



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

PŘIPOJITELNOST OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ DO DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ

HOSTING CAPACITY OF THE DISTRIBUTION GRIDS FOR RENEWABLE ELECTRICITY PRODUCTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Koubek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.

BRNO 2023



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Michal Koubek

ID: 233531

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Připojitelnost obnovitelných zdrojů do distribučních sítí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Podmínky pro připojování nových zdrojů elektrické energie do distribuční soustavy s ohledem na jejich zpětné vlivy na distribuční síť
2. Přehled obnovitelných zdrojů připojovaných do distribuční soustavy a jejich základních charakteristik
3. Vytvoření modelu napájecí oblasti VN a ekvivalentu zdrojů rozptýlené výroby elektřiny
4. Analýza vlivu připojovaných obnovitelných zdrojů elektřiny na kvalitu elektrické energie v dané napájecí oblasti VN a posouzení dalších přínosů rozptýlené výroby

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] MASTNÝ, Petr. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [2] PNE 33 3430-0: Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav
- [3] Pravidla provozování distribučních soustav

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 22.5.2023

Vedoucí práce: prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.

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

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá s připojitelností nových obnovitelných zdrojů do distribuční soustavy. První část práce se věnuje popisu zpětným vlivům a požadavkům na připojení. Dále je zpracován přehled nejčastěji připojovaných obnovitelných zdrojů do distribuční soustavy. V rámci praktické části diplomové práce byl vytvořen model reálné sítě vysokého napětí, ve kterém byly evidovány žádosti o připojení. Jedna z žádostí byla důkladně posouzena a byly vyhodnoceny dopady připojené výroby na síť.

KLÍČOVÁ SLOVA

Obnovitelné zdroje energie, připojitelnost, distribuční síť, zpětné vlivy na distribuční síť, regulace napětí.

ABSTRACT

This thesis deals with the topic of hosting capacity of the distribution grids for renewable electricity production. The first part of the thesis focuses on describing the back effects to the distribution network and requests for connection. Furthermore, an overview of the most commonly connected renewable energy sources to the distribution system is provided. In the practical part of the thesis, a model of a real high-voltage network was created, in which connection requests were recorded. One of the requests was thoroughly assessed, and the impacts of the connected generation on the network were evaluated.

KEYWORDS

renewable energy sources, hosting capacity, distribution system, back effects to distribution network, voltage regulation

KOUBEK, Michal. *Připojitelnost obnovitelných zdrojů do distribučních sítí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2023, 75 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora:	Bc. Michal Koubek
VUT ID autora:	233531
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2022/23
Téma závěrečné práce:	Připojitelnost obnovitelných zdrojů do distribučních sítí

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Petru Tomanovi, Ph.D., za vedení práce, konzultace a trpělivost. Dále děkuji konzultantům panu Ing. Františkovi Kysnarovi, Ph.D, a panu Mgr. Ing. Vítu Kleinovi, Ph.D., za podnětné a věcné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	19
1 Připojování nových zdrojů do distribuční soustavy	21
1.1 Zpětné vlivy na napájecí síť	21
1.1.1 Zvýšení napětí	22
1.1.2 Změny napětí vyvolané manipulacemi	24
1.1.3 Flicker	24
1.1.4 Zpětné vlivy na zařízení pro přenos signálů	25
1.1.5 Proudové vyšších harmonických	25
1.1.6 Kompenzace jalového výkonu	26
1.2 Provoz výroben z pohledu síťového napětí	27
1.2.1 Zásady podpory sítě	27
1.2.2 Řízení jalového výkonu výroben	30
2 Obnovitelné zdroje připojované do distribučních soustav	31
2.1 Typy připojovaných výroben	31
2.1.1 Fotovoltaické elektrárny	31
2.1.2 Větrné elektrárny	33
2.1.3 Vodní elektrárny	36
2.1.4 Biomasa	40
2.2 Současný a možný budoucí vývoj podílu obnovitelných zdrojů energie	42
2.2.1 Současný stav energetického mixu	42
2.2.2 Predikce vývoje obnovitelných zdrojů energie a jejich vliv na distribuční soustavu	44
3 Model napájecí oblasti vysokého napětí	47
3.1 Použitý výpočtový a modelovací software	47
3.2 Namodelovaná část analyzované sítě vysokého napětí	47
4 Analýza připojovaných zdrojů do distribuční soustavy	51
4.1 Ukázka výpočtu jednoduché sítě	51
4.2 Posouzení připojitelnosti nového zdroje do distribuční soustavy	55
4.2.1 Síťové poměry před připojením výrobní k síti	57
4.2.2 Souhrn síťových poměrů po připojení výrobní s rezervovaným výkonem 4000 kW	57
4.2.3 Souhrn poměrů po připojení výrobní s rezervovaným výkonem 3010 kW	58
4.2.4 Další zpětné vlivy	61

4.2.5	Proudové zatížení vedení a napájecích transformátorů	63
4.3	Vyhodnocení připojení nové výroby a dalších hledisek spojených s připojováním nových zdrojů	65
	Závěr	69
	Literatura	71
	A Obsah elektronické přílohy	75

Seznam obrázků

1.1	Požadavky na dodávku/odběr jalového výkonu při jmenovitém napětí v sítích NN [5]	28
1.2	Požadovaný rozsah dodávky/odběru jalového výkonu u synchronních výroben nad 11 kW při jmenovitém napětí [5]	29
1.3	Dodávka/odběr jalového výkonu při jmenovitém napětí a nižší než maximální dodávce činného výkonu pro nesynchronní výrobní modul nad 1 MW [5]	29
1.4	Charakteristika funkce $Q(U)$ [5]	30
2.1	Struktura fotovoltaického modulu [9]	32
2.2	Vliv intenzity slunečního záření na výkon FV článku [10]	32
2.3	Savoniův větrný motor [11]	34
2.4	Možné varianty provedení vztlakových motorů [12] a) jednolisté provedení s protizávažím, b) dvoulisté provedení, c) třílisté provedení	34
2.5	Asynchronní generátor s napájeným rotorem [11]	35
2.6	Synchronní generátor poháněný přímo turbínou [11]	36
2.7	Odtoková křivka [12]	38
2.8	Pracovní oblast vodních turbín [13]	39
2.9	Řez malou vodní elektrárnou s Bankiho turbínou [12]	39
2.10	Schéma připojení MVE k síti [7]	40
2.11	Vývoj instalovaného výkonu v ES ČR (k 31. 12. 2021) [15]	42
2.12	Porovnání dnešního a predikovaného výkonu v ES ČR [15], [16]	43
2.13	Vývoj počtu žádostí o připojení napříč napětovými hladinami [17]	44
2.14	Vývoj velikosti rezervovaného výkonu napříč napětovými hladinami [17]	45
3.1	Detail modelované sítě – rozdělení vývodů	48
3.2	Model analyzované sítě VN	49
4.1	Posuzovaná síť pro ukázkou zpětných vlivů	51
4.2	Náhradní schéma soustavy pro sestavení admitanční matice	52
4.3	Namodelovaná síť s novými a posuzovaným zdrojem	56
4.4	Velikost jalového výkonu a změny napětí v závislosti na provozním účinníku	58
4.5	Velikost jalového výkonu a změny napětí v závislosti na provozním účinníku	59
4.6	Odchylka napětí od jmenovité hodnoty v síti 22 kV a na svorkách střídačů výrobní v závislosti na provozním účinníku	60
4.7	Podpora napětí pomocí jalového výkonu	61
4.8	Příspěvek harmonických proudů výrobní	62

Seznam tabulek

1.1	Výkonové kategorie výroben [5]	22
1.2	Přípustný vztažný proud harmonických zdrojů v síti VN [5]	26
4.1	Zkratové poměry v místě připojení po připojení výrobní	63
4.2	Proudové zatížení vedení v různých provozních stavech výrobní	64
4.3	Zatížení transformátorů v normálním a N-1 stavu	65

Úvod a cíl práce

Výrazný rozvoj a současná podpora obnovitelných zdrojů přinesla významný úsporný potenciál pro odběratele elektrické energie, ale také zajímavé investiční příležitosti pro výstavbu větších elektráren připojených přímo do elektrizační sítě. To s sebou nese velké výzvy pro celou oblast elektroenergetiky a zejména pro provozovatele distribučních a přenosových soustav.

Pro rozhodování o připojitelnosti zdroje jsou v současné době nejdůležitější zejména pravidla provozování distribučních soustav, nařízení evropské komise (EU) 2016/631 ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě, a platné normy zabývající se zpětnými vlivy na síť. Tyto dokumenty kategorizují jednotlivé typy výroben, stanovují požadované chování výroben ve všech provozních stavech sítě a specifikují technické požadavky spojené s dálkovým ovládním, měřením atp.

S rostoucí decentralizací zdrojů v distribučních soustavách napříč všemi napěťovými hladinami se tyto požadavky na připojované výrobní a pravidla pro jejich provozování stávají nástrojem pro řízení distribučních sítí a sehrávají proto čím dál důležitější úlohu. Je proto nezbytné důkladně posoudit provozní možnosti připojovaných výroben a zhodnotit jejich dopady, které mohou mít nezanedbatelný dopad na provoz distribuční sítě.

Cílem této práce je poukázat na problematiku připojování nových zdrojů do distribučních soustav včetně všech souvislostí z toho plynoucích. Na konkrétním příkladu žádosti o připojení nové výrobní je demonstrován postup při vyhodnocování zpětných vlivů a důležitých dopadů na provoz částí konkrétní distribuční sítě. Všechna vyhodnocení, kvantifikace jednotlivých zpětných vlivů a získané výstupy v práci jsou v souladu s dnešní podobou výše zmíněných dokumentů.

1 Připojování nových zdrojů do distribuční soustavy

Distribuční soustava je část elektrizační soustavy, která je provozována na velmi vysokém, vysokém a nízkém napětí (v ČR zejména 0,4 kV, 22 kV nebo 35 kV a 110 kV) a slouží především k zajištění distribuce elektřiny na vymezeném území. Kromě samotných odběrů z distribuční soustavy, jsou do sítí jednotlivých napěťových úrovní připojeny i zdroje elektrické energie. Stejně jako připojení zátěže do elektrizační soustavy, tak i připojení nového zdroje způsobuje zpětné vlivy na elektrizační soustavu, které mohou mít zásadní vliv na chod sítě nebo také na kvalitu elektrické energie. Proto jsou na národní úrovni definovány a legislativně stanoveny požadavky, které jsou v rámci ČR obsaženy v pravidlech provozování distribuční soustavy. Z pohledu připojování výroben je pak nejzásadnější příloha 4, která specifikuje podmínky pro paralelní provozování výroben s distribuční sítí včetně zahrnutí požadavků nařízení komise (EU) 2016/631 ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě.

1.1 Zpětné vlivy na napájecí síť

Míra vyvolaných zpětných vlivů pak souhrnně nezávisí nejen na parametrech připojovaného výrobního modulu, ale také na parametrech elektrizační soustavy v daném místě připojení. Hlavním parametrem připojovaného nového zdroje do elektrizační soustavy je dodávaný výkon, jehož velikost zpravidla určuje napěťovou hladinu, do které je připojen. S rostoucím připojovaným výkonem, a tedy i s významem pro elektrizační soustavu, se zvyšuje napěťová hladina, do které se daná výrobná připojuje. Ačkoliv se výrobní moduly dělí dle [1] na jednotlivé výkonové kategorie, jak je uvedeno v tabulce 1.1 níže, každou žádost o připojení vyhodnocuje provozovatel distribuční soustavy, který určí místo a způsob připojení dané výrobní. Kromě výkonové kategorizace výroben je dále zásadní typ připojované výrobní, který je buďto synchronní nebo nesynchronní. To je dále rozhodující pro provozní požadavky na připojovanou výrobní. Konkrétní uzel sítě, a tedy i místo připojení, ve kterém se výrobná nachází, je charakterizováno napěťovou hladinou, zkratovým výkonem či zkratovou impedancí. Ta je vlastností daného uzlu sítě závisející na její konfiguraci, parametrech jednotlivých prvků a fakticky určuje tvrdost sítě.

Z pohledu zpětných vlivů charakteristických pro paralelní provoz výroben jsou dle [2] nejzásadnější tyto jevy:

- zvýšení napětí,
- změny napětí vyvolané manipulacemi,

- flickr,
- vyšší harmonické,
- kompenzace jalového výkonu,
- zpětné vlivy na zařízení pro přenos signálů po distribuční síti (např. HDO).

V dalších podkapitolách jsou charakterizovány a popsány výše uvedené zpětné vlivy včetně jejich příčiny vzniku a přípustné meze dodržované v distribučních sítích.

Kategorie výrobního modulu	Limit	Podkat.	Hranice PDS
A	800 W	A1	$\geq 800 \text{ W};$ $\leq 11 \text{ kW}$
		A2	$> 11 \text{ kW};$ $< 100 \text{ kW}$
B	1 MW	B1	$\geq 100 \text{ kW};$ $< 1 \text{ MW}$
		B2	$\geq 1 \text{ MW};$ $< 30 \text{ MW}$
C	50 MW	C	$\geq 30 \text{ MW}$ $< 75 \text{ MW}$
D	75 MW	D	$\geq 75 \text{ MW}$

Tab. 1.1: Výkonové kategorie výroben [5]

1.1.1 Zvýšení napětí

Pro další popis je uvažována zdrojová orientace, tj. uvažování dodávání činného i jalového výkonu ($P > 0$ a $Q > 0$) pro úhel změny zatížení $0^\circ < \varphi < 90^\circ$, který je typický pro přebuzené synchronní generátory či pulzní měniče. Naopak dodávka činného výkonu s odběrem jalového výkonu ($P > 0$ a $Q < 0$) je pak určena úhlem změny zatížení $-90^\circ < \varphi < 0^\circ$, který je spojován zejména s asynchronními a podbuzenými synchronními generátory nebo sítí řízenými střídači.

Změnu napětí vyvolanou připojením symetricky pracujícího výrobního modulu do elektrizační soustavy lze pak při zanedbání komplexní změny napětí popsat vztahem dle [3]:

$$\Delta U_{mp} = \Delta I(R_{mp} \cdot \cos \varphi \mp X_{mp} \cdot \sin \varphi) = \frac{\Delta P}{U_{mp}} \cdot R_{mp} \mp \frac{\Delta Q}{U_{mp}} \cdot X_{mp} \quad (1.1)$$

Relativní změnu napětí pak s přechodem ke zdánlivému výkonu lze vyjádřit

$$u_{mp} = \frac{\Delta S}{S_{k\ mp}} \cdot \cos(\Psi_{mp} \pm \varphi) \quad (1.2)$$

kde φ	[-]	úhel změny zatížení
u_{mp}	[-]	relativní změna napětí
ΔU_{mp}	[V]	změna napětí
U_{mp}	[V]	sdružené napětí v místě připojení
ΔS	[VA]	změna zdánlivého výkonu
$S_{k\ mp}$	[VA]	zkratový výkon v místě připojení
ΔP	[W]	změna činného výkonu
ΔQ	[VAr]	změna jalového výkonu
X_{mp}	[Ω]	reaktance sítě
R_{mp}	[Ω]	odpor sítě
Ψ_{mp}	[-]	úhel impedance sítě, který lze vyjádřit vztahem:

$$\Psi_{mp} = \arctan \left(\frac{X_{mp}}{R_{mp}} \right) \quad (1.3)$$

Častěji používaný poměr $\frac{R}{X}$ pak vystihuje citlivost napěťové změny na charakter dodávaného výkonu. Obecně lze tvrdit, že u napěťových hladin zvláště i velmi vysokého napětí je reaktance dominantní složkou impedance v síti, a napěťové změny jsou závislé zejména na jalovém výkonu. Naopak u sítí VN a více pak ještě u sítí NN narůstá podíl činné složky impedance a poměr $\frac{R}{X}$ je větší. Je to dáno zejména uspořádáním a parametry vodičů používaných na těchto hladinách. [4]

V distribučních soustavách nesmí dojít za normálních provozních podmínek k výraznému zvýšení napětí způsobené provozem výroben. Mezní hodnoty pro poměrné zvýšení napětí Δu ve srovnání s a bez provozu výroben v nejnepříznivějším případě jsou dány dle napěťových hladin [5]:

$$\Delta u_{vn, 110\ kV} \leq 2\ \% \quad \Delta u_{nn} \leq 3\ \%$$

Tato hodnota je uvažována při dodávaném výkonu s neutrálním účínkem v místě připojení, přičemž musí být stále dodržena velikost napětí v distribuční síti pro jednotlivé napěťové hladiny dle [6].

1.1.2 Změny napětí vyvolané manipulacemi

Změny napětí vyvolané manipulacemi, nebo též nazývané změny napětí při spínání, jsou zapříčiněné změnou dodávaného výkonu připojováním či odpojováním jednotlivých výrobních modulů nebo celých výroben. Limitní hodnota je určena pro minimální periodu spínání 1,5 minuty, přičemž je dle [5] opět rozdělena v rámci napěťových úrovní:

$$\Delta u_{max\ vn} \leq 2 \% \quad \Delta u_{max\ nn} \leq 3 \%$$

Pro spínání výrobní pracující do sítě 110 kV je požadavek ještě rozdělen na spínání jednoho modulu a pro celé zařízení:

$$\Delta u_{max_1} \leq 0,5 \% \quad \Delta u_{max_c} \leq 3 \%$$

Pro co největší omezení zpětného vlivu u více výrobních modulů se v rámci jednoho přípojného místa časově odstupňovávají jednotlivá spínání.[5]

1.1.3 Flickr

Pro vyhodnocení vlivu flickru výrobní na distribuční síť se posuzuje velikost dlouhodobé míry vjemu flickru P_{lt} . Hodnota této bezrozměrné veličiny nesmí překročit v předávacím místě danou mez. Pro napěťovou hladinu NN a VN dle [5] platí $P_{lt} \leq 0,46$ a pro napěťovou hladinu VVN $P_{lt} \leq 0,37$. Pro daný výrobní modul může být zadán činitel flickru c . Pomocí tohoto činitele lze pak pro jeden výrobní modul určit taktéž dlouhodobou míru flickru P_{lt} pomocí vztahu:

$$P_{lt} = c \cdot \frac{S_v}{S_{k\ mp}} \quad (1.4)$$

kde P_{lt}	[-]	dlouhodobá míra flickru
c	[-]	činitel flickru
S_n	[VA]	jmenovitý výkon výrobní
ΔS	[VA]	změna zdánlivého výkonu
$S_{k\ mp}$	[VA]	zkratový výkon

Pro n totožných výrobních modulů platí:

$$P_{lt} = \sqrt{n} \cdot c \cdot \frac{S_v}{S_{k\ mp}} \quad (1.5)$$

1.1.4 Zpětné vlivy na zařízení pro přenos signálů

V rámci distribuční sítě jde hlavně o hromadné dálkové ovládání, které je provozováno v rozsahu frekvencí 183,3 Hz až 283,3 Hz při vysílací úrovni kolem 2 % jmenovitého napětí. Připojení výroby do sítě může ovlivnit vysílač HDO její vlastní impedancí a také zvýšením zatížení sítě. Z tohoto důvodu se posuzuje snížení úrovně signálu, které nesmí být větší než 5 %, a to s ohledem na dodržení minimální požadované hodnoty signálu, jenž musí být zajištěna při různých stavech sítě. Dále se nesmí zvýšit zatížení vysílače o 5 A na napěťové hladině VVN, resp. o 2 A na hladině VN. Pro posouzení připojitelnosti je třeba určit šíření signálu HDO v síti pro konkrétní vysílací frekvenci a v případě nevyhovujícího výsledku zajistit vhodná opatření, kterými jsou zpravidla hradící členy. [2], [5]

1.1.5 Proudů vyšších harmonických

Dodávaný proud do sítě, jehož časový průběh se odlišuje od základní harmonické, lze popsat použitím Fourierovy transformace jako sumu celočíselných násobků základní harmonické, které jsou od druhého řádu nazývány jako vyšší harmonické. Emise harmonických proudů je spjata zejména s výrobnami, které dodávají výkon do sítě za pomoci střídače či měniči frekvence.

Pro posuzování závažnosti zpětného vlivu, vyvolaného harmonickými proudy, se obecně přistupuje k přípustnému vztažnému proudu, který udává velikost proudu na jednotku zkratového výkonu ve společném napájecím bodě. Pro všechny napěťové hladiny jsou pak určeny různé dovolené mezní velikosti těchto vztažných proudů pro jednotlivé harmonické. Posuzování je individuální nejen z důvodu odlišné velikosti zkratového výkonu v konkrétním uzlu sítě a napěťové hladiny, ale i z důvodu různého sčítání příspěvků dané harmonické z více výroben a odlišnému přístupu k jednotlivým harmonickým, jako například u pulsně modulovaných střídačů či usměrňovačů řízených sítí, které emitují své typické řady harmonických. Níže je uvedena tabulka s přípustnými vztažnými proudy pro napěťovou hladinu VN. Další meze včetně uvedených specifik jsou uvedeny podrobněji v [2] a [5].

Řád harmonické μ, ν	Přípustný vztažný proud harmonických $i_{\mu, \text{př}} [A/MVA]$	
	síť 22 kV	síť 35 kV
5	0,058	0,033
7	0,041	0,023
11	0,026	0,015
13	0,019	0,011
17	0,011	0,006
19	0,009	0,005
23	0,006	0,003
25	0,005	0,003
>25 nebo sudé	0,03/ ν	0,017/ ν
$\mu < 40$	0,03/ μ	0,017/ μ
$\mu > 40$	0,09/ μ	0,046/ μ

Tab. 1.2: Přípustný vztažný proud harmonických zdrojů v síti VN [5]

1.1.6 Kompenzace jalového výkonu

Problematice využití a řízení toků jalového výkonu se v distribučních sítích věnuje čím dál větší pozornost i kvůli masivní podpoře obnovitelných zdrojů a s ní související decentralizací výroben na nižších napěťových hladinách. Jalový výkon je, dle rovnice 1.1, úzce spjatý s napětím v konkrétním uzlu sítě a vzhledem k rozlehlosti distribučních sítí je nástrojem, který přispívá k lokální regulaci napětí. Z tohoto důvodu a důležitosti regulace napětí jsou požadavky na řízení dodávky jalového výkonu připojovaných výroben popsány v následující podkapitole i s dalšími požadavky a specifiky související s charakterem dodávaného výkonu.

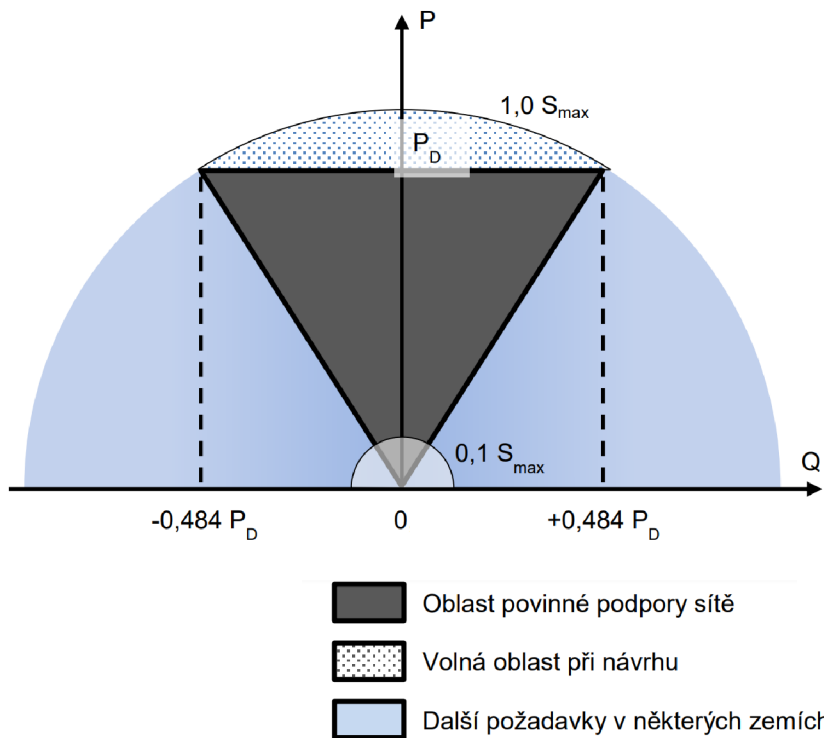
1.2 Provoz výroben z pohledu síťového napětí

Napětí v distribučních sítích, včetně jeho kvality, je zásadním parametrem a všechny výrobní musí umět pracovat v napětově odlišných podmínkách od těch jmenovitých. Z tohoto důvodu definuje [5] výrobním povinnost podílet se na podpoře napětí, kterou dále dělí na statickou a dynamickou.

1.2.1 Zásady podpory sítě

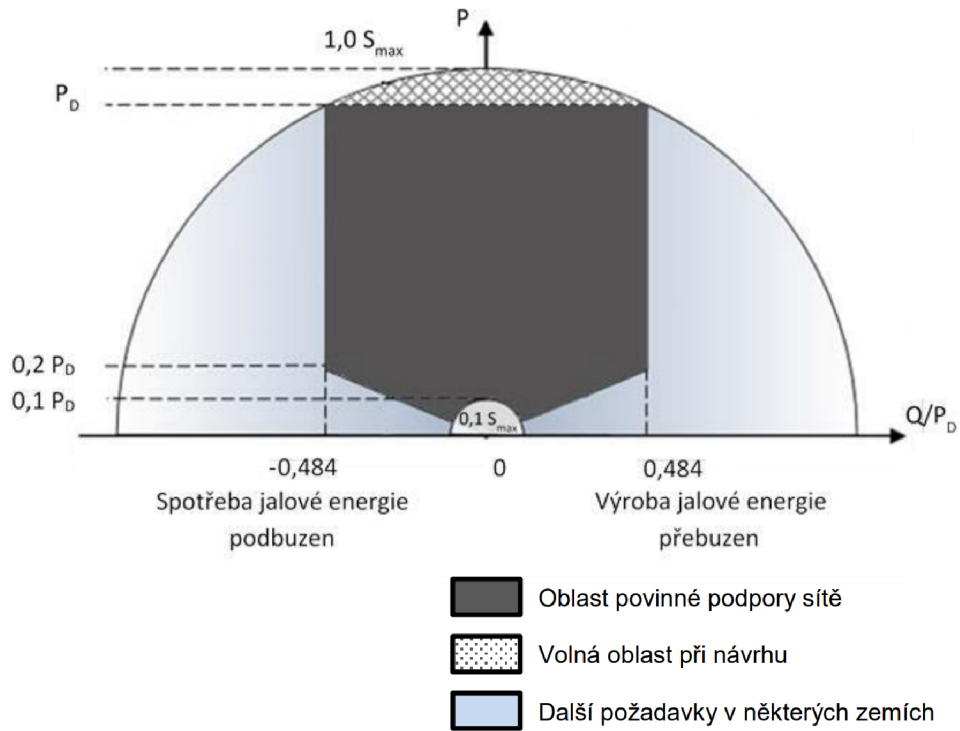
V rámci dynamické podpory sítě jsou definovány požadavky na výrobní moduly pro možné stavy sítě, při kterých vznikají poklesy napětí, které nastávají při poruchách v sítích ZVN a VVN. Dynamickou podporu lze tedy definovat jako nástroj pro zachování stability sítě při těchto krátkodobých jevech, jako jsou jedno i vícepólové zkraty, které by mohly svým účinkem způsobit nežádoucí odpojování výroben z distribuční sítě, což by mohlo vést až k možnému rozpadu sítě. Jde tak o popis požadavků na schopnost výroben překlenout poruchu jako je pokles napětí či přepětí, včetně doby obnovy dodávky činného výkonu či schopnosti provozu v ostrovním režimu, upřednostnění dodávky jalového výkonu před činným, tlumení výkonových oscilací v síti atd. Splnění těchto podmínek je zkušebně ověřováno v souladu [1] před uvedením do provozu a jsou i proto uváděny v přípojovacích podmínkách. Je nutné tedy zajistit technologie splňující všechny tyto podmínky. Jednotlivé požadované charakteristiky jsou uvedeny podrobněji v [5].

Při normálním stavu sítě, tj. v síti bez poruch ovlivňující provoz dané výrobní a malých změnách napětí, musí být výrobní schopny pracovat v daném rozsahu napětí vyskytující se v distribuční síti pro danou napětovou hladinu. Pro napětovou hladinu nízkého napětí je to rozsah jmenovitého napětí od 85 % do 110 %, přičemž při poklesu napětí pod jmenovitou úroveň je dovolené snížení výstupního výkonu v poměru odpovídajícímu tomuto napětovému poklesu. Výrobní připojené do hladiny vysokého a velmi vysokého napětí musí být schopny provozu 60 minut při 85 % až po 115 % jmenovitého napětí, přičemž v rozsahu 90 % až 111,8 % jmenovitého napětí musí být výrobní připojená neustále. Pro zajištění těchto mezí se musí každá výrobní podílet na udržování napětí v síti, čehož je docíleno využíváním regulačního rozsahu dodávaného jalového výkonu. Tento požadovaný výrobní rozsah v sítích nízkého napětí je zobrazen níže na obrázku 1.1.

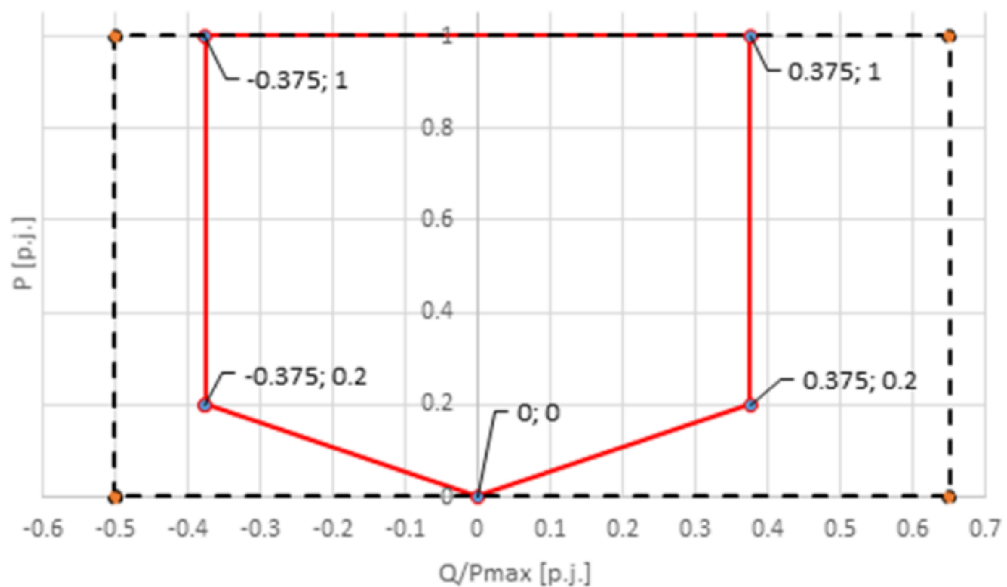


Obr. 1.1: Požadavky na dodávku/odběr jalového výkonu při jmenovitém napětí v sítích NN [5]

V případě výroben se jmenovitým výkonem větším než 11 kW je požadavek na rozsah dodávaného jalového výkonu přísnější. Jde o provozní stavy při dodávce menšího než jmenovitého činného výkonu. To je požadováno z důvodu zachování možnosti využití regulačního jalového výkonu i při stavech, kdy výrobná není schopna dodávat jmenovitý činný výkon. Navíc se musí u výroben nad 1 MW brát v úvahu dodatečný jalový výkon, který je potřeba na kompenzaci nabíjecího výkonu vedení, kabelů či blokových transformátorů, jenž se nacházejí před místem připojení. Výrobná s regulačním rozsahem širším, než který je vyznačen charakteristikou na obrázku 1.2 a 1.3 uvedeném níže, může tento regulační jalový výkon poskytnout provozovateli distribuční soustavy formou smluvní podpůrné služby. Způsob regulace, včetně rozsahu této charakteristiky, určuje provozovatel distribuční soustavy v rámci podmínek připojení. Ten také následně před uvedením do provozu ověřuje jejich splnění prokázáním souladu výrobního modulu s požadavky [1].



Obr. 1.2: Požadovaný rozsah dodávky/odběru jalového výkonu u synchronních výroben nad 11 kW při jmenovitém napětí [5]



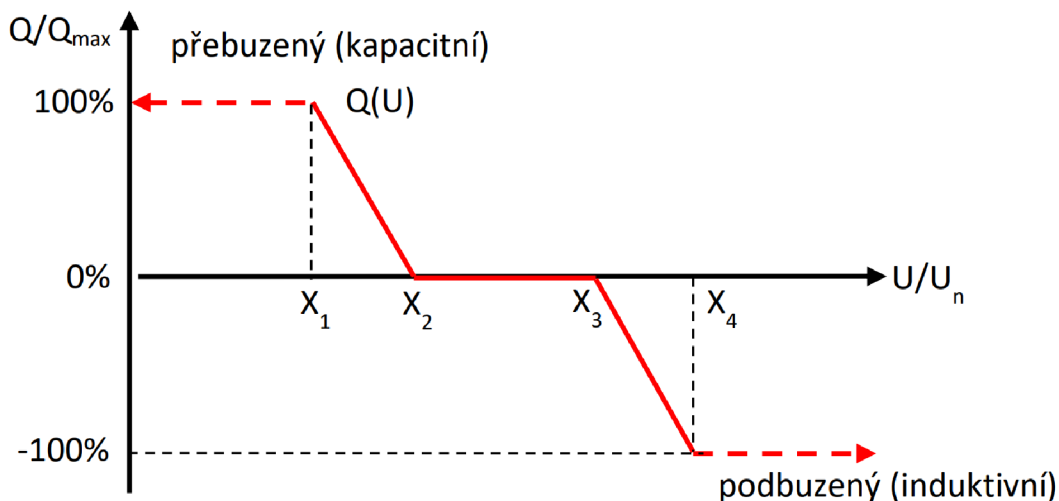
Obr. 1.3: Dodávka/odběr jalového výkonu při jmenovitém napětí a nižší než maximální dodávce činného výkonu pro nesynchronní výrobní modul nad 1 MW [5]

1.2.2 Řízení jalového výkonu výroben

Výrobní s instalovaným výkonem do 100 kVA jsou řízeny autonomně zadanou regulační charakteristikou určenou provozovatelem distribuční soustavy. V případě výroben s výkonem nad 100 kVA musí mít výrobní jalový výkon říditelný. Požadovaná hodnota je zadávána podle harmonogramu nebo dálkově online a je určována provozovatelem distribuční sítě dle jeho požadavků s ohledem na provoz sítě. Možné žádané hodnoty jsou:

- Pevná hodnota jalového výkonu Q .
- Hodnota jalového výkonu závislá na napětí $Q(U)$.
- Hodnota jalového výkonu závislá na činném výkonu $Q(P)$.
- Pevná hodnota účinníku $\cos\varphi$.
- Hodnota účinníku závislá na napětí $\cos\varphi(U)$.
- Hodnota účinníku závislá na činném výkonu $\cos\varphi(P)$.
- Zadaná hodnota napětí U .

V sítích nízkého napětí, kde jsou výrobní řízeny autonomně, se využívá kupříkladu charakteristické křivky $Q(U)$. Příklad takovéto charakteristické křivky je uveden níže na obrázku 1.4. Velká penetrace zdrojů na napěťové hladině NN vyžaduje koordinaci bodů křivky, kterou určuje provozovatel distribuční soustavy podle místních síťových podmínek nebo studie připojitelnosti s ohledem na technické omezení dané výrobní.



Obr. 1.4: Charakteristika funkce $Q(U)$ [5]

2 Obnovitelné zdroje připojované do distribučních soustav

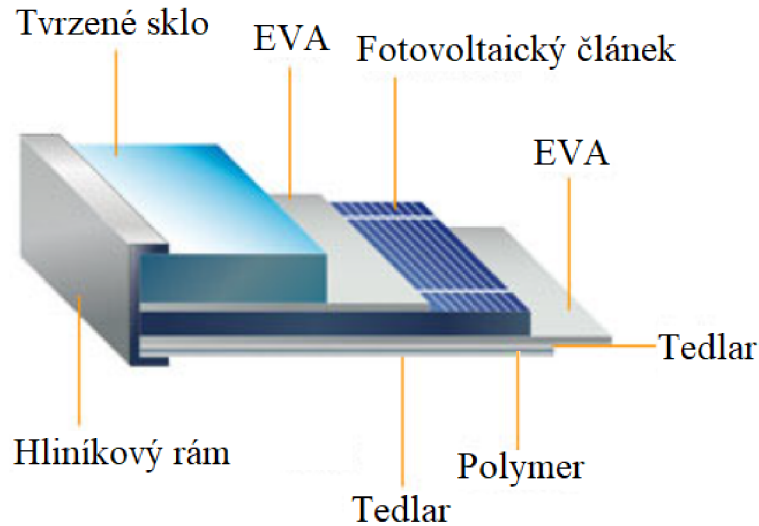
2.1 Typy připojovaných výroben

Následující odstavce se zabývají jednotlivými druhy obnovitelných zdrojů energie. Jde nejen o základní popis technologie jednotlivých typů elektráren, ale také faktorů z hlediska zpětných vlivů, soustavnosti dodávky elektrické energie a připojitelnosti k DS – hodnoty typicky připojovaných výkonů a další charakteristické rysy pro jednotlivé typy výroben.

2.1.1 Fotovoltaické elektrárny

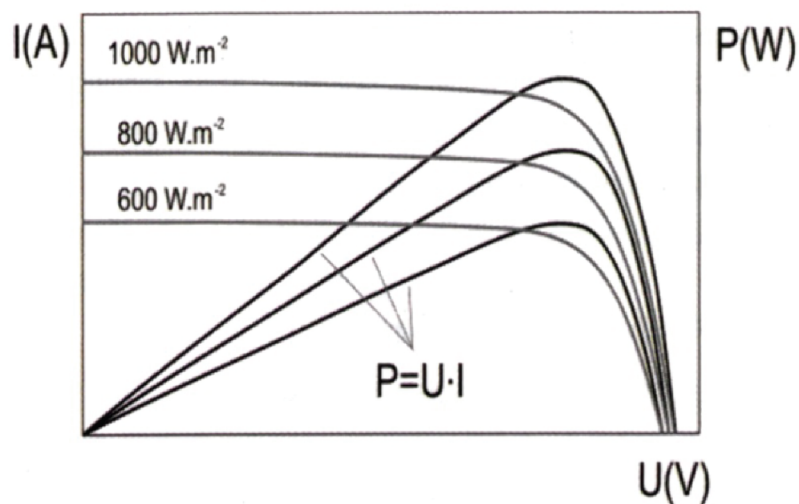
Fotovoltaické elektrárny jsou v posledních letech nejpřipojovanějším typem zdroje do distribučních soustav z důvodu významného nedávného rozvoje této technologie, což přineslo následné snížení vstupních nákladů, ale také jednoduchého přizpůsobení velikosti výkonu dle počtu fotovoltaických panelů, a jsou proto připojovány napříč napětovými hladinami. Základním prvkem fotovoltaické elektrárny je fotovoltaický článek, který je schopný absorbovat elektromagnetické záření, přičemž jsou uvolňovány elektrony, což je princip fotoelektrického jevu. Takto uvolněné elektrony je nutné z článku odvést, pro což se s výhodou využívají vlastnosti polovodičů s PN přechodem. Nejčastěji využívaným typem jsou křemíkové články, které mohou být monokrystalické nebo polykrystalické a ačkoliv existují další typy fotovoltaických článků (tenkovrstvé, organické aj.), fotovoltaické panely s krystalickým křemíkem jsou nejvíce komerčně rozšířené a dostupné. [7], [8]

Křemíkový článek vyroben z jedné křemíkové destičky o rozměrech nejčastěji 200 x 200 mm, se nakontaktuje ze zadní strany sítotiskem a následně sériově propojí (nejčastěji 36 článků ve 4 řadách). Takto spojené články jsou zataveny do etylvinylacetátové fólie (EVA). Přední strana je tvořena, z důvodu ochrany před vnějšími klimatickými podmínkami, tvrzeným sklem, které ale musí být i vysoce průsvitné pro největší propustnost dopadajícího slunečního záření. Zadní strana je zakryta vícevrstvou pevnou fólií a opatřena svorkovnicí a překlenovacími diodami. Celý tento modul je umístěn v hliníkovém rámu, který zvyšuje celkovou pevnost a usnadňuje přichycení k nosným konstrukcím. Takto vyrobený fotovoltaický modul musí splňovat požadované mechanické, optické a elektrické vlastnosti. Struktura fotovoltaického modulu je naznačená na obrázku 2.1. [7], [9]



Obr. 2.1: Struktura fotovoltaického modulu [9]

Fotovoltaický článek, potažmo celý panel, lze charakterizovat ampérvoltovou charakteristikou, která je závislá na intenzitě dopadajícího záření. Obvykle se z důvodu porovnávání těchto panelů používají standardní testovací podmínky, avšak při běžném provozu se intenzita dopadajícího záření a s tím se přímo úměrně mění i dodávaný výkon, jak je vidět na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Vliv intenzity slunečního záření na výkon FV článku [10]

Všechny fotovoltaické výrobny musí být, z podstaty generování stejnosměrného proudu fotovoltaickými články, opatřeny střídačem. Tyto střídače mohou být dle velikosti modulové, řetězcové nebo centrální. Nejčastěji se pro elektrárny s výkonem

stovek kW využívají řetězcové nebo centrální. Střídač je nesynchronní výrobní modul a z pohledu kvality dodávané elektrické energie je klíčovým prvkem celé fotovoltaické elektrárny. Nejčastěji se u střídačů jeví problematicky emise vyšších harmonických, které musí být uvedeny v certifikátu výrobního modulu, popř. ve zprávě o typové zkoušce [5]. Střídače mohou být vybaveny funkcí dodávky jalového výkonu i bez dodávky činného výkonu, čímž mohou splnit požadavek na kompenzaci jalového výkonu mezi samotnou výrobnou a místem připojení, jak je uvedeno v kapitole 1.2.1.

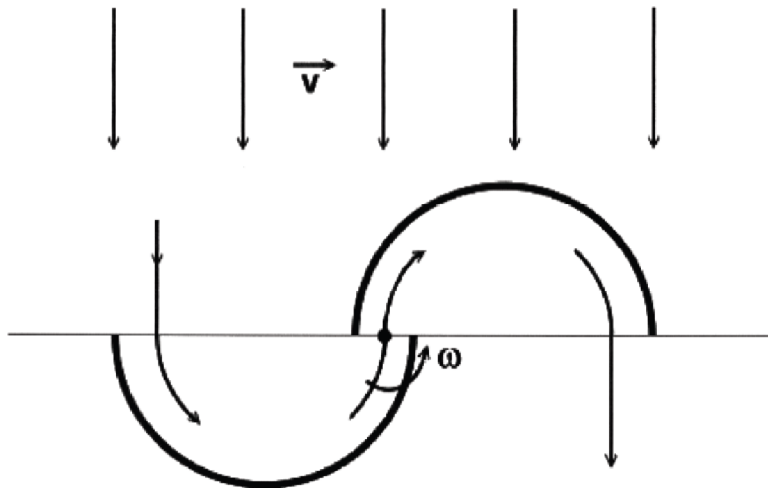
2.1.2 Větrné elektrárny

Vlivem dopadajícího slunečního záření může nastat nerovnoměrný ohřev zemského povrchu, což vyvolá v zemské atmosféře tlakové rozdíly. Při jejichž vyrovnávání vzniká vítr, který vane vždy od tlakové výše k tlakové níži. Nejdůležitějším parametrem větru je jeho rychlost, jak je uvedeno v následující rovnici. energii větru, jakožto proudící hmotu, lze popsat pomocí kinetické energie a přechodem k výkonu na jednotkovou plochu ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), jak je uvedeno v rovnici 2.1, dostaneme vztah pro okamžitý výkon větru na jednotku plochy. [7]

$$P_v = \frac{E}{A \cdot t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{A \cdot s}{A \cdot t} \cdot v^2 = \frac{\rho \cdot v^3}{2} \quad (2.1)$$

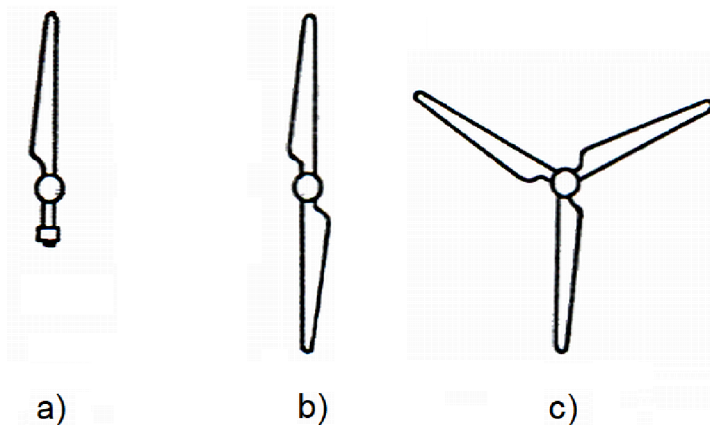
Energii větru využívají větrné motory, které ji přeměňují na energii mechanickou. Nejzákladnějším dělením těchto motorů je aerodynamický princip funkce a lze je tedy rozdělit na motory odporové a vztlkové.

Větrné motory pracující na odporovém principu se řadí mezi nejstarší užívané a nejčastěji mají svislou osu rotace. Jejich činnost spočívá v zakřivení ploch lopatek (kulové, válcové, parabolické), které mají rozdílný součinitel odporu v různých polohách natočení. Tím nastavená plocha klade aerodynamický odpor, který proudící vzduch zpomaluje, a vyvozovaná síla na tuto plochu se mění na rotační pohyb. Typickým příkladem odporového motoru je motor Savoniův, jehož vodorovný řez je znázorněn na obrázku 2.3. [8]



Obr. 2.3: Savoniův větrný motor [11]

Vztlakové větrné motory jsou nejčastěji rychloběžné, s vodorovnou osou otáčení a orientovány rovinou otáčení kolmo na směr větru. Vztlakové motory jsou nejčastěji konstruovány jako rychloběžné a jejich hlavní výhodou je relativně nízká hmotnost a vyšší účinnost než u odporových motorů, čímž jsou nejvíce vhodné pro výrobu elektrické energie. Nejčastěji se vyskytují větrné motory dvoulisté nebo třílisté, ale existují i motory s jedním listem, jak je uvedeno na obrázku 2.4. [12]



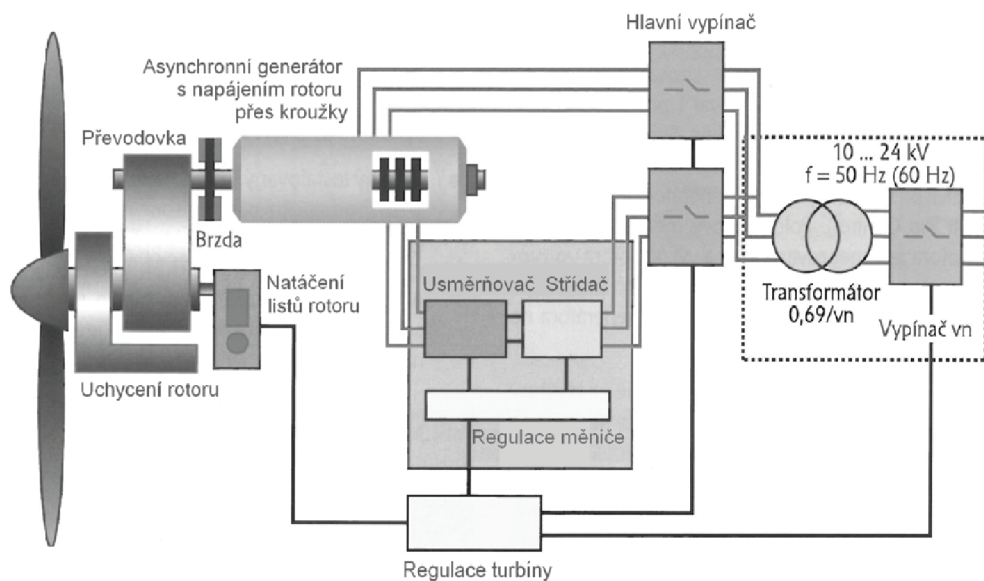
Obr. 2.4: Možné varianty provedení vztlakových motorů [12]

a) jednolisté provedení s protizávažím, b) dvoulisté provedení, c) třílisté provedení

Jednotlivé listy vztlakových motorů jsou navrhovány tak, aby vzduch který obtéká jejich horní stranu, zhušťoval svoje proudnice, čímž narůstá rychlost proudění. Obráceně je tomu na spodní hraně listu, kde rychlost proudění klesá. V souladu

s Bernoulliho rovnicí tak v místech s větší rychlostí klesá statický tlak a naopak. Vlivem působení těchto rozdílných tlaků vznikají odporové a vztlakové složky síly, jejichž výslednice vyvolává moment podél celého listu. Poměr těchto velikostí je zásadní při návrhu listu větrného motoru a je ovlivněn čistotou a kvalitou provedení daného listu. [8] Mechanická energie zachycená větrnými motory je přeměňována pomocí synchronních nebo asynchronních generátorů. Výhodou asynchronních generátorů je jejich jednoduchost, z čehož vyplývá vyšší spolehlivost a nižší provozní i pořizovací náklady. Na druhou stranu mají asynchronní generátory nižší regulační rozsah otáček generátoru, což lze částečně eliminovat použitím asynchronního generátoru s napájeným rotorem (podsynchronní kaskáda). [7]

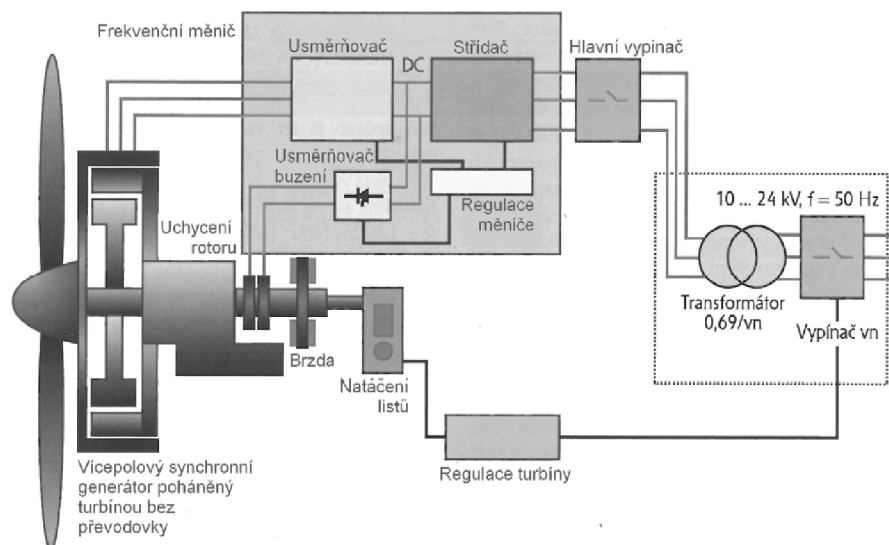
V případě malých větrných elektráren se využívá synchronního generátoru s permanentními magnety, jež jsou nejčastěji využívány pro nabíjení baterií nebo stejnosměrné autonomní sítě, případně mohou být doplňkem k jinému systému, například k fotovoltaickému. Větrné elektrárny s asynchronním generátorem jsou konstruovány pro vyšší výkony (stovky kW a více) a bývají vybaveny již zmíněnou podsynchronní kaskádou, jak je znázorněno na obrázku 2.5. [7]



Obr. 2.5: Asynchronní generátor s napájeným rotorem [11]

Moderní synchronní generátory, které jsou v energetice velmi využívány a dosahují výkonu i jednotek MW, se velmi často realizují bez převodovky a jsou tedy poháněny přímo turbínou. Na rotoru se nachází i budící vinutí, čímž se snižuje celková hmotnost gondoly větrné elektrárny, avšak dochází k větším prostorovým požadavkům na samotný generátor. Ten je připojen na měnič frekvence s možností regulace v celém výkonovém pásmu, což umožňuje chod ve velkém rozsahu otáček. Příklad

popisované větrné elektrárny se synchronním generátorem je uveden na obrázku 2.6. [12]



Obr. 2.6: Synchronní generátor poháněný přímo turbínou [11]

Větrné elektrárny jsou vybaveny regulací výkonu turbíny, a to z důvodu možné náhlé změny rychlosti větru. Jednou z variant je regulace stall, která využívá elasticity listu větrného motoru a s proměnnou velikostí rychlosti větru se mění úhel náběhu na list, čímž se snižuje velikost vztlakové síly. Nevýhodou je pokles účinnosti u vyšších rychlostí větru a nemožnost jejího využití pro samostatný rozběh. Proto se tato regulace využívá pro elektrárny s výkonem do 1 MW. Aktivní regulaci listů větrného motoru představuje regulace pitch. Ta spočívá v natačení listů turbíny pomocí hydraulického systému, který provede natočení lopatek, čímž se opět sníží vztlaková síla a tedy i moment na hřídeli. Z důvodu rychlosti regulace se běžně používá kombinace obou těchto variant. Tento typ regulace se provádí z důvodu změn rychlosti větru, avšak z důvodu možných rychlých změn momentu na hřídeli dochází i ke změně velikosti dodávaného výkonu do elektrizační soustavy. To s sebou může nést vznik flikru, vyšších harmonických a případně i rušení signálu HDO. Vzhledem k tomuto faktu, a připojení větrných elektráren přes měniče vybavené výkonovou elektronikou, je nutné tyto vlivy řešit v rámci posouzení připojitelnosti v souladu s dovolenými mezi, jak je uvedeno v kapitole 1.1. [7]

2.1.3 Vodní elektrárny

Energie vodních toků patří k přirozenému a již dlouho využívanému typu energie, jejíž formy – potenciální (polohová a tlaková) a kinetická se využívají k přeměně na

jinou formu, což je v případě vodních elektráren energie elektrická. Jde o levný zdroj, který je prakticky nevyčerpatelný, šetrný k životnímu prostředí a lze ho využít pro regulaci v době špičkového zatížení elektrizační soustavy. V geografických podmínkách České republiky je, z pohledu možnosti realizace vodní elektrárny, velká část významných vodních toků využita. Jde zejména o elektrárny na Vltavské kaskádě (Slapy, Orlický, Lipno), ale také přečerpávací vodní elektrárnu Dlouhé Stráně aj. Z tohoto důvodu lze v našich podmínkách předpokládat potenciální realizaci vodních děl s instalovaným výkonem do 10 MW, tj. malých vodních elektráren (MVE). [8] Pro popis energetického potenciálu lze využít Bernoulliho rovnici, jež udává, že měrná energie vody má složku potenciální, tlakovou a kinetickou, což lze dle [7] vyjádřit vztahem:

$$E_H = g \cdot H + \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} \quad (2.2)$$

kde	E_H	[J·kg ⁻¹]	hydroenergetický potenciál
	g	[m·s ⁻²]	tíhové zrychlení
	H	[m]	výška mezi hladinami (spád)
	p	[N·m ⁻²]	tlak kapaliny
	ρ	[kg·m ⁻³]	hustota kapaliny
	c	[m·s ⁻¹]	rychlost proudění kapaliny

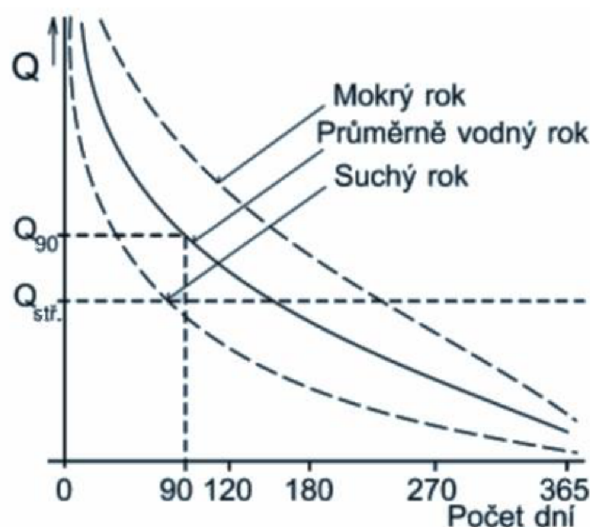
Pro návrh a výpočet vodní turbíny je zásadní zejména potenciální složka a lze tedy s tímto zjednodušením dle [7] a [8] popsat vztah definující výkon úseku vodního toku při zahrnutí ztrát a využití spádu při středním průtoku:

$$P = \rho \cdot Q \cdot \Delta E_H \cdot \eta \quad (2.3)$$

kde	E_H	[J·kg ⁻¹]	hydroenergetický potenciál
	P	[m]	střední výkon toku kapaliny
	Q	[m ³ · s ⁻¹]	střední objemový průtok
	ΔE_H	[m·s ⁻¹]	rozdíl hydroenergetických potenciálů
	η	[m]	účinnost zahrnující hydraulické a mechanické ztráty

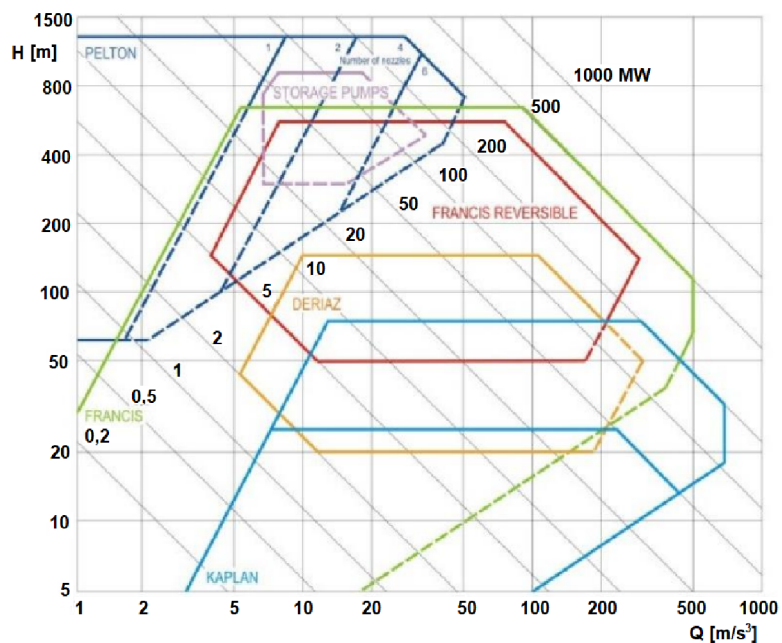
Průtok se na vodním toku mění nebo se může regulovat. Pro určení průtočného množství vody se vychází z dlouhodobě prováděných hydrologických měření, z nichž lze graficky vynést čaru překročení denních průtoků či jinak nazývanou křivku trvání průtoků. Ta udává počet dní za rok, ve kterých je v toku větší průtok, než je hodnota udávaná vynesenu křivkou. Jelikož vodní elektrárna nevyužívá veškerou vodu v řečišti z důvodu zachování určitého množství vody v toku, definuje se pro provoz

elektrárny též odtoková křivka, což je analogie pro křivku trvání průtoků, avšak z pohledu vody využitě vodní elektrárnou. Z této křivky pak lze vycházet při návrhu technologie, tedy turbíny, strojního i elektrického vybavení aj., ale i při počáteční ekonomické rozvaze. Nejčastěji se vodní elektrárny dimenzují na 90 až 180denní průtok. [12] Příklad odtokové křivky je na obrázku 2.7:



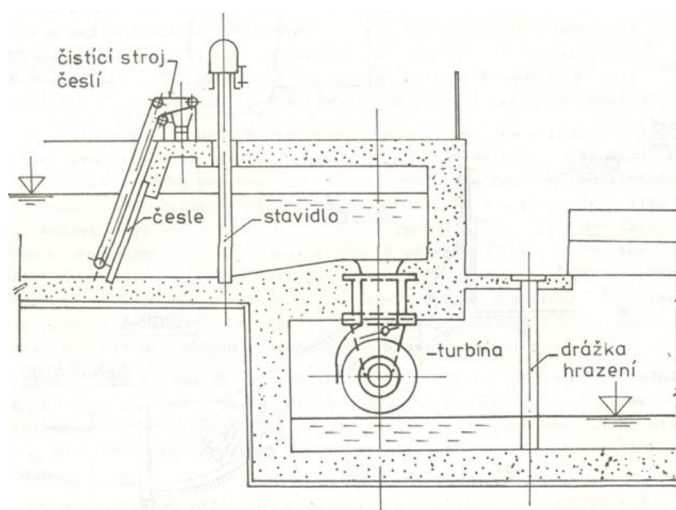
Obr. 2.7: Odtoková křivka [12]

Jednou z nejdůležitějších částí vodní elektrárny je její turbína. Základním členěním je dle způsobu přenosu kinetické energie vody na turbínu. Při přenosu se tato energie mění buď celá (rovnotlaké turbíny) nebo jen část (přetlakové). Mezi zástupce rovnotlakých turbín lze uvést turbínu Peltonovu nebo Bankiho. Nejužívanější turbíny přetlakové jsou Kaplanova, Francisova nebo Dériazova. Ačkoliv existuje mnoho dalších turbín, pro výše zmíněné turbíny jsou na obrázku 2.8 uvedeny nejčastější pracovní rozsahy v závislosti na spádu a průtoku včetně možných dosahovaných výkonů. Jednotlivé oblasti se překrývají a v případě výběru turbíny z tohoto překryvu, lze přihlížet k dalším aspektům, jako jsou kavitační vlastnosti, účinnost, náklady atd.



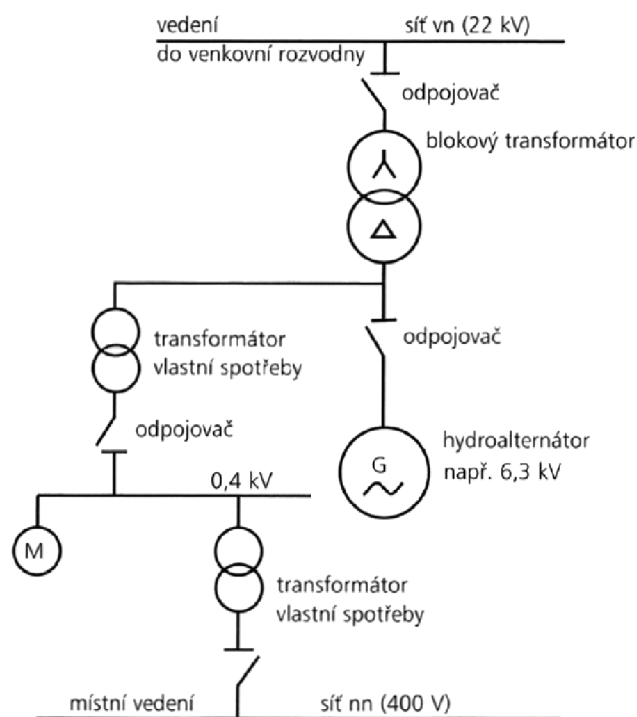
Obr. 2.8: Pracovní oblast vodních turbín [13]

Pro velkou variabilitu svých parametrů se velmi často využívá u malých vodních elektráren Bankiho turbína. Jde o radiální turbínu s dvojnásobným průtokem a patří konstrukčně k nejjednoduššímu a nejlépe zvládnutému řešení pro malé vodní elektrárny, a to z důvodu možnosti použití pro velmi malé průtoky (i setiny $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a spády do desítek metrů. Mezi další výhody patří snadné a rychlé regulační vlastnosti, menší citlivost na nečistoty ve vodě a nenáchylnost na kavitaci. Příklad malé vodní elektrárny s Bankiho turbínou je zobrazen na obrázku 2.10. [8], [12]



Obr. 2.9: Řez malou vodní elektrárnou s Bankiho turbínou [12]

Mechanická energie na hřídeli se u malých vodních elektráren přeměňuje pomocí asynchronního nebo synchronního generátoru. Synchronní generátor lze využít případně výpadku sítě jako náhradní zdroj nebo pro napájení odlehlých objektů. Běžný provoz synchronního generátoru je však paralelní se sítí, přičemž je schopný dodávat činný i jalový výkon. Standardně se regulace provádí na konstantní jalový výkon či konstantní účinník, avšak pro připojení musí být vodní elektrárna schopna dodržet regulační rozsah zmíněný v podkapitole 1.2.1. Asynchronní generátory nejsou schopny provozu do samostatné sítě a jsou proto provozovány pouze paralelně se sítí, jelikož pro svoji magnetizaci odebírají jalový výkon. Výhodou použití asynchronních generátorů jsou nižší náklady na samotný generátor i ostatní elektrická zařízení. Příklad zapojení malé vodní elektrárny je uveden na obrázku 2.10.



Obr. 2.10: Schéma připojení MVE k síti [7]

2.1.4 Biomasa

Pojmem biomasa je označován materiál biologického původu, jehož zdrojem je zejména chov živočichů, pěstování rostlin atd. Jde o produkty, které pojalý energii ve formě slunečního záření za pomoci fotosyntézy a dalších biochemických reakcí. Takto uložená energie může být i dále přeměněna v tělech živočichů na jiné chemické sloučeniny. Velkou výhodou biomasy, na rozdíl od jiných obnovitelných zdrojů, je nezávislost na klimatických podmínkách a tedy možnost řízení výroby energie. Mezi další

výhody patří možnost zpracování odpadů, které by jinak nenacházely využití a lze ji využít přímo tam, kde se biomasa produkuje. [7]

Jak bylo naznačeno výše, biomasu lze dělit dle různých hledisek. Jedním z nich je rozdělení na odpadní a cíleně pěstovanou biomasu. Prvně zmíněná zahrnuje odpady rostlinného původu jako jsou sláma, nezpracované zbytky obilí, odpady z dřevařského a dřevozpracujícího průmyslu, ale také odpady z cukrovarů, lihovarů nebo odpady živočišného původu z kravínů, vepřínů nebo kafilérií. Mezi cíleně pěstovanou biomasu patří rychle rostoucí dřeviny jako jsou topoly, olše aj., z nichž se produkuje dřevní štěpka, nebo olejnaté rostliny či cukernaté a škrobnaté plodiny, jejichž zpracováním se získává olej, který lze dál použít k výrobě bionafty nebo bioetanolu. [8], [14]

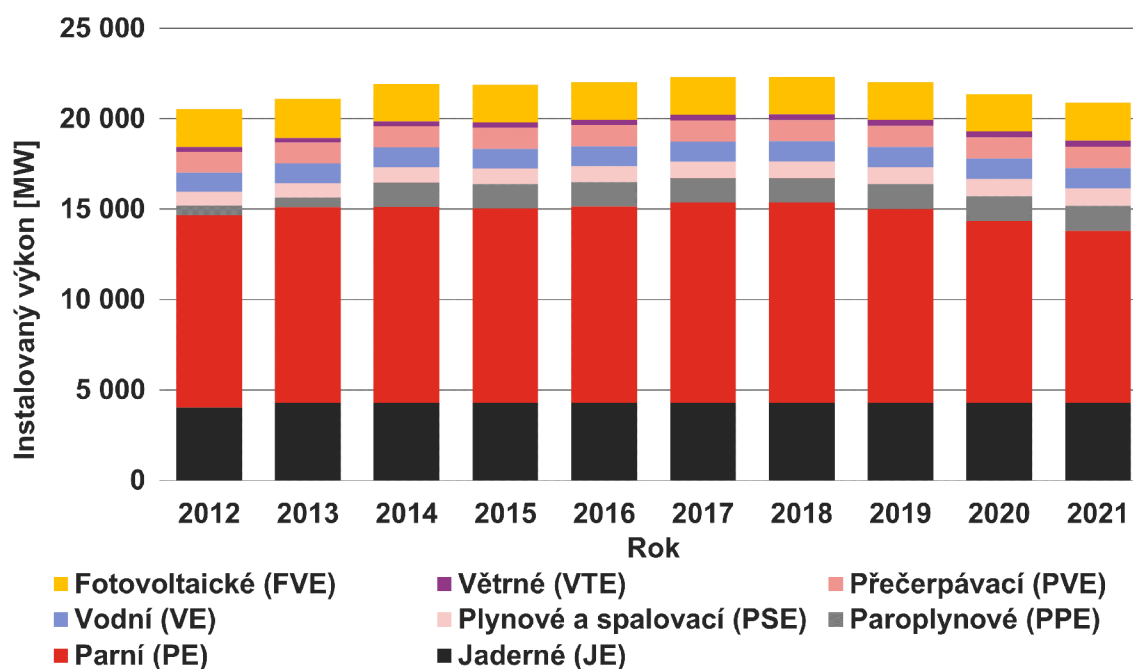
Dle množství vlhkosti v biomase se dále dělí procesy, které biomasu upravují či využívají z energetického hlediska. Biomasa s velkým obsahem vlhkosti, jako jsou odpady živočišné výroby nebo organické odpady z potravinářského průmyslu, se využívá na produkci bioplynu, což je směs plynů obsahující převážně metan, oxid uhličitý a další plyny. Bioplyn lze použít pro přímé spalování, výrobu elektrické energie a tepla nebo pro pohon spalovacích motorů či turbín. Spalování bioplynu, vzhledem k jeho velké koncentraci metanu, má příznivější vliv z pohledu emise skleníkových plynů. Mezi suché procesy, tedy termochemické přeměny biomasy, patří spalování, zplyňování a pyrolýza. Spalování patří mezi nejzákladnější a nejčastější využití biomasy. Pro spalování lze použít téměř jakýkoliv biomateriál, avšak převážně se spaluje biomasa v pevné formě s nízkým obsahem vlhkosti jako je dřevo či sláma. Často se spaluje biomasa spolu s fosilním palivem, což představuje ekologičtější variantu, než v případě samotného fosilního paliva. Existují však i elektrárny a teplárny, které dokáží spalovat pouze samotnou biomasu. Zplyňování je tepelná přeměna pevného paliva na plynné. Vzhledem k vysokým potřebným teplotám k tomuto procesu (1000 °C), vzniká využitelné teplo a spalitelné plyny, které jsou vhodné jako pohonné látky pro spalovací turbíny, ale také znečišťující látky jako dehet, oxidy dusíku a síry aj. Posledním zmíněným suchým procesem je pyrolýza, při níž dochází k ohřevu tuhého paliva, přičemž je zabráněno přístupu kyslíku. Tím dochází k termickému rozkladu paliva, vzniká bioplyn, jenž lze dále využít a zbytky paliva obsahující uhlovodíky. [7], [8], [14],

2.2 Současný a možný budoucí vývoj podílu obnovitelných zdrojů energie

V této podkapitole je podrobněji popsán dnešní stav energetického mixu včetně předpokládaného rozvoje obnovitelných zdrojů a aspekty s ním spojenými. Jelikož obnovitelné zdroje jsou připojovány v naprosté většině do distribučních soustav napříč všemi napěťovými hladinami, bude i tento fakt postihovat zejména provozovatele distribučních soustav.

2.2.1 Současný stav energetického mixu

Nejaktuálnější verze roční zprávy o provozu elektrizační soustavy České republiky za rok 2021, vydávaná každoročně energetickým regulačním úřadem, uvádí provozní technická data o elektrizační soustavě. Jedním ze sledovaných parametrů je instalovaný výkon jednotlivých typů elektráren. Data z aktuálně vyhodnocovaného roku jsou prezentována pro srovnání v rámci posledních deseti let. Vývoj velikosti instalovaného výkonu je uveden na obrázku ??.

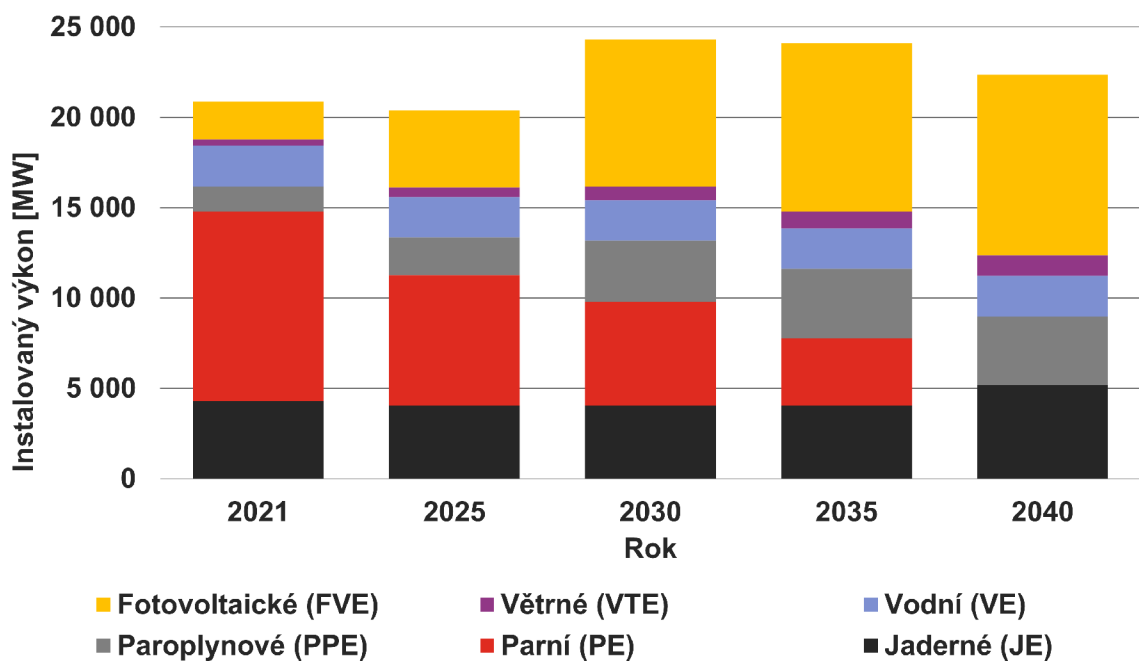


Obr. 2.11: Vývoj instalovaného výkonu v ES ČR (k 31. 12. 2021) [15]

Za posledních deset let nedocházelo k výraznější proměně energetického mixu. V roce 2021 tvořili 22,6 % celkového instalovaného výkonu obnovitelné zdroje. Vzhledem k jejich nižším dobám využití maxima, pak však představuje celková dodaná

energie do sítě pouze necelých 8 %. Z tohoto konstatování je patrné, že se obnovitelné zdroje (zejména fotovoltaické a větrné elektrárny) podílí na rozptylu velikosti okamžitého dodávaného výkonu.

Pro další vývoj se z pohledu elektrizační soustavy počítá s možnými scénáři rozvoje energetického mixu. Každý z nich předpokládá různé rozvoje obnovitelných zdrojů, elektromobility, ale také další aspekty jako růst ekonomiky, ceny elektrické energie atd. Pro porovnání s dnešním stavem byl vybrán konzervativní scénář, který počítá spíše s opatrnou a pozvolnou transformací energetického mixu. Dnešní stav a výhledové roky pro tento scénář jsou znázorněny na obrázku 2.12.



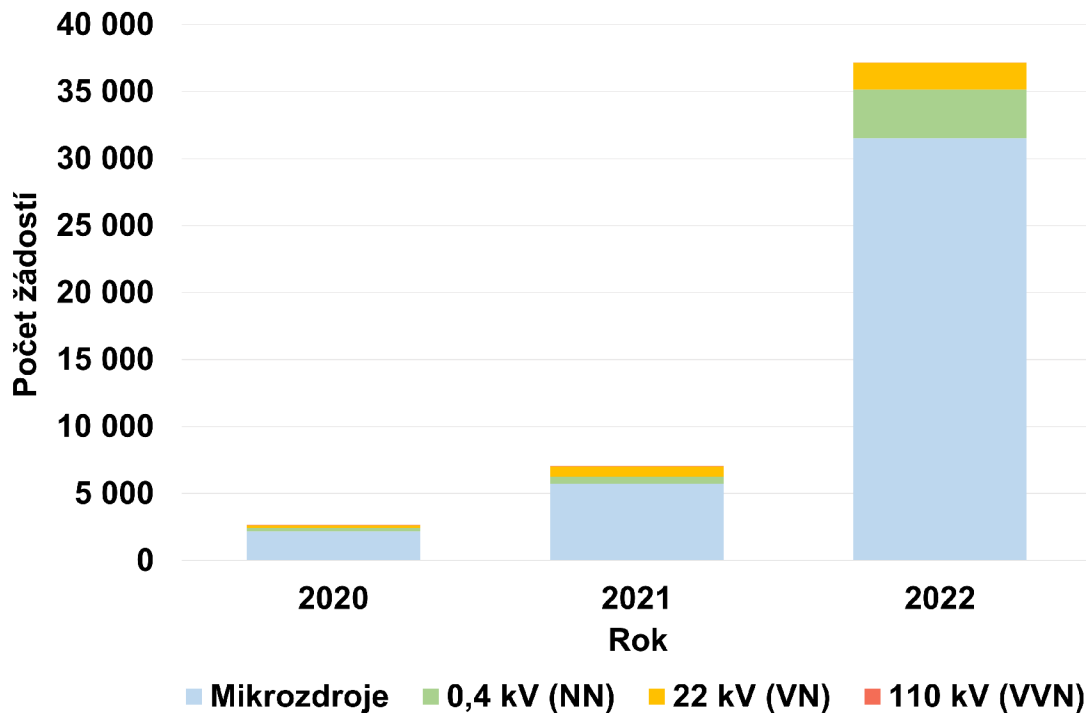
Obr. 2.12: Porovnání dnešního a predikovaného výkonu v ES ČR [15], [16]

Pro porovnávání dat z různých zdrojů byly sloučeny přečerpávací a vodní elektrárny a také spalovací s parními. I přes opatrnější predikci vývoje je na výše uvedeném grafu ukázáno ukončení využívání uhlerných zdrojů, jenž mají být nahrazeny novým jaderným zdrojem, ale také z velké části obnovitelnými zdroji a nejvíce fotovoltaickými elektrárnami.

V následující podkapitole je na základě dnešních dat vypracována úvaha možného vývoje a následků spojených s masivním připojováním obnovitelných zdrojů do distribučních sítí.

2.2.2 Predikce vývoje obnovitelných zdrojů energie a jejich vliv na distribuční soustavu

Součástí podkladů, které byly poskytnuty provozovatelem distribuční soustavy, byla data k namodelování reálné distribuční sítě vysokého napětí, jenž je popsána v kapitole 3, a také detailní informace k vývoji žádostí o připojení do všech napěťových hladin v rámci celého provozovaného distribučního území. Tato data z posledních tří let obsahují údaje o počtu žádostí o připojení, velikosti rezervovaného výkonu a rozprostření mezi provozované napěťové hladiny. V rámci napěťové hladiny nízkého napětí se dále, dle současné legislativy, ještě rozlišuje na mikrozdroje s maximálním instalovaným výkonem 10 kW, a ostatní výrobní s vyšším výkonem. Z těchto dat vyplývá, že zájem o obnovitelné zdroje enormně narostl, jak ukazuje graf 2.13, který je zobrazen níže. Ačkoliv jde pouze o počet žádostí, které nemusí být všechny kladně vyřízeny, je tento trend výrazný.

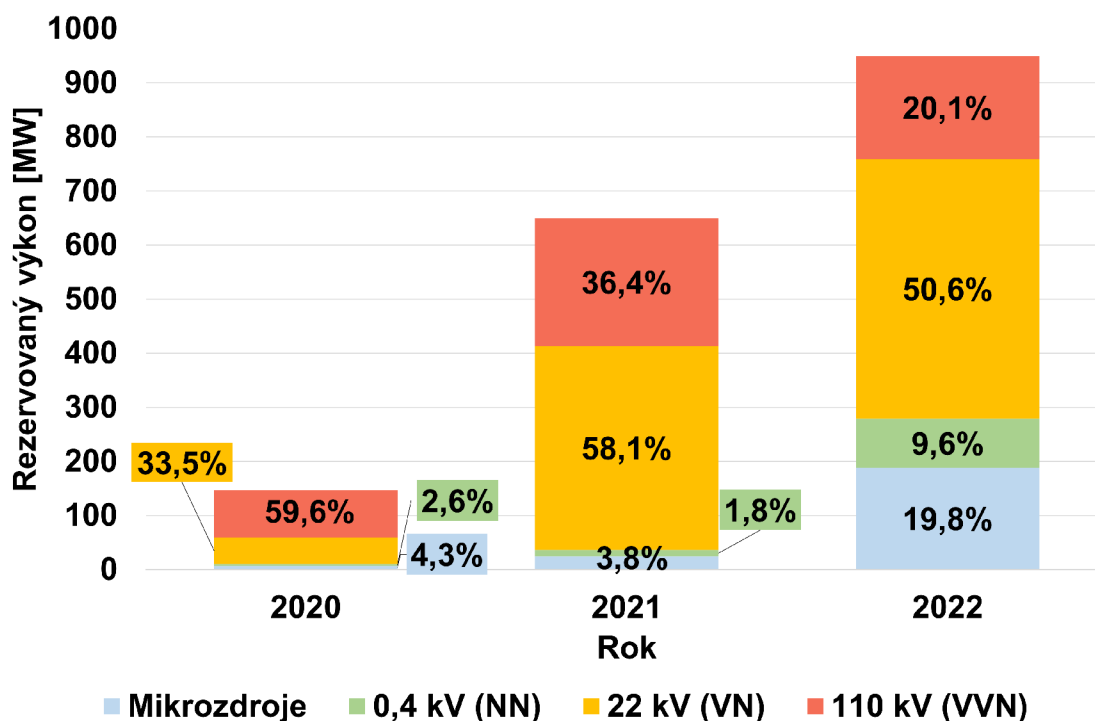


Obr. 2.13: Vývoj počtu žádostí o připojení napříč napěťovými hladinami [17]

Je nutné podotknout, že tento rekordní nárůst postihl všechny provozovatele distribučních soustav, jak uvádějí tiskové zprávy provozovatelů distribučních soustav [18] a [19]. I když je tato situace zapříčiněna globálními událostmi vyvolávající energetickou nejistotu, je nutné tyto žádosti o připojení evidovat a již počítat s přiděleným rezervovaným výkonem. Lze předpokládat, že další vývoj nemusí být

takto markantní, avšak s dalším plánovaným rozšiřováním a podporou obnovitelných zdrojů, jak je uvedeno v kapitole 2.2.1, lze očekávat vyšší zájem o obnovitelné zdroje než v předchozích letech.

Následující graf 2.14 uvádí velikost rezervovaného výkonu související s výše uvedenými počty žádostí o připojení. Tento graf ukazuje, že většina rezervovaného výkonu byla provozovatelem distribuční soustavy schválena do sítí vysokého napětí. Tento fakt, v kombinaci s předpokládaným odlehčováním sítí nízkého napětí, může mít zásadní dopad na provoz distribučních sítí jako celek. Lze předpokládat zvýšení případů přetoků do sítí velmi vysokého napětí, větší rozptyl dodávaného výkonu a spotřeby, a tím pádem i většího tlaku na regulaci napětí výroben a zpříšňování podmínek připojení. Již nyní je běžné omezování připojovaného výkonu výroben z důvodu přesáhnutí dovolené meze zvýšení napětí, či jsou dokonce uzlové oblasti velmi vysokého napětí, ve kterých nelze připojovat výrobní s dovoleným přetokem do distribuční soustavy. Na hladině nízkého napětí se tak běžně realizují připojení s nulovým rezervovaným výkonem, což znamená, že jednotlivé výrobní nemůžou dodávat výkon do distribuční sítě a musí veškerou vyrobenou energii spotřebovat. U takto připojených odběratelů lze předpokládat celkové celoroční snížení spotřeby, což také povede k většímu rozptylu zatížení sítí v závislosti na aktuálních klimatických podmínkách, které ovlivňují generovaný výkon z obnovitelných zdrojů.



Obr. 2.14: Vývoj velikosti rezervovaného výkonu napříč napěťovými hladinami [17]

3 Model napájecí oblasti vysokého napětí

3.1 Použitý výpočtový a modelovací software

Pro praktickou část diplomové práce byl využit program DNCalc od společnosti EGC – EnerGoConsult ČB s.r.o. Jedná se o software sloužící k modelování a analýze sítí všech běžných napěťových hladin. Uživatelsky přívětivé ovládání umožňuje vkládání jednotlivých prvků sítě, u nichž uživatel vyplní jejich standardní parametry, anebo je může načíst z databáze programu, která obsahuje v distribučních i přenosových sítích nejčastěji používané typy vedení, transformátorů atd.

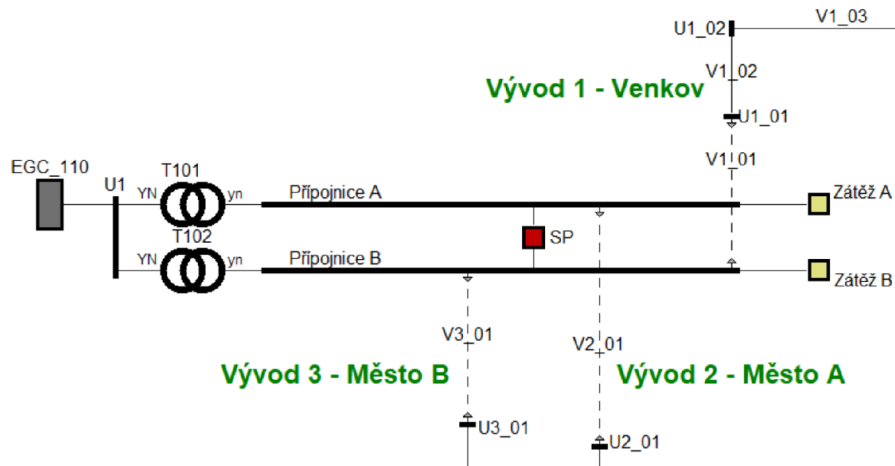
Pro takto připravený model lze pak vypočítat ustálený chod sítě, jehož výstupem jsou všechny hodnoty napětí v uzlech včetně jejich zkratové impedance a zkratového výkonu. Ve větvích jsou pak spočítány hodnoty protékajících proudů a výkonů. Dále je pak součástí programu výpočet připojitelnosti zdrojů, který stanoví velikost zvýšení či snížení napětí vlivem připojení dané výroby nebo odběru ve všech uzlech sítě. Pomocí funkce zkratové poměry lze určit v daném uzlu velikost zkratových proudů – počátečního rázového, nárazového a ekvivalentního oteplovacího. Z hlediska kvality elektřiny umí DNCalc určit úroveň flikru ve všech uzlech, provést harmonickou analýzu, pokud se v síti nacházejí zdroje emitující vyšší harmonické, nebo určit útlum signálu HDO.

3.2 Namodelovaná část analyzované sítě vysokého napětí

Vytvořený model vychází z dat reálné distribuční sítě vysokého napětí. Jedná se o oblast zahrnující okresní město a přilehlé menší vesnice. Samotný model obsahuje napájecí uzel představující nadřazenou síť VVN, transformaci na hladinu vysokého napětí, která je rozdělena pomocí dvou transformátorů na dvě přípojnice a z nich napájené jednotlivé vývody. Pro další analýzu sítě byly uvažovány tři vývody, přičemž dva vývody napájí zmíněné menší město a nejbližší okolí a zbylý vývod zásobuje vzdálenější vesnice. V prvním případě jde o smíšenou síť s lehce převažujícím podílem venkovního vedení a ve zbylém případě jde naopak o část distribuční soustavy se silně převládajícím podílem venkovního vedení.

Daná rozvodna obsahovala ještě další vývody s odběrovým charakterem, které byly pro zachování výkonové bilance zahrnuty do zátěží připojených na přípojnice, jak je patrné z obrázku 3.1. To vedlo ke zmenšení počtu prvků i uzlů a tím pádem

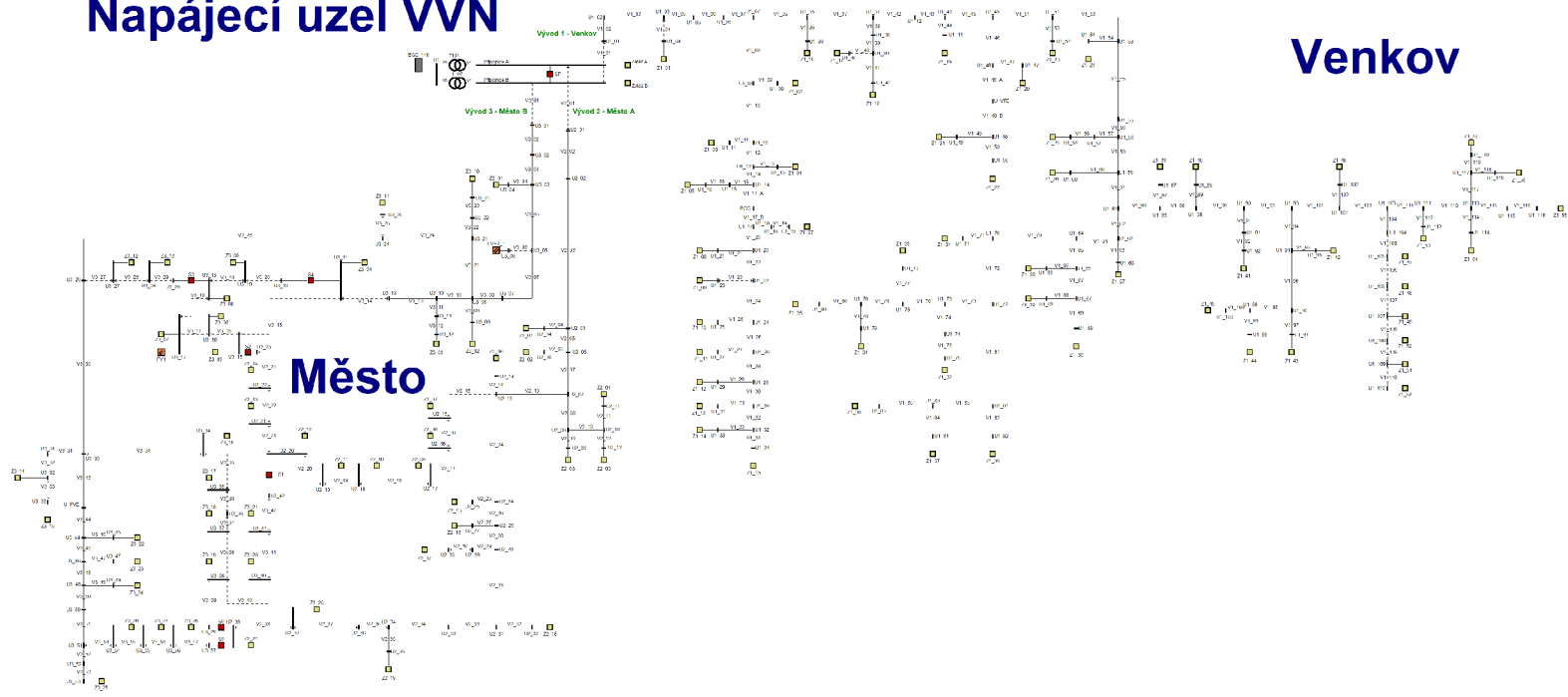
ke zvýšení přehlednosti sítě i všech dalších výpočtů. I tak obsahuje model několik set prvků (vedení, výroben a zátěží), a proto budou všechny informace k modelu včetně vypočtených hodnot součástí přílohy. Velikosti odběrů a výroby v síti jsou vždy při posuzování připojitelnosti uvažovány pro nejnepríznivější možný provozní stav sítě nebo jsou po konzultaci voleny hodnoty dle požadavků PDS.



Obr. 3.1: Detail modelované sítě – rozdělení vývodů

Rozsah modelu sítě bez zmíněných vývodů, které jsou zahrnuty do zátěží, je pak na obrázku 3.2. Pro přehlednost tištěné verze diplomové práce, je tento model součástí přílohy ve formátu A3.

Napájecí uzel VVN

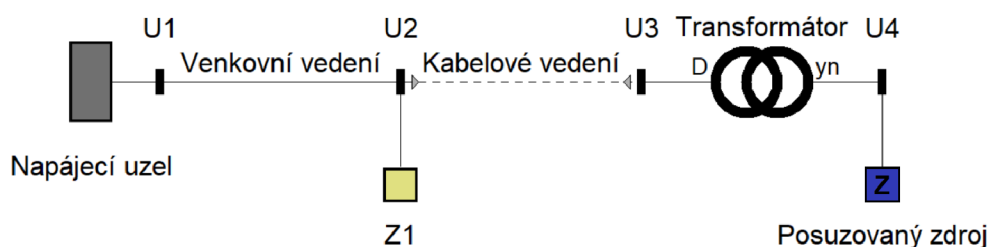


Obr. 3.2: Model analyzované sítě VN

4 Analýza připojovaných zdrojů do distribuční soustavy

4.1 Ukázka výpočtu jednoduché sítě

Pro objasnění výpočtů v celé kapitole, řešených pomocí programu DNCalc, byla zvolena v této podkapitole ukázka výpočtu s řešenými hodnotami a posuzovanými zpětnými vlivy. Pro příklad bylo zvoleno jednoduché uspořádání prvků dle schématu na obrázku 4.1 níže. Jde o část namodelované sítě, kde se bude připojovat nová výrobná, a lze tedy výsledky napěťové změny a výkonových poměrů porovnat. Posuzovaný zdroj pro výpočet je fiktivní a má nadefinované vlastnosti pro ukázkou výpočtu.



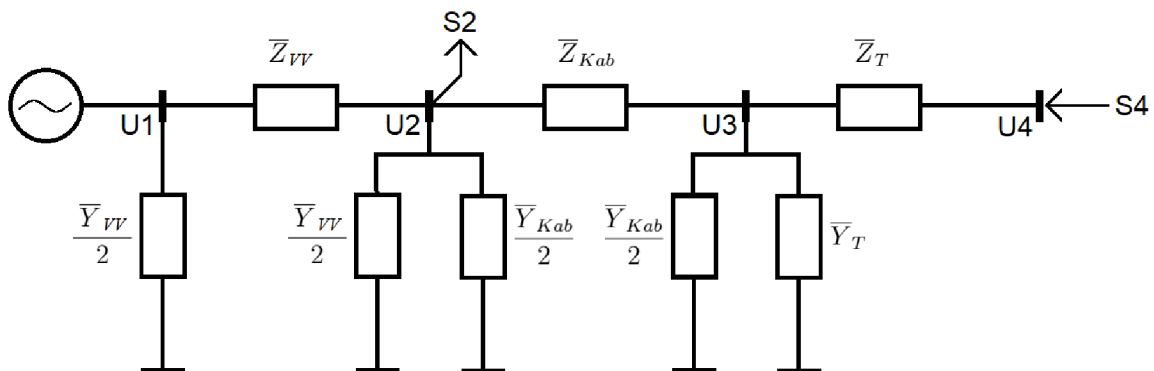
Obr. 4.1: Posuzovaná síť pro ukázkou zpětných vlivů

Parametry prvků

- Napájecí uzel
 - $U_n = 22 \text{ kV}$
 - $S_k = 126,788 \text{ MVA}$
 - Poměr $R/X = 0,767$
- Venkovní vedení 50AlFe6
 - $R_1 = 0,615 \text{ } \Omega/\text{km}$
 - $X_1 = 0,396 \text{ } \Omega/\text{km}$
 - $C_1 = 4,479 \text{ nF/km}$
 - $l = 1,246 \text{ km}$
- Kabelové vedení AXEKVCEY 1x240/25
 - $R_1 = 0,615 \text{ } \Omega/\text{km}$
 - $X_1 = 0,396 \text{ } \Omega/\text{km}$
 - $C_1 = 0,1,407 \text{ } \mu\text{F/km}$
 - $l = 0,24 \text{ km}$

- Transformátor
 - $p_n = 22/0,8 \text{ kV}$
 - $S_n = 4 \text{ MVA}$
 - $u_k = 6 \%$
 - $P_k = 42 \text{ kW}$
 - $P_0 = 3,08 \text{ kW}$
 - $i_0 = 0,4 \%$
 - Dyn1
- Připojovaný zdroj
 - $S_n = (3,03 + j1,467) \text{ MVA}$ ($\cos \varphi = 0,9 \text{ ind.}$)
 - Činitel flikru $c = 2,1$
 - Spektrum harmonických
- Odběr
 - $S_2 = (0,445 + j0,130) \text{ MVA}$

Pro výpočet napěťových poměrů v uvažované síti byla zvolena Gaussova-Seidlova iterační metoda. Daná síť je tedy popsána metodou uzlových napětí. Pro náhradu prvků byl zvolen pro kabelové vedení II-článek a pro transformátor Γ -článek. Svod pro vedení byl zanedbán. Zatížení v uzlu představuje výkonový tok do zbytku vývodu před připojením výroby.



Obr. 4.2: Náhradní schéma soustavy pro sestavení admitanční matice

Výpočet podélných a příčných parametrů prvků

Venkovní vedení

$$\bar{Z}_{VV} = (R_1 + jX_1) \cdot l = (0,615 + j0,396) \cdot 1,246 = (0,7663 + j0,49342) \Omega \quad (4.1)$$

$$\bar{Y}_{VV} = (G_1 + j2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_1) \cdot l = (0 + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 4,479 \cdot 10^{-9}) \cdot 1,246 = j1,753 \cdot 10^{-6} \text{ S} \quad (4.2)$$

Kabelové vedení

$$\bar{Z}_K = (R_1 + jX_1) \cdot l = (0,125 + j0,113) \cdot 0,24 = (0,03 + j0,02712) \Omega \quad (4.3)$$

$$\bar{Y}_K = (G_1 + j2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_1) \cdot l = (0 + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,3 \cdot 10^{-6}) \cdot 0,24 = j22,619 \cdot 10^{-6} \text{ S} \quad (4.4)$$

Transformátor

$$\begin{aligned} \bar{Z}_T &= R_T + jX_T = \frac{\Delta P_k \cdot U_n^2}{S_n^2} + j \left(\frac{U_n^2}{S_n} \cdot \sqrt{u_k^2 - \left(\frac{\Delta P_k}{S_n} \right)^2} \right) = \\ &= \frac{42 \cdot 10^3 \cdot (22 \cdot 10^3)^2}{(4 \cdot 10^6)^2} + j \left(\frac{(22 \cdot 10^3)^2}{4 \cdot 10^6} \cdot \sqrt{0,06^2 - \left(\frac{42 \cdot 10^3}{4 \cdot 10^6} \right)^2} \right) = \\ &= (1,2705 + j7,148) \Omega \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \bar{Y}_T &= G_T - jB_T = \frac{\Delta P_0}{U_n^2} - j \left(\frac{1}{U_n^2} \cdot \sqrt{\left(S_n \cdot i_0 \right)^2 - \Delta P_0^2} \right) = \\ &= \frac{3,08 \cdot 10^3}{(22 \cdot 10^3)^2} - j \left(\frac{1}{(22 \cdot 10^3)^2} \cdot \sqrt{\left(4 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \right)^2 - (3,08 \cdot 10^3)^2} \right) = \\ &= (6,36 - j32,44) \cdot 10^{-6} \text{ S} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Výpočet prvků admitanční matice

Danou čtyřuzlovou síť lze popsat pomocí metody uzlových napětí admitanční maticí, přičemž uzel U1 lze jako bilanční uzel eliminovat.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{13} & \bar{Y}_{14} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{24} \\ \bar{Y}_{31} & \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} & \bar{Y}_{34} \\ \bar{Y}_{41} & \bar{Y}_{42} & \bar{Y}_{43} & \bar{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Pro admitanční matici platí, že diagonální prvky se určují jako součet všech admitancí připojených do daného uzlu. Naopak mimodiagonální prvek je záporná hodnota admitance mezi těmito uzly. Pro nespojené uzly je pak hodnota admitance nulová, a jelikož je tato matice souměrná, prvky nacházející se převráceně od diagonály jsou si rovny (např. $\bar{Y}_{21} = \bar{Y}_{12}$).

Výpočet napěťových poměrů

Přechodem od proudových poměrů k výkonovým lze maticovou rovnost popsat pomocí Gauss-Seidlový iterací metody následující rovnicí:

$$\bar{U}_i^{(k+1)} = \frac{1}{\bar{Y}_{ii}} = \left(\frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^{*(k)}} - \sum_{j=1}^{i-1} \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j^{(k)} \right) \quad (4.8)$$

Po sto iteracích byla stanovena v uzlu U2 hodnota napětí na $U_2 = (22,83 \angle 29,99^\circ)$ kV, což se oproti hodnotě vypočítané softwarem $U_2 = (22,877 \angle 31,449^\circ)$ kV liší zejména ve fázovém posunu.

Výpočet a posouzení úrovně flikru

Velikost úrovně je určena podle vztahu 1.4.

$$P_{lt} = c \cdot \frac{S_v}{S_{k\ mp}} = 2,1 \cdot \frac{4 \cdot 10^6}{0,9 \cdot 126,788 \cdot 10^6} = 0,0736 \leq 0,46 \quad (4.9)$$

Výsledná úroveň flikru vychází v předávacím místě 0,0736, což je výrazně pod limitní hodnotou.

Výpočet dovolené emise harmonických proudů

Příklad výpočtu bude proveden pro 5. harmonickou. Zdroj na straně nízkého napětí emituje pro tuto harmonickou proud o velikosti 13,3 A. Pro porovnání s dovolenou mezí pro síť VN je nutno tuto hodnotu na napěťovou hladinu VN přepočítat pomocí velikosti převodu transformátoru.

$$I_{5_{VN}} = I_{5_{NN}} \cdot p = 13,3 \cdot \frac{0,8}{22} = 0,484 \text{ A} \quad (4.10)$$

Limit pro velikost harmonického proudu je pak určen pomocí součinu velikosti zkratového výkonu v místě připojení a přípustným vztažným proudem pro tuto harmonickou dle tabulky 1.2.

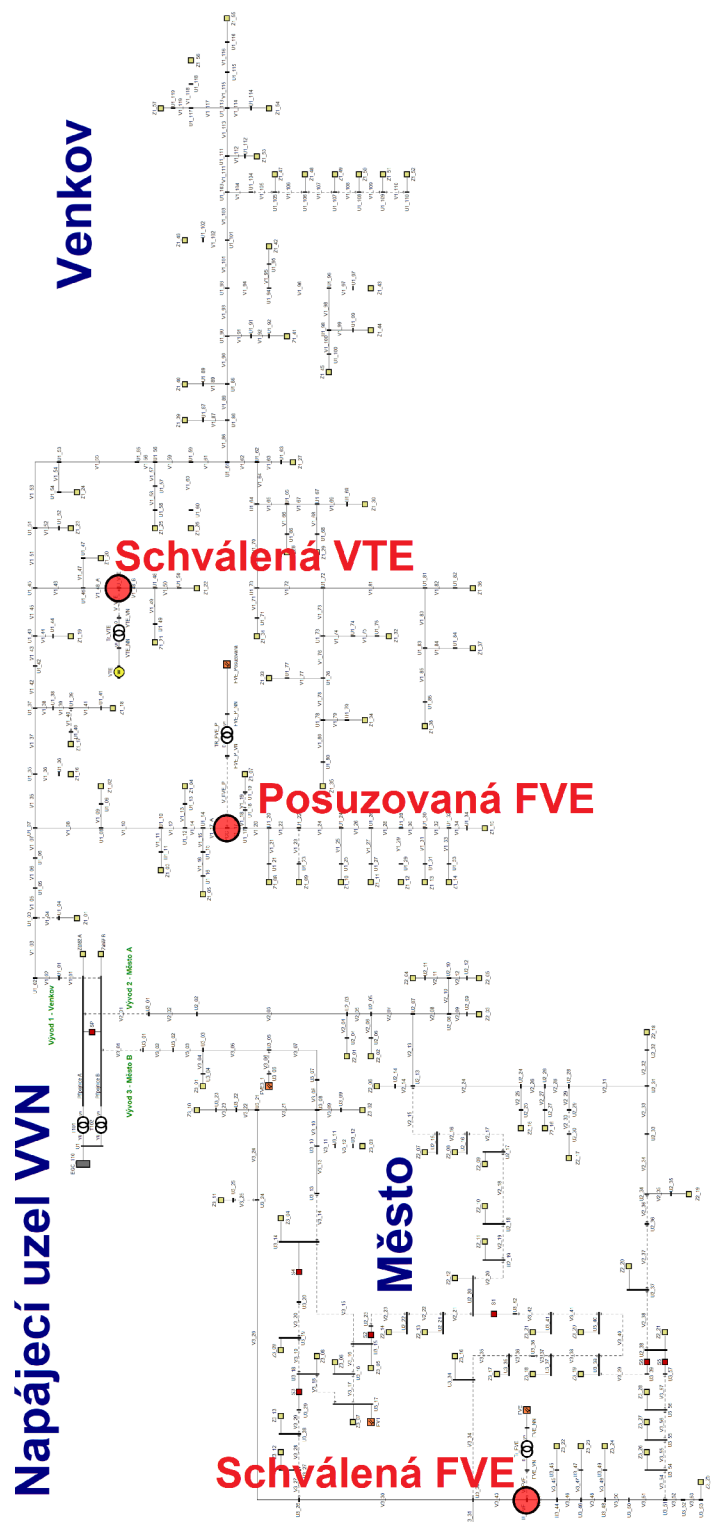
$$I_{5_{limit}} = i_{v5} \cdot S_{k\ mp} = 0,058 \cdot 126,788 \cdot 10^6 = 7,354 \text{ A} \geq 0,484 \text{ A} \quad (4.11)$$

Uvažovaný zdroj vyhovuje z hlediska velikosti 5. harmonické proudu. Posouzení velikosti emise pro ostatní harmonické je pak analogické.

4.2 Posouzení připojitelnosti nového zdroje do distribuční soustavy

V rámci analyzované a namodelované sítě byly evidovány tři žádosti o připojení. Jde o dvě fotovoltaické a jednu větrnou elektrárnu s celkovým výkonem 10,1 MW. Jelikož zmíněná větrná elektrárna a jedna z fotovoltaických elektráren byla v době získání podkladů již od provozovatele distribuční soustavy schválena, je dále posouzena připojitelnost a další související provozní aspekty pro dosud neschválenou fotovoltaickou elektrárnu. V namodelované síti dle kapitoly 3 se schválené zdroje nevyskytují, a proto byly tyto zdroje domodelovány. Pro tento účel jsou uvažovány střídače ABB PVS 175 TL u fotovoltaických elektráren a u větrné elektrárny to jsou větrné turbíny Vestas V100 s jednotkovým výkonem 1,8 MW. Je nutno podotknout, že v případě realizace výroby jsou dodavatelé zařízení zvoleni nejčastěji na základě výběrového řízení, a může tedy dojít ke změně technologie. Konečná technologie by měla dosahovat shodných nebo lepších parametrů než uvažovaná varianta, což je nejčastěji ověřováno v rámci zkušebního provozu. Veškeré namodelované parametry použité ve výpočtech jsou uvedeny v příloze této práce.

Z důvodu posuzování působení zpětných vlivů na distribuční soustavu jako celku je nutné rozlišovat pořadí žádostí, které provozovatelé distribuční soustavy v dané oblasti evidují. Z těchto příčin je dále v této podkapitole řešena poslední z žádostí o připojení, jejíž obsahem je připojení fotovoltaické elektrárny s výkonem 4 MW. Místo připojení bylo provozovatelem distribuční soustavy stanoveno na stávající venkovní vedení mezi odbočkami k distribučním trafostanicím (ve schématu označenými jako Z1_05 a Z1_07) na betonový podpěrný bod vzdálený zhruba 1250 m od první zmíněné odbočky. Vyvedení výkonu z výroby je uvažováno kabelovým vedením AXEKVCEY 3x1x240/25 o délce 240 m. Transformace na napětovou hladinu vysokého napětí byla modelována ekvivalentním prvkem transformátoru s výkonem 4 MVA (4 x 1 MVA) a s jmenovitým převodem 22/0,8 kV. Samotná výroba je pak namodelována prvkem fotovoltaické elektrárny s výkonem 4 MW a spektrem harmonických proudů. V případě již schválených výroben byl postup obdobný a vycházel z poskytnutých podkladů. Posuzovaná výroba spadá do výkonové kategorie B2 s nesynchronním připojením k distribuční soustavě, z čehož vyplývají dále řešené požadavky dané [5]. Na obrázku 4.2 je namodelovaná oblast doplněná o zmíněné výroby již schválené, a nově posuzované fotovoltaické výroby, jejíž připojitelnost je dále blíže analyzována.



Obr. 4.3: Namodelovaná síť s novými a posuzovaným zdrojem

4.2.1 Síťové poměry před připojením výroby k síti

Síťové poměry před připojením posuzované výroby k síti zahrnují kromě stávajících výroben i již schválenou větrnou a fotovoltaickou elektrárnu. Z pohledu napěťové změny všech těchto výroben je nejkritičtějším uzlem místo připojení (U_{FVE} na vývodu 3) a pokračující vývod u již schválené fotovoltaické elektrárny, která dosahuje hodnoty $\Delta u = 1,43 \%$, což je však místo v síti, které je velmi elektricky vzdáleno od místa připojení posuzované výroby. V plánovaném místě připojení dosahuje napěťová změna $\Delta u = 0,32 \%$. Jelikož napěťová změna bývá nejčastějším důvodem pro zamítnutí žádosti o připojení nebo omezení žádaného rezervovaného výkonu, jsou další zpětné vlivy již připojených výroben považovány za vyhovující, pokud provozovatel distribuční soustavy nestanoví jinak. Tyto vlivy se řeší individuálně v každé žádosti o připojení pro jednotlivé výroby a jsou tedy určeny i pro posuzovanou výrobu v následujících podkapitolách.

4.2.2 Souhrn síťových poměrů po připojení výroby s rezervovaným výkonem 4000 kW

Připojení s rezervovaným výkonem 4000 kW při $\cos\varphi_{PCC} = 1$

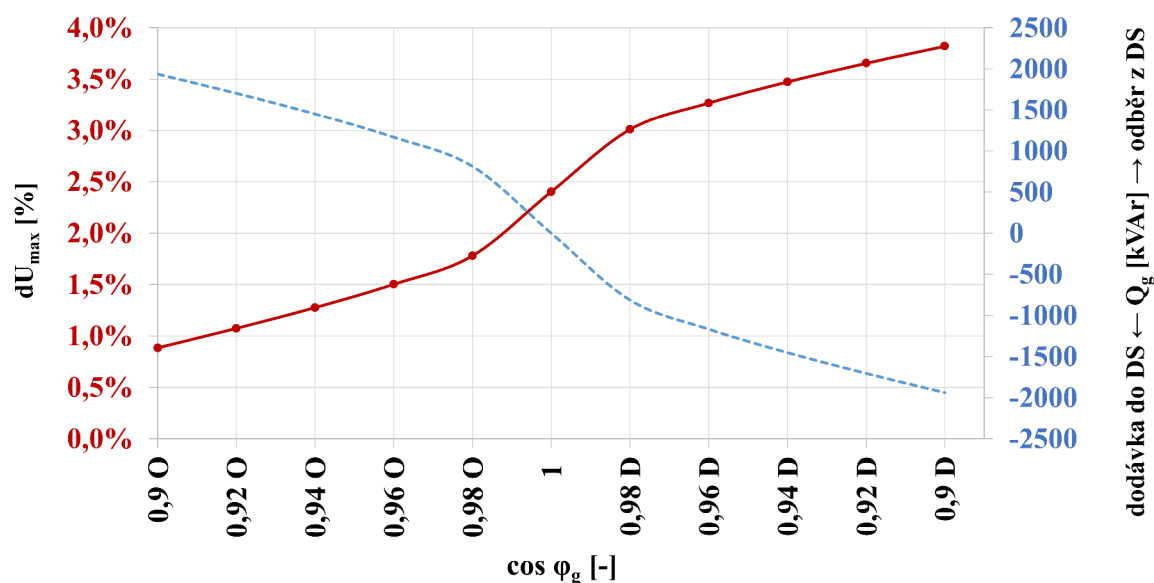
Žádaný rezervovaný výkon výroby v předávacím místě je 4000 kW. Výpočetní ekvivalent výroby respektuje činné ztráty na transformátoru a kabelové přípojce. Modelovaný instalovaný činný výkon výroby je uvažován 4042 kW.

Provozovatel distribuční soustavy požaduje dodávku v předávacím místě s neutrálním účínkem, který je rozhodující pro posouzení velikosti napěťové změny vyvolané připojením výroby. Tohoto stavu je pro posuzovanou výrobu dosaženo při účínku výroby $\cos\varphi_{FVE} = 0,9994_{KAP}$ a tedy při dodávce jalového výkonu. Ten je spotřebováván z důvodu převládajícího induktivního charakteru kombinace transformátorů a kabelového vedení, které je naopak zdrojem jalového výkonu. Jeho nepřilíšná délka není v tomto uvažovaném případě vyvedení výkonu výroby do předávacího místa převažující.

Po připojení výroby nedochází k překročení meze napětí $\pm 10 \% U_n$ pro napětí v síti 22 kV dle normativních požadavků pro distribuční síť [6]. K nejvyšší hodnotě napětí v namodelované distribuční síti dochází v předávacím místě, kde velikost napětí dosahuje 23,497 kV, což představuje o 6,8 % vyšší hodnotu, než je hodnota jmenovitá. Napěťová změna vyvolaná připojením výroby je však při neutrálním účínku v předávacím místě větší než limitní hodnota 2 %, tak jak požaduje [5]. Napěťová změna dosahuje velikosti 2,503 % a požadovaná velikost rezervovaného výkonu je proto v tomto místě z tohoto důvodu omezující.

Připojení s rezervovaným výkonem 4000 kW v rozsahu účinníků $\cos\varphi_{PCC} = 0,9$

Při provozu posuzované výrobní v celém rozsahu účinníků $\cos\varphi_{PCC} = 0,9$, tj. při odběru i dodávce jalového výkonu do předávacího místa, lze regulací jalového výkonu výrobní ovlivnit velikost napětí v předávacím místě o 0,634 kV, tj. cca 2,883 procenta jmenovitého napětí (22,931 - 23,565 kV). Pro dosažení požadované 2% hodnoty pro napěťovou změnu by musela výrobní odebrat jalový výkon s účinníkem nižším než přibližně $\cos\varphi_{PCC} = 0,99$. Pro lepší názornost jsou průběhy maximální vyvolané napěťové změny v síti (v tomto případě jde o předávací místo) a velikosti generovaného jalového výkonu znázorněny také v grafu 4.4 v celém pásmu účinníku v předávacím místě od 0,9 O (odběr Q) do 0,9 D (dodávka Q). Výpočty týkající se všech uvedených provozních stavů posuzované elektrárny jsou součástí přílohy.



Obr. 4.4: Velikost jalového výkonu a změny napětí v závislosti na provozním účinníku

Z důvodu překročení dovolené 2% hodnoty pro napěťovou změnu vyvolanou připojením posuzované výrobní, je dále určen maximální připojitelný výkon. Ten je dále rozhodující pro posouzení velikosti dalších zpětných vlivů.

4.2.3 Souhrn poměrů po připojení výrobní s rezervovaným výkonem 3010 kW

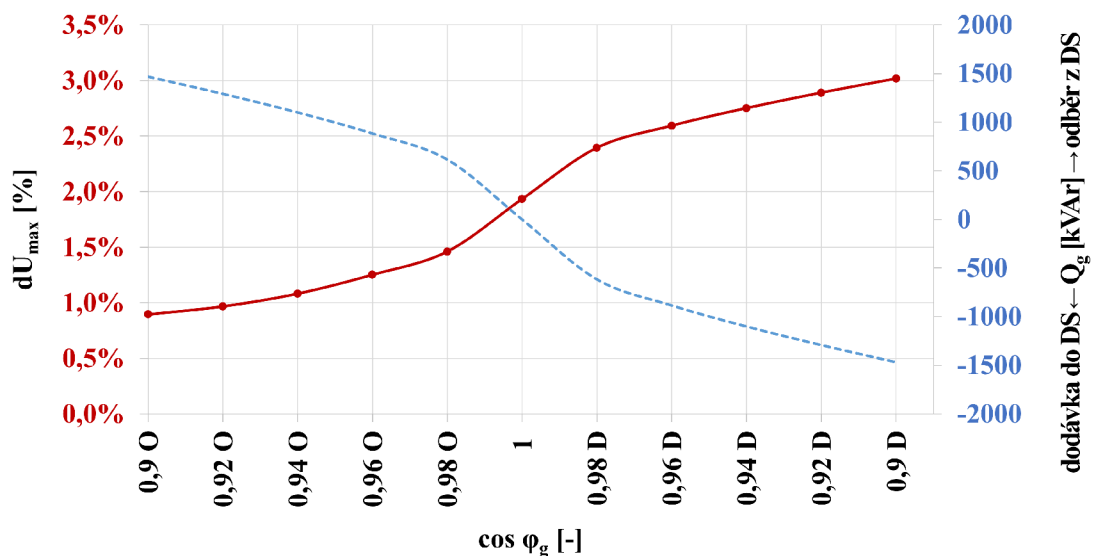
Za omezující hledisko pro velikost povoleného rezervovaného výkonu, jak bylo uvedeno výše, je maximální hodnota napěťové změny v distribuční síti po připojení posuzované výrobní. Z tohoto důvodu je dále uvažován rezervovaný výkon 3010 kW,

jenž vyvolá právě maximální přípustnou 2% hodnotu změny napětí.

Připojení s rezervovaným výkonem 3010 kW při $\cos\varphi_{PCC} = 1$

Snížený rezervovaný výkon výroby v předávacím místě o velikosti 3010 kW a výpočetní ekvivalent výroby opět respektuje činné ztráty na transformátoru a kabelové přípojce. Modelový instalovaný činný výkon výroby je proto uvažován o velikosti 3030 kW. Požadovaný neutrální účinník v předávacím místě, jakožto základní provozní stav, je dosažen při účinníku výroby $\cos\varphi_{FVE} = 0,9996_{KAP}$. To odpovídá zhruba velikosti dodávaného jalového výkonu 88 kVAr, který musí být výroba dle požadavků [5] schopna dodávat i v případě nulového dodávaného činného výkonu.

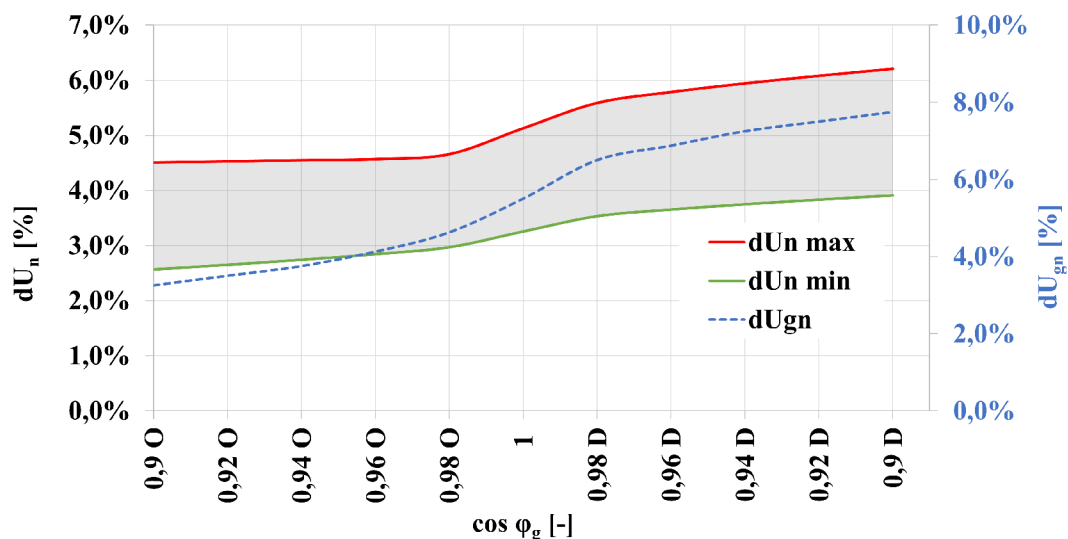
Po připojení výroby nabývá největší velikost napětí v distribuční soustavě hodnoty 23,143 kV, které je dosaženo rovněž v předávacím místě. Tato velikost napětí dosahuje nižší hodnoty vzhledem i k nižšímu připojovanému výkonu, než při původně požadované velikosti rezervovaného výkonu 4000 kW, a proto také splňuje požadavky dané normou [6]. Provozem připojené výroby, dodávající pouze činný výkon do předávacího místa, je vyvolána napěťová změna právě 2 %, což je mezní hodnota jak požaduje [5]. To je znázorněno také v grafu 4.5.



Obr. 4.5: Velikost jalového výkonu a změny napětí v závislosti na provozním účinníku

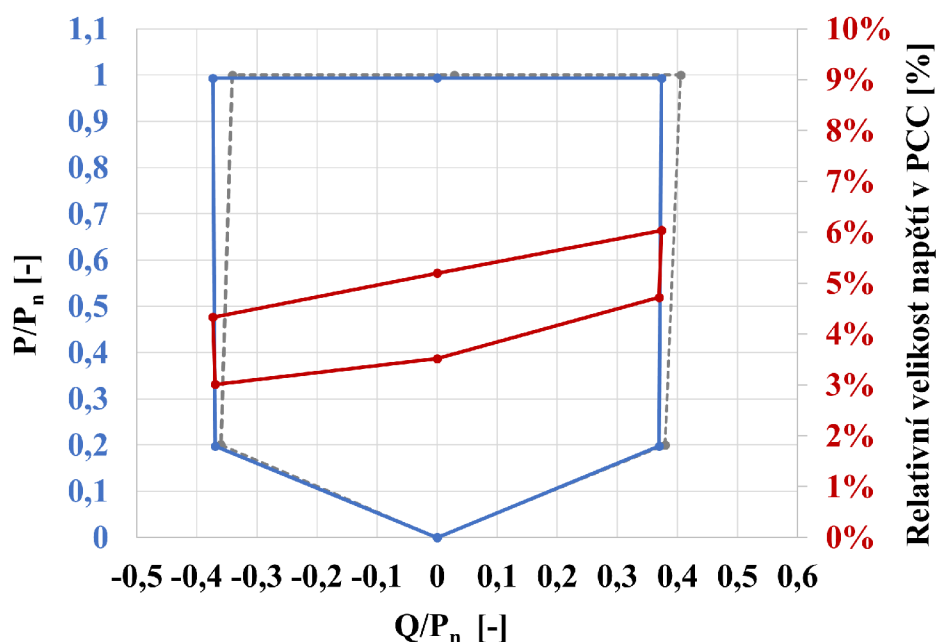
Připojení s rezervovaným výkonem 3010 kW v rozsahu účinníků $\cos\varphi_{PCC} = 0,9$

Při odběru i dodávce jalového výkonu do předávacího místa v celém uvažovaném rozsahu účinníků $\cos\varphi_{PCC} = 0,9$, tak jak je také vyneseno ve dříve uvedeném grafu 4.5, lze docílit změny velikosti napětí pomocí regulace jalového výkonu v rozsahu 22,897 - 23,381 kV, což představuje 2,199 % jmenovitého napětí. Stejně jako v prvotní variantě, s původním požadovaným připojovaným výkonem, jsou graficky znázorněny průběhy maximální vyvolané napěťové změny v předávací místě a velikosti generovaného jalového výkonu v celém pásmu účinníku od 0,9 O (odběr Q) do 0,9 D (dodávka Q). Výpočty pro jednotlivé provozní stavy posuzované výroby jsou součástí přílohy. Napěťovou situaci, v závislosti na provozním účinníku posuzované výroby v dané oblasti, pak nejlépe vystihuje následující graf 4.6. Šedě vyznačená oblast ukazuje rozsah velikosti napětí vyskytující se v celé namodelované síti. Pro červeně vyznačenou maximální hodnotu velikosti napětí lze při odběru jalového výkonu vidět téměř konstantní hodnotu, což je dáno tvrdostí sítě na přípojnicích. Od hodnoty účinníku $\cos\varphi_{PCC} = 0,98$ a dále při dodávce jalového výkonu se projevuje vliv připojené výroby a maximální hodnota napětí v síti se vyskytuje v místě připojení. Naopak minimální hodnota velikosti napětí se v celém provozním rozsahu účinníku výroby týká uzlu na jednom z vývodů na konci kmenového vedení, které je připojovaným výkonem posuzované výroby postihnuto. Dále je ve zmíněném grafu vynesena velikost napětí na svorkách střídačů výroby, která však nedosahuje ani 10% jmenovité hodnoty, pro provoz střídače není kritická a splňuje podmínky dle [5].



Obr. 4.6: Odchylka napětí od jmenovité hodnoty v síti 22 kV a na svorkách střídačů výroby v závislosti na provozním účinníku

Dle požadavku daného pravidly provozování distribučních soustav, jak je popsáno v podkapitole 1.2.1, musí být posuzovaná výrobn v rámci statické podpory sítě schopna dodávat jalový výkon při jmenovitém napětí i při nižším dodávaném činném výkonu, čímž může přispět k udržení velikosti napětí v daném místě připojení. Pro nesynchronní výrobn výkonové kategorie B2 to jsou charakteristické kombinace velikosti poměrů činného a jalového výkonu, které ohraničují výkonovou plochu, ve které musí být výrobn schopna pracovat. Popisovaná křivka je znázorněna níže v grafu 4.7 spolu s výkonovým rozsahem výrobn, jenž je potřeba pro dosažení žádaného rozsahu v předávacím místě. V rámci statické podpory sítě lze tedy v předávacím místě ovlivnit velikost napětí regulací účinníku v pásmu 0,936 odběr/dodávka ($Q/P_n = 0,375$) v rozsahu 22,953 až 22,328 kV, což je změna o cca 0,375 kV (1,7 % U_n).



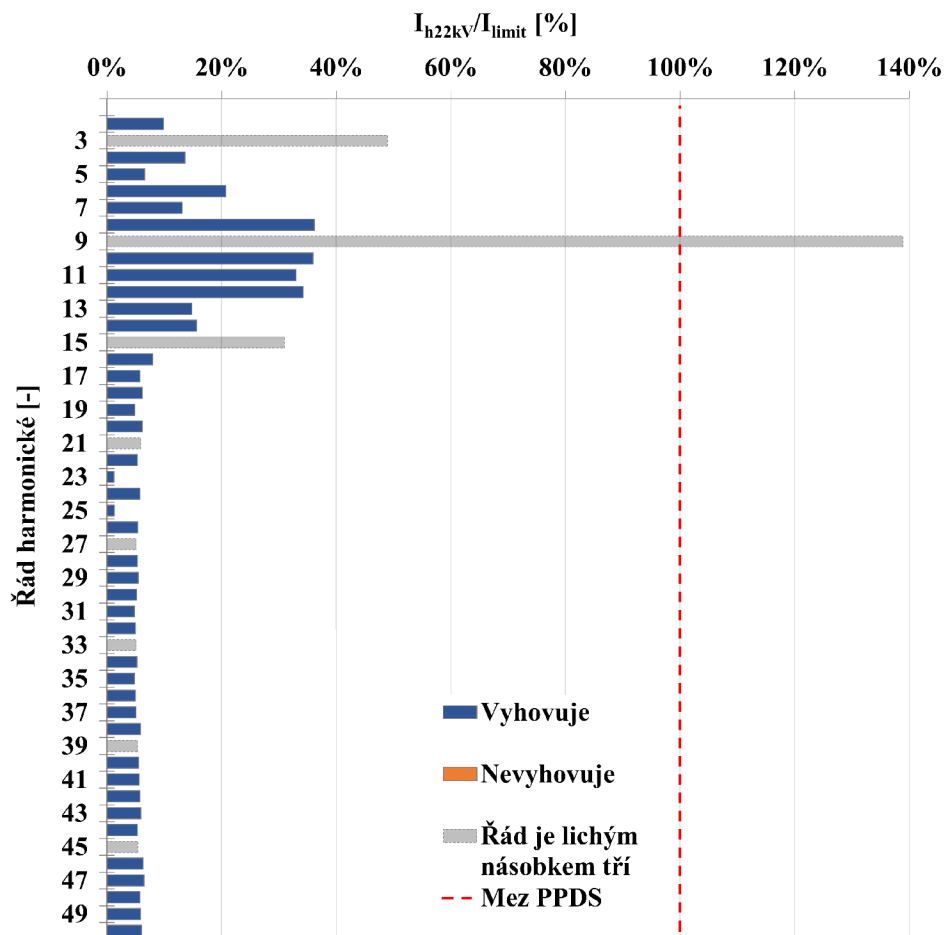
Obr. 4.7: Podpora napětí pomocí jalového výkonu

4.2.4 Další zpětné vlivy

Harmonické

Pro určení emise jednotlivých harmonických je nutná znalost posuzovaného zařízení. Pro tento účel se u uvažovaných střídačů vychází z datového listu, který uvádí míru emitovaného proudu pro každou harmonickou. Pro plánovaný uvažovaný a omezený výkon výrobn 3030 kW je dále posouzena emise harmonických s osmnácti střídači v souladu s pravidly provozování distribučních soustav, jak je popsáno v kapitole

1.1.5. Příspěvky pro jednotlivé harmonické včetně jejich maximálních dovolených mezí na napěťové hladině 22 kV jsou graficky znázorněny níže na obrázku 4.5. Data pro tento graf jsou uvedena v příloze společně hodnotami jednotkových i celkových emisí harmonických proudů pro uvažovaný typ střídače.



Obr. 4.8: Příspěvek harmonických proudů výroby

Harmonické, jejichž řád je lichým násobkem tří, se uzavírají ve vinutí transformátoru zapojeném do trojúhelníku, proto se překročení dovolených mezí harmonického proudu těchto řádů nepředpokládá. Vypočtené emise harmonických proudů ostatních řádů nepřekračují limity dané [5] pro jednu výrobní.

Flikr

Vzhledem k připojení FVE přes střídače se nedá očekávat přímý vliv na úroveň flikru. To je dáno samotnou funkcí střídačů, u kterých se nepředpokládá významný příspěvek k úrovni flikru v místě připojení a nejsou tak ani od výrobců poskytovány podklady pro namodelování a výpočet této veličiny. Připojení přes uvažované vedení s transformátory, a tedy do místa s vyšším zkratovým výkonem, je dalším faktorem, který velikost úrovně flikru přímo zmenšuje. Nejčastěji po dobu zkušebního provozu, kdy je ověřován reálný provoz výroby, se provádí měření kvality elektřiny, které ověřuje přímý vliv posuzované výroby k úrovni flikru.

Útlum signálu hromadného dálkového ovládání

Vzhledem k připojení posuzované výroby přes statické měniče dle [5], není předpoklad pro možný útlum signálu HDO. Před uvedením do provozu se také v rámci měření kvality elektřiny ověřuje vliv výroby na útlum signálu HDO.

Příspěvek ke zkratovému proudu

Příspěvek posuzované výroby ke zkratovému proudu se vzhledem k připojení přes střídače uvažuje dle technických specifikací výrobce. Hodnota zkratového proudu zpravidla dosahuje hodnoty jmenovité a případně může být nepatrně vyšší. Pro jeden uvažovaný střídač je uvedená hodnota maximálního zkratového proudu 140 A vůči 134 A pro maximální provozní proud. V rámci příspěvku posuzované výroby při uvažovaných 18 střídačích byl výpočtem stanoven příspěvek výroby do místa připojení při trojfázovém kovovém zkratu na 90,58 A. Vzhledem k fázovému posunu, mezi zkratovým proudem ze zbytku sítě a dodávaného výrobnou, se však hodnota zkratového proudu zvýší o menší hodnotu. Celkové zkratové poměry v místě připojení shrnuje tabulka 4.1.

$I''_{kBez FVE}$	$I''_{kS FVE}$	dI''_k	dI''_k
[kA]	[kA]	[kA]	[%]
2,952	3,011	0,059	1,998

Tab. 4.1: Zkratové poměry v místě připojení po připojení výroby

4.2.5 Proudové zatížení vedení a napájecích transformátorů

Součástí posouzení připojitelnosti je také v rámci ustáleného chodu sítě kvantifikace zatížení jednotlivých prvků sítě. Z jmenovitých hodnot pro jednotlivá vedení a

transformátory použitých v namodelované síti jsou dále určeny procentuální velikostí zatížení těchto prvků v již dříve uvažovaném rozsahu účinníků posuzované výroby.

Zatížení prvků v normálním provozním stavu

Nejvíce procentuálně zatížené prvky, vzhledem ke svým maximálním jmenovitým hodnotám proudového zatížení, jsou ve všech posuzovaných provozních stavech výroby vyjádřeny v tabulce 4.2 níže.

Vedení	Typ vedení	I_{\max}	$I_{\cos\varphi = 0,9 C}$	$I_{0,9 C}/I_{\max}$	$I_{\cos\varphi = 1}$	I_1/I_{\max}	$I_{\cos\varphi = 0,9 L}$	$I_{0,9 L}/I_{\max}$
		[A]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]
V1_48_A	35AlFe6	150	87,1	58,0	87,6	58,4	88,2	58,8
V1_46	35AlFe6	150	86,0	57,4	86,6	57,7	87,1	58,1
V1_17_A	50AlFe6	163	71,4	43,8	64,2	39,4	76,2	46,7

Tab. 4.2: Proudové zatížení vedení v různých provozních stavech výroby

První dvě uvedená vedení se nachází na odbočce z kmenového vedení, kde je připojena větrná elektrárna, do kterého směřuje velká část vyrobeného výkonu, jelikož na této odbočce je nízké zatížení (3 distribuční trafostanice). Největší procentuální proudové zatížení je pak dáno malým průřezem těchto vedení. Posledním uvedeným je vedení přímo u místa připojení posuzované fotovoltaické výroby blíže k rozvodně. Zatížení tohoto vedení je dáno také přetokem do kmenového vedení z důvodu nižšího celkového zatížení vývodu za místem připojení. Ve všech případech je maximálních hodnot dosaženo při odběru jalového výkonu, ale ani na jednom z vedení však nedochází k překročení 70 % maximálního zatížení. To je nejčastěji limitní hodnota pro provozovatele distribuční soustavy na napěťové hladině vysokého napětí s ohledem na další možný rozvoj sítě, pokud tento limit není provozovatelem distribuční soustavy stanoven jinak.

Zatížení prvků ve stavu N-1

Pro stav N-1 se standardně u distribučních sítí vysokého napětí z důvodu jejich topologie uvažuje pouze provoz bez jednoho z napájecích transformátorů 110/vn. Výjimečně se posuzuje možnost přepojení z jiného vývodu pomocí úsekového odpojovače v blízkosti rozvodny, který je umístěn paralelně mezi těmito vývody nebo případně napájení z jiné provozní oblasti.

Pro posouzení připojované výrobní ve stavu N-1 byl tedy posouzen provoz bez jednoho z napájecích transformátorů, přičemž byly pomocí příčného spínače přípojníc v napájecí rozvodně spojeny obě přípojnice a jednotlivé vývody celé namodelované oblasti byly tak napájeny zbývajícím transformátorem. Tabulka 4.3 níže ukazuje porovnání výkonových zatížení transformátorů v normálním a stavu N-1.

Stav N-1	Uzel	I [A]	P [kW]	Q [kVar]	S [kVA]
T102	U1	20,2	894	3909	4010
	Přípojnice B	96,5	-854	-3721	3818

Normální stav	Uzel	I [A]	P [kW]	Q [kVar]	S [kVA]
T101	U1	15,8	3057	735	3144
	Přípojnice A	77,0	-3018	-561	3070
T102	U1	19,9	-2125	3341	3960
	Přípojnice B	96,5	2165	-3153	3825

Tab. 4.3: Zatížení transformátorů v normálním a N-1 stavu

Jak je patrné z této tabulky, při provozu obou transformátorů při daném provozním zapojení sítě, je výkon na vývodu, kde se nachází posuzovaná výrobní výkonově přebytečný, a dochází k toku výkonu do vyšší napěťové hladiny. Naopak na druhém z transformátorů dochází k toku výkonu do nižší napěťové hladiny. V takovém případě lze při běžném provozu přepojit vývody mezi přípojnícemi, čímž lze zmírnit či eliminovat přetoky do vyšší napěťové hladiny. Ve stavu N-1 je vidět výkonová bilance celé oblasti. I po připojení nových zdrojů je pro uvažované odběry oblast mírně spotřební a nedochází k přetokům výkonu do vyšší napěťové hladiny. K přetěžování transformátorů tedy nedochází a oblast byla v minulosti spíše předimenzována z důvodu možného dalšího zatěžování odběry na dlouhých vývodech. Následkem toho i dochází k omezení připojovaného výkonu z důvodu překročení napěťové změny po připojení výrobní.

4.3 Vyhodnocení připojení nové výrobní a dalších hledisek spojených s připojováním nových zdrojů

Posuzovaná fotovoltaická elektrárna bude mít závažný vliv na kvalitu elektrické energie v dané oblasti a lze ji dle všech požadavků připojit v místě určeném provozem

vatelem distribuční soustavy pouze s nižším rezervovaným výkonem, než jaký byl požadován. Velikost požadovaného rezervovaného výkonu 4000 kW byla omezena z důvodu vyvolané napěťové změny.

Dosažením mezní hodnoty pro vyvolanou napěťovou změnu, zapříčiněnou připojovanou výrobnou, dochází ke znemožnění připojení dalších zdrojů na celém vývodu z napájeném z rozvodny 110/22 kV, do které je tato výrobná připojena. To platí pro uvažovanou konfiguraci sítě, tedy při příslušném zkratovém výkonu na hladině velmi vysokého napětí, zkratové impedance podél celého vývodu a velikosti zatížení tvořené distribučními trafostanicemi a velkoodběrateli na napěťové hladině vysokého napětí.

Zvyšování zkratového výkonu potažmo snižování zkratové impedance, a tedy zvyšování tvrdosti sítě, je obecně v distribučních sítích spojeno se značnými investicemi. Ty jsou vynakládány na zvyšování průřezů jednotlivých vedení nebo zvýšením transformačního výkonu mezi hladinami VVN a VN, což je však v tomto případě s dostatečně velkým transformačním výkonem 80 MVA bezúčelné. Jakákoliv rekonfigurace sítě za účelem zvýšení zkratového výkonu je vzhledem k topologii venkovních sítí vysokého napětí neproveditelná. Zvyšování zátěže nejspíše nelze očekávat s ohledem na rozvoj obnovitelných zdrojů energie napříč napěťovými hladinami, jak je popsáno v kapitole 2.2.2. Z těchto důvodů je tento vývod v nejbližší době pro další připojení výroben neuvážovatelný.

V rámci posuzování připojitelnosti je s ohledem na bezpečnost provozu uvažována nejhorší možná provozní varianta. To znamená, že je uvažován minimální zkratový výkon, naměřená data zatížení pocházejí z letního měření, provoz výroben je namodelován s maximálním rezervovaným výkonem a zohledňuje se možnost provozu ve stavu N-1. Takto vypočtená podoba ustáleného chodu sítě představuje nejnepříznivější provozní stav, který je však velmi málo pravděpodobný a neodráží dynamiku doprovázející provoz distribučních sítí. Ta je v případě bezporuchového stavu spojená se změnami zatížení a výroby a na to reagujícími regulačními pochody. U obnovitelných zdrojů lze, vzhledem k závislosti velikosti dodávaného výkonu na aktuálních klimatických podmínkách, očekávat v distribučních sítích rychlejší výkyvy ve změnách dodávky elektrické energie a také větší rozptyl velikosti právě spotřebovávané elektrické energie, což s sebou nese tlak na řízení distribučních sítí a zejména pak na regulaci napětí.

V tomto případě lze regulovat napětí v místě připojení v rámci povinné statické podpory sítě dle PPDS přílohy 4 [5] o 0,375 kV a v případě uvažování většího rozsahu účinníku s krajními hodnotami $\cos\varphi_{PCC} = 0,9$ v předávacím místě až o 0,474 kV. Na tomto případu je poukázána potřeba požadavků na regulační schopnosti střídačů a obecně všech výrobních modulů, které samy napěťové výkyvy způsobují. V budoucnu je pak zejména na provozovatelích distribučních soustav, aby tyto schopnosti

výroben využili účelně tak, aby byla zajištěna nepřetržitost dodávek elektrické energie a byla zachována požadovaná kvalita napětí v distribučních sítí i s připojenými intermitentními zdroji.

Závěr

Diplomová práce se zabývá problematikou spojenou s připojováním nových zdrojů do distribučních soustav s ohledem na současné legislativní a normativní požadavky, připojované typy technologií a další provozní poměry v síti.

První polovina diplomové práce je zaměřena na popis zpětných vlivů na distribuční soustavu a současného stavu podmínek pro připojování nových zdrojů. Dále je zpracován přehled obnovitelných zdrojů energie včetně popisu využitých technologií. Součástí poskytnutých dat od provozovatele distribuční soustavy pro vypracování diplomové práce je aktuální stav a rozložení žádaného rezervovaného výkonu mezi jednotlivé napěťové hladiny. S ohledem na dnešní energetický mix je z těchto dat nastíněn možný budoucí vývoj a jsou uváženy vyplývající souvislosti a případné následky, které z toho plynou.

Poskytnutá data obsahovala také informace o jedné z oblastí sítě vysokého napětí včetně transformace mezi napěťovými hladinami velmi vysokého a vysokého napětí. Z těchto dat byla za pomoci softwaru DNCalc namodelována část distribuční sítě, ve které byl požadován rezervovaný výkon na připojení tří nových výroben. Připojení jedné z fotovoltaických elektráren bylo dosud nevyhodnoceno a na této žádosti byla zpracovaná analýza sloužící k posouzení připojitelnosti. Ta zahrnovala kvantifikaci zpětných vlivů na síť z pohledu kvality elektrické energie, ale také provozní možnosti posuzované fotovoltaické elektrárny a dopady na namodelovanou část distribuční soustavy. Diplomová práce tak kromě konkrétního případu posouzení připojitelnosti poukázala na problematiku s decentralizovanou výrobou. Jde o praktickou ukázkou přesažení limitních hodnot zpětných vlivů na distribuční síť, jejichž překračování lze očekávat stále častěji s ohledem na současný trend připojování velkého množství výroben. Diplomovou práci lze využít i jako podklad pro hledání možností navýšení připojitelného výkonu, využití potenciálních širších provozních schopností výroben nebo pro zkoumání dopadů na provoz sítě vysokého napětí s ohledem na nestálost spotřeby a intermitentní provoz obnovitelných zdrojů.

Literatura

- [1] *NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/631 ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě (RfG) [online].* In: Únor 2022 [cit. 2022-11-11]. Dostupné z URL: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0631>>.
- [2] *PNE 33 3430-0: Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav.* 4. vydání. 2009.
- [3] *SPOLEK AUTORŮ. Technická pravidla pro posuzování zpětných vlivů na síť: Část A: Základy.* 4. vydání. 2009 SPOLEK AUTORŮ. Technická pravidla pro posuzování zpětných vlivů na síť: Část A: Základy. 3. vydání. Praha: ČSRES – České sdružení regulovaných elektroenergetických společností, 2022.
- [4] *BLAŽEK, Vladimír a Petr SKALA. Distribuce elektrické energie.* Skriptum. Brno: VUT, FEKT.
- [5] *PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla provozování distribučních soustav: Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy [online].* In: Únor 2022 [cit. 2022-11-11]. Dostupné z URL: <https://www.cezdistribuce.cz/webpublic/file/edee/distribuce/ppds/ppds-2022_priloha-4.pdf>.
- [6] *ČSN EN 50160. Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě.* 3. ed. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [7] *MASTNÝ, Petr. Obnovitelné zdroje elektrické energie.* Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [8] *BROŽ, Karel a Bořivoj ŠOUREK. Alternativní zdroje energie.* Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2802-X.
- [9] *POULEK, V., LIBRA, M., Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů.* Elektro. FCC PUBLIC, 2010, 2010(3), 6-9.
- [10] *VOJÁČEK, A., Solární články a jejich použití v sensorice a automatizaci.* 5. 12. 2005 [cit. 2023-02-09]. Dostupné z URL: <<https://automatizace.hw.cz//clanek/2005120501>>.

- [11] JANÍČEK, F. a kolektiv autorů, *Obnovitelné zdroje energie 1 – Technologie pro udržitelnou budoucnost*, STU FEI Bratislava, 2007, ISBN: 978-80-969777-0-3
- [12] MASTNÝ, P., *Studijní podklady předmětu Malé zdroje elektrické energie*, 2011, Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně
- [13] PROCHÁZKA, R.: *Přednášky z předmětu Elektroenergetika 2 (B1M15EN2)*, ČVUT v Praze, Dostupné z URL:
<<https://www.powerwiki.cz/attach/EN1Podklady/Elektroenergetika-1-Vodni%20elektrarny.pdf>>.
- [14] JAKUBES, J., BELLINGOVÁ, H., ŠVÁB, M., *Moderní využití biomasy: Technologické a logistické možnosti* [online]. Česká energetická agentura. 2006 [cit. 15.5.2023]. Dostupné z URL:
<<https://www.mpo-efekt.cz/dokument/02.pdf>>.
- [15] *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy České republiky za rok 2021* [online]. Jihlava: Energetický regulační úřad, 2022 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z URL:
<<https://www.eru.cz/rocni-zprava-o-provozu-elektrizacni-soustavy-cr-pro-rok-2021>>.
- [16] *Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040* [online]. Praha: ČEPS, a.s., 2022 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z URL:
<<https://www.ceps.cz/cs/zdrojova-primerenost>>.
- [17] *Poskytnutá data provozovatelem distribuční soustavy: Statistické údaje o připojení z let 2020-2022*. 2023.
- [18] *Tisková zpráva: Připojení fotovoltaických elektráren do sítě urychlí nový online formulář EG.D* [online]. Brno, 20.12.2022 [cit. 2023-03-12]. Dostupné z URL:
<https://www.egd.cz/sites/default/files/2022-12/tz_pripojeni_fve_novy_online-_formular.pdf>.
- [19] *Tisková zpráva: ČEZ Distribuce připojila do sítě za loňský rok rekordních 21 325 fotovoltaických elektráren* [online]. 17.2.2023 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z URL:
<<https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/cez-distribuce-pripojila-do-site-za-lonsky-rok-rekordnich-21-325-fotovoltackych>>.
- [20] MÁŠLO, Karel. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. [Praha]: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.

Seznam zkratek

DS	Distribuční soustava
EVA	Etylenvinylacetát
ES	Elektrizační soustava
FV	Fotovoltaický
FVE	Fotovoltaická elektrárna
HDO	Hromadné dálkové ovládání
MVE	Malá vodní elektrárna
NN	Nízké napětí
PDS	Provozovatel distribuční soustavy
PPDS	Pravidla provozování distribuční soustavy
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
ZVN	Zvlášť vysoké napětí

A Obsah elektronické přílohy

Součástí závěrečné práce je elektronická příloha. Ta obsahuje napěťové a proudové poměry v síti pro všechny uvedené provozní stavy posuzované FVE, výpočty emisí harmonických proudů, použité prvky v celém modelu včetně jejich zatížení v normální i N-1 stavu. Níže je uveden příklad znázornění vypočtených výsledků.

Poměry v uzlech

	Ua [kV]	α [°]	Ub [kV]	α b [°]	Uc [kV]	α c [°]	dUna [%]	dUnb [%]	dUnc [%]	Zk [Ω]	α [°]	Sk [MVA]
Připojnice B	22,9	30,5	22,9	-89,5	22,9	150,5	-4,0	-4,0	-4,0	1,8	85,7	329,2
Připojnice A	23,0	29,6	23,0	-90,4	23,0	149,6	-4,7	-4,7	-4,7	1,8	85,7	329,4
U1	114,8	30,0	114,8	-90,0	114,8	150,0	-4,3	-4,3	-4,3	11,8	81,5	1240,4
U2_01	23,0	29,6	23,0	-90,4	23,0	149,6	-4,7	-4,7	-4,7	1,8	85,2	326,4
U2_02	23,0	29,6	23,0	-90,4	23,0	149,6	-4,6	-4,6	-4,6	1,8	84,8	322,4
U3_22	22,9	31,0	22,9	-89,0	22,9	151,0	-4,3	-4,3	-4,3	3,6	67,7	161,4
U3_23	22,9	31,0	22,9	-89,0	22,9	151,0	-4,3	-4,3	-4,3	3,6	67,7	161,1
U3_21	22,9	31,0	22,9	-89,0	22,9	151,0	-4,3	-4,3	-4,3	3,4	68,6	172,2
U3_24	22,9	31,0	22,9	-89,0	22,9	151,0	-4,3	-4,3	-4,3	3,6	67,9	164,0
U3_25	22,9	31,0	22,9	-89,0	22,9	151,0	-4,3	-4,3	-4,3	3,6	67,4	162,9
U3_26	22,9	31,1	22,9	-88,9	22,9	151,1	-4,3	-4,3	-4,3	4,3	65,8	137,2
U3_27	22,9	31,1	22,9	-88,9	22,9	151,1	-4,3	-4,3	-4,3	4,3	65,7	136,1

Poměry ve větvích

	Uzel	Ia [A]	α [°]	Ib [A]	α b [°]	Ic [A]	α c [°]	P [kW]	Q [kVar]	S [kVA]
V1_95	U1_94	0,9	-17,3	0,9	-137,3	0,9	102,7	35	11	37
	U1_95	0,9	162,4	0,9	42,4	0,9	-77,6	-35	-11	37
SP	Připojnice B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0
	Připojnice A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0
Z1_42	U1_95	0,9	-17,6	0,9	-137,6	0,9	102,4	35	11	37
EGC_110	U1	21,4	90,1	21,4	-29,9	21,4	-149,9	-2	-4252	4252
	T101	15,8	-13,5	15,8	-133,5	15,8	106,5	3057	735	3144
V1_97	Připojnice A	77,0	169,0	77,0	49,0	77,0	-71,0	-3018	-561	3070
	U1_96	1,8	-17,6	1,8	-137,6	1,8	102,4	68	22	72
V2_01	U1_97	1,8	162,4	1,8	42,4	1,8	-77,6	-68	-23	72
	Připojnice A	48,3	-13,3	48,3	-133,3	48,3	106,7	1877	428	1925
	U2_01	48,3	166,5	48,3	46,5	48,3	-73,5	-1877	-435	1926

Rozdíl dU

	dUa před[%]	dUa po[%]	Δ dUa	dUb před[%]	dUb po[%]	Δ dUb	dUc před[%]	dUc po[%]	Δ dUc
Připojnice B	-3,77	-3,96	0,19	-3,77	-3,96	0,19	-3,77	-3,96	0,19
Připojnice A	-4,51	-4,66	0,15	-4,51	-4,66	0,15	-4,51	-4,66	0,15
U1	-4,19	-4,33	0,15	-4,19	-4,33	0,15	-4,19	-4,33	0,15
U2_01	-4,50	-4,65	0,15	-4,50	-4,65	0,15	-4,50	-4,65	0,15
U2_02	-4,49	-4,64	0,15	-4,49	-4,64	0,15	-4,49	-4,64	0,15
U3_22	-3,17	-4,28	1,12	-3,17	-4,28	1,12	-3,17	-4,28	1,12
U3_23	-3,17	-4,28	1,12	-3,17	-4,28	1,12	-3,17	-4,28	1,12
U3_21	-3,17	-4,29	1,12	-3,17	-4,29	1,12	-3,17	-4,29	1,12
U3_24	-3,13	-4,29	1,16	-3,13	-4,29	1,16	-3,13	-4,29	1,16
U3_25	-3,13	-4,29	1,16	-3,13	-4,29	1,16	-3,13	-4,29	1,16
U3_26	-2,96	-4,28	1,32	-2,96	-4,28	1,32	-2,96	-4,28	1,32
U3_27	-2,96	-4,28	1,32	-2,96	-4,28	1,32	-2,96	-4,28	1,32