

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Provoz fotovoltaického systému ve spolupráci s bateriovým
uložištěm (BESS)

Autor práce: **Bc. Dominik Mencl**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Dominik MENCL**
Osobní číslo: **E22N0024P**
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**
Specializace: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Provoz fotovoltaického systému ve spolupráci s bateriovým uložištěm (BESS)**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

- Proveďte rozbor možností řízení výkonu získaného z FVE (systému) a jeho vliv na změnu napětí v připojeném místě.
- Zpracujte informace o možnosti využití bateriového uložiště (BESS) a jeho vlivu na stabilizaci napětových a proudových poměrů v síti.
- Na konkrétním případě zvolené sítě analyzujte a vyhodnoťte vliv BESS na zvýšení přenosových schopností sítě a vyhodnoťte dopad navržených opatření na ztráty v síti a ekonomiku provozu.
- Porovnejte analytické výpočty se simulací zadaného případu a zhodnoťte vhodnost použití BESS v provozu společně s FVE (systémem).

Rozsah diplomové práce: **40-60**
Rozsah grafických prací: **minimálně 5**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

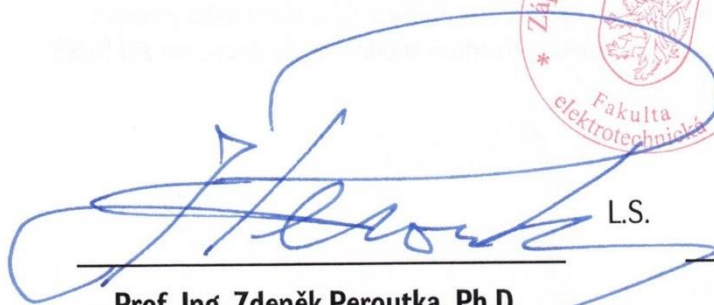
Seznam doporučené literatury:

1. Skripta a přednášky z předmětu Elektroenergetika I, II.
2. Internetové podklady. Legislativní předpisy o řízení P, Q u zdrojů nad 100 kW.
3. Student si další vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího a konzultanta práce, včetně internetových podkladů.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **6. října 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**




L.S.

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



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

V Plzni dne 6. října 2023

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou provozu fotovoltaické elektrárny ve spolupráci s bateriovým uložištěm. V první části jsou popsány legislativní předpisy pro připojování výroben elektrické energie do distribuční sítě. Na požadavky vyplývající z předpisů následuje část, která se věnuje řízení jalového a činného výkonu a účinkům tohoto řízení na velikost napětí v síti. Dále jsou shrnuty možnosti akumulace elektrické energie, aktuální trendy v jejím využívání a výhody i nevýhody, které provozování akumulčních zařízení přináší. Praktická část se zaměřuje na detaily spolupráce bateriového uložiště s fotovoltaickou elektrárnou, jež jsou připojeny v blízkosti významného odběru v síti vysokého napětí. Jsou zde simulovány různé situace, které mohou nastat při společném provozu. Jednotlivé stavy jsou vyhodnocovány převážně z hlediska výkonových a napěťových poměrů v síti. Poslední částí práce je ekonomické zhodnocení a návratnost investice.

Klíčová slova

Obnovitelné zdroje, fotovoltaická elektrárna, bateriové uložiště, distribuční síť, kabelové vedení, činný výkon, napěťové poměry.

Abstract

This thesis deals with the operation of a photovoltaic power plant in cooperation with a battery storage system. In the first part, the legislative regulations for connecting power generation plants to the distribution grid are described. The requirements resulting from the regulations are followed by a section that deals with reactive and active power control and the effects of this control on the magnitude of the grid voltage. The possibilities of electricity storage, current trends in its use and the advantages and disadvantages of operating storage facilities are also summarised. The practical part focuses on the details of the cooperation between battery storage and photovoltaic power plants that are connected close to a significant load on the middle-voltage grid. Different situations that may occur during joint operation are simulated. The different situations are mainly evaluated in terms of power and voltage conditions in the grid. The last part of the work is the economic evaluation and the return of investment.

Key Words

Renewable energy, photovoltaic power plant, battery storage, distribution network, cable lines, active power, voltage ratios.

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 19.5.2024

Bc. Dominik Mencl

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce, paní doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. za její cenné rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat konzultantovi panu Ing. Františku Žákovi, Ph.D., protože jeho praktické zkušenosti, nápady a připomínky mi velice pomohly při řešení praktické části. Nakonec musím také poděkovat panu doc. Ing. Karlu Noháčovi, Ph.D., který mi poskytl cenné rady ohledně volby simulačních programů.

Obsah

Úvod	- 1 -
1 Distribuční síť.....	- 2 -
1.1 Topologie distribučních sítí.....	- 2 -
1.2 Distribuční síť velmi vysokého napětí	- 4 -
1.3 Distribuční síť vysokého napětí.....	- 4 -
1.4 Distribuční síť nízkého napětí	- 6 -
2 Kvalita napětí v distribuční soustavě.....	- 7 -
2.1 Kmitočet sítě.....	- 7 -
2.2 Poklesy a dočasná zvýšení napětí	- 7 -
2.3 Kolísání napětí.....	- 8 -
2.4 Harmonická napětí.....	- 9 -
2.5 Nesymetrie napětí	- 9 -
3 Legislativní předpisy pro připojování zdrojů do distribuční soustavy	- 11 -
3.1 Pravidla provozování distribučních soustav	- 11 -
3.2 Chování výroben v síti.....	- 13 -
3.3 Přizpůsobení činného výkonu.....	- 15 -
3.4 Řízení jalového výkonu v závislosti na provozních podmínkách	- 18 -
4 Velikost napětí v místě připojení.....	- 20 -
4.1 Úbytek napětí na vedení VN	- 20 -
4.2 Řízení činného výkonu FVE pomocí střídače	- 22 -
4.3 Regulace jalového výkonu.....	- 27 -
4.4 OLTC transformátor	- 29 -
5 Akumulace elektrické energie	- 30 -
5.1 Možnosti akumulace.....	- 30 -
5.2 Poskytování podpůrných služeb	- 32 -
5.3 Provoz bateriového uložení v distribuční síti.....	- 33 -

5.4	Způsob připojování výroben s akumulacním zařízením.....	- 37 -
6	Řešení případu konkrétní sítě s BESS	- 38 -
6.1	Počtní řešení sítě	- 38 -
6.2	Simulace	- 43 -
6.3	Snížení rezervované kapacity odběru	- 44 -
6.4	Napět'ové poměry	- 46 -
6.5	Optimalizace využití BESS	- 47 -
6.6	Vliv zatížení sítě na velikost napětí.....	- 49 -
6.7	Vliv odebíraného jalového výkonu na napětí	- 50 -
6.8	Kombinace FVE a BESS.....	- 52 -
6.9	Ztráty na vedení	- 59 -
6.10	Zvýšení přenosové kapacity vedení.....	- 61 -
6.11	Ekonomické zhodnocení.....	- 62 -
	Závěr	- 66 -
	Literatura.....	- 70 -
	Přílohy.....	I

Seznam symbolů a zkratek

<i>FVE</i>		Fotovoltaická elektrárna
<i>DS</i>		Distribuční soustava
<i>PS</i>		Přenosová soustava
<i>VVN</i>		Velmi vysoké napětí
<i>VN</i>		Vysoké napětí
<i>NN</i>		Nízké napětí
<i>PDS</i>		Provozovatel distribuční soustavy
<i>PPS</i>		Provozovatel přenosové soustavy
<i>PPDS</i>		Pravidla provozování distribučních soustav
<i>SVR</i>		Služby výkonové rovnováhy
<i>VTE</i>		Větrná elektrárna
<i>APC</i>		Active power control
<i>OLTC</i>		On load tap changer
<i>BSAE</i>		Bateriové systémy akumulace elektrické energie
<i>BESS</i>		Battery energy storage system
<i>I</i>	(A)	Elektrický proud
<i>U</i>	(V)	Elektrické napětí
<i>R</i>	(Ω)	Elektrický odpor
<i>X</i>	(Ω)	Reaktance
<i>L</i>	(H)	Indukčnost
<i>C</i>	(F)	Kapacita
ω	(rad/sec)	Úhlová rychlost
<i>P</i>	(W)	Činný výkon
<i>S</i>	(VA)	Zdánlivý výkon
<i>Q</i>	(VAr)	Jalový výkon
<i>Z</i>	(Ω)	Impedance
$\cos\varphi$	(-)	Účinit
<i>Q_C</i>	(VAr)	Nabíjecí výkon
<i>Y</i>	(S)	Admittance
<i>G</i>	(S)	Konduktance
<i>B</i>	(S)	Susceptance
ΔP	(W)	Činné ztráty
ΔQ	(VAr)	Jalové ztráty

Úvod

Jednou z otázek, kterými se elektroenergetika v posledních letech zabývá, je udržitelnost a efektivní využívání elektrické energie. S ohledem na ochranu životního prostředí a neustále se zvyšující poptávku po elektrické energii začínají být stále více využívány nové alternativní zdroje elektrické energie. Ovšem některé tyto zdroje nedisponují zrovna ideálními vlastnostmi, které jsou pro výrobní připojované do elektrizačních soustav požadovány. Některé obnovitelné zdroje, především fotovoltaické a větrné elektrárny, se vyznačují proměnlivou dodávkou elektrické energie. Díky těžké predikci dodávaného výkonu a častým změnám vyráběné energie mohou tyto zdroje způsobovat značnou nestabilitu v elektrizační soustavě. Pro efektivní využívání těchto zdrojů se nabízí optimalizace dosavadních systémů. Jednou z možností, jak lze efektivněji využívat energii z fotovoltaických elektráren, jsou bateriová uložení.

Hlavním cílem této práce bude nastínění, jak lze optimalizovat provoz fotovoltaického systému ve spolupráci s bateriovým úložištěm v síti vysokého napětí. Pro uvedení do problematiky popíši v teoretické části distribuční síť. Především způsob, jakým jsou provozovány, topologie sítí a provozní rozdíly mezi kabelovým a venkovním vedením. Dále se budu věnovat problematice kvality napětí, na kterou má proměnlivá dodávka elektrické energie také vliv. V teoretické části se také budu zabývat zákony a vyhláškami, ze kterých vycházejí Pravidla provozování distribučních soustav. Z těchto pravidel popíši požadavky, které musejí výrobní připojované do distribuční sítě splňovat.

Od předpisů, určujících vlastnosti připojovaných zdrojů, se přesunu k popisu, jak je možné tyto technické požadavky splňovat. Věnovat se budu hlavně řízení činného a jalového výkonu. Pro nastínění důležitosti tohoto tématu zhodnotím vliv jednotlivých výkonů na velikost napětí v síti. Na závěr teoretické části se budu věnovat popisu současných technologií akumulace elektrické energie a možnostem jejich využití.

V praktické části se budu věnovat řešení poměrů v síti vysokého napětí, kam je připojena fotovoltaická elektrárna v kombinaci s bateriovým úložištěm. Hlavním cílem bude posouzení, jak lze pomocí bateriového úložiště stabilizovat napěťové poměry při proměnlivé dodávce a spotřebě. Dále se nabízí také návrh, jak lze pomocí baterie snížit rezervovaný příkon velkoodběratele a snížit tak částku, kterou za rezervovanou kapacitu platí provozovateli distribuční sítě. Na závěr této kapitoly zhodnotím investici v podobě výstavby fotovoltaické elektrárny s bateriovým úložištěm, kde se zaměřím na návratnost investice.

1 Distribuční síť

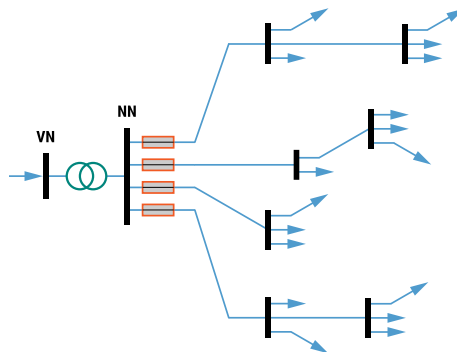
Jelikož se má práce zabývat fotovoltaickými elektrárnami (FVE), zaměřím se v první části na distribuční síť, do kterých jsou tyto zdroje elektrické energie připojovány. Distribuční soustava (DS) je soubor vedení a zařízení v napět'ových hladinách velmi vysokého napětí (VVN), vysokého napětí (VN) a nízkého napětí (NN). Hlavním úkolem DS je bezpečná a hospodárná dodávka elektrické energie v požadované kvalitě a množství. Do DS jsou připojovány zdroje menších výkonů, řádově do desítek MW. Příkladem zdrojů připojovaných do DS mohou být například teplárny, vodní elektrárny, bioplynové stanice či už výše zmíněné FVE. Na území České republiky jsou nejvýznamnějšími provozovateli distribučních soustav (PDS) společnosti ČEZ Distribuce, a.s., EG. D, a.s. a PREdistribuce, a.s.

1.1 Topologie distribučních sítí

Odběratelé elektrické energie, kteří jsou připojeni do DS, jsou děleni do tří skupin dle stupně důležitosti dodávky. Z tohoto hlediska rozlišujeme několik topologií, díky kterým můžeme zajistit vyšší, či nižší spolehlivost dodávky elektrické energie.

1.1.1 Paprsková síť

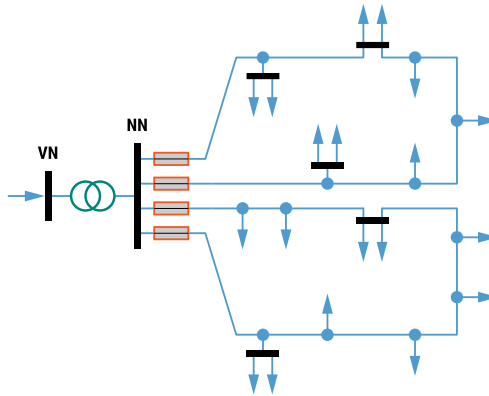
Jedná se o nejjednodušší síť s nejmenšími investičními náklady. Ovšem s jednoduchostí sítě klesá spolehlivost dodávky elektrické energie. V případě této sítě jsou skupiny odběrů napájeny z jednoho paprsku a při poruše je vypínán celý paprsek. Dalším problémem mohou být úbytky napětí u dlouhých paprsků, kde by se vlivem impedance vedení a protékajícího proudu mohla velikost napětí dostat pod dovolenou mez.



Obr. 1: Schéma paprskové sítě [1]

1.1.2 Okružní síť

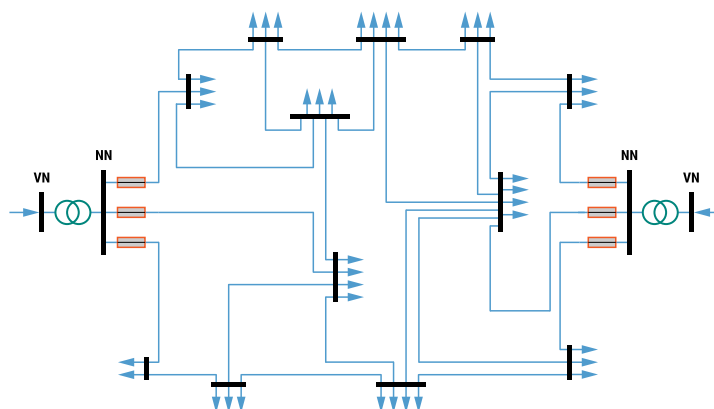
Tento typ sítě je tvořen jednotlivými okruhy rozvodů, ze kterých jsou napájeny odběry. Zvýšení spolehlivosti dodávky je zaručeno tím, že při poruše se rozpojí smyčka v místech co nejbližše poruše a zbytek sítě je provozován jako dva samostatné paprsky.



Obr. 2: Schéma okružní sítě [1]

1.1.3 Mřížová síť

V tomto typu rozvodu je zajištěno napájení ze dvou a více na sobě nezávislých zdrojů, což vede k nejvyšší spolehlivosti dodávky elektrické energie ze všech tří uvedených typů sítě. Kromě spolehlivosti dodávky se mřížové sítě vyznačují také nejmenším kolísáním napětí. Vzájemné propojení a složitost sítě ale vede k nevýhodám v podobě náročnější údržby, těžšího vyhledávání poruch a v neposlední řadě jsou zde výrazně horší zkratové poměry. Takto provedené sítě se využívají v husté městské zástavbě či při napájení větších průmyslových podniků. [1]



Obr. 3: Schéma mřížové sítě[1]

1.2 Distribuční síť velmi vysokého napětí

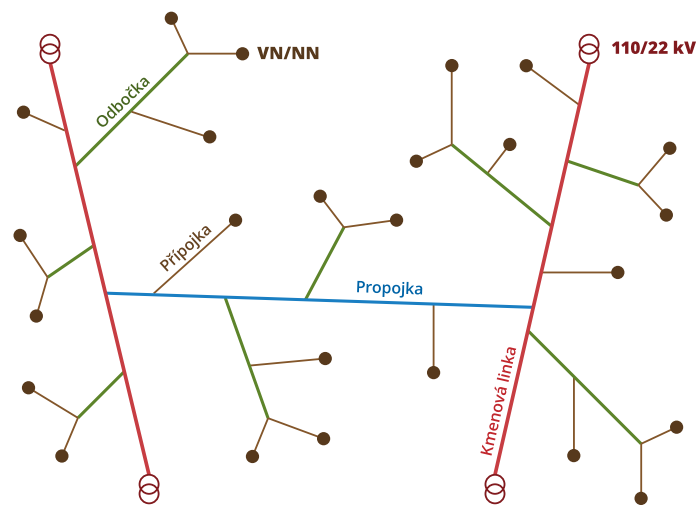
Distribuční síť VVN náleží napětí 110kV, jež tvoří základní pilíř celé DS. Síť zajišťují přenos velkých výkonů z transformačních uzlů, které jsou hranicí mezi přenosovou soustavou (PS) a DS do transformoven 110kV/VN. Do této části DS jsou vyvedeny výkony menších elektráren o instalovaných výkonech v desítkách MW. Co se topologie týče, nejčastěji jsou síť VVN rozděleny na samostatně pracující oblasti, které jsou příslušné jednotlivým transformátorům 400/110kV, resp. 220/110kV. Takto vytvořené síťové celky jsou pro vyšší spolehlivost maximálně možné zkruhovány. Rozvodny na hladině 110kV jsou velice důležitou částí DS, jelikož se jedná o předávací místo mezi přenosovou a distribuční soustavou. Z tohoto důvodu jsou prováděny pomocí dvojitého či trojitého systému přípojníc. Provedení sítí 110kV je v převážné většině řešeno pomocí venkovního vedení. Venkovní vedení jsou sestavena z jednoduchých AlFe lan, případně se mohou vyskytovat i dvojsvazkové vodiče. Stožáry jsou ocelové příhradové s jedním zemním lanem a mohou být vybaveny jednoduchým, či dvojitým vedením. Jelikož se jedná o účinně uzemněnou síť a většina vedení je venkovních, velkou část poruch tvoří poruchy přechodného charakteru. Z tohoto důvodu je každý vývod linky 110kV opatřen 1 – pólovou automatikou opětovného zapnutí, která slouží k eliminaci přechodných poruch. Kabelové vedení na této napěťové hladině je výjimečné a tvoří pouze několik jednotek procent z celkové délky vedení 110kV na území České republiky. [2][3]

1.3 Distribuční síť vysokého napětí

Sítě vysokého napětí jsou provozovány převážně na hladině 22kV, popřípadě 35kV a historicky se mohou vyskytovat síť 3, 6 a 10kV. Tyto historické napěťové hladiny ale v DS jsou, nebo v nejbližší době budou nahrazeny sítěmi 22, resp. 35kV. Co se týče provedení sítí VN, zde už není tak jednoznačná převaha venkovního vedení oproti kabelovému vedení. Naopak v posledních letech se síť VN začínají výrazně kabelizovat. Provoz sítí VN je v případě méně rozlezlých sítí s izolovaným uzlem. Větší část sítí je provozována s neúčinně uzemněným uzlem přes zhášecí Petersenovu tlumivku, a to především v případě venkovního vedení. V případě kabelového vedení je to poté přes odporník. Automatika opětovného zapnutí je zde v 3 – pólovém provedení, tedy všechny 3 fáze vypínače mají společný pohon. Ovšem opětovné zapínání je prováděno převážně u venkovních vedení, u kabelových vedení spíše výjimečně, protože by mohlo dojít k průrazu izolace. Provedení venkovních vedení je pomocí AlFe lan na příhradových,

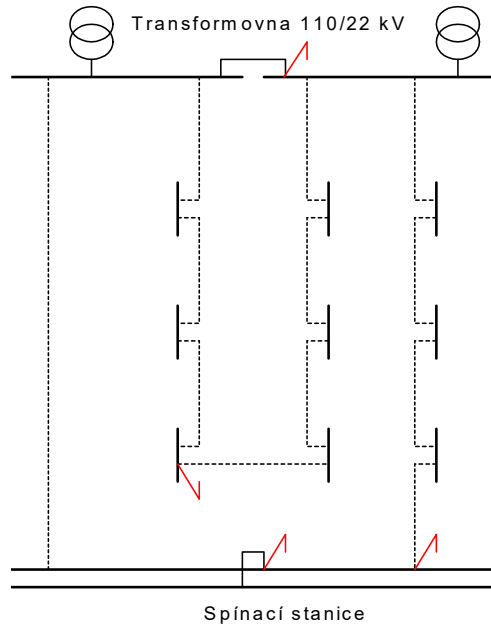
betonových, popřípadě dřevěných stožárech bez zemního lana. Kabelová vedení mohou být provedena z třífázových kabelů, ale u vyšších průřezů např. 240mm² jsou již používány kabely jednofázové.

Topologie venkovních sítí je převážně paprsková, kde jednotlivé paprsky jsou navzájem propojeny pro případné zálohování z jiné transformační stanice. Tyto propojky jsou za normálního provozu v rozpojeném stavu a spínají se pouze v případě potřeby napájení z druhé strany. Rozpojování jednotlivých paprsků je realizováno především pro snížení rozsáhlosti sítě, která má v případě izolovaných a neúčinně izolovaných sítí hlavní vliv na velikost poruchového proudu při zemním spojení.



Obr. 4: Topologie venkovní sítě VN [4]

Topologie městských kabelových sítí VN je odlišná. Na rozdíl od venkovních sítí jsou postaveny jako kruhový rozvod, v němž jsou jednotlivé vývody provedené zasmyčkováním, nebo pomocí T spojek. Provoz této sítě v bezporuchovém stavu je taktéž paprskový. Tedy okruh je rozpojen ve spínací stanici a pouze v případě poruchy na daném paprsku dochází k záložnímu napájení z druhé strany. Rozpínání okruhů je prováděno ve spínacích stanicích.[2]



Obr. 5: Topologie městské sítě VN [2]

1.4 Distribuční síť nízkého napětí

Sítě NN jsou provozovány na napěťové hladině 0,4kV s účinně uzemněným uzlem. Konkrétní provedení rozvodu mohou být dosti odlišná, jelikož v síti NN jsou odběratelé s různými stupni důležitosti dodávky a velikostmi dodávaného výkonu. Mohou být využity sítě paprskové, okružní ale i mřížové. Sítě NN byly historicky vybudovány venkovním rozvodem, který je v současné době z převážné většiny nahrazen kabelovým rozvodem. V kabelových rozvodech jsou používány kabely s PVC izolací o průřezu od 16mm² až do 240mm². [2]

2 Kvalita napětí v distribuční soustavě

Pro provozovatele distribučních soustav je jedním z hlavních hlídaných parametrů kvalita elektrické energie. Jelikož FVE mohou být z hlediska kvality elektrické energie zdrojem určitého rušení, budu se v následující kapitole věnovat popisu ukazatelů kvality elektrické energie.

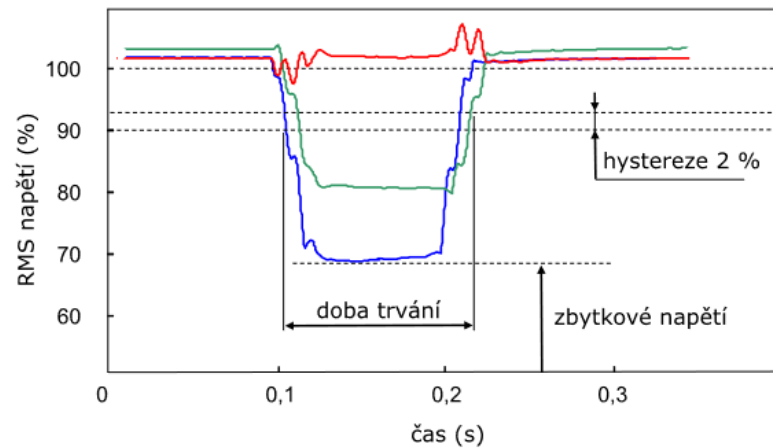
Kvalita napětí v daném bodě DS je definována naměřenými charakteristikami napětí, které jsou porovnávány s mezními hodnotami. Jednotlivé charakteristiky, dle kterých je kvalita napětí posuzována, vycházejí z normy ČSN EN 50160. [4]

2.1 Kmitočet sítě

Hlavním parametrem, který musí být hlídán, je frekvence základní harmonické. Za normálních provozních podmínek musí být střední hodnota kmitočtu v mezích $50\text{Hz} \pm 1\%$ po 99,5% roku a v mezích $50 +4\% / -6\%$ po 100% času. [4]

2.2 Poklesy a dočasná zvýšení napětí

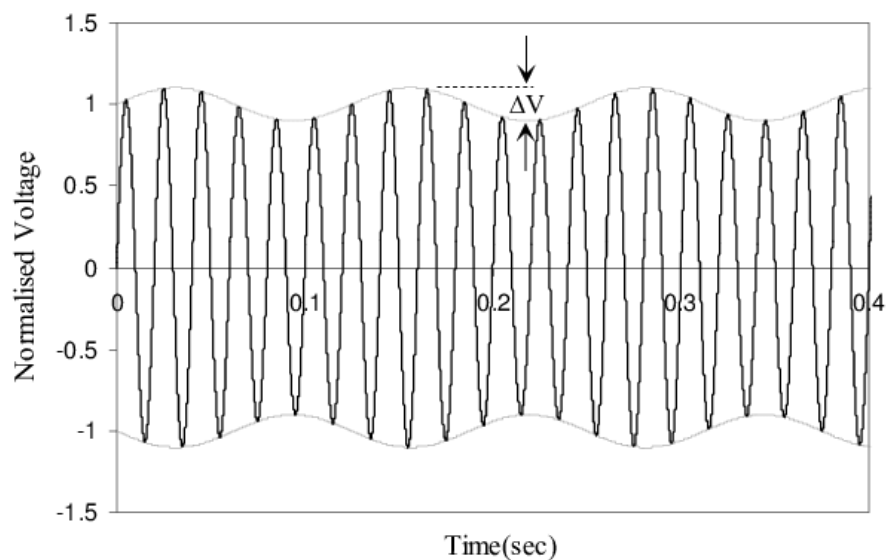
Za normálního provozu musí být odchylka napájecího napětí v mezích $\pm 10\% U_n$. Poklesy či zvýšení napětí mohou být způsobeny poruchami v síti (např. při zkratu na vedení dochází k poklesu napětí). Pokles napětí je dán velikostí protékaného zkratového proudu a impedancí sítě. To znamená, že čím blíže je pozorovaná část sítě ke zkratu, tím větší bude pokles napětí. Takovéto poruchy jsou nejčastější v sítích VN a VVN, kde je doba trvání max. do 1s, poté je porucha vypínána ochranami. Dalším zdrojem poklesů napětí mohou být výrazné změny zatížení v síti, například rozběhy motorů. Tyto poklesy už mají dobu trvání v řádech sekund. Kromě proměnlivých odběrů elektrické energie může být zdrojem snížení, či zvýšení napětí také proměnlivá dodávka. Takto proměnlivým zdrojem elektrické energie jsou převážně obnovitelné zdroje, které jsou silně závislé na počasí. Mezi ně můžeme zařadit především fotovoltaické a větrné elektrárny, u nichž mohou být výkyvy vyráběného výkonu v krátkém časovém rozmezí od 0 do 100% jmenovitého výkonu. Na Obr. 6 můžeme vidět typický případ poklesu napětí v síti. Při vyhodnocování poklesů napětí je posuzována doba trvání a tzv. zbytkové napětí. Odchylky napětí mohou být závažné pro zařízení, která jsou citlivá na velikost napájecího napětí. Takovými zařízeními jsou veškeré elektronické přístroje, stykače, výbojky či elektrické pohony. [2]



Obr. 6: Průběh poklesu napětí [2]

2.3 Kolísání napětí

Kolísání napětí je děj, při němž dochází k řadě rychlých změn napětí, nebo také děj, při kterém se cyklicky mění jeho obálka. Rychlou změnu napětí můžeme definovat jako změnu efektivní hodnoty mezi dvěma nebo více po sobě následujícími úrovněmi napětí v rozmezí $\pm 10\% U_n$.



Obr. 7: Průběh flikru [5]

Z obrázku je patrné, o jak rychlé změny napětí se jedná. Takto rychlé změny napájecího napětí mohou způsobovat kolísání světelného toku svítidel. U žárovek dochází k blikání neboli k flikru. Zdroji flikru mohou být například výkonové měniče, obloukové pece, spínání velkých zátěží nebo proměnlivé dodávky elektrické energie. [2]

2.4 Harmonická napětí

Jedná se o sinusová napětí, jejichž kmitočet je roven celistvému násobku základní harmonické napájecího napětí (50Hz). Dále se mohou vyskytovat také meziharmonická napětí, jejichž násobky leží mezi celistvými násobky první harmonické. Zdroji tohoto rušení jsou nelineární spotřebiče, které odebírají harmonické proudy. Odběrem harmonického proudu dochází k úbytkům napětí na impedanci vedení, a tím k následnému zkreslení síťového napětí. Působením vyšších harmonických dochází také ke vzniku deformačního výkonu. S deformačním výkonem vznikají přídavné ztráty v elektrických strojích, které výrazně snižují jejich využitelnost. Mezi hlavní zdroje harmonického rušení spadá především výkonová elektronika, obloukové pece, svářečí agregáty či spotřební elektronika. [2]

2.5 Nesymetrie napětí

V souměrné třífázové soustavě jsou efektivní hodnoty napětí a proudů stejné velikosti se vzájemným fázovým posunem 120° . V případě, že se jedna z těchto hodnot liší, hovoříme o nesymetrické soustavě, přičemž soustavu můžeme rozdělit na vyváženou a nevyváženou. U vyvážené soustavy je součet fázorů roven nule, u nevyvážené nikoli. Jako hlavní příčiny nesymetrie v síti uvažujeme zejména nesymetrickou zátěž (jednofázové elektrické pece, trakční vedení), nesymetrické poruchové stavy, jako jsou jednofázové a dvoufázové zkraty, či zemní spojení. Dalšími příčinami nesymetrie může být netransponované vedení, nebo stav sítě, kdy je napětí mezi uzlem a zemí vyšší než 1%. Zdroj nesymetrie může být ale také na straně výroby elektrické energie, přesněji u malých FVE, které jsou připojovány do sítě jednofázově.

Pro řešení nesymetrických stavů je využívána metoda souměrných složek neboli metoda Fortescue. Tato metoda je založena na principu superpozice, kdy nesouměrnou soustavu rozložíme na tři jednotlivé symetrické soustavy, tj. souslednou, zpětnou a netočivou. V případě souměrné soustavy je zpětná a netočivá složka nulová. Ideální zdroj napětí generuje pouze souslednou složku a zdroje zpětné a nulové složky jsou nesymetrie způsobené poruchami, nerovnoměrným zatížením, resp. výrobou.

Jedním z parametrů kvality elektrické energie je činitel nesymetrie ρ , který udává poměr mezi souslednou a zpětnou složkou síťového napětí. V sítích NN a VN musí být činitel nesymetrie menší než 2%, v případě sítí VVN nesmí přesáhnout hodnotu 1%.

Nesymetrie v síti má vliv především na elektrické stroje. U točivých strojů mohou vznikat záporné brzděné momenty vlivem netočivé složky. U transformátorů dochází vlivem netočivé a zpětné složky k navýšení přídavných ztrát, což vede ke zvýšenému zahřívání. Pro provozování strojů se zvýšenými přídavnými ztrátami je nutné snížit jejich zatížení, jelikož působením zpětné a netočivé složky dochází se snížení využitelnosti elektrických strojů.[2] [4]

3 Legislativní předpisy pro připojování zdrojů do distribuční soustavy

Aby mohl být zdroj připojen do DS, musí splňovat řadu předpisů. Český Energetický zákon č. 458/2000 Sb. hovoří v §23, odstavci 3 o povinnostech výrobců elektrické energie. O povinnosti dispečerského řízení připojených zdrojů hovoří v §23. odstavci 3, písmeno p.: „*vybavit výrobní elektrárny s instalovaným výkonem 100 kW a více zařízením umožňujícím dispečerské řízení výrobní elektrárny a udržovat toto zařízení v provozuschopném stavu; tato povinnost se nevztahuje na výrobní elektrárny využívající obnovitelné zdroje elektrické energie poprvé uvedené do provozu do roku 2000 o instalovaném výkonu do 10 MW včetně a na průtočné malé vodní elektrárny s instalovaným výkonem do 10 MW včetně*“. [6]

Energetický zákon tedy udává povinnost řízení pouze zdrojům, jejichž výkon je vyšší než 100kW. To je ovšem nedostačující požadavek, jelikož v posledních letech dochází k výraznému nárůstu připojování obnovitelných zdrojů menších výkonů. Jelikož bylo v minulosti připojeno velké množství menších zdrojů bez jakéhokoli řízení, bylo v návaznosti na to vydáno „Nařízení komise EU (RfG) 2016/631“. Toto nařízení již zahrnuje zdroje všech velikostí, které jsou následně rozděleny do skupin dle instalovaného výkonu, přičemž každé skupině jsou přiřazeny určité požadavky.

Pro provozování DS udává každý PDS tzv. „Pravidla provozování distribučních soustav“ (PPDS). Požadavky na připojování a provoz zdrojů v DS jsou přesně popsány v příloze PPDS č.4 „PRAVIDLA PRO PARALELNÍ PROVOZ VÝROBEN A AKUMULAČNÍCH ZAŘÍZENÍ SE SÍTÍ PROVOZOVATELE DISTRIBUTIVNÍ SOUSTAVY“. [8]

3.1 Pravidla provozování distribučních soustav

V této části práce se budu věnovat požadavkům na zdroje připojované do DS, které udává příloha č.4 PPDS. Tato část shrnuje pravidla, na která je zapotřebí brát zřetel při připojování zdrojů do DS na hladinách NN, VN i VVN. Slouží pro PDS ale také pro provozovatele výroben elektrické energie. Zároveň se jedná o jeden z hlavních dokumentů, který slouží jako podklad pro projektování výroben a rozhodování o připojitelnosti.

Tato pravidla se vztahují na všechny zdroje připojené do DS. Výjimkou jsou výrobní moduly, které byly instalovány za účelem poskytování záložní elektřiny, a které jsou provozovány v každém měsíci maximálně po dobu pěti minut. Taktéž se netýkají výroben, které nejsou trvale připojeny do DS a provozovatel je využívá pouze k dočasným dodávkám.

Jak jsem již zmínil výše, výrobní moduly jsou rozděleny do jednotlivých kategorií dle velikosti instalovaného výkonu viz. Obr.8.

Kategorie výrobního modulu	Limit	Podkat.	Hranice PDS	Nejvýznamnější požadavky
A	800 W	A1	≥ 800 W; ≤ 11 kW	podle čl. 13 pro výrobní moduly A
		A2	> 11 kW; < 100 kW	podle čl. 13 pro výrobní moduly A a čl. 14.2, 14.3, 14.4, 14.5 pro výrobní moduly B a čl. 20 pro nesynchronní výrobní moduly kategorie B
B	1 MW	B1	≥ 100 kW; < 1 MW	podle čl. 14 pro výrobní moduly B, čl. 17 pro synchronní výrobní moduly B a čl. 20 pro nesynchronní výrobní moduly kategorie B
		B2	≥ 1 MW; < 30 MW	podle čl. 14 pro výrobní moduly B, čl. 17 pro synchronní výrobní moduly B a čl. 15.2, 15.3, 15.4, 15.5a, 15.5b, 15.5c, 15.6a, 15.6b, 15.6c pro výrobní moduly C, podle čl. 18 pro synchronní výrobní moduly C a podle čl. 21 pro nesynchronní výrobní moduly kategorie C
C	50 MW	C	≥ 30 MW < 75 MW	podle čl. 15, čl. 18 a čl. 21
D	75 MW	D	≥ 75 MW	podle čl. 16, čl. 19 a čl. 22

Obr. 8: Výkonové kategorie výroben [8]

Jako synchronní výrobní moduly jsou posuzovány zdroje se synchronními generátory bez výkonové elektroniky na výstupu. Příkladem těchto výroben mohou být parní, vodní, plynové, kogenerační, bioplynové či větrné elektrárny. Nesynchronními moduly jsou považovány výrobní, na jejichž výstupu je výkonová elektronika, či asynchronní generátor. Jako nesynchronní modul je tedy považována FVE a akumulární systémy s výkonovou elektronikou na výstupu, vodní a větrné elektrárny s asynchronním generátorem či kogenerační a bioplynové elektrárny s asynchronním generátorem, nebo výkonovou elektronikou na výstupu.

Napěťová úroveň pro připojení jednotlivých výroben není pevně dána. Jedinou kategorií, která je připojována pouze do sítě 110kV je kategorie D. Volba napěťové úrovně

se odvíjí dle druhu a způsobu provozu výroby a dle síťových poměrů dané části DS. Nejčastěji jsou do sítí NN připojovány zdroje kategorie A1 a A2, do sítě VN kategorie B1, B2 a C. [8]

3.2 Chování výroben v síti

Pro stabilní chod soustavy je zapotřebí, aby připojené zdroje byly schopny reagovat na aktuální stav sítě a plnit požadavky PDS dle následujících pravidel.

3.2.1 Frekvenční rozsah

Tab. 1: Provozní frekvenční rozsah výroben v sítích NN, VN a 110kV [8]

Rozsah frekvence	Minimální doba provozu
47,5–48,5 Hz	30 min
48,5-49 Hz	90 min
49-51 Hz	neomezeně
51-51,5 Hz	30 min

3.2.2 Rozsah trvalého provozního napětí

V sítích NN musí být výroby schopny trvalého provozu, pokud je napětí v místě připojení v mezích $U_n - 15\%$ až $U_n + 10\%$. V případě poklesu napětí pod jmenovitou hodnotu je povoleno snížení výstupního výkonu, které odpovídá změně napětí v poměru odchylky napětí ku jmenovité hodnotě. Pro provozování výroben na vyšších napětíových hladinách platí následující tabulky:

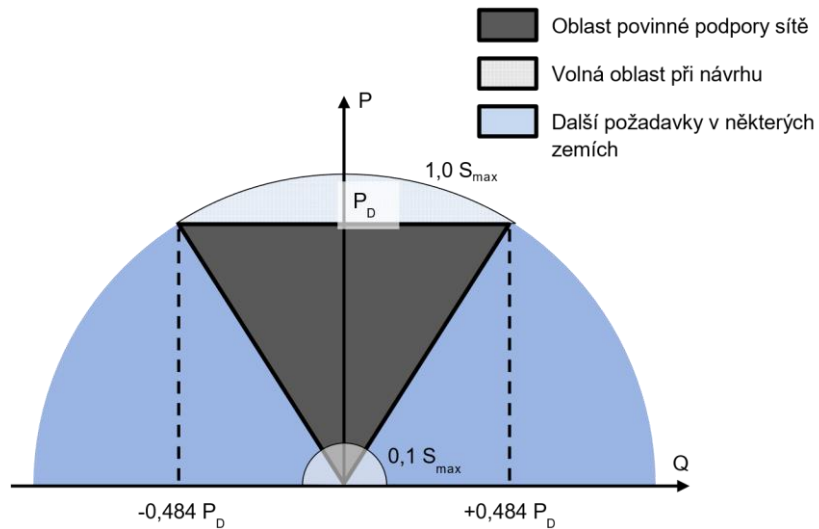
Tab. 2: Rozsah napětí výroby připojené v síti VN [8]

Rozsah napětí	Doba provozu
0,85 p.j.-0,90 p.j.	60 minut
0,90 p.j.–1,118 p.j.	neomezená
1,118p.j.–1,15 p.j,	60 minut

3.2.3 Statické řízení napětí

Statickým řízením je napětí udržováno ve smluvně stanovených mezích za normálních provozních podmínek a při pomalých změnách napětí. Vyžadují-li to podmínky v síti, musí se výroba podílet na udržování napětí pomocí jalového výkonu. Regulační rozsah jalového výkonu musí být takový, aby se účinník pohyboval v rozsahu 0,90

kapacitního do 0,90 induktivního charakteru. Pro grafické znázornění předepsaných mezí jsou využívány PQ diagramy, které určují pracovní body, v nichž se zdroj musí pohybovat.



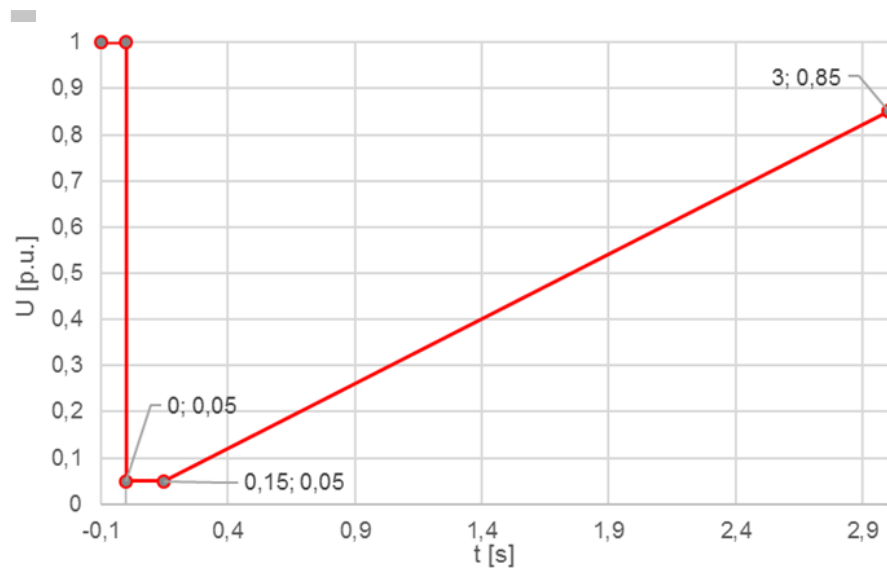
Obr. 9: PQ diagram při U_n [8]

V případě výrobních modulů kategorie B2, C a D je definován tzv. dodatečný jalový výkon, který musí být zdroj schopen dodávat/odebírat. Dodatečný výkon slouží k vykompenzování nabíjecího výkonu vedení nebo kabelu VN od místa připojení k blokovému transformátoru. [8]

3.2.4 Dynamická podpora sítě

Dynamická podpora sítě je schopnost udržování napětí v sítích VVN a VN při poklesech napětí. Účelem dynamické podpory je zamezení nežádoucího odpojování výkonů a rozpadu sítě. Z tohoto důvodu je nutné, aby se výrobny v sítích NN, VN i VVN podílely na dynamické podpoře sítě. Krátkodobé poklesy napětí jsou způsobeny převážně poruchami v síti, při kterých kolísá napětí. Těmito poruchami jsou všechny druhy zkratů (jedno-, dvou-, i třípólové).

Pro krátkodobé poklesy napětí je dána křivka překlenutí poruchy při krátkodobém poklesu napětí (Undervoltage ride through – UVRT). Tato křivka udává, při jakém napětí a po jakou dobu musí zůstat zdroj připojen při poklesu napětí. V případě že se hodnota napětí v místě připojení nachází pod křivkou, zdroj může být odpojen od sítě. [8]



Obr. 10: Napětí za podmínek poruchy pro nesynchronní moduly A1, A2, B1, B2 a C [8]

Stejně jako pro snížené hodnoty napětí jsou dány charakteristiky, podle nichž musí zdroje zůstat připojeny při dočasném zvýšení napětí. PPDS udávají, že výrobní musí být schopny zůstat připojeny při 120% U_N po dobu 1 sekundy. Při zvýšení napětí na 115% U_N musí zůstat připojeny 60 sekund. V sítích NN je vyhodnocována hodnota fázového napětí, zatímco v sítích VN a VNN hodnota sdruženého napětí. [8]

Novinkou pro nesynchronní výrobní moduly je schopnost poskytování umělé setrvačnosti, která je vyžadována pro výrobní kategorie B2, C a D. Výrobní musí být připraveny k aktivaci umělé setrvačnosti, která může být vyžádána PDS v důsledku rozvoje elektrizační soustavy. Posouzení dostatečnosti setrvačnosti v soustavě bude v periodě dvou let dle Nařízení komise EU 2017/1485 (SOGL) čl.39. [8]

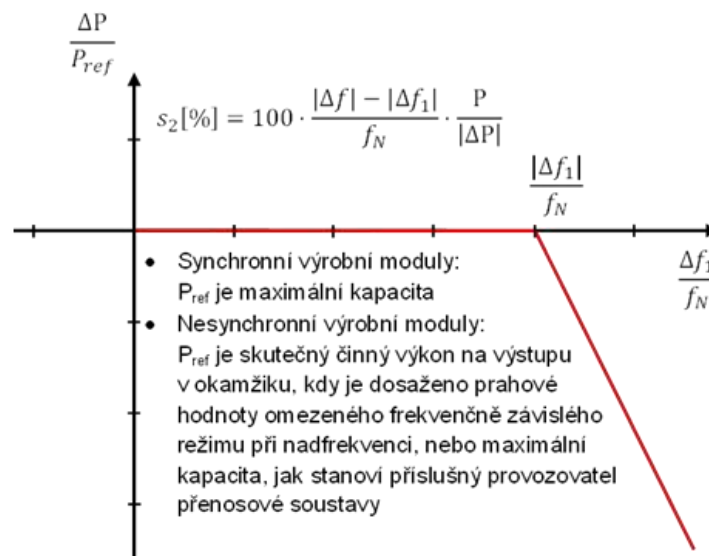
Součástí dynamické podpory sítě je také schopnost startu ze tmy. Tento požadavek je přidělen výrobním modulům kategorie C a D. To znamená, že tyto zdroje musí být schopny zahájit dodávku činného výkonu do vydělené části DS nejpozději do 30 minut bez jakékoli dodávky elektrické energie. [8]

3.3 Přizpůsobení činného výkonu

Jak jsem již uvedl v části 3.2.1., PPDS udávají frekvenční rozsah, ve kterých se musí pohybovat kmitočet sítě. Aby bylo možné udržet kmitočet v daných mezích, je nutné, aby zdroje připojované do elektrizační soustavy byly schopny regulovat činný výkon, nebo se případně automaticky odpojily od sítě.

3.3.1 Snížení činného výkonu při nadfrekvenci

Zdroje musí být schopny poskytnout frekvenční odezvu činného výkonu. To znamená, že při zvýšení frekvence nad prahovou hodnotu musí dojít ke snížení činného výkonu. Prahovou frekvenci a statiku snižování činného výkonu určuje PDS tak, aby byl zajištěn minimální dopad na sousední oblasti. Hodnoty prahové frekvence se mohou pohybovat v rozmezí 50,05Hz až 50,5Hz a nastavení statiky musí být od 4% do 10%. Zvyšování dodávaného výkonu může být provedeno po návratu hodnoty kmitočtu pod 50,05Hz, nebo po povolení dispečinku PDS. [8]



Obr. 11: Frekvenční odezva při nadfrekvenci[8]

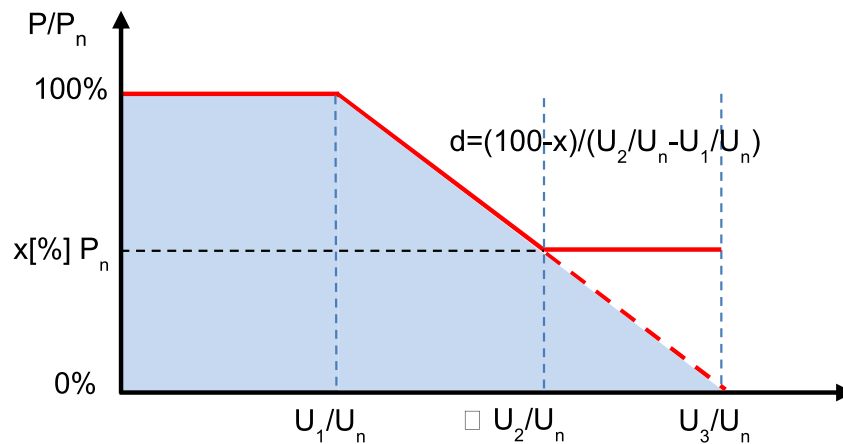
3.3.2 Přípustné snížení činného výkonu při podfrekvenci

Toto pravidlo udává výrobním modulům hranice snižování dodávaného výkonu v případě, že frekvence klesne pod jmenovitou hodnotu. S ohledem na technické možnosti výroben se připouští maximální snížení 2% P_{MAX}/Hz. Konkrétní požadavky udává PDS pro jmenovité podmínky stanovené výrobcem zařízení. V případě, že zdroj není schopen plnit předepsaná kritéria, musí být doložena technická studie provozovateli sítě.[8]

3.3.3 Snížení činného výkonu v závislosti na napětí – funkce P(U)

Všechny zdroje připojené pomocí střídače do sítě NN musí být vybaveny funkcí pro řízení napětí pomocí činného výkonu. Účelem tohoto opatření je zamezení odpojování výroben nadpět'ovými ochranami. Z tohoto důvodu je povoleno v sítích NN snižování činného výkonu při zvyšujícím se napětí. Výrobny mohou snižovat svůj činný výkon dle

výrobce definované logiky, ale nesmí docházet ke skokové změně výkonu či výkonovému kmitání. [8]



Obr. 12: Snížení P v závislosti na U[8]

3.3.4 Řízení činného výkonu v závislosti na provozních podmínkách

Výrobní moduly A2 a B1 i akumulční zařízení musí být schopné provozu při snížené dodávce činného výkonu. V závislosti na této povinnosti musí být vybaveny rozhraním pro přijímání pokynů z dispečinku PDS. Změna činného výkonu může nastat za následujících situací:

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

V těchto případech má PDS právo vyžadovat omezení činného výkonu, či úplné odpojení. Přičemž PDS zadává požadovanou hodnotu na výstupu a nezasahuje do řízení výroby. Úrovně snižovaného výkonu mohou být u FVE 60,30 a 0%, přičemž snížení musí být neprodlené, nejpozději do jedné minuty. Dále musí být technicky možné snížení výstupního výkonu na 0%, aniž by musel zdroj být odpojen od sítě. [8]

3.4 Řízení jalového výkonu v závislosti na provozních podmínkách

Způsob řízení jalového výkonu je vždy proveden na základě místa připojení do DS a určuje ho PDS po konzultaci s výrobcem výrobního modulu.

3.4.1 Způsoby řízení jalového výkonu

U výroben s instalovaným výkonem větším než 100kVA a výše musí být jalový výkon regulovatelný. Regulace jalového výkonu ve stanovených mezích účinníku je součástí udržování kvality napětí a musí být k dispozici kdykoli. Řízení jalového výkonu mimo stanovené meze může být dohodnuto smluvně a stává se součástí podpůrných služeb. Velikost jalového výkonu je zadávána PDS na pevnou hodnotu, nebo může být hodnota dálkově nastavitelná.

Možnosti nastavení hodnoty jalového výkonu:

- pevná hodnota Q_{fix} ,
- hodnota v závislosti na napětí $Q(U)$,
- hodnota v závislosti na činném výkonu $Q(P)$,
- pevná hodnota účinníku $\cos \varphi_{\text{fix}}$,
- účinník v závislosti na napětí $\cos \varphi(U)$,
- účinník v závislosti na činném výkonu $\cos \varphi(P)$
- zadaná hodnota napětí U .

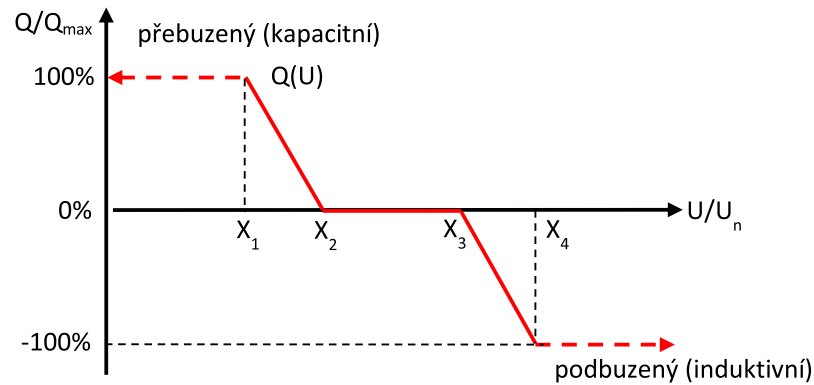
PDS může také zadat charakteristiku, po které se zdroj musí pohybovat. V tomto případě musí být jalový výkon automaticky nastaven:

- do 10s pro charakteristiku $\cos \varphi = f(P)$
- mezi 10s až 1 minutou pro charakteristiku $Q(U)$

Při silně kolísajícím dodávaném výkonu (FVE, VTE) musí být kompenzace dostatečně rychlá a automatická. Kompenzační zařízení nesmí být připojeno před zapnutím generátoru a při odstavování musí být vypínány současně. [8]

3.4.2 Jalový výkon v závislosti na napětí – $Q(U)$

V sítích NN díky velkému počtu připojovaných zdrojů a jejich vzájemné blízkosti je nutná koordinace parametrů této funkce. Každý zdroj má danou $Q(U)$ charakteristiku. Tvar a charakteristické body charakteristiky jsou udávány PDS na základě topologie sítě a poměrů v síti.



Obr. 13: funkce $Q(U)$ [8]

Tato charakteristika popisuje velikost odebíraného/dodávaného jalového výkonu zdrojem v závislosti na velikosti napětí v místě připojení. Bod X_1 určuje hodnotu maximálního dodávaného jalového výkonu pro zvýšení napětí v místě připojení. V bodě X_2 je začátek dodávky jalového výkonu pro zvyšování napětí. Naopak tomu je v bodě X_3 , který značí začátek pro odebrání jalového výkonu pro snížení napětí. Maximální odebíraný jalový výkon pro snížení napětí je znázorněn v bodě X_4 .

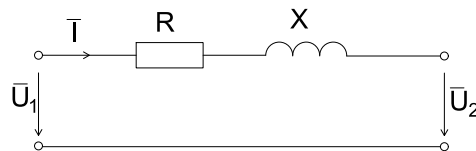
Při nastavování této regulační charakteristiky je nezbytné brát v úvahu velikost a kolísání napětí či velikost odboček nadřazeného transformátoru. Zásadní je také vhodné nastavení strmosti s ohledem na stabilitu napětí podél vývodů s ohledem na dodávku výkonů od jiných výroben.

4 Velikost napětí v místě připojení

Nepredikovatelná výroba FVE a VTE vede k mnoha negativním vlivům na síť. Jedním z těchto účinků je změna velikosti napětí v místě připojení. Abychom dosáhli určité stability sítě, je potřebné regulovat dodávku činného i jalového výkonu. V dalších částech rozeberu možnosti řízení výkonů z FVE a jejich vliv na velikost napětí v místě připojení.

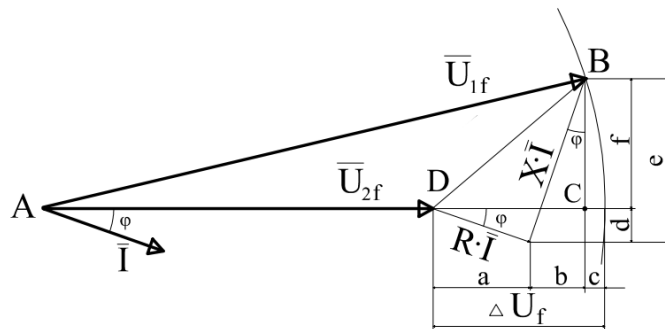
4.1 Úbytek napětí na vedení VN

Jelikož se ve výpočetní části budu zabývat výrobou o velikosti větší než 100kW, zaměřím se v této části na vedení VN. U vedení VN můžeme zanedbat příčné parametry a náhradní schéma tedy tvoří pouze kombinace činného odporu a provozní indukčnosti.



Obr. 14: Náhradní schéma sítě VN

Pro odvození vztahu pro úbytek napětí využijí fázorový diagram sestrojený dle tohoto náhradního schématu.



Obr. 15: Fázorový diagram sítě VN při induktivním charakteru zátěže [9]

Úbytek napětí je dán obecným vztahem:

$$\Delta U_f = |U_{1f}| - |U_{2f}| = a + b + c \quad (4.1.)$$

kde jednotlivé složky a , b , c jsou znázorněny na Obr.15.

Dílní složky úbytku jsou dány vztahy:

$$a = R * I * \cos\varphi \quad (4.2.)$$

$$b = X * I * \sin\varphi \quad (4.3.)$$

Složka c je odvozena z trojúhelníku ABC následovně:

$$(X * I * \cos\varphi - R * I * \sin\varphi)^2 + (U_{1f} - c)^2 = U_{1f}^2 \quad (4.4.)$$

$$(X * I * \cos\varphi - R * I * \sin\varphi)^2 = 2U_{1f} * c - c^2 = c * (2U_{1f} - c) \quad (4.5.)$$

Je-li $c \ll 2U_{1f}$ dostaneme vztah:

$$c = \frac{(X * I * \cos\varphi - R * I * \sin\varphi)^2}{2U_{1f}} \quad (4.6.)$$

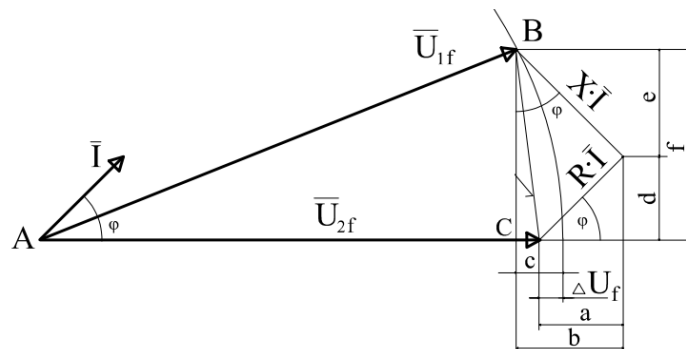
Následně sečteme jednotlivé složky a dostáváme výsledný vztah úbytku napětí při induktivním charakteru zátěže:

$$\Delta U_f = R * I * \cos\varphi + X * I * \sin\varphi + \frac{(X * I * \cos\varphi - R * I * \sin\varphi)^2}{2U_{1f}} \quad (4.7.)$$

V případě že je $\cos\varphi > 0,5$, je hodnota složky c zanedbatelná. Jelikož jsou sítě provozovány ve většině případů při $\cos\varphi \geq 0,95$, budu využívat zjednodušený vztah pro sdružený úbytek napětí:

$$\Delta U = \sqrt{3} * \Delta U_f = \sqrt{3}(R * I * \cos\varphi + X * I * \sin\varphi) = \frac{R * P + X * Q}{U_n} \quad (4.8.)$$

kde U_n je jmenovité napětí sítě, R je činný odpor vedení, X je induktivní reaktance vedení, P je činný výkon a Q je výkon jalový.



Obr. 16: Fázorový diagram vedení VN při kapacitním charakteru zátěže [9]

Změnou charakteru zátěže se mění fázový posuv mezi proudem a napětím, tedy proud předbíhá napětí. Důsledkem toho se mění obecný vztah pro úbytek napětí:

$$\Delta U_f = |U_{1f}| - |U_{2f}| = a - b + c \quad (4.9.)$$

Vztah pro složku c se také mění:

$$c = \frac{(X * I * \cos\varphi + R * I * \sin\varphi)^2}{2U_{1f}} \quad (4.10.)$$

Pro složku c platí stejné pravidlo jako u induktivního charakteru a tím pádem bude v následujícím vztahu zanedbána. Výsledný úbytek sdruženého napětí je:

$$\Delta U = \sqrt{3} * \Delta U_f = \sqrt{3} (R * I * \cos\varphi - X * I * \sin\varphi) \quad (4.11.)$$

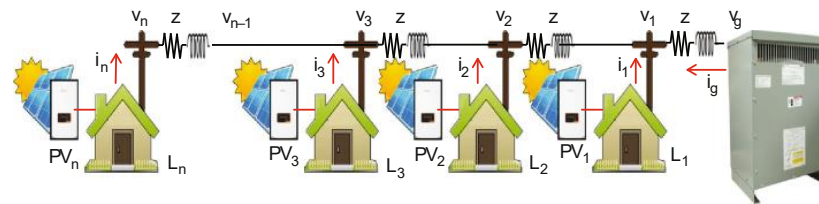
Z těchto odvozených vztahů vyplývá, že úbytek napětí lze ovlivnit jak činným, tak jalovým výkonem. V případě činného výkonu můžeme ovlivnit velikost úbytku napětí pomocí velikosti efektivní hodnoty proudu, či hodnoty účinníku. V případě jalového výkonu je možností pro změny velikosti úbytku více. Velikost jalové složky úbytku můžeme měnit hlavně charakterem zátěže, kdy změnou fázového posuvu mezi napětím a proudem dochází ke změně znaménka jalové složky. V případě induktivního odběru je jalová složka přičítána a hodnota úbytku se zvyšuje. Naopak je tomu v případě kapacitního charakteru, kdy se jalová složka odečítá a může být snižována velikost úbytku napětí. Kromě charakteru zátěže vyplývá ze vztahu také změna pomocí efektivní hodnoty proudu, či velikosti $\cos\varphi$. Velikost účinníku ovšem souvisí se změnou charakteru zátěže, a tudíž jsou tyto dvě možnosti mezi sebou navzájem propojeny. Jelikož v sítích VN značně převažuje induktivní reaktance nad činným odporem, má větší vliv na hodnotu napětí velikost, a především také charakter jalového výkonu.

4.2 Řízení činného výkonu FVE pomocí střídače

Jak jsem již mnohokrát zmínil, největší nevýhodou FVE je nepredikovatelnost a vysoká proměnlivost dodávaného výkonu v závislosti na intenzitě slunečního záření. Tento problém může být částečně řešen provedením střídače s aktivním řízením činného výkonu (APC – Active power control). Zrovnoměněním dodávky, či změnou dodávky činného výkonu v závislosti na napěťových poměrech sítě můžeme dosáhnout zlepšení kvality napětí. Ačkoli je k regulaci napětí využívána také kompenzace jalového výkonu, která má na velikost napětí větší vliv, je toto řízení vyznačováno nižšími ztrátami na vedení. Důvodem nižších ztrát je fakt, že nedochází ke změně jalové složky proudu, čímž se nezvyšují ztráty přenosem jalové energie. Další výhodou oproti kompenzaci jalového výkonu je snížení

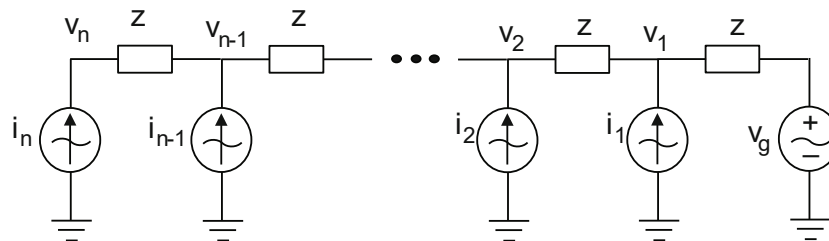
zdánlivého výkonu střídače, jelikož regulujeme činný výkon. Regulací pouze činného výkonu omezujeme jalovou složku a tím klesá jmenovitý výkon střídače i namáhání polovodičových součástek.

Jako příklad využití APC uvádím síť s vysokou koncentrací FVE. Jedná se o síť NN, která je složena z distribučního transformátoru, jednotlivých rezidencí, rozvodů sítě a fotovoltaických systémů.[10]



Obr. 17: Obytná oblast pro využití APC[10]

Pro vyšetření napěťových poměrů je vhodné nahradit obytnou oblast náhradním schématem. V tomto schématu je distribuční trafostanice nahrazena zdrojem sinusového napětí a impedancí transformátoru. Jednotlivým vedením je přiřazena jejich impedance a FVE jsou nahrazeny zdroji proudu.



Obr. 18: Náhradní schéma sítě[10]

Analýzou tohoto obvodu dostáváme rovnice pro napětí v jednotlivých uzlech:

$$U_n = U_{n-1} + Z \cdot I_n \quad (4.12.)$$

kde U_n je napětí v místě připojení poslední výroby, U_{n-1} je velikost napětí v místě připojení předcházející výroby, Z je impedance vedení a I_n je velikost dodávaného proudu do sítě.

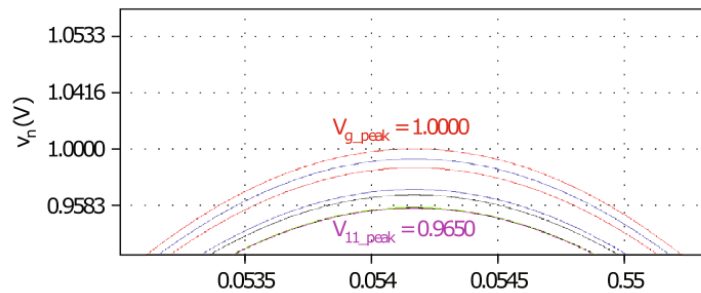
Analýzou obvodu a sestavením rovnic pro jednotlivé body sítě dostaneme soustavu rovnic, která je popsána následovně:

$$U_n = U_g + \sum_{m=1}^{n-1} I_m \cdot Z_m + \sum_{m=n}^r I_m \cdot Z_m \quad (4.13.)$$

kde n je jednotlivý bod sítě a r je celkový počet rezidencí.

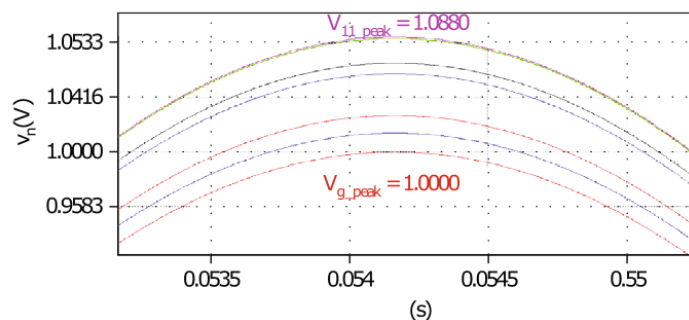
Z tohoto matematického modelu můžeme usoudit, že velikost napětí v jednotlivých bodech sítě je závislá na velikosti dodávaného/odebíraného proudu v dané části. Pro příklad byla použita síť s 11 rezidencemi v síti NN se síťovým napětím 120V. Pro zjednodušení byly vzdálenosti mezi rezidencemi uvažovány stejné, a to 11m. Pro určení impedance byly použity parametry vedení $R_k = 1,61\Omega/\text{km}$ a $X_k = 0,21\Omega/\text{km}$. [10]

Jako první výsledek simulace je stav, kdy každá rezidence požaduje odběr 4,4A. Z následujícího obrázku je patrné, že v takovém případě dochází k postupným poklesům velikostí napětí směrem od transformátoru ke konci vedení. Tedy na začátku vedení za transformátorem je hodnota nejvyšší a na konci vedení je napětí nejnižší.



Obr. 19: Velikost napětí v uzlech při odběru ze sítě [10]

Druhý výsledek je stav sítě, kdy jednotlivé rezidence dodávají výkon do sítě. V tomto případě se jedná o velikost dodávaného proudu 8,8A. Následkem dodávky dochází k opačnému napěťovému profilu než v předchozím případě. To znamená, že velikost napětí v posledním přípojném místě je zhruba o 8% vyšší než napětí na svorkách transformátoru.

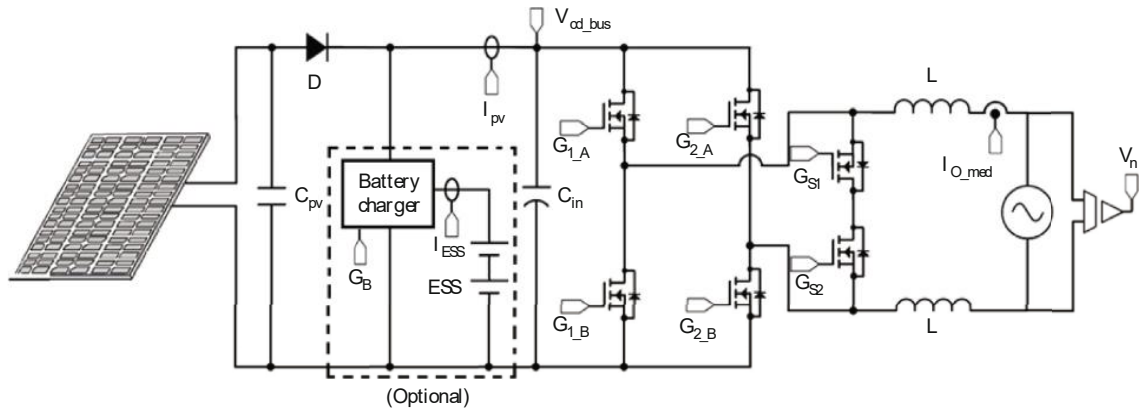


Obr. 20: Velikost napětí v uzlech při dodávce do sítě [10]

Z těchto charakteristik je dále navržena strategie pro řízení střídačů tak, aby byly co nejvíce zmírněny škodlivé účinky FVE v síti. Řízení činného výkonu je navrženo takovým

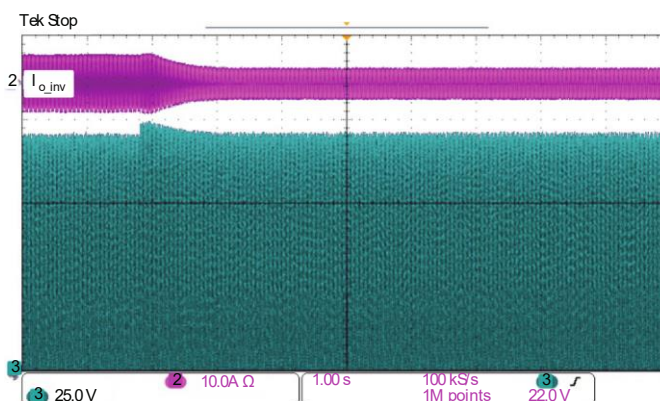
způsobem, aby při detekci přírůstku napětí došlo k omezení činného výkonu a k následnému snížení velikosti napětí k bezpečné hodnotě.

System pro řízení činného výkonu se skládá z proporcionálního rezonančního regulátoru proudu, regulátoru stejnosměrného napětí, synchronizace síťového napětí, regulátoru činného výkonu (ACP) a systému pro ukládání energie (ESS). Použití ESS není nezbytné, ovšem ukládáním energie dochází ke zlepšení efektivity a výkonu celého systému.[10]



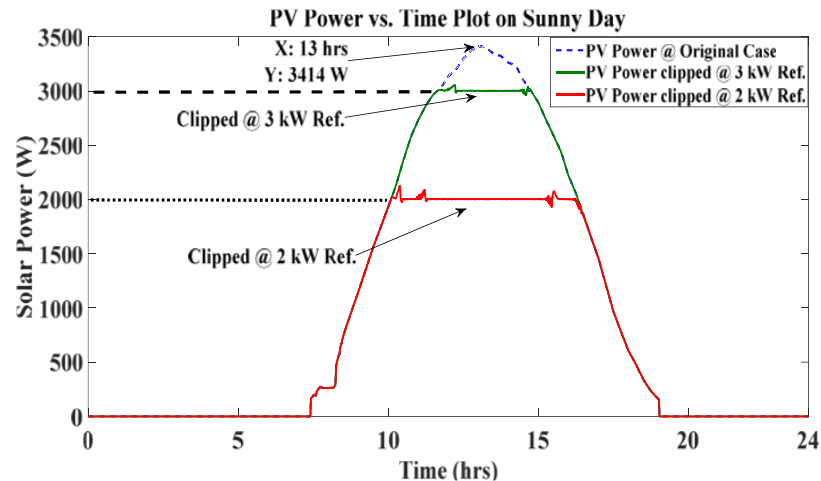
Obr. 21: Topologie střídače s ACP[10]

Příkladem působení APC uvádím následující průběh (Obr. 22), kde fialový průběh je proud dodávaný do sítě a zelený průběh je velikost napětí v místě připojení. Jedná se o situaci, kdy došlo ke zvýšení velikosti napětí nad dovolenou mez a začala regulace činného výkonu. Při navýšení napětí došlo k téměř okamžitému snížení velikosti dodávaného proudu. Z průběhu je patrné, že snižování proudu probíhá plynule až do doby, kdy dojde k ustálení velikosti napětí na požadované hodnotě.



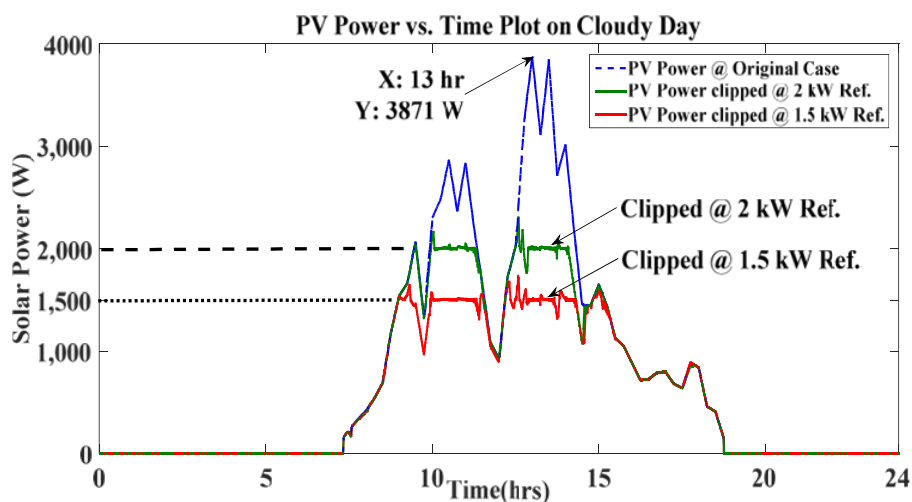
Obr. 22: Reakce ACP na zvýšení napětí [10]

Dalším příkladem využití APC uvádím FVE, která je instalována na střeše akademické budovy v IIT Kharagpur. Výstupní výkon může být nastavován v různých výkonových stupních, viz. Obr.23. V tomto případě se jedná o slunečný den, kdy je vyráběný výkon stálý a výstupní výkon je nastaven na velikost 2 nebo 3kW. [11]



Obr. 23: APC ve slunečný den[11]

V průběhu dne s proměnlivou oblačností je vyráběný výkon silně proměnlivý. Na Obr.24 uvádím příklad, kde jsou nastaveny dvě hodnoty referenčního výkonu. Z průběhu lze pozorovat, že využitím APC dochází ke značné stabilizaci výstupního výkonu. Ovšem výstupní výkon je téměř konstantní pouze v případě, že je vyráběný výkon větší než referenční hodnota. V případě poklesu velikosti vyráběného výkonu pod referenční mez již není výstupní výkon regulován a kopíruje křivku průběhu vyráběného výkonu FVE. [11]



Obr. 24: APC při oblačném dni [11]

4.3 Regulace jalového výkonu

Jak jsem již uvedl v kapitole 4.1., na velikost napětí má zásadní vliv jalový výkon. Aby byla dodržena kvalita elektrické energie a spolehlivost dodávky, je nutné udržovat napětí ve stanovených mezích za pomoci řízení jalového výkonu. V následující části rozeberu způsoby a možnosti, jak lze regulovat jalový výkon v síti.

4.3.1 Kompenzace jalového výkonu

Podstatou kompenzace jalového výkonu je snížení jalové složky, která je přenášena vedením na dlouhé vzdálenosti. To vede ke snížení ztrát, které by vznikaly přenosem jalového výkonu. Princip kompenzace spočívá ve vyrábění potřebného jalového výkonu co nejbližše směrem ke spotřebě. Typickým spotřebičem jalového výkonu může být například asynchronní motor. Zdroji kapacitního jalového výkonu mohou být kondenzátorové baterie, synchronní kompenzátory či kompenzační filtry.

Kompenzaci dělíme na individuální, skupinovou a centrální. Při individuální kompenzaci je velikost kompenzační baterie navrhována přesně, dle velikosti kompenzovaného zařízení. Toto provedení je využíváno nejčastěji u velkých motorů, jejichž provoz je stálý a není potřeba aktivně měnit jalový výkon. Dalším způsobem může být kompenzace skupinová. V tomto případě se většinou jedná o skupinu menších zařízení a kompenzační výkon je navrhován dle soudobého příkonu. Centrální kompenzace je využívána převážně u velkých výrobních závodů, kde je kompenzační zařízení umístěno v hlavním rozvaděči, nebo u transformátoru v místě připojení. Při tomto způsobu je výkon baterie opět navrhován dle celkové soudobosti všech připojených zařízení.

V případě, že se jedná o proměnlivou zátěž, je nutné, aby kompenzace byla regulovatelná. Každý velkoodběratel má distributorem předem stanovené rozmezí účinníku v přípojném místě. Při nedodržení stanového $\cos\phi$ hrozí odběrateli sankce. Aby byla dodržena velikost odebíraného jalového výkonu a hlavně charakter, musí být možnost změny velikosti kompenzačního výkonu. Regulace může být stupňovitá, kdy jsou jednotlivé sekce baterií připínány, či odpínány v závislosti na požadavcích spotřebičů. U stupňovitého řízení může být připojování provedeno kontaktně pomocí stykačů, nebo bezkontaktně pomocí výkonové elektroniky. U náročnějších aplikací, kde se odebíraný výkon mění často, by stupňovitá regulace nemusela stačit. Pro tyto případy se využívá plynulé řízení, kde se paralelně ke kompenzačnímu zařízení připojuje tlumivka s tyristorovým měničem napětí.

Výsledný kompenzační proud je dán rozdílem proudu kondenzátoru a tlumivky, přičemž proud tlumivky může být řízen od 0 do 100 % pomocí tyristorového měniče. [12]

4.3.2 Dekompensace jalového výkonu

Se stále rozšiřující se kabelizací sítí VN dochází k navyšování provozních kapacit. Důvodem zvyšování provozní kapacity je fakt, že provozní kapacita kabelového vedení je cca 30x vyšší než u vedení venkovního. S vysokou kapacitou vedení narůstá také nabíjecí výkon, který je dán následujícím vztahem:

$$Q_C = \sqrt{3} * U_N * I_C \quad (4.14.)$$

kde U_N je sdružená hodnota jmenovitého napětí sítě a I_C je nabíjecí proud vedení, který je dán vztahem:

$$I_C = \omega * C * U_f \quad (4.15.)$$

kde C je provozní kapacita vedení a U_f je fázová hodnota jmenovitého napětí sítě.

Ze vztahu pro nabíjecí proud je patrné, že kapacita vedení hraje zásadní roli a nabíjecí výkon je oproti venkovnímu vedení mnohem vyšší. V normálním stavu, kdy je vedení zatížené jmenovitě a spotřeba je převážně induktivního charakteru, může být tento výkon nápomocný ke kompenzaci induktivní složky proudu. Ovšem problém nastává zejména v nočních hodinách, kdy jsou distribuční sítě odlehčené a začne převládat kapacitní charakter jalového výkonu. Při převládání kapacitního charakteru hovoříme o tzv. přetocích jalového výkonu. Tento stav může být problematický zejména díky zvyšování hodnoty napětí v síti, kdy na konci vedení je napětí vyšší než na jeho začátku. Tento stav se nazývá Ferrantiho jev, který kromě kabelového vedení může nastat i u dlouhých venkovních vedení VVN a ZVN, jejichž provozní kapacita nabývá také vyšších hodnot. [13]

Pro eliminaci účinků nabíjecích výkonů vedení slouží dekompenzace jalového výkonu. Jedná se o opačný děj, než je kompenzace. Ovšem cíl je podobný, a sice snížení přenášeného jalového výkonu po vedení. Principem snížení kapacitní složky proudu je instalace dekompenzačních tlumivek. Proudů tekoucí dekompenzační tlumivkou jsou orientovány proti smyslu kapacitních proudů a dochází k vzájemné eliminaci těchto složek proudu. Tlumivky jsou instalovány do uzlů distribuční sítě, kde je významný podíl kabelových vedení. Stejně jako při kompenzaci pomocí kapacitního charakteru, jsou tlumivky regulovatelné, aby mohly reagovat na změny jalového výkonu v síti.

Další možností pro eliminaci kapacitních jalových výkonů v nočních hodinách může sloužit funkce střídačů „Q at night“. Tato funkce umožňuje, aby střídač dodával jalový výkon do sítě v noci bez dodávání činného výkonu. Jedná se ale o speciální střídače, které musejí být schopny funkce bez stejnosměrného napětí z FVE. Díky tomu je potřeba počítat s přídatnými provozními náklady, které jsou nezbytné pro noční provoz střídače. [14]

4.4 OLTC transformátor

Další možností pro řízení napětí v místě připojení jsou tzv. OLTC transformátory (On load tap changer). Tento druh transformátoru umožňuje změnu počtu odboček bez přerušování proudu a tím umožňuje regulaci napětí při zatížení. Transformátory s přepínáním odboček jsou využívány převážně v sítích VVN, přesněji v transformačních uzlech VVN/VN. S přibývajícím počtem decentralizovaných zdrojů se ale začínají OLTC transformátory vyskytovat i v transformačních bodech VN/NN. Využití těchto transformátorů nám umožňuje další eliminaci nepříjemných účinků proměnlivé výroby obnovitelných zdrojů. Ovšem hlavní nevýhodou těchto transformátorů je cena, která je výrazně vyšší oproti stávajícím distribučním transformátorům. Stávající transformátory VN/NN mají také možnost změny odboček, ovšem tato změna je při nezatíženém stavu a musí být provedena manuálně.

5 Akumulace elektrické energie

Akumulace přebytečné energie vyrobené pomocí FVE je základním prvkem pro optimalizaci jejího provozu. Produkce energie ze solárních systémů je převážně v časech, kdy je poptávka po elektrické energii menší. Z tohoto důvodu se nabízí ukládání nespotřebované energie pro využití v časech, kdy nesvítí slunce.

5.1 Možnosti akumulace

Pro ukládání přebytečné energie se nabízí mnoho způsobů. Jednou z nejefektivnějších možností je ukládání elektrické energie do baterií, jelikož nedochází k přeměně na jiný typ energie, což by vedlo k dalším ztrátám. Dalším způsobem mohou být uložiště tepelná, kde je využívána solární energie k ohřevu médií. Takto ohřáté médium následně slouží k výrobě elektrické energie nebo k vytápění budov. Pokud bychom na akumulaci pohlíželi ve větším měřítku, nezanedbatelným způsobem je ukládání přebytečné energie v přečerpávacích elektrárnách. V tomto případě jsou při přebytku energie poháněna čerpadla, která čerpají vodu do vyvýšených nádrží. V momentu nedostatku výkonu v síti je voda z vyšší nádrže spouštěna do spodní nádrže přes turbínu, která pohání generátor. Při přebytku energie se nabízí také možnost jejího použití pro výrobu vodíku. Pomocí elektrické energie je voda rozkládána na vodík a kyslík. Vodík je následně uchováván a může být využit pro výrobu elektrické energie pomocí palivových článků. Elektrickou energii lze také uchovávat v setrvačnicích, kde je využívána energie kinetická. Touto metodou dochází pomocí elektrické energie k roztočení setrvačnicku a v případě potřeby setrvačnick zpomalí a uvolní potřebnou energii. Ačkoli jsou výše uvedené možnosti akumulace zajímavé a bezpochyby využitelné, zaměřím se na bateriové systémy, které jsou používány ve spolupráci s FVE.

5.1.1 Olovněné baterie

Jedná se o jeden z nejrozšířenějších typů baterií pro skladování elektrické energie. Princip činnosti je založen na elektrochemických reakcích, kdy dochází k výměně nábojů mezi kladnou a zápornou elektrodou. Kladná elektroda je tvořena z oxidu olovnatého a záporná elektroda je z porézního olova. Obě elektrody jsou ponořeny v elektrolytu, který je v tomto případě kyselina sírová. V posledních letech jsou vyvíjeny nové typy olovněných baterií. Jedním z nich je tzv. bezúdržbová baterie, která je utěsněná a není potřeba ji doplňovat vodou. Dalším typem, se kterým se můžeme setkat je gelová baterie, která je

plněna gelovým elektrolytem. Použití gelu snižuje riziko úniku kyseliny sírové z baterie. Se současným trendem využívání bateriových uložišť se zvyšují požadavky na baterie. Zásadním parametrem je životnost a hustota akumulované elektrické energie. V souvislosti s tímto vývojem se využívá například oxid grafenu, čímž je zlepšována vybíjecí kapacita olovněných akumulátorů. [15]

5.1.2 Lithium-iontové baterie

Základem lithium-iontové baterie je opět děj elektrochemické reakce, při kterém dochází k nabíjení, či vybíjení. Katoda je tvořena z oxidu litného kovu a záporná elektroda je sestavena z uhlíkových materiálů. V současnosti je tato technologie nejvíce využívána. Jelikož tyto baterie oproti olovněným bateriím dosahují až dvojnásobné provozní doby, rychleji se nabíjejí a mají nejvyšší účinnost. Využití nacházejí v přenosných elektrických zařízeních, jako jsou například mobilní telefony, notebooky apod. V posledních letech však nacházejí uplatnění i v automobilovém průmyslu, a to díky rostoucímu trendu elektromobility. Rostoucí poptávka po lithium-iontové technologii vede k dalším výzkumům a dochází ke zvyšování hustoty akumulované energie, prodloužení doby provozu i zvýšení počtu cyklů. Kromě přenosných zařízení a automobilů se využívají tyto baterie také pro napájení vlastní spotřeby obytných, či komerčních budov. Tato bateriová uložiště jsou převážně připojována k síti a mohou poskytovat podpůrné služby výkonové rovnováhy. [15]

5.1.3 Průtokové baterie

Princip průtokových baterií je založen na nádržích, ve kterých je uložený elektrolyt. Fungují podobně jako olovněné baterie, ale narozdíl od olovněných je elektrolyt umístěn v externích nádržích. Tato technologie umožňuje poskytování velkého množství energie, jelikož kapacita baterií může být vyšší než 10MWh. Pokud jsou takto velké baterie připojovány do elektrizační soustavy, mohou stejně jako lithium-iontové poskytovat podpůrné služby k regulaci síťové frekvence. V současnosti jsou ale průtokové baterie příliš drahé a dosahují nízké hustoty elektrické energie. Z tohoto důvodu je využití průtokových baterií minimální. Možností pro budoucí technologie průtokových baterií se nabízí využití organických průtokových baterií. Tyto baterie by měly být schopny využívat také organické molekuly. Díky své nízké ceně a vysokému výkonu jsou organické baterie považovány jako jeden ze základních pilířů pro akumulaci elektrické energie v budoucnu. [15]

5.1.4 Sodno – sirné baterie

Tento princip akumulace je založen na katodě z roztavené síry a anodě z roztaveného sodíku. Elektrolyt je tvořen pevným keramickým materiálem, který je znám pod názvem beta oxid hlinitý sodný. Sodno – sirné baterie mohou být využívány v provozech při vyšších teplotách a mají vyšší úroveň bezpečnosti proti vnějším faktorům než ostatní druhy baterií. Nejvyšší počet instalovaných baterií je v Japonsku a USA. Značnou výhodou této technologie je schopnost reakce v období výkonové špičky, díky čemuž plní požadavky energeticky náročných aplikací. V Japonsku jsou sodno – sirné baterie využívány pro poskytování veřejných služeb a jejich celková velikost dosahuje cca 300MW. Další využití nacházejí při stabilizaci VTE a FVE při špičkových výkonech a změnách počasí. [15]

5.2 Poskytování podpůrných služeb

Provozovatel přenosové soustavy (PPS), což je v České republice společností ČEPS, a.s. má povinnost k zajištění kvality a spolehlivosti dodávky. V případě přenosové soustavy to představuje zejména regulaci frekvence a napětí. Pro zajištění systémových služeb využívá PPS podpůrné služby, které jsou poskytovány jednotlivými účastníky trhu s elektrickou energií. Podpůrné služby se dělí do dvou kategorií. První jsou služby výkonové rovnováhy (SVR), kdy se jedná o udržení rovnováhy mezi výrobou a spotřebou a slouží především k regulaci frekvence. Druhou kategorií tvoří ostatní podpůrné služby, do nichž řadíme sekundární regulaci U/Q, ostrovní provoz a start ze tmy. Zařízeními, které poskytují podpůrné služby, mohou být například bateriové systémy akumulace elektrické energie (BSAE), elektrokotle, FVE, jaderné elektrárny, parní elektrárny, plynové elektrárny, vodní a větrné elektrárny a v neposlední řadě přečerpávací elektrárny. [16]

Pro BSAE jsou uplatnitelné především služby výkonové rovnováhy. Jelikož může být energie z baterie dodávána do sítě ihned, hodí se pro služby s nejrychlejší aktivací. Pro poskytovatele SVR pomocí BSAE platí povinnost o doložení nabíjecí a vybíjecí strategie. Pokud se však jednotka nachází uvnitř agregáčního bloku, ve kterém je zprostředkováno nabíjení a vybíjení BSAE při současném poskytování SVR, není potřeba dokládat nabíjecí strategii. V případě, že v agregáčním bloku jsou pouze BSAE nebo BSAE a zařízení, která nejsou schopna poskytnout nabíjení, jedná se o tzv. stand-alone BSAE a je nutné doložit nabíjecí strategii. Nabíjecí strategie musí být navržena tak, aby bylo možné zajistit plnohodnotné a nepřetržité poskytování SVR v normálním stavu PS. [16]

5.2.1 Automatická regulace frekvence (FCR)

Jedná se o lokální automatickou funkci, která udává přesně definovanou změnu výkonu v závislosti na odchylce frekvence od zadané hodnoty. Změnu výkonu jednotky v závislosti na odchylce frekvence udává regulační rovnice:

$$\Delta P_{KORf} = - \frac{100}{S} \cdot \frac{P_n}{f_n} \cdot \Delta f \quad (5.1.)$$

kde S je statika korektoru frekvence (%), P_n je nominální výkon jednotky (MW), f_n je jmenovitá hodnota frekvence (Hz) a Δf je odchylka frekvence od jmenovité hodnoty (Hz).

K uvolnění maximální rezervované velikosti FCR dochází při hodnotě odchylky frekvence ± 200 mHz. Poskytovatel musí zajistit uvolnění 100% rezervované velikosti nejpozději do 30s od vzniku odchylky frekvence. Současně musí být schopen uvolnit 50% rezervované velikosti do 15s od vzniku odchylky frekvence. Rozsah poskytované velikosti je pro tuto službu stanoven v rozmezí 1–10MW. [16]

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

Tyto služby jsou realizované změnou hodnoty výkonu regulované jednotky. Regulace výkonu je dána požadavkem regulátoru frekvence a salda předávaných výkonů. Využití aFRR určuje algoritmus regulátoru dispečinku PPS. Poskytovatel aFRR má povinnost poskytnout rezervovanou velikost během doby do plné aktivace, která aktuálně činí 7,5 minut. Do konce roku 2024 je ale plánováno zkrácení doby plného náběhu aFRR na 5 minut. Pro tuto službu je stanoven rozsah velikostí na jedné jednotce na hodnotu v rozmezí 1-70MW. [16]

5.2.3 Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací mFRR

Změny výkonu jsou v tomto případě realizované pomocí obsluhy v závislosti na požadavku dispečinku PPS. Při standardní mFRR je udávána doba do plné aktivace 12,5 minuty. V zálohách s manuální aktivací se objevuje i služba mFRR₅, při které je doba do plné aktivace 5 minut.

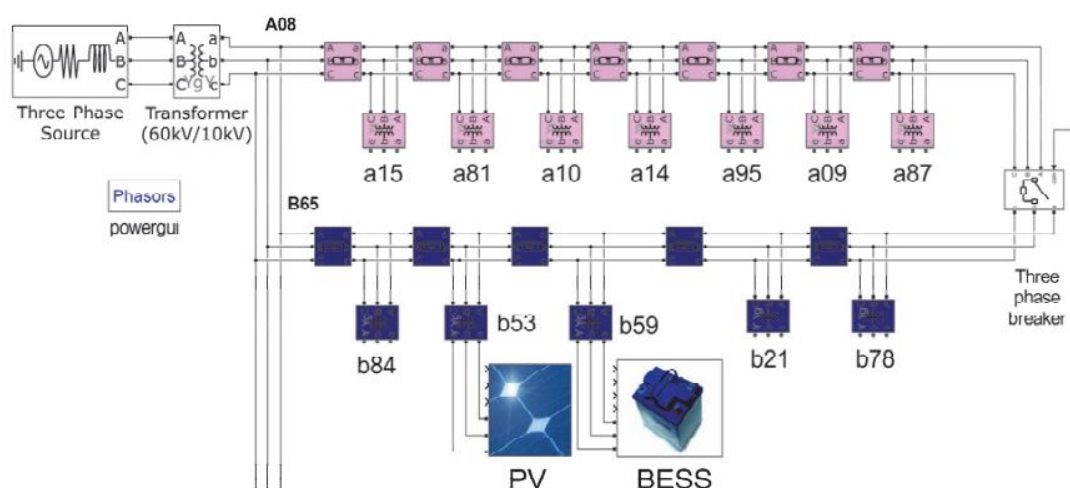
5.3 Provoz bateriového uložiště v distribuční síti

Zvyšování penetrace obnovitelných zdrojů instalovaných do DS drasticky mění způsob řízení sítě. Vyšší množství zdrojů v síti, které mají proměnlivou dodávku energie, vede ke zhoršování napěťové stability. S tímto faktem musejí provozovatelé počítat zejména při plánování výroby elektrické energie, přenosu a distribuce. V návaznosti na rozšiřování

decentralizované výroby v DS vznikají nové způsoby provozování sítí. Provoz sítí s vysokým počtem proměnlivých zdrojů klade vyšší požadavky na vybavenost sítě. Pro udržení stability a kvality elektrické energie začínají být a v budoucnu budou stále více nasazována inteligentní měřicí a regulační zařízení. Síť využívající pokročilé měřicí a regulační technologie s možností ostrovního provozu nazýváme mikrosítě, popřípadě smartgrid. Základní rozdíl mezi mikrosítí a smartgridem je v řízení výroby a spotřeby. V případě smartgrid technologie je řízena jak výroba, tak spotřeba elektrické energie, přičemž v mikrosítích řídíme pouze výrobu.

Aby byla síť schopna pokrývat výkyvy dodávky z obnovitelných zdrojů, je potřeba mít k dispozici rezervní výkon. Tento rezervní výkon může být dodáván záložními zdroji, které jsou schopny rychlého njetí na plný výkon. Mezi tyto zdroje řadíme přečerpávací vodní elektrárny či plynové elektrárny. V následujících letech s rozvojem technologií akumulace elektrické energie ale můžeme uvažovat také s možností regulace pomocí bateriových uložišť. V další části popíši případ využití BESS v síti vn a možnosti podpory sítě pomocí činného a jalového výkonu.

Pro ukázkou využití BESS v síti vn jsem zvolil článek [17], který se zabývá modelováním stávající DS 10kV v Kodani v Dánsku. Hlavním cílem tohoto článku je prozkoumání vlivu instalace 0,5MWh BESS na regulaci činného a jalového výkonu, úspory špičkového zatížení a podpory napětí. Tato modelovaná síť by se v budoucnu měla stát součástí inteligentního energetického města s více obnovitelnými zdroji energie.



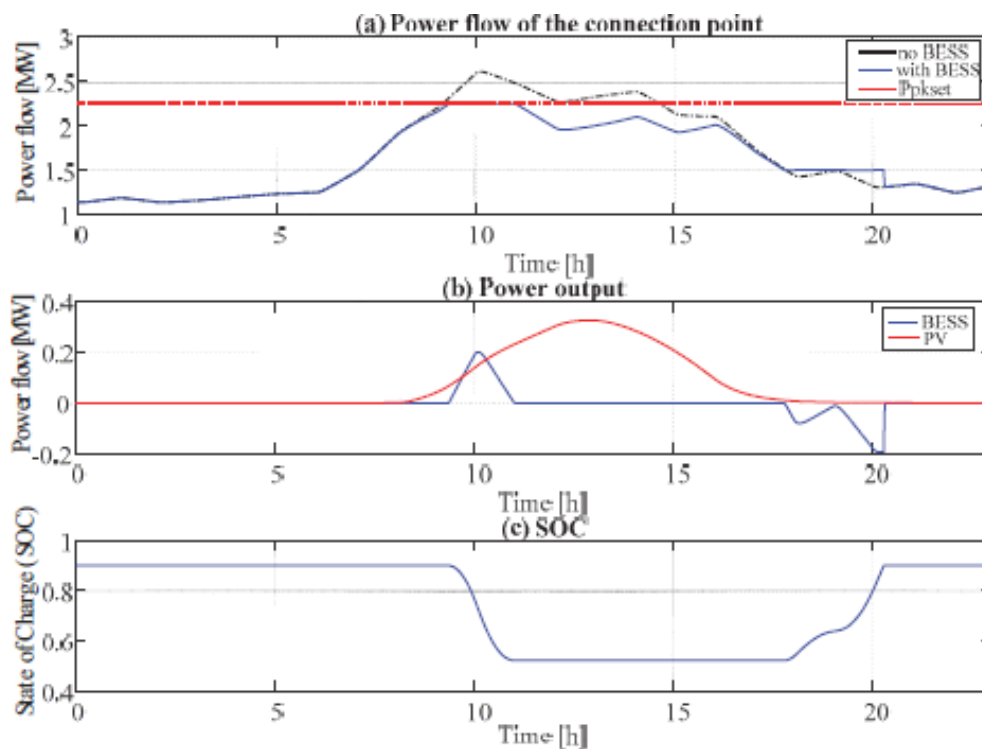
Obr. 25: Schéma modelované sítě[17]

Vybraná část sítě se skládá ze dvou paprsků, které jsou připojeny na sběrnici napájenou z transformátoru 60/10kV. V normálním provozním stavu jsou paprsky napájeny

samostatně, a jsou tedy připojeny ke sběrnici v bodech A08 a B65. Pro zvýšení provozní spolehlivosti sítě jsou tyto dva paprsky spojeny vypínačem, který může být sepnut pro zajištění napájení z druhé strany v případě poruchy na jednom z paprsků.

5.3.1 Řízení činného výkonu BESS

Algoritmus řízení činného výkonu BESS může zvýšit možnosti využívání distribuční sítě a snížit zatížení sítě pomocí tzv. „peak load shaving“ funkce. Pro algoritmus je nutné určit velikost špičkového výkonu P_{pkset} a velikost minimálního výkonu $P_{offpkset}$. Dále se vypočte aktuální výkon přenášený vedením P a stav nabití baterie (SOC – state of charge). Následně algoritmus vyhodnotí SOC a určí, zda je baterie schopna poskytnout danou službu. Pokud je SOC v mezích, může být sníženo špičkové zatížení sítě, v opačném případě zůstává BESS neakční. Poté, když je výkon v síti vyšší, než je nastavená hodnota P_{pkset} , začne se baterie vybíjet výkonem P_{out} . V případě, že je výkon sítě pod hodnotou $P_{offpkset}$, dochází k nabíjení baterie výkonem o velikosti $-P_{out}$.



Obr. 26: Regulace činného výkonu pomocí BESS[17]

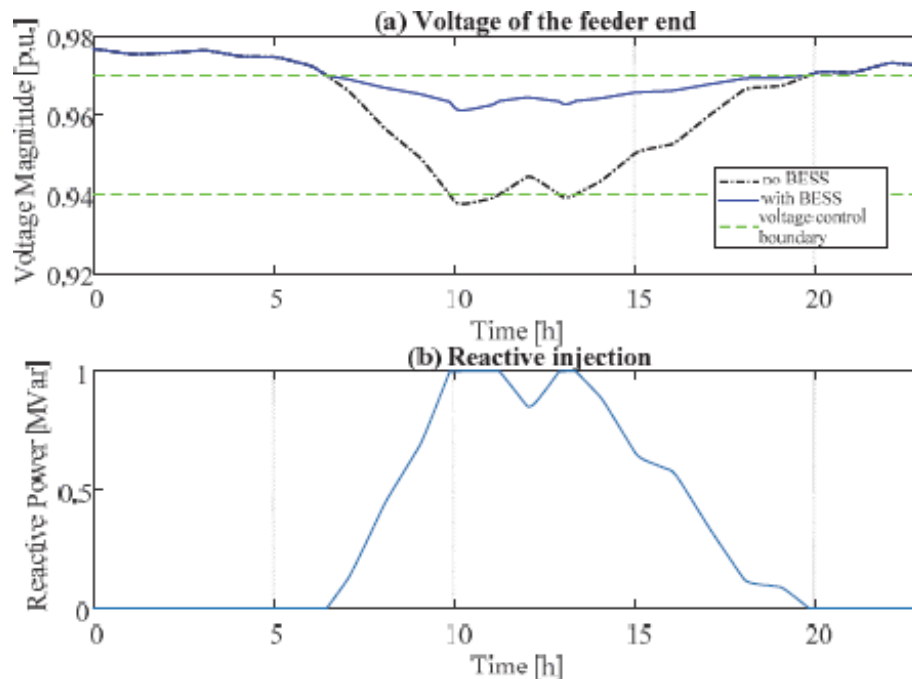
Na Obr.26. lze vidět ukázkou funkce peak load shaving prostřednictvím BESS. Hodnota P_{pkset} je nastavena na 2,5MW a $P_{offpkset}$ na 1,5MW. Na prostředním grafu je znázorněn průběh činného výkonu BESS a FVE připojené do sítě, jejíž instalovaný výkon je 700kW. Na horním průběhu lze vidět, jak je činný výkon sítě řízen. V případě, že je

aktuální výkon vyšší, než je nastavená hodnota špičkového výkonu a baterie má optimální SOC, dochází k vybití baterie a odlehčení části sítě. Pokud je síť méně zatížená a výkon je ve stanovených mezích, zůstává BESS neaktivní. K dobíjení baterie dochází v případě, kdy je síť méně zatížena, to znamená že výkon v síti klesne pod nastavenou hodnotu P_{offpkset} .

5.3.2 Řízení jalového výkonu

V algoritmu BESS pro řízení velikosti napětí jsou klíčové hodnoty V_{ref} , neboli jmenovitá hodnota napětí a hodnoty V_{low} a V_{upp} , což jsou hraniční velikosti napětí, při nichž je aktivována regulace pomocí jalového výkonu. Velikosti a strmost, jakou má zdroj regulovat, udává PDS pomocí Q-U diagramu, který jsem uvedl v části 3.4.2.

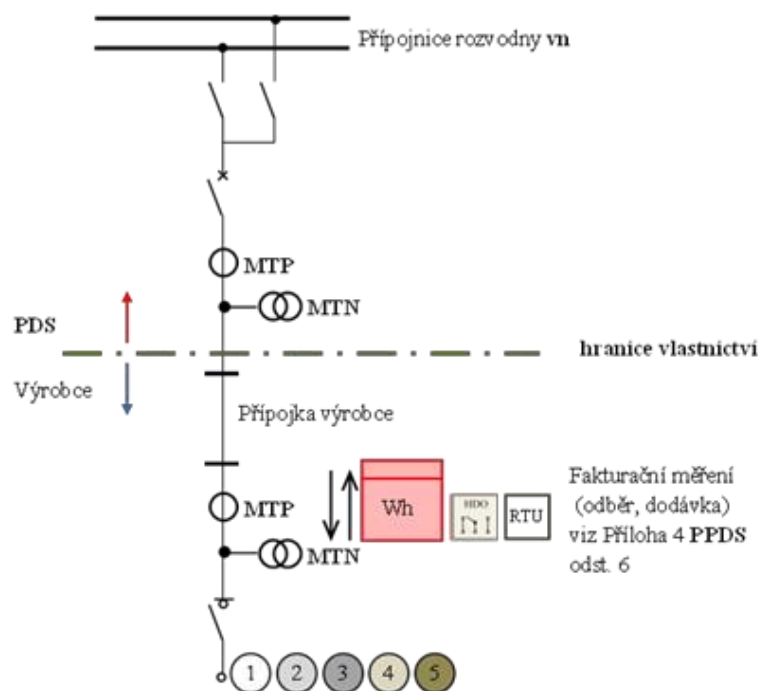
Pro případ této sítě byl simulován stav, kdy je sepnut vypínač mezi paprsky a je tak vytvořen jeden dlouhý paprsek, který je napájen z jednoho místa. Důsledkem dlouhého vedení a jeho vyšší impedance je úbytek na konci vedení značný. Při této konfiguraci je velikost napětí v bodě B65 výrazně nižší, než je tomu v normálním stavu, kdy je tento bod připojen ke sběrnici napájené z transformátoru 60/10kV. V následujícím grafu lze vidět průběh napětí, které by bez regulace jalového výkonu kleslo pod povolenou mez. Při poklesu pod horní mez velikosti napětí začíná zdroj kompenzovat jalovým výkonem a udržuje napětí téměř konstantní. Z průběhu dodávaného jalového výkonu lze vidět, že při poklesu pod dolní mez je aktivována plná regulace a zdroj dodává maximální možný výkon.



Obr. 27: Q-U regulace BESS[17]

5.4 Způsob připojování výroben s akumulacním zařízením

Pro zhodnocení možností, jak lze připojovat výrobní s akumulacním zařízením do sítí VN, vycházím z PPDS. První možností je připojení k venkovnímu vedení pomocí přípojky ze strany výrobce. V případě připojování výrobní ke kabelovému vedení VN by požadavky na vybavení byly obdobné. Jediný rozdíl v připojení by byl v provedení, jelikož u kabelového vedení se využívá způsob zasmyčkování. Připojení pomocí T spojek je u kabelů také možné, ale je problematické z hlediska provozní spolehlivosti. Další možností je připojení samostatným vedením, které je vyvedené do rozvodny DS.



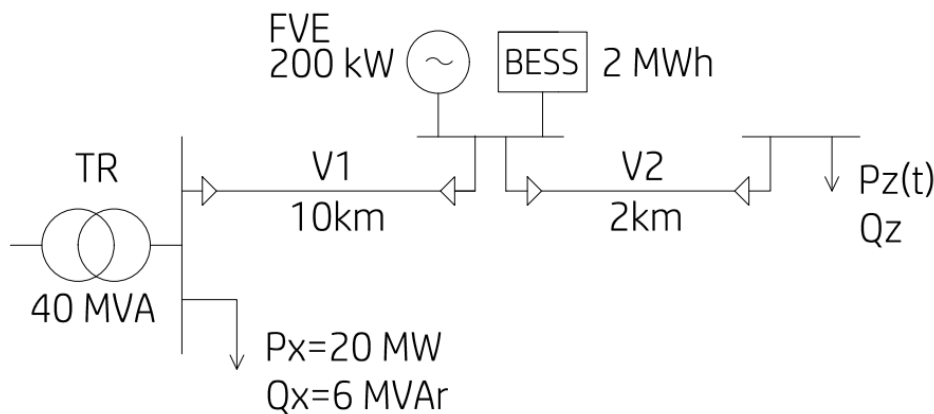
Obr. 28: Připojení do rozvodny vn[8]

Z hlediska připojovaného zařízení (body 1, 2, 3, 4, 5 na Obr.28.) se v mém případě může jednat o výrobní s akumulací bez provozní podpory, či s provozní podporou.

6 Řešení případu konkrétní sítě s BESS

Ve spolupráci s konzultantem Ing. Františkem Žákem, Ph.D. byla zvolena následující topologie sítě VN. Síť je složena z transformátoru 110/22kV, vyšetřovaný paprsek je realizován pomocí kabelového vedení. Na konci paprsku se nachází významný odběr se značně proměnlivou spotřebou a před ním je ve vzdálenosti 2 km umístěna FVE s BESS. V této síti budu vyhodnocovat napěťové poměry pomocí analytického výpočtu a následně budu posuzovat další možnosti využití BESS pomocí simulačního programu GridCal.

6.1 Početní řešení sítě



Obr. 29: Topologie sítě

Následující parametry součástí sítě jsem volil na doporučení konzultanta z katalogů firem ETD Transformátory a.s. a NKT s.r.o.

Transformátor

Tab. 3: Parametry transformátoru

Transformátor 110/22kV, 40MVA	
Napětí nakrátko u_k (%)	11,5
Zdánlivý výkon S (MVA)	40
Ztráty naprázdno ΔP_0 (kW)	19,5
Ztráty nakrátko ΔP_k (kW)	110
Proud naprázdno i_0 (%)	0,15

$$Z_t = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{22000^2}{40 \cdot 10^6} = 1,39\Omega \quad (6.1.)$$

$$R_t = \frac{\Delta P_k \cdot U_N^2}{S_N^2} = \frac{19500 \cdot 22000^2}{(40 \cdot 10^6)^2} = 0,033\Omega \quad (6.2.)$$

$$X_t = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{1,39^2 - 0,033^2} = 1,389 \Omega \quad (6.3.)$$

$$Y_q = \frac{i_0}{100} \cdot \frac{S_N}{U_N^2} = \frac{0,15}{100} \cdot \frac{40}{22^2} = 0,000124S \quad (6.4.)$$

$$G_{FE} = \frac{\Delta P_0}{U_N^2} = \frac{19500}{22000^2} = 0,0403mS \quad (6.5.)$$

$$B_m = \sqrt{Y_q^2 - G_{FE}^2} = \sqrt{0,000124^2 - 0,00000403^2} = 0,000117S \quad (6.6.)$$

Parametry vedení

Tab. 4: Parametry kabelu

22-AXEKCE	
Průřez vodiče (mm^2)	95
Činný odpor (Ω/km)	0,32
Indukčnost (mH/km)	0,4
Kapacita ($\mu F/km$)	0,21

Vedení V1:

$$R_{V1} = R_k \cdot l_1 = 0,32 \cdot 10 = 3,2\Omega \quad (6.7.)$$

$$X_{V1} = L_k \cdot l_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 = 1,2566\Omega \quad (6.8.)$$

$$X_{c1} = \frac{1}{C_k \cdot l_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{1}{0,21 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 1515,8\Omega \quad (6.9.)$$

Vedení V2:

$$R_{V2} = R_k \cdot l_2 = 0,32 \cdot 2 = 0,64\Omega \quad (6.10.)$$

$$X_{V2} = L_k \cdot l_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 = 0,2513\Omega \quad (6.11.)$$

$$X_{c1} = \frac{1}{C_k \cdot l_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{1}{0,21 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 7578,8\Omega \quad (6.12.)$$

Impedance zátěže Z_X :

$$P_X = 20MW, Q_X = 6MVar$$

$$\overline{Z}_X = \frac{U_N^2}{P_X - jQ_X} = \frac{22000^2}{20 \cdot 10^6 - j \cdot 6 \cdot 10^6} = 22,2018 + 6,6606j\Omega \quad (6.13.)$$

Impedance zátěže Z_Z :

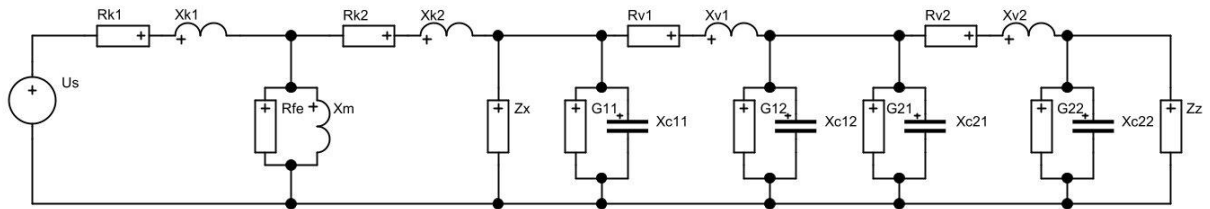
$$P_Z = 2,5\text{MW}, \cos\varphi = 0,93$$

$$Q_Z = \tan(\varphi) \cdot P_Z = \tan(\arccos(0,93)) \cdot 2,5 = 0,988\text{MVA}r \quad (6.14.)$$

$$\bar{Z}_Z = \frac{U_N^2}{P_Z - jQ_Z} = \frac{22000^2}{2,5 \cdot 10^6 - j \cdot 0,988 \cdot 10^6} = 167,44 + 66,178j \Omega \quad (6.15.)$$

Náhradní schéma sítě:

Pro řešení napěťových poměrů nahradím jednotlivé prvky náhradními parametry. Jednotlivá vedení jsou nahrazena pomocí π – článků a zátěže jsou nahrazeny impedancí, odpovídající velikosti odebíraného výkonu.



Obr. 30: Náhradní schéma sítě

Následně nahradím spojení prvků ve větvích impedancemi:

$$\bar{Z}_{t1} = \bar{Z}_{t2} = \frac{R_t}{2} + j \frac{X_t}{2} = 0,0166 + 0,6956j\Omega \quad (6.16.)$$

$$\bar{Z}_m = \left(\frac{1}{R_{FE}} + j \frac{1}{X_m} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{G_{FE}} + j \frac{1}{X_m} \right)^{-1} = 2\,621,7 + 7\,628,8j\Omega \quad (6.17.)$$

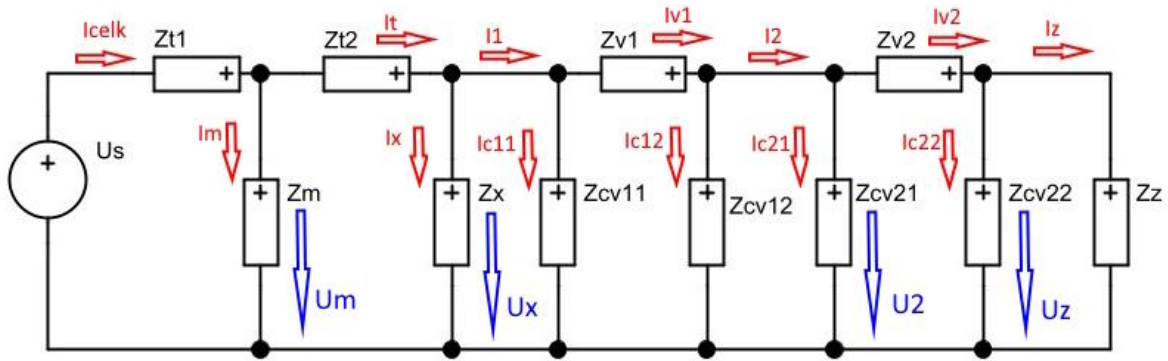
$$\bar{Z}_{CV11} = \bar{Z}_{CV12} = -j \cdot X_{c1} \cdot 2 = -3031,5j\Omega \quad (6.18.)$$

$$\bar{Z}_{V1} = R_{V1} + jX_{V1} = 3,2 + 1,2566j\Omega \quad (6.19.)$$

$$\bar{Z}_{CV21} = \bar{Z}_{CV22} = -j \cdot X_{c2} \cdot 2 = -15\,158j\Omega \quad (6.20.)$$

$$\bar{Z}_{V2} = R_{V2} + jX_{V2} = 0,64 + 0,2513j\Omega \quad (6.21.)$$

Z těchto impedancí lze sestavit následující schéma:



Obr. 31: Náhradní schéma impedancí

Dalším krokem je výpočet celkové impedance:

$$\overline{Z}_A = \left(\frac{1}{\overline{Z}_Z} + \frac{1}{\overline{Z}_{CV22}} \right)^{-1} = 168,9 + 64,595j\Omega \quad (6.22.)$$

$$\overline{Z}_B = \left(\frac{1}{\overline{Z}_A + \overline{Z}_{V2}} + \frac{1}{\overline{Z}_{CV21}} \right)^{-1} = 170,97 + 63,204j\Omega \quad (6.23.)$$

$$\overline{Z}_C = \overline{Z}_{V1} + \left(\frac{1}{\overline{Z}_B} + \frac{1}{\overline{Z}_{CV12}} \right)^{-1} = 180,94 + 55,569j\Omega \quad (6.24.)$$

$$\overline{Z}_D = \left(\frac{1}{\overline{Z}_{CV11}} + \frac{1}{\overline{Z}_C} \right)^{-1} = 187,07 + 45,232j\Omega \quad (6.25.)$$

$$\overline{Z}_E = \left(\frac{1}{\overline{Z}_X} + \frac{1}{\overline{Z}_D} \right)^{-1} = 19,8524 + 5,8299j\Omega \quad (6.26.)$$

$$\overline{Z}_F = \left(\frac{1}{\overline{Z}_m} + \frac{1}{\overline{Z}_E + \overline{Z}_{t2}} \right)^{-1} = 19,8245 + 6,5561j\Omega \quad (6.27.)$$

$$\overline{Z}_{celk} = \overline{Z}_F + \overline{Z}_{t1} = 19,8411 + 7,2517j\Omega \quad (6.28.)$$

Z celkové impedance lze určit celkový proud tekoucí ze zdroje:

$$\overline{I}_{celk} = \frac{\overline{U}_f}{\overline{Z}_{celk}} = \frac{\frac{22000}{\sqrt{3}}}{19,8411 + 7,2517j\Omega} = 564,73 - 206,4jA \quad (6.29.)$$

Z celkového proudu dále vypočítám větvové proudy:

$$\bar{I}_m = \bar{I}_{celk} \cdot \frac{\bar{Z}_E + \bar{Z}_{t2}}{\bar{Z}_E + \bar{Z}_{t2} + \bar{Z}_m} = 0,4599 - 1,4869jA \quad (6.30.)$$

$$\bar{I}_t = \bar{I}_{celk} - \bar{I}_m = 564,27 - 204,92jA \quad (6.31.)$$

$$\bar{I}_X = \bar{I}_t \cdot \frac{\bar{Z}_D}{\bar{Z}_X + \bar{Z}_D} = 502,62 - 185,85jA \quad (6.32.)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_t - \bar{I}_X = 61,6571 - 19,0692jA \quad (6.33.)$$

$$\bar{I}_{C11} = \bar{I}_1 \cdot \frac{\bar{Z}_C}{\bar{Z}_{Cv11} + \bar{Z}_C} = 0,2568 + 4,0893jA \quad (6.34.)$$

$$\bar{I}_{V1} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{C11} = 61,4003 - 23,1585jA \quad (6.35.)$$

$$\bar{I}_{C12} = \bar{I}_{V1} \cdot \frac{\bar{Z}_B}{\bar{Z}_{Cv12} + \bar{Z}_B} = 0,2578 + 4,0149jA \quad (6.36.)$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{V1} - \bar{I}_{C12} = 61,1425 - 27,1734jA \quad (6.37.)$$

$$\bar{I}_{C121} = \bar{I}_2 \cdot \frac{\bar{Z}_A + \bar{Z}_{V2}}{\bar{Z}_{C21} + \bar{Z}_A + \bar{Z}_{V2}} = 0,0516 + 0,8030jA \quad (6.38.)$$

$$\bar{I}_{V2} = \bar{I}_2 - \bar{I}_{C121} = 61,091 - 27,9764jA \quad (6.39.)$$

$$\bar{I}_{C22} = \bar{I}_{V2} \cdot \frac{\bar{Z}_Z}{\bar{Z}_Z + \bar{Z}_{C22}} = 0,0422 + 0,7971jA \quad (6.40.)$$

$$\bar{I}_Z = \bar{I}_{V2} - \bar{I}_{C22} = 61,0487 - 28,7734jA \quad (6.41.)$$

Nakonec ze znalosti proudů lze určit napěťové poměry:

$$U_m = U_N - |I_{celk}| \cdot |Z_{t1}| \cdot \sqrt{3} = 21,746kV \quad (6.42.)$$

$$U_t = U_m - |I_t| \cdot |Z_{t2}| \cdot \sqrt{3} = 21,514kV \quad (6.43.)$$

$$U_2 = U_t - |I_{v1}| \cdot |Z_{V1}| \cdot \sqrt{3} = 21,125kV \quad (6.44.)$$

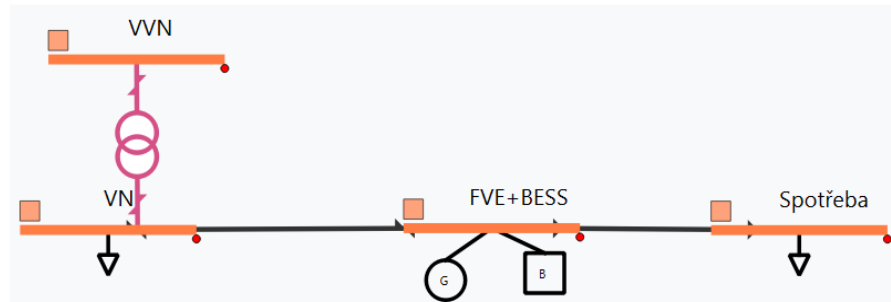
$$U_Z = U_2 - |I_{v2}| \cdot |Z_{V2}| \cdot \sqrt{3} = 21,045kV \quad (6.45.)$$

Celkový úbytek napětí v paprsku je dán vztahem:

$$u_{\%} = \frac{U_N - U_Z}{U_N} \cdot 100 = \frac{22000 - 21045}{22000} \cdot 100 = 4.34\% \quad (6.46.)$$

6.2 Simulace

Simulace jsem provedl v programu Gridcal. Jedná se o simulační program, který je volně dostupný. Tento software je určen pro plánování a simulování energetických systémů, umožňuje provádět několik druhů statických analýz a nabízí také optimalizační funkce. Do mé práce jsem zvolil tento program zejména díky možnosti tzv. „power flow time series“ simulací, do kterých lze nahrát vstupní soubory pomocí tabulek.



Obr. 32: Schéma sítě v GridCal

Na Obr.32 uvádím schéma, které jsou použil pro výpočet simulací. Pro správnou funkci programu je ale potřeba zadat jednotlivé parametry vedení v poměrných jednotkách.

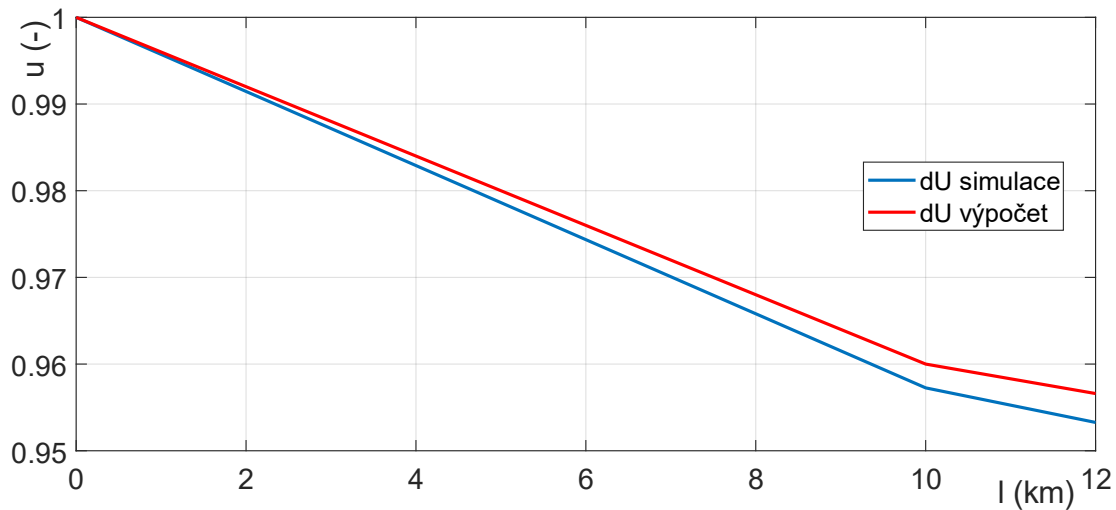
Pro výpočet poměrných jednotek volím vztažný výkon $S_V = 50\text{MVA}$ a vztažné napětí U_V jako hodnotu jmenovitého napětí sítě, tedy 22kV . Níže uvádím výpočet pro vedení V_1 , výpočet pro vedení V_2 a transformátor je proveden obdobně.

$$r_{v1} = R_{v1} \frac{S_V}{U_V^2} = 3,2 \cdot \frac{50}{22^2} = 0,3306 \quad (6.47.)$$

$$x_{v1} = X_{v1} \frac{S_V}{U_V^2} = 1,257 \cdot \frac{50}{22^2} = 0,1299 \quad (6.48.)$$

$$b_{v1} = B_{v1} \frac{U_V^2}{S_V} = 0,0006597 \cdot \frac{22^2}{50} = 0,006386 \quad (6.49.)$$

Pro ověření, zda mnou spočítané výsledky odpovídají hodnotám ze simulace, nasimuluji výše spočtenou situaci. V tomto případě je neaktivní výroba FVE i BESS a na konci paprsku je odběr o velikosti $2,5\text{MW}$ činného a $0,988\text{MVAr}$ jalového výkonu. Zbytek sítě zatěžuje transformátor výkonem 20MW a 6MVAr . Pro zhodnocení srovnatelných výsledků uvádím graf napěťového profilu podél délek vedení jednotlivých úseků.

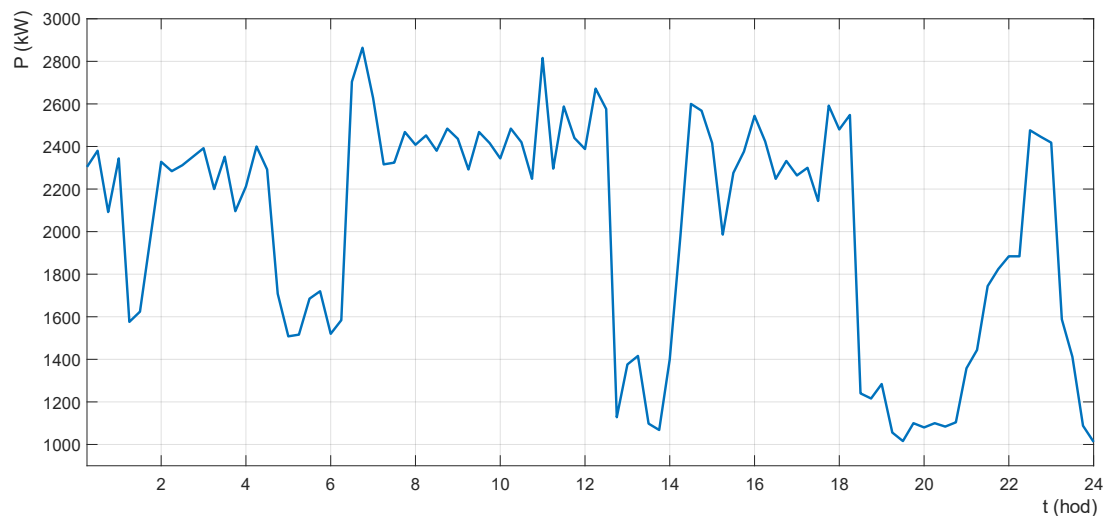


Obr. 33: Velikost napětí podél vedení

Z výše uvedeného grafu je patrná mírná odchylka ve výsledném úbytku. Dle mého názoru může být tato chyba způsobena různými metodami výpočtu, jelikož program GridCal využívá Newton-Raphsonovu numerickou metodu. Další možnou nepřesnost jsem mohl vnést do výpočtu zaokrouhlováním.

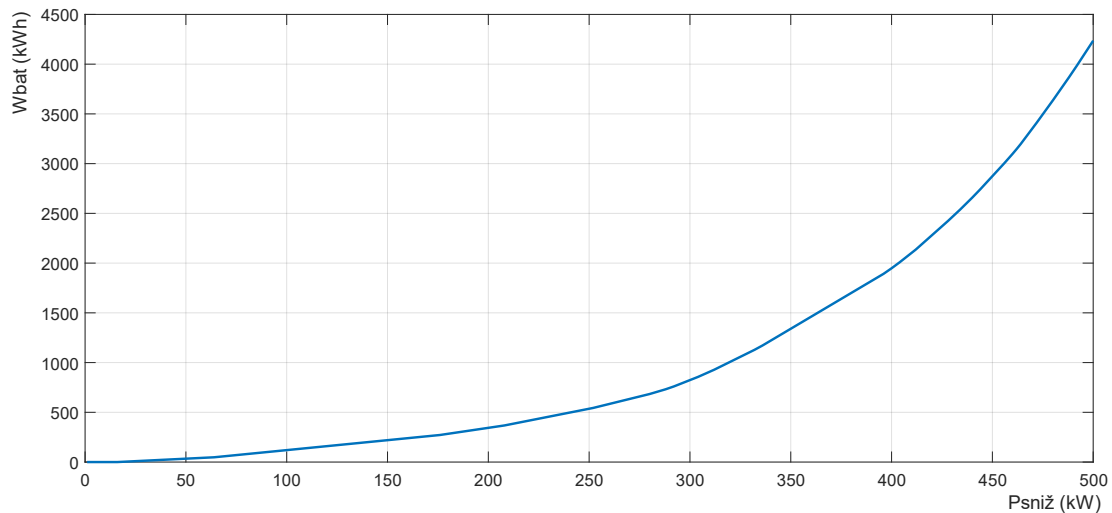
6.3 Snížení rezervované kapacity odběru

Pro další výpočty budu uvažovat charakteristiku odběru, která mi byla poskytnuta konzultantem. Jedná se o významný odběr připojený do sítě 22kV, jehož špičkové hodnoty dosahují až téměř 2,9MW. Jelikož je odběr silně proměnlivý, je výhodné využít bateriové uložiště pro pokrývání výkonových špiček.



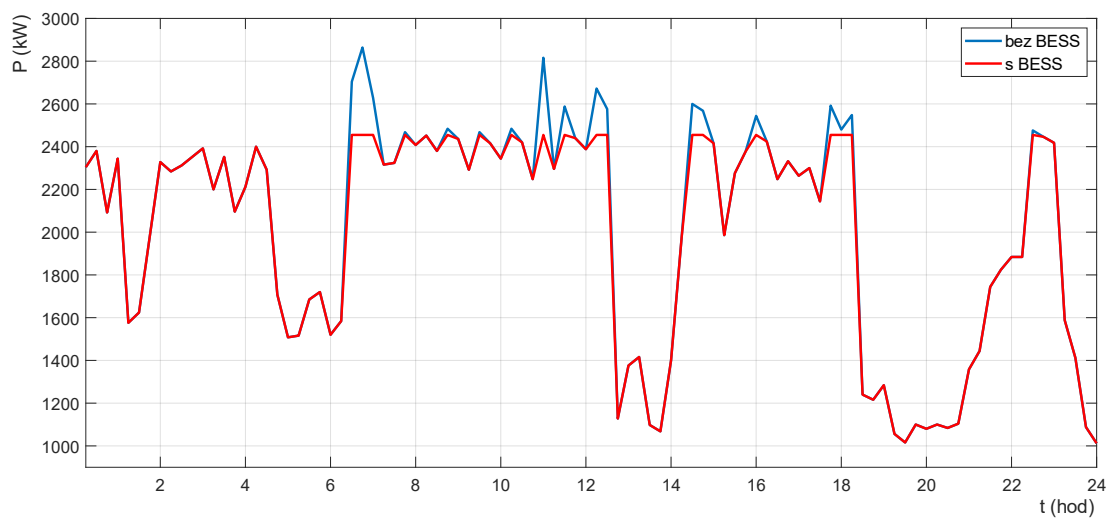
Obr. 34: Průběh odebíraného výkonu

Na základě rad od konzultanta jsem zvolil pro vyrovnávání tohoto odběru bateriové uložiště o kapacitě 2MWh. Jedná se o typ baterie 1C, což znamená, že je schopna dodávat maximální výkon o velikosti 2MW. Pro určení velikosti úspory rezervované kapacity jsem využil program Matlab, skript s výpočtem viz. Příloha 1.



Obr. 35: Závislost kapacity BESS na snížení příkonu

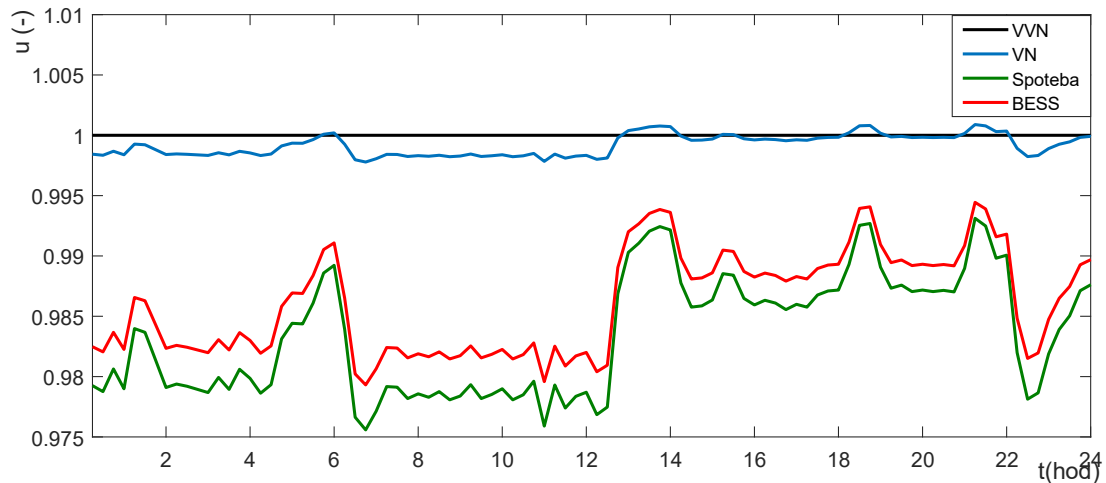
Dle hodnot, ze kterých je sestaven výše uvedený graf, umožňuje využití BESS s kapacitou 2MWh snížení rezervovaného příkonu o 403kW. To znamená, že ze špičkových hodnot (viz. Obr.34), které dosahují až 2864kW, lze snížit maximální odebíraný výkon na hodnotu 2461kW. Výsledný průběh odebíraného výkonu při využití tohoto BESS uvádím na Obr.36.



Obr. 36: Porovnání odebraného výkonu ze sítě s a bez BESS

6.4 Napětové poměry

Pro demonstraci vlivu odběru na konci vedení na napětové poměry nejdříve simulují situaci, kdy není aktivní BESS ani FVE. Jedná se tedy o stav, kdy není žádným způsobem řízen tok činného výkonu ani velikost napětí v síti.

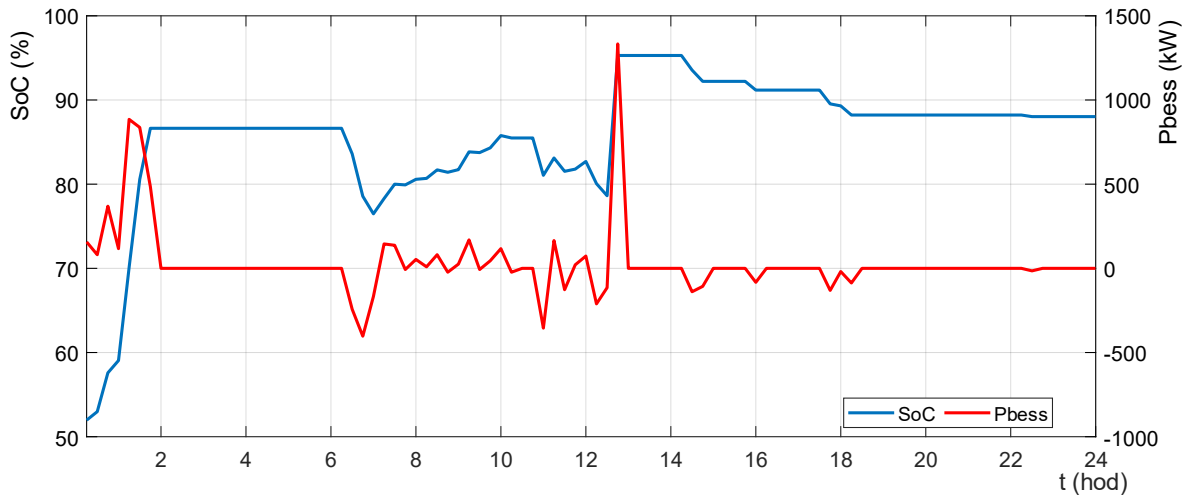


Obr. 37: Napětové poměry v síti

Z grafu je patrné, jak velký vliv na napětí má skoková proměnlivost odebíraného výkonu. Napětí v místě U_{VVN} je uvažováno na straně transformátoru 110kV a představuje tedy tvrdou síť. Napětí U_{tr} reprezentuje velikost napětí na sekundární straně transformátoru, tedy 22kV. V tomto místě již lze pozorovat určité změny v úbytcích, které ovšem nejsou tak razantní jako ve vyšetřovaném paprsku. Úbytky napětí nabývají nejvyšších hodnot v místě konečného odběru, kde dosahují až 5 %. Dále se budu věnovat aplikaci BESS a možnostem, kterými lze zmírnit negativní účinky na napětové poměry. Pro návrh velikostí dodávaného, či odebíraného výkonu BESS jsem opět využil program Matlab, přičemž skript výpočtu je uveden v Příloze č.2. Dle rad konzultanta nastavuji horní mez nabíjení, tedy parametr SoC (State of Charge) na 85 %. Dolní mez je nastavena na 15 %. Výkon, který je schopno BESS dodávat/odebírat dosahuje velikosti 2MW, jelikož se jedná o typ baterie 1C. Po dobu výpočtu je kontrolována hodnota SoC. Na základě hodnoty SoC algoritmus vyhodnocuje, zda může baterie výkon do sítě dodávat, nebo naopak odebírat. To znamená, že při překročení stavu nabití 85% baterie nedobíjí a v případě poklesu energie pod 15% již baterie přestává poskytovat činný výkon. První výpočet průběhu výkonu BESS je pro výše spočtenou hodnotu sníženého výkonu, tedy 2461kW.

Z níže uvedeného Obr.38 lze vidět, jak je baterie využívána pro stabilizaci činného výkonu v síti. Pro lepší znázornění uvádím navíc závislost SoC. Z obou průběhů lze říci,

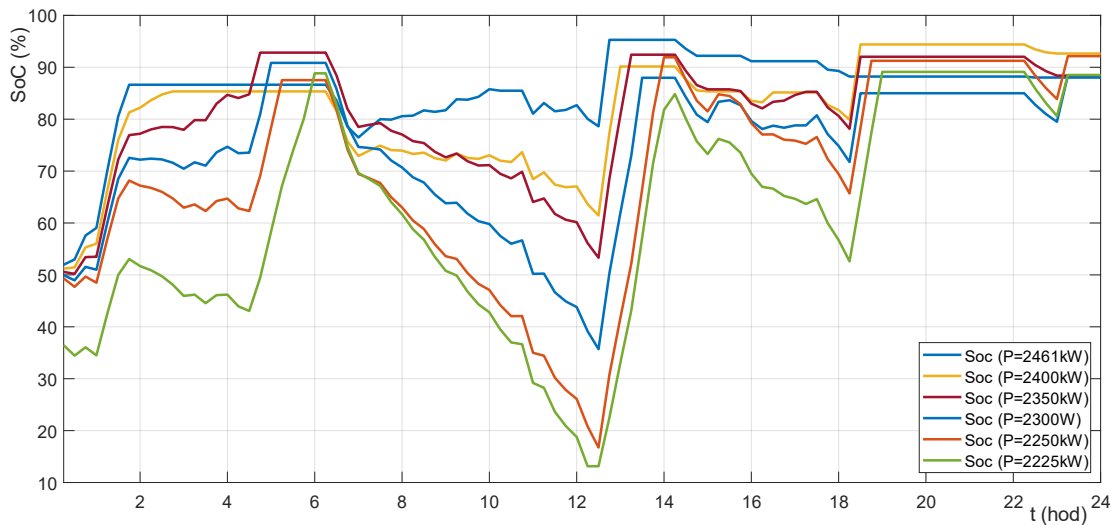
že baterie je využita značně pod své možnosti, a proto v následujících výpočtech budu volit optimální snížení rezervované kapacity odběru tak, aby bylo BESS využito co možná nejvíce.



Obr. 38: Závislost SoC a PBESS

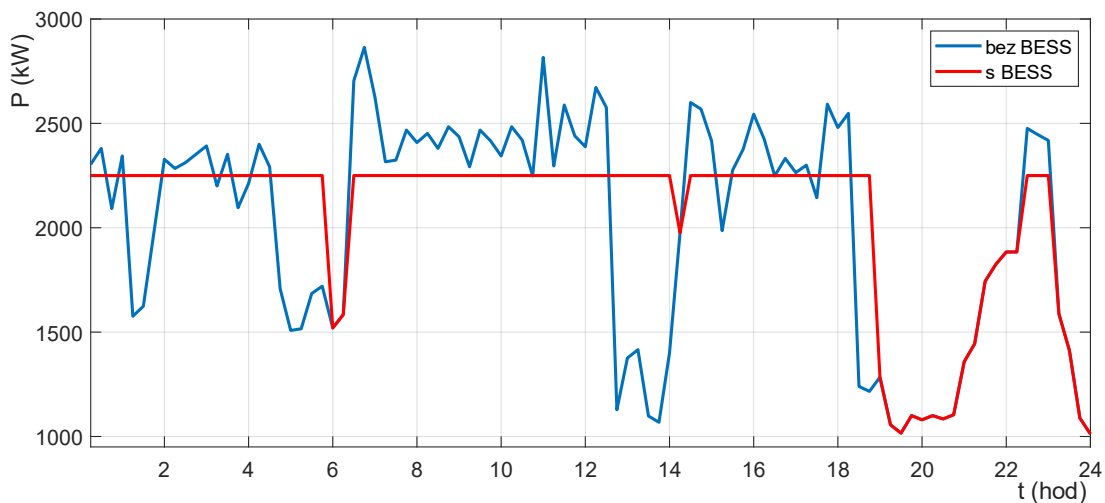
6.5 Optimalizace využití BESS

Jelikož charakteristika odebíraného výkonu má razantní změny, mezi nimiž je dostatek prostoru pro dobíjení baterie, nabízí se návrh nového snížení rezervované kapacity. Předchozí výpočet vycházel pouze z velikosti energie, která je potřeba pro pokrytí výkonových špiček. Dle velikosti potřebné energie a velikosti baterie jsem následně určil velikost snížení rezervovaného příkonu o 403kW. Jak lze vidět z výše uvedeného obrázku, baterie se stále pohybuje kolem horní hranice SoC a v některých případech i překračuje hranici 85 %. Překročení hranice 85 % SoC je dáno hodnotami výkonu, které mi byly poskytnuty v 15minutových intervalech. V případě, že je dobíjecí výkon po dobu 15 minut dostatečně velký, dosahuje SoC vyšší hodnoty, než je předem daná horní mez.

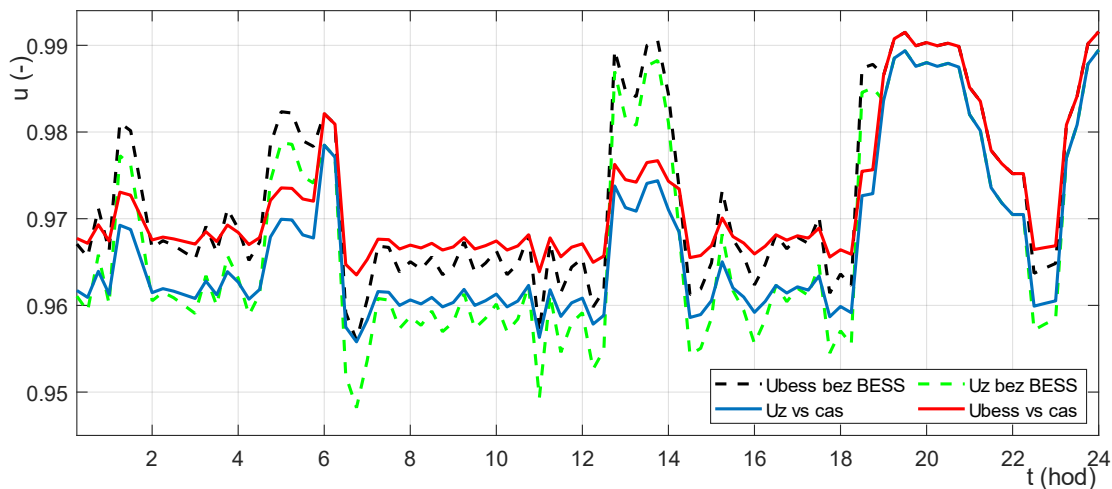


Obr. 39: Porovnání SoC v závislosti na snižování rezervovaného příkonu

Z výše uvedeného grafu vychází možnost snížení rezervovaného příkonu až na hodnotu 2225kW. Při tomto snížení už se ale hodnota SoC dotýká 15 %. Pro šetrnější cyklování baterie a zároveň určitou rezervu volím na základě průběhu SoC hodnotu 2250kW.

Obr. 40: Průběh odebíraného výkonu po úpravě na $P_{rez} = 2250\text{kW}$

S navýšením využití baterie dochází k zásadnímu vyrovnání charakteristiky odebíraného výkonu v porovnání s předchozí charakteristikou (viz. Obr. 36). Zrovnoměnění odebíraného výkonu se projeví především na napěťových poměrech. Jelikož jsou všechny výrazné špičky odebíraného výkonu seříznuty, měla by být spodní mez velikosti napětí na konci vedení posunuta směrem k jmenovité hodnotě.

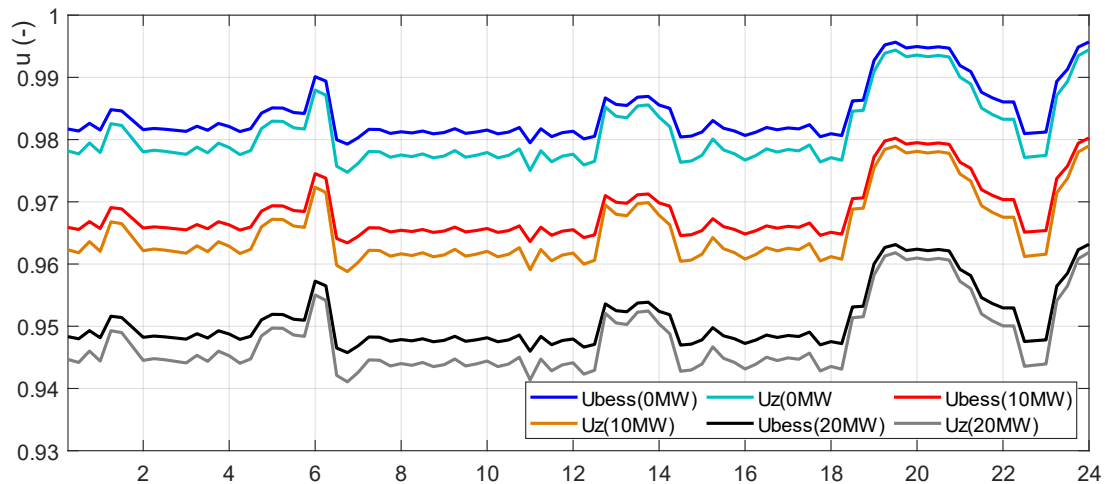


Obr. 41: Velikost napětí s a bez BESS

Z obr.41 lze říci, že využití bateriového uložiště přispělo ke stabilizaci napěťových poměrů. Úbytky napětí při největších výkonových špičkách se podařilo v některých případech snížit o 1 %. Stejným způsobem přispívá BESS také v situacích, kdy dochází k odlehčení, jelikož baterie začíná dobíjet výkonem až 2MW a tím opět posouvá velikost napětí k hodnotě v rozmezí 0,96 – 0,97. Také je důležité zmínit, že v tomto případě není BESS schopno pokrýt všechny změny odebíraného výkonu. Důvodem je omezení z hlediska hodnoty SoC. K těmto jevům ovšem dochází v případech, kdy je energie nadbytek a baterie již není schopna dále dobíjet. Konkrétně se jedná o časy mezi 6.-7. hodinou a časový úsek mezi 18.-22. hod.

6.6 Vliv zatížení sítě na velikost napětí

Všechny výše uvedené průběhy byly simulovány pro případ, kdy ostatní zatížení sítě bylo nulové. Nezatíženou síť jsem volil z důvodu co možná nejlepší demonstrace vlivu proměnlivého odběru na velikost napětí v daném paprsku. Nyní se přesunu k vyhodnocení závislosti napětí v místě připojení mnou vyšetřovaného odběru na celkovém zatížení zbytku sítě. Pro porovnání volím 3 stavy sítě, v prvním případě se jedná o zcela nezatíženou síť, tedy P_X a Q_X jsou nulové. Dále pro dva stavy zatížení volím účinník odběru 0,9 induktivní. Pro druhou variantu při $P_X=10\text{MW}$ vychází $Q_X=4,84\text{MVar}$. Pro třetí případ volím $P_X=20\text{MW}$, pro tuto variantu je hodnota jalového výkonu $Q_X=9,76\text{MVar}$.

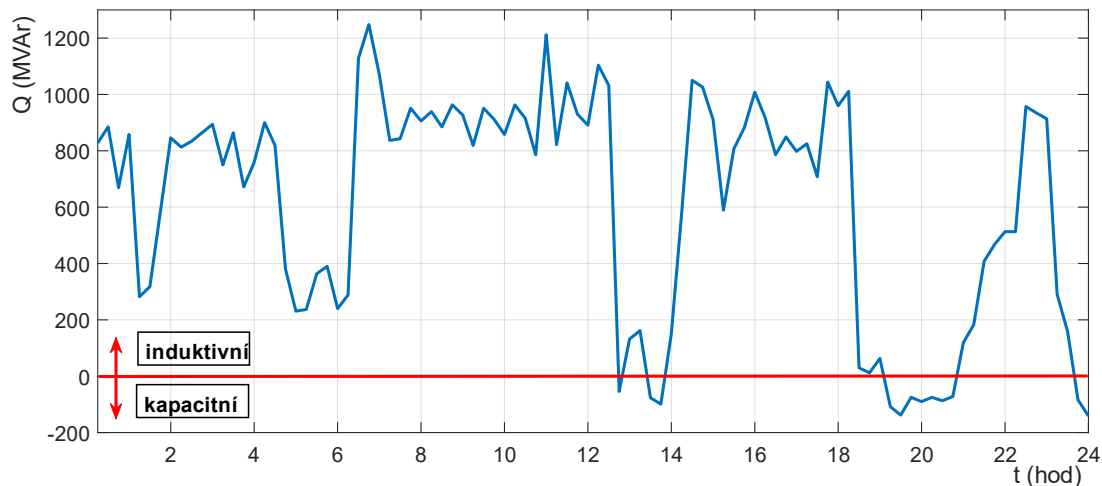


Obr. 42: Závislost napětí na celkovém zatížení sítě

Z výše uvedeného grafu je patrná závislost napětí na celkovém zatížení sítě. Pokles napětí je dán převážně úbytkem napětí na transformátoru. V tomto případě je ale důležité zmínit, že v simulaci není prováděna regulace napětí přepínáním odboček, k čemuž by v reálné situaci jistě docházelo. Regulace odboček transformátorů VVN/VN je automatická a pod zatížením reguluje velikost napětí.

6.7 Vliv odebíraného jalového výkonu na napětí

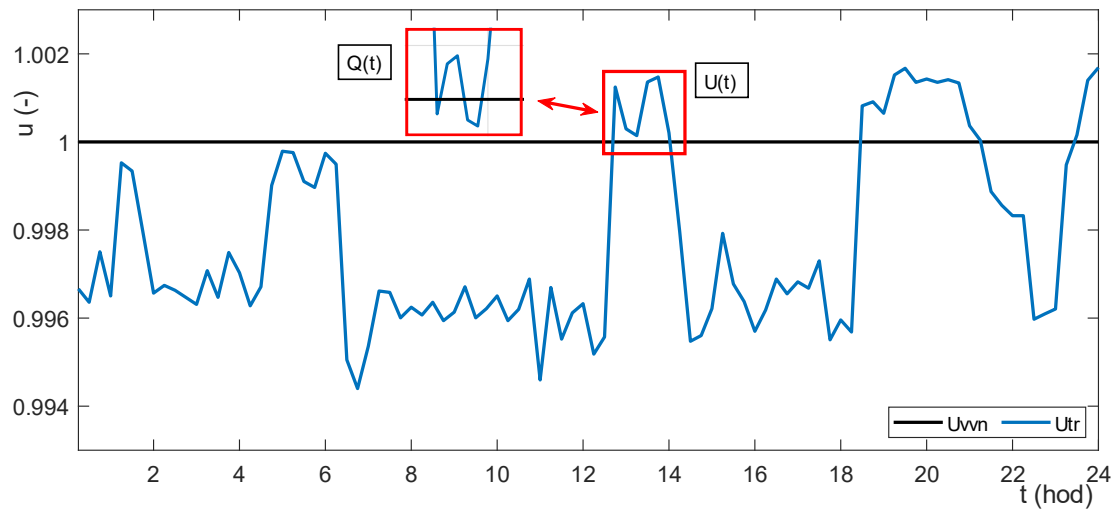
Nyní se zaměřím na vliv jalového výkonu, který je odebírán na konci vedení. Jelikož se jedná o kabelové vedení značné délky, bude zde hrát svou roli nabíjecí výkon vedení. Kapacita vedení se bude projevovat zejména v případech odlehčené sítě, kdy se může vlivem kapacitních proudů navyšovat napětí v síti. Další možností, kde se může projevit kapacita vedení je při odebírání jalového výkonu induktivního charakteru. V tomto případě může kapacitní nabíjecí výkon pomáhat ke kompenzaci a snižovat tak velikost úbytku napětí. Doposud byly všechny průběhy simulované dle zadaných hodnot odběru jalového výkonu.



Obr. 43: Charakteristika odebíraného jalového výkonu

Odebíraný jalový výkon je stejně jako činný výkon vysoce proměnlivý. Jeho špičkové hodnoty dosahují cca. 1,2MVAR. Ovšem při náhlém odlehčení dochází k přechodu do kapacitní oblasti jalového výkonu. Kapacitní charakter odebíraného výkonu spolu se značnou kapacitou kabelového vedení budou mít vliv na velikost napětí sítě.

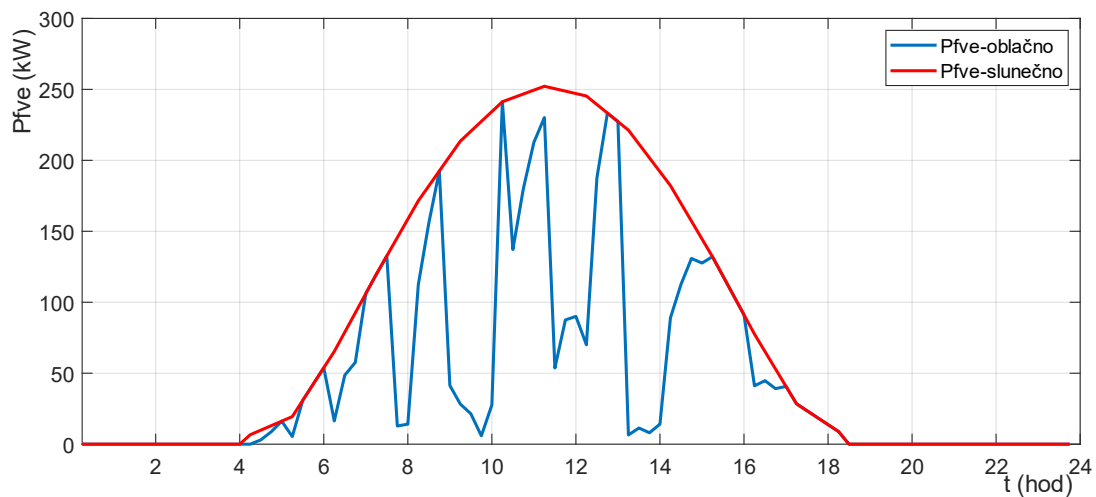
Jak jsem již výše zmínil, kapacitní charakter se projeví zejména při odlehčení sítě. Z toho důvodu volím pro demonstraci vlivu odebíraného jalového výkonu na velikost napětí stav, kdy jsou hodnoty P_X a Q_X nulové. Níže uvedený graf (viz. Obr. 44) reprezentuje velikost napětí transformátoru na straně VVN a VN. Strana VVN je definována jako referenční, tedy se chová jako tvrdý zdroj a napětí nabývá konstantní hodnoty 1. Naopak na straně VN se projevují úbytky napětí na transformátoru, které jsou v tomto případě způsobeny pouze proudem, který je odebírán na konci vyšetřovaného paprsku. Při přechodu odběru na kapacitní charakter dochází k navýšení napětí na transformátoru až nad referenční hodnotu 1. Zajímavý je případ, který jsem zvýraznil červenými obdélníky. Na obdélníku vlevo je připojen průběh jalového výkonu v daném okamžiku (viz. Obr. 43). Dle průběhu jalového výkonu je patrné, že odběr přechází do kapacitního charakteru, tím pádem se navyšuje napětí nad referenční hodnotu 1. Následně se ale vrací zpět do charakteru induktivního, to však nezpůsobuje pokles napětí pod hodnotu 1. V tomto případě je očividný vliv kapacity kabelového vedení. Neboli nabíjecí výkon vedení, který nabývá kapacitního charakteru, má větší hodnotu, než je aktuální odebíraný induktivní výkon. Tím pádem dochází k navyšování napětí i při sice malém, ale induktivním charakteru zátěže.



Obr. 44: Průběh napětí na transformátoru

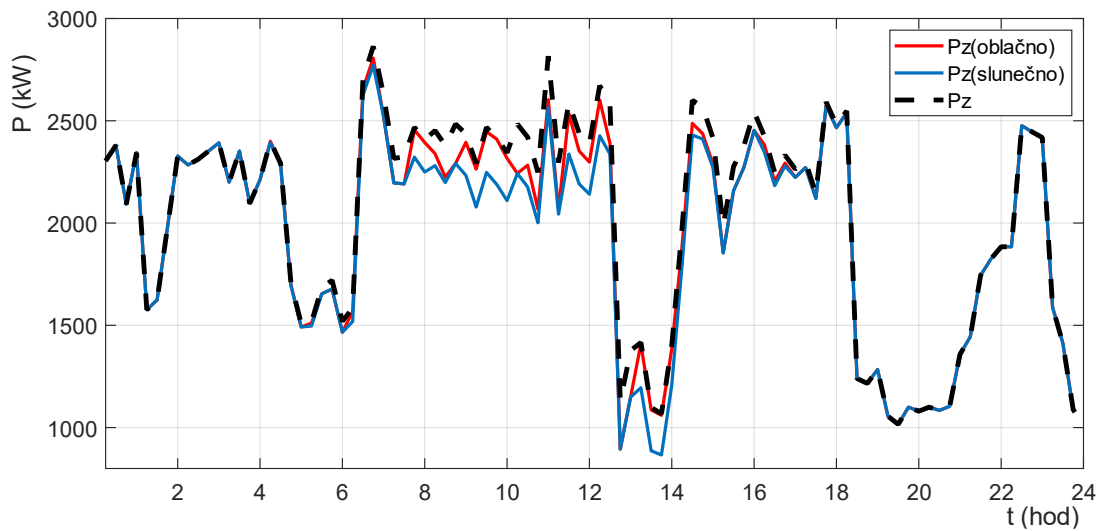
6.8 Kombinace FVE a BESS

V místě připojení BESS se nachází také FVE o instalovaném výkonu 200kW. Pro simulace mám k dispozici průběh ideální výroby při jasném slunečném dni. To ovšem nastává pouze zřídka, a proto budu ve většině simulací používat reálnější průběh, při kterém dochází ke skokovým změnám výkonu.

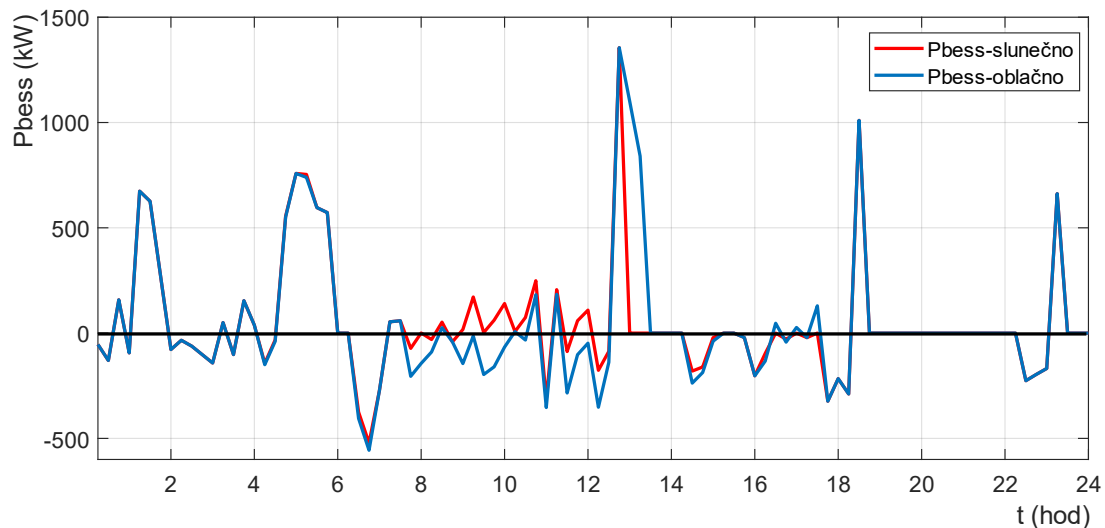


Obr. 45: Výroba FVE v místě instalace

Výroba FVE bude přispívat ke snižování úbytku napětí v síti. Jelikož se ale jedná o značně proměnlivou dodávku, je vhodné ověřit, zda bude mít příspěvek FVE pozitivní dopady na stabilitu napětí v síti. Pro prvotní porovnání přikládám průběh odebíraného výkonu bez FVE a s FVE v případě slunečného, i oblačného dne.

Obr. 46: Odebíraný výkon P_z na konci paprsku

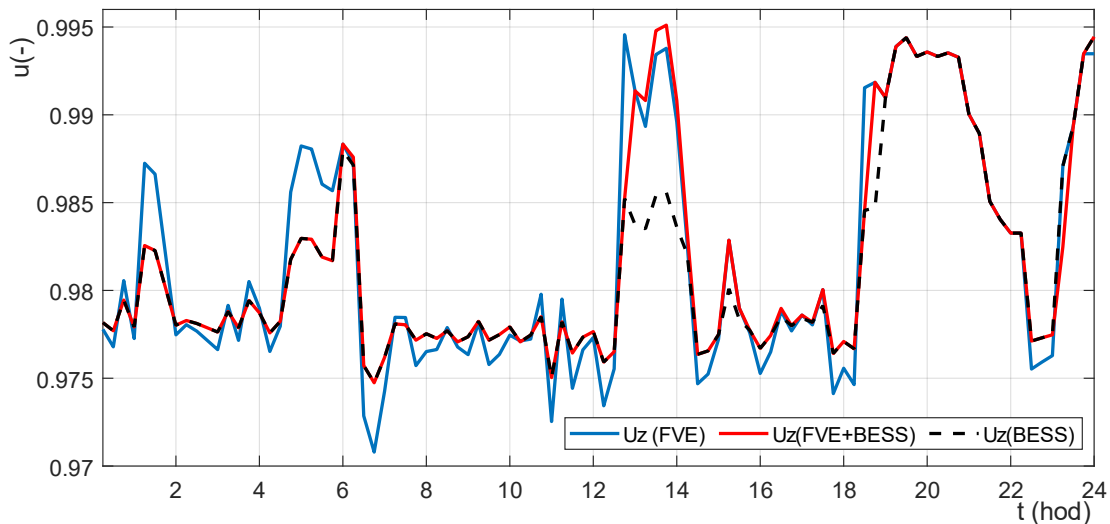
Dodávaný výkon z FVE snižuje velikost odebíraného výkonu, což by na první pohled mohlo mít pozitivní účinky na velikost úbytku napětí. Ovšem při porovnání původního průběhu s např. průběhem ze zamračeného dne lze pozorovat navýšení strmosti změn odebíraného výkonu. Kmitání výkonu bude mít přímou souvislost se změnami napětí v síti. Pro vyrovnání výkonových změn lze opět využít BESS.



Obr. 47: Výkon BESS při slunečném dni a při proměnné oblačnosti

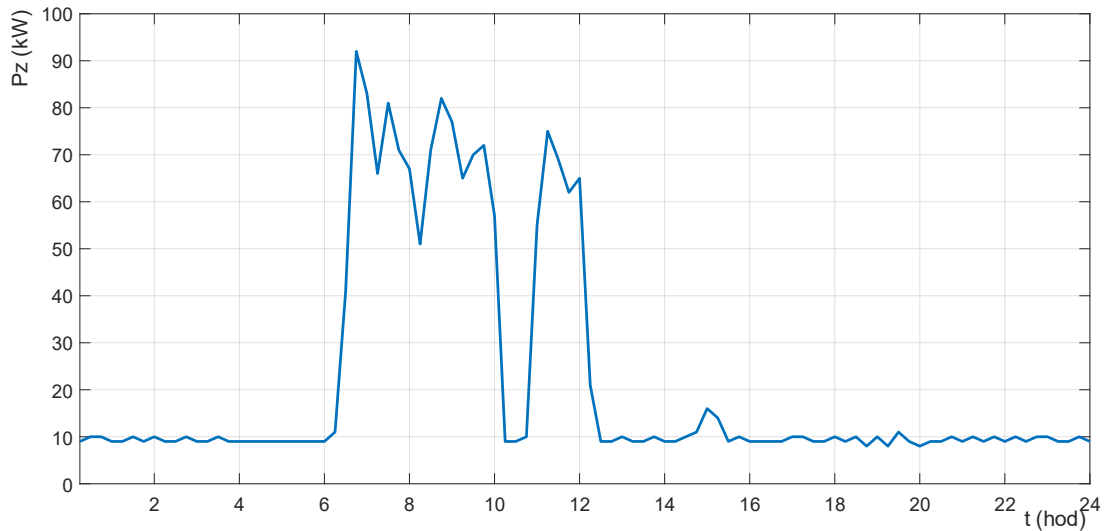
Na výše uvedeném průběhu lze pozorovat rozdíl činnosti BESS při slunečném a oblačném dni. Při slunečném dni dochází častěji ke snížení odebíraného výkonu pod hodnotu 2250kW. Důsledkem toho je nižší využití baterie, která nemusí regulovat výkonové špičky odběru. Dalším omezujícím faktorem je hodnota SoC, která díky nečinnosti baterie postupně stoupá až nad horní mez. To je důvodem, proč baterie není schopna pokrýt všechny

okamžiky výrazných odlehčení sítě. Tyto okamžiky přebytku výkonu jsou patrné z níže uvedeného grafu, který porovnává velikosti napětí pro případy samotné sítě s FVE a kombinaci FVE s BESS. V těchto případech již baterie není schopna odebrat přebytečnou energii a dochází k navyšování napětí. Je ovšem také nutné uvést, že nedochází k navýšení napětí nad jmenovitou hodnotu 1. Tato skutečnost je dána faktem, že odebíraný výkon je stále ještě větší než výkon vyráběný FVE a nedochází k přetoku energie opačným směrem.

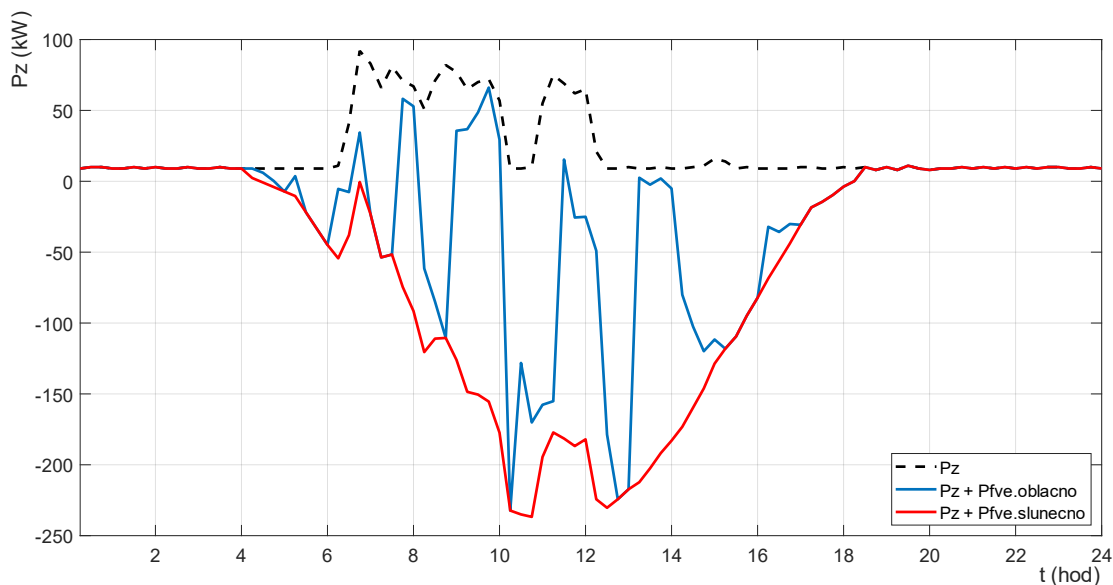


Obr. 48: Velikost napětí U_z v místě odběru

Horší případ z hlediska napěťových a výkonových poměrů nastává o víkendu, kdy odběr na konci vedení spotřebovává pouze minimální výkon v porovnání s pracovními dny. Takto malý odběr v kombinaci s vyrábějící FVE znamená přebytek výkonu, který bude mít samozřejmě vliv i na velikost napětí v síti. V tomto případě se opět nabízí využití BESS ke stabilizaci poměrů v síti. Pomocí akumulace energie lze odebrat přebytečnou energii z FVE, což povede ke snížení přetoků činného výkonu a k napěťovým změnám, které s nimi souvisejí.

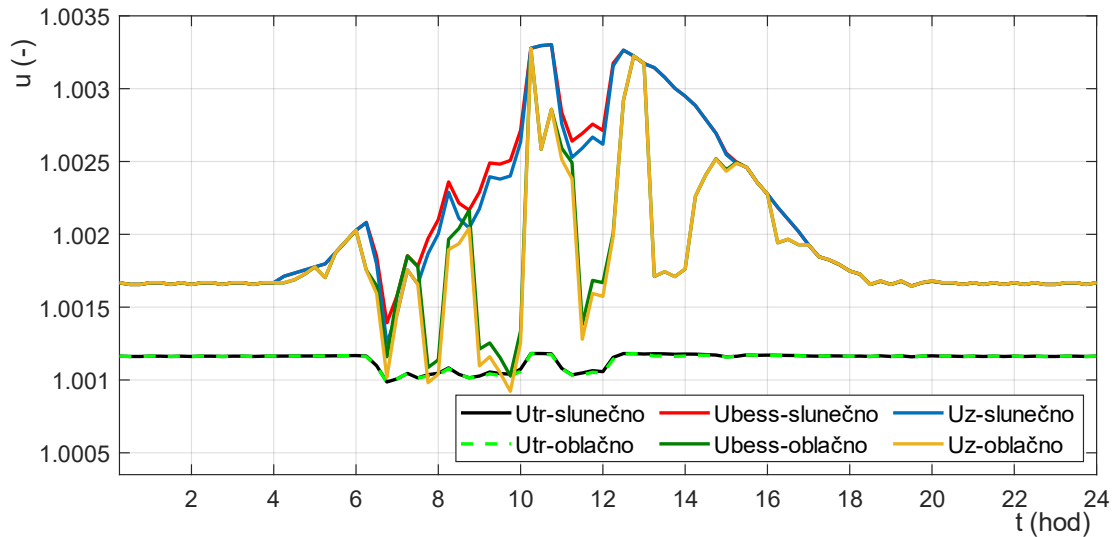
Obr. 49: Víkendový odběr P_z

Z výše uvedeného průběhu je patrné, že velikost odebíraného výkonu nabývá menších hodnot, než je vyráběný výkon z FVE. Pro výpočty budu nadále používat charakteristiky (viz. Obr.50), které jsou kombinací odebíraného výkonu a vyráběného výkonu z FVE. V grafu uvádím dvě varianty, se kterými budu uvažovat, a sice slunečný den s ideální výrobou a den, kdy se střídá slunce s oblačností.

Obr. 50: Odběr P_z + výroba z FVE

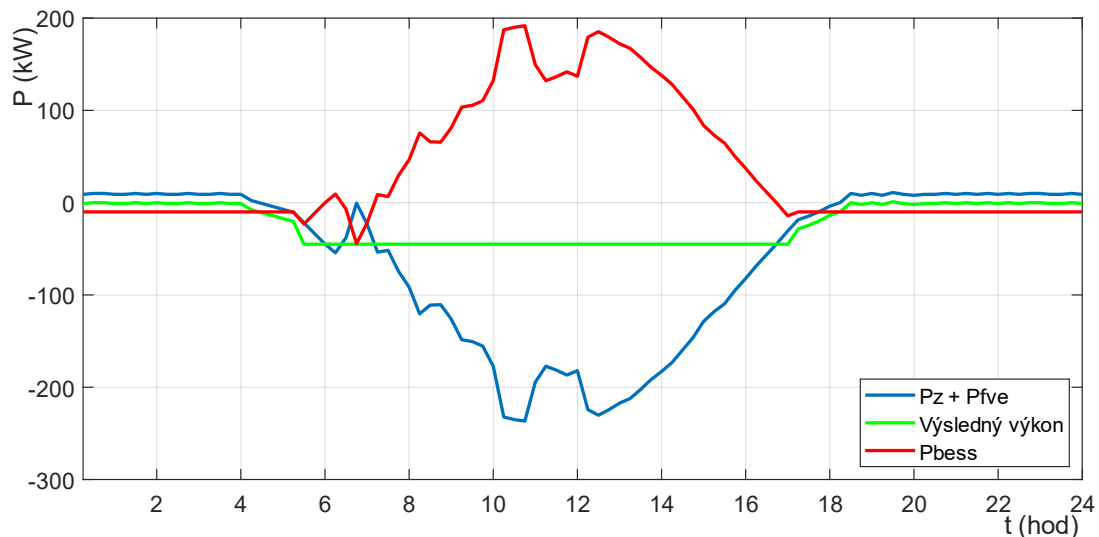
Průběh výkonu P_z , který reprezentuje víkendový odběr na Obr. 49 je výrazně menší než hodnota výkonu dodávaného z FVE. Modrá a červená charakteristika značí průběh výkonu, který je výsledkem působení FVE a víkendového odběru. V obou případech dochází k přetokům energie, která v místě výroby nemůže být spotřebována. Nadbytek energie má

přímý dopad na velikost napětí, jehož průběhy jsou uvedeny níže na Obr.51. Charakteristika U_{tr} charakterizuje velikost napětí na 22kV straně transformátoru, U_{bess} je velikost v místě připojení BESS s FVE a napětí U_Z je velikost napětí na konci paprsku, kde se nachází odběratel.



Obr. 51: Víkendové průběhy napětí při výrobě FVE

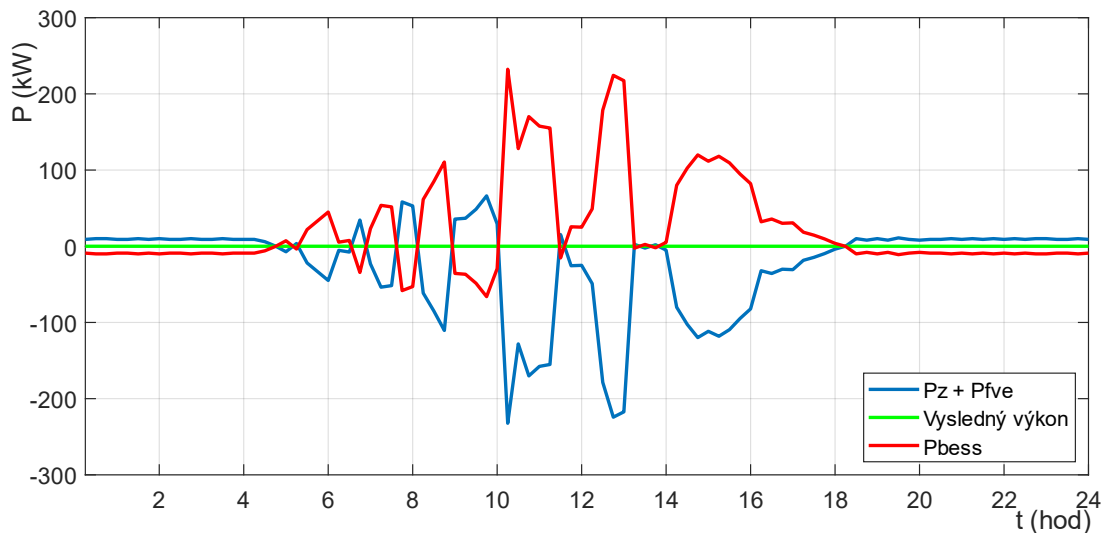
V následujících výpočtech se budu zabývat tím, jak lze přebývající energii akumulovat, a jak lze co možná nejvíce zamezit přetokům energie a změnám velikosti napětí.



Obr. 52: Průběhy výkonů při slunném víkendovém dni

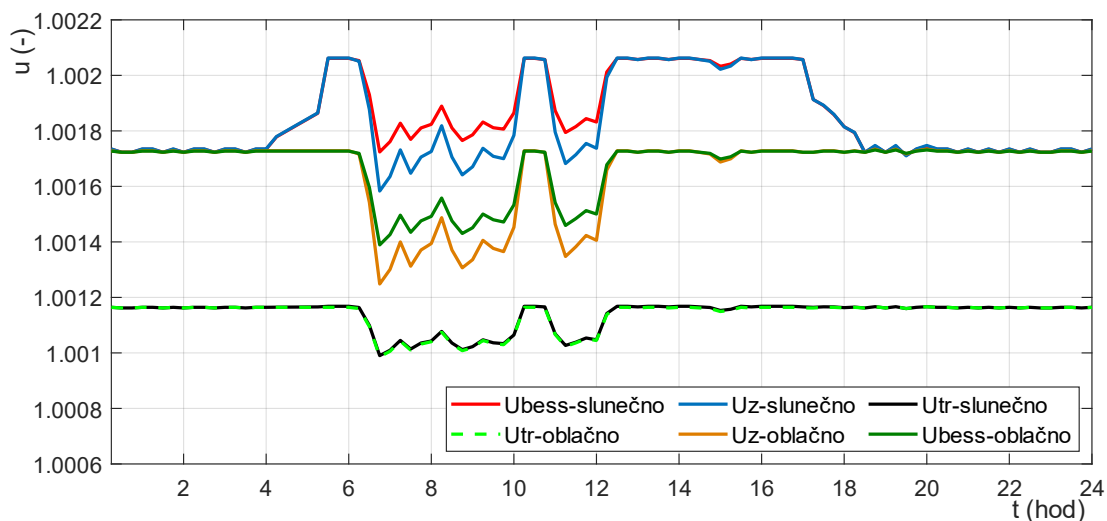
V případě, kdy FVE vyrábí na své maximum, dochází k omezení z hlediska kapacity baterie, která není schopná akumulovat všechnu vyrobenou energii. Jelikož při výpočtech uvažují počáteční hodnotu SoC 40%, nenabízí se dále moc možností pro další snížení

přetoku výkonu. Výsledný výkon, který přetéká směrem k transformátoru má konstantní velikost 45kW. Oproti původnímu průběhu, který dosahoval ve špičkových hodnotách až 250kW, se ale stále jedná o obstojný výsledek.



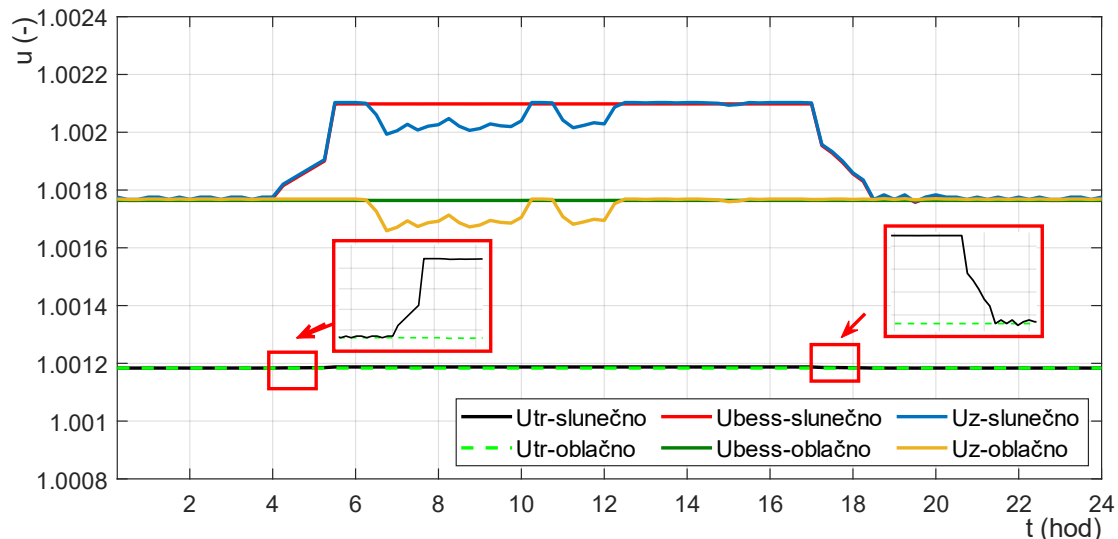
Obr. 53: Průběhy výkonů při proměnné oblačnosti ve víkendový den

Lepšího výsledku již lze dosáhnout při proměnlivé výrobě FVE. Jelikož je množství vyrobené energie menší, BESS je schopno veškerou energii akumulovat. Výsledný výkon, který reprezentuje zelený průběh na Obr.52, nabývá nulové hodnoty. To znamená, že nedochází k žádnému přetoku energie, který se nepromítne na napět'ových poměrech v síti. Ovšem je opět důležité zdůraznit, že uvažuji počáteční nabití na 40 %. V případě, kdy by baterie byla nabitá na vyšší hodnotu, nebude možné dosahovat takovýchto výsledků.



Obr. 54: Průběhy napětí po stabilizaci činného výkonu pomocí BESS

Při porovnání výše uvedených průběhů s průběhy na Obr.51 lze říci, že pomocí aktivního řízení BESS dochází ke značné stabilizaci napěťových poměrů v síti. Průběhy ale ještě nejsou tak stabilní, jako byly průběhy navrhovaných výkonů (viz. zelené křivky na Obr.52 a Obr.53.). Tyto rozdíly jsou dané odběrem jalového výkonu, jedná se tedy o úbytky způsobené jalovou složkou proudu, která není v tomto případě regulována. Regulaci jalového výkonu již dnešní střídače, které jsou připojovány do DS, umožňují. Povinnost regulace jalového výkonu jim je přidělována na základě PPDS, jak jsem již uvedl v kapitole 3., kde jsem se zabýval legislativními předpisy. Tématem této práce ovšem není problematika regulace jalového výkonu v závislosti na napětí, a proto pro lepší zobrazení vlivu BESS uvádím na dalším grafu průběhy pro případ, kdy je odebírán jalový výkon na konci vedení nulový.



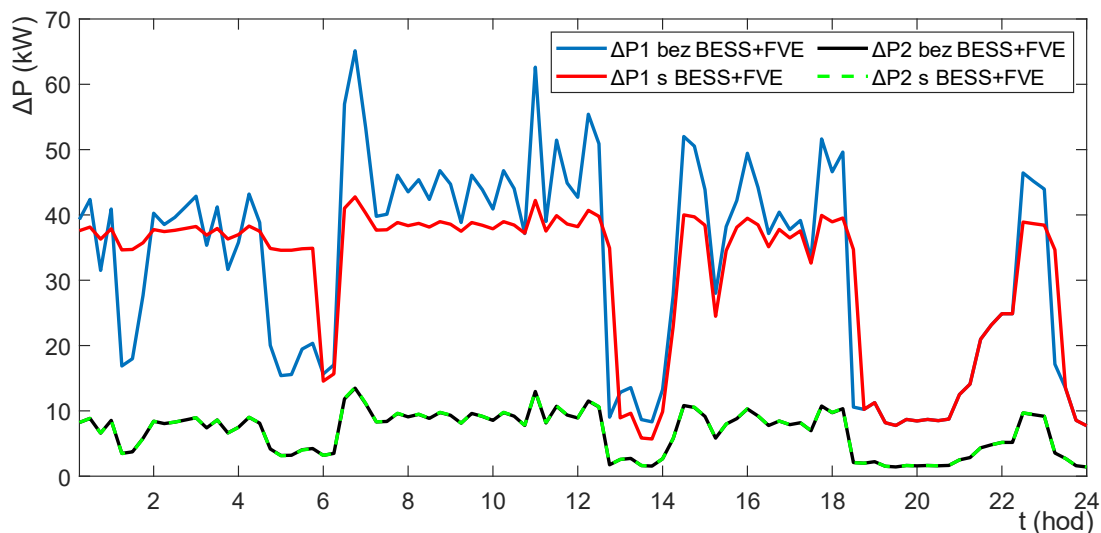
Obr. 55: Průběhy napětí po stabilizaci činného i jalového výkonu

Průběhy napětí bez odběru jalového výkonu již odpovídají charakteristikám činných výkonů, které jsem navrhl pro stabilizaci pomocí BESS. Při oblačném dni je výkon odebírán z transformátoru nulový a napětí na transformátoru je konstantní. Stabilní velikost napětí je i v místě připojení BESS a FVE díky aktivnímu řízení baterie. Lehce proměnlivé napětí je až v místě připojení odběru na konci vedení (U_z). To je dáno úbytkem napětí na vedení V2, kterým protéká činný výkon, jenž je dodáván z BESS a FVE směrem k odběru. Pro případ slunečného dne již BESS nestačí pokrývat veškeré přebytky energie. Z toho plyne, že přebytečný výkon směřuje opačným směrem k transformátoru a dochází k navyšování velikosti napětí. Zvýšení napětí není ovšem nijak razantní. Rozdíl velikosti napětí v místě připojení BESS ale i spotřeby činní cca. 0,4 % U_N . Malý rozdíl napětí lze

pozorovat i na výstupu transformátoru, ovšem tato změna je vůči měřítku osy y nepostřehnutelná. Pro lepší vizualizaci jsem připojil do grafu přibližné průběhy. Tyto změny napětí na 22kV straně transformátoru jsou v řádech tisícín % U_N .

6.9 Ztráty na vedení

Důsledkem snížení špiček odebíraného výkonu bude přímo úměrné snížení velikosti činné složky proudu, který je dodáván transformátorem. Činné ztráty jsou lineárně závislé na velikosti odporu vedení R_v a kvadraticky na velikosti činné složky proudu protékajícího vedením. Díky kvadratické závislosti dojde při snížení výkonových špiček ke značnému snížení ztrát, které by vznikaly přenosem činného výkonu.

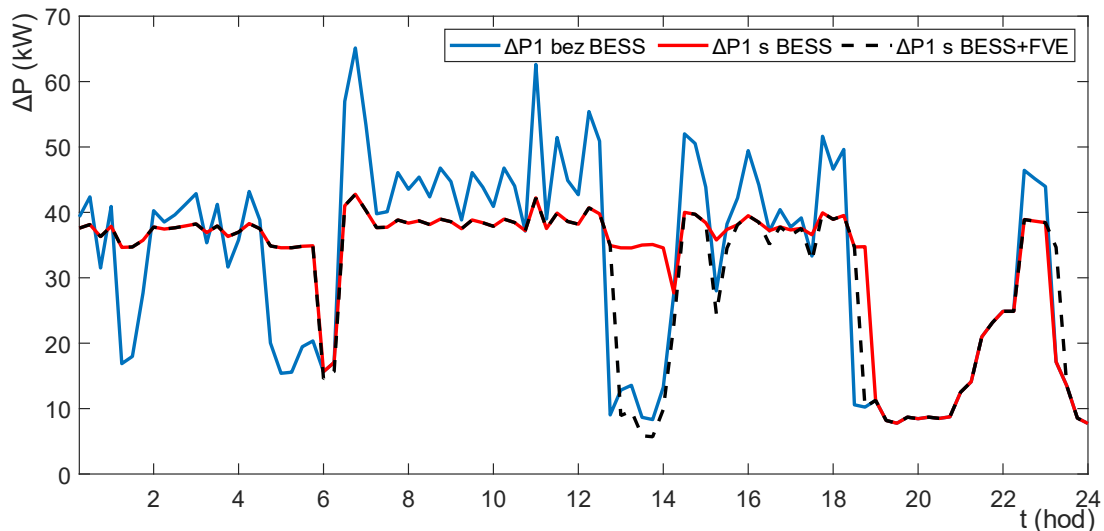


Obr. 56: Průběh ztrát na vedení V1 a V2

Ztráty ΔP_1 představují ztráty ve vedení V1, které je instalováno mezi transformátorem a místem připojení BESS a FVE. ΔP_2 jsou ztráty vznikající ve vedení V2, které vede mezi BESS, FVE a místem spotřeby. Ztráty ve vedení V2 jsou pro obě situace stejné, protože jím protéká stále stejný výkon, který slouží k pokrývání denního diagramu zatížení koncového spotřebitele. Na vedení V1 již ale lze pozorovat snížení činných ztrát. Snížení ztrát je dáno snížením činné složky proudu, jak jsem již avizoval výše. K tomuto snížení dochází díky přiblížení výroby blíže ke spotřebě. Navíc díky BESS lze v momentech přebytku energii akumulovat, takže nedochází k dalším ztrátám, které by vznikaly při přetocích činného výkonu. K nejrazantnějšímu snížení ztrát dochází ale díky činnosti BESS v momentech výkonových špiček. Baterie snižuje špičkové hodnoty výkonu, které

dosahovaly až 2864kW na hodnotu 2250kW. Tímto omezením výkonových špiček se podařilo snížit ztráty ΔP_1 při největších odběrech na téměř poloviční hodnotu.

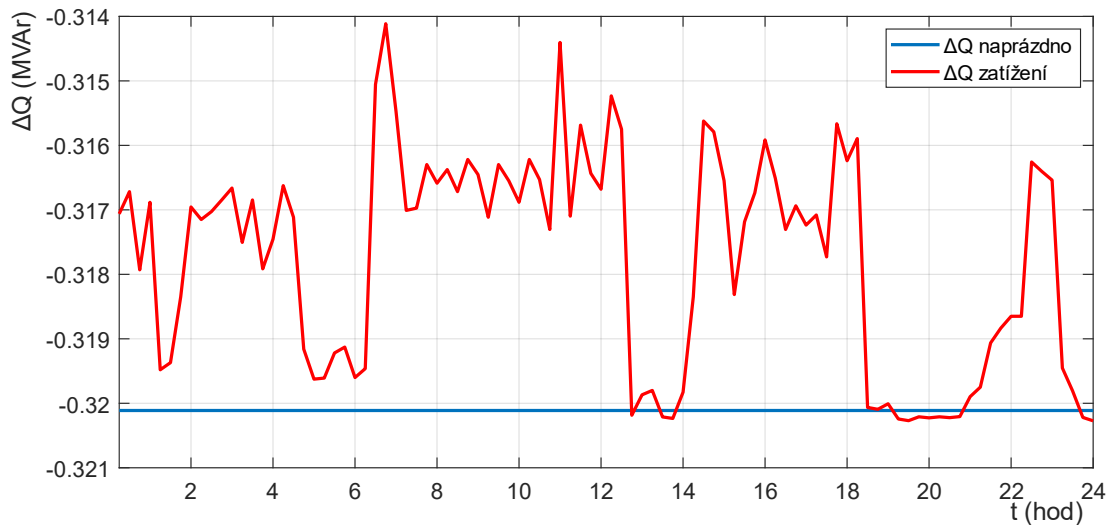
Další možností posouzení vlivu BESS na ztráty sítě se nabízí stav, kdy není k dispozici výkon z FVE. V tomto případě je baterie dobíjena ze sítě. To znamená, že dobíjecí proud protéká vedením V1, čímž vznikají přídatné ztráty oproti provozu s FVE.



Obr. 57: Porovnání ΔP_1 s FVE a bez FVE

Dobíjením dochází ke zvýšení ztrát v časech, kdy by FVE za slunečného počasí dodávala energii. Nejhorší situace oproti provozu s FVE nastává v rozmezí 12–14 hodin.

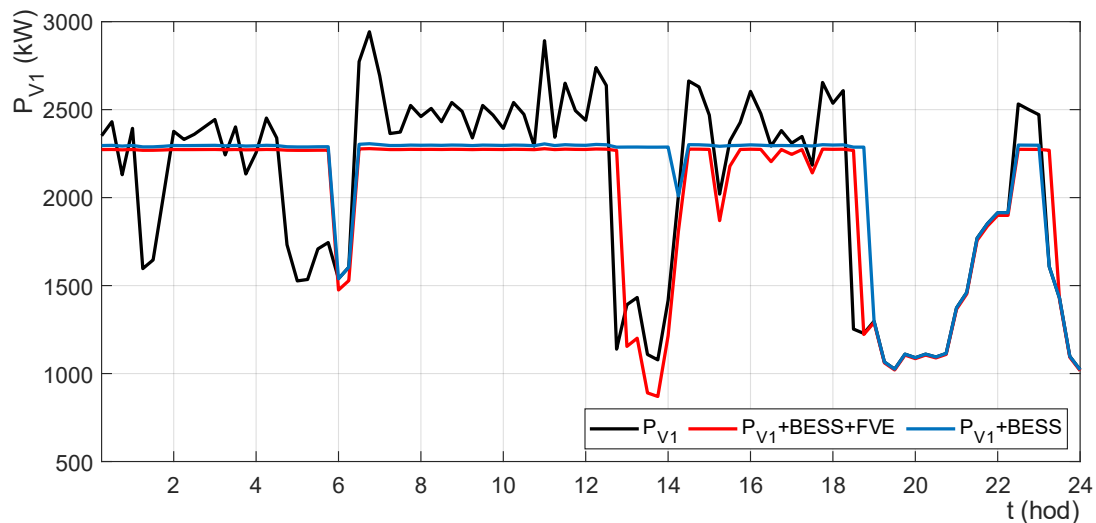
V obvodech se střídavým proudem ale vznikají také ztráty jalové. Jalové ztráty jsou tvořeny imaginární složkou proudu, na které jsou závislé kvadraticky a také velikostí reaktance, na níž jsou závislé lineárně. Jelikož se jedná o kabelové vedení značné délky, promítne se do přenášeného jalového výkonu i nabíjecí výkon vedení. Jak jsem již zmínil v kapitole 4.3.2, velikost nabíjecího výkonu je dána převážně provozní kapacitou, která je u kabelových vedení vysoká. Pro demonstraci příkládám na Obr.58. průběh jalových ztrát na vedení V1. Pro lepší vizualizaci jsem do grafu zahrnul i stav vedení naprázdno, kdy je veškerý odebíraný jalový výkon kapacitního charakteru pro pokrývání nabíjecího výkonu. Při zatíženém stavu, tedy odběru jalové energie induktivního charakteru, dochází ke změnám velikosti jalové složky proudu. V závislosti na velikosti jalového proudu se mění i velikost jalových ztrát na vedení.



Obr. 58: Průběh jalových ztrát na vedení V1

6.10 Zvýšení přenosové kapacity vedení

Dalším přínosem, který s sebou přináší instalace FVE společně s BESS je snížení zatížení vedení V1. Díky výrobě blíže k místu spotřeby klesá výkon, který je potřeba vedením přenášet. Navíc možnost akumulace snižuje odebíraný výkon i v okamžicích, kdy FVE nevyrobí. Dle níže uvedených průběhů (Obr.58.) je patrné, jak kleslo zatížení jen při využití BESS. V tomto případě je maximální hodnota přenášeného výkonu 2306,2kW. Původní hodnota přenášeného výkonu vedením nabývá 2942,65kW. Při porovnání těchto dvou hodnot dochází ke snížení přenášeného výkonu o 21,6 %. Ještě lepší situace nastává v případě, kdy je aktivní FVE. V tomto případě činí maximální přenášený výkon vedením 2278,28kW, což v porovnání s původní hodnotou představuje odlehčení o 22,6 %. Tento efekt může přispět zejména při budoucím rozšiřování sítě, kdy bude možné vedením přenést vyšší výkon. Zároveň lze také více zatěžovat transformátor 110/22kV.



Obr. 59: Výkon přenášený vedením V1

6.11 Ekonomické zhodnocení

Instalace bateriového uložiště o velikosti 2MWh v kombinaci s FVE o výkonu 200kW představuje značnou investici. Všechny ceny, se kterými budu kalkulovat, mi byly poskytnuty konzultantem.

Cena FVE:

Odhad investiční náročnosti instalace FVE, který zahrnuje fotovoltaické panely, střídače, podpěry i řízení, se uvažuje ve výši 950 €/kWp. To znamená, že investice do samotné FVE činí 190 000€.

Cena BESS:

Bateriové uložiště je od firmy Huawei, konkrétně se jedná o typ LUNA s kapacitou 2000kWh a výkonem 2000kW. Cena toho produktu je 730 000€.

Transformátor:

Jelikož výstupní napětí BESS je 3x800V, je nutná také instalace transformátoru 0,8/22kV. Pro tento případ je zvolen transformátor o výkonu 3150kVA, jehož cena je 130 000€.

Celkové náklady:

$$190\,000 + 730\,000 + 130\,000 = 1\,050\,000\text{€} \quad (6.50.)$$

Převodem dle aktuálního kurzu ke dni 4.5.2024 (1€ = 25,07Kč) je tato částka rovna 26 322 797,66Kč.

První úsporou, kterou přináší instalace BESS, je snížení rezervované kapacity. Ceny za rezervovanou kapacitu uvádím dle Cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 5/2023 ze dne 29. listopadu 2023, kterým se stanovují ceny za související službu v elektroenergetice a ostatní regulované ceny. [18]

Tab. 5: Cena za rezervovanou kapacitu [18]

Provozovatel distribuční soustavy	Hladina napětí	Měsíční cena za roční rezervovanou kapacitu [Kč/MW/měsíc]	Měsíční cena za měsíční rezervovanou kapacitu [Kč/MW/měsíc]
ČEZ Distribuce, a. s.	VVN	79 607	87 242
	VN	204 788	224 429
EG.D, a.s.	VVN	71 094	79 551
	VN	178 368	199 586
PREdistribuce, a.s.	VVN	81 867	90 616
	VN	202 480	224 120
UCED Chomutov s.r.o.	VN	215 925	239 525
SV servisní, s.r.o.	VN	189 470	204 628

Pro tento případ uvažuji místo instalace Plzeň, kde je PDS společnost ČEZ Distribuce, a. s.

Roční náklady za rezervovanou kapacitu před instalací BESS:

$$N_1 = 2,864 \cdot 204\,788 \cdot 12 = 7\,074\,240,38 \text{ Kč} \quad (6.51.)$$

kde hodnota 2,864 je velikost špičkového odebíraného výkonu před instalací BESS.

Roční náklady za rezervovanou kapacitu po instalaci BESS:

$$N_2 = 2,25 \cdot 204\,788 \cdot 12 = 5\,529\,276 \text{ Kč} \quad (6.52.)$$

kde hodnota 2,25 je velikost špičkového odebíraného výkonu po instalaci BESS.

Roční úspora z rezervované kapacity:

$$N_1 - N_2 = 1\,544\,964,38 \text{ Kč} \quad (6.53.)$$

Další prostor pro úsporu představuje energie, kterou vyrábí FVE. Pro tento případ budu uvažovat, že provozovatel DS neumožnil přetoky činného výkonu do sítě a všechny výkon z FVE musí být spotřebován, popř. akumulován.

Pro určení množství vyrobené energie využívám výpočetní model PVGIS.[19] Tento model slouží ke kalkulaci solárních systémů po celém světě. Do modelu zadávám jako lokalitu Plzeň. Materiál panelů je krystalický křemík a sklon panelů 35° s orientací na jih. Celková roční vyrobená energie je 210 370,58kWh. Kompletní výsledky výpočtu PVGIS

přikládám v příloze č.3. Cena, za kterou odběratel nakupuje elektrickou energii, je 4Kč/kWh. Z toho plyne další úspora, která dosahuje hodnoty 841 482,32Kč.

Celková roční úspora na poplatcích:

$$1\,544\,964,38 + 841\,482,32 = 2\,386\,446,7\text{Kč} \quad (6.54.)$$

Pro výpočet návratnosti investice je zapotřebí stanovit proměnné a fixní náklady. Fixní náklady zahrnují převážně částky pro pokrytí nákladů na údržbu. Jelikož tato technologie nevyžaduje nikterak náročnou a nákladnou údržbu, volím roční fixní náklady ve výši 120 000Kč. Variabilní náklady se týkají převážně vlastní spotřeby. Velikost variabilních nákladů volím pro první rok provozu ve výši 100 000Kč, přičemž každým dalším rokem roste jejich velikost o 2%.

Dále je zapotřebí stanovit výši odpisů. Provoz FVE a BESS je odhadován na dobu 30-40 let. Pro výpočty budu uvažovat střední hodnotu, tedy 35 let. Roční odpis bude dán poměrem počáteční investice a dobou provozu.

$$o = \frac{26\,322\,797,66}{35} = 752\,080\text{Kč} \quad (6.55.)$$

Celkové roční náklady:

$$N = N_p + N_f + o = 120\,000 + 100\,000 + 752\,080 = 972\,080\text{Kč} \quad (6.56.)$$

Celková roční úspora:

$$2\,386\,446,7 - 972\,080 = 1\,414\,367\text{Kč} \quad (6.57.)$$

Cash flow:

$$CF = 1\,414\,367 + 972\,080 = 2\,166\,447\text{Kč} \quad (6.58.)$$

Návratnost investice:

$$T = \frac{N_p}{CF} = \frac{26\,322\,797,66}{2\,166\,447} = 12,5 \text{ let} \quad (6.59.)$$

kde N_p jsou počáteční náklady (Kč), CF je cash flow, v tomto případě velikost roční úspory, kterou ušetří odběratel na poplatcích distributorovi elektrické energie.

Pro přesnější výpočet využiji soubor, který jsem vytvořil v softwaru Excel (viz. Příloha č.5.), který nabízí funkce pro výpočet ekonomických veličin. Je zde kalkulováno s každoročním přírůstkem variabilních nákladů, fixními náklady i odpisy.

Pro posouzení investice se kromě doby návratnosti využívají také indikátory IRR a NPV. Hodnota IRR reprezentuje tzv. vnitřní výnosové procento a udává rentabilitu investice po dobu životnosti objektu. Parametr NPV představuje tzv. čistou současnou hodnotu. Pro výpočet IRR jsem využil funkci Míra návratnosti, kterou Excel nabízí. [20][21]

Tab. 6: Ekonomické indikátory

IRR (%)	7,49%
NPV (Kczk)	48 003,39

Návratnost investice vychází cca. na 12,5 roku, což je téměř polovina provozní doby FVE a BESS. Co se týče dalších ekonomických indikátorů, hodnota IRR vychází 7,49%. Čistou současnou hodnotu jsem určil jako sumu hodnot Cash flow za jednotlivé roky. NPV vychází 48 003 390 Kč. To znamená, že po dobu provozu 35 let ušetří provozovatel na poplatcích za energii celkem 48 003 390 Kč. Ovšem je také nutné uvést, že neuvažují dotace, které se vztahují na výstavbu obnovitelných zdrojů. Při obdržení těchto dotací by se celková výnosnost investice ještě podstatně vylepšila.

Závěr

Hlavním úkolem této práce bylo popsat možnosti spolupráce mezi fotovoltaickými systémy a bateriovými uložišti. Instalace obnovitelných zdrojů s sebou přináší řadu komplikací, které se nejvíce dotýkají provozovatelů distribučních a přenosových soustav. S velkým instalovaným výkonem v obnovitelných zdrojích mohou nastávat situace, kdy není elektrická energie potřeba a obnovitelné zdroje vyrábějí na své maximum. Při neregulování těchto zdrojů by tudíž mohlo docházet k problémům s nestabilitou sítě a v horších případech i k jejímu rozpadu.

V návaznosti na tyto vlastnosti převážně fotovoltaických elektráren jsem se v první části práce věnoval legislativním předpisům, které udávají za povinnost regulaci každé výrobní připojené do elektrizační soustavy. Popsány jsou především požadavky vycházející z „Pravidel provozování distribučních soustav“.

Jelikož výše zmíněná pravidla udávají povinnost regulace činného výkonu v závislosti na napětí, ale i frekvenci, navazuje další část mé práce možnostmi řízení činného výkonu z FVE. Možnost řízení činného výkonu nabízí funkce „Active power control“. Jedná se o funkci střídače, kdy je střídač schopen omezit výstupní výkon dodávaný FVE do sítě. Regulace činného výkonu je založena na omezení dodávaného výkonu na určité konstantní hodnotě v případě, kdy například síťové napětí přesáhne horní dovolenou mez. Výsledná charakteristika vyráběného výkonu nedosahuje původních maximálních hodnot, ale je oříznuta (tato funkce je také známa jako tzv. „Peak shaving“).

V poslední kapitole teoretické části jsem se věnoval způsobům akumulace elektrické energie. Možností pro akumulaci elektrické energie se nabízí celá řada. Pro téma mé práce jsem se ale zaměřil na technologie bateriových uložišť, které se využívají ve spolupráci s fotovoltaickými systémy. Jsou zde popsány základní principy jednotlivých technologií od olovněných baterií, lithium-iontových až po sodno-sírné baterie. Kromě spolupráce s obnovitelnými zdroji mohou být bateriová uložiště využívána také ke službám výkonové rovnováhy. Vhodnost baterií k tomuto využití je dána především rychlostí, kterou je schopna dodávat regulační výkon do sítě.

Pro nastínění vlivů proměnlivé dodávky obnovitelných zdrojů na velikost napětí jsem odvodil vztah pro úbytek napětí. Z tohoto vztahu je patrná závislost jak na činném, tak jalovém výkonu. Při využití spolupráce bateriového uložiště a fotovoltaického systému

se nabízí možnost stabilizace dodávaného výkonu do sítě. Díky stabilizaci výkonových poměrů v síti dojde také ke stabilnějšímu průběhu napětí, což dokazuje odvozený vztah pro úbytek napětí. Tyto teoretické předpoklady jsem dále ověřoval na konkrétním příkladu sítě v praktické části.

Na praktické části jsem spolupracoval s konzultantem Ing. Františkem Žákem, Ph.D. Hlavním úkolem bylo na konkrétním případu sítě dokázat, jak lze pomocí BESS stabilizovat napěťové poměry. V návaznosti na toto zadání byla konzultantem zvolena kabelová síť 22kV. V této síti se nachází velký odběratel, jehož spotřeba má značně kolísavý charakter. Mým úkolem bylo analyzovat, jak lze instalací FVE a BESS zlepšit výkonové poměry a s nimi související poměry napěťové. V první části jsem nejdříve vyhodnotil napěťové poměry v síti pomocí analytického výpočtu. Po určení velikostí úbytků napětí v jednotlivých částech sítě jsem se přesunul k simulacím v programu Gridcal. První stav, který byl simulován, byl stejný jako při analytickém výpočtu. Při porovnání napěťových poměrů z analytického a simulačního výpočtu jsem dospěl k odchylce úbytku napětí v řádech setin procenta. Tímto jsem si ověřil správnost mého výpočtu a také správnou funkci simulace.

Jako první úkol bylo stanovení velikosti rezervované kapacity odběratele po instalaci BESS. Průběhy odebíraného výkonu mi byly poskytnuty konzultantem a v návaznosti na velikost odebíraného výkonu byla zvolena baterie o kapacitě 2MWh. Výpočet snížení rezervovaného příkonu jsem prováděl v programu Matlab, viz. Příloha 1. Výsledkem tohoto výpočtu (viz. Obr.35.) je možnost snížení rezervované kapacity z 2864kW na hodnotu 2461kW. Ovšem tento výpočet pouze posuzuje velikost potřebné energie pro pokrytí špiček odebíraného výkonu po dobu 24 hodin. Skutečnost, kterou tento výpočet ovšem neuvažuje, je fakt, že mezi špičkami odběru jsou dost velké propady na to, aby se baterie stihla dobít jak z blíže připojené FVE, tak ze sítě. Jako důkaz jsem znázornil průběh výkonu z BESS a stav nabití SoC (viz. Obr.38). Pro optimalizaci využití BESS jsem zhotovil průběhy SoC při postupně se snižujících hodnotách rezervovaného příkonu odběratele. Výsledky uvádím na Obr.39, ze kterého vyplývá možnost snížení rezervovaného příkonu až na hodnotu 2250kW.

Dalším krokem bylo vyhodnocování napěťových poměrů v síti po aplikaci samotného BESS. Pro výpočty řízení toku výkonů do BESS a dále i pro kombinaci s FVE jsem využil opět program Matlab, jehož skript uvádím v Příloze č.2. Díky stabilizaci odebíraného výkonu (viz. Obr.40.) dochází ke snížení úbytků napětí na vedení, což vede

k menším napět'ovým výkyvům v síti. Porovnání napět'ových průběhů bez BESS a po jeho instalaci uvádím na Obr.41. Z tohoto grafu lze říci, že využitím baterie došlo ke snížení úbytků napětí až o 1 %. Dále se také velikost napětí v síti ustálila v rozmezí 0,96 – 0,97. Ovšem dochází zde i ke skutečnosti, kdy už baterie není schopna akumulovat energii a z důvodu odlehčení dochází k navýšení napětí na hodnotu 0,99.

Dalším faktorem, který se projeví na velikosti napětí v síti, je jalový výkon odebíraný spotřebitelem na konci vedení. Odebíraný jalový výkon je v převážné většině induktivního charakteru. Ovšem při prudkých odlehčeních dochází k přechodu jalového výkonu do kapacitního charakteru. Ve spojitosti se značným nabíjecím výkonem kabelového vedení se tyto změny jalového výkonu také promítnou do napět'ových poměrů. Detailní pohled na tuto závislost uvádím na Obr.44., kdy dochází při odlehčení sítě ke zvýšení napětí na výstupní straně transformátoru nad jmenovitou hodnotu 1. Zajímavostí zde je fakt, že i když je odebíraný jalový výkon induktivního charakteru malé hodnoty, dochází i přesto k navýšení napětí nad jmenovitou hodnotu díky velkému nabíjecímu výkonu vedení.

K dokončení posuzování vlivu na stabilizaci napět'ových poměrů jsem k BESS připojil i FVE s instalovaným výkonem 200kW. Pro simulace jsem využil dva průběhy výroby FVE, a sice ideální výrobu při slunečném jarním dni a výrobu při proměnlivé oblačnosti, kdy dodávaný výkon výrazně kolísá. Výsledkem simulací kombinace FVE a BESS v průběhu pracovního dne, kdy je odběr veliký je skutečnost, že při slunečném dni je baterie využívána méně. Důvodem je přebytek energie díky výrobě z FVE. Ovšem je nutno uvést, že oproti stavu bez BESS a FVE dochází taktéž ke stabilizaci napět'ových poměrů, což dokazují průběhy na Obr.48. V případě dne s proměnlivou oblačností už je využití baterie vyšší a díky proměnlivé dodávce z FVE se podílí na stabilizaci mnohem více.

Jelikož spotřebitel odebírá takto veliký a proměnlivý výkon pouze v pracovní dny, provedl jsem simulace a výpočty i pro dny víkendové. Při víkendových dnech dosahuje velikost odebíraného výkonu v maximech kolem 90kW, což přináší další možnost využití BESS, jelikož při dodávce výkonu z FVE by docházelo k přetokům výkonu. Mým cílem bylo navrhnout řízení BESS tak, aby došlo k co možná největší stabilizaci výkonových toků v síti, díky nimž by se stabilizovala i velikost napětí. Nejméně příznivá situace nastává opět při ideálním slunečném dni. V tomto případě je přebytek energie příliš velký a BESS není schopno akumulovat všechnu vyrobenou energii. Ovšem vhodným nastavením řízení se mi podařilo stabilizovat velikost přetékajícího výkonu na hodnotě 45kW. Výsledek je celkem

obstojný, jelikož původní hodnoty přetoků dosahovaly hodnot až 250kW. Výrazně příznivější je den s proměnnou oblačností, kdy je množství vyrobené energie méně. V tomto případě se mi podařilo stabilizovat výkonové toky tak, že nepřetéká žádný činný výkon směrem k transformátoru 22/110kV. Průběhy výsledných výkonů jsou uvedeny na Obr. 52. a 53. Po stabilizaci víkendových přetoků výkonu dochází k ustálení velikosti napětí při slunečném dni na hodnotě 1,0021 a při oblačném dni na hodnotě cca. 1,0018. Zde je ale důležité zmínit, že při výpočtech jsem uvažoval počáteční hodnotu nabití SoC o velikosti 40%. V případě, že by byla baterie nabita více, nebyla by schopna poskytovat takto dobré služby pro stabilizaci napěťových poměrů.

Další věcí, na kterou má instalace BESS a FVE vliv, jsou ztráty na vedení. V případě činných ztrát dochází díky přiblížení výroby k místu spotřeby ke snížení ztrát na vedení V1. BESS přispívá ke snížení ztrát omezením přetoků výkonu směrem k nadřazené síti, díky kterým by vznikaly také přídavné ztráty. Největší snížení ztrát ale nastává v případech, kdy je díky činnosti BESS snížen špičkový odebíraný výkon. V těchto případech dochází ke snížení ztrát z původních hodnot, které dosahovaly až 65kW na hodnoty pohybující se kolem 40kW.

Kromě snížení ztrát poskytuje instalace BESS a FVE také odlehčení přírodního vedení V1 a transformátoru 110/22kV. Díky provozu FVE a BESS dochází ke snížení přenášeného výkonu o 22,6%. Díky tomuto snížení přenášeného výkonu dochází k navýšení přenosové kapacity jak vedení V1, tak i zatížitelnosti transformátoru.

Posledním úkolem praktické části bylo ekonomické zhodnocení. V této části jsem se zaměřil především na návratnost investice do BESS a FVE. Celková návratnost investice vychází 12,5 let, což při uvažované době provozu 35 let je méně než polovina životnosti.

Na závěr bych rád dodal, že vypracování této práce mi umožnilo naučit se alespoň základní způsoby a principy simulování elektrických sítí. V neposlední řadě jsem si řešením praktické části upevnil znalosti, které jsem během studia nasbíral. Zároveň mi tato práce také umožnila proniknout hlouběji do problematiky vlivu obnovitelných zdrojů na elektrizační soustavu. Na obnovitelné zdroje je v posledních letech ve společnosti nahlíženo jako na zdroj, který by mohl v budoucnu nahradit stávající elektrárny. Můj názor ovšem je, že současné technologie nejsou schopny této náhrady při zachování stejné kvality dodávky. Z tohoto důvodu bych je označil spíše jako doplněk stabilních zdrojů.

Literatura

- [1] TOPOLOGIE DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ. *Svět energie* [online]. 2020 [cit. 2023-10-27]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elektřiny/distribuce-elektrické-energie-podrobně/topologie-distribucnich-siti/vyklad>
- [2] TESAŘOVÁ, Miloslava. *Přednášky PDS*. 2023.
- [3] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. *Provoz distribučních soustav*. Praha, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [4] Distribuční soustava. *Svět energie* [online]. 2020 [cit. 2023-10-31]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elektřiny/distribuce-elektrické-energie-podrobně/distribucni-soustava/vyklad>
- [5] PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV PŘÍLOHA 3. *ČEZ Distribuce* [online]. [cit. 2023-11-01]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/webpublic/file/edee/distribuce/ppds/ppds-2011_priloha-3.pdf
- [6] TENNAKOON, Sankika, Lakshai PERERA a Duane ROBINSON. *FLICKER TRANSFER IN RADIAL POWER SYSTEMS* [online]. [cit. 2023-11-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/254440418_FLICKER_TRANSFER_IN_RADIAL_POWER_SYSTEMS
- [7] *Zákon č. 458/2000 Sb.: Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon)*. In: 2000.
- [8] *PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV: PŘÍLOHA 4. PRAVIDLA PRO PARALELNÍ PROVOZ VÝROBEN A AKUMULAČNÍCH ZAŘÍZENÍ SE SÍTÍ PROVOZOVATELE DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY*. In: 2022.
- [9] *Studijní materiály EE2* [online]. [cit. 2021-01-11]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kee/ee2/prednasky.html>

- [10] Active Power Management for PV Systems under High Penetration Scenario. *International Journal of Photoenergy* [online]. **2021** [cit. 2023-11-19]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2021/9940862/>
- [11] Active and reactive power control in three phase solar PV inverter using modified IC method. *IEEE* [online]. [cit. 2023-11-19]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8052727>
- [12] DVORSKÝ, Emil. *Kompenzace v ES* [online]. [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: <https://home.zcu.cz/~dvorsky/MR/PrednaskyMR/Pred9/09%20Kompenzace.pdf>
- [13] NOHÁČ, Karel. *Ferrantiho jev* [online]. [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: https://home.zcu.cz/~nohac/EE1/Ferrantiho_jev-Colaboratory.pdf
- [14] SMA ENERGY SYSTEMS. *Q at Night* [online]. [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: <https://www.sma-america.com/partners/knowledge-base/q-at-night>
- [15] Ranking of Electricity Accumulation Possibilities: Multicriteria Analysis. *MDPI* [online]. **2023** [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/13/7349>
- [16] *Kodex PS* [online]. ČEPS, 2022 [cit. 2023-12-04]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>
- [17] WANG, Jiawei, Seyedmostafa HASHEMI, Shi YOU a Chresten TROEHOLT. Active and reactive power support of MV distribution systems using battery energy storage. *IEEE* [online]. **2017** [cit. 2023-12-17]. Dostupné z: [doi:10.1109/ICIT.2017.7913261](https://doi.org/10.1109/ICIT.2017.7913261)
- [18] Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 5/2023. *Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: <https://eru.gov.cz/energeticky-regulacni-vestnik-72023>
- [19] *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)* [online]. [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en

- [20] Čistá současná hodnota. *MANAGEMENT MANIA* [online]. [cit. 2024-05-06].
Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/cista-soucasna-hodnota>
- [21] Vnitřní výnosové procento. *MANAGEMENT MANIA* [online]. 2015 [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/vnitri-vynosove-procento>

Přílohy

Příloha č.1 – kód pro výpočet snížení rezervované kapacity

```
clc;
n = 96; %počet časových vzorků
Pmax=2880; %maximální odebíraný výkon
Evyb=0; % vybíjecí energie
Enab=0; %nabíjecí energie
Eminus=0; %přírůstek vybíjecí energie
Eplus=0; %přírůstek nabíjecí energie
Pv = 500; %počet kroků snižování rezervovaného příkonu
cas = zeros(n,1); %matice časů
v = zeros(n,1); %matice výsledných potřebných energií
Psniz = zeros(n,1); %matice snížení rezervovaných příkonů
for i=1:Pv

for k = 1:n
    cas(k,1) = k*0.25;

if pu1(k) >= (Pmax-i) %podmínka vybíjení baterie
    Eminus = (pu1(k)-(Pmax-i));
    Evyb = Evyb + Eminus;

end
if pu1(k)< (Pmax-i) %podmínka pro dobíjení baterie
    Eplus = ((Pmax-i)-pu1(k));
    Enab=Enab+Eplus;
end

end
v(i,1) = Evyb;
Enab=0;
Evyb=0;
Psniz(i,1)=i;
end
f = figure;
plot(Psniz,v);
plottools(f);
```

Příloha č.2 – kód pro výpočet velikostí výkonů BESS

```

clc;
n = 96;
Prez=2250; %hodnota rezervovaného příkonu
vykon_BEES=zeros(n,1); %matice výkonů BESS
Soc=zeros(n,1); %Stav nabití baterie
cas=zeros(n,1);
energie = zeros(n,1); %Hodnota energie pro výpočet SoC
Eminus=0;
Eplus=0;
Emax=2000;%kWh - maximální kapacita baterie
Ezbyt=750; %počáteční hodnota energie v BESS
vykon_oriznuty=zeros(n,1); %matice výsledného výkonu oříznutého pomocí BESS
pu1=zeros(n,1); %matice průběhu výkonu
pfve=zeros(n,1); %matice výkonu FVE
pfvesim=zeros(n,1); %matice výkonu FVE pro vložení do simulačního programu

for k = 1:n
cas(k,1) = k*0.25;
Soc(k,1)=(Ezbyt/Emax)*100; %výpočet SoC
pfvesim(k,1)=-pfve(k,1);
pu1(k,1)=pz(k)-pfve(k,1); %rozdíl odebíraného výkonu a výkonu dodávaného z FVE

if Soc(k)<85 %podmínky pro dodržení mezí SoC
if Soc(k)>15
if pu1(k) > Prez
vykon_BEES(k,1) = Prez-pu1(k,1);
En = vykon_BEES(k,1).*0.25; %Energie do BESS
vykon_oriznuty(k,1)=pu1(k)+vykon_BEES(k,1); %Výsledný výkon
end

if pu1(k)<=Prez %podmínka pro dobíjení baterie
vykon_BEES(k,1) = Prez-pu1(k);
if vykon_BEES(k,1)>=2000 %Omezení výkonu BESS na 2MW
vykon_BEES(k,1) = 2000;
else
vykon_BEES(k,1) = Prez-pu1(k);
end
En = vykon_BEES(k,1).*0.25;
vykon_oriznuty(k,1)=pu1(k)+vykon_BEES(k,1);
end
end
if Soc(k)<15 %Podmínka spodní hranice SoC - může pouze nabíjet
if pu1(k) > Prez
vykon_BEES(k,1) = 0;
En = vykon_BEES(k,1).*0.25;
vykon_oriznuty(k,1)=pu1(k);
end
if pu1(k)<=Prez
vykon_BEES(k,1) = Prez-pu1(k);
if vykon_BEES(k,1)>=2000 %Omezení výkonu BESS
vykon_BEES(k,1) = 2000;
else
vykon_BEES(k,1) = Prez-pu1(k);
end
En = vykon_BEES(k,1).*0.25;
vykon_oriznuty(k,1)=pu1(k)+vykon_BEES(k,1);

```

```
end
end
end
if Soc(k)>=85 %Podmínka horní hranice SoC - baterie může pouze vybíjet
    if pu1(k) > Prez
        vykon_BEES(k,1) = Prez-pu1(k,1);
        En = vykon_BEES(k,1).*0.25;
        vykon_oriznuty(k,1)=pu1(k)+vykon_BEES(k,1);
    end
    if pu1(k)<=Prez
        vykon_BEES(k,1) = 0;
        En = vykon_BEES(k,1).*0.25;
        vykon_oriznuty(k,1)=pu1(k);
    end
end
Ezbyt=Ezbyt+En;
energie(k,1)=Ezbyt;
Soc(k,1) = (Ezbyt/Emax)*100;
En=0;
end
```

Příloha č.3 – Výstup z PVGIS



PVGIS-5 estimates of solar electricity generation:

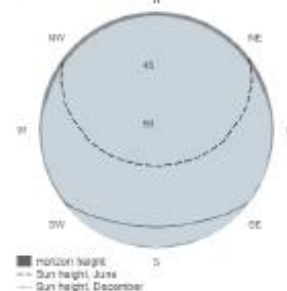
Provided inputs:

Latitude/Longitude: 49.722,13.347
 Horizon: Calculated
 Database used: PVGIS-SARAH2
 PV technology: Crystalline silicon
 PV installed: 200 kWp
 System loss: 14 %

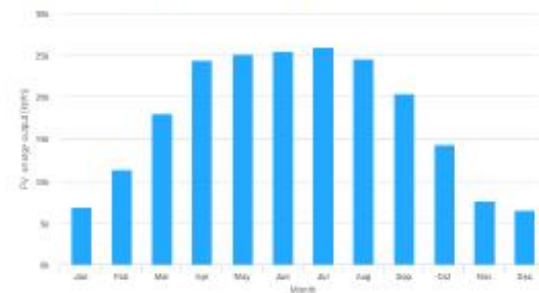
Simulation outputs

Slope angle: 35 °
 Azimuth angle: 0 °
 Yearly PV energy production: 210370.58 kWh
 Yearly in-plane irradiation: 1330.98 kWh/m²
 Year-to-year variability: 12062.60 kWh
 Changes in output due to:
 Angle of incidence: -3.05 %
 Spectral effects: 1.73 %
 Temperature and low irradiance: -6.83 %
 Total loss: -20.97 %

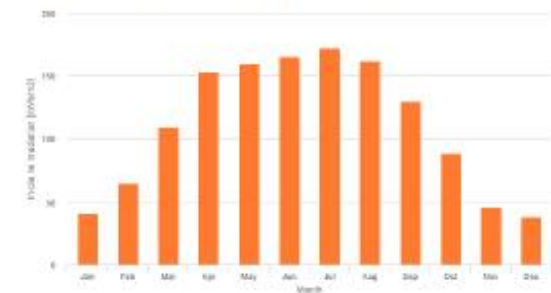
Outline of horizon at chosen location:



Monthly energy output from fix-angle PV system:



Monthly in-plane irradiation for fixed-angle:



Monthly PV energy and solar irradiation

Month	E _m	H(I) _m	SD _m	
January	6954.7	40.9	1321.2	E _m : Average monthly electricity production from the defined system [kWh].
February	11247.765.6	2929.1		H(I) _m : Average monthly sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system [kWh/m ²].
March	17924.9109.0	3422.9		SD _m : Standard deviation of the monthly electricity production due to year-to-year variation [kWh].
April	24429.2153.3	4036.5		
May	25157.7160.2	3618.5		
June	25390.5165.9	2404.8		
July	25935.5172.3	2752.2		
August	24595.4161.9	2635.9		
September	20350.4129.6	2920.8		
October	14181.087.5	2655.5		
November	7672.1	46.1	1232.8	
December	6531.3	38.7	1359.5	

The European Commission maintains the website to enhance public access to information about its initiatives and European Union policies in general. Our goal is to have this information clear and accurate. If errors are brought to our attention, we will try to correct them. However, the Commission accepts no responsibility or liability whatsoever with regard to the information on this site.
 It is our goal to minimize disruption caused by technical errors. However, some data or information on this site may have been updated or discontinued in this or future editions and we cannot guarantee that our website will not be interrupted or otherwise affected in each instance. The Commission accepts no responsibility with regard to such problems caused as a result of using the site or any linked external sites.
 For more information, please visit http://ec.europa.eu/energy/index_en

PVGIS ©European Union, 2001-2024.
 Reproduction is authorized, provided the source is acknowledged, save where otherwise stated.

Report generated on 2024/05/04



Příloha č.4 – Hodnoty použité pro výpočet a simulaci

Pz	Qz	Pbess	Pfvemrak	Pbess(mrak)	Pfveslun	Pbess(slun)
2304	828	-54	0	-54	0	-54
2380	885	-130	0	-130	0	-130
2092	669	158	0	158	0	158
2344	858	-94	0	-94	0	-94
1576	282	674	0	674	0	674
1624	318	626	0	626	0	626
1976	582	274	0	274	0	274
2328	846	-78	0	-78	0	-78
2284	813	-34	0	-34	0	-34
2312	834	-62	0	-62	0	-62
2352	864	-102	0	-102	0	-102
2392	894	-142	0	-142	0	-142
2200	750	50	0	50	0	50
2352	864	-102	0	-102	0	-102
2096	672	154	0	154	0	154
2212	759	38	0	38	0	38
2400	900	-150	0	-150	-6.665	-143.335
2292	819	-42	-3	-39	-9.85125	-32.1487
1708	381	542	-8.75	550.75	-13.0375	555.0375
1508	231	742	-16.2238	758.2238	-16.2238	758.2238
1516	237	734	-5.364	739.364	-19.41	753.41
1685	363.75	565	-30.8944	595.8944	-30.8944	595.8944
1720	390	530	-42.3788	572.3788	-42.3788	572.3788
1520	240	0	-53.8631	0	-53.8631	0
1584	288	0	-16.364	0	-65.3475	0
2704	1128	-454	-48.614	-405.386	-78.9344	-375.066
2864	1248	-614	-57.6125	-556.388	-92.5213	-521.479
2628	1071	-378	-106.108	-271.892	-106.108	-271.892
2316	837	-66	-119.695	53.695	-119.695	53.695
2324	843	-74	-132.644	58.64437	-132.644	58.64437
2468	951	-218	-12.809	-205.191	-145.594	-72.4063
2408	906	-158	-14.1145	-143.886	-158.543	0.543125
2452	939	-202	-112.5	-89.5	-171.493	-30.5075
2380	885	-130	-155.863	25.8625	-182.005	52.005
2484	963	-234	-192.518	-41.4825	-192.518	-41.4825
2436	927	-186	-41.364	-144.636	-203.03	17.03
2292	819	-42	-28.25	-13.75	-213.543	171.5425
2468	951	-218	-21.4135	-196.587	-220.481	2.480625
2416	912	-166	-5.885	-160.115	-227.419	61.41875

2344	858	-94	-27.635	-66.365	-234.357	140.3569
2484	963	-234	-241.295	7.295	-241.295	7.295
2420	915	-170	-137.163	-32.8375	-244.021	74.02125
2248	786	2	-180.137	182.1365	-246.748	248.7475
2816	1212	-566	-212.664	-353.337	-249.474	-316.526
2296	822	-46	-230.137	184.1365	-252.2	206.2
2588	1041	-338	-53.664	-284.336	-250.485	-87.515
2440	930	-190	-87.5535	-102.447	-248.77	58.77
2388	891	-138	-90.0525	-47.9475	-247.055	109.055
2672	1104	-422	-70.0315	-351.969	-245.34	-176.66
2576	1032	-326	-187.614	-138.386	-239.328	-86.6725
1128	-54	1122	-233.315	1355.315	-233.315	1355.315
1376	132	874	-227.303	1101.303	-227.303	0
1416	162	834	-6.5	840.5	-221.29	0
1098	-76.5	1152	-11.3913	0	-211.517	0
1068	-99	1182	-8.031	0	-201.744	0
1400	150	850	-14.12	0	-191.971	0
1976	582	0	-89.031	0	-182.198	0
2600	1050	-350	-112.531	-237.469	-169.676	-180.324
2568	1026	-318	-130.863	-187.138	-157.154	-160.846
2416	912	-166	-127.614	-38.386	-144.632	-21.3681
1986	589.5	264	-132.11	0	-132.11	0
2276	807	-26	-118.468	0	-118.468	0
2376	882	-126	-104.825	-21.175	-104.825	-21.175
2544	1008	-294	-91.1825	-202.818	-91.1825	-202.818
2424	918	-174	-41.1125	-132.888	-77.54	-96.46
2248	786	2	-44.7375	46.7375	-65.265	0
2332	849	-82	-39.1285	-42.8715	-52.99	-29.01
2264	798	-14	-40.715	26.715	-40.715	0
2300	825	-50	-28.44	-21.56	-28.44	-21.56
2144	708	106	-23.5506	129.5506	-23.5506	0
2592	1044	-342	-18.6613	-323.339	-18.6613	-323.339
2480	960	-230	-13.7719	-216.228	-13.7719	-216.228
2548	1011	-298	-8.8825	-289.118	-8.8825	-289.118
1240	30	1010	0	1010	0	1010
1216	12	1034	0	0	0	0
1284	63	0	0	0	0	0
1056	-108	0	0	0	0	0
1016	-138	0	0	0	0	0
1100	-75	0	0	0	0	0
1080	-90	0	0	0	0	0
1100	-75	0	0	0	0	0
1084	-87	0	0	0	0	0

1104	-72	0	0	0	0	0
1358	118.5	0	0	0	0	0
1444	183	0	0	0	0	0
1744	408	0	0	0	0	0
1824	468	0	0	0	0	0
1884	513	0	0	0	0	0
1884	513	0	0	0	0	0
2476	957	-226	0	-226	0	-226
2446	934.5	-196	0	-196	0	-196
2418	913.5	-168	0	-168	0	-168
1588	291	0	0	662	0	662
1412	159	0	0	0	0	0
1088	-84	0	0	0	0	0
1012	-141	0	0	0	0	0

Pz_vikend	Qz_vikend	Pbess- peakshave- slunecno	Pbess- peakshave- mrak
9	6.75	-10	-9
10	7.5	-10	-10
10	7.5	-10	-10
9	6.75	-10	-9
9	6.75	-10	-9
10	7.5	-10	-10
9	6.75	-10	-9
10	7.5	-10	-10
9	6.75	-10	-9
9	6.75	-10	-9
10	7.5	-10	-10
9	6.75	-10	-9
9	6.75	-10	-9
10	7.5	-10	-10
9	6.75	-10	-9
9	6.75	-10	-9
9	6.75	-10	-9
9	6.75	-10	-6
9	6.75	-10	-0.25
9	6.75	-10	7.22375
9	6.75	-10	-3.636
9	6.75	-28.1056	21.89438
9	6.75	-16.6213	33.37875
9	6.75	-5.13688	44.86313
11	8.25	4.3475	5.364

41	30.75	-12.0656	7.614
92	69	-49.4788	-34.3875
83	62.25	-26.8919	23.10813
66	49.5	3.695	53.695
81	60.75	1.644375	51.64438
71	53.25	24.59375	-58.191
67	50.25	41.54313	-52.8855
51	38.25	70.4925	61.5
71	53.25	61.005	84.8625
82	61.5	60.5175	110.5175
77	57.75	76.03	-35.636
65	48.75	98.5425	-36.75
70	52.5	100.4806	-48.5865
72	54	105.4188	-66.115
57	42.75	127.3569	-29.365
9	6.75	182.295	232.295
9	6.75	185.0213	128.1625
10	7.5	186.7475	170.1365
55	41.25	144.4738	157.6635
75	56.25	127.2	155.1365
69	51.75	131.485	-15.336
62	46.5	136.77	25.5535
65	48.75	132.055	25.0525
21	15.75	174.34	49.0315
9	6.75	180.3275	178.614
9	6.75	174.315	224.315
10	7.5	167.3025	217.3025
9	6.75	162.29	-2.5
9	6.75	152.5169	2.39125
10	7.5	141.7438	-1.969
9	6.75	132.9706	5.12
9	6.75	123.1975	80.031
10	7.5	109.6756	102.5313
11	8.25	96.15375	119.8625
16	12	78.63188	111.614
14	10.5	68.11	118.11
9	6.75	59.4675	109.4675
10	7.5	44.825	94.825
9	6.75	32.1825	82.1825
9	6.75	18.54	32.1125
9	6.75	6.265	35.7375
9	6.75	-6.01	30.1285
10	7.5	-19.285	30.715

10	7.5	-10	18.44
9	6.75	-10	14.55063
9	6.75	-10	9.66125
10	7.5	-10	3.771875
9	6.75	-10	-0.1175
10	7.5	-10	-10
8	6	-10	-8
10	7.5	-10	-10
8	6	-10	-8
11	8.25	-10	-11
9	6.75	-10	-9
8	6	-10	-8
9	6.75	-10	-9
9	6.75	-10	-9
10	7.5	-10	-10
9	6.75	-10	-9
10	7.5	-10	-10
9	6.75	-10	-9
10	7.5	-10	-10
9	6.75	-10	-9
10	7.5	-10	-10
9	6.75	-10	-9
10	7.5	-10	-10
10	7.5	-10	-10
9	6.75	-10	-9
9	6.75	-10	-9
10	7.5	-10	-10
9	6.75	-10	-9

Příloha č.5 – výpočet návratnosti

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
úspora (Kczk)	0	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447
odpisy (Kczk)	0	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799
variabilní náklady (Kczk)	0	100	102	104.04	106.1208	108.2432	110.4081	112.6162
fixní náklady (Kczk)	0	120	120	120	120	120	120	120
náklady (Kczk)	0	972.0799	974.0799	976.1199	978.2007	980.3231	982.488	984.6962
celková úspora (Kczk)	0	1414.367	1412.367	1410.327	1408.246	1406.124	1403.959	1401.751
Cash flow (Kczk)	-26322.8	2166.447	2164.447	2162.407	2160.326	2158.203	2156.039	2153.83

2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041
2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447
752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799
114.8686	117.1659	119.5093	121.8994	124.3374	126.8242	129.3607	131.9479	134.5868	137.2786
120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
986.9485	989.2459	991.5892	993.9794	996.4174	998.9041	1001.441	1004.028	1006.667	1009.359
1399.498	1397.201	1394.858	1392.467	1390.029	1387.543	1385.006	1382.419	1379.78	1377.088
2151.578	2149.281	2146.937	2144.547	2142.109	2139.623	2137.086	2134.499	2131.86	2129.168

2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051
2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447
752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799
140.0241	142.8246	145.6811	148.5947	151.5666	154.598	157.6899	160.8437	164.0606	167.3418
120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
1012.104	1014.905	1017.761	1020.675	1023.647	1026.678	1029.77	1032.924	1036.141	1039.422
1374.343	1371.542	1368.686	1365.772	1362.8	1359.769	1356.677	1353.523	1350.306	1347.025
2126.423	2123.622	2120.766	2117.852	2114.88	2111.849	2108.757	2105.603	2102.386	2099.105

2052	2053	2054	2055	2056	2057	2058	2059
2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447	2386.447
752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799	752.0799
170.6886	174.1024	177.5845	181.1362	184.7589	188.4541	192.2231	196.0676
120	120	120	120	120	120	120	120
1042.769	1046.182	1049.664	1053.216	1056.839	1060.534	1064.303	1068.148
1343.678	1340.264	1336.782	1333.231	1329.608	1325.913	1322.144	1318.299
2095.758	2092.344	2088.862	2085.311	2081.688	2077.993	2074.224	2070.379

IRR(%)	7.49%
NPV (Kczk)	48003.39