E a ČEPS, a.s.

Podle ENTSOE-E existuje několik variant, jak dosáhnout zvýšení odolnosti soustavy proti výrazným výchylkám frekvence způsobeným např. poruchou nebo změnou zatížení, a potenciálně vedoucím k blackoutu. Mezi navrhovaná opatření patří [43]:

- dodání setrvačnosti do systému pomocí střídačů obnovitelných zdrojů a bateriových úložišť,
- zvýšení celkové setrvačnosti systému prostřednictvím zařízení, jako je např. STATCOM s bateriemi ve stejnosměrném meziobvodu nebo synchronní kompenzátor,
- zabránění rozpadu soustavy posílením jejích prvků (vedení, stanice) a zvýšením využití stejnosměrného rozvodu oproti střídavému,
- zvýšení odolnosti zdrojů energie a vytvoření scénářů pro rychlejší reakci systému,
- vytvoření speciálních postupů pro zmírnění efektů rozpadu systému (např. dorovnání nerovnováhy zátěží nebo zdroji bez změny RoCoF),
- zavedení tržních nařízení vedoucích ke snížení toků činného výkonu.

Zvýšení setrvačnosti tedy není jediný prostředek umožňující zlepšit stabilitu soustavy, oproti ostatním má však velký význam i z jiných důvodů (např. zásoba kinetické energie pro poskytnutí činného výkonu v případě zvýšených toků). Teoretické scénáře vývoje soustavy předpokládají, že v roce 2025 by bylo potřeba přidat setrvačnost více než 500 GWs, v roce 2040 dokonce přes 2 500 GWs. To odpovídá přibližně 400 jednotkám o instalované kapacitě 400 GW v roce 2025 a 2 000 jednotkám s kapacitou 500 GW v roce 2040. Každá jednotka by měla mít jmenovitý výkon 250 MW a setrvačnou konstantu 5 s. [43]

Společnost ČEPS, a.s. ve svém Plánu rozvoje na rok 2021 – 2030 vyjadřuje setrvačnost pomocí mechanické časové konstanty T_M (s), která charakterizuje kinetickou energii naakumulovanou v točivých strojích. Pro výrobní s parní turbínou dosahuje hodnot cca 7 až 10 s, pro soustrojí s vodní turbínou pak 6 až 9 s. Na úrovni celé soustavy se navíc definuje akcelerační časová konstanta sítě T_N (s), jež zahrnuje časové konstanty všech točivých strojů v soustavě. Hodnota T_N spočítaná pro ČR na rok 2030 se pohybuje nad

hodnotou 6 s, což je v rámci ENTSO-E jedna z nejvyšších hodnot. Vzhledem k tomu, že minimální přípustná hodnota v rámci Evropy je 2,3 s a ES ČR tuto hranici bez problémů splňuje, provozovatel soustavy prozatím nepovažuje za nutné její setrvačnost uměle zvyšovat, nicméně ji neustále sleduje pro případ, že by nastala výrazná nepředpokládaná změna. [45]

4 Možnosti využití setrvačnicků a baterií pro zajištění setrvačnosti ES

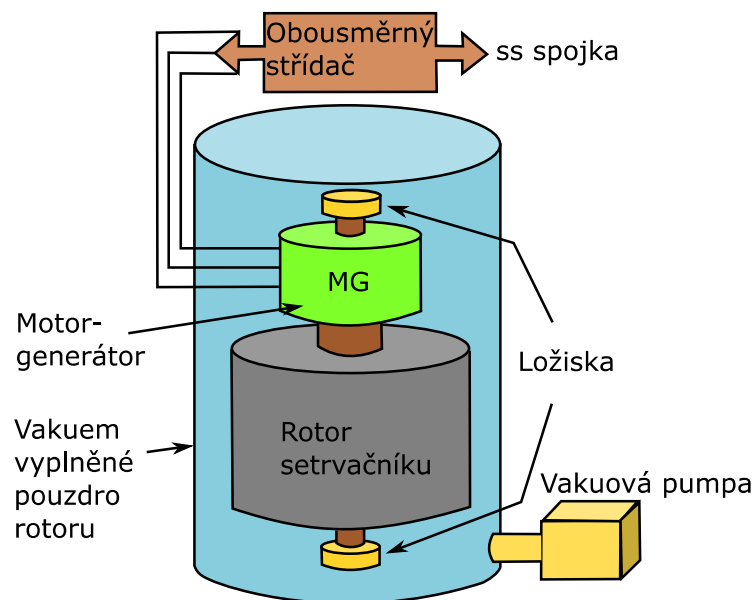
4.1 Možnosti využití setrvačnicků

4.1.1 Setrvačnickové úložiště (FESS)

FESS ukládá elektrickou energii tím, že jí převede na kinetickou rotační energii, jedná se tedy o mechanické úložiště. Vstupní energie je získávána ze zdroje elektrické energie, kterým je v tomto případě elektrická síť. Během ukládání energie dochází k urychlování setrvačnicku, při vybíjení je naopak setrvačnick zpomalován, aby mohl předat naakumulovanou energii. Změnu elektrické energie na kinetickou a naopak má na starosti motor-generátor (MG), jenž je se setrvačnickem spojen společnou hřídelí. Toto spojení nám umožňuje řídit setrvačnick řízením motor-generátoru. [47]

4.1.2 Struktura a komponenty setrvačnickového úložiště

Typické uspořádání FESS je ukázáno na Obr. 12.



Obr. 12 Struktura setrvačnickového úložiště [63]

Mezi hlavní komponenty patří rotor, elektrický stroj (již zmíněný motor-generátor), ložiska, řídicí výkonová elektronika a pouzdro, ve kterém je setrvačnick uložen. Uložená energie je závislá na tvaru a materiálu rotoru, který se běžně otáčí mezi limitními hodnotami otáček ω_{min} a ω_{max} tak, aby nedocházelo k příliš velké odchylce napětí a byl limitován maximální tok motor-generátoru pro daný jmenovitý výkon. [48]

Rotor

Rotor je obvykle ve tvaru válce nebo dutého válce o různé délce a maximální rychlost jeho otáčení je dána pevností materiálu, ze kterého je vyroben. Podle toho se rozlišují dva typy úložišť – nízkorychlostní a vysokorychlostní. Rotor nízkorychlostních FESS je vyroben z těžšího kovového materiálu a uložen v mechanických nebo magnetických ložiskách. Vysokorychlostní úložiště využívají pro rotory lehčí a pevnější materiály (nejčastěji kompozity) a používají výhradně magnetická ložiska. Jejich cena tak může být až pětkrát vyšší než u nízkorychlostních. [48]

Motor-generátor

Elektrický stroj v úložišti slouží k nabíjení a vybíjení setrvačnicku tím, že jej urychluje (pracuje jako motor) nebo zpomaluje (pracuje jako generátor). Nejčastěji používanými stroji jsou asynchronní motor s vinutým rotorem, synchronní motor s permanentními magnety nebo reluktanční motor. Asynchronní motor se používá kvůli jeho odolnosti, poměrně nízké ceně a velkému toku. Jeho nevýhodami jsou však obtížné řízení, omezená rychlost a složitá údržba. Reluktanční motor je také velmi robustní, navíc má široký rozsah dosažitelných rychlostí a nízké ztráty naprázdno. Při vyšších rychlostech je také lépe kontrolovatelný než asynchronní motor, ale pracuje s nízkým účínkem, malými hodnotami měrného výkonu a velkým zvlněním toku, proto se používá pouze pro vysokorychlostní úložiště. Nejběžněji používaným motorem je synchronní motor s permanentními magnety díky jeho vysokému účínku a měrnému výkonu a nízkým ztrátám, a to nejčastěji pro vysokorychlostní aplikace. Problém u tohoto typu motoru mohou představovat ztráty vířivými proudy, vyšší cena a nízká pevnost v tahu. [48]

Výkonová elektronika

Základním prvkem je obousměrný převodník, který společně s motorem zajišťuje transformaci energie. Nejčastěji se zde používá AC-DC-AC měnič, což jsou v podstatě dva

střídače s připojeným stejnosměrným kapacitorem. Základ topologie tvoří třífázové polovodičové můstky, jejichž spínání je řízeno pomocí pulzně-šířkové modulace (PWM). Dalšími méně používanými konfiguracemi měničů mohou být např. DC-DC v kombinaci s DC-AC měničem, AC-AC nebo maticový měnič. [48]

Ložiska

Hlavním úkolem ložisek je poskytovat oporu pro setrvačnick a zároveň udržovat jeho rotor na místě s pokud možno minimálním třením. Jejich systém může být založen na mechanickém nebo magnetickém principu, v závislosti na aplikaci a hmotnosti stroje. Největší uplatnění zatím nalézají mechanická kuličková ložiska, která ale mají vyšší tření a vyžadují častější údržbu kvůli degradaci maziva, proto je snaha o přechod k magnetickým ložiskům s permanentními magnety. V jejich případě neexistují třecí ztráty a nevyžadují žádné mazivo, je však potřebné zajistit jejich napájení během provozu. [48]

Pouzdro

Pouzdro úložiště má především dva účely – zajistit nízký odpor vzduchu a zadržet rotor v případě poruchy. Kryt bývá vyplněn vakuem, aby se snížily ztráty odporem vzduchu vyvolané rotací setrvačnicku, jejichž hodnota se při atmosférickém tlaku zvyšuje s třetí mocninou rychlosti. Z tohoto důvodu je součástí úložiště i vakuová pumpa a chladičový systém. Při poruše se rotor obvykle rozpadne na malé části, jejichž energie se vstřebává třením o stěny uložení. Tento jev je provázen nárůstem tlaku uvnitř pouzdra, které musí být dostatečně odolné, aby tlak vydrželo. V případě, že by se při poruše do pouzdra dostal vzduch, mohlo by dojít k explozi částic a bylo by nutné použití silnějšího krytu. Z výše uvedených důvodů tvoří pouzdro setrvačnicku přibližně polovinu hmotnosti celého úložiště. [48]

4.1.3 Vlastnosti

FESS mají oproti jiným typům energetických úložišť několik výhod, což z nich dělá jeden z nejlepších a nejefektivnějších systémů pro poskytování umělé setrvačnosti a regulaci frekvence. Na rozdíl od např. baterií mají setrvačnick poměrně nízké náklady na pořízení, provoz i údržbu a zároveň i dlouhou životnost (obvykle kolem 20 let), která není ovlivňována úrovní nabití, již je dosahováno během provozu. Navíc jsou schopny

poskytnout plný výkon během 50 až 60 ms a změnit svůj stav z vybíjení na nabíjení za méně než 10 ms. [49]

Při návrhu FESS nicméně musíme počítat s několika problémy, které mohou přinést různé komplikace, mezi ně patří např. [50]:

- aerodynamické ztráty,
- třecí ztráty v ložiskách,
- vyrovnávání rotace Země pomocí stabilizace pozice a naklonění osy,
- reakce setrvačnicku na působící síly (kývání v ose rotace, změna orientace osy rotace),
- vynaložení značné energie na řízení stabilizačního systému.

Řešení těchto potíží je navrženo v [50] a jeho design spočívá v nahrazení klasických mechanických ložisek magnetickými ložisky a umístěním uvnitř vakuové nádoby. Tato navržená konfigurace se vyznačuje vysokou účinností ukládání energie díky malému množství energie vynaloženému na stabilizaci setrvačnicku.

Jak již bylo dříve zmíněno v této kapitole, uložení setrvačnicku do nádoby obsahující vakuum pomáhá výrazně omezit ztráty způsobené odporem vzduchu při rotaci setrvačnicku. Vakuová pumpa v tomto případě potřebuje větší výkon pouze při uvedení FESS do provozu, během činnosti slouží jen k pokrytí zanedbatelných úbytků vakua. Nejlepšími materiály pro magnetická ložiska se ukázaly být magnety vyrobené ze vzácných zemin (konkrétně slitina neodymu, železa a bóru), které jsou schopny vyvinout dostatečnou sílu k nadzvednutí tělesa rotoru. Udržení stability je komplexní problém, při kterém se musí počítat se všemi silami, které na setrvačnick mohou během provozu působit. Důležité je především zabránění výraznějšímu naklonění osy, které by mohlo vyústit v kontakt rotujícího setrvačnicku se stěnou nádoby a následnou havárii. Možným řešením by mohlo být použití zpětnovazební smyčky pro levitující tělesa, která používá jako senzory k detekci vychýlení osy Hallovovy sondy (indikují změnu intenzity magnetického pole způsobenou změnou polohy. Při navrhování daných řešeních bylo uvažováno vertikální umístění osy rotace. [50]

Dynamické vlastnosti

Aby bylo možné použít setrvačnick pro regulaci v síti, je důležité znát jeho dynamické chování, které je charakterizováno několika veličinami popsanými základními rovnicemi. Asi nejvýznamnější veličinou je kinetická energie, kterou může setrvačnick akumulovat/dodávat [62]:

$$E = \frac{1}{2} m \cdot \omega_{max}^2 \quad (4.1)$$

kde E (J) je množství kinetické energie, kterou je úložiště schopno akumulovat, m (kg) je hmotnost setrvačnicku a ω_{max} (rad/s) je jeho maximální úhlová rychlost. Pro zjištění výkonu, který je tato energie schopna dodat po transformaci, lze při znalosti momentu setrvačnosti (je dán konstrukcí setrvačnicku) spočítat pomocí následujícího vztahu [62]:

$$P = \frac{\Delta E_n}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\Delta t} \quad (4.2)$$

kde P (W) je výkon kinetické energie setrvačnicku za daný čas a J (kg·m²) je moment setrvačnosti. Z těchto rovnic je patrné, že udržení konstantního výkonu lze dosáhnout pouze při konstantních otáčkách, nabíjení a vybíjení setrvačnicku ale může probíhat jak při konstantní rychlosti, tak i během její změny. Tato změna probíhá po exponenciále a v rámci jedné periody ji lze definovat takto [62]:

$$\omega(t) = \begin{cases} \omega_{max} & t \leq T \\ \omega_{max} \cdot e^{-\frac{K_0}{J} \cdot t} & t \geq T \end{cases} \quad (4.3)$$

kde K_0 je tzv. konverzní momentový faktor a T (s) je doba chodu setrvačnicku na ω_{max} .

Konverzní momentový faktor definuje transformaci mechanické energie na elektrickou a pro daný setrvačnick je konstantní. Doba provozu na maximální otáčky je běžně udávaná v technickém listu konkrétního stroje. V případě, že tato doba není zadána, lze ji vypočítat dle rovnice [62]:

$$T = \frac{J \cdot \omega_{max}^2}{2 \cdot P_{max}} \quad (4.4)$$

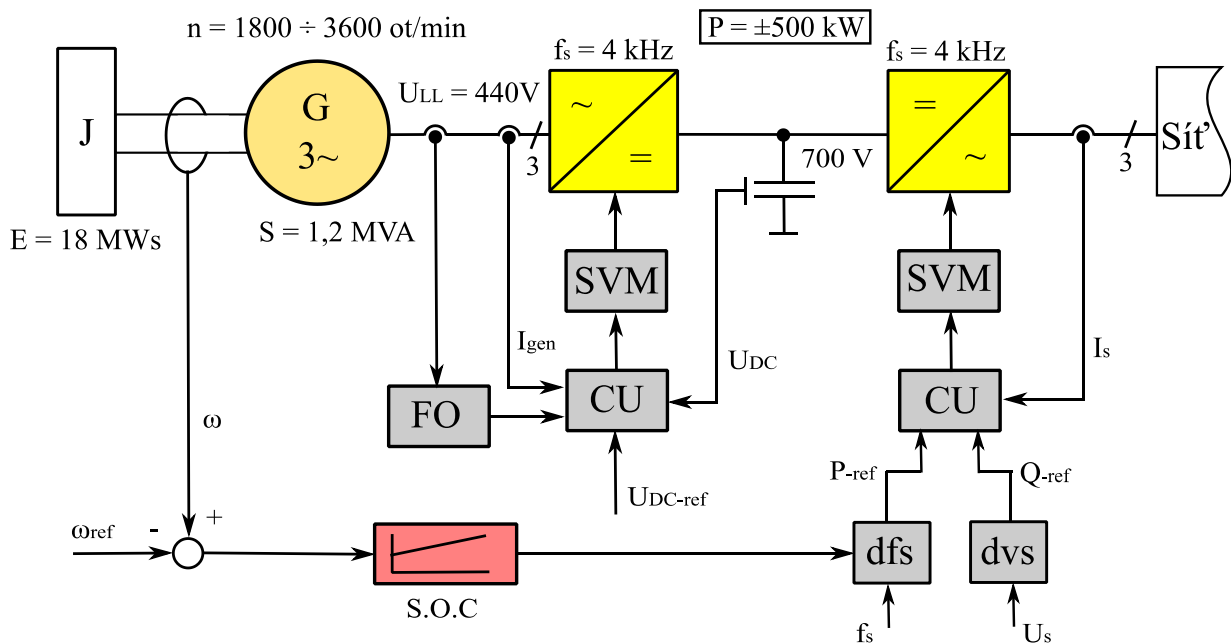
kde P_{max} (W) je maximální výkon setrvačnicku. Výkon setrvačnicku v exponenciální oblasti s ohledem na čas se pak dá zjistit derivací energie [62]:

$$P = \begin{cases} P_{max} & t \leq T \\ \eta \cdot \omega_{max}^2 \cdot e^{-\frac{K_0}{J} \cdot t} & t \geq T \end{cases} \quad (4.5)$$

kde η (-) je účinnost setrvačnicku, která zohledňuje potřebnou energii k udržení otáček setrvačnicku a obvykle se pohybuje v rozmezí 95 až 98 %.

4.1.4 Řízení

Princip řízení setrvačnickového úložiště je zobrazen na Obr. 13. Zde jsou ukázány základní části systému a jejich propojení.



Obr. 13 Princip řízení FESS [47]

Střídač na straně sítě pracuje jako univerzální regulátor výkonů (UPFC), který má nastavenou určitou hodnotu činné ho výkonu (P_{set}) a jalového výkonu (Q_{set}). Oba výkony jsou dodávány prostřednictvím funkcí „Dynamická podpora frekvence“ (DFS) a „Dynamická podpora napětí“ (DVS), P_{set} má navíc ještě vstup z regulátoru nabíjení. Zmíněné funkce budou vysvětleny dále v této kapitole [47].

Střídač na straně setrvačnicku je zodpovědný za kontrolu stejnosměrného napětí na sběrnici. Tato kontrola probíhá na základě rotorového toku zjišťovaného snímačem toku (FO). Kontrolní jednotka (CU) má na starosti určení cílových hodnot pro střídač, k jejichž zjištění využívá modulaci prostorového vektoru (SVM). Poslední částí celého systému je regulátor stavu nabití (SOC), který má na starosti regulaci jmenovité rychlosti setrvačnicku [47].

Algoritmus DFS měří frekvenci systému a nastavuje hodnotu činného výkonu P_{set} . Pokud dojde ke snížení frekvence v důsledku změny zatížení nebo snížení dodávky z obnovitelných zdrojů, nastaví se kladná hodnota P_{set} a setrvačnick dodává energii do sítě. V případě nárůstu frekvence se nastaví záporná hodnota činného výkonu a přebytečná energie v síti se ukládá v setrvačnicku. [47]

Algoritmus DVC pracuje na podobném principu jako algoritmus DFS. Při naměření nízkého napětí v soustavě je nastavena kladná hodnota Q_{set} a jalový výkon je dodáván do sítě. Stejně tak při naměření vysoké hodnoty napětí se nastaví záporný Q_{set} a jalový výkon je spotřebováván. Tento algoritmus tedy umožňuje systému FESS regulovat napětí sítě během dynamických změn. [47]

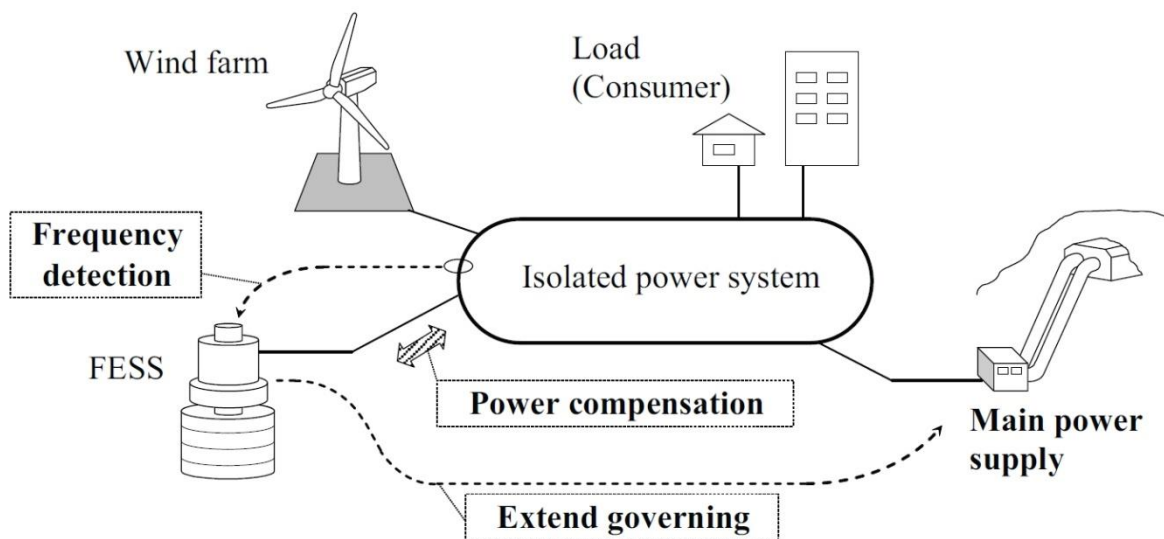
4.1.5 Použití FESS

Zatím nejúspěšnější aplikací setrvačnickového úložiště v oblasti kvality elektrické energie jsou zařízení UPS (Uninterruptible Power System), protože většina výpadků střídavé sítě trvá méně než 3 s. Pro takto krátký čas je setrvačnick spolehlivější než např. olověné baterie, a proto se v této oblasti stal běžně používaným systémem. V elektrizační soustavě mohou být použity pro regulaci frekvence a nahradit tak tuto funkci klasických tepelných elektráren. Jedním z příkladů reálné aplikace je FESS nacházející se ve městě Stephentown ve státě New York, které se skládá z 200 setrvačnicků a je schopné uložit výkon o velikosti 20 MW během 15 min. Zmíněné úložiště se používá právě pro regulaci frekvence s reakční dobou cca 4 s. FESS také nalezneme v izolovaných sítích obsahujících obnovitelný zdroj energie (nejčastěji větrné turbíny), kde slouží ke krátkodobé kompenzaci výkyvů energie. Takové úložiště se nachází např. na ostrově Utsira v Norsku, který je zásobován kombinací větrné a vodní energie s nízkorychlostním FESS o velikosti 200 kW. [51]

Technický list setrvačnicků od společnosti Beacon Power instalovaných v Stephentownu společně s dalšími technickými listy jsou pro ilustraci uvedeny v přílohách A až C.

Většina dosavadních studií zabývajících se využitím setrvačnickového úložiště ke stabilizaci frekvence modelovala FESS jako součást izolované sítě s obnovitelným zdrojem. Z principu řízení vyplývá, že referenční hodnota činného výkonu setrvačnicku je závislá na odchylce frekvence sítě. Při poklesu frekvence dodává setrvačnick výkon do sítě, naopak při jejím nárůstu je výkon ze sítě setrvačnickem spotřebováván. Referenční výkon se mění v závislosti na rychlosti otáčení rotoru setrvačnicku, při jejíž změně se mění množství uskladněné energie (pro každý setrvačnick jsou nastaveny hranice minimální a maximální rychlosti a také rychlosti, při které dosáhne množství uskladněné energie poloviční hodnoty než je celková kapacita). To nám může umožňovat minimalizovat odchylky frekvence v síti. [52]

Nejčastěji používaný model ostrovní sítě je ukázán na Obr. 14 a skládá se z hlavního zdroje (diesel generátor nebo synchronní generátor), zátěže, obnovitelného zdroje (větrná nebo fotovoltaická elektrárna) a setrvačnicku.



Obr. 14 Model izolované sítě s obnovitelným zdrojem a FESS [52]

Vzhledem k tomu, že FESS reguluje frekvenci sítě pomocí kompenzace výkonu, může nastat situace, že hlavní regulace frekvence je prováděna prostřednictvím setrvačnicku a

synchronní generátor dodává prakticky konstantní výkon. To však funguje pouze v případě, že má FESS dostatečnou rezervu výkonu pro regulaci oběma směry. Pokud by došlo k tomu, že setrvačnick je prázdný nebo na své maximální hodnotě výkonu, nebylo by možné dále udržet výkonovou bilanci a došlo by k výrazné odchylce frekvence v síti. Proto musí být výstup synchronního generátoru regulován s ohledem na množství energie uložené v setrvačnicku. K tomu slouží tzv. koordinované řízení, které zajistí zvýšení výstupu generátoru, pokud se rychlost rotoru FESS sníží pod hodnotu, při níž uložená energie odpovídá polovině maximální kapacity, a naopak při zvýšení rychlosti nad tuto hodnotu dojde ke snížení výstupu generátoru. Pro omezení mechanického namáhání SG je do řízení zakomponován i omezovač rychlosti změny jeho výkonu. [52]

4.2 Možnosti využití velkokapacitních baterií

4.2.1 Bateriové úložiště (BESS)

Bateriová úložiště jsou zařízení skládající se z jedné nebo více dobíjecích baterií, která umožňují skladovat energii vyrobenou nejčastěji OZE (FVE a VTE) a v případě potřeby ji uvolnit do sítě. V současnosti nepoužívanějším typem jsou Li-Ion baterie díky jejich ekonomické výhodnosti a vysoké účinnosti. Nejrozšířenější využití BESS je v kombinaci s FVE. Pokud zdroj vyrábí, baterie se nabíjí energií jdoucí z tohoto zdroje a v případě, že zdroj nevyrábí, baterie je schopna poskytnout uskladněnou energii do sítě. Může tedy pomoci s vyrovnáváním výkonové bilance. Kromě toho však lze bateriové úložiště použít i pro poskytování zálohy a podporu stability ES. [53], [54]

Jeden z možných modelů BESS uvažuje připojení úložiště do sítě prostřednictvím měniče napětí. V tomto případě je množství energie jdoucí do baterie nebo z baterie kontrolováno svorkovým napětím měniče. Pokud je v síti zaznamenána odchylka frekvence překračující určitou hodnotu, aktivuje se blok, který vysílá pomocný signál. Tento signál má za následek snížení nebo zvýšení výstupního činného výkonu v závislosti na odchylce frekvence. [55]

4.2.2 Vlastnosti

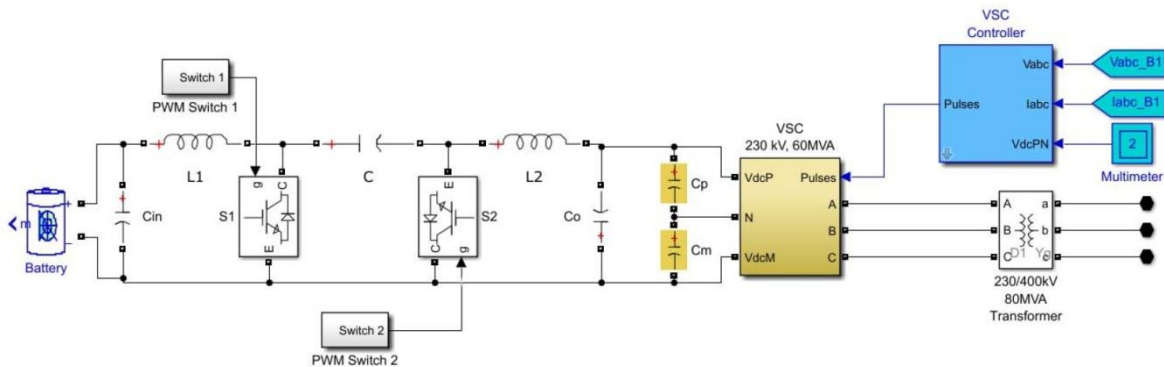
Jednou z nevýhod baterie v porovnání se setrvačником je její životnost. Při výrobě baterií je uvažován pomalý a plynulý cyklus nabíjení/vybíjení. Baterie sloužící pro regulaci frekvence však pracují v jiném režimu, kdy se jejich stav nabití mění poměrně rychle a ve velkém rozsahu. To může ovlivňovat jejich stárnutí a mít za následek kratší dobu životnosti než je uvedena v technickém listu. Během stárnutí se také snižuje kapacita baterie, což může způsobit snižování regulačního rozsahu. Jelikož stárnutí závisí mimo jiné také na teplotě, průměrném stavu nabití, velikosti napětí a nejnižší úrovni vybití, které baterie dosahuje během každého cyklu, lze tento proces zpomalit např. efektivním chlazením a správným stanovením minimální hladiny nabití, pod kterou baterie nesmí klesnout. Rychlost nabíjení/vybíjení má na stárnutí pouze zanedbatelný vliv. [56]

4.2.3 Řízení

Řízení BESS může být prováděno několika různými způsoby v závislosti na typu použitých baterií a jejich charakteristikách nabíjení/vybíjení, a jeho provedení může být

poměrně složité obzvláště v oblastech, kde se nachází více úložišť a je nutné zajistit jejich kooperaci, nebo např. v případě, že se k regulaci frekvence využívají i baterie elektromobilů připojených k nabíjecím stanicím. V takových situacích se zdá vhodné dynamické řízení, které vyhodnocuje velké množství informací najednou (často se také musí počítat i s obchodní stránkou regulace frekvence a rozhodovat na základě aktuálních cen energie a služeb poskytovaných k regulaci). [57]

Příklad modelu BESS a jeho řízení je ukázán na obrázku Obr. 15. Model sestává z Li-ion baterie, obousměrného DC-DC měniče, převodníku napětí (VSC – Voltage Source Converter) a zvyšovacího transformátoru.



Obr. 15 Model BESS a jeho řízení [58]

Činnost BESS je řízena pomocí DC-DC měniče prostřednictvím spínačů S_1 a S_2 – S_1 má na starosti vybíjení baterie, S_2 její nabíjení. Tyto spínače jsou ovládány PWM na základě signálu (chyby frekvence f_{error}) vypočítaného z aktuální frekvence sítě snímané v reálném čase $f_{realtime}$ a referenční hodnoty frekvence $f_{reference}$ (jmenovitě) podle následující rovnice:

$$f_{error} = f_{reference} - f_{realtime} \quad (4.6)$$

Pokud je chyba záporná (frekvence sítě je vyšší než jmenovitá), BESS se začne nabíjet, když je chyba kladná (aktuální frekvence je nižší než jmenovitá), BESS přejde do

režimu vybíjení. Požadované výstupní napětí V_{output} se pak vypočítá na základě původního napětí $V_{initial}$ a frekvenční chyby jako:

$$V_{output} = V_{initial} - K \cdot f_{error} \quad (4.7)$$

Tato hodnota je následně převedena na signál PWM ovládající oba spínače. Aby se zabránilo nepřetržitému nabíjení/vybíjení baterie, je vhodné nastavit limity odchylky frekvence a aktuálního stavu nabití, při kterých se úložiště zapojí do regulace. [58]

Jedna z věcí, které se musí při řízení BESS řešit je i to, že baterie se nesmí nabíjet až do 100 % kapacity a vybíjet až do 0 %, ale vždy musí zůstat rezerva. Aby se zabránilo překročením limitů pro danou baterii, je vhodné použít tzv. frekvenční řízení, při kterém se dodávaný/odebíraný výkon baterie vypočítá podle této rovnice:

$$P_{BESS} = K \cdot \Delta f \quad (4.8)$$

kde P_{BESS} (W) je výkon injektovaný baterií, K (-) je koeficient řízení a Δf (Hz) je odchylka frekvence v síti. Benefit tohoto řízení je, že koeficient K je lineární funkcí aktuálního stavu nabití a odchylky frekvence. To znamená, že rychlost nabíjení/vybíjení závisí na velikosti odchylky a zároveň nedojde k přílišnému nabití/vybití baterie. [59]

4.2.4 Použití BESS

Jak bylo zmíněno dříve, lze BESS použít ke zvýšení stability sítě. Tato aplikace je umožněna díky tomu, že úložiště je schopné poskytovat FFR (Fast Frequency Response – rychlá frekvenční odezva) v sítích s nízkou setrvačností. Řízení takového úložiště probíhá ve čtyřech operačních režimech, které závisí na stavu sítě (frekvenci) a stavu nabití baterií. První z režimů je při normálních podmínkách a úložiště si v něm zachovává svůj stav nabití v určitém rozmezí tak, aby v případě potřeby mělo potřebnou energii, kterou by mohlo dodat do sítě a zároveň mělo dost místa, aby se dalo dobíjet energií odebranou ze sítě. Pokud odchylka frekvence překročí konkrétní nastavenou hodnotu (resp. pásmo), úložiště pracuje tak, aby regulovalo frekvenci, a přepne se buď do ustáleného, nebo přechodného režimu (v závislosti na velikosti naměřené odchylky). Přechodný režim slouží k rychlému dodání činného výkonu, jehož velikost závisí na velikosti odchylky frekvence a množství energie uložené v bateriích, v ustáleném režimu je odezva pomalejší a v podstatě se jedná o primární regulaci frekvence. Přechod do tohoto režimu nastává při nepříliš velké odchylce např. během nezávažné poruchy. Poslední režim se nazývá výstupní plán a slouží

k plynulému návratu zpět do normálního provozu bez nepříznivého dopadu na chod soustavy. Deaktivování velkých BESS poté, co se síť dostatečně zotaví z přechodného děje způsobujícího změnu frekvence, by mohlo vést k oscilacím frekvence, zvláště pokud by k vypnutí došlo v blízkosti některé z nastavených hodnot frekvence určujících přechod do jednotlivých režimů. Proto se při vypínání úložiště jeho energie snižuje postupně s pevně danou rychlostí (ta je menší než v přechodném režimu). Díky implementaci několika různých režimů operace je BESS schopno zlepšovat krátkodobou i dlouhodobou stabilitu ES. [60]

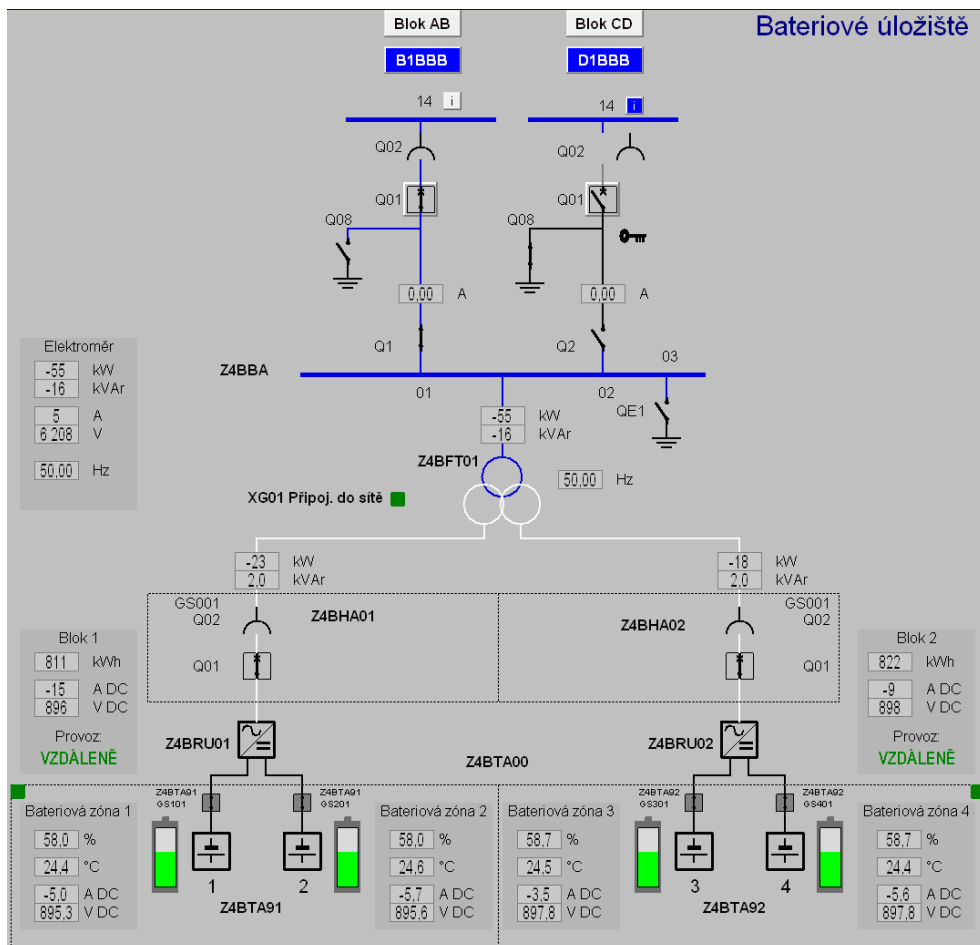
4.2.5 Bateriové úložiště v elektrárně Tušimice II

Provozovatelé DS a PS v České republice se již také začínají zabývat možnostmi použití bateriových úložišť ke zlepšení řízení ES. Společnost ČEZ, a.s. ve spolupráci s provozovatelem PS ČEPS, a.s. v rámci projektu BAART (Bateriová akumulace pro automatickou regulaci frekvence Tušimice) nainstalovala bateriové úložiště v areálu elektrárny Tušimice II (viz Obr. 16) s cílem vyzkoušet použití BESS k regulaci frekvence. Baterie má výkon 4 MW, kapacitu 2,8 MWh a účinnost ukládání energie se pohybuje kolem 90 %. Její umístění přímo v jednom z bloků umožňuje kooperaci s turbogenerátorem pro nabíjení/vybíjení úložiště. Tento systém byl testován v zapojení pro automatickou regulaci frekvence, kdy při poklesu frekvence pod 50 Hz se baterie vybíjela, naopak při nárůstu nad 50 Hz se dobíjela. Výsledky ukázaly, že v kombinaci s blokem dokázala baterie regulovat frekvenci s více než 95 % spolehlivostí, navíc dokázala reagovat za méně než 40 ms. Úspěšnost provedených testů otevírá možnosti využití velkokapacitních baterií k poskytování podpůrných služeb, konkrétně automatické regulace frekvence, v rámci elektrizační soustavy ČR. [61]

Na Obr. 17 je uvedeno schéma zapojení bateriového úložiště v elektrárně Tušimice II. Baterie není připojena přímo do sítě, ale do vlastní spotřeby elektrárny přes transformátor Z4BFT01, a je rozdělena na dvě části, z nichž každá je připojena k jedné dvojici bloků (AB a CD). To znamená, že elektrárna poskytuje podpůrné služby z vlastní spotřeby a využívá baterii k tomu, aby doplnila nebo odebrala výkon, který ve vlastní spotřebě v důsledku regulace chybí nebo přebývá.

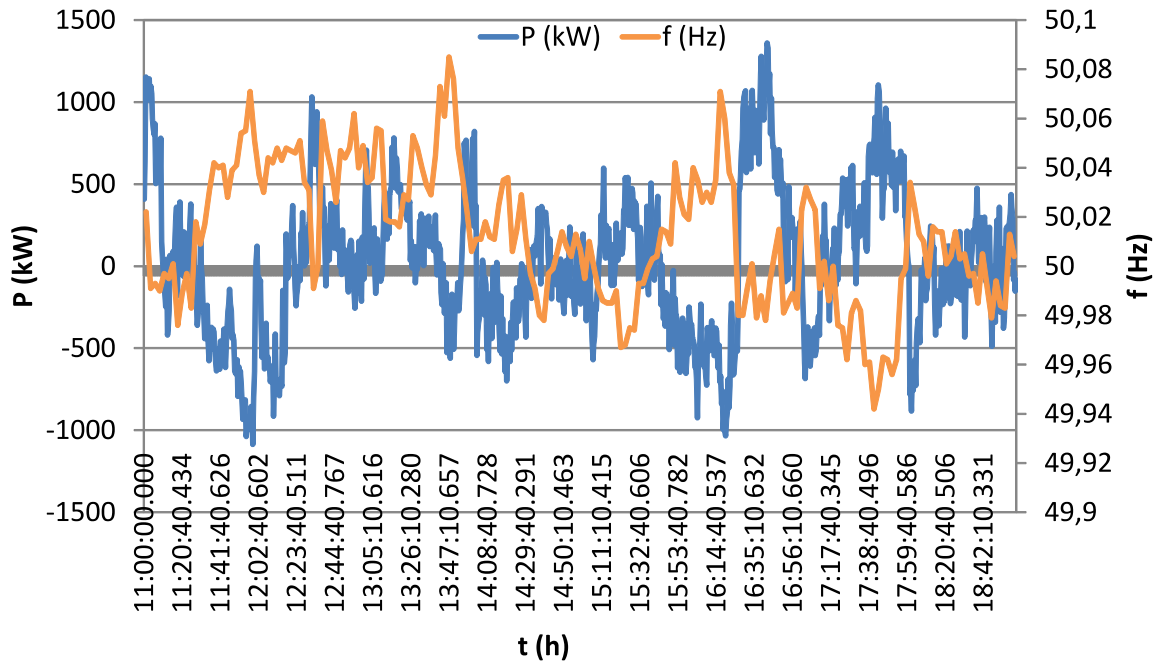


Obr. 16 Velkokapacitní baterie v elektrárně Tušimice II [61]



Obr. 17 Schéma zapojení baterie v Tušimicích

Obr. 18 ukazuje naměřená data z Tušimické baterie, konkrétně průběh frekvence sítě (oranžová křivka) a činného výkonu baterie (modrá křivka) v průběhu dne 10. dubna 2023 (výřez pro rozmezí 11:00 – 19:00 hodin). Graf naměřených průběhů za celý den je v příloze D.

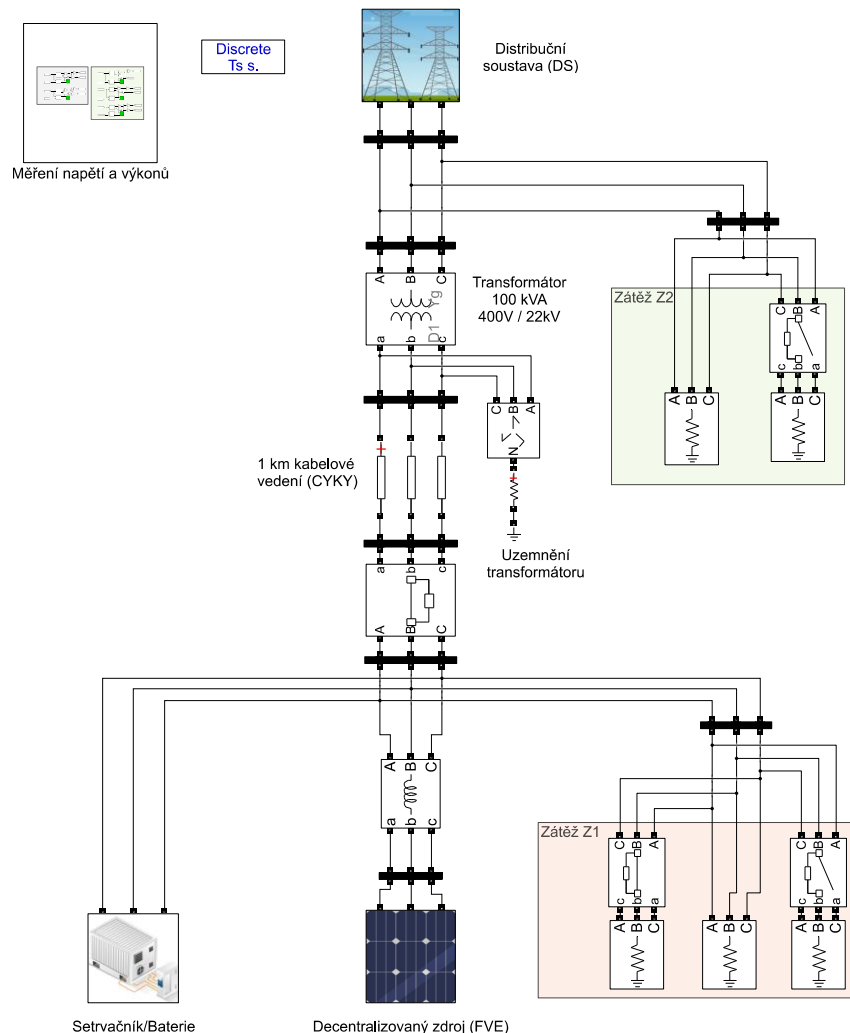


Obr. 18 Naměřené průběhy frekvence v síti a výkonu baterie

V grafu je patrné, že při zvýšení frekvence, které nastalo např. ve 12 hodin, nabýval činný výkon baterie záporných hodnot, a byl tedy ze sítě odebírán a baterie se dobýjela. Naopak při poklesu frekvence (zde je dobře vidět např. mezi 17. a 18. hodinou), narostl činný výkon baterie do kladných hodnot, a tím probíhala dodávka do sítě. Je také zřejmé, že při větších výkyvech frekvence byla i změna hodnoty výkonu výraznější. Tato naměřená data potvrzují vhodnost využití bateriového úložiště k poskytování regulačního výkonu pro udržení frekvenční stability v síti.

5 Návrh modelu části ES se setrvačnickem a baterií

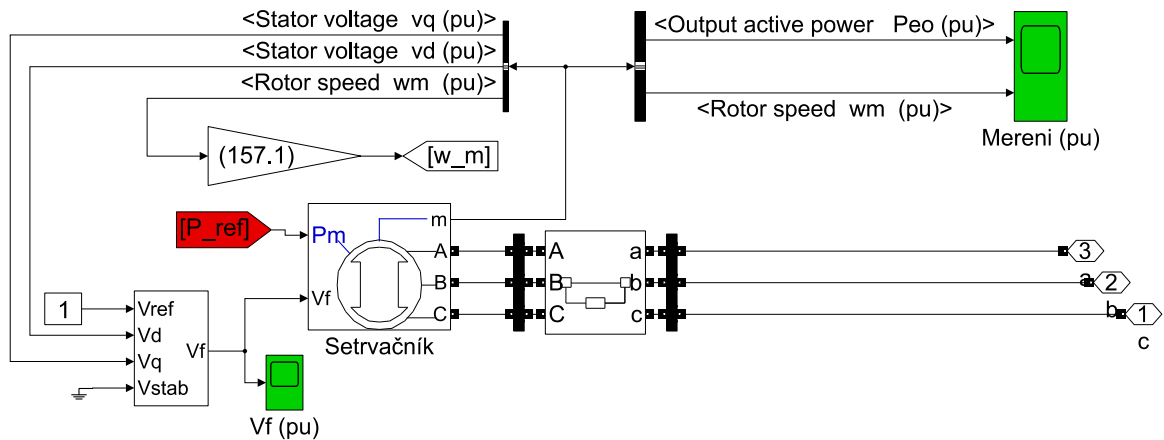
Hlavním přínosem této práce je návrh regulátoru setrvačnicku, který je popsán níže v této kapitole. Pro analýzu dané problematiky byl v rámci této diplomové práce navržen a vytvořen model sítě nízkého napětí v prostředí MATLAB Simulink, viz Obr. 19. Tato část sítě je připojena do distribuční soustavy 22 kV a obsahuje akumulční zařízení (setrvačnickové nebo bateriové úložiště), decentralizovaný zdroj s proměnnou dodávkou reprezentovaný FVE a několik odběrů, které jsou znázorněny jako konstantní zátěž. Různé provozní stavy byly prováděny pomocí proměnlivé zátěže, jež byla realizována jako konstantní zátěž připojená přes vypínač, který byl v určitý čas buď sepnut, nebo rozepnut. Dále byla simulována reakce na změnu výkonu dodávaného decentralizovaným zdrojem.



Obr. 19 Model sítě

5.1 Model ES se setrvačnickem

Model setrvačnicku je na obrázku Obr. 20.

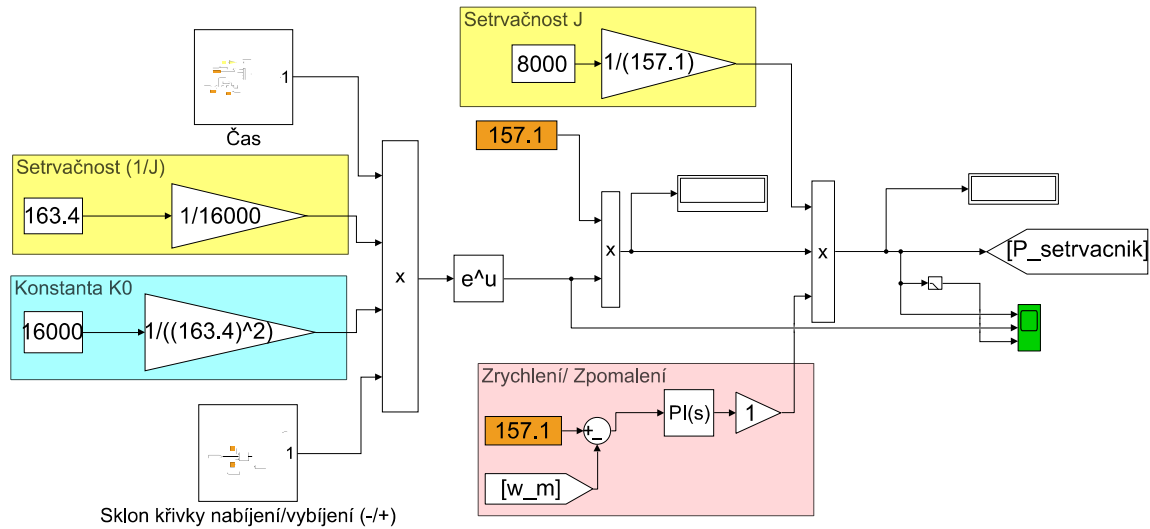


Obr. 20 Model setrvačnicku

Setrvačnick je modelován jako synchronní stroj s regulovatelným výstupním výkonem umístěný přímo do sítě. Jmenovitý výkon stroje je 8 kW a jmenovité otáčky 1 500 ot/min, jež odpovídají úhlové rychlosti 157,08 rad/s. Maximální dosažitelný výkon setrvačnicku je 16 kW, pásmo povolených otáček je vymezeno hodnotami $\omega_{min} = 150,8$ rad/s (1 440 ot/min) a $\omega_{max} = 163,36$ rad/s (1 560 ot/min). U setrvačnicku je fyzikálně pevně daná hodnota setrvačnosti $J = 97,92$ kg·m² a konstanty $K_0 = 0,599$. Požadovaný výkon je zadáván pomocí samostatného bloku řízení, který se skládá ze dvou částí. První část má na starosti výpočet velikosti potřebného výkonu, druhá část řídí samotnou dodávku výkonu. Na základě řízení setrvačnick podle potřeby dodává nebo odebírá výkon ze sítě.

5.1.1 Výpočet potřebného výkonu

Zjednodušené schéma navrženého regulátoru setrvačnicku je prezentováno na Obr. 21. Blok výpočtu potřebného výkonu je společně s regulátorem dodávky činného výkonu do elektrizační soustavy nejdůležitější částí celého zde navrženého modelu, protože zajišťují správnou funkci setrvačnicku tak, aby jeho reakce na různé odchylky v síti odpovídala fyzikálním principům. A také zároveň, aby setrvačnick dokázal poskytovat výkon přesně podle potřeby soustavy a splnil tak svůj účel, za kterým je do sítě instalován.



Obr. 21 Schéma bloku zajišťujícího výpočet potřebného výkonu setrvačnicku

Základní funkce bloku vychází z následující rovnice odvozené ze základních rovnic setrvačnicku (4.1 až 4.5) při zanedbání ztrát:

$$P = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega_{max} \cdot e^{-\frac{K_0}{J} \cdot t} \quad (5.1)$$

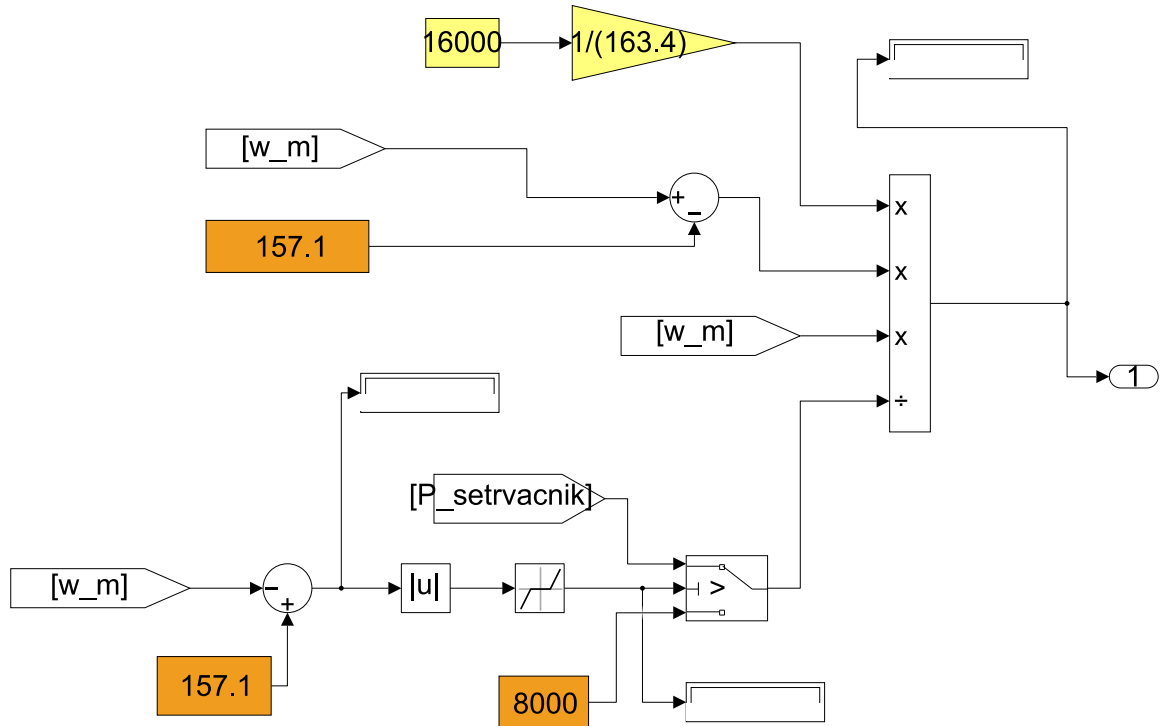
Hodnoty J , ω_{max} a K_0 jsou společně se jmenovitými otáčkami ω_n zadávány jako konstanty, protože jsou dané konstrukcí konkrétního setrvačnicku a tedy neměnné. Setrvačnost lze vyjádřit pomocí úhlové rychlosti a výkonu následovně:

$$J = \frac{P_{max}}{\omega_{max}} \quad (5.2)$$

a konstantu K_0 taktéž pomocí stejných veličin jako:

$$K_0 = \frac{P_{max}}{\omega_{max}^2} \quad (5.3)$$

Vliv času je zohledněn blokem na Obr. 22 a jeho výpočet je založen na statických charakteristikách vytvořených jako ekvivalent k charakteristikám blokových zdrojů, zde se však jedná o závislost úhlové rychlosti a času, nikoliv frekvence a výkonu.



Obr. 22 Blok výpočtu času

Potřebný čas k dosažení otáček se určí ze znalosti pohybové rovnice setrvačnicku ve tvaru:

$$M = J \cdot \varepsilon = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = J \cdot \frac{\omega_2 - \omega_1}{t} \quad (5.4)$$

Vyjádřením času a aplikací rovnice 5.2 a následující závislosti:

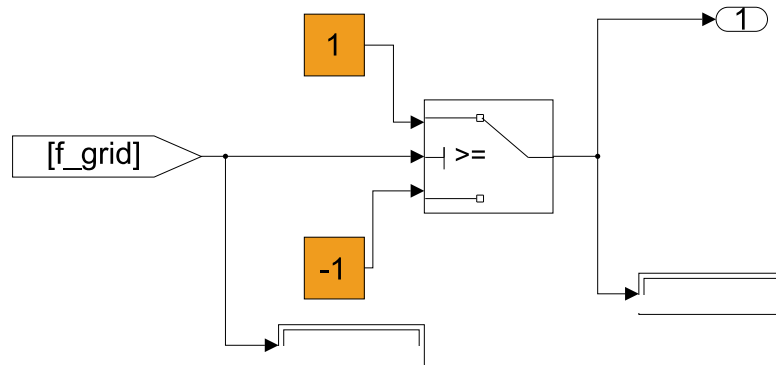
$$M = \frac{P}{\omega} \quad (5.5)$$

vznikne výsledná rovnice popisující funkci bloku času:

$$t = \frac{P_{max}}{\omega_{max}} \cdot \frac{\omega_{max} - \omega_m}{P_{setrvacnik}} \cdot \omega_m \quad (5.6)$$

kde ω_m (rad/s) je měřená (aktuální) úhlová rychlost a $P_{setrvacnik}$ (W) je aktuální výkon setrvačniku.

Dalším důležitým blokem je určování sklonu křivky nabíjení/vybíjení. Ten je znázorněn na Obr. 23 a jedná se o jednoduchý rozhodovací člen, který porovnává frekvenci sítě se jmenovitou frekvencí a nastavuje správnou polaritu.

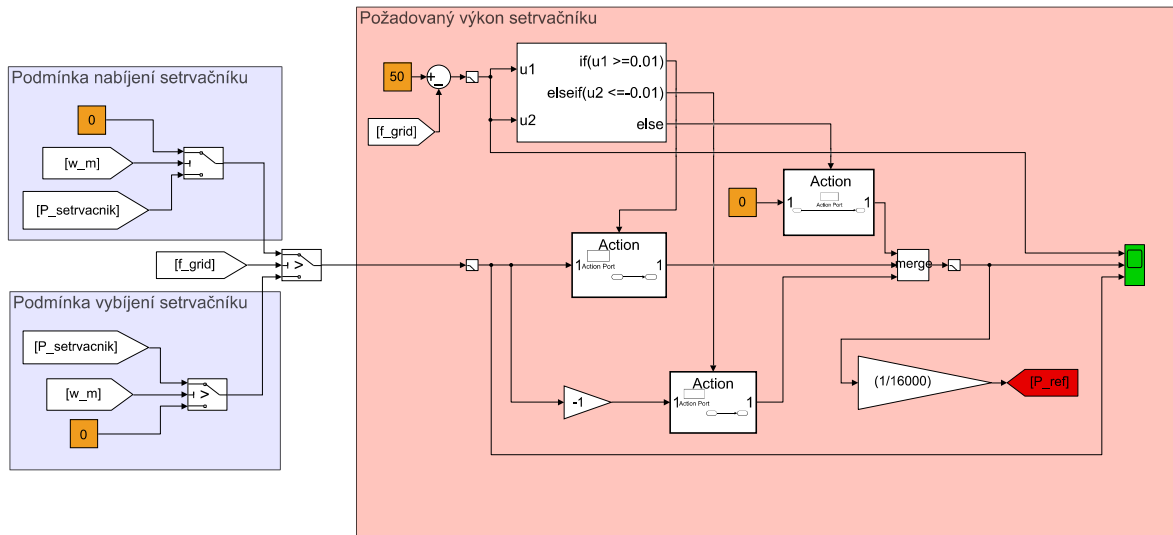


Obr. 23 Blok nastavení sklonu křivky nabíjení/vybíjení

Člen derivace, jež zohledňuje změnu otáček, je reprezentován PI regulátorem. Jeho úkolem je regulovat otáčky a tím ovládat zrychlení nebo zpomalení setrvačniku. Na konstantách regulátoru závisí rychlost reakce setrvačniku, pokud by tedy byl příliš rychlý nebo pomalý, dala by se jeho odezva částečně pozměnit právě jejich velikostí.

5.1.2 Rozhodování o dodávce

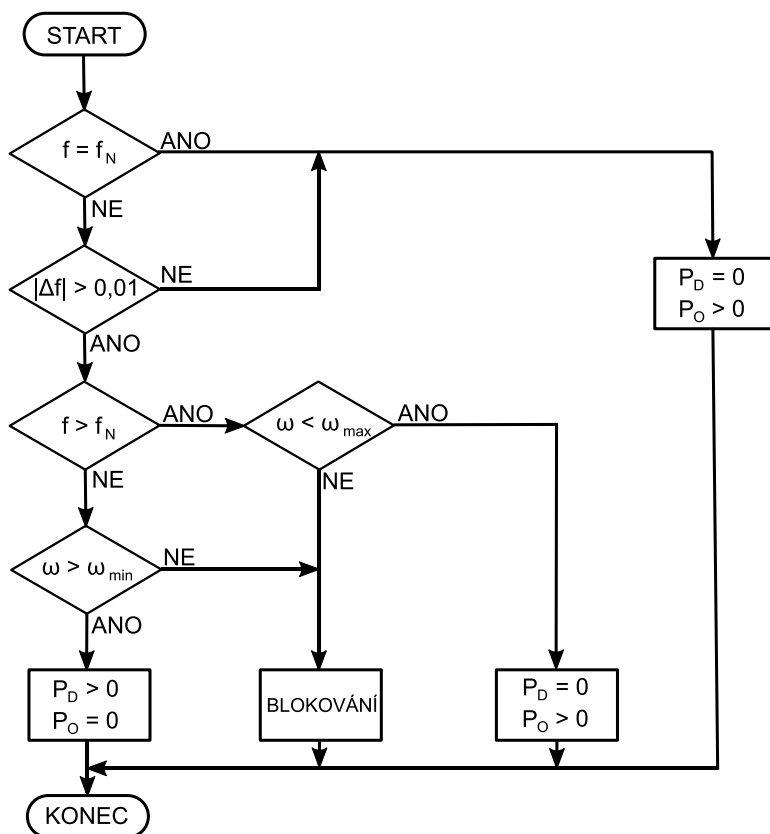
Druhá část řízení (Obr. 24) slouží k rozhodování, kdy má být výkon do sítě dodáván, kdy odebírán a kdy má být dodáváný/odebíraný výkon nulový.



Obr. 24 Blok regulace dodávky výkonu

Základem pro tento blok je několik rozhodovacích členů, které porovnávají aktuální měřenou frekvenci v síti se jmenovitou frekvencí. Činnost bloku je popsána vývojovým diagramem na Obr. 25.

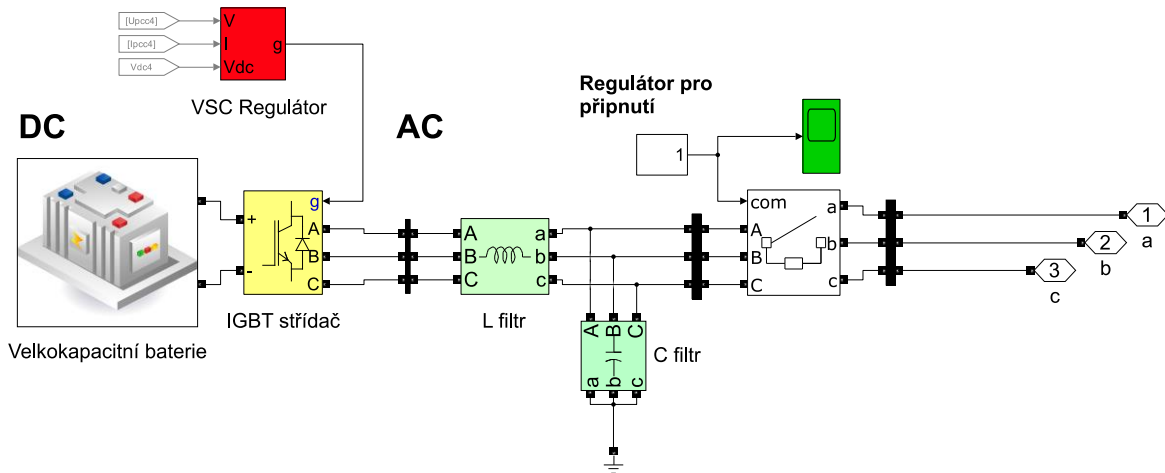
Pokud odchylka přesáhne pásmo necitlivosti, které je nastaveno na $\Delta f = \pm 0,01$ Hz, regulátor zjistí, jestli je odchylka kladná nebo záporná. Pokud je kladná (v síti je přebytek výkonu), setrvačnik výkon ze sítě odebírá, pokud je naopak odchylka záporná, což značí nedostatek výkonu v síti, setrvačnik výkon dodává. Vybíjení a nabíjení setrvačniku je rozděleno do dvou samostatných větví. V nich jsou porovnávány aktuální otáčky setrvačniku s maximální nebo minimální hodnotou, a tím je ošetřeno blokování setrvačniku tak, aby jeho rychlost nevybočila z mezí daných minimálními a maximálními otáčkami. Pokud tedy pracuje na maximální otáčce, už se dále nemůže nabíjet, naopak při minimálních otáčkách není možné další vybíjení.



Obr. 25 Vývojový diagram dodávky výkonu

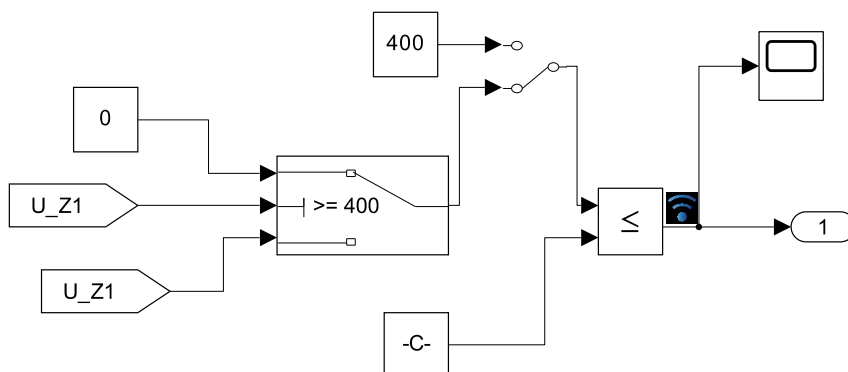
5.2 Model ES s velkokapacitní baterií

Model sítě zobrazený je stejný jako v předchozím případě, pouze setrvačnick je nahrazen velkokapacitní baterií (Obr. 26).



Obr. 26 Model baterie

Protože baterie je v této práci použita pouze pro porovnání a netvoří hlavní náplň, byl její model s drobnými úpravami převzat z jiné diplomové práce [64]. Její řízení (Obr. 27) je o něco jednodušší než u setrvačnicku, protože se neřídí dodávaný výkon, ale připnutí baterie k síti přes vypínač. Baterie pak vždy dodává svůj plný výkon (proud), mění se pouze doba, po kterou dodávka probíhá.



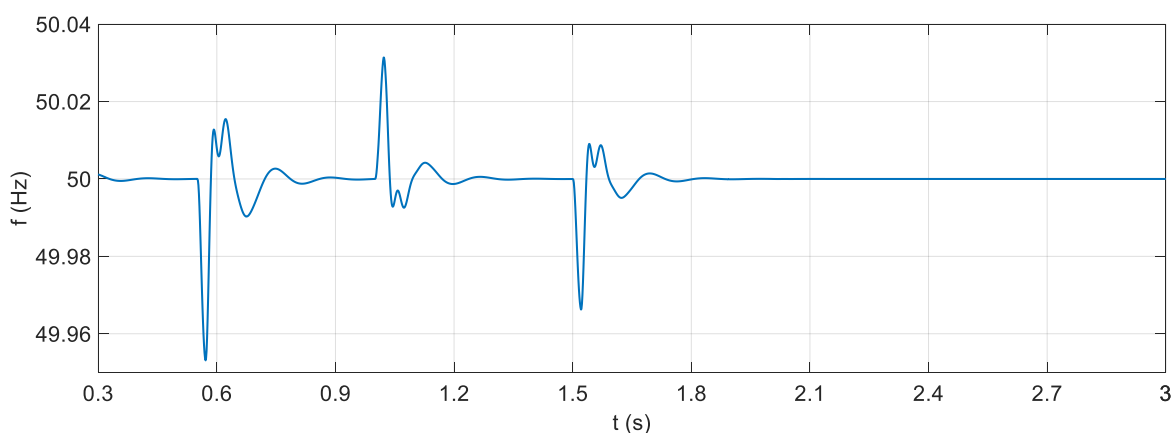
Obr. 27 Regulátor připnutí baterie

6 Analýza výsledků simulací provozu modelu ES

6.1 Model ES se setrvačником

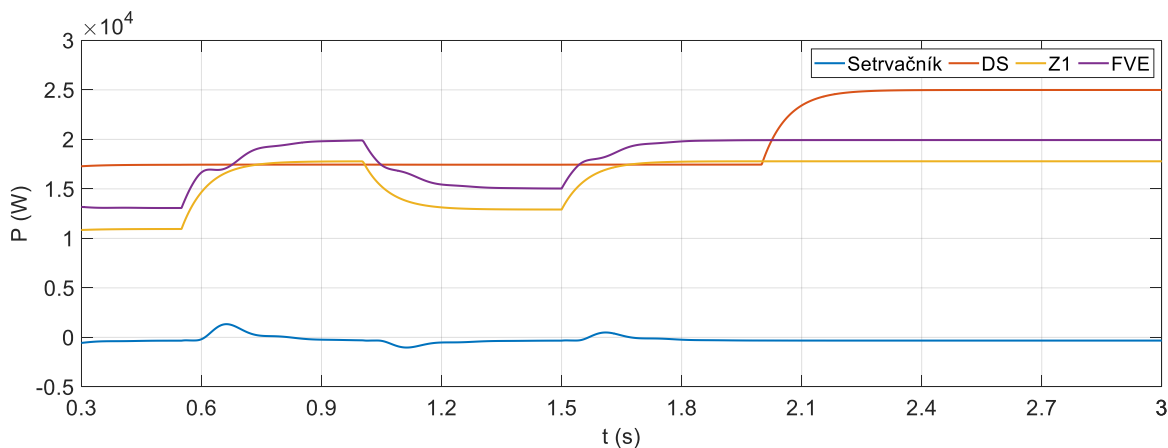
6.1.1 Změna zatížení

V ustáleném stavu na začátku byla velikost připojené zátěže $Z1 = 11$ kW a $Z2 = 15$ kW. První změna nastala v čase $t = 0,55$ s, když došlo ke zvýšení zátěže $Z1$ o 7 kW na celkovou hodnotu 18 kW. Na grafu Obr. 28 je vidět, že zvýšení zatížení způsobilo pokles frekvence v síti.



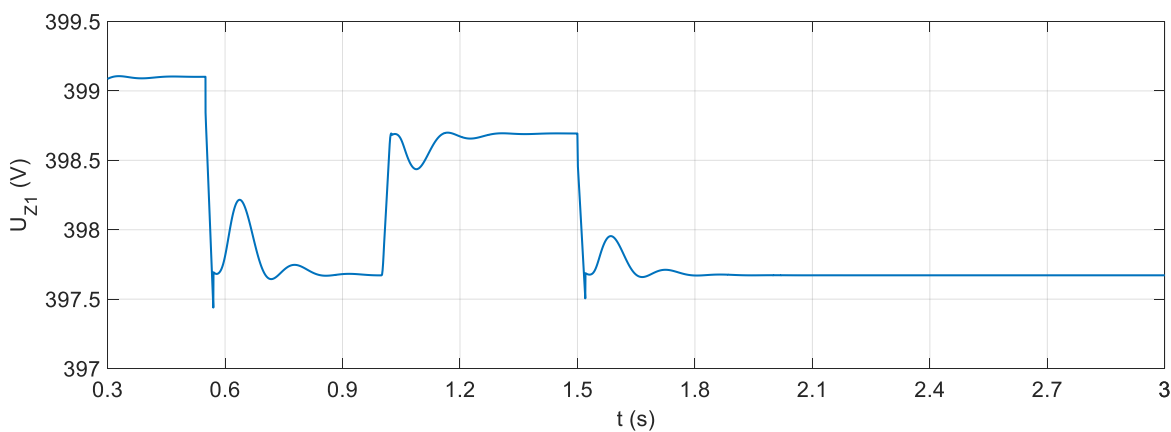
Obr. 28 Průběh frekvence v síti při změně zátěže

Graf výkonů (Obr. 29) ukazuje, že na tento pokles zareagoval regulátor setrvačnicku požadavkem na zvýšení dodávaného výkonu a setrvačnick se následně na základě tohoto požadavku začal vybíjet (modrý průběh). Pro udržení výkonové bilance přispěl zvýšeným výkonem také decentralizovaný zdroj (fialový průběh), který převzal regulaci od setrvačnicku a ten následně svůj výkon opět začal snižovat. Distribuční soustava (červený průběh) se regulace nezúčastnila. Pro porovnání je uveden i průběh výkonu zátěže (žlutý průběh).

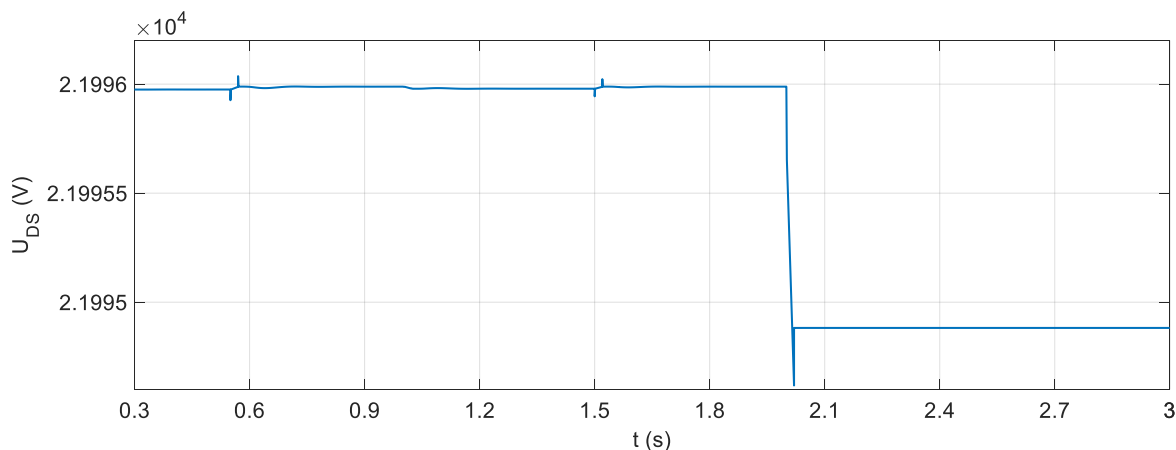


Obr. 29 Průběh výkonů setrvačnicku, FVE, DS a Z1 při změně zátěže

Napětí na zátěži Z1 (Obr. 30) a napětí distribuční sítě (Obr. 31) zůstaly po celou dobu téměř konstantní. Na obrázku se sice jeví skoky poměrně velké, při bližším pohledu je však vidět, že odchylka napětí Z1 byla méně než 2 V, což činí cca 0,5 %, u distribuční sítě byl rozdíl v absolutní i procentní hodnotě ještě menší (1,5 V je přibližně 0,007 % z 22 kV).



Obr. 30 Průběh napětí na Z1 při změně zátěže

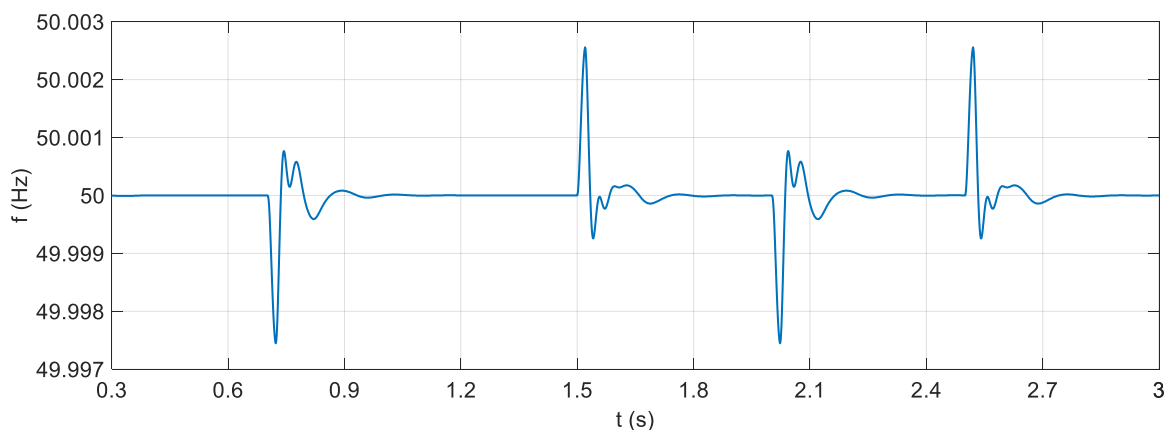


Obr. 31 Průběh napětí DS při změně zátěže

V čase $t = 1$ s došlo ke snížení zátěže Z1 o 5 kW. Frekvence v síti tím vzrostla nad jmenovitou hodnotu a regulátor setrvačnicku zadal pokyn ke snížení výkonu, což způsobilo, že se setrvačnick začal nabíjet. Zároveň svůj výkon snížila i fotovoltaická elektrárna a při dosažení určité hodnoty přestal setrvačnick dorovnávat bilanci podporovat. Zátěž v čase $t = 1,5$ s opět vzrostla o 5 kW a způsobila tím pokles frekvence, tentokrát menší než v čase $t = 0,55$ s. Odpověď setrvačnicku i FVE byly stejné, jako v prvním případě, akorát výkony nedosahovaly takových hodnot (vykřývaly o 2 kW menší skok zatížení). Poslední změna nastala na zátěži Z2 na straně distribuční soustavy, jež v čase $t = 2$ s zvýšila svou velikost o 8 kW. V tomto případě je patrné, že změna se na straně nízkého napětí, kde je připojen setrvačnick a FVE, vůbec neprojevila a výkonová bilance byla dorovnána především distribuční soustavou. To je způsobeno tím, že oba zdroje jsou od zátěže Z2 ve větší elektrické vzdálenosti (dané impedancí sítě) než distribuční soustava.

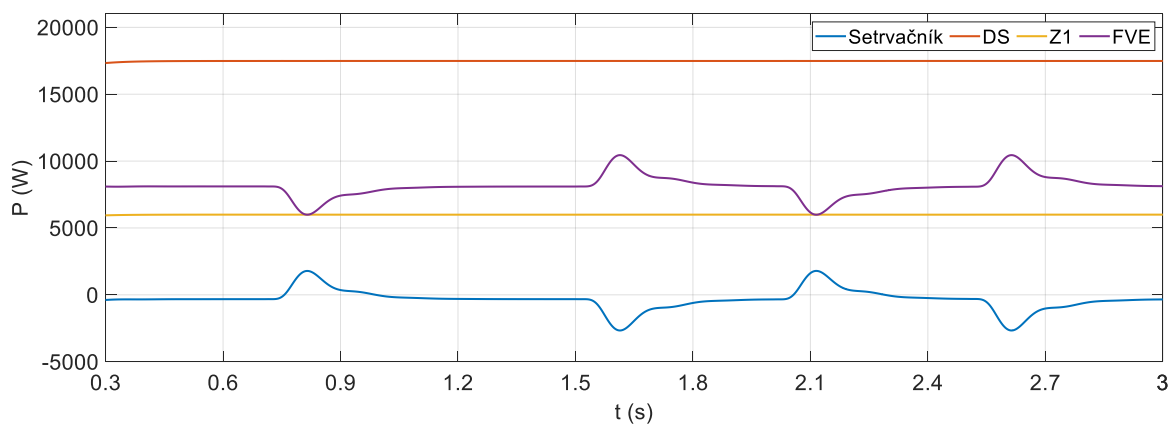
6.1.2 Změna výkonu FVE

Výkon decentralizovaného zdroje začínal na hodnotě 8 kW a zátěže Z1 = 6 kW a Z2 = 15 kW byly během celé simulace neměnné. První skok v dodávce výkonu byl v čase $t = 0,7$ s, kdy výkon FVE poklesl o 2 kW. V důsledku toho poklesla i frekvence v síti, jak je vidět na Obr. 32.



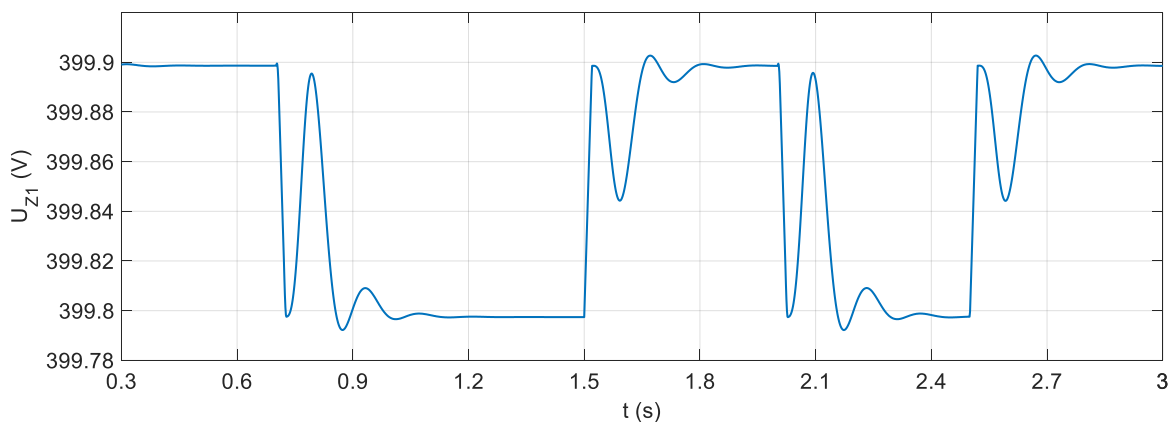
Obr. 32 Průběh frekvence v síti při změně výkonu FVE

Z grafu výkonů na Obr. 33 je zřejmé, že setrvačnická kapacita na odchytku frekvence odpověděl dodáním výkonu do sítě (modrý průběh) a po chvíli se zvýšením výkonu přidala i fotovoltaická elektrárna (fialový průběh). K vyrovnání výkonové bilance tím došlo za poměrně krátkou dobu. Výkony zátěže Z1 (žlutý průběh) a distribuční sítě (červený průběh) se za celou dobu nezměnily.

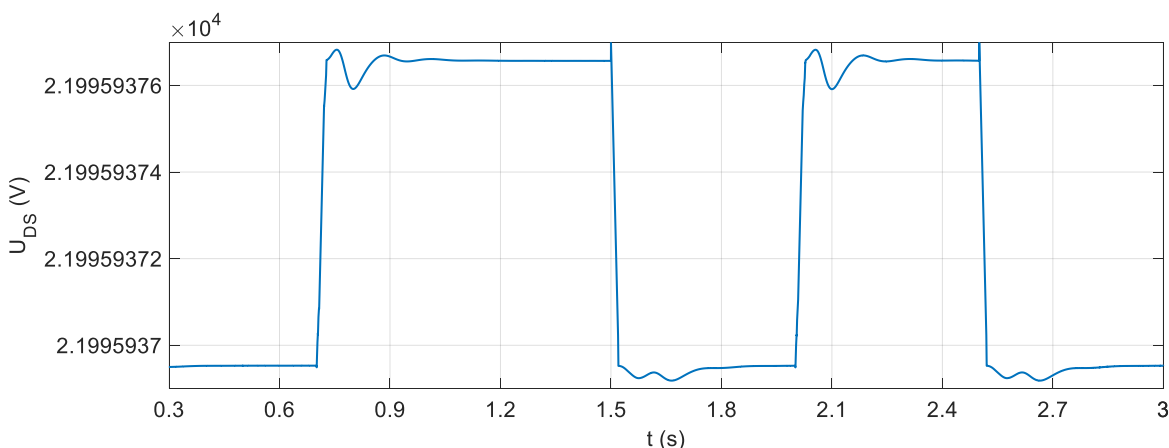


Obr. 33 Průběh výkonů setrvačnicku, FVE, DS a Z1 při změně výkonu FVE

Obr. 34 ukazuje napětí na zátěži Z1, které se drželo přibližně na stejné hodnotě, stejně jako napětí distribuční sítě na Obr. 35.



Obr. 34 Průběh napětí na Z1 při změně výkonu FVE



Obr. 35 Průběh napětí DS při změně výkonu FVE

V čase $t = 1,5$ naopak FVE svou dodávku zvedla o 2 kW a vyvolala kladnou odchylku frekvence. K dorovnání výkonové bilance zapůsobil setrvačnick odebráním výkonu ze sítě a decentralizovaný zdroj postupným snižováním svého výkonu. Výkony Z1 a DS i napětí Z1 a DS jsou pořád stejné. Další změna vznikla v čase $t = 2$ s a bylo jí opětovné snížení výkonu FVE, tentokrát o 6 kW. Děj probíhal podobně, jako změna v čase 0,7 s – pro ustálení frekvence na jmenovité hodnotě musel setrvačnick začít vybíjet a FVE zvednout svůj výkon. K další změně došlo ještě v čase $t = 2,5$ s, když dodávaný výkon

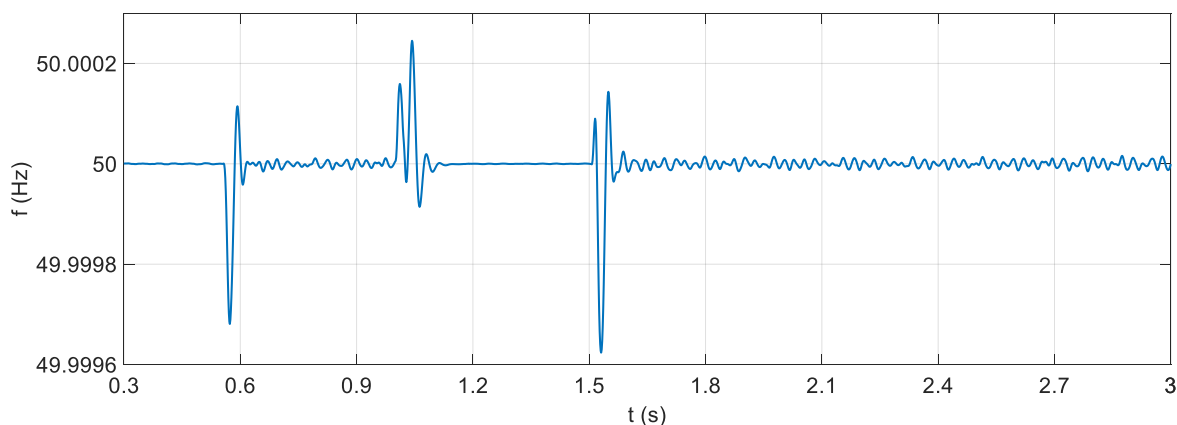
decentralizovaného zdroje vzrostl o 6 kW. Obdobně, jako v čase 1,5 s, způsobil nárůst výkonu zvýšení frekvence a setrvačnick zareagoval tím, že se začal nabíjet, a FVE svůj výkon postupně snižovala.

6.2 Model ES s velkokapacitní baterií

Simulace sítě s připojenou baterií byly prováděny podobně jako simulace se setrvačnickem, aby bylo možné je na závěr mezi sebou porovnat

6.2.1 Změna zatížení

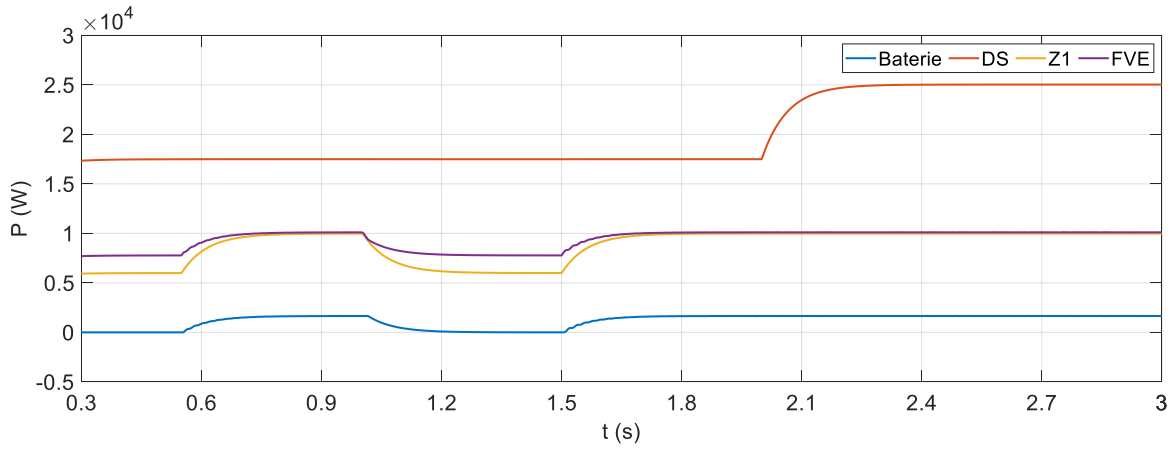
Počáteční hodnoty zátěží byly $Z1 = 6$ kW a $Z2 = 15$ kW. V čase $t = 0,55$ s se zvýšila zátěž $Z1$ o 4 kW a tím nastal pokles frekvence, který je vidět na Obr. 36.



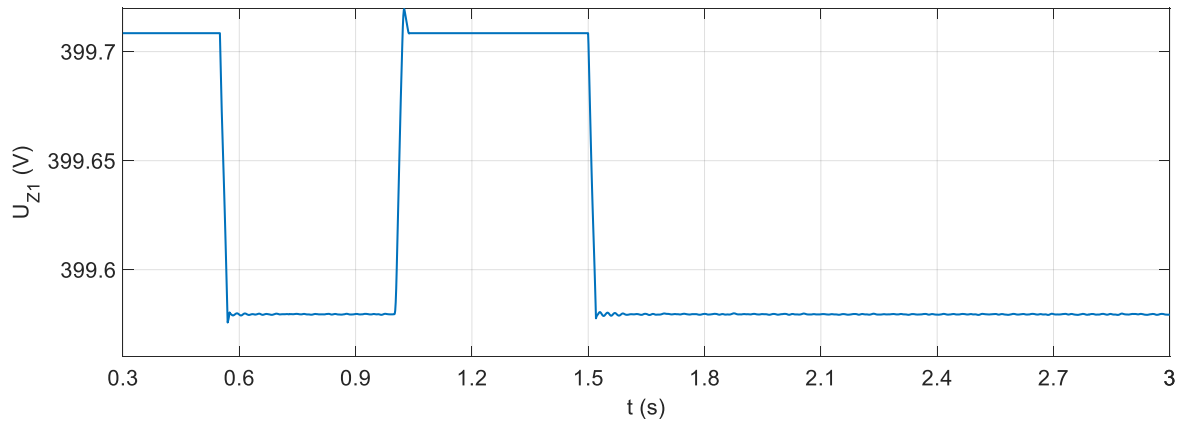
Obr. 36 Průběh frekvence v síti při změně zátěže

Na Obr. 37 je průběh jednotlivých výkonů během simulace. Je zřejmé, že v reakci na pokles frekvence začala baterie dodávat výkon do sítě (modrý průběh) a fotovoltaická elektrárna zvedla svůj dodávaný výkon (fialový průběh). Distribuční síť příslušnou změnu vůbec nezaznamenala (červený průběh). Žlutý průběh pro informaci zobrazuje změny výkonu zátěže $Z1$.

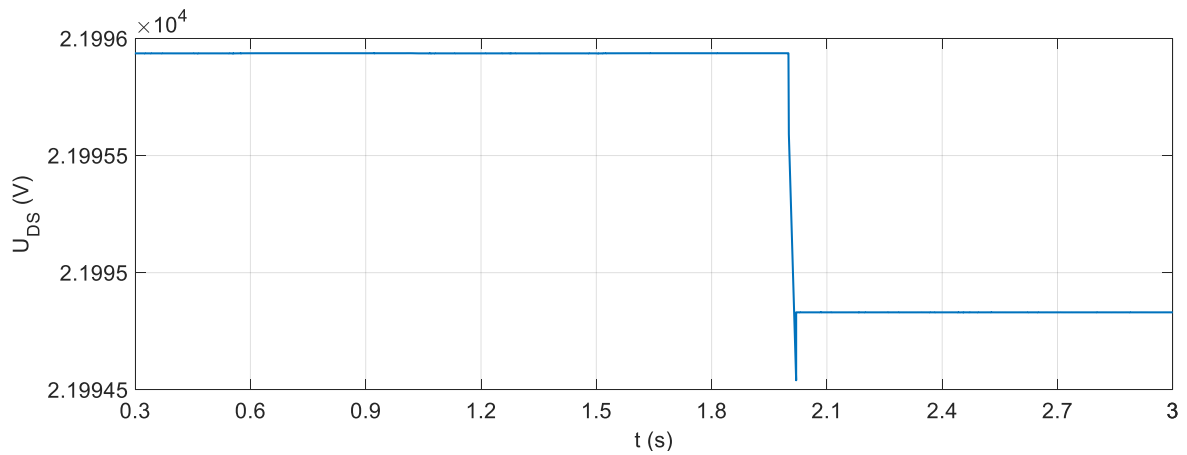
Na napětí zátěže $Z1$ (Obr. 38) a napětí distribuční sítě (Obr. 39) se změna zatížení nijak neprojevila.



Obr. 37 Průběh výkonů baterie, FVE, DS a Z1 při změně zátěže



Obr. 38 Průběh napětí na Z1 při změně zátěže

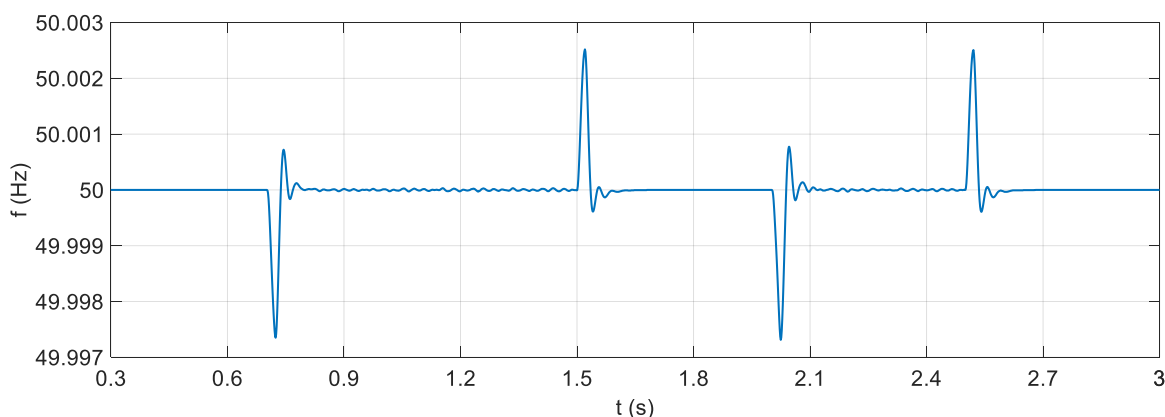


Obr. 39 Průběh napětí DS při změně zátěže

Další změnou bylo v čase $t = 1$ s snížení zatížení o 4 kW, které mělo za následek nárůst frekvence. Decentralizovaný zdroj snížil svůj výkon a baterie přešla do režimu vybíjení, který se při opětovném zvýšení zatížení v čase $t = 1,5$ s změnil naopak na režim nabíjení. Fotovoltaická elektrárna svůj výkon odpovídajícím způsobem také zvýšila. Konečný skok nastal v čase $t = 2$ s, v tomto případě šlo o zvýšení zátěže Z2 o 8 kW. Stejně jako u setrvačnicku byla tato změna kompletně vykryta distribuční sítí a zařízení v síti nízkého napětí ji vůbec nezaznamenala.

6.2.2 Změna výkonu FVE

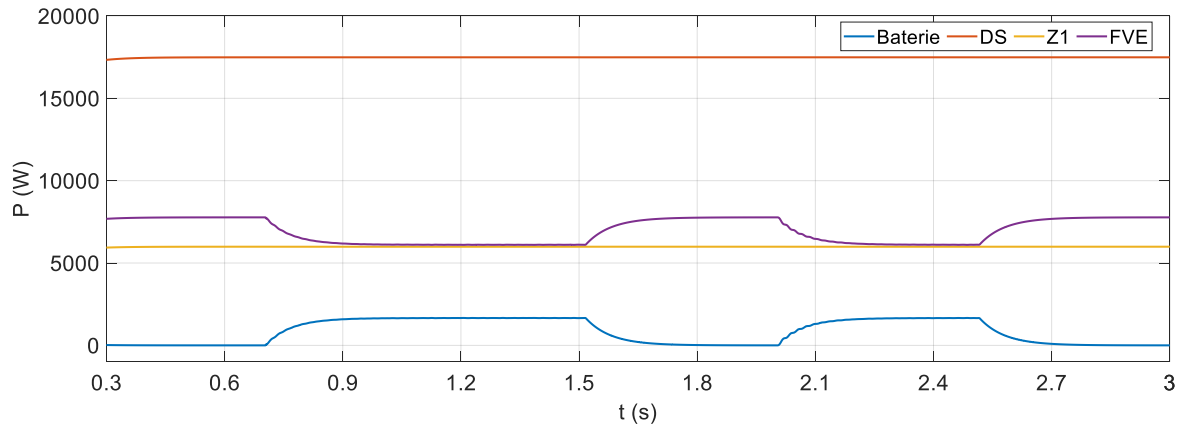
Změny výkonu FVE byly nastaveny identicky jako u setrvačnicku. První změna vznikla v čase $t = 0,7$ s, kdy se snížil dodávaný výkon o 2 kW a tím poklesla i frekvence v síti, jak je patrné na Obr. 40.



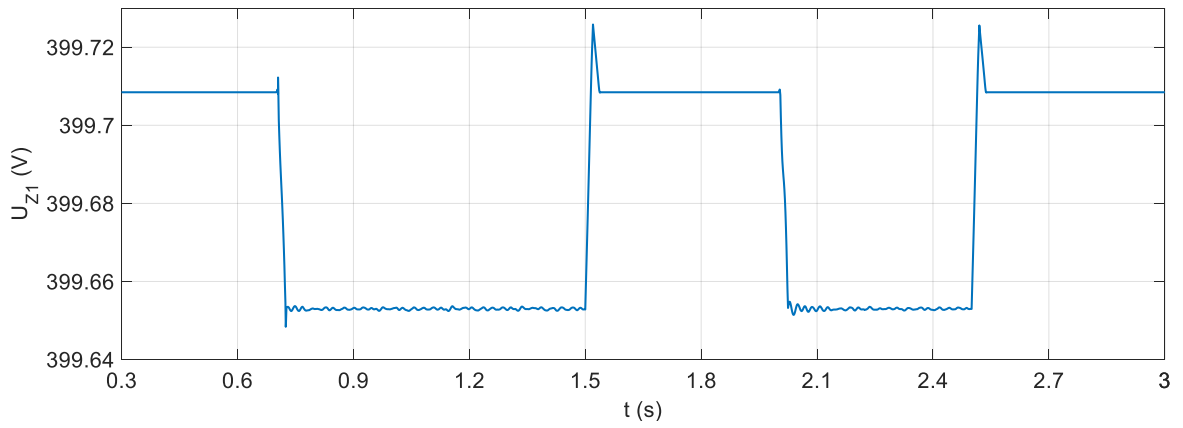
Obr. 40 Průběh frekvence v síti při změně výkonu FVE

Průběhy na Obr. 41 zobrazují výkony jednotlivých prvků sítě. Je vidět, že baterie (modrý průběh) při poklesu frekvence zahájila vybíjení, které pomohlo síti obnovit frekvenci na jmenovitou hodnotu. Výkon zátěže Z1 (žlutý průběh) a výkon distribuční sítě (červený průběh) svou hodnotu po celou dobu nezměnily. Fialový průběh ukazuje nastavené změny výkonu FVE

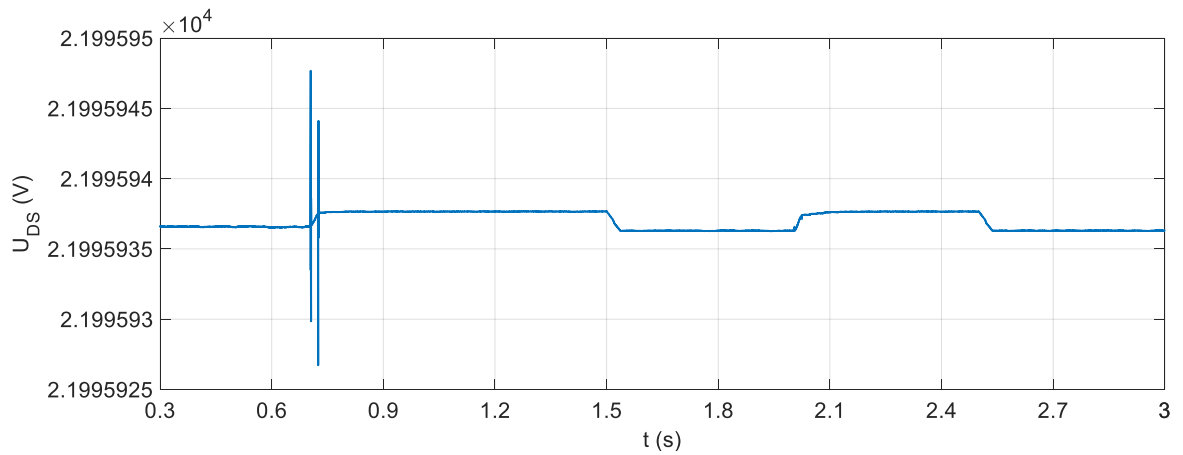
Výrazná odchylka nenastala ani v případě napětí na Z1 (Obr. 42) a napětí distribuční sítě (Obr. 43).



Obr. 41 Průběh výkonů baterie, FVE, DS a Z1 při změně výkonu FVE



Obr. 42 Průběh napětí na Z1 při změně výkonu FVE

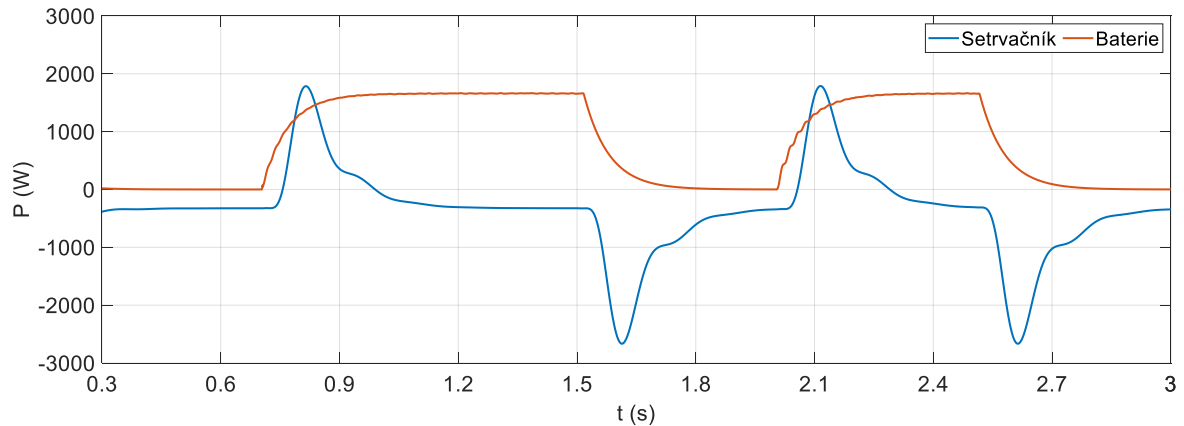


Obr. 43 Průběh napětí DS při změně výkonu FVE

V čase $t = 1,5$ s vzrostl výkon FVE o 2 kW, což zapříčinilo zvýšení frekvence. Na to zareagovala baterie odebráním výkonu ze sítě. Změna v čase $t = 2$ s (pokles výkonu o 6 kW) odpovídá průběhem změně v čase 0,7 s, stejně tak i poslední změna v čase $t = 2,5$ s (nárůst o 6 kW) má obdobný průběh jako děj v čase 1,5 s.

7 Porovnání vhodnosti použití setrvačnicků a baterií pro řízení ES

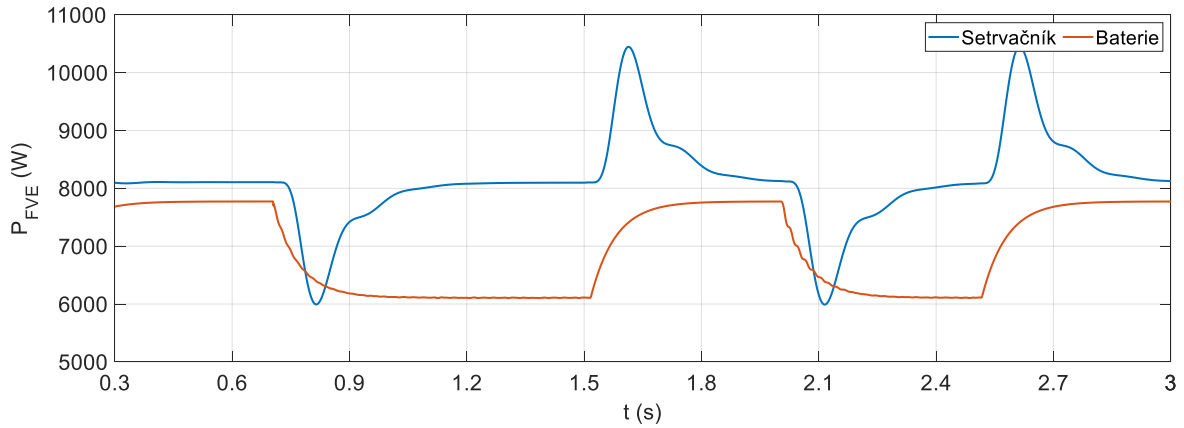
Pro porovnání byla zvolena simulace změny výkonu decentralizovaného zdroje popsána v předchozí kapitole. Na Obr. 44 jsou průběhy výkonu setrvačnicku (modrý průběh) a baterie (červený průběh) během jednotlivých změn dodávaného výkonu.



Obr. 44 Průběh výkonů setrvačnicku a baterie při změně výkonu FVE

Je vidět, že setrvačnick zpočátku dodá nebo odebere větší výkon než baterie a výrazněji přispěje k setrvačnosti sítě, ale velice rychle tento výkon klesá zpět k nule. To je způsobeno tím, že zareagují ostatní zdroje připojené do sítě a regulaci od setrvačnicku převezmou. Baterie na druhou stranu dodává výkon o menší velikosti, ale udržuje jej po delší dobu a snižuje tím požadavek na výkon dodaný ostatními zdroji. Obrázek také ukazuje, že baterie zareaguje o něco rychleji než setrvačnick, jeho rychlost by se však případně dala zvýšit upravením konstanty PI regulátoru v jeho řídicím obvodu.

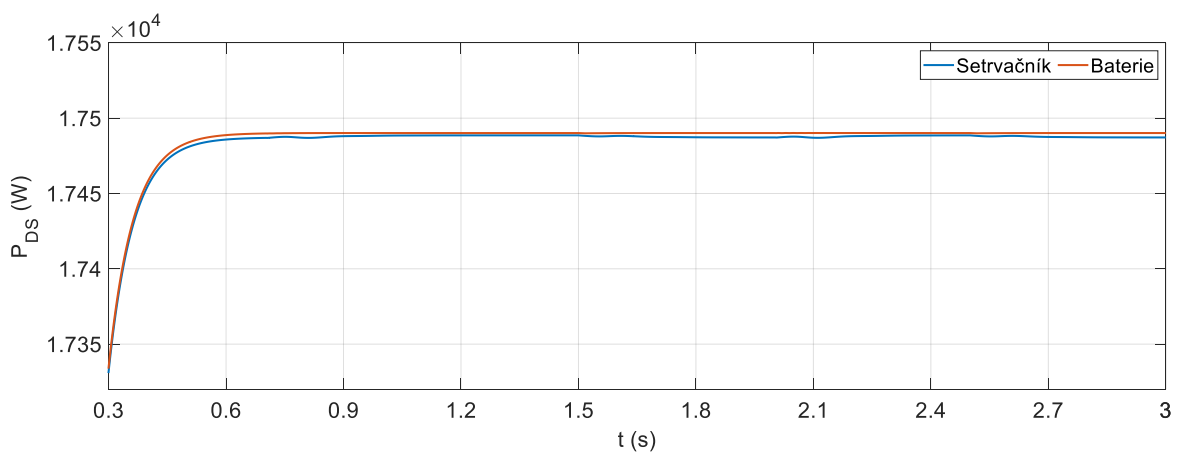
Na dalším grafu (Obr. 45) je ukázán výkon dodávaný decentralizovaným zdrojem v síti se setrvačnickem (modrý průběh) a v síti s velkokapacitní baterií (červený průběh).



Obr. 45 Průběh výkonu FVE v síti se setrvačnickem a baterií

Z průběhů je zřejmé, že v síti se setrvačnickem je změna výkonu FVE vždy pouze krátkodobá a zdroj se po určité chvíli připojí k setrvačnicku, aby dorovnal výkonovou bilanci. V případě sítě s baterií se výkon FVE po počátečním skoku dále nemění a celou regulaci zajišťuje baterie kontinuální dodávkou nebo odběrem výkonu. Porovnání s výkony setrvačnicku a baterie na předešlém grafu ukazuje, že výkon FVE zrcadlí jejich průběh, akorát při poklesu vzroste a naopak.

Důležitým ukazatelem pro posouzení vhodnosti předkládaných řešení je také výkon distribuční sítě zobrazený na Obr. 46.



Obr. 46 Průběh výkonu DS s připojeným setrvačnickem a baterií

Výkon zůstal v obou případech po celou dobu konstantní (nárůst výkonu na počátku před dosažením času 0,5 s je důsledkem přechodného děje na začátku simulace, ještě než dojde k ustálení) a to znamená, že soustava vůbec nemusela na změny reagovat. Díky tomu je možné učinit závěr, že setrvačnick i baterie se dají použít k poskytování podpůrných služeb a pomoci ostatním zdrojům s udržení frekvence ve stanovených mezích a tím i výkonové bilance. Setrvačnick dodává krátkodobě větší množství výkonu a je vhodné jej použít k překlenutí prodlevy, než dojde ke spuštění primární regulace zdrojů připojených v síti. V závislosti na konkrétních parametrech zařízení by však byl schopen dodávat i po delší dobu. Baterie na druhou stranu může být použita spíše k ulehčení ostatním zdrojům, které by nemusely dodávat tolik výkonu a díky tomu by mohly dosáhnout vyrovnání frekvence plynuleji za kratší dobu a snáz by se jim následně obnovovala výkonová rezerva pro regulaci.

Zhodnocení a závěr

Elektrizační soustava musí být schopna udržet své ukazatele kvality, kterými jsou frekvence a napětí, v předepsaných mezích a to nejen při běžném provozu, ale i během poruchy, kterou může být např. výpadek zdroje, nebo změna zatížení. K tomu je potřeba, aby měla co největší frekvenční a napěťovou stabilitu, která jí umožní odolávat všem možným provozním stavům a za každou cenu udržet výkonovou bilanci. Stabilitu sítě ovlivňuje i její přirozená setrvačnost, jež je zajišťována především synchronními generátory. Neustálý rozvoj instalace obnovitelných zdrojů energie a plánované odstavení tepelných elektráren bude mít za následek pokles přirozené setrvačnosti, a z toho důvodu se jeví jako vhodné řešení umělé zvýšení setrvačnosti instalací setrvačnicků, které v tomto ohledu fungují jako synchronní generátory (setrvačnost je zajištěna rotující masou). Cílem této práce bylo navrhnout model sítě, jež by ověřil možnost použití setrvačnicků jako podpůrného prostředku pro řízení sítě. Součástí tohoto návrhu bylo vymyslet vhodné řízení tak, aby setrvačnick reagovал správně na všechny možné nesoulady v síti. Pro porovnání byla zkoumána i stejná síť s připojeným bateriovým úložištěm, které by mohlo být určitou alternativou k předkládanému řešení se setrvačnickem.

Výsledky provedených simulací potvrdily, že setrvačnický se dají použít k poskytování podpůrných služeb a podpoření stability soustavy tím, že přispějí svou setrvačností k přirozené setrvačnosti sítě. Ta je důležitá především v počátcích přechodného děje před tím, než zareagují regulátory primární regulace a dopomáhá k udržení výkonové bilance.

Jako další možné řešení se ukázaly i velkokapacitní baterie, které jsou již na několika místech v ČR testovány (příkladem může být bateriové úložiště v elektrárně Tušimice II). Na rozdíl od setrvačnicků neslouží pouze k vykrytí počátečních okamžiků změn v síti, ale jsou schopné dodávat výkon delší dobu a pomoci zdrojům poskytujícím primární regulaci. Ty pak mohou dodávat menší výkon, než by dodávaly bez použití baterie, a zachovat si tak větší výkonovou rezervu pro případné další změny, které by mohly nastat. V obou případech se změny na nízkém napětí nijak neprojeví v nadřazené soustavě, která při nich nemusela vůbec reagovat, ani neovlivnily odběratele reprezentované zátěžemi Z1 a Z2, což je potvrzené téměř konstantními průběhy napětí.

Analýza byla realizována v síti nízkého napětí připojené do distribuční soustavy 22 kV, stejně by ale řešení fungovalo i v sítích vysokého nebo velmi vysokého napětí, pouze

by musely být odpovídajícím způsobem upraveny parametry setrvačnicku (napětí, výkon, otáčky atd.).

Jako další postup by bylo vhodné vytvořit reálný model části elektrizační soustavy České republiky s umístěným setrvačnickem a ověřit funkčnost návrhu ve skutečných podmínkách. Také by stálo za zvážení instalovat fyzické zařízení v blízkosti některé z elektráren a rozběhnout zkušební provoz, jako je to již provedeno v případě bateriových úložišť.

Literatura

- [1] Přenosová soustava. *ČEPS, a.s.* [online]. ©2022 [cit. 25. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/prenosova-soustava>.
- [2] Údaje o PS. *ČEPS, a.s.* [online]. 2021 [cit. 25. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/udaje-o-ps>.
- [3] Popis distribuční soustavy. *EG.D, a.s.* [online]. 2020 [cit. 25. 10. 2022]. Dostupné z: https://www.egd.cz/sites/default/files/2020-08/332_Popis_DS_elektro_2020.pdf.
- [4] Pravidla provozování distribuční soustavy 2022. *ČEZ Distribuce, a.s.* [online]. ©2022 [cit. 25. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/energeticka-legislativa/pravidla-provozovani-ds/pravidla-provozovani-distribucni-soustavy-2022>.
- [5] Technické údaje. *PREdistribuce, a.s.* [online]. ©2022 [cit. 25. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.predistribuce.cz/cs/distribucni-sit/technicke-informace/>.
- [6] Národní energetický mix. *OTE, a.s.* [online]. ©2018 [cit. 13. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/narodni-energeticky-mix>.
- [7] Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ). *ČEPS, a.s.* [online]. 2021 [cit. 14. 10. 2022]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/elektroenergetika/2022/2/Hodnoceni-zdrojove-primerenosti-elektrizacni-soustavy-CR-2021_v2.pdf.
- [8] Hodnocení zdrojové přiměřenosti elektrizační soustavy ČR. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 23. 2. 2022 [cit. 13. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/elektroenergetika/hodnoceni-zdrojove-primerenosti-elektrizacni-soustavy-cr--259620/>.
- [9] BOUŠKA, Jan. Elektřinu na vývoz bude mít jen Francie. *Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů, z.s.* [online]. 29. 7. 2022 [cit. 14. 10. 2022]. Dostupné z: <http://www.spvez.cz/pages/aktuality/akt733.htm>.
- [10] TOMAN, Petr a kol. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8.

- [11] Dispečerské řízení. *ČEPS, a.s.* [online]. 2021 [cit. 26. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/dispecerske-řízení>.
- [12] Roční příprava provozu 2022. *ČEPS, a.s.* [online]. 2021 [cit. 26. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/priprava-provozu>.
- [13] Dispečerské řízení ČEPS (ČEPS Dispatch Control). *ČEPS, a.s.* [online]. © 2020 [cit. 26. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/publikace-ke-stazeni>.
- [14] Hodnocení provozu. *ČEPS, a.s.* [online]. 2021 [cit. 26. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/hodnoceni-provozu>.
- [15] ČERNÁ, Jana. Dispečerské řízení ČEPS. Dostupné z: https://kce.zcu.cz/old_web/files/projekty/enazp/07/IUT/042_Dispecerske_řízení_CEPS_-_P0.doc.
- [16] ENTSO-E Mission Statement. *ENTSO-E* [online]. © 2009–2022 [cit. 15. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.entsoe.eu/about/inside-entsoe/objectives/>.
- [17] Zahraniční spolupráce. *ČEPS, a.s.* [online]. 2021 [cit. 15. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/zahranicni-spoluprace>.
- [18] Power Regions. *ENTSO-E* [online]. ©2009–2022 [cit. 7. 11. 2022]. Dostupné z: <https://www.entsoe.eu/regions/>.
- [19] Kodex PS, část I. *ČEPS, a.s.* [online]. Duben 2020 [cit. 14. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>.
- [20] Systémové služby. *ČEPS, a.s.* [online]. 2021 [cit. 25. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/systemove-sluzby>.
- [21] Podpůrné služby. *ČEPS, a.s.* [online]. 2021 [cit. 25. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/podpurne-sluzby>.
- [22] Kodex PS, část II. *ČEPS, a.s.* [online]. Září 2022 [cit. 25. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>.

- [23] GEUSSOVÁ, Milena. Jak se nedostat do tmy. A když už, tak jak z ní ven?. *Občanská bezpečnostní komise při JEDU* [online]. 23. 6. 2016 [cit. 27. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.obkjedu.cz/zaujalo-nas/jak-se-nedostat-do-tmy-a-kdyz-uz-tak-jak-z-ni-ven/>.
- [24] SOBOL, Vladislav. V případě blackoutu umožní elektrárna Dlouhé stráně black start. *ČEZ, a.s.* [online]. 5. 11. 2019 [cit. 27. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/v-pripade-blackoutu-umozni-elektrarna-dlouhe-strane-black-start-68390>.
- [25] MÁŠLO, Karel a kol. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. 272 s. ISBN 978-80-260-4461-1.
- [26] MÁŠLO, Karel. *Stabilita elektrizační soustavy* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2021 [cit. 20. 9. 2022]. ISBN 978-80-214-5941-0. Dostupné z: <https://dx.doi.org/10.13164/book-feec-stabilitaes>.
- [27] PROKOP, Ondřej. *Analýza provozu uzlu sítě po připojení jaderného bloku velkého výkonu*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Karel KATOVSKÝ.
- [28] ŠROM, Jakub. *Řízení frekvence a výkonové bilance v elektrizační soustavě* [online]. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2009 [cit. 20. 9. 2022]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/12-srom.pdf>.
- [29] SOUKUPOVÁ, Tereza, FANTÍK, Josef. *Elektrina v každém okamžiku*. *Časopis Vesmír* [online]. Vesmír, s.r.o., 2007, vol. 86, no. 12, s. 794-795. ISSN 1214-4029. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2007/cislo-12/elektrina-kazdem-okamziku.html>.
- [30] DAWARE, Kiran. *Methods of Voltage Control In Power System*. *Electrical easy.com* [online]. Duben 2018 [cit. 21. 9. 2022]. Dostupné z: <https://www.enerdynamics.com/Energy-Currents-Blog/How-Electric-Operators-Maintain-Acceptable-Voltage.aspx>.

- [31] HABRYCH, Richard. Automatická sekundární regulace napětí. *Časopis ENERGETIKA*. ČSZE, 2015, vol. 65, no. 5, s. 264-271. ISSN 0375-8842.
- [32] KOUBEK, Michal. Regulace napětí a jalového výkonu v distribučních sítích. Praha, 2019. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Katedra elektroenergetiky. Vedoucí práce Vít KLEIN.
- [33] Hromadné dálkové ovládání (HDO). *ČEZ Distribuce, a.s.* [online]. 2022 [cit. 28. 9. 2022]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/pro-zakazniky/spinani-hdo>.
- [34] Co je HDO a jaké jsou časy spínání. *SPP CZ, a.s.* [online]. 10. 2. 2021 [cit. 28. 9. 2022]. Dostupné z: <https://www.spp.cz/magazin/co-je-hdo-a-jake-jsou-casy-spinani>.
- [35] MAJLING, Eduard. HDO – Smart Grid fungující již půl století. *oenergetice.cz* [online]. 19. 4. 2015 [cit. 29. 9. 2022]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/hdo-smart-grid-fungujici-jiz-pul-stoleti>.
- [36] Kodex PS, část V. *ČEPS, a.s.* [online]. Červenec 2022 [cit. 2. 11. 2022]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>.
- [37] PISTORA, Martin. *Dynamická stabilita a důsledky jejího porušení* [online]. 2014, cit. [21. 9. 2022]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/data-ftp-user/konference/2014/eprob_XI/06-pistora-epb-xi.pdf.
- [38] MÁŠLO, Karel, ŠVEJNAR, Pavel. Stabilita elektrizační soustavy. *Časopis Vesmír*. Vesmír, s.r.o., 2007, vol. 86, no. 1, s. 30-34. ISSN 1214-4029.
- [39] DENHOLM, P., MAI, T., KENYON, R. W., KROPOSKI, B., O'MALLEY, M. *Inertia and the Power Grid: A Guide Without the Spin*.
- [40] Inertia and Rate of Change of Frequency (RoCoF) Version 17. *ENTSO-E* [online]. 16. 12. 2020 [cit. 2. 11. 2022]. Dostupné z: https://eepublicdownloads.azureedge.net/clean-documents/SOC%20documents/Inertia%20and%20RoCoF_v17_clean.pdf.

- [41] POSPÍŠIL, Jaroslav. Dynamická stabilita – kritérium mixu v ČR. Protection & Consulting, s.r.o [online]. 2020 [cit. 2. 11. 2022]. Dostupné z: http://www.konference.org/vyvoj_odvetvi_energetiky_2020/prezentace_recniku/Pospisil.pdf.
- [42] Rate of Change of Frequency (RoCoF) withstand capability. *ENTSO-E* [online]. 29. 3. 2017 [cit. 2. 11. 2022]. Dostupné z: https://docstore.entsoe.eu/Documents/Network%20codes%20documents/NC%20RfG/IGD_RoCoF_withstand_capability_final.pdf.
- [43] Future system inertia. *ENTSO-E* [online]. 18. 6. 2018 [cit. 2. 11. 2022]. Dostupné z: <https://docs.entsoe.eu/dataset/nordic-report-future-system-inertia>.
- [44] Implementace NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/1388. *Energetický regulační úřad* [online]. 2019 [cit. 15. 11. 2022]. Dostupné z: https://www.eru.cz/sites/default/files/import_files/Implementace%20DCC.pdf.
- [45] NOHÁČ, Karel. *Pojem stability v elektrizační soustavě*. Prezentace z předmětu KEE/PJS [online]. Západočeská univerzita v Plzni 2015 [cit. 23. 11. 2022]. Dostupné z: <https://home.zcu.cz/~nohac/PJS/Prednasky/>.
- [46] Desetiletý plán rozvoje přenosové soustavy České republiky 2021 - 2030. *ČEPS, a.s.* [online]. Listopad 2020 [cit. 23. 11. 2022]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/verejny-konzultacni-proces-k-desetiletemu-planu-rozvoje-prenosove-soustavy-ceske-republiky-2021-e2-80-93-2030>.
- [47] HAMSIC, N., SCHMELTER, A., MOHD, A., ORTJOHANN, E., SCHULTZE, E., TUCKEY, A., ZIMMERMANN, J. Increasing Renewable Energy Penetration in Isolated Grids Using a Flywheel Energy Storage System. *2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives* [online]. IEEE, 12. 11. 2007 [cit. 19. 11. 2022]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/POWERENG.2007.4380112>.
- [48] AMIRYAR, Mustafa E., PULLEN, Keith R. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. *Applied Sciences* [online]. MDPI, 16. 3. 2017, vol. 7, no. 3 [cit. 19. 11. 2022]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app7030286>.

- [49] GARCÍA-PEREIRA, H., BLANCO, M., MARTÍNEZ-LUCAS, G., PÉREZ-DÍAZ, J. I., SARASÚA, J.-I. Comparison and Influence of Flywheels Energy Storage System Control Schemes in the Frequency Regulation of Isolated Power Systems. *IEEE Access* [online]. IEEE, 2022, vol. 10, s. 37892-37911 [cit. 11. 2. 2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3163708>.
- [50] ŠONSKÝ, J., TESAŘ, V. Design of a stabilised flywheel unit for efficient energy storage. *Journal of Energy Storage* [online]. Elsevier, Ltd., srpen 2019, vol. 24 [cit. 13. 2. 2023]. ISSN 2352-152X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100765>.
- [51] SEBASTIÁN, R., PEÑA ALZOLA, R. Flywheel energy storage systems: Review and simulation for an isolated wind power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. Elsevier, Ltd., prosinec 2012, vol. 16, no. 9, s. 6803-6813 [cit. 22. 1. 2023]. ISSN 1879-0690. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.08.008>.
- [52] TAKAHASHI, Rion. Frequency control of isolated power system with wind farm by using Flywheel Energy Storage System. In: KRAUSE, Geschke. *From Turbine to Wind Farms* [online]. InTech, 2011 [cit. 22. 1. 2023]. ISBN 978-953-51-5995-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/15855>.
- [53] What is battery storage?. *National Grid* [online]. ©2023 [cit. 26. 1. 2023]. Dostupné z: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/what-is-battery-storage>.
- [54] Battery energy storage. *Siemens Energy* [online]. ©2020–2023 [cit. 26. 1. 2023]. Dostupné z: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/storage-solutions/battery-energy-storage.html>.
- [55] SHAZON, M. N. H., AL-MASOOD, N., AHMED, H. M., DEEBA, S. R., HOSSAIN, E. Exploring the Utilization of Energy Storage Systems for Frequency Response Adequacy of a Low Inertia Power Grid. *IEEE Access* [online]. IEEE, 20. 9. 2021, vol. 9, s. 129933-129950 [cit. 26. 1. 2023]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3114216>.

- [56] CANEVESE, S., GATTI, A., MICOLANO, E., PELLEGRINO, L., RAPIZZA, M. Battery Energy Storage Systems for Frequency Regulation: Simplified Aging Evaluation. *2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)* [online]. IEEE, 10. 8. 2017 [cit. 11. 2. 2023]. ISSN 2474-9664. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2017.8004830>.
- [57] CHENG, B., POWELL, W. B. Co-optimizing Battery Storage for the Frequency Regulation and Energy Arbitrage Using Multi-Scale Dynamic Programming. *IEEE Transactions on Smart Grid* [online]. IEEE, 1. 9. 2016, vol. 9, no. 3, s. 1997-2005 [cit. 13. 2. 2023]. ISSN 1949-3061. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2605141>.
- [58] DATTA, U. KALAM, A., SHI, J. Battery energy storage system for transient frequency stability enhancement of a large-scale power system. *2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)* [online]. IEEE, 8. 2. 2018 [cit. 13. 2. 2023]. ISSN 2474-1507. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2017.8282465>.
- [59] HUANG, J., YANG, D. Improved System Frequency Regulation Capability of a Battery Energy Storage System. *Frontiers in Energy Research* [online]. Frontiers Media, 23. 5. 2022, vol. 10 [cit. 13. 2. 2023]. ISSN 2296-598X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.904430>.
- [60] ARYANI, D. R., SONG, H., CHO, Y. Operation strategy of battery energy storage systems for stability improvement of the Korean power system. *Journal of Energy Storage* [online]. Elsevier, 15. 12. 2022, vol. 56, s. 129933-129950 [cit. 27. 1. 2023]. ISSN 2352-1538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106091>.
- [61] SCHREIER, Martin. *Tušimická baterie v testování obstála*. ČEZ, a.s. [online]. 22. 3. 2021 [cit. 31. 1. 2023]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/tusimicka-baterie-v-testovani-obstala-139511>.
- [62] ARGHANDEH, R., PIPATTANASOMPORN, M., RAHMAN, S. Flywheel Energy Storage Systems for Ride-through Applications in a Facility Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid* [online]. IEEE, 3. 9. 2012, vol. 3, no. 4, s. 1955-

- 1962 [cit. 14. 2. 2023]. ISSN 1949-3061. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2212468>.
- [63] PULLEN, Keith R. The Status and Future of Flywheel Energy Storage. *Joule* [online]. Elsevier, Ltd., 19. 6. 2019, vol.3, no. 6, s. 1394-1399 [cit. 14. 2. 2023]. ISSN 2542-4351. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.04.006>.
- [64] VOŇKA, Jakub. Možnosti využití konceptu Smart Village v České republice. Plzeň, 2021. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Katedra elektroenergetiky. Vedoucí práce Lenka RAKOVÁ.
- [65] Flywheel Energy Storage System. *Beacon Power* [online]. ©2018 [cit. 25. 5. 2023]. Dostupné z: http://www.beaconpower.com/files/SEM_20MW_2010.pdf.
- [66] Technical Data Sheet. *Beacon Power* [online]. ©2018 [cit. 25. 5. 2023]. Dostupné z: https://beaconpower.com/wp-content/themes/beaconpower/inc/beacon_power_brochure_032514.pdf.
- [67] Flywheel UPS Systems, 50-1000 kVA. *ABB Group* [online]. ©1995–2022 [cit. 25. 5. 2023]. Dostupné z: <https://library.industrialsolutions.abb.com/publibrary/checkout/DEA-642?TNR=Brochures%7CDEA-642%7CPDF&filename=DEA-642.pdf>.

Přílohy

Příloha A – Technický list setrvačnicků společnosti Beacon Power instalovaných ve Stephentownu v New Yorku (řešení z roku 2010) [65]



Flywheel Energy Storage System

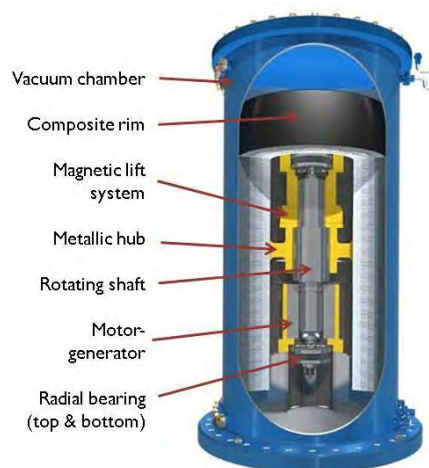
Features

- Beacon’s proven Gen 4 flywheel energy storage technology
- Modular FESS implementation to meet specific needs
- High cycle life. 100,000 cycles at full depth of discharge
- Four quadrant inverter can deliver real and reactive power

Primary Applications

- Frequency regulation
- Frequency response
- Solar PV & wind output smoothing
- Power quality and voltage support
- Peak shaving

Generation 4 Flywheel



FESS Ratings*		
Configuration	Power & Energy	High Power
Capacity per flywheel	100 kW	150 kW
Energy delivery per flywheel	25 kWh	12.5 kWh
Discharge time at rated capacity	15 minutes	5 minutes

* Can be configured for any power and energy value in between

Advantages	Benefits
High performance: Less regulation needs to be purchased. Existing resources can operate more efficiently. Enhances renewable integration	<ul style="list-style-type: none"> • Lower cost to load for regulation and energy • Less emissions to the environment • Lower existing unit maintenance costs
High cycle life: 100,000 equivalent full charge/discharge cycles over a 20 year design life	<ul style="list-style-type: none"> • Low cost: \$/MW per full charge-discharge cycle • High availability and limited O&M scope and cost • Reduced life cycle costs
No degradation: Energy storage capacity and performance does not degrade with cycle duty, depth of discharge, charging rate, time or temperature	<ul style="list-style-type: none"> • No decrease in performance over asset life • No need to oversize the system
Flexible: Capable of charging as fast as it discharges and switching power direction almost instantaneously	<ul style="list-style-type: none"> • Increased system availability • More frequency regulation mileage available
State-of-charge is accurately known at all times	<ul style="list-style-type: none"> • Predictable operation
State-of-health monitoring system	<ul style="list-style-type: none"> • Key parameters continuously monitored • Condition-based maintenance
No direct air emissions, no air permits or water use. NEPA evaluation: “Findings of No Significant Impact”	<ul style="list-style-type: none"> • Rapid siting

Specification	Value
Design Life	20 years or 100,000 full depth of discharge cycles
Electrical Interface	
Input / Output Voltage	480 VAC
Input / Output Real & Reactive Power	Up to 150 kVA continuous power at any power angle
Frequency	50 Hz or 60 Hz
Standby Loss	0.03 MWh / MW / hour
Round Trip Efficiency	85 %
Response Time	<1 second to full power
Mechanical	
Flywheel Rim Material	Comingled carbon and E-glass fiber composite (patented)
Flywheel Motor / Generator	Permanent magnet synchronous
Flywheel Magnetic Lift System	Combination of permanent and electro magnets
Flywheel Vacuum Level	<1 Millitorr
Flywheel Operating Rotational Speed	8,000 to 16,000 RPM
Flywheel Dimensions	82 in (208 cm) height x 47 in (120 cm) diameter
Modular Electronics & Cooling Dimensions	40 in (101 cm) x 40 in (101 cm) x 60 in (152 cm)
Environmental	
Temperature Range	-35C to +40 C
Humidity	Up to 95% (non-condensing)
Flywheel Installation	Below ground in concrete housing
Seismic Capability	Sds 2.0g Per IBC 2012
Noise Level	45 dBA standard and Ldn of 50 dBA
Communications and Monitoring	
Driving Signal	Receives DNP3 (or other standard protocols) signal from the operator. Or self managed based on frequency
Monitoring	Internet based in compliance with NERC Standards
Data Storage	Full trending and analysis. Data stored locally and offsite
U.S. Patents	
6,710,489; 6,747,378; 6,817,266; 6,824,861; 6,852,401; 6,884,039; 6,959,756; 7,034,420; 7,174,806; 7,365,461; 7,679,247; 8,008,804; 8,314,527 (other U.S. and international patents pending)	



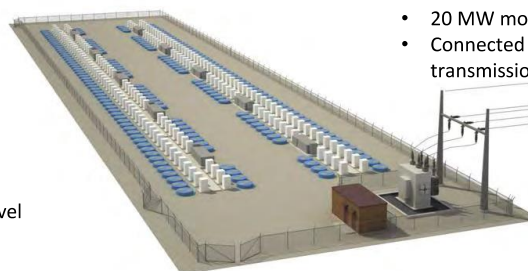
Flywheel assemblies arriving at a plant site



Integrated power and control electronics and ancillary equipment

System Characteristics

- No direct fuel or emissions – typically permitted locally like a substation
- Unmanned installation, remotely operated
- Modular design results in high availability
- Can be sized from 100 kW to any power level



Typical Installation

- 20 MW modular plant
- Connected to high voltage transmission line

Beacon Power, LLC

65 Middlesex Road • Tyngsboro, MA • USA

www.beaconpower.com

Příloha B – Technický list setrvačníků od firmy Beacon Power (novější řešení) [66]



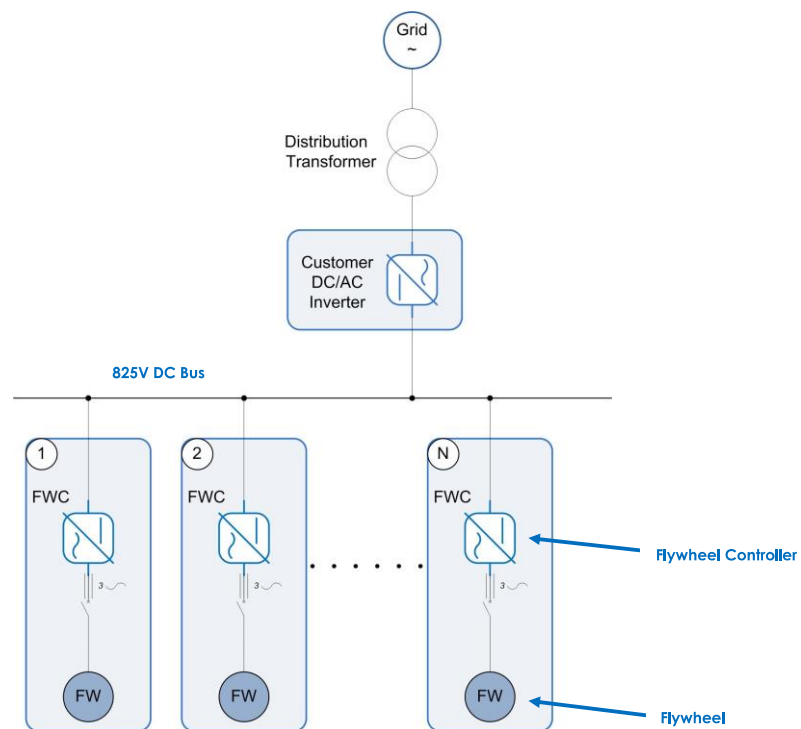
Technical Data Sheet

AC Product	Flywheel with PCM
Design Life	
160 kW configuration	20 years or 175,000 full depth-of-discharge cycles
100 kW configuration	20 years or 100,000 full depth-of-discharge cycles
Specifications	
Nominal supply voltage	3 Phase, 480 VAC
Supply frequency	50/60 Hz
Response time — normal operations	<1 second to full power
Ramp rate	Up to 190 kW/second
Response time — system event	100 milliseconds to full power
Under-voltage fault ride through	Yes
Output short circuit protection	Yes
Paralleling of units	Yes
Unbalanced current	Optional
Technical Data	
Nominal output rating	Up to 190 kVA
Reactive power	Four-quadrant operations up to full rating
Output power and corresponding charge/discharge times	Configurable from 190 kW for 0.5 minutes to 50 kW for 35 minutes. Configurations can be changed during an operating day. See Output Power vs Time Plot (Appendix)
Usable energy (@ full charge)	~30 kWh depending on power vs time configuration
Idling losses	3 kW per hour under typical conditions
Round trip efficiency	> 85%
Environmental	
Temperature range	-35C to +40C (without derating)
Humidity	Up to 95% (above which a heater may be installed)
Altitude (above sea level)	<1200 m (without derating)
Flywheel installation	Below ground in concrete foundations
Seismic capability	Sds 1.0g Per IBC 2012
Communication	
Supported protocols	Modbus, TCP/IP, CAN
Monitoring	Internet-based in compliance with NERC standards
Data storage	Full trending and analysis; data stored locally and offsite
Dimensions	
Flywheel dimensions	82 in (208 cm) height x 47 in (120 cm) diameter
Power Control Module	40 in (101 cm) x 40 in (101 cm) x 60 in (152 cm)

Technical Data Sheet

DC Product	Flywheel with PCM (DC Output)
Electrical Interface	
DC Bus Voltage	825 VDC
Input / Output Power	Up to 195 kW continuous power (single unit)
One Way Efficiency	>93 %

Flywheel systems can be configured for DC integration, enabling system integrators to incorporate flywheel storage capability into an existing system, or one optimized around different controls and AC conversion technologies. Below is a one-line configuration diagram along with flywheel performance specifications at the DC bus.



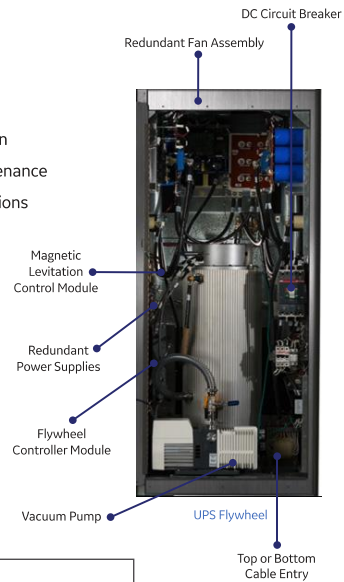
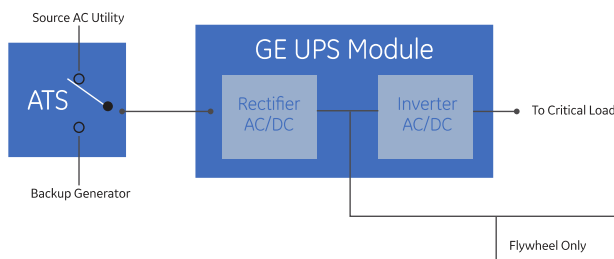
Příloha C – Technický list UPS se setrvačnický od firmy GE Industrial Solutions [67]

Flywheel Features & Applications

Key Flywheel Features

- **Hi-Speed Motor** Generator for hi efficiency, hi power density & hi temperature operation
- **Magnetic Levitation System** for no lubrication, no bearing replacement, and no maintenance
- **Smart Monitoring System** for real time data, advanced warnings, remote communications
- **Proven/Tested**, with over 1000 systems installed and over 13 million discharge cycles

Block Diagram



Continuous Power Application

- Battery Free Operation
- Ride through to Generator Start
- Highest reliability
- Parallel the flywheels for capacity, longer runtimes or redundancy

Glitch Protection Application

- Battery Free Operation
- Resolves 98% of all power events
- High Operating Temperature
- Small footprint

Battery Hardening Application

- Flywheel first line of defense for all but long duration outages
- Provides energy storage redundancy
- Can extend battery life due to reduced battery cycling



Flywheel Data

POWER/DURATION RATINGS	
Max Power	300 kW
Max Energy Storage	Standard Flywheel: 4000kW seconds
	Enhanced Flywheel: 6000kW seconds
Runtimes	See tables near end of brochure
Rotational Speed	Standard Flywheel: 36,750-24,500 RPM
	Enhanced Flywheel: 36,750-14,000 RPM

INPUT	
Voltage (Vdc)	400-600
Recharge Rate	15-50 Amps adjustable

OUTPUT	
Voltage Discharge (Vdc)	400-520 adjustable
Operating Temp	14 degr F to 104 degr F (-10 degr C to 40 degr C)
Humidity	90% non-condensing
Max Altitude	5,000 ft (1524 m) without derating
Audible Noise	< 68 dBA at 3.3ft (1M)

PHYSICALS	
Height	73.7 in (1872mm)
Width	30.0 in (762mm)
Depth	30.0 in (762mm)
Weight	1810 lbs (822kg)

Flywheels in Parallel

Up to 6 Flywheels can be paralleled on a UPS Module, but each Flywheel feeder cabling should be brought to a **DC Paralleling Cabinet**, with only one main feeder going to the UPS Module. The DC Breakers in the cabinet are all 250Amp.



DC PARALLELING CABINET		
	For 2-3 Flywheels	For 4-6 Flywheels
Bus Size	800A MLO	1600A MLO
Size w x dp x hi	24" x 33" x 71"	24" x 33" x 71"
	609mm x 838mm x 1803mm	609mm x 838mm x 1803mm
Weight (est)	500 lbs	600 lbs
	227 kg	272 kg

Příloha D – Naměřená data z baterie v elektrárně Tušimice II ze dne 10. 4. 2023

