



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra Elektroenergetiky

Využití mikrozdrojů při obnově elektrizační soustavy při poruše blackout

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Radim Kolařík

Daniel Miškovský

Praha 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Miškovský** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **434995**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Využití mikrozdrojů při obnově elektrizační soustavy po poruše typu blackout

Název diplomové práce anglicky:

Possibilities of black start with the use of RES

Pokyny pro vypracování:

1. Popište stávající strategii obnovy ES ČR po poruše typu blackout.
2. Popište možnosti využití mikrozdrojů pro obnovu soustavy.
3. Vytvořte model vyhrazené části sítě pro obnovu napájení.
4. Na základě provedených simulací zhodnoťte vhodnost využití mikrozdrojů pro obnovu soustavy po poruše typu blackout.

Seznam doporučené literatury:

1. MÁŠLO, Karel. Řízení a stabilita elektrizační soustavy. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN isbn-978-80-260-4461-1.
2. Yamashita, Koji, Renner, Herwig, Martinez Villanueva, Sergio, et al. Modelling of inverter-based generation for power system dynamic studies [online]. 2018 [cit. 2020-02-07]. ISBN 978-2-85873-429-0. Dostupné z: <http://cired.net/uploads/default/files/727-web.pdf>
3. KŘÍŽ, J., NOHÁČOVÁ, L., PISTORA, M. Možnosti startu ze tmy s využitím OZE. In Proceedings of the 12th International Scientific Conference – Electric Power Engineering 2011. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. s. 29-32. ISBN: 978-80-248-2393-5
4. Pourbeik, Pouyan & Weber, James & Ramasubramanian, Deepak & Sanchez-Gasca, Juan & Senthil, Jayapalan & Zadkhash, Pouya & Boemer, Jens & Gaikwad, Anish & Green, Irina & Tacke, Spencer & Favela, Roberto & Wang, Song & Zhu, Songzhe & Torgesen, Matthew. (2019). An Aggregate Dynamic Model for Distributed Energy Resources for Power System Stability Studies. 14. 38-48.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Radim Kolařík, Constellium Extrusions Děčín s.r.o.

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **10.02.2020** Termín odevzdání diplomové práce: **14.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

Ing. Radim Kolařík
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 14. 8. 2020

podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat své rodině, která mě podporovala v mém studiu. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří se mnou konzultovali a byli mi nápomocni při vytváření této práce. Jmenovitě bych chtěl poděkovat za cenné rady panu Ing. Mgr. Vítu Kleinovi, Ph.D.a panu Ing Martinovi Pistorovi. Také bych chtěl poděkovat panu Ing. Janu Truxovi za konzultace a poskytnuté energetické audity.

Anotace

Práce se zabývá problematikou blackoutu, jeho popisem, vznikem a připravenými scénáři, jak by se blackout řešil dnes. Teoretická část se věnuje budoucnosti a využití decentralních zdrojů energie a jejich případným použitím během stavu nouze. Praktická část se zabývá možným vytvořením ostrovního provozu a zajištěním vlastní spotřeby důležitým místům v elektrizační soustavě.

Klíčová slova

Blackout, obnovitelné zdroje energie, ostrovní provoz, decentralní zdroje

Annotation

This thesis deals with the issue of a blackout. It describes the course of such event, its origin and it explores the procedures prepared to manage a blackout, if it was to happen today. The theoretical part indicates the future and usage of decentralized energy resources as well as their possible application in a state of emergency. The practical part concerns the establishment of an isolated network while securing self-consumption for critical parts of the electrical grid.

Key Words

Blackout, renewable resources, isolated network, decentralized energy resources

Obsah

Seznam použitých zkratk.....	9
Seznam použitých obrázků.....	9
Úvod.....	10
1 Strategie obnovy elektrizační soustavy.....	11
1.1 Blackout.....	11
1.2 Historická zkušenost s blackouty	16
1.2.1 Zahraníčí zkušenosti.....	16
1.2.2 Tuzemské zkušenosti.....	19
1.3 Plán obrany proti šíření poruch v přenosové soustavě	19
1.4 Plán obnovy po výpadku soustavy	25
1.4.1. Strategie obnovy.....	26
1.4.2. Priority.....	27
1.4.3. Principy obnovy	27
1.4.4. Obnova napájení z elektráren schopných startu ze tmy	28
1.4.5. Distribuční soustavy.....	28
2 Decentralizované zdroje energie.....	29
2.1. Predikce decentralizace výroby elektrické energie	30
2.2. Obnovitelné zdroje	34
2.1.1 Větrné elektrárny.....	35
2.1.2 Vodní elektrárny.....	38
2.1.3 Fotovoltaické elektrárny.....	41
2.3. Využití mikrozdrojů při nouzových stavech	43
3 Modelová situace	44
3.1. Výkonová rovnováha.....	44
3.1.1 Kritéria	45
3.1.2 Rizika	45
3.2. MVE Měřejovice.....	46
3.2 Strana spotřeby	50
3.2.1 Teplárna Louny	50
3.2.2 Nemocnice.....	52
3.2.3 Čistička odpadních vod	52
3.2.4 Vedení	54
4 Model.....	55
4.1 Popis modelu	55

4.2	Cíl modelu	56
4.3	Popis spínání.....	56
	Závěr.....	61
	Knižní zdroje	62
	Zdroje	63
	Přílohy	66

Seznam použitých zkratk

ES – elektrizační soustava
OZE – obnovitelné zdroje energie
VS – vlastní spotřeba
KI – krizová infrastruktura
ČOV – čistička odpadních vod
OTE – operátor trhu OTE,a.s.
MVE – malá vodní elektrárna
CZT – centrální zdroj tepla

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 Pád linky V441 [2].....	12
Obrázek 2 Požár transformátoru v TR Výškov [2]	13
Obrázek 3 Náraz traktoru do stožárové konstrukce V430 [2].....	14
Obrázek 4 Přeshraniční toky přes naše území [3]	15
Obrázek 5 Blackout Itálie 2003 [5]	18
Obrázek 6 Schéma přechodu mezi jednotlivými stavy včetně možných korektivních zásahu [4]	20
Obrázek 7 Schéma přenosové soustavy České republiky [14]	26
Obrázek 8 Varianta Koncepční – instalovaný výkon [15]	30
Obrázek 9 Varianta Centrální – instalovaný výkon [15].....	31
Obrázek 10 Varianta Decentrální – instalovaný výkon [15].....	31
Obrázek 11 Podíl decentrálních zdrojů na celkovém instalovaném výkonu [15].....	32
Obrázek 12 Horizontální (vlevo) avertikální větrná turbína [9]	35
Obrázek 13 Území s dostatečným větrným potenciálem [10]	36
Obrázek 14 Rozdělení vodních elektráren dle instalovaného výkonu [18]	38
Obrázek 15 Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny (brutto) v roce 2019 [33]	39
Obrázek 16 Ostrožská Lhota - FVE na browfieldu [19]	42
Obrázek 17 Frekvenční kolaps [26]	45
Obrázek 18 MVE Měřejovice [27]	46
Obrázek 19 řídicí systém MVE [26]	49
Obrázek 20 Kogenerační jednotka [21]	50
Obrázek 21 Náhradní π -článek dlouhého vedení [23]	54
Obrázek 22 Průběh frekvence při modelové situaci.....	57
Obrázek 23 Výkon synchronního generátoru.....	58
Obrázek 24 Průběh frekvence při přinutí zátěže 550 kW	58
Obrázek 25 Model soustavy	60
Obrázek 27 Rozběh asynchronního motoru - otáčky	67
Obrázek 26 Proudové zatížení teplotenského asynchronního motoru 0,3kW	67

Úvod

Dnešní společnost je závislá na elektrické energii. Používáme ji téměř nepřetržitě, ať už vědomě, či ne. Svět si asi už těžko budeme představovat bez osvětlení a elektrických strojů, které za nás dělají nejrůznější činnosti. A tento fenomén, usnadnit si život za pomoci nejrůznějších přístrojů, využívajících ke svému provozu elektřinu, se neustále vyvíjí. Dnes už není nic zvláštního na tom, si čistit zuby elektrickým kartáčkem, jet do práce v elektromobilu, mít na ruce chytré hodinky nebo používat místo zápisníku notebook a tablet. S nárůstem využívání těchto spotřebičů také narůstá spotřeba elektrické energie.

Státy se snaží zajistit pro své obyvatele dostatek energie ve vyhovující kvalitě, tak aby poptávka byla vyrovnána nabídkou. Avšak může se stát, že se objeví chyba. Může se třeba jednat o nedostatek vyrobené energie, nebo poruchu na vedení. V případě, že dojde k rozpadu elektrizační soustavy mluvíme o takzvaném blackoutu. Samotný blackout je velmi nebezpečný jev, který posléze může ohrozit chod celé společnosti. Někteří odborníci mluví o blackoutu jako o hrozbě 21. století. Tváří v tvář této hrozbě státy připravují scénáře a postupy, kterými se připravují na tento možný krizový stav.

Tato práce se zabývá popisem blackoutu, jeho vznikem a jeho případným řešením. Cílem této práce je najít řešení tohoto krizového stavu pomocí decentralizovaných zdrojů energie.

1 Strategie obnovy elektrizační soustavy

Cílem této kapitoly je popsat samotný blackout. Detailně rozepsat jeho typický průběh, zkušenosti, které s ním ve světě a v České republice máme a popsat jak opatření preventivní, tak postupy, které máme připraveny, pokud blackout nastane.

1.1 Blackout

Blackoutem v tomto pojetí nazýváme rozpad elektrizační sítě. Jedná o neschopnost elektrizační sítě přenášet elektrický výkon od zdrojů energie ke spotřebitelům. Zpravidla blackout nevzniká okamžitě, ale jedná se o postupný kaskádovitý efekt, který začíná počáteční poruchou, která vyvolá další poruchy, které přetěžují síť.

Evropská legislativa 2017/1485 popisuje blackout, jako stav, který nastává, pokud nastane alespoň jedna z následujících podmínek:

- a) v regulační oblasti daného provozovatele přenosové soustavy došlo ke ztrátě více než 50 % odběrů;
- b) v regulační oblasti daného provozovatele přenosové soustavy zcela chybí napětí po dobu nejméně tří minut, což vede ke spouštění plánů obnovy. [1]

Dnes jsou prvky v ES navrhovány s pravidlem N-1. To znamená, že provoz ES nesmí ohrozit výpadek jakékoliv části v systému. Můžeme říci, že jde o zálohování každého prvku v systému a v případě poruchy existuje plnohodnotná náhrada, která je připravena zaskočit za prvek, který je v poruše. V místech, kde je potřeba vyšší spolehlivosti provozu se počítá i s pravidlem N-2 a N-3. Jedná se třeba o vyvedení výkonu z jaderných elektráren. S ohledem na tato pravidla je pravděpodobnost poruchy nízká, avšak na základě zkušeností se poruchy stávají a musíme s nimi počítat i v případech, kdy se nám zdá systém dokonale zabezpečený. Jak bylo zmíněno výše, může mít blackout více příčin vzniku. Na tento fakt bychom si měli dát pozor a brát v potaz jakékoliv ohrožení.

Vegetační faktor

Mezi nejčastější příčiny poruch v ES patří ty, způsobené přírodou. Jedná se především o zkraty, které jsou způsobeny vysokou vegetací, která může zapříčinit svým pádem či růstem spojení drátů se zemí. Další častou příčinou jsou extrémní větrné kalamity, které dokáží, jak povalit konstrukce samotné, tak povalit vegetaci, která následně způsobí zkrat konstrukce.

Příkladem může být pád linky V441, ke kterému došlo 20.5.2016, kdy po výpadku vedení bylo po pochůzce zjištěno, že u vedení V441 popadaly 4 nosné konstrukce typu delta. Příčinou havárie byla extrémní povětrnostní kalamita.



Obrázek 1 Pád linky V441 [2]

Technické poruchy

Jako technické poruchy rozumíme takové poruchy, které jsou způsobeny činností pracovních prvků soustavy. Výskyt těchto poruch se zvyšuje se zvyšujícím se stářím jednotlivých prvků soustavy. Poruchovost také závisí na jejich celkovém opotřebení a na tom, jak jsou jednotlivé prvky zatěžovány. Z tohoto důvodu mají provozovatelé přenosové a distribuční soustavy povinnost mít přehled o stáří spravovaných soustav. ČEPS jako správce přenosových sítí, neustále obnovuje jednotlivá vedení, která se blíží ke hranici své životnosti. Dle předpokladu

bude mít nová linka životnost 40 let. V roce 2019 se podíl elektrických vedení starších 40 let pohyboval kolem 50 %. Stejná životnost se uvažuje i u některých transformátorů, například u PST transformátorů v elektrické stanici Hradec u Kadaně.

Pokud se bavíme o riziku poruchy, tak by bylo vhodné si říci, o jak velkém riziku mluvíme. Hodnocení rizika se provádí například u jaderných bloků. U stávajících jaderných bloků je projektována nehoda, která je zaviněna vícenásobným selháním, na riziko 1:10 000. U nově navržených jaderných bloků je četnost nehody ještě 10x menší. [1]

Dne 10.12.2009 došlo k požáru na transformátoru na rozvodně ve Vyškově. Za nejpravděpodobnější příčinu havárie byla označena porucha regulace a přeskok výboje na kostru nádoby.



Obrázek 2 Požár transformátoru v TR Vyškov [2]

Lidský faktor

Lidským faktorem rozumíme činnosti člověka, který jakýmkoliv způsobem interaguje se sledovaným systémem. Musíme i tento faktor brát v potaz, protože člověk není uzpůsobený stejně jako stroj a jeho chybovost je mnohonásobně vyšší, a tím snižuje spolehlivost samotného systému, do kterého zasahuje. Může se jednat o operátora, který udělá špatné rozhodnutí, o technika, který nedostatečně opraví spojení, nebo se může jednat i o civilní osoby, které svým jednáním mohou narušit funkčnost ES.

Havárie z 28.7.2018 byla zapříčiněna lidskou chybou, a to nárazem traktoru do ocelové stožárové konstrukce vedení V430

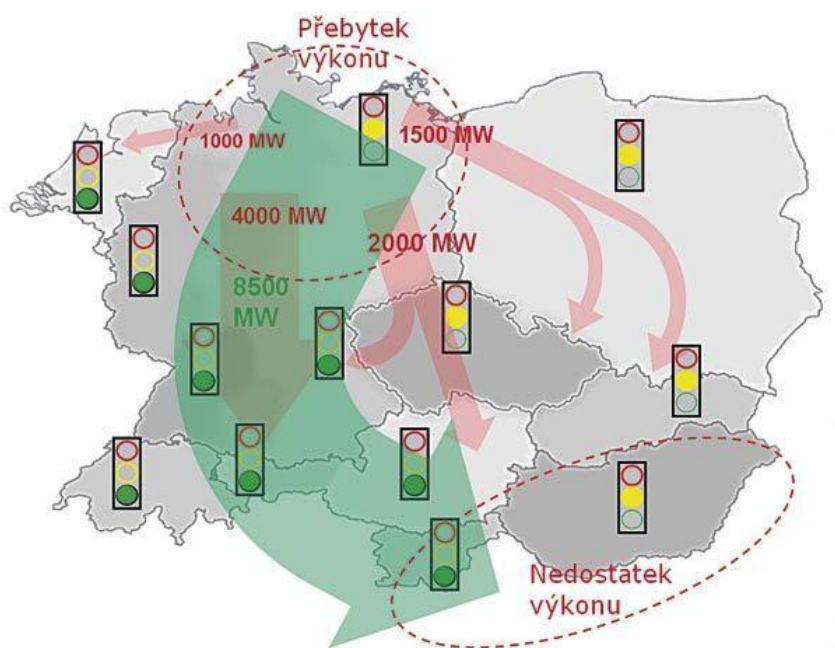


Obrázek 3 Náraz traktoru do stožárové konstrukce V430 [2]

Mezistátní spolupráce

Další riziko vyplývá z mezinárodní spolupráce. Je důležité si uvědomit, že ačkoliv je Česká republika suverénní stát s jasnými hranicemi, tak by bylo problematické si představit, že by tyto hranice elektřina mohla respektovat. Proto události a stavy v sousedních přenosových soustavách mohou a také ovlivňují i naši soustavu.

Česká republika je v tomto ohledu tranzitní zemí. Na základě naší geografické polohy ve středu evropského kontinentu jsme na všech hranicích propojeni se sousedními přenosovými soustavami. Tato propojenost se může jevit jako výhoda, v případě poruchy soustavy, kdy jsou okolní sousedé schopni efektivně pomoci v nouzových situacích. Z důvodů propojenosti však také pramení riziko, kdy se krizový stav od sousedního státu rozšíří i do naší soustavy. Nejtypičtějším jevem, který přetěžuje naši ES, jsou velké přetoky energií přes naši přenosovou soustavu. Jeho příčinou jsou velké větrné parky na severu Německa, které dodávají vyrobenou energii průmyslovějším jižním částem země či jiným zemím, jako je třeba Rakousko. Posléze z důvodu malých přenosových kapacit, které propojují severní část a jižní část Německa, tak část elektřiny protéká skrze naši přenosovou soustavu a tím ji přetěžuje. Obvykle se jedná o výkony okolo 1000 MW. Před těmito neplánovanými přetoky přes tuzemskou přenosovou soustavu byly v rozvodně Hradec pořízeny transformátory s regulací fáze (PST), které svojí činností umožňují regulovat protékající činný výkon.



Obrázek 4 Přeshraniční toky přes naše území [3]

Ozbrojený útok

Dle zákona č. 240/2000 Sb. Zákon o krizovém řízení a o změně některých zákonů patří energetika mezi kritickou infrastrukturu (KI). Podle tohoto zákona jsou za ochranu KI odpovědní hlavně jejich provozovatelé. Jde jak o státní subjekty, tak i o soukromé provozovatele. Každý provozovatel za účelem ochrany vypracovává plán krizové připravenosti subjektu KI. Dále existuje metodika „Metodika zajištění ochrany kritické infrastruktury v

oblasti výroby, přenosu a distribuce elektrické energie“, která má za cíl pomoci provozovatelům KI k zabezpečení řízení ochran KI.

Jak bylo zmíněno výše, tak evropské státy ochranu energetického sektoru berou velmi vážně. Útok na energetický sektor by ohrozil provoz a funkčnost státu a z toho důvodu se vnímá útok na tento sektor jako „krizový stav“ nebo „válečný stav“. U energetiky se nesmíme spoléhat jen na ochranu proti fyzickému vniknutí, třeba teroristickou či ozbrojenou jednotkou, ale v našem moderním světě začíná narůstat i nebezpečí kybernetického útoku. Proto zajištění funkčnosti a zabezpečení řídicích systémů je stejně důležité, jako ochrana před fyzickým vniknutím do energetických zařízení.

1.2 Historická zkušenost s blackout

Přenosová soustava je provozována s ohledem na kritérium N-1, které hrozbu havárie, která by měla za následek blackout, značně eliminuje. Z praxe ale víme, že havárie se i přesto stávají a nelze se spoléhat, že nás zabezpečení 100 % ochrání. V následující části se detailně seznámíme s blackouts, jejich příčinami, vznikem a následky.

1.2.1 Zahraničí zkušenosti

Blackout 14.3.2003 USA a Kanada

K výpadku došlo v severovýchodní části USA na hranici s Kanadou. Porucha vznikla u města Ohio 14.3.2003 kolem 14:00, kdy došlo ke kontaktu venkovního vedení 345 KV s vegetací. Během hodiny převládaly toky z jihozápadu na severovýchod směrem k městům Michigan a New York. Příčina vzniku poruchy byla vyhodnocena jako zanedbání vysekávání přerostlých stromů v ochranném pásmu kolem venkovního vedení.

Půl hodinu před poruchou způsobenou stromem ve stejné oblasti došlo k výpadku bloku u jezera Erie s výkonem 597 MW. Důvodem byla chybně nastavená regulace jalového výkonu bloku, který byl nastaven na nulu. V tu chvíli bylo v oblasti odstaveno více bloků, které by případně mohly jalový výkon do soustavy dodávat. Při narůstající absenci jalového výkonu v síti, který se využívá ke krytí ztrát jalového výkonu při vyšších zatíženích, anebo pro zajištění spotřeby asynchronních strojů, se celá soustava dostala do výstražného stavu, kdy nebyl zajištěn princip N-1.

Samotná porucha vyvolaná vysokou vegetací neměla přímý vliv na vznik blackoutu, ale tato porucha na vedení nebyla zaznamenána v monitorovacích systémech dispečera, které v tu

chvíli začaly podávat dispečinku chybné informace. V té době dispečink pracoval ještě s nedovyvinutými dispečerskými aplikacemi (estimátor, kontingenční analýza), které spolu s chybnými daty o soustavě podávaly dispečerům chybné údaje, jak v dané chvíli soustavu řídit. Dalším faktorem, který podpořil tuto špatnou situaci, bylo nefunkční výstražné zařízení, takže možnosti odhalit poruchy v soustavě byly pro dispečery značně omezeny. V následujících hodinách byl výkon přeměrován na zbylé linky, které později kvůli jejich přetížení musely být rovněž odpojeny. To vedlo ke kaskádovitému odpojování, jak zdrojů, tak linek, které vyústilo v odpoledních hodinách v blackout.

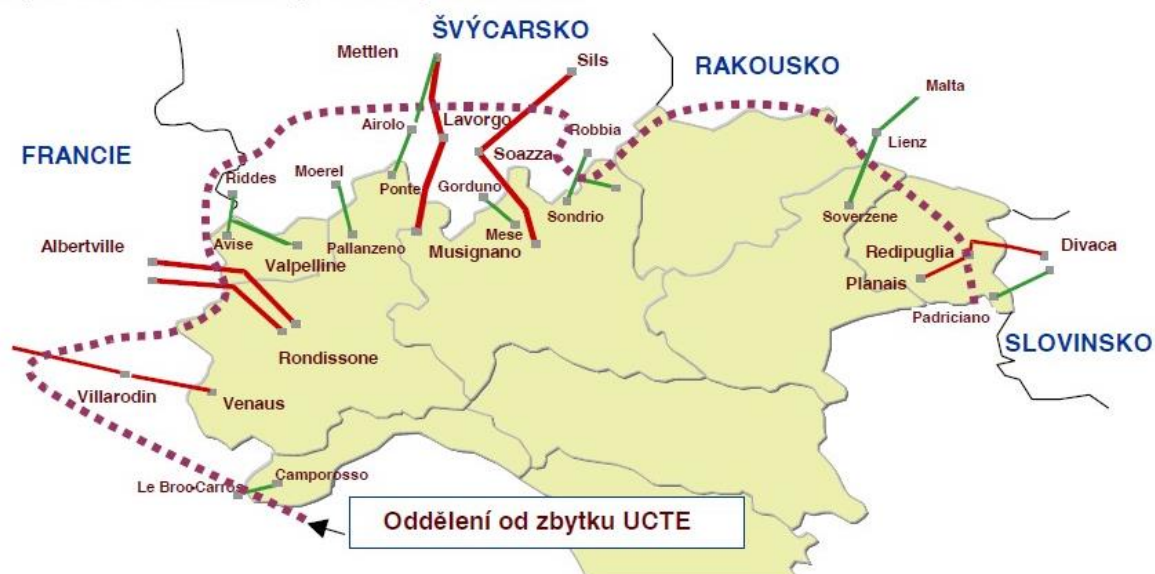
Hlavními příčinami byly špatná komunikace mezi dispečery sousedních přenosových soustav, údržba porostu v blízkosti linek, chybná analýza a následná diagnostika informací o soustavě. Chyběly vypracované plány, které by mohly dispečerům pomoci k redispečinku zdrojů ale také strategie pro vypínání zátěží pro odlehčování sítě.

Během blackoutu bylo odstaveno 20 elektráren a asi 50 milionů Američanů bylo bez proudu. Vlivu blackoutu se také přičítá několik úmrtí a odhadované škody se vyšplhaly do řádů miliard dolarů. Obnova soustavy trvala podle místa od několika hodin až 8 dní.

Blackout 2003 Itálie

Blackout v Itálii, který proběhl 28.9.2003, měl podobný průběh a příčiny jako blackout, který se stal na severu Spojených států. Tu noc probíhaly po Itálii festivaly, jejichž důsledkem byl vysoký odběr po celé Itálii i přes noc. Itálie tu noc dovážela 6651 MW z celkového zatížení 24 GW.

Jak je vidět na obrázku č. 5, tak je Itálie propojena se svými sousedy linkami 220 kV (zelená barva) a linkami 400 KV (červená barva). Během noci byla linka na území Švýcarska mezi Lavorgo a Mettlen přetěžována a vlivem vysokých toků proudu došlo k vyššímu průhybu lan, což mělo za následek dotyk linky s vegetací. V důsledku přeskoků a zkratů byla linka odpojena. Pro velký fázový rozdíl (42°), který byl zapříčiněn velkými toky a oslabenou sítí se linku tu noc nepodařilo dostat do bezpečného provozu. Další havárie proběhla také ve Švýcarsku na lince mezi Sils a Soazza, kde kvůli vysokému přetížení linky (110 %) se zvýšil průhyb lan, který měl za následek dotek vedení s vegetací. Tyto výpadky zapříčinily kaskádovité výpadky linek mezi Švýcarskem a Itálií (Riddes – Avise a Riddes – Vallpelline), Rakouskem a Itálií (Lienz – Soverzene), Francií a Itálií (Albertville-Rondisone) a mezi Slovinskem a Itálií (Divaca- Redipuglia). V tu samou chvíli začaly vypadávat linky na severu Itálie a celá Itálie se dostala do ostrovního provozu.



Obrázek 5 Schéma propojení Itálie se svými sousedy [4]

Obnova sítě trvala ve většině případů okolo 8-16 hodin. V některých částech Itálie se jednalo o celé 3 dny. Jako příčiny blackoutu bylo určeno neúspěšné obnovení linek ve Švýcarsku, nerozpoznání kritičnosti situace, nezareagování případným odlehčením sítě a nedostatečná údržba vegetace podél koridorů linek. Při přechodu do ostrovního provozu nastala napěťová nestabilita a ztráty úhlové stability, které způsobily další výpadky napěťových zdrojů v síti.



Obrázek 5 Blackout Itálie 2003 [5]

1.2.2 Tuzemské zkušenosti

V České republice naštěstí zatím blackout nikdy nenastal. V případě blackoutu by byly náklady pro ČR velmi vysoké. Následky a ztráty pro tuzemskou ekonomiku se těžko predikují. Odhaduje se, že by ztráty způsobené blackoutem a jeho důsledky by znamenaly škody v řádů stovek miliard. Jedno z možných přiblížení ekonomických dopadů ukazuje webová aplikace <http://www.blackout-simulator.com/>

Jak už bylo řečeno v ČR se žádný blackout nestal, ale už nastaly situace, kdy se ES potýkala s problémy, které k takové kritické situaci mohly vést.

Ostrovní provoz 2006

25. června byla prováděna revize a oprava mnoha vedení v přenosové soustavě. Extrémní tropické podmínky po celé Evropě se podílely na výpadcích vedení, což zapříčinilo u ostatních přenosových sítí atypické tranzitní toky přes naši přenosovou soustavu. V těchto podmínkách se začaly zbylé linky vypínat z důvodu přetěžování, zkratů zapříčiněných pádem lana, či reakcí dalších ochran.

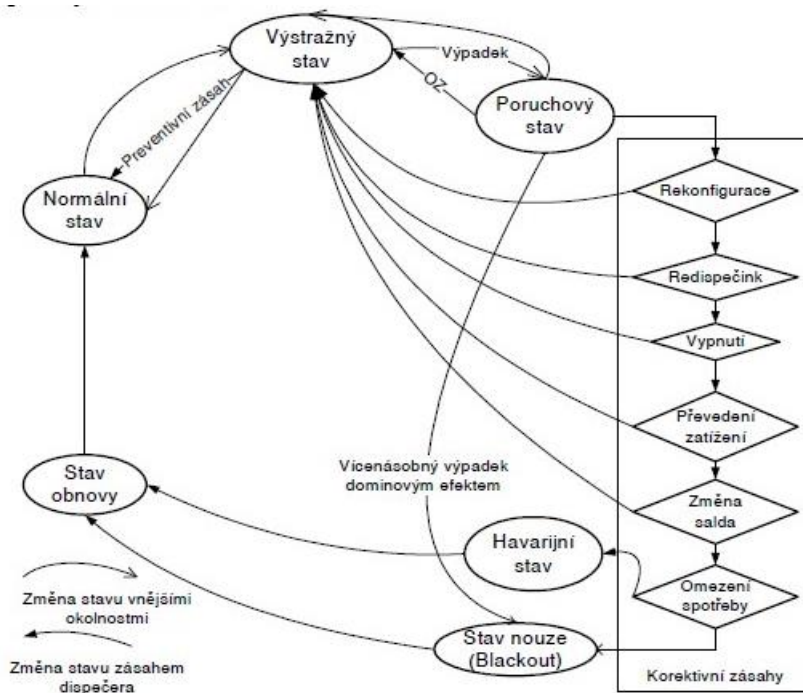
Z důvodů vypnutí takřka 10 linek přešla PS do ostrovního provozu. Tento stav pokračoval až do odpoledních hodin, kdy byl vyhlášen stav nouze a byl aktivován regulační plán, který kontrolovaným snižováním spotřeby snížil výkon odběratelů o stovky megawatt.

1.3 Plán obrany proti šíření poruch v přenosové soustavě

Dispečer řídí přenosovou síť s ohledem na pravidlo N-1, tedy snaží se udržet přenosovou síť v normálním chodu i po výpadku jednoho prvku (vedení, transformátoru, ochrany atp.), zároveň může dojít ke krátkodobému místnímu omezení spotřeby. Při dodržení tohoto stavu mluvíme o takzvaném normálním stavu. V opačném případě se soustava nachází ve výstražném stavu, kdy dispečer přijímá nápravná opatření, které mají uvést soustavu zpět do normálního stavu.

Aby se soustava nedostala do výstražného stavu, tak se dispečer řídí Plánem obrany proti šíření poruch v přenosové soustavě, který je definován v Kodexu přenosové soustavy. Úkolem Plánu obrany je navrhnout taková opatření, která by zamezila rozšíření poruchy (zejména kaskádovitému šíření poruchy) a dále pak vedla ke zkrácení doby výpadku. [4]

V případech, kdy dojde k výpadku prvku sítě, které je spojeno s hrozbou přetížení jiných prvků sítě, se síť dostává do poruchového stavu (viz obr.8). Posléze dispečer provádí korekci, kterou se snaží dostat síť zpátky do normálního stavu. K nápravě pro to využívá redispečink, protiobchod, rekonfiguraci sítě, které budou podrobněji vysvětleny dále.



Obrázek 6 Schéma přechodu mezi jednotlivými stavy včetně možných korektivních zásahu [4]

Obranný plán obsahuje:

- řízení propustnosti sítě, opatření proti přetížení
- opatření proti kaskádovitému šíření poruchy,
- opatření proti poklesu a vzrůstu frekvence,
- opatření proti poklesu a vzrůstu napětí,
- opatření proti kývání,
- opatření proti ztrátě synchronismu.

Řízení propustnosti sítě, opatření proti přetížení

Jak už bylo řečeno, tak přenosová síť se provozuje s kritériem N-1. Z pohledu rozvoje sítě se přenosová kapacita sítě zvyšuje posilováním „úzkých“ míst navyšováním výkonové či tepelné zatíženosti. To se pak provádí zdvojením vedení nebo zvýšením napěťové hladiny.

V případech, kdy hrozí poruchový stav (přetížení vedení, porucha na prvcích v soustavě) dispečer může požádat, aby došlo ke změně výkonu u výrobních bloků, jak u tuzemských elektráren (interní redispečink), tak i u zahraničních elektráren (přeshraniční redispečink). U obou redispečinků je důležité si dát pozor na celkové saldo v regulačních oblastech. V posledním případě může dispečer dát pokyn dispečerům distribučních soustav k snížení odběru.

Opatření proti kaskádovitému šíření poruchy

Tyto ochrany a opatření chrání jednak hlídáný prvek v ES, ale také díky své funkci ochraňují síť před možným rizikem šíření poruchy dále do sítě. V případě detekce poruchy jsou ochrany schopny velmi rychle reagovat a vrátit prvek ES zpět do normálního stavu, nebo prvek od sítě odpojit, aby nedošlo k jeho poškození, anebo nedošlo k šíření poruchy, která by mohla zapříčinit poruchu na sousedním prvku, a tím způsobit šíření kaskádovité šíření poruchy. Jednotlivá opatření proti šíření kaskádovitých poruch dělíme na ty, které jsou na straně generátorů a na ty, které jsou na straně sítě.

Mezi ochrany u generátorů patří hlídače podbuzení, jsou zde omezovače proudů, stabilizátor buzení generátoru, správná funkce proporcionální regulace otáček turbíny nebo regulátor ostrovního režimu.

Na straně vedení jde o správnou činnost ochran a blokování hladinových regulátorů transformátoru od podnapětí. Důležitým faktorem je rychlost reakce ochran, ale také selektivita ochran, tedy schopnost ochrany rozlišit mezi postiženými částmi sítě a zdravými částmi sítě a posléze se rozhodnout, které části vypnout. Na straně vedení působí také distanční ochrany, které vypínají vedení a transformátory při ztrátě synchronismu. Dále zde jsou opatření, které zodpovídají za opětovné zapínání při jednofázových zkratech.

Opatření proti poklesu a vzrůstu frekvence

V běžném provozu ES (charakterizovaném odchylkami frekvence v pásmu ± 200 mHz) je frekvence udržována pomocí primární regulace frekvence a sekundární regulace f a P . Při vybočení frekvence z těchto mezí určuje opatření frekvenční plán. [6]

V situacích, kdy frekvence vybočí $50 \pm 0,20$ Hz výrobní bloky se odpojují od centrálního centrálního regulátoru a přepínají se do otáčkově proporcionální regulace. Dispečer PS má možnost požádat o dálkové řízení bloků v ostrovním režimu. V tu chvíli centrální regulátor

posílá řídicí signál s korekcí otáček na terminály výrobních bloků. Při poklesu frekvence pod 48,8 Hz přečerpávací elektrárny najíždí do turbínového režimu a jejich provozovatel se dále řídí pokyny dispečera ČEPS.

V posledním případě, kdy dojde k odpojení výrobního bloku od ES, tak výrobní blok sníží svůj výkon na takovou úroveň, aby byl schopný pokrýt vlastní spotřebu a dále čeká na instrukce od dispečera ČEPS, který mu podá další pokyny.

Jak je vidět z tabulky č.1 fotovoltaické a větrné elektrárny zůstávají připojeny v ES v pásmu 47,5-51,5 Hz a pomáhají vyrovnávat bilanci výkonů. V rozsahu 49,5 – 50,2 Hz výrobní bloky VTE a FVE dále vyrábějí beze změn. Při frekvenci vyšší než 50,2 Hz probíhá postupné snižování výroby bloku po takzvaných krocích až na 40 % z nominální hodnoty na 1 Hz. Elektrárenské bloky se odpojují v situaci, kdy je frekvence vyšší než 51,5 Hz. V opačném případě, kdy v síti klesá frekvence, výrobní blok zůstává připojen v síti a jeho výkon je zvýšen na maximum. Blok je dále připojen v síti, pokud hodnota frekvence nepoklesne pod 47,5 Hz, tehdy dojde k okamžitému odpojení bloku od sítě.

Typ elektrárny	Uhelné	Jaderné		Větrné	PVE		Paro- plynové	OZE a nové VM
		EDU	ETE		Turbína	Čerpání		
Normální bez omezení	48.5–50.5	48.5–50.5		48,5 – 50,5	48,5 – 50,5	49,5 – 50,5	48,5 – 51,5	49-51
S časovým omezením	46–48.5	50,5 – 53	47.9-48.5	46-48.5	46-48.5	49-49.5	48-48.5	47.5–49
	50.5-53	50.5-52.5	50.5-51.5	50.5-53	50.5-53	50.5-52(53)	51.5-52	51.-51.5
Nepřípustný	f > 53	f > 52.5	f > 51.5	f > 53	f > 53	f > 52 (53)	f > 52	f > 51.5
	f < 46	f < 47.5	f < 47.9	f < 46	f < 46	f < 49	f < 48	f < 47,5
Automatické odpojení od ES	f > 53	f > 52,5	f > 51,5	f > 50.2(51.5)	f > 50.2(51.5)	f > 52 (53)	f > 52	f > 51.5
	f < 47,5	f < 47.9	f < 47.9	f < 47.5	f < 47.5	f < 49.8–49.2	f < 48	f < 47.5

Tabulka 1 Vymezení frekvence v Hz pro pásma provozu [6]

Pro další možné opatření, které má dispečer možnost použít je systémové frekvenční odlehčení sítě. V ČR je implementováno šest stupňů systémového frekvenčního odlehčení zátěže, které je realizované pomocí frekvenčního relé v rozvodnách VN. V případě, že by dispečer využil všech šesti stupňů, tak odpojí 50 % zatížení ES v ČR.

Stupeň / frekvence [Hz]	1./49	2./48.7	3./48.4	4./48.1	5./48.1	6./48
Objem odlehčované zátěže [%] z netto zatížení na území, na kterém příslušný PDS zajišťuje distribuci	10	10	10	2	10	8

Tabulka 2 Systémové frekvenční odlehčování [6]

V dnešní době už nemůže dispečer toto frekvenční odlehčování používat s vědomím, že mu 100 % pomůže. Nežřídko už v některých bodech ES tečou výkony opačnými směry způsobeny lokálními výrobci elektrické energie. Můžeme si představit situaci, kdy dispečer potřebuje frekvenčně odlehčit síť a pošle pokyn k vypnutí. Frekvenční relé vypne blok domácností, které zrovna mají na střechách instalované fotovoltaické elektrárny, díky kterým za předpokladu dobrého počasí mohou dodávat energii do sítě. Dispečer si jednak odpojením tohoto bloku „zátěže“ nepomůže, ale také přijde o výrobní kapacity, které mu pomáhají vyrovnávat nedostatek výkonu v síti. Jedním z řešení je rozmístit takové relé, které dokážou zaznamenávat směr toku činného výkonu a tím podávat dispečerovi reálnější stav ES.

Opatření proti poklesu a vzrůstu napětí

Hlavním prostředkem, kterým reguluje ČEPS změny napětí v síti jsou podpůrné služby v rámci systémových služeb. Další opatření jsou implementována u elektráren, u prvků v přenosové soustavě a v poslední řadě se jedná o postupy při dispečerském řízení.

Elektrárny

Elektrárenské bloky s výkonem vyšším 100 MW jsou vybaveny automatickými regulátory buzení, jejichž úkolem je udržovat zadanou hodnotu napětí na svorkách generátoru, udržovat stabilitu generátoru pomocí rychlé změny buzení, tlumit kyvy generátoru a udržovat pracovní bod generátoru v žádané oblasti P-Q diagramu. Pro optimální a bezpečný chod sítě je důležité mít v síti vhodně rozmístěné točivé rezervy jalového výkonu, které se mohou využívat nejen pro běžný provoz sítě, ale také pro stresové situace zapříčiněné náhlým zvýšením zatížení, výpadkem výrobního bloku nebo změnou topologie sítě.

Transformátory a kompenzační prostředky

Všechny síťové transformátory 400/220 kV, 400/110 kV, 220/110 kV jsou vybaveny přepínači odboček pod zatížením. Transformátory 400/110 kV a 220/110 kV jsou postupně vybavovány hladinovými regulátory (HRT). Tyto regulátory udržují konstantní napětí na sekundární straně s danou necitlivostí a časovou konstantou. Princip časového zpoždění spočívá v rychlejší regulaci transformátorů na vyšších napěťových hladinách, čímž se předchází hromadným regulacím transformátorů na nižší napěťové hladině. U paralelně pracujících transformátorů jsou zadané hodnoty napětí hladinových regulátorů korigovány tak, aby transformátory byly zatěžovány rovnoměrně jalovým výkonem a proporcionálně k jejich jmenovitému výkonu S_n . [4]

Soustava je také vybavena kompenzačními tlumivkami, které jsou umístěny, jak na hladině 400 kV, tak i na terciálních stranách transformátorů.

Mimořádné prostředky

Mimořádnými prostředky rozumíme takové postupy, které dispečerské řízení přijímá, když na hladině 400 kV napětí vybočí z dovoleného rozmezí 380–420 kV ($\pm 5\%$).

Při napětí převyšující hodnotu 420 kV se postupně vypínají jednotlivá přenosová vedení 400 kV s tím pravidlem, že každé místo v soustavě musí být napájeno minimálně ze dvou míst.

Při hodnotách nižších, než je 380 kV se snižuje činný výkon u výrobních bloků za účelem uvolněním jalového výkonu a s tím najetí rychle startující zálohy. Dispečer také může vydat pokyn k zastavení zkoušek a prací na vedení, a tím vedení uvést zpět do provozního stavu. V případech, kdy je v oblasti nedostatek výkonu a dispečer nenajde jinou možnost, jak do oblasti přenést potřebné kapacity, tak může vydat pokyn ke snížení objemu zátěže, na kterém je předem domluvený s dispečinkem distribuční soustavy.

Opatření proti kývání

Při poruchách v síti, kdy dochází k velkým změnám zatížení či dochází ke změnám konfigurace v síti dochází k cyklickým změnám v poloze rotorů generátorů, které jsou důsledkem kývání výkonu v síti. Podle reakce ochran a závažnosti poruchy se síť může zpět dostat do nového synchronního stavu, nebo se generátory mohou dostat až na okraj synchronního chodu a posléze ze synchronizmu vypadnout.

V případě, kdy vzniknou v ES kyvy je hlavní zásadou dál neoslabovat síť vypínáním dalších výrobních kapacit. V druhém případě, kdy kývání výkonu dostane soustavu na pokraj

synchronismu se rozdělí ES na stabilní ostrovy, aby se zamezilo dalším možným poruchám či blackoutu.

Opatření proti ztrátě synchronismu

Zájmem každého provozovatele ES je, aby jeho síť byla co nejstabilnější, proto v síti pro zachování statické stability používají distanční ochrany. V případě, kdy dojde k narušení statické stability například tranzitem vyšších výkonů, které přesahují možnosti přenosových prvků, tak vypínací funkce distančních ochrany zapůsobí a zabrání možným poruchám v síti.

V rozvodnách 400 kV jsou kontrolovány výpočtem maximální povolené doby trvání třípólového zkratu, aby nedošlo k narušení dynamické stability blízkých generátorů. Tato kontrola uvažuje i případy selhání vypínače. Generátory o výkonu větším než 200 MVA jsou podle normy ČSN 333051 vybavovány ochranou proti ztrátě stability. [4]

1.4 Plán obnovy po výpadku soustavy

Provozovatel přenosové soustavy ČEPS se řídí Kodexem přenosové soustavy. Tento kodex má za cíl informovat účastníky trhu o pravidlech, které kodex stanovuje. Jedná se o minimální technické, konstrukční a provozní požadavky, které účastníci musí respektovat, pokud se chtějí připojit k distribuční síti. Obsahem kodexu jsou také pravidla mezinárodní spolupráce v propojených soustavách (ENSO-E). Kodex se také chápe jako základní pravidla, která jsou nezbytná pro bezpečné a spolehlivé provozování přenosové sítě.

V rámci Kodexu existuje také „Plán obnovy po výpadku soustavy“ pro případ hrozby celostátního blackoutu. Hlavním cílem Plánu obnovy je zkrátit dobu trvání výpadku dodávek energie a zajistit bezpečné obnovení chodu elektrizační soustavy.

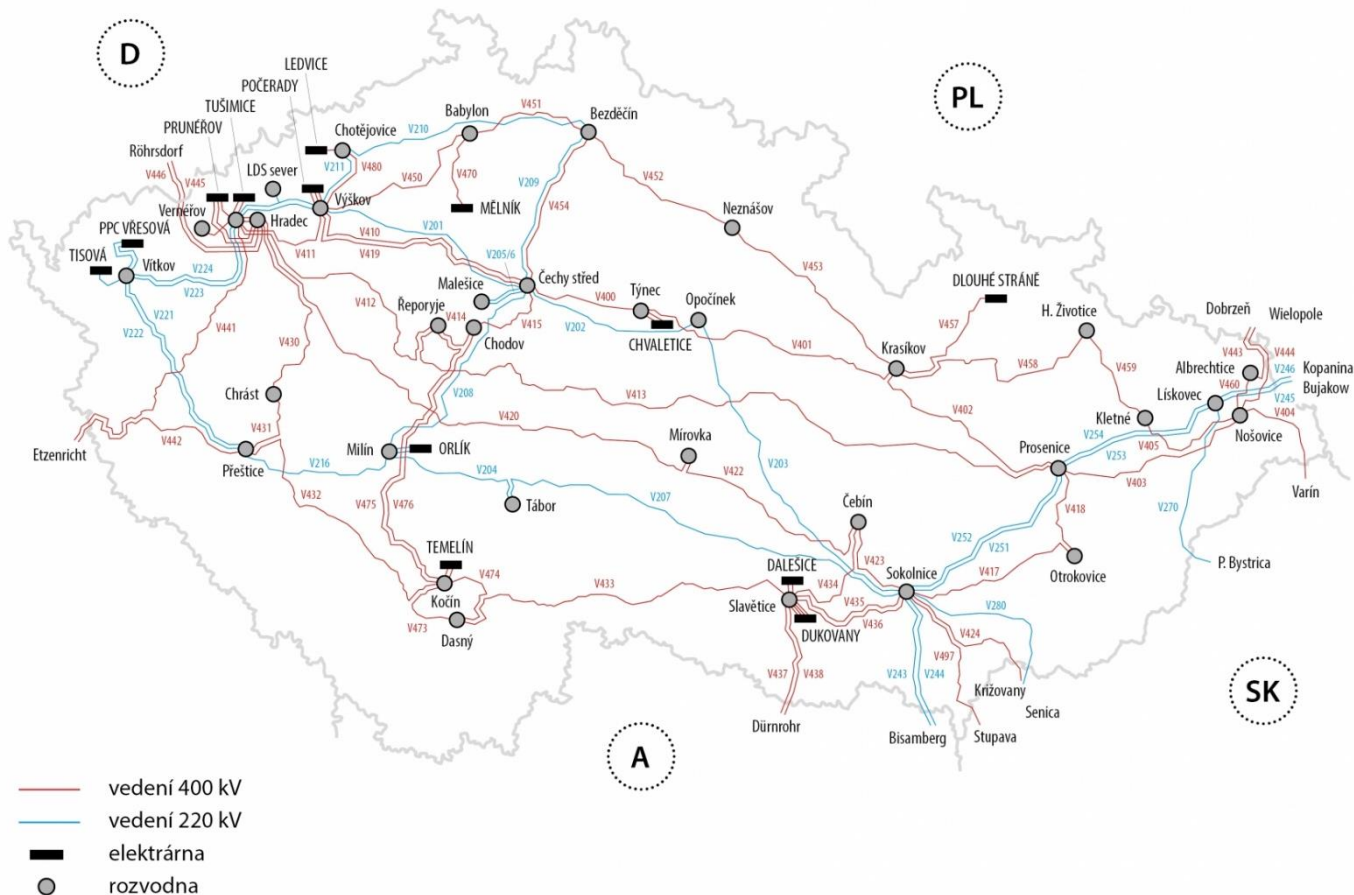
Samotný Plán obnovy má několik částí:

- Strategie obnovy
- Priority
- Principy obnovy
- Obnova napájení z elektráren schopných startu ze tmy
- Distribuční soustavy

1.4.1. Strategie obnovy

Jak je ze 7. obrázku patrné, tak přenosová soustava České republiky je díky své geografické poloze řazena mezi takzvané „vnitřní sítě“. Přenosová soustava je propojena s dalšími pěti přenosovými soustavami (Tennet, 50 Herz (obě Německo), APG (Rakousko), PSE-Operator (Polsko) a SEPS (Slovensko)). Tato propojení pomocí 10 vedení 400 kV a 6 vedení 220 kV umožňují obnovit napájení ze zahraničí. [4]

Strategie obnovy v první řadě využívá naší geografické polohy, tedy na tom, že v případě poruchy nám okolní přenosové soustavy mohou pomoci. Toto je možné jedině v případě, že sousední soustava není postižena stejnou poruchou či sdílená pomoc by neohrozila stabilitu její samé. Z toho důvodu při obnově ES má ČEPS vypracovány další postupy, které nepočítají s přeshraniční pomocí. Důležitým prvkem těchto postupů obnovy jsou vodní elektrárny. Některé vodní elektrárny jsou schopny „startu ze tmy“, kdy elektrárna bez vnějšího napětí je schopna dodávat energii do soustavy. Tyto elektrárny jsou ovládány na pokyn dispečera ČEPS.



Obrázek 7 Schéma přenosové soustavy České republiky [14]

Při řešení poruchových stavů se dispečer řídí pravidlem „open – all“. Jedná se o pravidlo, kdy se cíleně nebo ručně vypnou všechny vypínače v postižené oblasti. Důsledkem toho je dosažení výchozího stavu, ze kterého může operativní služba vycházet při řešení obnovy soustavy. Při obnově soustavy může dispečer postupovat bez rizika sepnutí části PS neznámé velikosti. Během obnovy ES se dispečer řídí dalšími provozními instrukcemi.

1.4.2. Priority

Plán obnovy dodávky elektrické energie má své priority, které jsou pevně stanoveny. Na prvním místě je potřeba zajistit vlastní spotřebu jaderných elektráren. Je to z toho důvodu, aby jaderné elektrárny zachovaly bezpečný provoz a nenastalo riziko havárie. Obyčejně se jedná o vodní elektrárny, které jsou připraveny při události blackout dodávat energii do rozveden, které zajišťují vlastní spotřebu jaderných elektráren. U jaderné elektrárny Temelín je to vodní elektrárna Orlík, která je vzdálena vzdušnou trasou asi 60 km. Kromě Orlíku by pomohly i přehrady na Lipno a Hněvkovice

Druhou prioritou je zajistit vlastní spotřebu systémových elektráren, které dodávají energie do přenosové soustavy. Je to z toho důvodu, že tyto elektrárny jsou základem pro obnovu napětí v celé soustavě.

Třetí prioritou je zásobování energií hlavního města Prahy a dalších měst. Poslední prioritou jsou ostatní spotřebitelé.

1.4.3. Principy obnovy

Jak už bylo napsáno, tak první možností při obnově napětí v soustavě je využití sousedních přenosových soustav. Výhodou tohoto postupu je možnost rychle získat stabilní napětí. Zajištění a dodání potřebného výkonu je v zodpovědnosti dispečera ČEPS, který si domluví se svým protějškem ze sousedního dispečerského centra potřebné manipulace (řádově se jedná o 200 MW s postupným náběhem). Postup, jak dispečer pracují při poruše typu blackout lze nalézt v provozní instrukci PI 620-5. Tato instrukce obsahuje postupy a priority při obnově napájení v příhraničních oblastech. Dispečer ČEPS následně zapíná jednotlivá přeshraniční vedení 400 kV a 220 kV a následně příslušné transformátory a kompenzační prvky. V tu samou chvíli provádí PDS postupné fázování a kruhování obnovených oblastí.

1.4.4. Obnova napájení z elektráren schopných startu ze tmy

V situacích, kdy ČEPS není schopen získat napětí od sousedních přenosových soustav postupuje dispečink v zapínání elektráren schopných „startu ze tmy“. Pro tyto situace má ČEPS vypracovány postupy a principy pro jednotlivé oblasti v soustavě. ČEPS se dále snaží vypracovat další postupy a provozní instrukce pro další oblasti v PS. Dispečink určuje pořadí obnovovacích míst a koordinaci postupného fázování a kruhování částí, které jsou už obnoveny.

1.4.5. Distribuční soustavy

Odpovědnost za obnovu distribuční sítě je nese PDS. Plán obnovy je v době poruchy vzájemně konzultován a koordinován dispečery ČEPS a DS. Distribuční síť se obnovuje přes transformátory 400/110 kV a 220/110kV.

2 Decentralizované zdroje energie

Dnešní energetická koncepce dnes stojí před velkou výzvou decentralizované výroby energie. Nejdříve by bylo dobré si říci, že definice decentrálních zdrojů energie se mnohdy liší. Můžeme pracovat se zjednodušenou definicí, která zní, že za decentrální zdroje se považují všechny ty, které jsou připojeny distribuční soustavě na všechny hladinách.

Vize o decentrální energetice má mnoho výhod a také mnoho potencionálních úskalí, které budeme muset do budoucna řešit. Modely soustav, metody výpočtů a nástroje, které dispečerům pomáhají předpovídat chování soustavy při určitých stavech se bude muset změnit a přizpůsobit se novým situacím, se kterými jsme do dnes ještě nemuseli zaobírat. Příkladem může být v době slunečních dní změna toku energií od zákazníku zpět do soustavy. Tyto a další důvody povedou k intenzivnější spolupráci mezi přenosovou soustavou a distribuční soustavou v oblasti sdílení technických dat o stavech v síti, spotřebě, výrobě, tocích jednotlivých uzlech soustavy.

Decentralizované zdroje energie jsou zdroje s nižšími výkony, než je u elektrárenských bloků, s výkony od 80 kW do 150MW. V závislosti na svých výkonech jsou připojovány do různých částí distribuční sítě ES. Zpravidla jde o síť vn a nn. V důsledku na instalovaném výkonu jednoho či skupiny těchto zdrojů je patrný jejich vliv na okolní ES.

Je nutné v tomto odvětví energetiky předpokládat větší rozmach, než jsme do dnes byli zvyklí. Leckteré firmy procházejí modernizací výrobních technologií a pokud jim to technologie podnikatelské činnosti umožní, tak ke své dosavadní činnosti připojují i výrobu elektrické energie a tepla (spalovny, chemické závody atp.). Mohou využívat zbytkové teplo nebo instalovat střešní fotovoltaické panely. Tyto vlastní zdroje umožňují firmám snížit náklady na energiích, či dokonce po získání licence za prodávané energie inkasovat nové finanční příjmy.

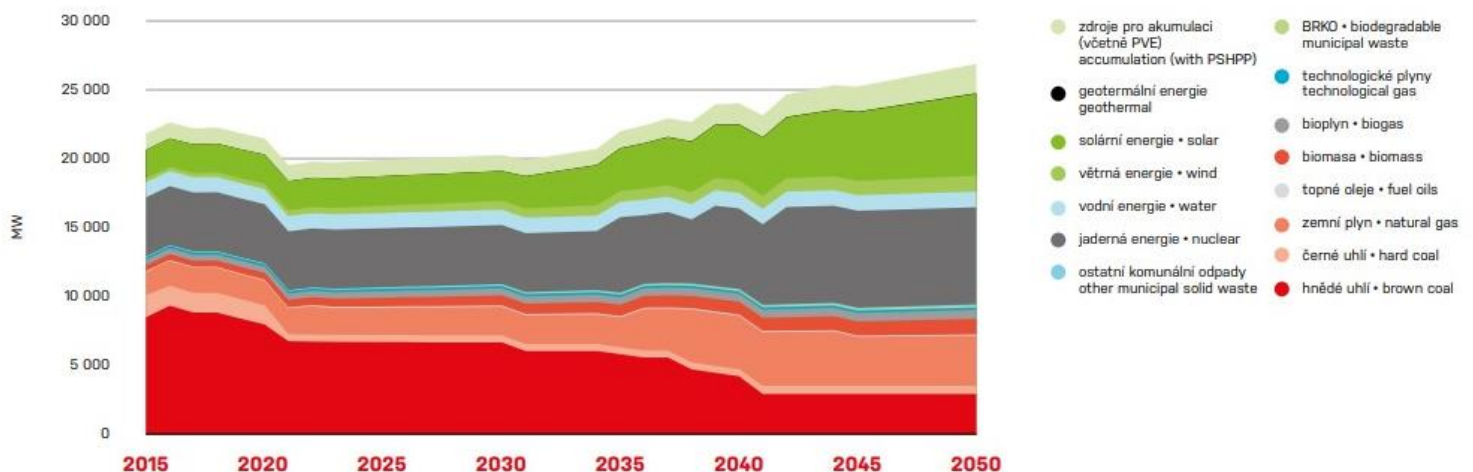
Druhým důvodem mohou být finanční podpory pro obnovitelné zdroje energie nebo licenční ústupky, ke kterým ERU přistoupilo. Tento důvod stojí za rozvojem mikrozdrojů na střechách rodinných domků, protože osoby, které provozují fotovoltaické zdroje s instalovaným výkonem do 10kWp mohou provozovat mikrozdroj bez licence na výrobu energie.

2.1. Predikce decentralizace výroby elektrické energie

V roce 2016 představil Operátor trhu (OTE) studii o předpokládaném vývoji elektroenergetiky a plynárenství. Studie stanovuje možná rizika a problémy české energetiky a jejím hlavním tématem jsou možnosti decentralizace české energetiky. Studie tím představuje možné scénáře, kterými může česká republika dále vyvíjet. Autoři studie si také pokládají otázky, jak se bude vyvíjet poptávka po elektřině v ČR a v EU, jestli budou celkové výrobní kapacity dostatečné, jaké budou technologické, ekonomické, bezpečnostní a environmentální důsledky různých variant.

Studie navrhla čtyři možné varianty o budoucím možném vývoji. Počítá, že tuzemská netto spotřeba stopne mezi roky 2015–2050 o 25 %, pokud by se měl do predikce zahrnout i rozvoj elektromobility, tak by se předpokládaná spotřeba zvýšila až na 34 %.

První variantou je **varianta nulová**, která nepočítá s další výstavbou nových výrobních bloků a bere na zřetel postupný útlum současných výrobních bloků. Varianta dále počítá s případným prodloužením výroby u hlavních výrobních bloků v ČR. Dnes (červen 2020) představitelé ČEZ potvrdili úvahy o případném prodloužení živostnosti elektrárny Dukovany až do roku 2047.

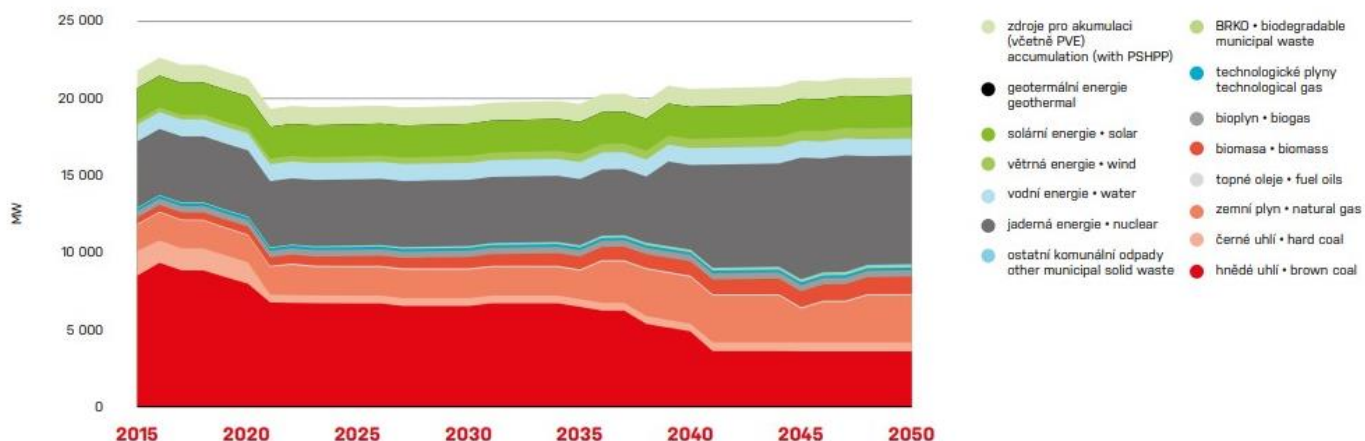


Obrázek 8 Varianta Koncepční – instalovaný výkon [15]

Druhou možností je **varianta koncepční**, která vychází ze Státní energetické koncepce. Počítá s dostavbou bloků u obou jaderných elektráren, plynových zdrojů energie i s rozvojem zdrojů obnovitelných. Instalovaný výkon u větrných elektráren by se do roku 2050 musel zvýšit čtyřnásobně a u fotovoltaik trojnásobně. Tato varianta také počítá s tím, že v roce 2050 budou

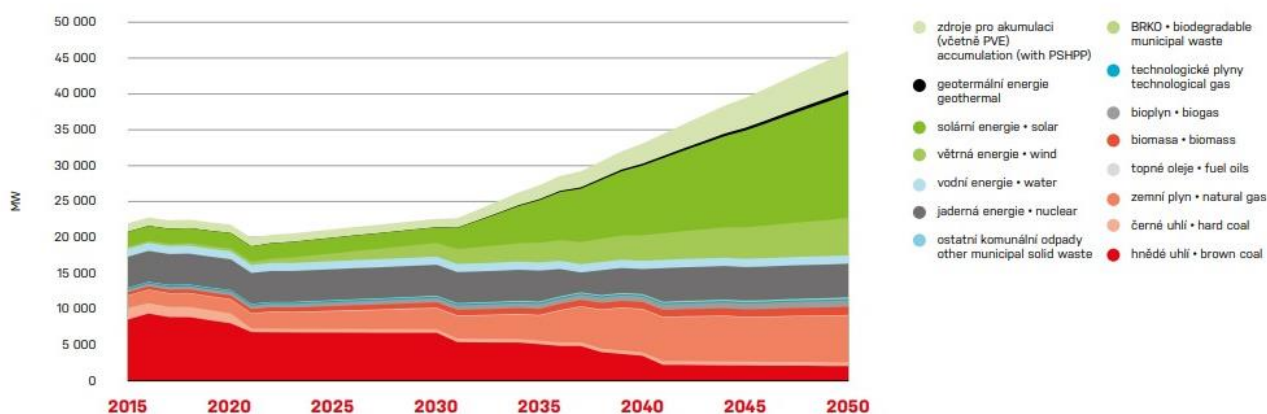
v síti instalované akumulátory energie o kapacitě 4320 MWh a to bez zahrnutí přečerpávacích elektráren.

Třetí variantou je **varianta centrální**. Tato varianta počítá s dosavadním provozem dnešních bloků, výstavbou nových jaderných bloků, prolomením limitů na těžbu uhlí a výstavbou nových uhelných bloků. Rozvoj obnovitelných zdrojů energie je mnohem střídmejší než u koncepční varianty. Podrobnější energetický mix je patrný z grafu č.9.



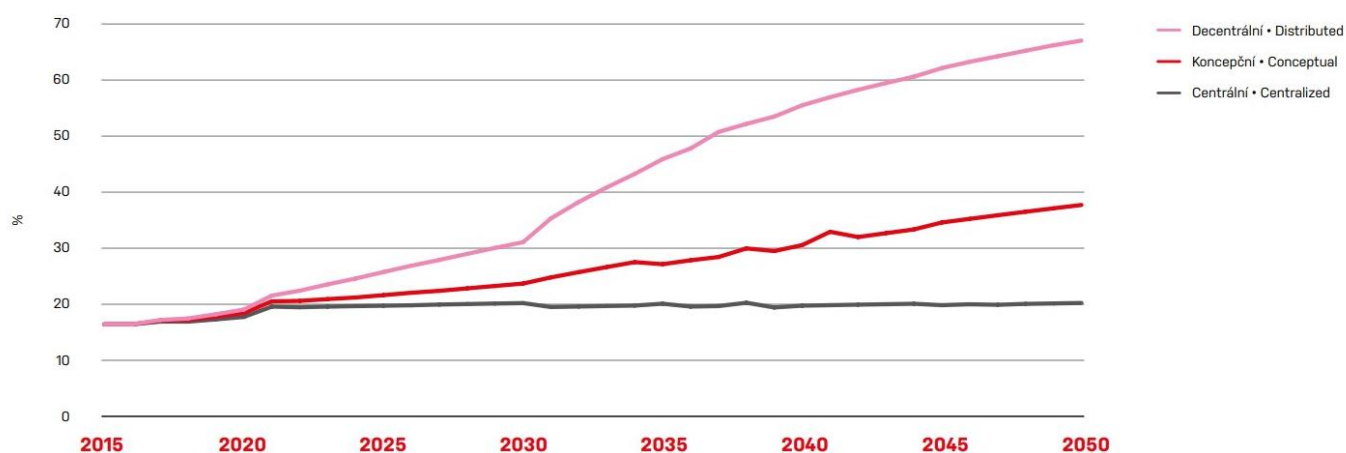
Obrázek 9 Varianta Centrální – instalovaný výkon [15]

Poslední variantou je **varianta decentrální**. Tato varianta popisuje možnost maximálního rozvinutí decentrální energetiky v českých podmínkách. Počítá s postupným útlumem uhelných elektráren. Kvůli potřebě regulačního výkonu, který by se ze soustavy z důvodu zavírání uhelných zdrojů ztrácel, by byly budovány mezi roky 2031-45 nové elektrárny na zemní plyn. S výrazným nárůstem instalovaného výkonu počítá tato varianta hlavně v oblasti fotovoltaických elektráren, a to bezmála o 625 % na hodnotu instalovaného výkonu 17 150 MW.



Obrázek 10 Varianta Decentrální – instalovaný výkon [15]

Je potřeba si říci jaké klady a jaké zápory by nám případná budoucí decentralizace výroby přinesla.



Obrázek 11 Podíl decentralních zdrojů na celkovém instalovaném výkonu [15]

Výhody

Mezi hlavní pozitiva určitě patří fakt, že do decentralní energetiky patří obnovitelné zdroje energie. Tedy takové zdroje, které se přirozeně obnovují. Pozitivem je také fakt, že decentralní zdroje energie jsou zpravidla malé zdroje, jejichž případný výpadek či závada negativně neovlivní zbytek ES, jako je to u velkých centrálních zdrojů. Další výhodou je to, že decentralní zdroje se nacházejí v blízkosti konečných spotřebitelů, jako jsou rodinné domy s FVE na střeše. Tím odpadá zátěž pro distribuční síť a následné ztráty během přepravy elektřiny. Neposlední předností těchto zdrojů jsou řádově nižší investice do výstavby a na provoz. Tato příležitost může oslovit mnoho nových investorů, kteří by si investici do větších zdrojů nemohli dovolit.

Nevýhody

Očividnou nevýhodou je, že decentralních zdroje jsou menšího a je potřeba velkého počtu, aby se mohly vyrovnat velkým centrálním zdrojům. Proto bude do budoucna potřeba oslovit případné nové investory, kteří by se finančně podíleli na výstavbě nových zdrojů.

Mezi další negativní následky rozvoje decentralní energetiky patří zvýšení poptávky po elektřině, či jiném zdroji vytápění bytových objektů. To je zapříčiněno předpokládaným

úbytkem výtopen a částečnému odklonu od CZT. Tento odklon by byl řešen jinými decentralními zdroji tepla, jako jsou solární panely, kotle na pevná paliva nebo tepelná čerpadla.

Je nutné si uvědomit, že i při zvolení decentralní varianty nejsou možnosti decentralizace neomezené. Studie OTE odhaduje, že do roku 2050 by byl maximální podíl instalovaného výkonu decentralních zdrojů energie na energetickém mixu státu kolem 68 %. I přesto, že se jedná o poměrně vysoké číslo, tak by se tato část výkonu podílela maximálně na 50 % celkové poptávky elektřiny.

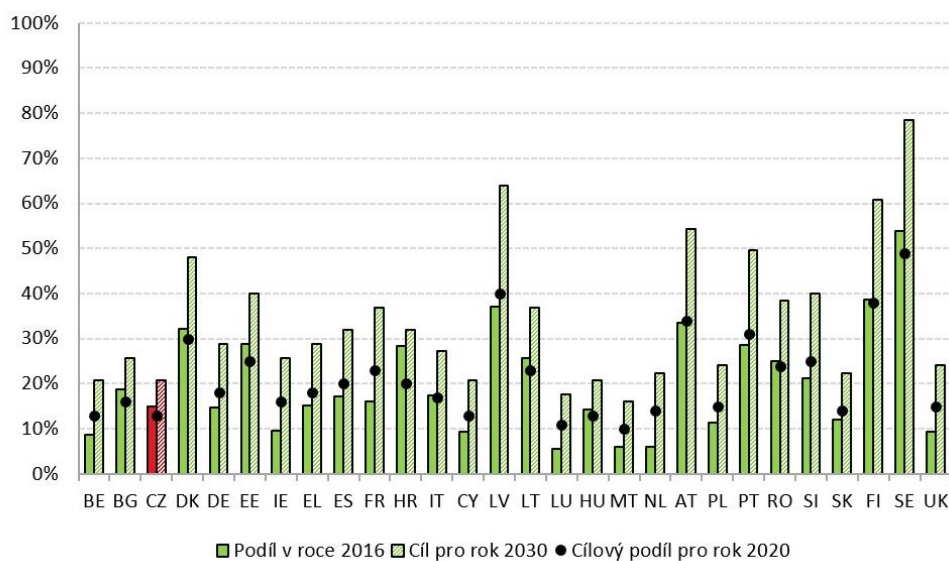
S rozvojem decentralizované energetiky se musí také brát ohled na stabilitu a flexibilitu sítě. V případě, kdy česká energetika nebude mít dost zdrojů, které by byly schopny poskytnou podpůrné služby, které se podílejí na výkonové rovnováze v síti nebo na udržení kvality napětí a provozu, tak může mít ČEPS velké problémy v řešení v nenadálých situacích. Právě tyto důsledky absence točivých zdrojů může v budoucnosti vést k výstavbě synchronních kompenzátorů, které dnes ze stejného důvodu už využívají například v Německu.

2.2. Obnovitelné zdroje

Směřování evropských států k „zelené energetice“ je zcela zřejmý fakt. Některé státy tuto transformaci již započaly a některé tato transformace teprve čeká. Důkazem může být například Německo, které je schopno během větrných dní pokrýt pomocí obnovitelných zdrojů energie z 50 % svou celkovou spotřebu [16]. V roce 2016 představila Evropská komise energetický balíček Čistá energie pro všechny Evropany [88], který mimo jiné také obsahuje závazky EU a jednotlivých členských států na zvýšení podílu OZE na celkové hrubé spotřebě. Evropská unie si vytyčila několik ambiciózních cílů, které mají za cíl postupné snižování emisí a skleníkových plynů, zvyšování podílu OZE na celkové spotřebě nebo zvyšování energetické účinnosti. Tyto cíle a jejich plnění rozdělila do několika etap, které se snaží postupně plnit.

Cíle směrnice o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů jsou rozděleny do dvou období, první do roku 2020 a druhé do roku 2030. Do roku 2030 by se na celkové spotřebě v EU měly OZE podílet 32 %. Pro rok 2020 ve výši 20 %. Členské státy posléze připravily své optimální cíle, které byly přizpůsobeny jejich velikosti, geografickým a klimatickým podmínkám nebo i ekonomickým možnostem země. Česká republika s přihlédnutím k těmto podmínkám navrhla za optimální cíl podíl OZE na celkové spotřebě země v roce 2030 20,8 % a v roce 2020 13 %. Tyto závazky zatím ČR dokáže plnit a čeká ji překonat v příštích letech dalších bezmála 8procentních bodů.

Níže na grafu jsou vidět jednotlivé členské státy EU a jejich vytyčené cíle ohledně podílu energie z OZE pro rok 2020 a 2030. Jak je vidět z grafu, tak nejambicióznější jsou ty státy, které jsou státy přímořskými a mají možnost vybudovávat offshore větrné parky.



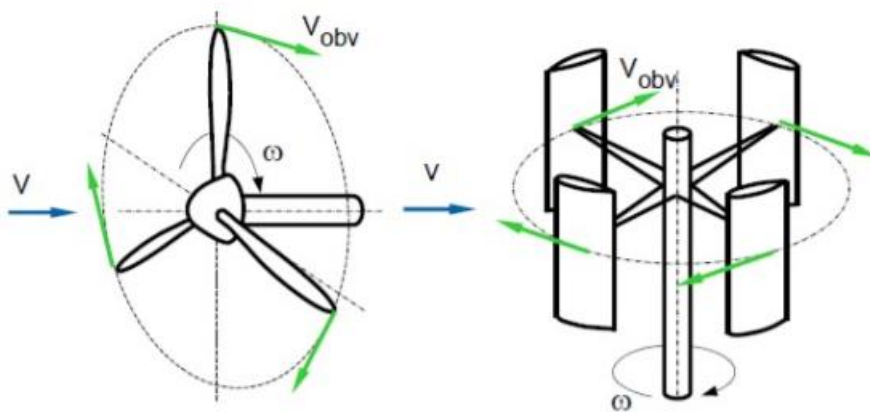
graf 1 Podíl OZE 2016 a klimatické cíle EU [8]

2.1.1 Větrné elektrárny

Jeden z důležitých obnovitelných zdrojů energie je vítr. Výstavba větrných elektráren celosvětově stoupá. V roce 2017 vzrostla roční výroba větrné energie o 17 % a dosáhla 4,4 % z celosvětové spotřeby energie. V Evropě je lídrem v oblasti větrné energetiky Dánsko, které pokrylo 43 % své spotřeby z větru. V roce 2018 vzrostl celkový instalovaný výkon z větrné energie o 9,6 % , tedy na 591 GW [13]. Celosvětovým lídrem je Čína, která v roce 2016 vyrobila 237 TWh z větrných elektráren.

Větrná energetika v českých zemích začala už v roce 1990. Do roku 2006 mělo Česko na svém území nainstalovaných 60 elektráren s celkovým instalovaným výkonem 50 MW. Hnací motivací po roce 2000 byl cenový výměr, kterým ERÚ určilo výkupní cenu vyrobenou z větru na 3 Kč/kWh.

Důležitým faktorem větrných elektráren je větrný potenciál, který Česká republika má. Jedná se o potenciál větrné energie, který stanoví v určitém bodě „výkon větru“, jenž by bylo možné získat při stoprocentním využití kinetické energie větru proudící plochou, kolmou na směr proudění větru.



Obrázek 12 Horizontální (vlevo) a vertikální větrná turbína [9]

Kinetická energie větru protékající plochou A

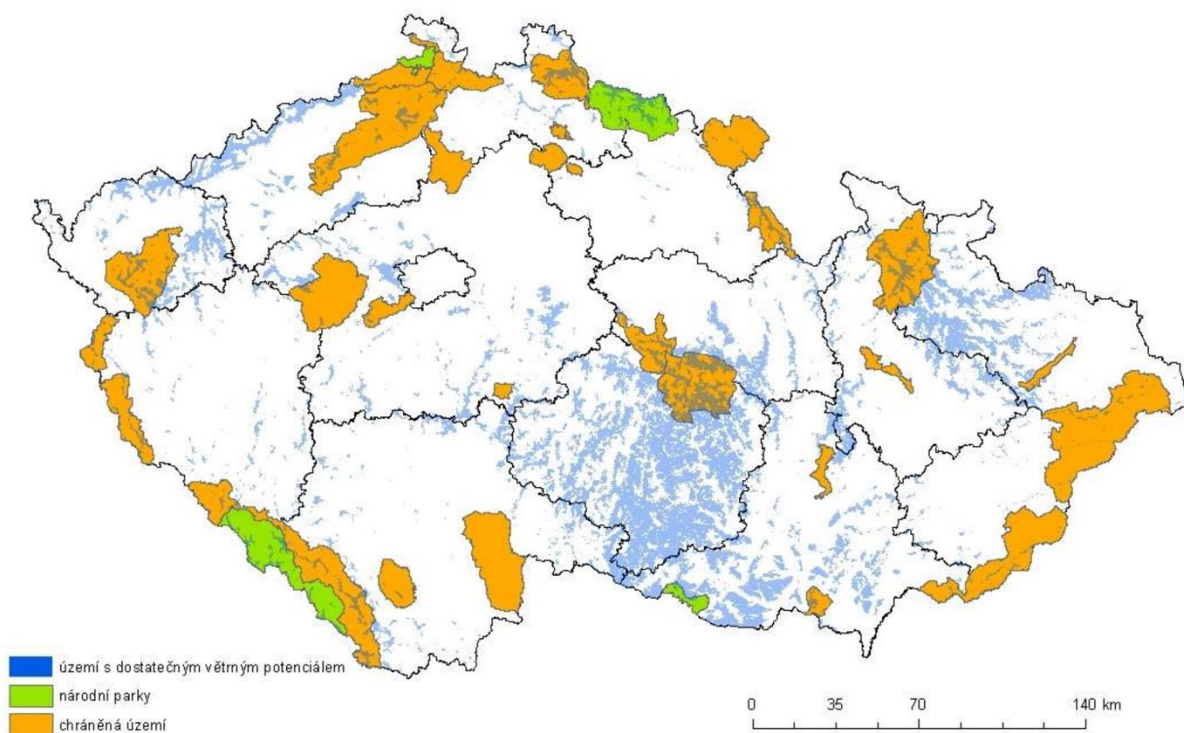
$$Pv = \frac{r}{2} \cdot v^3 \cdot A \quad [W; 1; \text{kgm}^{-3}; \text{ms}^{-3}; \text{m}^2]$$

- r (kgm^{-3}) je hustota vzduchu,
- v (ms^{-1}) je rychlost proudění vzduchu,
- A (m^2) je plocha vymezená listy turbíny ve směru proudění větru.

Teoretický dosažitelný výkon turbíny

$$Pt = c_p \cdot r \cdot \frac{v^3}{2} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad [W]$$

- c_p (1) je součinitel výkonosti generátoru,
- r (kgm^{-3}) je hustota vzduchu,
- v (ms^{-1}) je rychlost proudění vzduchu,
- D průměr rotoru



Obrázek 13 Území s dostatečným větrným potenciálem [10]

Na této mapě jsou vidět chráněná území, kde výstavba VTE není možná. Na zbývajícím území byly rozmístěny jednotlivé teoretické pozice VTE. Rozmíst'ování bylo prováděno podle těchto pravidel:

- cílem je v rámci území maximalizovat počet umístěných VTE a teoretické množství vyrobené elektrické energie těmito elektrárnami,
- VTE jsou umíst'ovány v rámci možností, na vhodných pozicích (vyvýšená místa otevřená proudění vzduchu),
- minimální vzdálenost mezi VTE činí 450 m v místech bez výrazně převládajícího směru větru, v místech s výrazně převládajícím směrem větru pak 540 m ve směru převládajícího větru a 270 m ve směru kolmém na něj (tato pravidla odpovídají VTE o průměru rotoru 90 m). [10]

V odhadu realizovaného potenciálu větrné energie v ČR, který spočítal Ústav fyziky a atmosféry akademie věd, se uvažuje s třemi možnými vývoji.

Nízký scénář přepokládá nízkou podporu jak ekonomické podpory, tak i legislativní. Takzvaný střední scénář předpokládá, že úřady přijímají větrnou energetiku jako potřebný zdroj a budou jej legislativně podporovat. Třetí variantou je vysoký scénář, který předpokládá vysokou podporu pro větrnou energetiku jednak ze strany státu, tak ze strany obyvatelstva. Větrná energetika je vnímána, jako dobrý, čistý a šetrný zdroj, který může omezit klimatickou změnu.

Nízký scénář			Střední scénář			Vysoký scénář		
Počet VE	výkon [MW]	výroba [GWh/r]	Počet VE	výkon [MW]	výroba [GWh/r]	Počet VE	výkon [MW]	výroba [GWh/r]
472	991	2 443	1 179	2 516	5 577	2 736	5 972	14 723

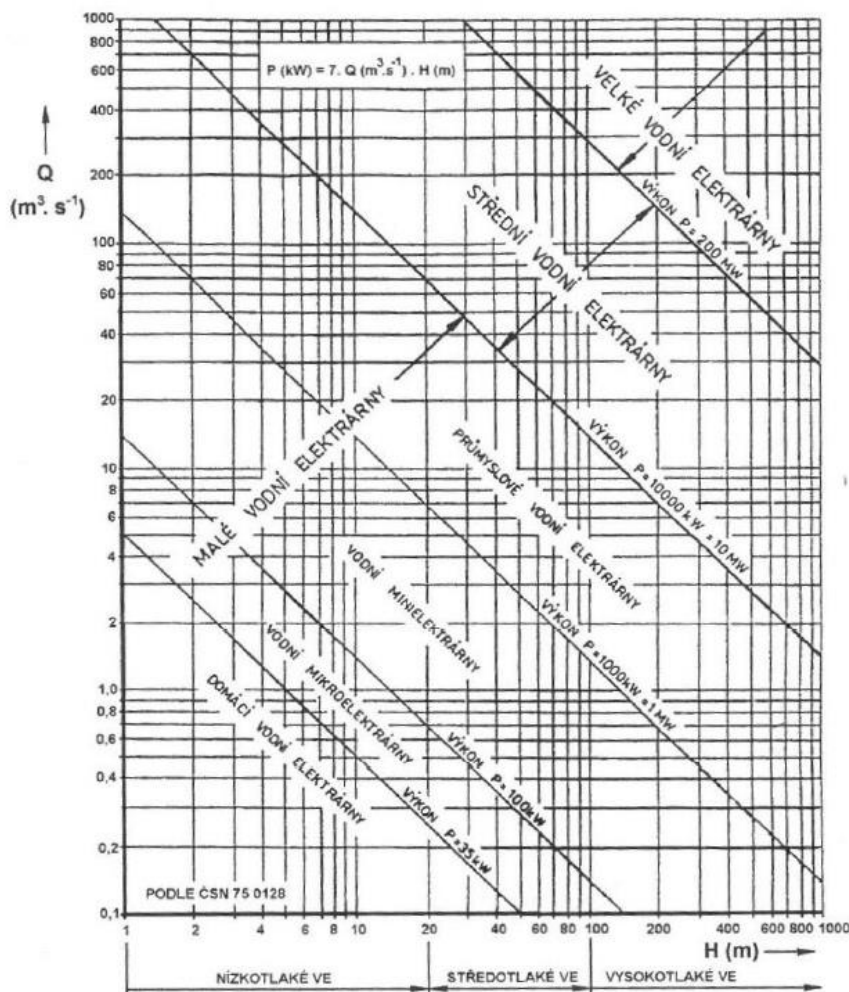
Tabulka 3 Odhad realizovatelného potenciálu větrné energie na území ČR

2.1.2 Vodní elektrárny

Vodní elektrárny lze rozdělit podle několika kategorií podle normy ČSN 75 0120 Vodní hospodářství – Terminologie hydrotechniky a normy ČSN 75 2601 Malé vodní elektrárny – Základní požadavky-dle instalovaného výkonu, podle získaného spádu, podle velikosti spádu, charakteru pracovního režimu, podle umístění a uspořádání strojovny, podle provozovatele či podle zapojení a řízení provozu elektrárny.

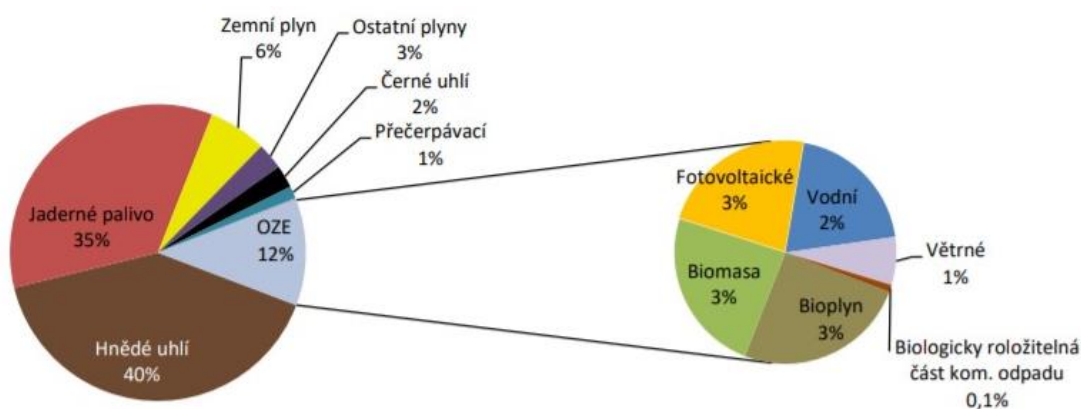
Jako malé vodní elektrárny se označují vodní díla s instalovaným výkonem do 10MW. Tyto elektrárny lze dělit na:

- Průmyslové vodní elektrárny (1-10 MW),
- Vodní minielektrárny (100-1000 kW),
- Vodní mikroelektrárny (35-100 kW),
- Domácí vodní elektrárny (do 35 kW). [7]

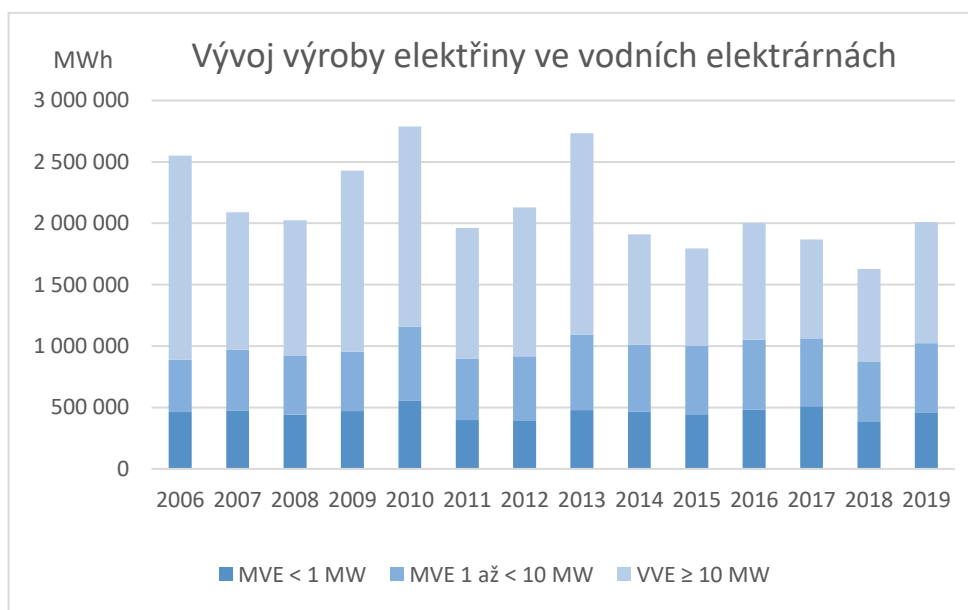


Obrázek 14 Rozdělení vodních elektráren dle instalovaného výkonu [18]

V současné době (2020) je na území České republiky instalovaných 1606 vodních elektráren s celkovým instalovaným výkonem 352,43 MWe. Díky geografické poloze České republiky nemají tuzemské vodní elektrárny dostatečný spád a množství vody, což zapříčiňuje, že energie z vodních elektráren nikdy nebude ve zdejším energetickém mixu hrát tak dominantní roli, jako je tomu třeba v Rakousku (11 990,3 MW [11]) nebo ve skandinávských státech. Proto se v české energetice vodní elektrárny využívají spíše jako doplňkový energetický zdroj. Díky velké flexibilitě se vodní zdroje využívají pro rychlé vyrovnání energetické bilance v ES, kdy proti jiným koncepčním zdrojům jsou schopny do minut najet na plný výkon.



Obrázek 15 Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny (brutto) v roce 2019 [33]



graf 2 vývoj výroby ve vodních elektrárnách [zdoj dat ERU]

Princip vodní elektrárny

Vodní elektrárny přeměňují potenciální energii vody na energii elektrickou. Tlaková a kinetická energie vody protékající vodní turbínou je přeměněna na mechanickou energii rotující turbíny, která posléze roztáčí elektrický generátor, který mění mechanickou energii na energii elektrickou. Proto se pro výstavbu vodních děl hledají takové lokality, kde je zaručený vysoký spád či velký průtok vody.

Teoretický výkon vodní turbíny lze pak vypočítat podle:

$$Pt = \rho \cdot H \cdot g \cdot Q \cdot \eta t [W; \text{kgm}^{-3}; m; \text{ms}^{-2}; \text{m}^3 \text{s}^{-1}; 1],$$

- ρ (kgm^{-3}) je hustota vody,
- H (m) je užitkový spád turbíny,
- Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) je průtok turbínou
- ηt (-) účinnost turbíny

Možný potenciál vodních elektráren v české republice

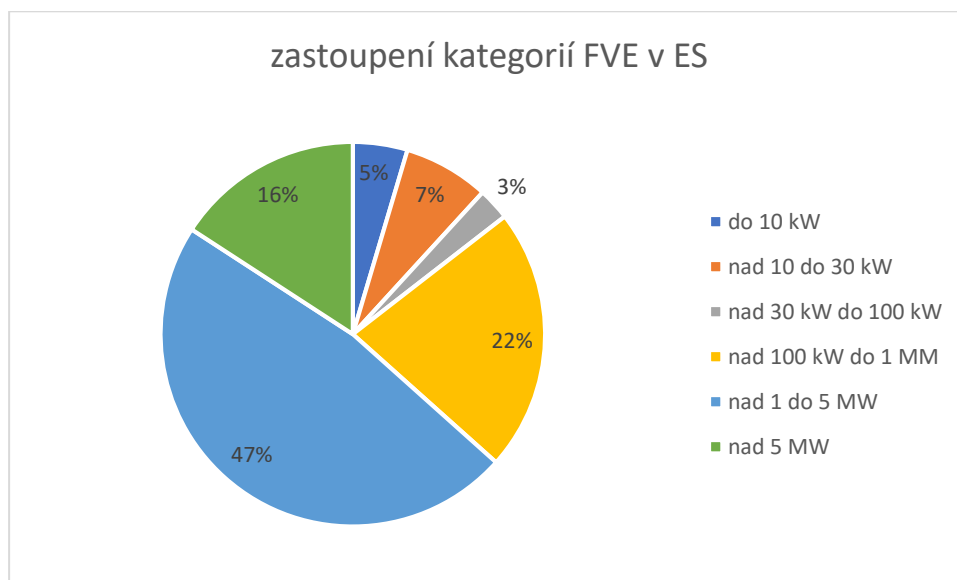
Ministerstvo životního prostředí si nechalo v roce 2013 udělat projekt Analýza efektivního využití malých vodních elektráren z hlediska přírodního potenciálu vodních toků jako energetického zdroje, jejímž výstupem je metodika, která má pomoci při návrhu vodních elektráren na malých, středních a velkých tocích tak, aby se co nejméně narušila ekologická rovnováha místa projektu a bylo dosaženo maximální ekonomické efektivnosti investice a vodního díla.

Projekt také přichází s analýzou hydroenergetického potenciálu, který ještě nebyl využit. Ta přichází s 207 lokalitami s již existujícím soustředěným spádem s instalovaným výkonem 35,1 MW a výrobou 226,9 GWh/rok. Dle rozdělení MVE podle instalovaného výkonu by se jednalo o 138 MICRO – do 100 kW, 64 MINI – do 1 MW a 5 SMALL – do 10 MW.

V současné době už některá vodní díla z vytypovaných lokalit byla postavena. Z těch větších je to třeba MVE v Roudnici nad Labem s instalovaným výkonem 4,5 MW nebo MVE Štětí s instalovaným výkonem 5,8 MW.

2.1.3 Fotovoltaické elektrárny

Dalším významným obnovitelným zdrojem energie jsou fotovoltaické elektrárny. Na začátku roku 2020 ERÚ evidoval celkem 28 623 fotovoltaických elektráren s celkovým instalovaným výkonem 2129,99 MWe. Podle dat OTE v roce 2019 FVE vyprodukovaly 2 193 368 MWh (brutto).



Jak je vidět z tabulky č.4, tak možný potenciál výstavby dalších fotovoltaických elektráren v Česku je ale daleko vyšší, než je dnes.

Studie [12] odhaduje technický potenciál fotovoltaických elektráren na 39 GW. Je nutné si uvědomit, že se jedná o celkový technologický potenciál, a to včetně fasád, u kterých nepředpokládáme, že by se tento potenciál v budoucnosti ve větší míře využíval.

FVE technický potenciál	instalovaný výkon [GWp]
střechy budov	10,6
fasády	13,2
celkem	23,7
brownfieldy	15,3
celkem	39

Tabulka 4 Celková technický potenciál [12]

Dalším velkým potenciálem jsou brownfieldy, totiž plochy zemědělské či průmyslné činnosti, které se již nevyužívají. Takové plochy se dnes nevyužívají a stavba FVE by byla dobrou příležitostí, jak takové plochy znovu využívat. Výhody a nevýhody využívání brownfieldů jsou různé. Hlavními aspekty, které se musí při samotné instalaci FVE zajistit jsou nekontaminované podloží, které by mohlo vést k degradaci nosných konstrukcí FVE a degradaci technologických součástí elektrárny, a především spolehlivé kotvení nosných konstrukcí fotovoltaických panelů, proto jsou někdy potřebné další investice do zpevnění podloží pod budoucí FVE. Příkladem takové instalace může být například FVE u Dubňan, kde se na konci 20. století ukončila těžba a v roce 2007 se bývalý průmyslový areál využil pro instalaci FVE. [20]



Obrázek 16 Ostrožská Lhota - FVE na brownfieldu [19]

Střechy budov zdánlivě přináší nejmenší potenciál pro výstavbu, avšak do budoucna půjde o cestu s jednoduchým řešením instalace FVE, jak z pohledu kotvení FVE, tak z pohledu ekonomického. Právě tato ekonomická dostupnost instalace malé FVE motivuje investory do investic do malých instalací na střechy jejich domů. Podle průzkumu českého trhu [12] se pohybuje cena malé FVE (5 kWp) kolem 35 tis Kč/kW. Cena instalací bude dále klesat a očekává se, že do roku 2040 cena elektrárny klesne až o 50 % z dnešní ceny. Díky snižující se ekonomické náročnosti investice a jednodušší administraci malé FVE se uvažuje, že počet střešních instalací (do 11kWp) stoupne do roku 2040 na celkových 240 400.

2.3. Využití mikrozdrojů při nouzových stavech

Využití mikrozdrojů a dalších decentralizovaných zdrojů energie při nouzových stavech v síti obnovu sítě po blackoutu je docela problematický úkol. Limitujícím faktorem je hlavně jejich malý zkratový výkon. Z toho důvodu jsou mikrozdroje schopny zajistit spotřebu malých odběrů v jejich bezprostřední blízkosti. Nejlepším příkladem jsou fotovoltaiky na střechách rodinných domů, které jsou vybaveny baterií a střídačem. Baterie umožňuje instalaci akumulovat přebytečnou energii během dne, kterou pak dům využije během noci. V některých případech, hlavně během letních měsíců, jde o soběstačné „ostrůvky“, které nejsou závislé na distributorovi.

Do budoucna s úbytkem velkým elektráren začne vznikat větší potřeba po tom, aby mikrozdroje byly schopny se podílet na vyrovnávání výkonové bilance v ES. Jednou z možností, která se dnes řeší je dálkové ovládání a omezování výroby fotovoltaických farem. S očekávanou výstavbou nových malých FVE na střechách domů by se tato metoda měla rozšířit i do této oblasti, kdy by dispečer mohl dálkově omezovat výrobu FVE, aby vyrovnal výkonovou bilanci v síti.

Další možností bude využití bateriových úložišť. S rozšiřováním elektromobility začínají po Česku vznikat nová bateriová úložiště u rychlonabíječek elektroaut, které by se daly agregovat do větších virtuálních bloků. Tyto bateriová úložiště u rychlonabíječek nebo fotovoltaik, by se za určitých okolností daly použít pro regulaci výkonové nerovnováhy v ES. Tento potenciál by se dal pravděpodobně nejvíce využíval pro primární a sekundární regulaci ES.

Další možností je začlenění mikrozdrojů do smartgrids. Kdy by například fotovoltaické elektrárny na střechách domů zásobovaly body kritické infrastruktury, jako jsou nemocnice, hasičské stanice atp. Potenciální cestou je také spojení Fotovoltaik a bioplynových stanic, které by s případnou kogenerační jednotkou byly schopny zásobovat přilehlé vesnice, či menší města.

3 Modelová situace

V této kapitole se budu zabírat modelovou situací, podmínkami, které jsou pro ostrovní provoz nezbytné a jednotlivými vytypovanými odběry v ES.

Modelovaná situace popisuje stav v elektrizační síti během blackoutu. Při blackoutu a rozpadu ES výkony výrobních bloků sjedou na vlastní spotřebu a dále čekají na pokyn dispečera, který dle potřeby a možností se snaží zpět bloky přifázovat zpět do ES.

Model popisuje pokus o vytvoření ostrovního provozu za pomoci vodní elektrárny, která poskytne elektřinu teplárně, a postupně připojuje jednotlivá odběrová místa, jako je nemocnice, čistička odpadních vod a další různé zátěže, které v této práci dále nespecifikuji.

Pro zajištění a úspěšnou činnost ostrovního provozu je důležité, aby byla zachována rovnováha mezi výrobou a spotřebou a zároveň, aby elektrárna udržovala jmenovitou frekvenci sítě na 50 Hz pro zajištění výkonové rovnováhy.

3.1. Výkonová rovnováha

Každá regulovaná (synchronní) oblast se snaží dosáhnout výkonové bilance mezi vyrobenou elektřinou a elektřinou spotřebovanou. Za tuto rovnováhu jsou zodpovědní jednotliví správci přenosových soustav. Ve skutečnosti není jednoduché této prosté výkonové bilance dosáhnout lehce dosáhnout. Musíme zde uvažovat ztráty ve vedení, akumulaci, a především reálné chování výrobců i spotřebitelů, které se v čase velmi dynamicky mění. Proto výpočty pro udržení výkonové rovnováhy dělají předem, tak i během samotného dne.

Můžeme tedy psát bilanční rovnici zdánlivých výkonů:

$$S_v(t) = S_s(t) + S_z(t) + S_a(t)$$

$S_v(t)$ – Vyráběný výkon [MW]

$S_s(t)$ – Spotřebovávaný výkon [MW]

$S_z(t)$ – Ztráty způsobené dopravou elektřiny [MW]

$S_a(t)$ – Akumulovaný elektřina [MW]

ES musí být připravena i na výpadek celých výrobních bloků (např. z důvodu přetížení) a proto má ČEPS nasmlouvané dodavatele podpůrných služeb (FCP, aFRP, mFRPt a RRP), kterými zajišťuje finální výkonovou bilanci v síti. Například podle Kodexu PS je ES připravena na výpadek největšího bloku JE Temelín.

3.1.1 Kritéria

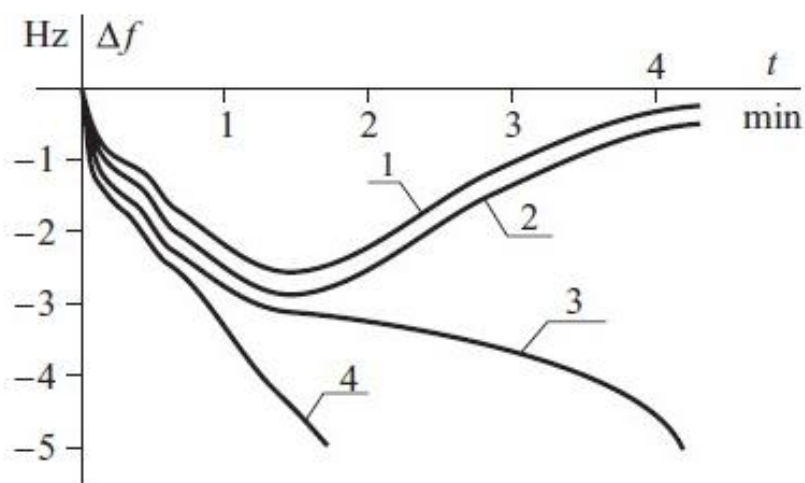
Za úspěšný rozběh a činnost ostrovního provozu elektrárny se považuje takový blok, který splní tyto podmínky:

- Odchyłka od jmenovité frekvence (50 Hz) by měla být mezi 48,5 až 50,5 Hz.
- Nesmí působit podpět'ová ochrana v rozvodně vlastní spotřeby ($U < 0,8U_n$, $t = 6s$; $U < 0,65U_n$, $t = 2s$).
- Nesmí působit přepět'ová ochrana v rozvodně vlastní spotřeby u teplárny. [28]

3.1.2 Rizika

Jedno z možných rizik je opětovné rozpadnutí sítě z důvodu frekvenčního kolapsu. Tento kolaps je zapříčiněn nedodržením výkonové bilance, například z důvodu náhlého zvýšení zátěže. V soustavě se nebude nacházet další točivá rezerva a tím se výkonová rovnováha nevyrovná a začne frekvenční kolaps.

Na obrázku č. 17. jsou vidět 4 případy, jak frekvence závisí na velikosti točivé rezervy v ES. Obrázek zobrazuje výpadek generovaného výkonu rovný 10 % celkové zátěže. První a druhý průběh zobrazuje, jak se soustava zachová, pokud bude koeficient točivé rezervy $r_1 = 16\%$ a $r_2 = 14\%$. Soustava se po několika minutách opět vrátí k jmenovité hodnotě frekvence. V třetím případě je točivá rezerva nedostatečná a dojde k pomalému kolapsu sítě. Ve čtvrtém případě charakteristika výroby a spotřeby nemají průnik a k frekvenčnímu kolapsu dojde rychle. [26]



Obrázek 17 Frekvenční kolaps [26]

3.2. MVE Miřejovice

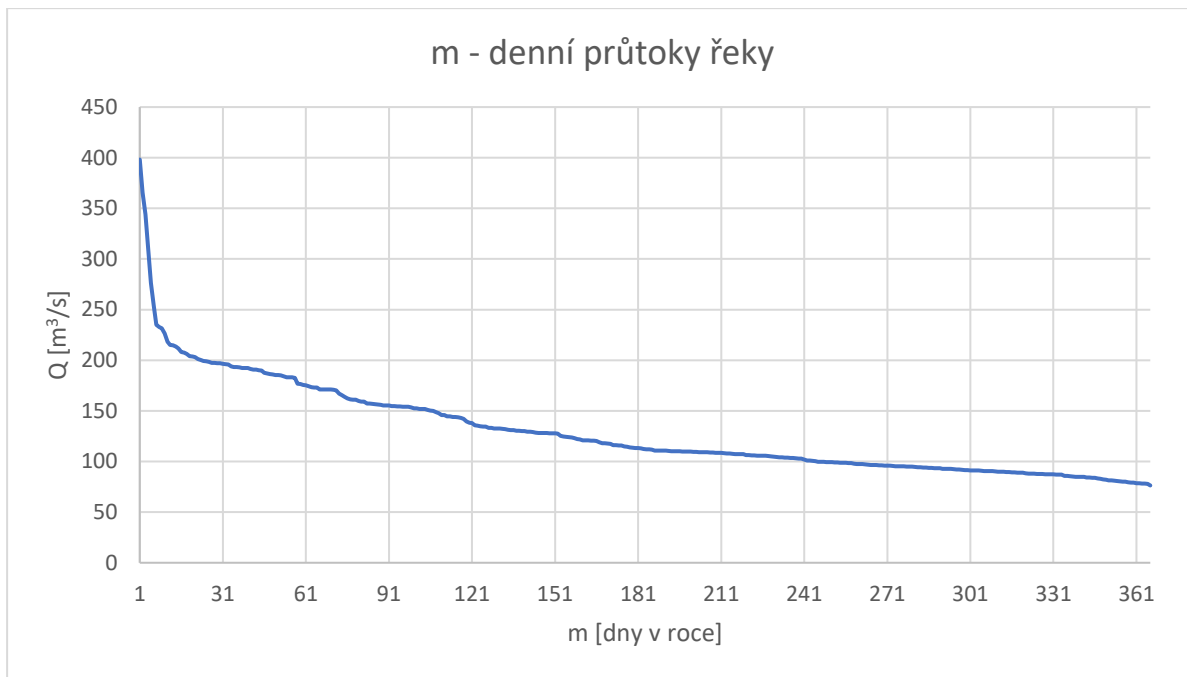
Vodní elektrárna Miřejovice se nachází poblíž Miřejovic, asi deset kilometrů severně od Kralup nad Vltavou. Elektrárna pracuje s přirozeným průtokem na řece Vltavě. U elektrárny je jezová zdrž, která zvyšuje využívaný spád elektrárny, který je až 3,9 m. Elektrárna disponuje 5 vertikálními turbínami, jednou Francisovou a čtyřmi Kaplanovými, které jsou spojeny přímo s pěti synchronními hydroalternátory. Celková hltnost turbín je úměrná průtoku vody a je 150 m³/s. Celkový instalovaný výkon elektrárny je 5,5 MW, který řadí elektrárnu mezi malé vodní elektrárny. Výkon generátorů je vyveden z elektrárny pomocí dvou 2,5 MW transformátory, které elektrárnu spojují distribuční 22 kV linou s rozvodnou v Kralupech.



Obrázek 18 MVE Miřejovice [27]

Hydrologické podmínky MVE

Důležitou informací je čára překročení průměrných denních průtoků (m-denní průtoky) řeky u elektrárny. Pro odhadnutí možných denních průtoků Vltavy u elektrárny jsem použil měření Českého hydrometeorologického ústavu [24], který má přímé měření u obce Vraňany, které jsou asi 7,5 km po proudu řeky a další přítoky do Vltavy zde nejsou.

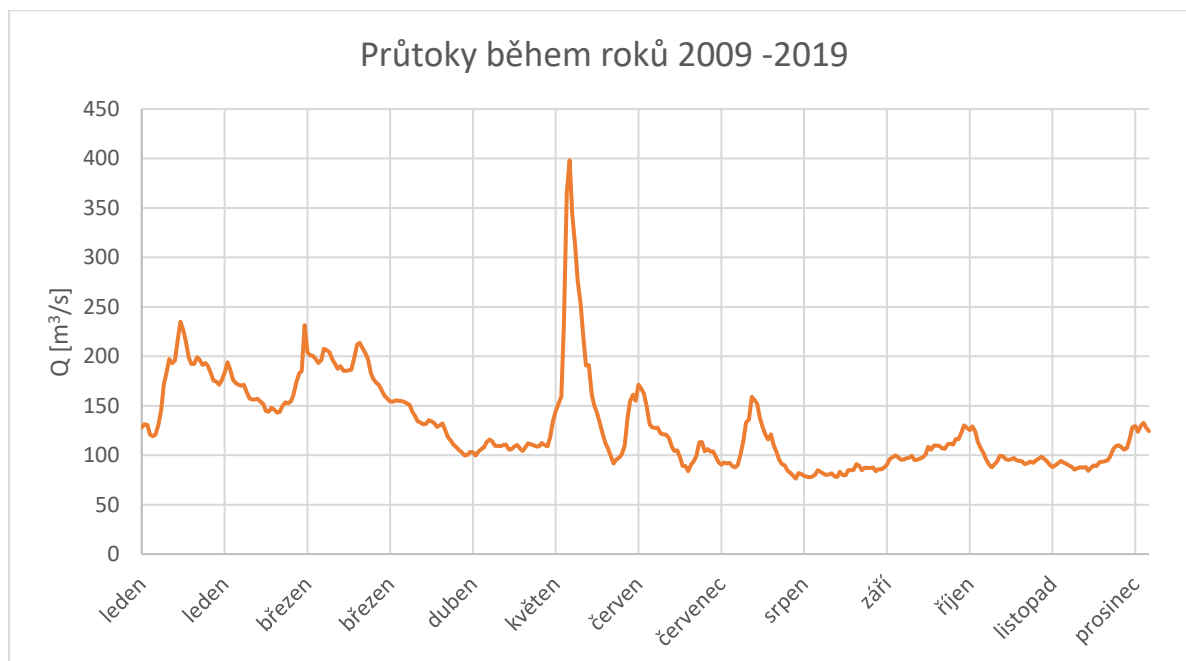


graf 3 Čára překročení m – denní průtoky Vltavy u Vraňan (2009–2019)

Graf č.3. m – denní průtoky řeky zobrazuje čáru překročení. Na svislé ose je celkový průtok Q řekou a vodorovná osa zobrazuje během kolika dnů průtok v roce nastává. Pro lepší predikci průtoky řeky a z důvodu odstranění extrémů, které se vyskytovaly v některých letech, byla zprůměrována data z let 2009-2019. Za předpokladu, že by elektrárna dokázala odklonit pomocí jezové zdrži celý protékající objem řeky do náhonu elektrárny mohla by elektrárna produkovat maximální výkon během 107 dní v roce.

Z grafu č.4 je vidět, že největších průtoků řeka dosahuje během jarního období a během letních dešťů. Je však vidět, že se průtok stabilně drží okolo 100 m³/s.

Vltavská kaskáda plní několik účelů, jako je třeba ochrana před povodněmi, k výrobě čisté energie, ale také kaskáda zaručuje minimální průtok řeky. Toto minimum se pochopitelně různí podle říčních kilometrů, avšak minimální průtok Vltavy u Vrané před Prahou je 35 m³/s. Do Vltavy ještě přitéká Sázava (průměrný roč. průtok Q=25,2 m³/s) s Beroučkou (průměrný roč. průtok 36 m³/s) a dalšími přítoky, takže můžeme říci, že průtok Prahou bude vždy vyšší než zmíněné minimum. [25].



graf 4 Průtoky během roků 2009–2019

Zajištění vlastní spotřeby elektrárny

MVE si zajišťuje vlastní spotřebu pomocí 250 kVA transformátoru 6,3/0,4kV. Dnes není MVE vybavena technologií, aby mohla poskytovat službu blackstart. Proto, aby mohla tuto službu poskytovat, by musela projít instalací záložních zdrojů, které by zajistily vlastní spotřebu elektrárny. Vlastní spotřeba každé elektrárny se značně liší technologickou výbavou elektrárny a vybavením budovy, kde je elektrárna umístěna. Mezi důležitými prvky vlastní spotřeby bude patřit buzení generátorů, pohony pohybuující zdymadly a dalšími technologickými zařízeními, elektrické ochrany, požární systémy, řídicí systémy a osvětlení.

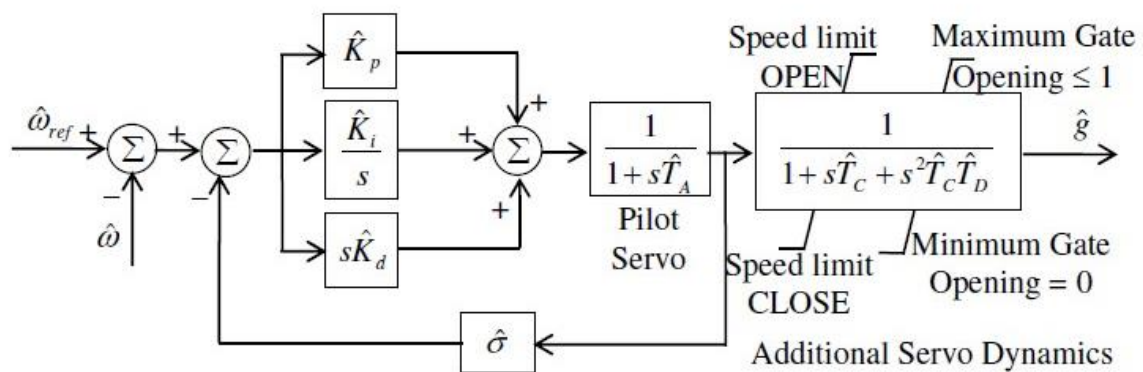
Používanými zařízeními pro zajištění vlastní spotřeby jsou dnes diesel agregátory nebo UPS systémy s dostatečným výkonem a kapacitou.

Řídicí systém

Základní úlohou regulace výroby MVE je ovládání průtoku vody turbínou. Toho se dosahuje natáčením oběžných lopatek, které jsou umístěny kolem turbíny. Celý regulační systém je pak řízen říditelným servomotorem, který svou činností určuje průtok vody turbínou. Samotným průtokem vody turbínou se pak ovládá výkon a rychlost otáček generátoru. To pak zajišťuje výkonovou rovnováhu v síti a reguluje zvolenou frekvenci sítě.

Po překročení frekvenční hranice $50 \pm 0,2\text{Hz}$ přecházejí bloky z výkonové regulace na regulaci otáčkovou. Regulator je řízený PID regulátorem řídicím signálem řídí servomotor, kterým ovlivňuje vtok vody do turbíny. Pro bezpečnost a fyzikální možnosti regulace je systém vybaven omezovačem polohování regulačního systému vtoku.

Pro nastavení parametrů regulátoru jsem vycházel z fyzických a rychlostních možností regulace elektrárny. Nastavení PID regulátoru se ukázalo jako největší problém. Existují konfigurace, při kterých regulátor reaguje příliš rychle rychlost motoru se neustálí na požadované hodnotě, což pak vede k frekvenčnímu kolapsu.



Obrázek 19 řídicí systém MVE [26]

3.2 Strana spotřeby

Při volbě spotřeby jsem použil pro vytypování citlivých míst Typový plán narušení dodávek elektrické energie velkého rozsahu od ministerstva průmyslu a obchodu. Tento dokument popisuje krizový stav, jeho možnou predikci, jeho následky a dále možné řešení krizových situací.

V minulých letech v České republice proběhlo cvičení k přípravě na blackout. Ze závěrů tohoto cvičení mimo jiné vyplývalo, že mezi kritickými oblastmi při blackoutu je zajištění energií u nemocnic, které by byly schopny provozu jen v omezeném režimu, zajištění energií vodojemů, které se během blackoutu vyprazdňují a není zjištěno jejich opětovné doplňování. Další důležitou oblastí je také zajištění chodu čističek odpadních vod, u kterých hrozí únik odpadních vod do okolí a kolaps odpadního systému, který by mohl ohrozit.

3.2.1 Teplárna Louny

Teplárna v Lounech se nachází na okraji městě. Teplárna disponuje dvěma kogeneračními jednotkami o celkovém výkonu 3,116 MWe a 3,514 MWt, kterými zásobují teplem přilehlé městská sídliště. Teplárna má pro každou jednotku vlastní transformátor, kterými jsou jednotky připojeny k distribuční trafostanici. Po konzultaci s technikou jsme určili potřebný příkon pro zajištění vlastní spotřeby a najetí jedné jednotky na 500 kW.



Obrázek 20 Kogenerační jednotka [21]

Teplárny a jejich provoz má několik podmínek, které jsou potřeba splnit, aby jejich provoz byl bezpečný a možný. Dále se pokusím vypsát ty nejdůležitější, které jsou potřeba zajistit.

Výroba elektrické energie v kogeneračních jednotkách neoddělitelně spjata s výrobou tepelné energie, které je dále dodávána skrze teplovodní systém až k zákazníkovi. Toto teplo se buď může posílat rovnou do teplovodů, či se může uskladňovat v tepelných zásobnících. Tepelné zásobníky jsou u tepláren hlavně z ekonomických důvodů, aby se mohlo vyrobené teplo uskladňovat a nemuselo se během dne několikrát zapínat a vypínat výroba teplárny.

Rizik během blackoutu je několik. I v případě, že je zajištěna vlastní spotřeba teplárny, tak tato skutečnost automaticky nedovoluje provoz objektu. Jak již bylo řečeno, výroba el. energie je spjata s výrobou tep. energie, a tudíž se tato tepelná energie potřebují někde v systému zužítkovat. Nejjednodušším řešením, je dodávat tepelnou energii do předpřipravených zásobníků, které by byly schopny zajistit několika hodinový bezpečný provoz teplárny. Druhou možností je dodávat teplo do teplovodů rovnou zákazníkům. Ani tato cesta není, tak jednoduchá, protože je potřeba během blackoutu zajistit provoz výměňkových stanic v soustavě, které by během blackoutu nefungovaly. V případě, že by teplárna dodávala teplo pouze do soustavy, ze které zákazníci neodebírají tep. energii, tak vzniká riziko přehřátí kogenerační jednotky z důvodu, že jediná tep. energie by byla ve formě tepelných ztrát ve vedení.

Další podmínkou pro provoz těchto tepláren je přívod zemního plynu. Malým teplárnám se obvykle nevyplatí si vybudovávat velké zásobníky plynu a plyn rovnou čerpají od dodavatele. Během blackoutu vzniká riziko, že tato dodávka bude přerušena a provoz teplárny nebude možný.

Ve chvíli, když jsou všechny podmínky zajištěny, tak aby byl provoz bezpečný a možný, tak je potřeba také brát v úvahu samotnou technologii teplárny. U větších tepláren na biomasu, či na jiná tuhá paliva je brát v úvahu například nahřátí kotle, které po odstávce

V případě začlenění malých kogeneračních bloků do řešení obnovy sítě, by se tyto podmínky musely vyřešit případnými zásobníky zemského plynu a tepla, které by zajistili bezpečný provoz objektu po dobu několika hodin, nebo po potřebnou dobu, která by se určila s distributorem elektřiny.

V této práci uvažuji teplárnu jen jako odběrové místo, kterému se snažím zajistit vlastní spotřebu tak, aby se posléze mohla zapojit do výroby a podílet se na dodávaného výkonu do ostrovního provozu.

3.2.2 Nemocnice

Energetická náročnost nemocnic se může velmi lišit. Důležitým aspektem je velikost a vybavenost nemocnice. Energetická specifika těchto budov bych rozdělil na dvě části, a to na odběr tepla a odběr el. energie. Specifikum odběru tepla je, že odběr je poměrně konstantní, významný pokles může nastávat v letním měsících. Odběr el. energie se během roku příliš neliší. V letních měsících může nastat vyšší odběr zapříčiněn používáním klimatizací s chladícími jednotkami. Podle energetických auditů pro Státní program na podporu úspor energie a využití obnovitelných zdrojů se příkony velkých nemocnic pohybují během letních měsíců od 0,5-1,2 MW a během zimních měsíců od 0,7 – 1,5 MW.

3.2.3 Čistička odpadních vod

Čistička odpadních vod takzvané ČOV je zařízení, jehož účelem je čistit odpadní vody. Nejčastěji jsou budovány v blízkosti měst, kde jsou napojeny na městskou kanalizaci. Velikost ČOV se odvíjí od velikosti kanalizačního systému a objemu vody, který je potřeba vyčistit.

Spotřebu čističky určuje objem splaškové vody, která do čističky vtéká. Je nutné si uvědomit, že objem se může během roku měnit v závislosti na produkci obyvatel, ale také na velikosti srážek v daném období, která může zvýšit objem splaškové vody i 4x.

V čističce je mnoho strojů a dalších elektrických zařízení, které se podílejí na funkčnosti ČOV. Nejdůležitější a energeticky nejnáročnější jsou:

- Dmychala
- Míchadla
- Čerpadla
- Armatury (stavidla atp.)
- Zařízení pro zahřívání kalu

Výkony jednotlivých strojů se odvíjejí od velikosti ČOV. Pro hrubou představu můžeme předpokládat, že u největších ČOV v republice se výkony dmychadel pohybují okolo 350 kW. Jedná se o velké stroje, které svou činností vtlačují vzduch do kalu, který tím okysličují a napomáhají biologickým reakcím čistícího procesu. Míchadla jsou malé stroje o výkonu 3-8 kW, které obvykle mají mnoho převodů. Jedná se soustrojí, které pomalu otáčejí míchadly a promíchávají kalové nádrže. Je nutné si uvědomit, že i přes velikost strojů nemusí jet na plný výkon. U čerpadel, které mají za úkol čerpání splaškové vody, může být denní spotřeba okolo

10 MWh. V ČOV jsou i další stroje, které jsou již menšího charakteru, jako stavidla (0,1 kW) a menší.

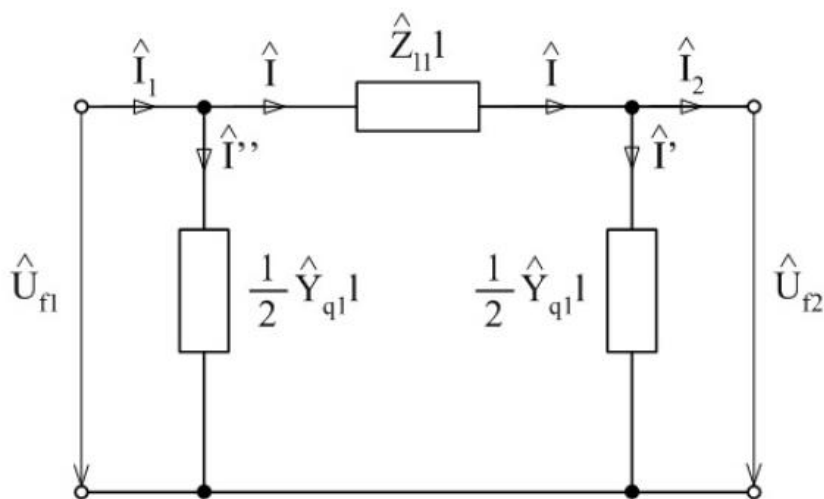
V modelu počítám s ČOV severně od Kralup nad Vltavou, která podle zprávy od Středočeské vodárny, a.s. pro rok 2019 vyčistila 3,2 milionů kubíků splaškové vody. Pro odhad spotřeby jsem použil energetický audit z roku 2018 podobně vybavené ČOV. Roční spotřeba středně velké ČOV se pohybuje kolem 1760 MWh. ČOV je schopna vyčistit 1,65 milionů kubíků splaškové vody. Do spotřeby uvažuji celý komplex čističky i se spotřebou kancelářských prostor a dalších zařízení, které se na provozu ČOV podílejí. Pro sestavení modelu je důležité si také ujasnit o jaký typ zátěže se jedná.

I přesto, že ČOV je objektem, kde je mnoho strojů, které by mohly negativně ovlivnit účinník, tak si ho čističky kompenzují samy a pomocí svých kompenzátorů účinníku dosahují, kterými dosahují hodnoty 0,95. Pro zjednodušení proto uvažuji, že ČOV má vykompenzovaný účinník $\cos \varphi$ a odebírá čistě činný výkon.

Do modelu budu uvažovat Kralupskou ČOV. Ze zprávy Středočeské vodárny [22] vyčistí Kralupská ČOV za rok 3 253 690 m³/rok. To znamená, že v průměru za den ČOV vyčistí 8914 m³ a 103 l/s. Z důvodu, že se mi nepodařilo sehnat přesná data o spotřebě Kralupské ČOV, tak jsem použil energetický audit stejně velké ČOV. Z důvodu, že se příkon objektu může v rámci roku i dne měnit, tak jsme po konzultaci s techniky určili na 200 kW pro funkční provoz objektu.

3.2.4 Vedení

K výpočtu parametrů vedení se používá zjednodušení v podobě dvojbranu (viz. Obr. 21). Jde o zjednodušení, při kterém řešený objekt popíšeme pomocí obecného dvojbranu, které soustředí celý parametr objektu v jednom bodě. Dvojbrany se dělí na články, které mají názvy podle svých charakteristických struktur. Existuje několik typů článků: π článek, Γ článek a T článek. V praxi se nejčastěji používá π článek, který je nejvhodnější pro přesnost výpočtu.



Obrázek 21 Náhradní π -článek dlouhého vedení [23]

Parametry zvoleného vedení

	Vedení Měřejovice – Kralupy (22kV)	Vedení V343 (110 kV)	Vedení V358 (110 kV)	Vedení Louny (22kV)
Délka vedení L [km]	5	33,3	24,9	5
Rezistivita R [Ω/km]	0,121	0,136	0,141	0,121
Indukčnost X [Ω /km]	0,113	0,402	0,394	0,113
Kapacita C [μF/km]	0,3	8,893	8,904	0,3
Proudová zatížitelnost	417	483	460	417

Tabulka 1 Parametry vedení

Pro zjednodušení modelové situace uvažují plnou funkčnost rozvodu, která je například zajištěna dieselgenerátory, nebo jinými zdroji a rozvodna je plně funkční pro další operace. Jedná se hlavně o funkčnost vypínačů a dalších prvků, které připojují zvolená vedení. Manipulaci vypínači simulují v modelu spínacími bloky.

4 Model

Modelová soustava popisuje malý decentrální zdroj elektřiny, malou vodní elektrárnu, která při blackoutu pomocí diesel generátoru zajistí svou vlastní spotřebu elektrárny a následný rozběh MVE. Model posléze popisuje činnost dispečera PDS, který společně s operátorem MVE propojí elektrárnu s rozvodnou Kralupy. Pro další činnost dispečera je potřeba mít plán obvyklých dodávek výkonů do jednotlivých oblastí. Ten je potřeba z toho důvodu, aby dispečer mohl bezpečněji připojovat vytypované trafostanice s distribuční sítí. Modelová soustava ukazuje hypotetickou činnost operátora, který propojí MVE Mířejovice s rozvodnou Kralupy kabelovou linkou 22 kV. Posléze propojuje rozvodnu Kralupy s rozvodnou u města Slané po 110 kV lince V343 a nakonec spojuje tuto rozvodnu s rozvodnou v Lounech po 110 kV lince V358. Ve chvíli, kdy rozvodna v Lounech je schopna podat napětí, tak zajistí napětí pro tamní teplárnu.

Jednou z priorit je poskytnutí vlastní spotřeby teplárně v Lounech. Zajištění napětí pro teplárnu je z tohoto důvodu, že by se tato teplárna po ohřevu kotlů a po zajištění dalších nezbytných procedur mohla připojit k výrobě a tím podpořit ostrovní provoz. Další z priorit je poskytnutí vlastní spotřeby ČOV, která se nachází v bezprostřední blízkosti od Kralup nad Vltavou. Další vytypovaným odběrem je nemocniční komplex v Lounech.

Reálná situace vzniku ostrovního provozu a následovného rozšiřování ostrova by trvala až hodiny. Model ukazuje, jak by tento proces mohl vypadat.

4.1 Popis modelu

Pro výpočet modelové soustavy jsem použil program MATLAB se softwarovou nástavbou Simulink, který se používá pro modelování dynamických systémů. Tato část nabízí uživateli velkou paletu možností, které mu pomůžou s inženýrskými výpočty, algoritmy modelováním dynamických soustav, či analýzou dat. Simulink je uživatelsky přívětivé prostředí, které uživateli nabízí knihovnu fungujících bloků, signálů a ukázek, které mohou pomoci přiblížit danou problematiku.

4.2 Cíl modelu

Pomocí této diplomové práce bych rád ověřil, jestli jsou malé/mirko vodní zdroje energie, schopny zajistit stabilní ostrovní provoz s několika vytypovanými odběry. Simulace by měla ověřit, jestli jsou splněny frekvenční a napěťové podmínky ostrovního provozu a určit jaké podmínky jsou pro takovou sestavu již limitní, či vedou k frekvenčnímu kolapsu a následnému rozpadu sítě.

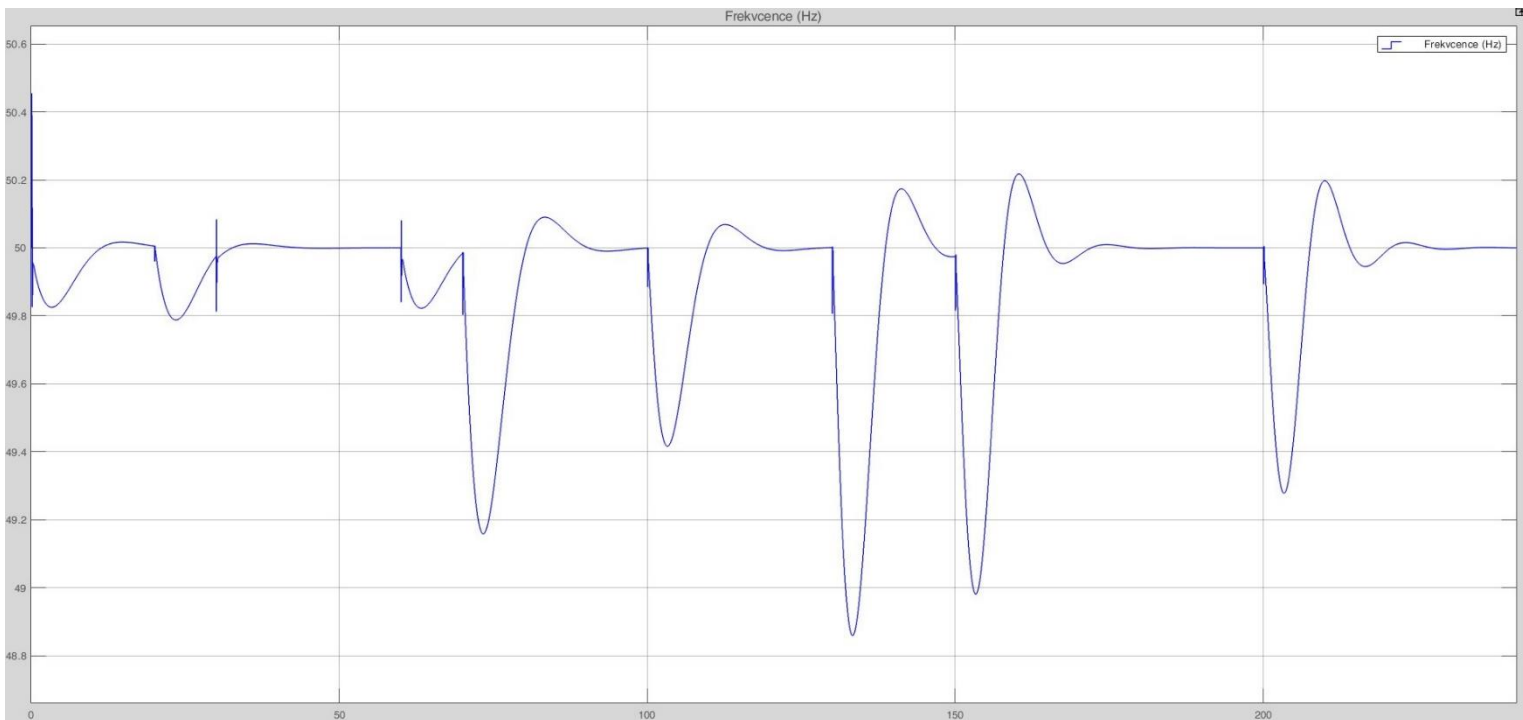
4.3 Popis spínání

Jak už bylo řečeno, tak hlavní osobou, která by koordinovala a dohlížela na průběh ostrovního provozu je dispečer PDS. Uvažuji, že dispečer má připravený plán ostrovního provozu v oblasti Kralup a sleduje při spínání výkonovou bilanci v síti a frekvenci.

Souslednost spínání

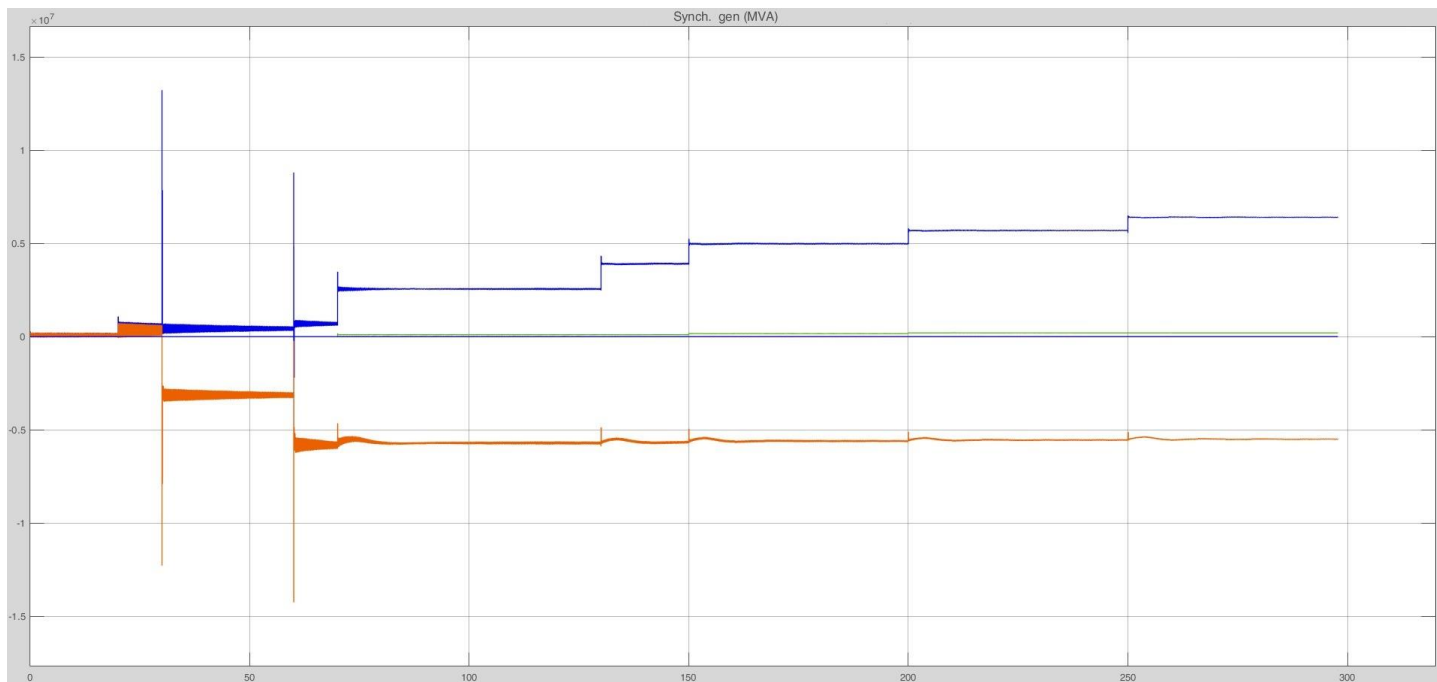
- V čase 20 dispečer připojí MVE Měřejovice s rozvodnou Kralupy
- V čase 30 dispečer propojí Kralupskou rozvodnu s rozvodnou ve Slaném linkou V343
- V čase 60 dispečer propojí rozvodnu ve Slaném s rozvodnou v Lounech linkou V358
- V čase 70 dispečer připojí do ostrova teplárnu v Lounech a nemocnici v Lounech
- V časech 130, 150, 200 dispečer připíná předem nevytypovaný odběr
- V čase 250 připíná Kralupskou ČOV

Na obrázku č.22 je vidět průběh frekvence a její reakce na činnost dispečera.



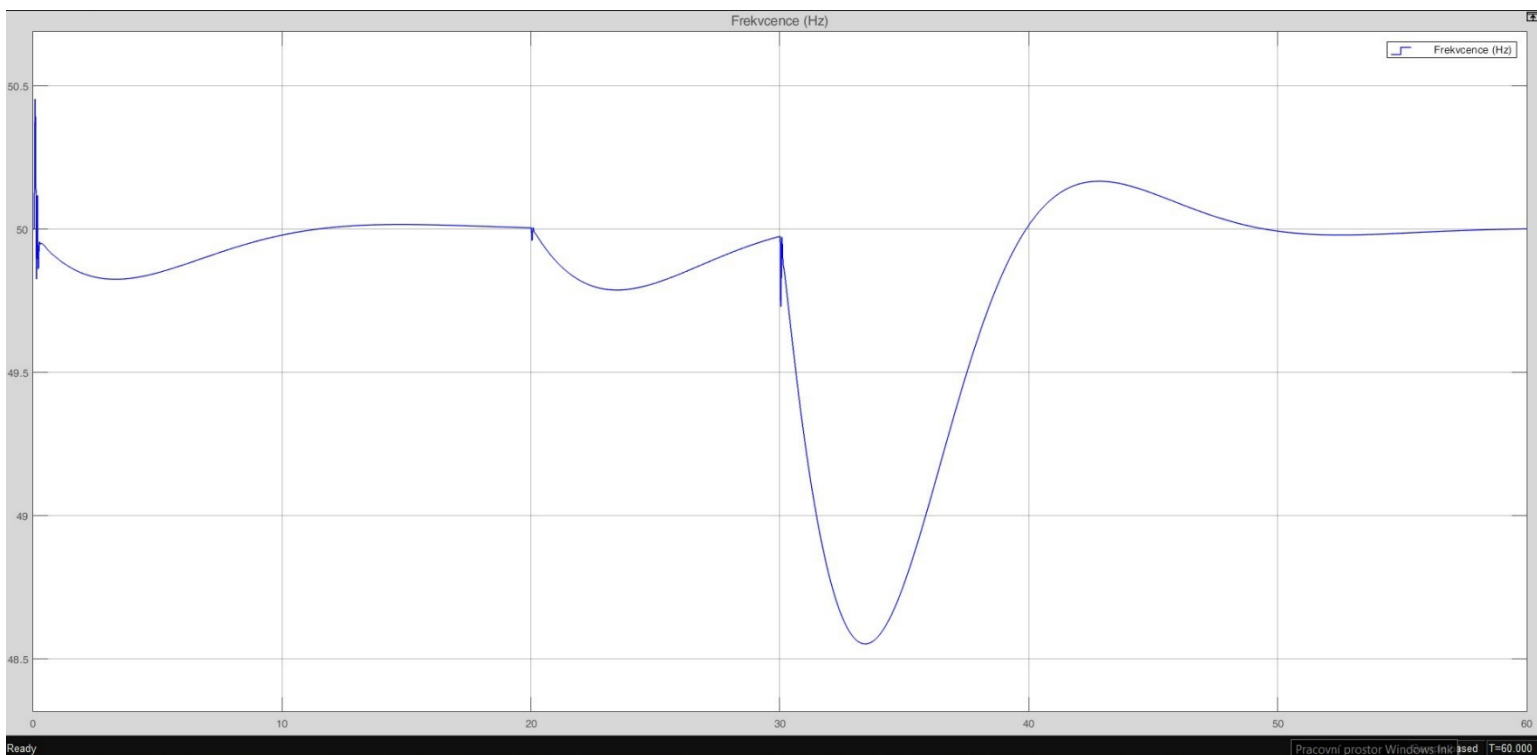
Obrázek 22 Průběh frekvence při modelové situaci

Na obrázku č.23 výkonu generátoru vidíme generovaný výkon elektrárny. Jak je vidět, tak elektrárna reaguje na připojený odběr zvýšením výkonu okamžitě. Při připnutí nezatíženého vedení V343 a V358 dojde k Ferrantiho jevu, kde se při vysokém napětí projeví veliká kapacita sítě a nabíjecí proudy začnou mít vliv na přenos. Z grafu je vidět jaký vliv má nezatížené vedení na generátor. V nezatížené vedení se začne projevovat nabíjecí kapacitní výkon a síť se začne chovat jako nový zdroj jalového výkonu. Tento jalový výkon by se případně mohl využít v asynchronních motorech, které by se případně připojovaly do sítě. V tomto případě synchronní generátor tuto jalovou energii kompenzuje.

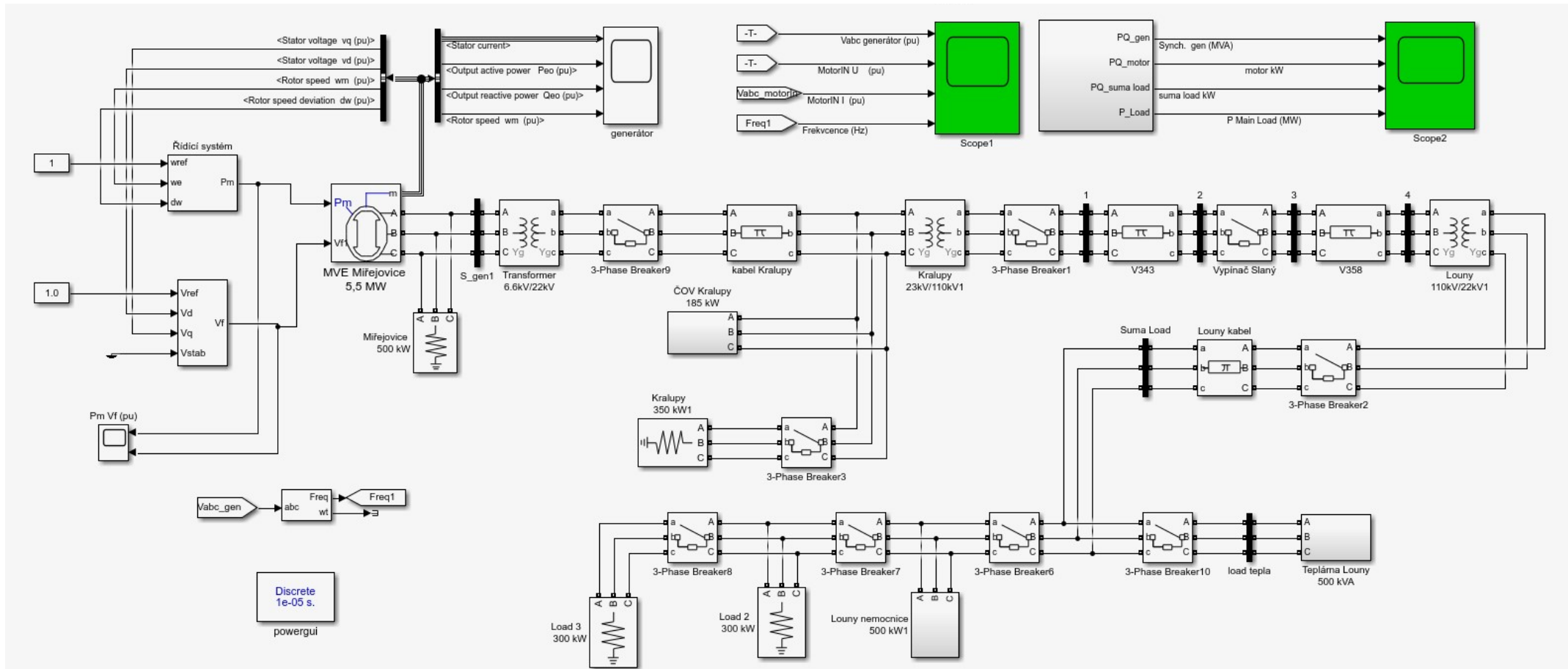


Obrázek 23 Výkon synchronního generátoru

Na obrázku č.25 je průběh frekvence při přinutí 550 kW. Z průběhu je zřejmé, že se jedná o maximální velikost odběru za předpokladu dodržení předem určených podmínek. Ostrovní provoz by případně zvládnul přinutí ještě větší zátěže, ale jak bylo zmíněno v dřívějších kapitolách, tak by mohlo dojít k frekvenčnímu kolapsu, který by opět vedl k rozpadnutí ES.



Obrázek 24 Průběh frekvence při přinutí zátěže 550 kW



Obrázek 25 Model soustavy

Závěr

Příchod decentralních zdrojů energie a začlenění do tuzemské energetiky se zdá jako nevyhnutelný fakt. Studie OTE uvažuje v koncepční variantě, že se budou decentralní zdroje podílet až 38 % na celkovém instalovaném výkonu v zemi. S ustupujícími konvenčními zdroji budeme muset najít způsob, jak bude moc část decentralních zdrojů přebrat podpůrné služby, které jsou nutné pro zachování kvality provozu ES. Největší příležitostí pro českou energetiku může být rozvoj bateriových úložišť, které by mohly v budoucnu poskytovat primární a sekundární regulaci. Pro nefrekvenční služby například blackstart se mohou v budoucnosti využívat i malé vodní elektrárny či teplárny s dostatečným výkonem a za splnění provozních podmínek.

V praktické části jsem se věnoval modelování ostrovního provozu napájeným malou vodní elektrárnou a činnosti dispečera PDS, který postupně do ostrovního provozu připojoval jednotlivá vytypovaná odběrová místa, jako je ČOV, nemocnice a teplárna. Model ukázal, že jednorázové připnutí zátěže není neomezené a maximální připojitelné zatížení je asi 550 kW, tak abychom dodrželi dovolený frekvenční rozsah. Dále model ukázal možný problém, který vzniká při přenosu malých výkonů přes vedení vysokého napětí. Přenášené výkony, které jsou menší, než přirozený výkon vedení způsobí Ferratiho jev. Vedení se začne chovat, jako zdroj jalového výkonu, který je posléze nutný kompenzovat. Modelovaný ostrovní provoz byl však stabilní, a tudíž úspěšný.

Za předpokladu, že by existovalo více těchto malých ostrovních provozů, tak je nereálné, aby dispečer dokázal všechny činnosti obsloužit a bylo by nutné zajištění nové logiky, která by část dispečerské činnosti zautomatizovala. Tato diplomová práce může být podnětem pro vytvoření plánů a scénářů pro nové ostrovní provozy na úrovni distribuční sítě.

Knižní zdroje

HOLATA, Miroslav, GABRIEL, Pavel, ed. *Malé vodní elektrárny: projektování a provoz*. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-0828-4.

MACHOVSKI, Jan, Janusz W. BIALEK a James R. BUMBY. *Power System Dynamics and Stability*. Warsaw University of Technology, Poland: Wiley, 1997. ISBN 0 471 97174 X.

IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies," in IEEE Std 421.5-1992 , vol., no., pp.1-56, 10 Aug. 1992, doi: 10.1109/IEEESTD.1992.106975.

Zdroje

- [1] *NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2017/1485: kterým se stanoví rámcový pokyn pro provoz elektroenergetických přenosových soustav*. In: . 2017, ročník 2017. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R1485&from=DE>
- [2] *Prezentace z Letní škola ČEPS 2019 - Havárie TI PS Oblast Západ*
<https://www.mvcr.cz/cthh/clanek/ochrana-kriticke-infrastruktury-ochrana-kriticke-infrastruktury.aspx>
<https://oze.tzb-info.cz/9517-blackout-a-obnovitelne-zdroje-energie>
- [3] *Přeshraniční toky* [online]. [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2012/cislo-4/prenosova-soustava-celila-pretokum.html>
- [4] MÁŠLO, Karel. a spol. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy* [online]. [cit. 2020-08-8]. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/PrilohyVyuka/%C5%98%C3%ADzen%C3%AD%20a%20stabilita%20elektriza%C4%8Dn%C3%AD%20soustavy.pdf>
- [5] *Obrázek Itálie blackout*<https://oenergetice.cz/zahranicni/turecky-blackout-pod-drobnohledem/>
- [6] *KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY* [online]. 2018 [cit. 2020-08-8]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>
- [7] GABRIEL, Pavel, František ČIHÁK a Petr KALANDRA. *Malé vodní elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01812-1.
- [8] *Rozvoj podporovaných zdrojů energie do roku 2030* [online]. 2019, , 231 [cit. 2020-08-08]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/elektroenergetika/obnovitelne-zdroje/rozvoj-podporovanych-zdroju-energie-do-roku-2030-podkladovy-dokument-nkep--244303/>
- [9] KOČÁRNÍK, Petr. *Větrné elektrárny: Výukové materiály předmětu Strojní struktury elektráren (B1M14SSE)*, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- [10] *Větrný potenciál* [online]. 2016 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: http://www.ufa.cas.cz/files/OMET/potencial_ufa.pdf
- [11] *INSTALLED POWER PLANT CAPACITY* [online]. 2020 [cit. 2020-08-08]. Dostupné z: <https://www.apg.at/en/markt/Markttransparenz/erzeugung/installierte-leistung>
- [12] ČAMBALA, Petr, Matěj HRUBÝ, Oldřich MUSELÍK, Tomáš ŠPAČEK a Jiří PORCHÁZKA. EGÚ BRNO, A. S. *Oponentní posudek k vybraným tématům z návrhu*

Národního Klimaticko-Energetického Plánu (NKEP) pro oblast FVE [online]. 2020 [cit. 2020-08-08]. Dostupné z: https://www.solarniasociace.cz/aktuality/20190107_oponentni-posudek-k-nkep-pro-fve.pdf

[13] *Wind capacity* [online]. [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: <https://gwec.net/51-3-gw-of-global-wind-capacity-installed-in-2018/>

[14] *Údaje o přenosové soustavě* [online]. 2020 [cit. 2020-08-8]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/udaje-o-ps>

[15] *Zpráva o očekávané dlouhodobé rovnováze mezi nabídkou a poptávkou elektřiny a plynu* [online]. 2016 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/en/about-ote/files-annual-reports/expected-balance-report-2016.pdf>

[16] *5,7 Prozent weniger Strom...* [online]. 2020 [cit. 2020-08-08]. Dostupné z: <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/zdw-57-prozent-weniger-strom/>

[17] *Putting energy efficiency first: consuming better, getting cleaner* [online]. 2016 [cit. 2020-08-08]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/MEMO_16_3986

[18] MELICHAR, Jan. *Hydraulické a pneumatické stroje, část vodní turbíny*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2013. ISBN 978-80-01-05283-9.

[19] *Ostrožská Lhota – FVE na browfieldu*. In: *TZB – info* [online]. [cit. 2020-08-08]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/18760-nejstarsi-fotovoltaicke-elektrarny-v-cr-vznikaly-na-strechach-a-brownfieldech>

[20] *FVE na brownfieldech* [online]. [cit. 2020-08-08]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/18760-nejstarsi-fotovoltaicke-elektrarny-v-cr-vznikaly-na-strechach-a-brownfieldech>

[21] *Kogenerační jednotka* [online]. [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: <http://enh.mvv.cz/kde-pusobime/czt-louny/>

[22] *Zpráva o Kralupy ČOV* [online]. In: . s. 1 [cit. 2020-08-08]. Dostupné z: <https://www.svas.cz/res/archive/265/229076.pdf?seek=1580719066>

[23] *Pí článek* [online]. [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/EN2/EN2_pr05_vedeniVVN.pdf

[24] *Hydrometeorologická data* [online]. [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: <https://chmi.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=d22f9918e6514ca5a84bc048ee32a950>

[25] *Rozhovor s* [online]. [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: https://www.irozhlas.cz/veda-technologie/priroda/sucho-povodi-vltavy-nadrze-leto-kubala_2005201034_pj

[26] Choo, Y. C., Muttaqi, K. M., & Negnevitsky, M. (2008). Modelling of hydraulic governor-turbine for control stabilisation. *ANZIAM Journal*, 49(December 2014), 681. <https://doi.org/10.21914/anziamj.v49i0.333>

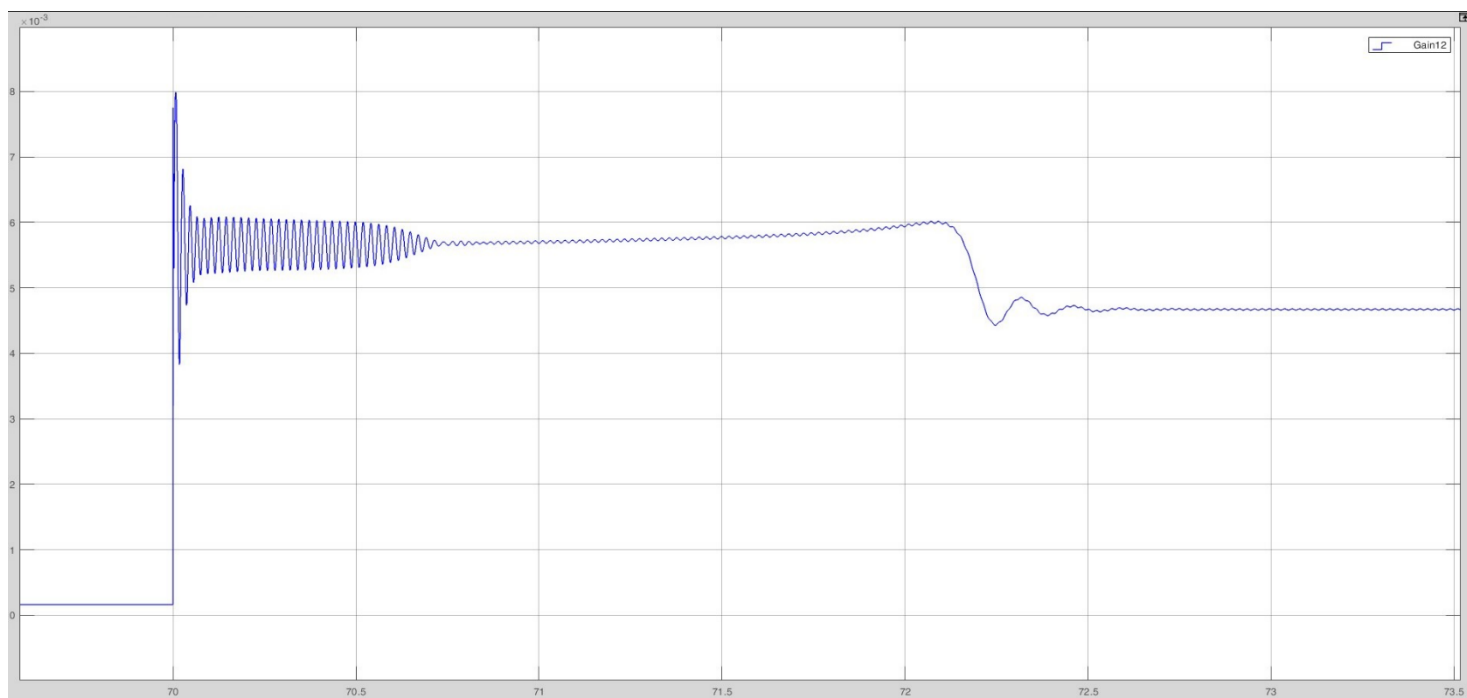
[27] Obrázek elektrárny [online]. [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: <http://czechhydro.com/>

[28] KASEMBE, Andrew, Karel MÁŠLO a Zdeněk HRUŠKA. Obnova soustavy po poruše typu blackout. *Elektroenergetika* [online]. , 3 [cit. 2020-08-08]. Dostupné z: <https://jenda.hrach.eu/f2/blackout.pdf>

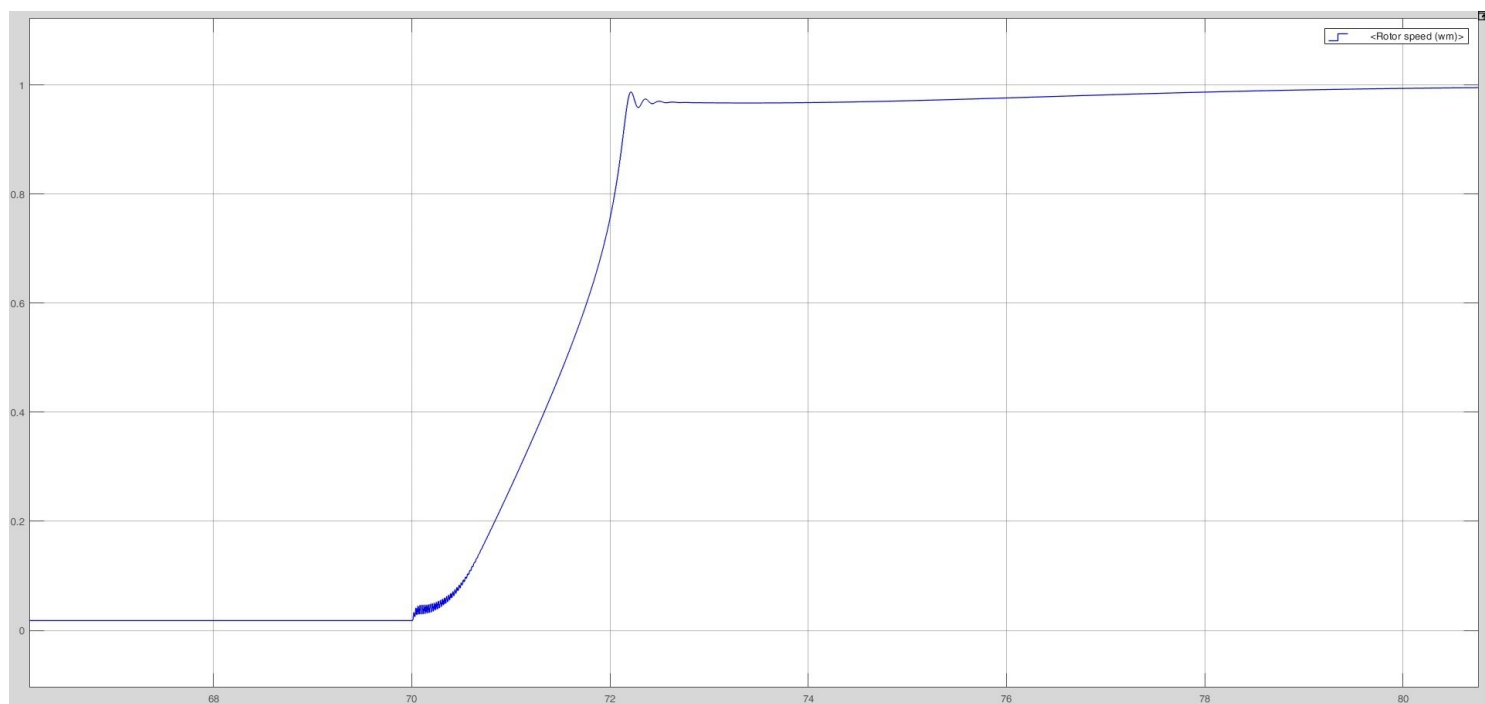
Přílohy

Parametry budícího systému

Popis veličiny	Veličina	Hodnota	Jednotka
Časová konstanta aperiodického bloku převodníku napětí statoru	T_r	20E-03	[s]
Zesílení regulátoru	K_a	300	[-]
Časová konstanta regulátoru	T_a	0,001	[s]
Zisk budiče	K_e	1	
Časová konstanta budiče	T_e	0	[s]
Přechodné snížení zisku aperiodického bloku-časová konstanta	T_b	0	[s]
Přechodné snížení zisku aperiodického bloku-časová konstanta	T_c	0	[s]
Zisk zpětné vazby	K_f	0,001	[-]
Časová konstanta zpětné vazby	T_f	0,1	[s]
Regulační rozsah	E_{fmin}	-11,5	[%]
Regulační rozsah	E_{fmax}	11,5	[%]
Proporcionální zesílení	K_p	0	[-]
Počáteční hodnoty svorkového napětí	V_{t0}	1	[%]
Počáteční hodnoty napětí pole	V_{f0}	1,25	[%]



Obrázek 276 Proudové zatížení teplotněného asynchronního motoru 0,3kW



Obrázek 267 Rozběh asynchronního motoru - otáčky