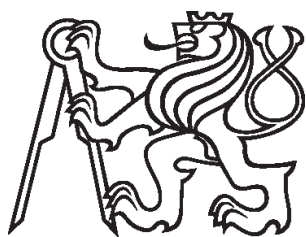


Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická

**Využití obnovitelných zdrojů
energie při obnově elektrizační
soustavy po poruše typu
blackout**

Jiří KULT

Vedoucí práce: Mgr. Ing. Vít Klein, Ph.D.
2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kult** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **507245**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Využití obnovitelných zdrojů energie při obnově elektrizační soustavy po poruše typu blackout

Název bakalářské práce anglicky:

Utilization of renewable energy sources in restoring the power grid after a blackout-type disturbance

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište aktuální strategii obnovy elektrizační soustavy ČR po systémové poruše typu blackout.
- 2) Uveďte reálné případy blackoutů, popř. jiných systémových poruch a popište jejich průběh.
- 3) Popište možnosti využití OZE pro obnovu elektrizační soustavy a porovnejte tyto možnosti se stávajícími zdroji zařazenými do strategie obnovy soustavy.
- 4) Sestrojte model vyhrazené části soustavy a nasimulujte obnovu napájení.
- 5) Zhodnoťte vhodnost využití OZE pro obnovu soustavy po systémové poruše typu blackout na základě provedených simulací.

Seznam doporučené literatury:

- 1) ČEPS, a. s.: Kodex PS, Část V.: Bezpečnost provozu a kvalita na úrovni PS.
- 2) MÁSLA, Karel. Řízení a stabilita elektrizační soustavy. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.
- 3) TOMAN, Petr. Provoz distribučních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- 4) TLUSTÝ, Josef. Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04939-6.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D. katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **08.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné 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 22. 5. 2024

Jiří Kult

Poděkování

Mé poděkování patří panu Mgr. Ing. Vítu Kleinovi, Ph.D. za jeho ochotu, vstřícnost a věnovaný čas při vedení bakalářské práce. Jeho poznámky a připomínky byly věcné a konstruktivní. Dále bych chtěl poděkovat pánům Ing. Tomáši Hábovi a Ing. Stanislavu Macejkovi ze společnosti ČEPS za poskytnutí potřebných informací k vypracování této práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za podporu během celého studia.

Abstrakt

Tato bakalářská práce řeší obnovu elektrizační soustavy po poruše typu blackout. V úvodu je shrnuta aktuální strategie obnovy elektrizační soustavy České republiky. Dále jsou zde zkoumány případy systémových poruch z různých částí světa. V další části jsou prostudovány zdroje, které jsou aktuálně zařazeny do systému obnovy elektrizační soustavy. Prozkoumáno je také možné použití obnovitelných zdrojů energie pro start ze tmy. V poslední části je provedena a následně i zhodnocena, simulace obnovy napájení rozvodny Krasíkov pomocí přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé stráně.

Klíčová slova

Blackout, start ze tmy, OZE, obnovitelné zdroje energie, přenosová soustava.

Typografická poznámka autora

Obrázky, tabulky a grafy, u kterých nejsou odkazy na použité zdroje, jsou vlastním dílem autora této práce.

Abstract

This bachelor's thesis addresses the restoration of the power grid following a blackout-type disturbance. The introduction summarizes the current strategy for power grid restoration in the Czech Republic. Subsequently, cases of system disturbances from various parts of the world are examined here. The following section studies the sources currently incorporated into the power grid restoration system. The possible utilization of renewable energy sources for blackout recovery is also explored. In the final section, a simulation of the power restoration of the Krasíkov substation, followed by an evaluation, is conducted using the Dlouhé stráně pumped-storage hydro power station.

Keywords

Blackout, black start, RES, renewable energy sources, transmission system.

Obsah

1. ÚVOD.....	1
2. AKTUÁLNÍ STRATEGIE OBNOVY ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY ČESKÉ REPUBLIKY	3
2.1. Kodex přenosové soustavy	3
2.2. Plán obnovy	3
2.3. Priority obnovy	5
2.4. Principy obnovy soustavy	6
2.4.1. Obnova napájení ze sousedních přenosových soustav.....	6
2.4.2. Obnova napájení z elektráren schopných startu ze tmy.....	6
3. PŘÍKLADY ROZSÁHLÝCH SYSTÉMOVÝCH PORUCH	9
3.1. Dopady blackoutu na společnost	9
3.2. USA a Kanada, 9. 11. 1965.....	9
3.3. Brazílie, 11. 3. 1999.....	10
3.4. USA a Kanada, 14. 8. 2003.....	11
3.5. Dánsko a Švédsko, 23. 9. 2003	12
3.6. Itálie, 28. 9. 2003	13
3.7. Rozpad UCTE na tři části, 4. 11. 2006	14
3.8. Rozpad synchronní zóny ENTSO-E, 8. 1. 2021	15
4. ZDROJE PRO OBNOVU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY.....	17
4.1. Stávající zdroje zařazené do systému obnovy soustavy	17
4.1.1. Elektrárna Dukovany	17
4.1.2. Elektrárna Temelín.....	17
4.1.3. Elektrárna Chvaletice.....	18
4.1.4. Teplárna Kladno.....	18
4.1.4.1. Zkouška Startu ze tmy: Obnova hlavního města Prahy	18

4.1.5.	Elektrárna Prunéřov II	19
4.1.6.	Elektrárna Tuřimice II	19
4.1.7.	Elektrárna Počerady	19
4.1.7.1.	Uhelná elektrárna Počerady.....	20
4.1.7.2.	Paroplynový cyklus Počerady	20
4.1.8.	Elektrárna Dlouhé stráně	20
4.1.8.1.	Zkouška Startu ze tmy: Dlouhé stráně – Chvaletice	20
4.1.9.	Elektrárna Orlík	21
4.1.9.1.	Zkouška Startu ze tmy: Orlík – Prunéřov II	21
4.1.9.2.	Zkouška Startu ze tmy: Orlík – Tuřimice II.....	22
4.1.10.	Elektrárna Daleřice.....	22
4.2.	Obnovitelné zdroje energie a jejich možné využití	23
4.2.1.	Vodní elektrárny	23
4.2.2.	Větrné elektrárny	24
4.2.3.	Fotovoltaické elektrárny.....	25
5.	SIMULACE OBNOVY NAPÁJENÍ Z ELEKTRÁRNY DLOUHÉ STRÁNĚ ...	27
5.1.	Schéma a použitá zařízení	27
5.2.	Provedení simulace.....	29
5.2.1.	Parametry prvků simulace	29
5.2.2.	Výsledky simulace	29
5.3.	Zhodnocení simulace.....	31
6.	ZÁVĚR.....	33
7.	SEZNAM LITERATURY	35

Obrázky

Obr. 2.1 Mapa přenosové soustavy ČR [4].....	4
Obr. 3.1 Průběh poruchy spínače přípojnic v rozvodně Horred [14].....	12
Obr. 3.2 Doba trvání výpadku v Itálii [15]	14
Obr. 3.3 Rozdělení jednotné evropské sítě během poruchy 4. 11. 2006 [19].....	15
Obr. 3.4 Rozdělení ENTSO-E na dva synchronní ostrovy 8. 1. 2021 [21]	16
Obr. 5.1 Zjednodušené schéma řešené části PS a jejího okolí.....	27
Obr. 5.2 Schéma simulace	28
Graf 1 Průběh napětí při postupném nabuzení generátoru HG1	30
Graf 2 Průběh napětí po nabuzení generátoru HG1 na vedení V457	31

Tabulky

Tab. 1 Parametry hydrogenerátoru HG1.....	28
Tab. 2 Parametry transformátoru T1.....	28
Tab. 3 Parametry vedení V457	28

Seznam zkratek

ČR	Česká republika
DS	Distribuční soustava
ES	Elektrizační soustava
JE	Jaderná elektrárna
MVE	Malá vodní elektrárna
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PI	Provozní instrukce
PS	Přenosová soustava
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna
V	Vedení (doplněné o číslo linky vedení, např.: V457)
VE	Vodní elektrárna
VS	Vlastní spotřeba
VTE	Větrná elektrárna
VVN	Velmi vysoké napětí
ZVN	Zvlášť vysoké napětí

1. ÚVOD

Elektrická energie hraje klíčovou roli ve společnosti, podporuje průmyslový rozvoj, pohodlí v domácnostech a technologický pokrok. Je nezbytná pro moderní komunikaci, digitální technologie a ekologické inovace. V dnešní době je klíčovým úsilím efektivní využívání elektrické energie a přechod na obnovitelné zdroje energie (dále také „OZE“) s cílem podporovat udržitelný životní styl a chránit životní prostředí.

S přibývajícím podílem OZE v elektrizační soustavě (dále také „ES“) vzniká výzva v oblasti regulace a stability sítě. Obnovitelné zdroje, jako jsou solární a větrné elektrárny, jsou charakteristické proměnlivým výkonem dodávaným do sítě. Určitá nepředvídatelnost v produkci obnovitelných zdrojů může vést k nerovnováze mezi výrobou a spotřebou elektrické energie, popřípadě velkým přetokům výkonu přes přenosovou soustavu (dále také „PS“), což ztěžuje úkol v udržování konstantní frekvence a napětí v elektrické síti.

Připravenost na možné poruchy v ES, včetně potenciálních blackoutů, je klíčovým prvkem pro zajištění stabilní a bezpečné dodávky elektřiny. I přes to, že blackouty jsou události výjimečné, jejich následky mohou být velmi vážné a mohou ovlivnit široké spektrum oblastí, od domácností až po průmyslová odvětví. Pro minimalizaci dopadů těchto poruch je nezbytné implementovat robustní plány krizového řízení a pravidelně provádět cvičné scénáře, aby se zvýšila schopnost rychlé reakce a obnovení dodávky elektřiny. Celkově vzato, efektivní připravenost na poruchy je klíčovým prvkem udržení spolehlivosti elektrické infrastruktury a ochrany společnosti před nepředvídatelnými událostmi.

Tato práce se věnuje popsání blackoutu a možnostem jeho řešení. Cílem práce je shrnutí aktuální strategie obnovy ES a prozkoumání využitelnosti OZE pro její obnovu. Zároveň si klade za cíl popsat případy z minulosti, které vedly k blackoutu, popř. k jiným rozsáhlým systémovým poruchám. Součástí práce je také simulace startu ze tmy pomocí přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé Stráně.

2. AKTUÁLNÍ STRATEGIE OBNOVY ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY ČESKÉ REPUBLIKY

Tato kapitola vychází z části V Kodexu PS (Bezpečnost provozu a kvalita na úrovni PS) [2].

2.1. Kodex přenosové soustavy

Na webu společnosti ČEPS je uvedeno: „Cílem Kodexu PS je vypracovat a veřejně publikovat informace pro účastníky trhu a pravidla, která stanoví: minimální technické, konstrukční a provozní požadavky pro připojení a užívání přenosové soustavy, podmínky pro poskytování podpůrných služeb a přenosových služeb.

K dosažení bezpečného a ekonomického provozu PS nestačí pouze splnění podmínek definovaných Kodexem PS. Další stupeň formalizace vztahů mezi provozovatelem a uživatelem PS představují provozní instrukce Dispečinku ČEPS. Pojem provozních instrukcí je vymezen dispečerským řádem elektrizační soustavy České republiky. Celý tento soubor dokumentů – tj. Kodex PS a provozní instrukce Dispečinku ČEPS jsou chápány a vytvářeny jako minimální soubor pravidel nutných k zajištění bezpečnosti a spolehlivosti provozu PS.“ [3]

Kodex PS se skládá z několika částí. Strategii obnovy elektrizační soustavy České republiky (dále také „ČR“) popisuje část V (Bezpečnost provozu a kvalita na úrovni PS). Tato část nepopisuje pouze plán obnovy, popisuje také plán obrany (opatření k zamezení rozšíření poruchy), dlouhodobou bezpečnost a spolehlivost ES a v neposlední řadě také kvalitu elektrické energie v PS.

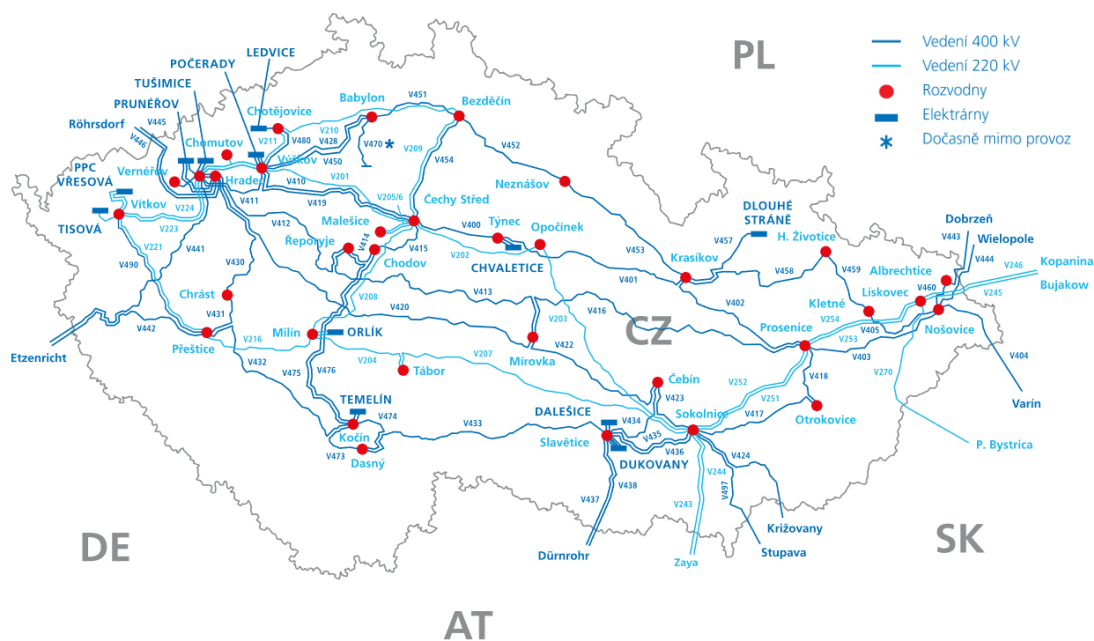
2.2. Plán obnovy

Klíčovým principem provozování ES je kritérium N-1. Některé části soustavy, např. vyvedení jaderných elektráren (dále také „JE“), jsou provozovány s kritériem N-2. Toto kritérium znamená, že výpadek jakéhokoliv jednoho prvku (vedení, transformátoru

apod.) neohrozí stabilitu ES. V takto provozované soustavě je malá pravděpodobnost výskytu rozsáhlejší poruchy. Nicméně i přesto existují případy, při kterých došlo k se skupení několika náhodných jevů, což vedlo k rozsáhlým systémovým poruchám. V některých případech došlo dokonce k úplnému rozpadu soustavy – blackoutu. Zpracování strategie obnovy zajistí mj. zkrácení doby výpadku.

Plán obnovy vychází z naší geopolitické polohy a ze skutečnosti, že se na našem území nachází několik vodních elektráren, které jsou schopny startu ze tmy. ES ČR je propojena se všemi čtyřmi sousedními státy. Navzdory tomu je česká ES napojena na pět provozovatelů přenosových soustav.

Na severozápadě je propojena pomocí dvou vedení 400 kV do německého Saska. Tuto část německé PS provozuje společnost 50Hertz Transmission. Na jihozápadě jsou dvě linky 400 kV do německého Bavorska, provozované společností TenneT. Do Rakouska vedou dvě vedení na hladině 400 kV a dvě na hladině 220 kV. Rakouskou PS provozuje společnost APG. Se Slovenskem jsme propojeni třemi linkami 400 kV a jednou linkou 220 kV. Na Slovensku je provozovatelem PS společnost SEPS. S Polskem jsme propojeni, tak jako s Rakouskem, dvěma linkami na hladině 400 kV a dvěma na hladině 220 kV. Polským provozovatelem PS je společnost PSE. Celkově se jedná o jedenáct vedení na hladině 400 kV a pět vedení na hladině 220 kV. Všechna tato propojení lze vidět na následujícím obrázku.



Obr. 2.1 Mapa přenosové soustavy ČR [4]

Jak jsem již zmínil, součástí naší ES je několik vodních elektráren schopných startu ze tmy. Start ze tmy, někdy také označován jako black start, je schopnost uvedení daného zdroje do provozu bez napětí z vnější sítě.

Při obnově ES se využívá tzv. „open-all“ strategie. Jejím principem je vypnutí všech vypínačů v postižené oblasti, ať už automaticky nebo ručně. Důvodem pro použití této strategie je dosažení jasně definovaných výchozích podmínek, ze kterých může dispečer následně obnovit postiženou část ES.

2.3. Priority obnovy

Obnova elektrizační sítě má jasně definované priority:

1. vlastní spotřeba jaderných elektráren,
2. vlastní spotřeba systémových klasických elektráren,
3. hlavní město Praha,
4. velké městské aglomerace,
5. ostatní spotřebitelé.

Z předchozího seznamu je patrné, že nejvyšší prioritu pro obnovu napájení má vlastní spotřeba (dále také „VS“) JE. V případě kompletní ztráty napájení VS JE se jedná o nadprojektovou poruchu. V důsledku této poruchy může dojít k jaderné havárii. Proto je pro napájení VS JE přijato několik opatření, jejichž účelem je zajištění jaderné bezpečnosti. Pokud vypadne napájení, ať už pouze jednoho bloku (Unit Blackout) či celé JE (Station Blackout), je cílem přivést napětí na VS JE do jedné hodiny od výpadku. Tato doba je dána rychlostí vysušení parogenerátoru a okamžikem, kdy začne narůstat teplota v primárním okruhu JE.

Dalším, velmi důležitým, bodem v prioritách obnovy je VS systémových klasických elektráren. Jedná se o elektrárny připojené do PS, pomocí kterých bude probíhat další obnova soustavy, protože je důležité mít dostatečnou kapacitu výkonu před připojováním spotřebitelů. Hlavní město Praha je zvláštním bodem, protože se v Praze nachází mnoho institucí důležitých pro chod státu.

2.4. Principy obnovy soustavy

Plán obnovy ES vychází ze dvou hlavních principů. Prvním, upřednostňovanějším, je obnova napájení ze sousedních PS. Druhým je pak obnova napájení z elektráren schopných startu ze tmy.

2.4.1. Obnova napájení ze sousedních přenosových soustav

Obnova ze sousedních PS probíhá následujícím způsobem. Dispečink ČEPS zapíná jednotlivá vedení 400 a 220 kV, transformátory a kompenzační prostředky. V součinnosti s dispečinkou provozovatele distribuční soustavy provádí postupné fázování a kruhování (sepnutí dvou synchronních částí sítě) obnovených částí systému. K těmto činnostem dispečer ČEPS využívá zejména tyto provozní instrukce (dále také „PI“):

- ČEPS PI 620-11: „Provoz a fázování ostrovů“,
- ČEPS PI 620-12: „Odstraňování poruch v provozu přenosové a distribučních soustav“,
- ČEPS PI 620-22: „Plán obnovy“.

Hlavním důvodem preferování tohoto principu obnovy napájení je schopnost rychlého získání stabilního napětí. Zjištění možností získání napětí a dohodnutí případné velikosti poskytnutého výkonu spadá do pravomoci dispečinku ČEPS. Dispečer dohodne potřebné operace a přibližnou velikost poskytnutého výkonu, což se obvykle pohybuje v rozsahu 200 MW s postupným náběhem. Celý postup je podrobně popsán v provozní instrukci ČEPS PI 620-22 (Plán obnovy).

Tato provozní instrukce popisuje postupy a priority obnovy příhraničních oblastí. Zároveň obsahuje upozornění pro manipulace, možné velikosti připojovaných oblastí a nezbytné technické a organizační informace o elektrárnách a rozvodnách.

2.4.2. Obnova napájení z elektráren schopných startu ze tmy

Jak jsem již uvedl v kapitole 2.3, nejdůležitější je přivést napětí na VS JE. Proto jsou zpracovány postupy na obnovu napájení vlastní spotřeby. Tyto postupy jsou popsány ve dvou provozních instrukcích:

- ČEPS PI 628-1: „Obnovení napájení VS EDUK po poruše typu blackout“,
- ČEPS PI 628-3: „Obnovení napájení VS ETEM po poruše typu blackout“.

EDUK představuje elektrárnu Dukovany a ETEM elektrárnu Temelín.

V případě, že není možné získat napětí ze zahraničních soustav má ČEPS zpracovány další provozní instrukce:

- ČEPS PI 620-13: „Obnova napájení VS ECHV z EORK“,
- ČEPS PI 620-21: „Obnova napájení VS ECHV z EDST“.

Využity jsou k tomu elektrárny Chvaletice (ECHV), Orlik (EORK) a Dlouhé Stráně (EDST). Tyto elektrárny jsou dále popsány v kapitole 4.1.

Dispečink ČEPS použije pro obnovu ten postup, který bude za daných okolností nejvhodnější. Rozhoduje se například podle dostupnosti a ovladatelnosti prvků ES, stavu okolních PS aj.

3. PŘÍKLADY ROZSÁHLÝCH SYSTÉMOVÝCH PORUCH

I přesto, že rozsáhlé systémové poruchy nejsou běžné, existuje mnoho příkladů z celého světa, které zdůrazňují důležitost být připraven na takové události. Následující podkapitoly přinesou konkrétní příklady masivních systémových poruch, které ve většině případů vyvrcholily v blackout.

Z vybraných příkladů lze vyzorovat určitou podobnost, a to sice takovou, že vždy došlo k souhře několika drobných poruch, které se následně kaskádovitě šířily. Zajímavá je vždy rychlost sledu událostí, jak se během několika okamžiků soustava dostane ze stabilního stavu do rozpadu.

3.1. Dopady blackoutu na společnost

Dodávka elektrické energie je pro dnešní společnost velmi důležitá, dalo by se říct kritická. Po několika hodinách výpadku přestává prakticky vše fungovat. Zastaví se kolejová doprava, vypadne internet, telefonní síť, veřejné osvětlení. Zastaví se dodávka vody, zároveň také odvod odpadních vod. Zkolabuje bankovní systém, nepůjde platit kartou, lidé nebudou mít přístup k finančním prostředkům na bankovních účtech.

Pokud trvá výpadek delší dobu, začnou se kazit potraviny v chladničkách a mrazničkách. Postupně nebude možné využívat dopravní prostředky na fosilní paliva (benzin a nafta), protože nebudou fungovat čerpací stanice. Bude narušeno zásobování potravinami. V nemocnicích budou, po vyčerpání náhradních zdrojů, ohroženi pacienti připojení na přístroje, nebude možné provádět operace. Taktéž může dojít k sociálním nepokojům. Při některých poruchách došlo dokonce i k rabování. (volně dle [5])

3.2. USA a Kanada, 9. 11. 1965

Ve večerních hodinách dne 9. listopadu 1965 došlo k jednomu z největších výpadků elektrické energie v historii USA. Tento výpadek postihl celý stát New York, části sedmi okolních států a části východní Kanady. Porucha začala v 17:16 a byla způsobena vy-

pnutím přenosové linky 230 kV poblíž Ontaria v Kanadě. To zapříčinilo selhání několika dalších silně zatížených linek. Následně byl vyvolán nárůst toku výkonu přenosovými linkami na západě New Yorku. To způsobilo kaskádovité vypnutí dalších linek. Nakonec došlo přibližně v 17:27 k rozpadu celé severovýchodní přenosové sítě.

Výpadek začal v době nejvyšší dopravní špičky, zpožďujíc miliony dojíždějících, uvěznil 800 000 lidí v newyorském metru a způsobil uvíznutí tisíců dalších v kancelářských budovách, výtazích a vlacích. Celkem bylo postiženo 30 milionů obyvatel na území o rozloze 207 000 km². Povoláno bylo 10 000 národních gardistů a 5 000 policistů.

Výpadek celkově trval asi 13 hodin. V Kanadě byla dodávka obnovena kolem 20. hodiny. Výpadek nejdéle trval přímo ve městě New York, kde byla dodávka obnovena druhého dne přibližně v 3:30. (volně dle [6], [7])

3.3. Brazílie, 11. 3. 1999

Blackout postihl sedm spolkových států v jihovýchodní části Brazílie. Sled událostí zahájil ve 22:16 bleskový výboj, který udeřil do rozvodny Bauru ve státě São Paulo. Úder blesku způsobil jednofázový zkrat a následné vypnutí pěti přírodních odboček na hladině 440 kV. Přenosové linky na této napěťové hladině byly pro stát São Paulo velmi důležité, jelikož byl přes ně přenášen výkon z vodních elektráren na řece Paraná. Z důvodu vypnutí těchto odboček byly vodní elektrárny odstaveny.

Nedostatek výkonu se snažila vykrýt elektrárna Itaipú. Nicméně tok výkonu přes střídavé linky 750 kV a stejnosměrné linky 600 kV, které spojují elektrárnu Itaipú se zbytkem ES, byl natolik velký, že způsobil vypnutí těchto linek. Postupným vypínáním dalších generátorů, z důvodu vybočení frekvence od jmenovitých hodnot, došlo k rozpadu sítě na mnoho částí.

Celkově tento výpadek postihnul až 75 milionů lidí. Ve městě Rio de Janeiro se v metru v době výpadku nacházelo přes 60 000 lidí. Do ulic navíc úřady povolaly 1 200 policistů, aby zabránily rabování. V São Paulu byly uzavřeny tunely, aby se předešlo loupežím. V některých postižených částech Brazílie byly dodávky elektrického proudu obnoveny už do jedné hodiny. Nejdéle trval výpadek v São Paulu a Rio de Janeiru a to sice asi čtyři hodiny. Brazílie navíc v tomto roce procházela investiční krizí, což omezovalo výdaje na údržbu a rozšiřování ES. (volně dle [8], [9])

3.4. USA a Kanada, 14. 8. 2003

Výpadek elektřiny v USA a Kanadě dne 14. srpna 2003 ovlivnil obyvatele v osmi státech USA a dvou kanadských provinciích. Během této události selhalo více než 400 přenosových linek a 531 bloků ve 261 elektrárnách. Hlavním důvodem vzniku blackoutu byl stavový estimátor, který byl navíc v kritický čas mimo provoz. Ten dodával chybné informace pro kontingenční analýzu v reálném čase, která simuluje možné stavy soustavy a dává dispečerovi informaci o tom, jestli soustava pracuje s bezpečnostním kritériem N-1. Oba tyto systémy byly v tu dobu ještě ve vývoji.

Prvním výpadkem, který by v případě správného zásahu dispečerů ještě neodstartoval sled událostí, byl ve 13:31 výpadek pátého bloku elektrárny Eastlake ve státě Ohio. Ve 14:02 vypadlo vedení 345 kV, což bylo způsobené zkratem vedení se stromem. Tento výpadek také neměl přímý vliv na vznik blackoutu. Ve 14:40 zjistila obsluha stavového estimátoru, že neběží v automatickém režimu a přepnula jej do něj. Ten však pracoval s chybnými daty, jelikož informace o výpadku vedení ve 14:02 do něj nebyla zadána automaticky. O tomto výpadku se obsluha dozvěděla až v 15:29. Tím pádem estimátor pracoval správně až v 15:41. V 16:04 byly oba systémy přepnuty na automatiku, ale to už bylo pozdě pro včasné varování dispečerů. Mezi tím došlo k dalším výpadkům vedení po jednofázovém zkratu vodiče se stromem. Poté se už řetězově vypínala další vedení, načež došlo v 16:11 k rozpadu soustavy a následnému blackoutu.

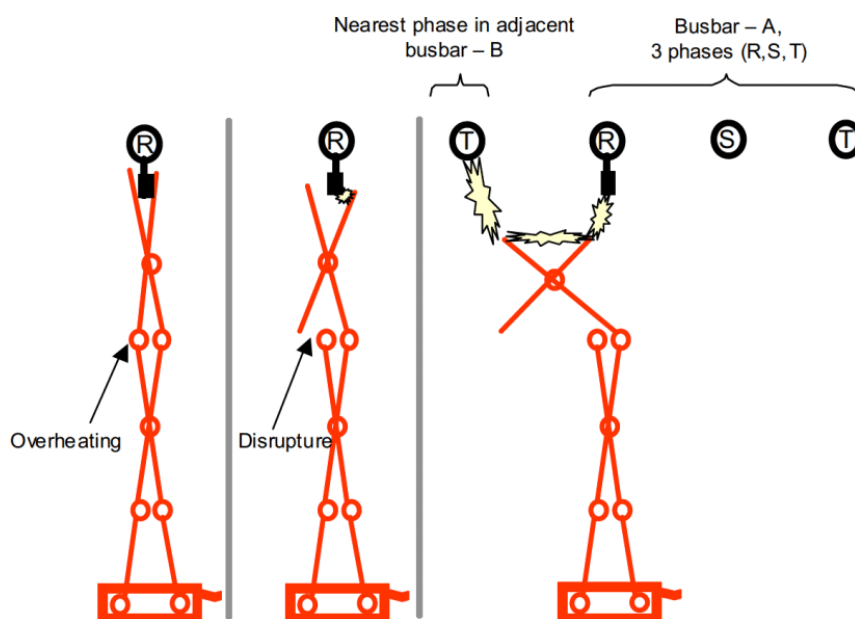
Většina míst obnovila dodávku elektrické energie do půlnoci (během sedmi hodin), někde dokonce už během dvou hodin okolo 18:00. Newyorské metro obnovilo služby v omezeném režimu kolem 20:00. Plný provoz byl v New Yorku a částech Toronta obnoven až 16. srpna. Výpadek postihl odhadem 55 milionů obyvatel na území o rozloze 15 000 km². V Kanadě to bylo přibližně 10 milionů obyvatel a 45 milionů obyvatel v USA. Obyvatelé New Yorku a dalších měst spali na chodnících. Výpadek si vyžádal nejméně tři lidské oběti. Škody byly vyčísleny až na 6 miliard dolarů. Vyskytly se i případy rabování. (volně dle [10], [11], [12], [13])

3.5. Dánsko a Švédsko, 23. 9. 2003

V úterý 23. září 2003 v poledne nastala pro Švédsko nejzávažnější porucha za posledních 20 let. Jižní část Švédska a východní část Dánska včetně jeho hlavního města Kodaně byly odříznuty od elektrické energie. Před poruchou byly provozní podmínky stabilní. Spotřeba ve Švédsku byla přibližně 15 000 MW. To odpovídalo normálu i přes neobvykle teplé počasí pro danou roční dobu.

Výroba v JE byla omezena kvůli probíhajícím každoročním revizím. Některé bloky byly odstavené z důvodu požadavků na jadernou bezpečnost. JE Barsebäck v jižním Švédsku byla mimo provoz, 1. blok byl trvale odstaven a 2. blok byl odstaven kvůli revizi (požadavky na jadernou bezpečnost). Kromě jaderných zdrojů byly v jižním Švédsku v provozu pouze menší vodní elektrárny a místní kogenerační jednotky.

První problém nastal v JE Oskarshamn ve 12:30. Z důvodu problému s ventily v okruhu napájecí vody byl snížen výkon 5. bloku z 1 235 MW na 800 MW. Nicméně to problém nevyřešilo a po 10 sekundách byl blok odstaven. Na tento výpadek byla ovšem síť připravena. Automatickou regulací frekvence na vodních elektrárnách v Norsku, severním Švédsku a Finsku byl tento výpadek zvládnut. Ve 12:35 nastal dvoufázový přípojnicový zkrat v rozvodně Horred, což mělo za následek odpojení JE Ringhals (ztráta 1 750 MW). Zkrat byl způsoben spínačem přípojnic. Na následujícím obrázku je zobrazen přibližný průběh poruchy spínače přípojnic.



Obr. 3.1 Průběh poruchy spínače přípojnic v rozvodně Horred [14]

Ztráta JE Ringhals způsobila kyvy výkonu a pokles frekvence. Ve 12:36 byl systém stabilizován, nicméně došlo ke zvýšení zatížení z důvodu přepínání odboček na distribučních transformátorech. To způsobilo napět'ový kolaps jihozápadní části Švédska, došlo k vybavení distančních ochran a vypnutí přenosových linek. Vznikl tak samostatný ostrov jižního Švédska a východního Dánska. Tento ostrov měl nedostatek činného i jalového výkonu, což způsobilo pokles napětí i frekvence a následně vypnutí zdrojů a blackout.

Obnova napájení trvala v rozsahu 1–6 hodin. Celkově tato událost ovlivnila asi 4 miliony obyvatel Švédska a Dánska. (volně dle [11], [12], [14])

3.6. Itálie, 28. 9. 2003

Dne 28. září 2003 nastal pro Itálii nejhorší výpadek elektřiny od 2. světové války. Zasažena nebyla pouze Itálie, ale celý Apeninský poloostrov a malá část Švýcarska. Ve 3:01 byla ve Švýcarsku vypnuta linka 380 kV Mettlen-Lavorgo z důvodu jednofázového zkratu vedení se stromem. Opětné zapnutí nebylo úspěšné a pokus o ruční zapnutí ve 3:08 také selhal. To znamenalo přerozdělení toku výkonu přes ostatní vedení. Kvůli blízkosti jiné švýcarské linky 380 kV Sils-Soazza byla právě tato linka přetížena. Ačkoliv byla snaha o snížení importu výkonu ze Švýcarska do Itálie, došlo k vypnutí linky Sils-Soazza ve 3:25 po jednofázovém zkratu se stromem.

Během následujících 12 sekund došlo k postupnému odpojení italské ES od zbytku jednotné evropské sítě. Ztrátou spojení se zbytkem evropské sítě došlo k poklesu frekvence, čemuž se i přes frekvenční odlehčování nepodařilo zabránit. Do 2 minut a 30 sekund po vzniku ostrovního provozu nastal blackout.

Porucha se vyskytla během kulturní akce Bílá noc. Jedná se o akci, kdy jsou bezplatné vstupy do muzeí a veřejných institucí. Znamenalo to tedy, že se v ulicích měst nacházelo mnoho lidí i v pozdních nočních hodinách. Výpadek uvěznil lidi v metru, kolem 110 vlaků bylo odřeknuto, což znamenalo problémy pro asi 30 000 cestujících. Blackoutem tak bylo ovlivněno až 56 milionů obyvatel.

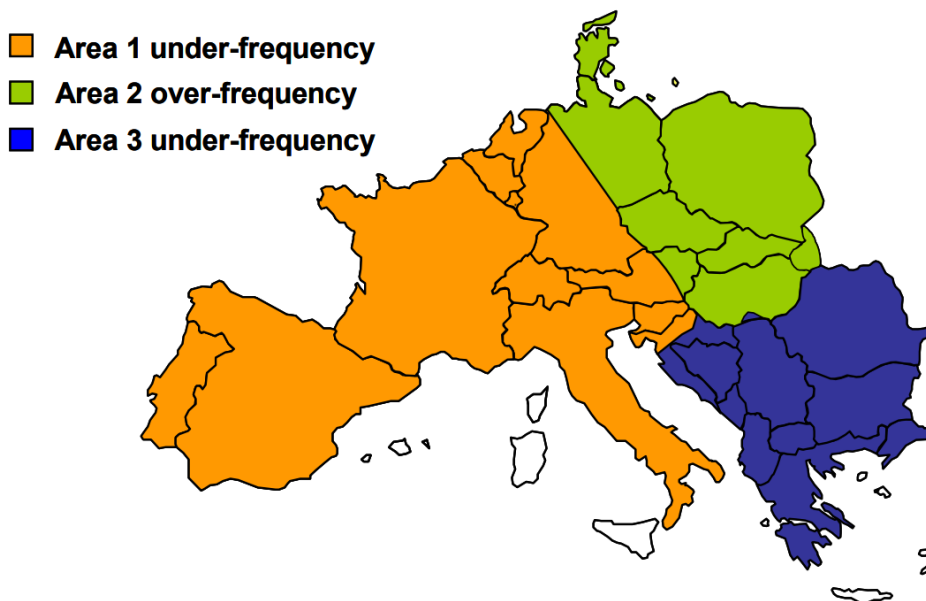


Obr. 3.2 Doba trvání výpadku v Itálii [15]

Během obnovy museli dispečeři provést více než 3 600 spínacích operací. Na obrázku výše je vidět přibližná doba trvání výpadku v jednotlivých částech Itálie. Kompletní obnova italské ES trvala 18 hodin a 12 minut. (volně dle [16], [17], [18])

3.7. Rozpad UCTE na tři části, 4. 11. 2006

Tato porucha nastala 4. listopadu 2006. Došlo k rozpadu propojení jednotné evropské sítě na tři ostrovní části. Ve 21:38 a ve 21:39 došlo k postupnému vypnutí dvojitého vedení 380 kV Conneforde – Diele na severu Německa. Tato linka nebyla vypnuta kvůli poruše, nýbrž kvůli průjezdu lodě po řece Emži. Ve 22:10:11 byl sepnut spínač přípojnic v rozvodně Landesbergen pro odlehčení vedení 380 kV Landesbergen – Wehrendorf. Po dvou sekundách byla tato linka vypnuta nadproudovou distanční ochranou. To způsobilo postupné vypínání dalších linek, až v čase 22:10:31 došlo k oddělení severovýchodního ostrova (na následujícím obrázku zvýrazněn zeleně). Ve 22:11:29 se oddělil západní (na následujícím obrázku zvýrazněn oranžově) a jihovýchodní ostrov (na následujícím obrázku zvýrazněn modře).



Obr. 3.3 Rozdělení jednotné evropské sítě během poruchy 4. 11. 2006 [19]

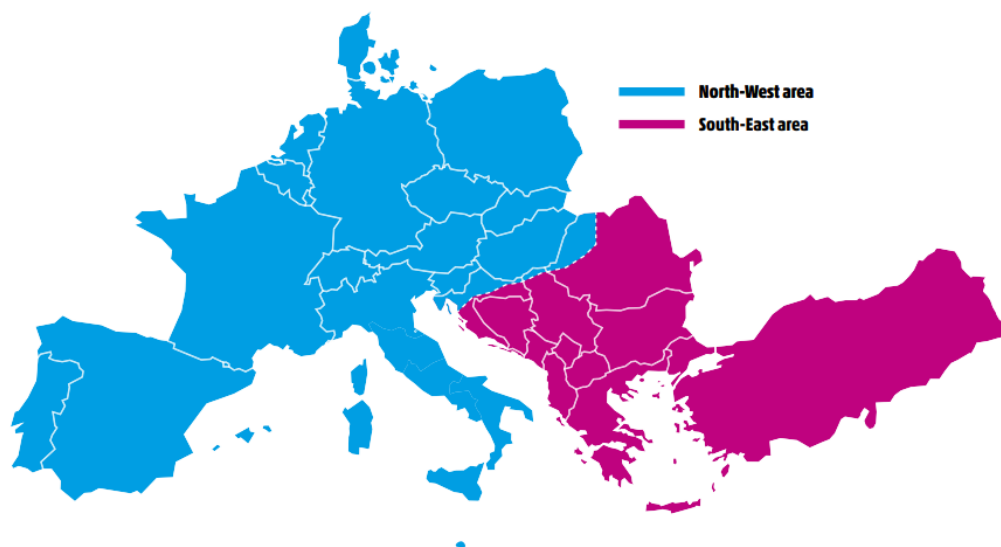
K opětovnému sfázování jednotlivých ostrovů došlo za 38 minut od rozpadu. Provozovatelé soustav v jednotlivých státech dokázali obnovit normální stav během dvou hodin od výpadku. V závěrečné zprávě byly označeny hlavní dvě příčiny poruchy. Jednou příčinou bylo nedodržení a nekontrolování kritéria N-1 po vypnutí dvojitého vedení 380 kV Conneforde – Diele. Druhou příčinou byla nedostatečná komunikace mezi jednotlivými provozovateli PS.

Celkem bylo výpadkem ovlivněno více než 10 milionů lidí v severním Německu, Francii, Itálii, Belgii a Španělsku. V severním Německu bylo zpožděno, o více než dvě hodiny, přes 100 vlaků. Ve Francii hasiči vyjízděli přibližně ke 40 lidem uvíznutým ve výtazích. (volně dle [11], [19], [20])

3.8. Rozpad synchronní zóny ENTSO-E, 8. 1. 2021

Během 8. 1. 2021 došlo k rozdělení jednotné synchronní evropské zóny ENTSO-E na dva ostrovy. Od jednotné ES se oddělil Balkánský poloostrov. Během tohoto dne byly velké přenosy výkonu severozápadním směrem. Porucha začala ve 14:04:25 v chorvatské rozvodně Ernestinovo. Došlo zde k rozpojení spínače přípojnic nadproudovou ochranou. To v rámci rozvodny Ernestinovo způsobilo oddělení vedení vedoucích na severozápad od vedení na jihovýchod. Toto oddělení vyvolalo přerozdělení toku výkonů na sousední vedení. Ve 14:04:48 bylo nadproudovou ochranou vypnuto srbské vedení Subotica – Novi Sad. Následně začaly vybavovat distanční ochrany okolních linek, což

ve 14:05:08 vedlo ke vzniku jihovýchodního ostrova. Tyto oblasti jsou vyznačeny na následujícím obrázku.



Obr. 3.4 Rozdělení ENTSO-E na dva synchronní ostrovy 8. 1. 2021 [21]

Vznik ostrova měl za následek deficit výkonu v severozápadní oblasti, přibližně -6,3 GW. Naopak v jihovýchodní oblasti byl přebytek výkonu, přibližně +6,3 GW. V severozápadní oblasti klesla frekvence až na hodnotu 49,74 Hz, následně se ustálila na 49,84 Hz. V jihovýchodní oblasti frekvence vzrostla až na 50,6 Hz, a poté se ustálila na hodnotě mezi 50,2 – 50,3 Hz. V ČR nedošlo k žádným mimořádným incidentům. Zdroje pouze přešly do režimu regulace otáček. K opětovnému propojení obou oblastí došlo v 15:07:31.

Z důvodu poruchy došlo k přerušení dodávky elektrické energie pro malou část odběratelů. Celkově se jednalo asi o 250 MW v obou částech Evropy. Byla také odpojena zařízení ve Francii a Itálii s celkovým odběrem kolem 1,7 GW. Zde se jednalo o tzv. odpojitelná zařízení, kdy je odběratel zavázán k odpojení od PS v případě poklesu frekvence pod určitou hodnotu.

Vyšetřovací komise vydala na základě této události několik doporučení. Jedním z nich bylo, že mají být nastavení zapojení rozvodů provedena tak, aby byly toky výkonu přes spínač přípojnic co nejmenší. Dále pak zlepšit koordinaci mezi jednotlivými provozovateli PS. V neposlední řadě také namodelování všech spínačů přípojnic, a případně i částí distribuční soustavy, pro potřebu výpočtů přípravy provozu. (volně dle [21], [22], [23])

4. ZDROJE PRO OBNOVU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY

4.1. Stávající zdroje zařazené do systému obnovy soustavy

Do systému obnovy ES je zařazeno několik zdrojů. Jedná se o různé typy elektráren. Jako první jsou využity elektrárny vodní (kapitoly č. 4.1.8, 4.1.9 a 4.1.10). Z vodních elektráren je poté přivedeno napětí do uhelných, popř. jaderných elektráren. Zvláštním případem je Teplárna Kladno (kapitola č. 4.1.4), která by pro případný start ze tmy použila plynovou spalovací turbínu.

4.1.1. Elektrárna Dukovany

Jaderná elektrárna Dukovany je první jadernou elektrárnou postavenou na území ČR. Nachází se u obce Dukovany v kraji Vysočina, přibližně 36 km západně od Brna. První blok byl uveden do provozu v květnu 1985. Od července 1987 jsou v provozu všechny čtyři bloky. Instalovaný výkon je 4×510 MW. [24]

Elektrárna je připojena do přenosové soustavy pomocí čtyř vedení (V483 – V486) na napěťové hladině 400 kV do rozvodny Slavětice. Dále je připojena k distribuční soustavě na hladině 110 kV pomocí čtyř vedení, dvě vedení vedou do rozvodny Slavětice a další dvě vedení do rozvodny Oslavany. [25], [26]

4.1.2. Elektrárna Temelín

Jaderná elektrárna Temelín je druhou jadernou elektrárnou na území ČR. Nachází se u obce Temelín v Jihočeském kraji, přibližně 24 km severně od Českých Budějovic. Instalovaný výkon elektrárny je $2 \times 1\,125$ MW. [27]

Výkon je z elektrárny vyveden do rozvodny Kočín. Do přenosové soustavy je elektrárna připojena pomocí dvou vedení V051 a V052 na hladině 400 kV. Připojena je také do distribuční soustavy pomocí dvou vedení na hladině 110 kV. [25], [26]

4.1.3. Elektrárna Chvaletice

Elektrárna Chvaletice se nachází u města Chvaletice v Pardubickém kraji, přibližně 23 km západně od Pardubic. Jedná se o parní elektrárnu spalující hnědé uhlí. Instalovaný výkon elektrárny je 4×205 MW. Elektrárna má navíc certifikaci na start ze tmy a také na ostrovní provoz. [28]

Připojena je na hladině 400 kV do přenosové soustavy pomocí vedení V471 a V472 vedoucích do rozvodny Týnec. Na hladině 110 kV je připojena také do distribuční soustavy. Dvě vedení do rozvodny Týnec a dvě vedení do rozvodny Opočínec. [25], [26]

4.1.4. Teplárna Kladno

Teplárna Kladno leží ve Středočeském kraji asi 23 km západně od Prahy. Teplárna má pět výrobních bloků (číselně označeny 4–8) o celkovém výkonu 524 MW. Slouží jako primární zdroj pro centrální zásobování teplem města Kladno. Hlavním palivem používaným v kladenské teplárně je hnědé uhlí. Kotle mohou také spalovat biomasu. (volně dle [28])

Připojena je do distribuční soustavy na hladině 110 kV [26].

4.1.4.1. Zkouška Startu ze tmy: Obnova hlavního města Prahy

Blok 8 je tvořen plynovou spalovací turbínou, který je navíc doplněn o pomocný diesel-generátor. Tento blok je tedy schopen startu ze tmy. V případě potřeby by tak 8. blok přivedl napětí na ostatní uhelné bloky, které by se podílely na obnově ES. To bylo ověřeno v rámci cvičení Blackout 2018.

Podle plánu obnovy by tento okamžik měl nastat již po hodině a půl od výpadku. Postupně spouštěné bloky by pokryly spotřebu nejen Kladna, ale i minimální nezbytnou potřebu elektrické energie celé části Prahy ležící na levém břehu Vltavy. Plný výkon všech bloků by měl být dosažen do pěti hodin od výpadku. Soustava by nejprve fungovala v ostrovním režimu a teprve poté, co by došlo k obnovení napětí v přenosové soustavě, by se ostrov opět přifázoval. (volně dle [29])

4.1.5. Elektrárna Pruněrov II

Elektrárna Pruněrov II je parní elektrárna spalující hnědé energetické uhlí. Leží u Kadane v Ústeckém kraji, přibližně 34 km severovýchodně od Karlových Varů. Instalovaný výkon je 3×250 MW. V areálu se dříve ještě nacházela elektrárna Pruněrov I o výkonu 4×110 MW, která byla v červnu 2020 odstavena. [30]

Elektrárna je připojena do přenosové soustavy pomocí vedení V465 a V466 do rozvodny Hradec na hladině 400 kV. Dále je připojena do distribuční soustavy pomocí jednoho vedení do rozvodny Verněrov na hladině 110 kV. [25], [26]

Jedná se o jednu z elektráren, kterou si ČEPS vytipoval jako možného kandidáta pro obnovu soustavy. [31]

4.1.6. Elektrárna Tušimice II

Elektrárna Tušimice II je parní elektrárna spalující hnědé uhlí. Leží 7 km od elektrárny Pruněrov II. Instalovaný výkon elektrárny je 4×200 MW. Elektrárny Pruněrov i Tušimice byly strategicky postaveny poblíž hnědouhelných Dolů Nástup Tušimice. [32]

Připojena je do přenosové soustavy pomocí vedení V463 a V464 do rozvodny Hradec na hladině 400 kV. Připojena je také do distribuční soustavy na hladině 110 kV. V areálu se také nacházela elektrárna Tušimice I, která byla již dříve odstavena. [25], [26]

Taktéž jako Pruněrov II byla tato elektrárna vytipována pro obnovu soustavy. [31]

4.1.7. Elektrárna Počeradý

Elektrárna Počeradý se nachází u obce Počeradý v Ústeckém kraji, přibližně 36 km jihozápadně od Ústí nad Labem. Areál počeradské elektrárny se dělí na uhelnou elektrárnu a na elektrárnu s paroplynovým cyklem.

Připojena je do přenosové soustavy na hladině 400 kV pomocí tří vedení V467, V468 a V469 vedoucích do rozvodny Výškov. Dále je připojena do distribuční soustavy na hladině 110 kV pomocí dvou vedení také do rozvodny Výškov. [25], [26]

4.1.7.1. Uhelná elektrárna Počerady

Uhelnou elektrárnu vlastní společnost Elektrárna Počerady, a.s., která patří pod skupinu Sev.en Česká energie a.s. Instalovaný výkon je 5×200 MW. Elektrárna poskytuje podpůrné služby pro přenosovou soustavu. Má také certifikaci pro ostrovní provoz. [28]

Navíc byla vytipována jako možný kandidát pro obnovu soustavy. [31]

4.1.7.2. Paroplynový cyklus Počerady

Paroplynový cyklus v Počeradech vlastní společnost ČEZ, a. s. Instalovaný výkon je 888 MW. Elektrárna se skládá ze dvou plynových turbín, každá o výkonu 304 MW, a jedné parní turbíny o výkonu 280 MW. [33]

4.1.8. Elektrárna Dlouhé stráně

Přečerpávací vodní elektrárna (dále také „PVE“) Dlouhé stráně se nachází v pohoří Jeseníky v Olomouckém kraji asi 55 km severně od Olomouce. Jedná se o největší přečerpávací elektrárnu v ČR. Instalovaný výkon je 2×325 MW. Dlouhé stráně plní v soustavě několik funkcí. První je přeměna nadbytečné energie na špičkovou. Poté schopnost elektrárny plnit funkci výkonové rezervy, vyrábět regulační výkon, a tím regulovat kmitočet soustavy. Zároveň plní funkci kompenzační, tedy napomáhá regulaci napětí v soustavě. (volně dle [34])

K přenosové soustavě je připojena pomocí vedení V457 do rozvodny Krasíkov na hladině 400 kV. [25], [26]

4.1.8.1. Zkouška Startu ze tmy: Dlouhé stráně – Chvaletice

V roce 2017 byla vypracována studie o přivedení napětí na VS elektrárny Chvaletice z PVE Dlouhé stráně. Trasa vedla na hladině 400 kV přes rozvodny Krasíkov a Týnec. V rámci studie bylo provedeno několik simulací. Ty ověřily mimo jiné vliv spouštění zařízení VS na změny frekvence. Z výpočtu vyšlo najevo, že nejvyšší změna frekvence nastane při spouštění chladicího zařízení, a to 330 mHz. V noci 2. září 2017 následně proběhl úspěšný test.

Test začal oddělením plánované trasy od PS. Následně bylo provedeno spuštění PVE Dlouhé stráně v black start režimu. Generátor byl postupně nabuzen po rampě

1 kV/30 s na straně 22 kV. Následovalo spuštění VS elektrárny Chvaletice. Dále byla provedena zkouška reakce PVE Dlouhé stráně na nastavení žádané frekvence v rozsahu ± 100 mHz. Tím byla zkouška přivedení napětí v podstatě dokončena. Poté následovalo postupné vypnutí VS elektrárny Chvaletice, nabuzení linky rampou 1 kV/20 s na straně 22 kV a přifázování k PS v rozvodně Týnec. Před koncem testu byla vypnuta PVE Dlouhé stráně, aby mohlo dojít k propojení v rozvodnách dle normálního režimu. (volně dle [35])

V roce 2019 dostala PVE Dlouhé stráně certifikaci pro start ze tmy. V případě blackoutu by obnova začala pomocí dieselaagregátu v objektu kotelny elektrárny Dlouhé stráně. Jeho spuštění umožní spuštění vody z horní nádrže a roztočení jedné z turbín. Následně by došlo k nabuzení linky do rozvodny Krasíkov a dále do elektrárny Chvaletice. Celý proces dodání napětí by neměl trvat déle než půl hodiny. (volně dle [36])

4.1.9. Elektrárna Orlík

Vodní nádrž Orlík je nejobemnější akumulací nádrží v ČR. Nachází se ve Středočeském kraji asi 56 km jižně od Prahy. Instalovaný výkon elektrárny je 4×91 MW. Elektrárna je schopna najet na plný výkon za 128 sekund. [37]

Připojena je do přenosové soustavy pomocí dvou vedení V001 a V002 do rozvodny Milín na hladině 220 kV. [25], [26]

Existuje projekt, který má z elektrárny Orlík udělat přečerpávací elektrárnu. Dolní nádrž by tvořila vodní nádrž Kamýk a horní právě nádrž Orlík. Nynější Kaplanovy turbíny by byly nahrazeny reverzními Francisovými turbínami. Provoz by měl být zahájen v roce 2030. (volně dle [38])

ČEPS provedl během roku 2023 několik zkoušek Startu ze tmy u nově vytipovaných systémových elektráren.

4.1.9.1. Zkouška Startu ze tmy: Orlík – Pruněrov II

Zkouška byla provedena 14. 5. 2023. Během ní došlo k sestavení separátní trasy mezi elektrárnami Orlík a Pruněrov II. Trasa vedla po vedeních 220 kV (ČEPS) a 110 kV (ČEZ Distribuce), přičemž bylo napětí přivedeno na vlastní spotřebu elektrárny Pruněrov II. V rámci testu bylo spuštěno několik důležitých pohonů nezbytných pro výrobu

elektrické energie, včetně chladicího čerpadla a mlýnu vápence. Zkouška proběhla úspěšně. (volně dle [31])

4.1.9.2. Zkouška Startu ze tmy: Orlík – Tušimice II

V úterý 3. 10. 2023 byla provedena zkouška přivedení napětí na vlastní spotřebu elektrárny Tušimice II z elektrárny Orlík. Jednalo se o rozšířený test s najetím jednoho bloku tušimické elektrárny. V rámci testu došlo i k přifázování elektrárny k soustavě.

Trasa mezi Orlíkem a Tušimicemi byla přivedena do beznapěťového stavu (pro nasimulování rozpadu soustavy). Jednalo se o vedení 220 kV (ČEPS) a 110 kV (ČEZ Distribuce). Po úspěšném najetí elektrárny Orlík a přivedení napětí na VS elektrárny Tušimice II proběhlo najetí odstaveného tušimického bloku. Během testu se kontrolovaly systémové veličiny, zejména napětí a frekvence. Kontrolovala se také dynamika přechodných jevů z důvodu postupného připojování spotřebičů VS elektrárny Tušimice II. Zkouška byla úspěšně zakončena přifázováním elektrárny Tušimice II k PS v rozvodně Hradec. (volně dle [39])

4.1.10. Elektrárna Dalešice

Přečerpávací elektrárna Dalešice leží v těsné blízkosti jaderné elektrárny Dukovany, vzdálena je od ní přibližně 5 km. Elektrárna disponuje čtyřmi reverzními Francisovými turbínami. Instalovaný výkon je 475 MW. Rychlost najetí na plný výkon je 60 s pro turbínový režim a 150 s pro čerpadlový režim. Funguje tedy i jako okamžitá poruchová rezerva. Zároveň může sloužit pro regulaci napětí a jalového výkonu. Maximální doba v turbínovém režimu je pět hodin. (volně dle [40])

Připojena je do přenosové soustavy pomocí vedení V481 a V482 do rozvodny Slavětice na hladině 400 kV. [25], [26]

Spolu s malou vodní elektrárnou (dále také „MVE“) Mohelno umožňuje ostrovní provoz a start ze tmy. To z elektrárny Dalešice dělá velmi důležitý zdroj pro již zmíněnou elektrárnu Dukovany, v případě obnovy napájení vlastní spotřeby a následné obnovy ES. (volně dle [41])

4.2. Obnovitelné zdroje energie a jejich možné využití

4.2.1. Vodní elektrárny

Využívání energie vody má v českých zemích dlouhou historii. Již ve středověku se využívala pro pohon mlýnů a hamrů. Během průmyslové revoluce se následně začala využívat energie vody na výrobu elektrické energie.

Výkon vodní turbíny je dán následujícím vztahem:

$$P = Q \cdot H \cdot \rho \cdot g \cdot \eta \quad [\text{W}] \quad (1)$$

kde P je výkon turbíny [W],
 Q je průtok vody [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
 H je spád [m],
 ρ je hustota vody [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 g je tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],
 η je účinnost [-].

Z rovnice (1) je patrné, že hlavními parametry, na kterých závisí výkon elektrárny jsou průtok vody Q a spád H . Ačkoliv vodní elektrárny (dále také „VE“) v ČR nedosahují tak velkých průtoků ani spádů, v porovnání s vodními elektrárnami např. v Rakousku, má využití VE v ČR velký význam. Hlavní výhodou na našem území tedy nepředstavuje objem výroby, ale schopnost rychlého najetí, a tím pádem stabilizaci ES. VE jsou velmi levným zdrojem elektrické energie, který je využíván hlavně v pásmu špičkového zatížení (kromě průtočných elektráren, které se využívají v pásmu základního zatížení).

Vodní elektrárny se dělí dle zařazení do diagramu zatížení na průtočné a regulační. Jak jsem již zmínil, tak se průtočné elektrárny používají v pásmu základního zatížení. Je to dáno tím, že výkon průtočné elektrárny je dán hlavně aktuálním průtokem vody. Proto se její výkon nepřizpůsobuje momentálním požadavkům ES. Naopak regulační elektrárny se používají ve špičkovém a pološpičkovém pásmu zatížení. Ke své funkci využívají akumulaci (přehradní nádrž), ze kterého probíhá řízený odběr vody.

Speciálním druhem regulačních elektráren jsou elektrárny přečerpávací. Používají se pro pokrytí špičkového zatížení a rychlých výkonových změn. V případě největšího za-

tížení ES běží elektrárna v turbínovém režimu (voda v horní nádrži se využívá k výrobě). V době malého zatížení ES běží elektrárna v čerpadlovém režimu (voda se přečerpává z dolní nádrže do horní). (volně dle [42])

Použití VE pro start ze tmy je velice výhodné. Oproti uhelným a jaderným zdrojům, které pro start ze tmy potřebují přibližně 7–8 % jmenovitého výkonu, potřebují vodní elektrárny pro naběhnutí pouze cca. 0,5–1 %. To je dáno malou technologickou náročností. Pro svůj provoz primárně potřebují pouze buzení generátoru a ovládání ventilů u turbíny. Další výhodou pro start ze tmy je schopnost rychlého najetí. Při použití průtočných VE může nastat problém, pokud jsou dlouhodobá sucha a hladiny a průtoky řek klesají. (volně dle [43])

4.2.2. Větrné elektrárny

Energii větru lidstvo využívá již po staletí ve formě větrných mlýnů, plachetnic nebo vodních čerpadel. Vítr vzniká jako důsledek nerovnoměrného ohřevu zemského povrchu. Teplý vzduch stoupá vzhůru a studený vzduch se tlačí na jeho místo. První větrnou elektrárnu (dále také „VTE“) na světě postavil Američan Charles F. Bush v roce 1888. První větrné elektrárny na území ČR byly vyráběny koncem 80. let 20. století. (volně dle [44], [45])

Výkon VTE je dán následujícím vztahem [46]:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot c_p \cdot S \quad [\text{W}] \quad (2)$$

kde P je výkon VTE [W],
 ρ je hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 v je rychlost větru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
 c_p je účinnost stroje [-],
 S je plocha rotoru [m^2].

Z rovnice (2) vyplývá, že výkon VTE závisí hlavně na třetí mocnině rychlosti větru v a na ploše rotoru S . Účinnost stroje c_p je v ideálním případě $c_p = 0,59$. To je dáno fyzikálními zákony a jedná se o tzv. Betzův koeficient. Betzův koeficient respektuje maximální možné využití energie větru proudícího skrz turbínu. (volně dle [47])

Instalovaný výkon větrných elektráren v ČR je 352 MW (v roce 2023). Největší větrný park v ČR jsou Kryštofovy Hamry v Ústeckém kraji, který čítá 21 VTE o jmenovitém výkonu 2 MW. Celkový instalovaný výkon větrného parku Kryštofovy Hamry je 42 MW. [48]

Použití VTE pro start ze tmy by mohlo být možné s přihlédnutím k tomu, že mohou pracovat s různými rychlostmi otáčení rotoru, jsou schopny regulovat činný a jalový výkon a mají schopnost rychlého náběhu. Nicméně jsou velice závislé na počasí. Navíc i když mohou pracovat s různými rychlostmi otáčení rotoru, tak je jejich výkon velmi závislý na rychlosti větru. Ze vztahu (2) vidíme, že pokud rychlost větru klesne na polovinu, tak výkon elektrárny klesne osmkrát. To může negativně ovlivnit stabilitu frekvence a napětí v obnovované části ES. (volně dle [43])

4.2.3. Fotovoltaické elektrárny

Sluneční záření lze využívat dvěma základními způsoby. Je možné využívat záření k ohřevu, tzv. nepřímá přeměna slunečního záření nebo využívat fotovoltaického jevu k přímé přeměně slunečního záření na elektrickou energii. Nepřímou přeměnu využívají sluneční kolektory, kterými prochází teplotně nosné médium. Toto je vhodné k ohřevu vody a k vytápění. Dále existují koncentrační elektrárny, které pomocí soustavy zrcadel koncentrují záření do ohniskového absorberu. Tímto způsobem je možné dosáhnout vyšších teplot než u slunečních kolektorů. Proto je možné využívat koncentrační elektrárny k nepřímé přeměně slunečního záření na elektrickou energii.

V dnešní době se nejvíce využívá přímé přeměny pomocí fotovoltaických článků. Základem fotovoltaických článků je polovodičová dioda. Nejčastěji se vyrábí z křemíku. Dopadem fotonu na článek dojde k uvolnění elektronů, které se hromadí ve vrstvě N, mezi vrstvami vzniká elektrické napětí o hodnotě 0,5–0,6 V. Vhodným sérioparalelním zapojením lze dosáhnout potřebných hodnot napětí a proudu.

Největší fotovoltaickou elektrárnou (dále také „FVE“) je FVE Ralsko v Libereckém kraji. Její instalovaný výkon je 55,76 MW. Samotná elektrárna se skládá z pěti menších elektráren vzdálených od sebe několik kilometrů. (volně dle [49])

Celkový instalovaný výkon FVE v ČR je, dle statistik ERÚ za rok 2022, 2 100 MW. [50]

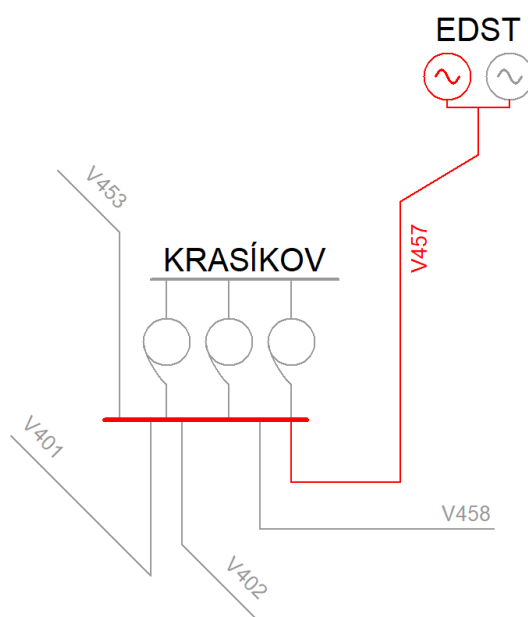
Důležitou součástí FVE je střídač. Střídače můžeme rozdělit podle několika kritérií. Pro potřebu startu ze tmy je důležitý způsob propojení s elektrickou sítí. Rozeznáváme střídače síťové (on-grid), hybridní a ostrovní (off-grid). Síťové střídače vyžadují pro svůj provoz připojení k elektrické síti. V případě výpadku se střídač ihned vypne. Hybridní střídače mohou kombinovat odběr energie ze sítě a využití energie z fotovoltaických panelů a z baterií. Ty se nabíjí v případě přebytku energie. Ostrovní střídače jsou taktéž propojeny s baterií, nicméně již nejsou připojeny k distribuční soustavě (dále také „DS“). (volně dle [51])

V dnešních podmínkách je použití FVE pro start ze tmy velice obtížné. V případě vhodného řízení je sice možné rychlé najetí, ale mohou nastat problémy se stabilitou z důvodu nerovnoměrného a proměnlivého ozáření fotovoltaických panelů, a také problémy s regulací napětí a frekvence. Použití síťových střídačů (on-grid) nedává smysl, jelikož, jak bylo popsáno v předchozím odstavci, v případě výpadku dojde k jejich vypnutí. Hybridní a ostrovní střídače by byly technicky schopné startu ze tmy. Využití ostrovních střídačů taktéž nedává smysl, protože nejsou propojeny s DS. Problém nejen s hybridními střídači představuje to, že řada těchto zařízení má pro potřeby startu ze tmy příliš malý výkon. Proto bychom potřebovali použití více střídačů najednou. Pro toto spojení je nutná vzájemná komunikace a řízení, což prozatím není technicky možné. Použití FVE pro start ze tmy tedy není v dnešní době proveditelné. Využití je teoreticky možné pouze pro jednotlivce, kteří v případě výpadku mohou fungovat v ostrovním režimu. (volně dle [52])

5. SIMULACE OBNOVY NAPÁJENÍ Z ELEKTRÁRNY DLOUHÉ STRÁNĚ

V této kapitole bude provedena simulace obnovy napájení pomocí PVE Dlouhé stráně. Přecherčovací vodní elektrárna Dlouhé stráně byla zvolena na základě zkoumání možností využití OZE k obnově ES v kapitole 4.2. Z této kapitoly vyšlo najevo, že jsou vodní elektrárny prozatím jediným spolehlivým zdrojem pro start ze tmy.

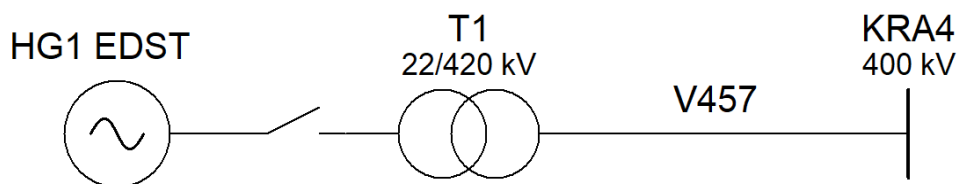
Cílem simulace bude dodat napětí do rozvodny Krasíkov. Simulace bude částečně vycházet z veřejně dostupného dokumentu „Black start test of pumped storage Dlouhé stráně“ [35], který byl vypracován společností ČEPS na základě provedeného testu. Tento test byl již stručně popsán v kapitole 4.1.8.1. Na následujícím obrázku je červeně znázorněna simulovaná část PS.



Obr. 5.1 Zjednodušené schéma řešené části PS a jejího okolí

5.1. Schéma a použité zařízení

Pro start ze tmy bude použita PVE Dlouhé stráně (EDST). V Dlouhých stráních k tomu bude využit hydrogenerátor HG1. Napětí bude vyvedeno přes blokový transformátor T1 na vedení V457 a dále do rozvodny Krasíkov (KRA4). Na následujícím obrázku je schéma simulované části PS.



Obr. 5.2 Schéma simulace

V následujících tabulkách jsou uvedeny charakteristické parametry jednotlivých prvků výše uvedeného schématu.

Parametry hydrogenerátoru HG1		
Jmenovitý činný výkon	P_N [MW]	320,0
Jmenovitý zdánlivý výkon	S_N [MVA]	355,5
Jmenovité napětí	U_N [kV]	22,0
Jmenovitý proud	I_N [A]	9 329,0
Synchronní reaktance	x_d [%]	130,0
Rázová podélná reaktance	x_d'' [%]	21,0
Mechanická časová konstanta	T_m [s]	7,0

Tab. 1 Parametry hydrogenerátoru HG1

Parametry transformátoru T1		
Jmenovitý zdánlivý výkon	S_N [MVA]	360
Jmenovité napětí primárního vinutí	U_{Np} [kV]	22
Jmenovité napětí sekundárního vinutí	U_{Ns} [kV]	420
Procentní napětí nakrátko	u_k [%]	12

Tab. 2 Parametry transformátoru T1

Parametry vedení V457		
Délka	l [km]	59,80
Činný odpor	R [Ω]	1,37
Indukční reaktance	X [Ω]	16,94
Susceptance	B [μS]	247,00
Průřez vodiče	S [mm^2]	500,00
Typ vodiče	AlFe 450/52	

Tab. 3 Parametry vedení V457

5.2. Provedení simulace

Simulace bude provedena pomocí programu MODES. Tento program využívá pro modelování dynamických stavů soustavy společnost ČEPS. Základní model soustavy byl dodán společností ČEPS. Pro potřeby této práce byl model upraven dle schématu na obr. 5.2.

5.2.1. Parametry prvků simulace

Parametry jednotlivých prvků jsou uvedeny v tabulkách v kapitole 5.1. Nabuzení generátoru HG1 je nastaveno dle [35] tak, aby na svorkách generátoru narůstalo napětí po rampě rychlostí 1 kV/30 s. V poměrných jednotkách to je pro generátor HG1 0,045 p.j./30 s. Simulace bude úspěšně ukončena po nabuzení generátoru na hodnotu výstupního napětí $u = 0,9$ p.j. a následném ustálení hodnot.

Pro generátor HG1 je nastavena remanence 10 %. Jedná se o indukované napětí do statorového vinutí roztočeného stroje bez napájení budicího vinutí. Tento fakt je ve skutečnosti dán remanentním magnetismem rotoru. Rotor synchronního generátoru je napájen stejnosměrným proudem a vytváří tak stejnosměrné magnetické pole. To po odpojení budicího vinutí od napájení zůstává na hodnotě remanentní magnetické indukce.

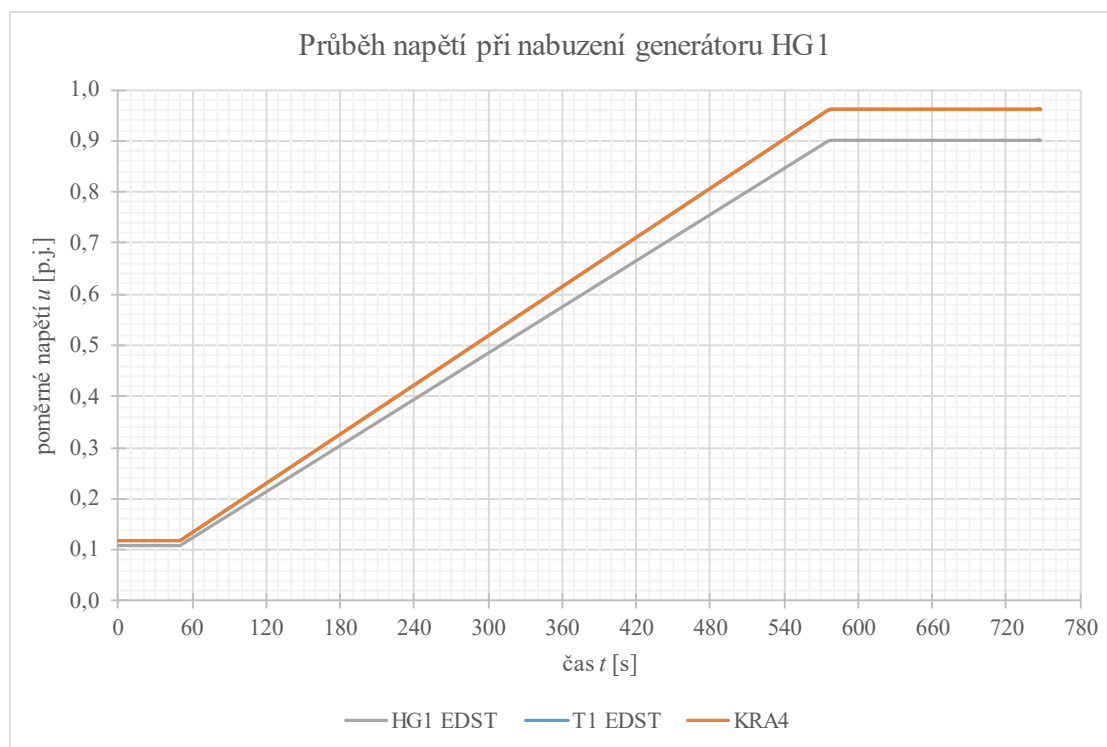
5.2.2. Výsledky simulace

Program MODES zobrazuje přímo grafy sledovaných veličin. Výstupem simulace tedy může být graf přímo vygenerovaný programem MODES. Data lze také vyexportovat pro pozdější zpracování, například v programu Microsoft Excel. Pro účely této práce je využita druhá varianta. Všechny grafy jsou proto vytvořeny pomocí Microsoft Excel.

Dobu T , po kterou bude trvat nabuzování, můžeme odhadnout krátkým výpočtem. Využijeme k tomu počáteční a žádanou poměrnou hodnotu napětí u_{\min} a u_{\max} a poměrnou hodnotu rychlosti nabuzování Δu generátoru HG1 uvedenou v kapitole 5.2.1.

$$T = \frac{u_{\max} - U_{\min}}{\Delta u} = \frac{0,9 \text{ p.j.} - 0,1 \text{ p.j.}}{0,045 \text{ p.j.} \cdot (30 \text{ s})^{-1}} = 533 \text{ s} \quad (3)$$

V následujícím grafu je zobrazen proces nabuzení.

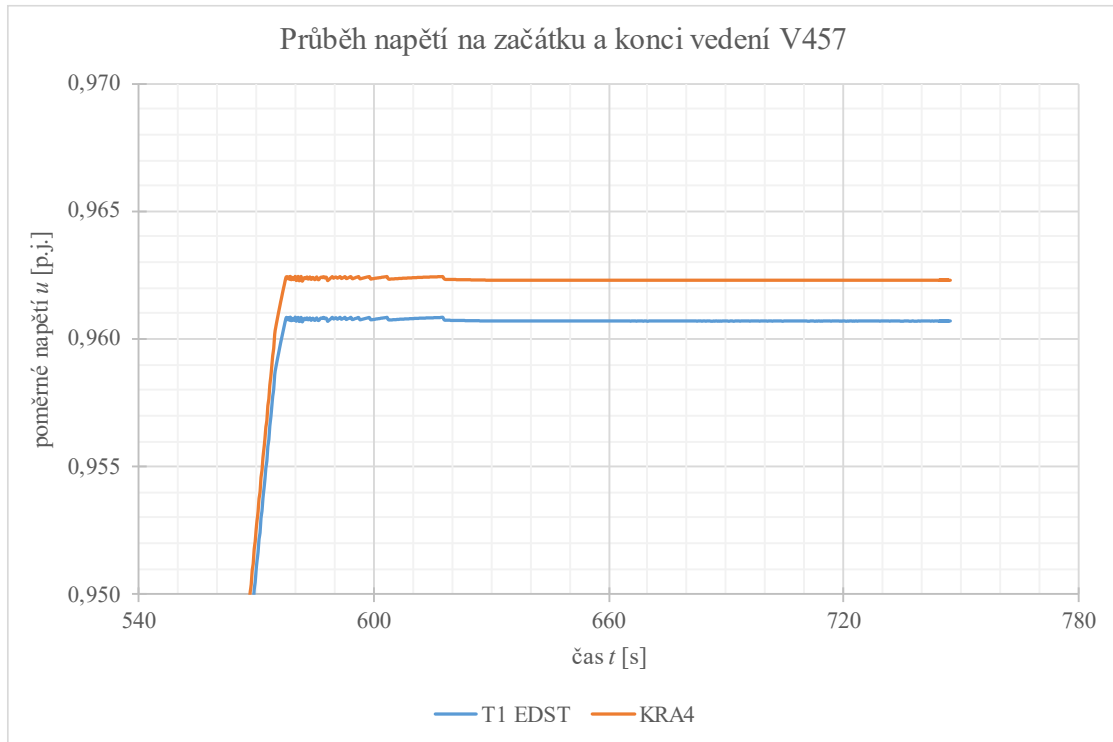


Graf 1 Průběh napětí při postupném nabuzení generátoru HG1

V grafu 1 představuje HG1 EDST napětí na svorkách generátoru HG1. T1 EDST reprezentuje napětí za transformátorem T1, to jest na začátku vedení V457. KRA4 představuje napětí na konci vedení V457 v rozvodně Krasíkov. Velikosti napětí T1 EDST a KRA4 byly téměř stejné. To znamená, že jsou v tomto grafu v zákrytu.

Do času $t = 50$ s vidíme, že napětí na generátoru bylo $u = 0,1$ p.j., to bylo způsobené nastavením remanence (vysvětleno v kapitole 5.2.1). V čase $t = 50$ s začalo nabuzování generátoru rychlostí $0,045$ p.j./30 s. V čase přibližně 578 s bylo dosaženo cílové napětí na generátoru $u = 0,9$ p.j. Nabuzení tedy trvalo přibližně 528 s.

Pro lepší znázornění situace po dokončení nabuzování a pro zobrazení mírného rozdílu v napětích T1 EDST a KRA4 jsou v následujícím grafu zobrazena pouze napětí v rozsahu 0,95–0,97 p.j.



Graf 2 Průběh napětí po nabuzení generátoru HG1 na vedení V457

Napětí KRA4 je vyšší než T1 EDST, ačkoliv jsou tato místa spojena vedením V457, a tak bychom očekávali, že napětí budou stejná, popřípadě nižší. Rozdíl napětí KRA4 a T1 EDST byl v ustáleném stavu přibližně 0,0016 p.j. To v absolutních jednotkách odpovídá napětí 0,644 kV. Tento rozdíl je způsoben Ferrantiho jevem.

Při Ferrantiho jevu se na konci vedení objeví větší napětí než na jeho začátku. To nastává především u vedení vvn a zvn při provozování v chodu naprázdno, popřípadě pokud je přenášený výkon příliš malý ve srovnání s přirozeným výkonem vedení. Ferrantiho jev se klasifikuje jako provozní přepětí. (volně dle [53])

5.3. Zhodnocení simulace

Vytvořená simulace potvrdila možnost využití přečerpávací vodní elektrárny pro start ze tmy. PVE Dlouhé stráně je schopna přivést napětí do rozvodny Krasíkov.

Nastavená rychlost nabuzení generátoru HG1 se potvrdila jako dostačující. Dle provedeného odhadu mělo nabuzení linky trvat 533 s. V simulaci trvalo nabuzení linky 527 s. Tento rozdíl je zanedbatelný. Můžeme říct, že simulace potvrdila vypočtený odhad. Do

rozvodny Krasíkov tedy může být z elektrárny Dlouhé stráně během 10 minut přivedeno napětí.

Na vedení V457 se projevil Ferrantiho jev. Ten ovšem nezpůsobil takové přepětí, které by ohrozilo chod ostrovního systému. Na základě toho lze usoudit, že je ve zvláštních případech možné provozovat vedení V457, napájené pomocí PVE Dlouhé stráně, ve stavu naprázdno.

Jednou z výhod použití přečerpávací vodní elektrárny oproti ostatním obnovitelným zdrojům je výkon zdroje. PVE Dlouhé stráně disponují výkonem 650 MW. Výkon největší větrného parku v ČR je 42 MW. Výkon největší FVE v ČR je 55,76 MW. V případě, že by bylo možné provést start ze tmy pomocí VTE nebo FVE (problémy spojené s použitím VTE a FVE jsou zmíněny v kapitole 4.2.2 respektive 4.2.3), mohlo by dojít k tomu, že instalovaný výkon nebude dostatečný pro napájení VS některé ze systémových elektráren a start ze tmy tak nebude možné provést.

Největší výhoda PVE je však v tom, že ačkoliv se řadí mezi OZE, tak není intermitentním zdrojem. V případě, že je v horní nádrži dostatečný objem vody, tak je start ze tmy možné provést kdykoliv bez ohledu na aktuální povětrnostní podmínky.

6. ZÁVĚR

Obnova chodu elektrizační soustavy je velmi komplexní činností. V případě blackoutu je nejdůležitější přivést napětí na vlastní spotřebu jaderných elektráren. K tomu má společnost ČEPS zpracované provozní instrukce. Napětí je možné přivést ze zahraničních soustav nebo z elektráren schopných startu ze tmy. Pokud nebude možné získat napětí ze zahraničních PS, je nutné provést black start jednou z certifikovaných elektráren. Vhodné je mít vícero takových elektráren pro případ, že některé zdroje budou mimo provoz, popř. nebudou v danou chvíli startu ze tmy schopné. Elektrárny pracující na principu OZE lze stavět rychleji oproti jiným zdrojům a jsou také rovnoměrněji rozmístěny. Nabízí se tak možnost využít tyto zdroje pro black start.

Využitelnost OZE pro obnovu chodu elektrizační soustavy je však v dnešní době omezená v podstatě pouze na vodní elektrárny. Hlavní problém VTE a FVE je intermitence. Pro start ze tmy jsou potřeba zdroje s dostatečným výkonem říditelným provozovatelem PS. Výkon větrných elektráren může být velice proměnlivý, protože je velice závislý na rychlosti větru. VTE tak lze využít pouze v robustnější soustavě. Pro využití FVE by bylo nutné upravit střídače tak, aby mezi nimi mohla probíhat vzájemná komunikace. Navíc velký počet střídačů potřebuje pro svůj provoz přítomnost sítě, což je pro start ze tmy diskvalifikuje. Využití OZE pro start ze tmy (kromě vodních elektráren) se tak jeví jako velice složité a za současných podmínek téměř neproveditelné.

Ovšem v případě, že nebude možné po roce 2038 provozovat uhelné elektrárny, budeme muset tyto systémové elektrárny nějakým způsobem nahradit. Problém nebude pouze v úbytku výkonu dodávaným těmito elektrárnami do soustavy v normálním režimu, ale také ve vyřazení důležitých zdrojů pro start ze tmy. Zmíněná možnost obnovy pomocí elektráren Dlouhá stráně a Chvaletice, tak nebude možná. Pokud budou stávající uhelné zdroje nahrazeny plynovými elektrárnami, budou nejspíše právě ty zařazeny do systému obnovy. Bude ovšem nutné zpracovat studie, vypracovat modely a provést simulace, zda bude možné certifikovat tyto zdroje pro obnovu ES.

7. SEZNAM LITERATURY

- [1] KOREL, Jan. *Šablona pro bakalářskou práci*. Verze 1. 2020.
- [2] *KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY – ČÁST V. - Bezpečnost provozu a kvalita na úrovni PS* [online]. Revize Prosinec 2023. ČEPS, 2023 [cit. 2023-12-28]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>
- [3] Kodex PS. *ČEPS, a.s.* [online]. 2024 [cit. 2024-01-12]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>
- [4] ČEPS, a.s. *ČEPS, a.s.* [online]. 2024 [cit. 2024-01-17]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/>
- [5] RADY PRO OBČANY - BLACKOUT. *Portál krizového řízení HZS JHM* [online]. c2023 [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://www.krizport.cz/rady/rady-pro-obcany-blackout>
- [6] LOEHR, George C. The \"Good\" Blackout: The Northeast Power Failure of 9 November 1965 [History]. In: *IEEE Power and Energy Magazine*. IEEE, 2017, s. 84-96. ISSN 1540-7977. Dostupné z: doi:10.1109/MPE.2017.2659379
- [7] LOOK BACK: Blackout of 1965 plunged 30 million into darkness, including NYC. In: *ABC7 New York - NY News, Local News, Breaking News, Weather* [online]. c2024 [cit. 2024-02-01]. Dostupné z: <https://abc7ny.com/blackout-1965-file-footage/1075637/>
- [8] FILHO, V.X., L.A.S. PILOTTO, N. MARTINS, A.R.C. CARVALHO a A. BIANCO. Brazilian defense plan against extreme contingencies. In: *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)*. IEEE, 2001, 834-839 vol.2. ISBN 0-7803-7173-9. Dostupné z: doi:10.1109/PESS.2001.970160

- [9] *The Darkest Night* [online]. 2011 [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20110612121234/http://www.brazzil.com/pages/p07mar99.htm>
- [10] *Interim Report on the August 14, 2003 Blackout* [online]. 2004 [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20080910221454/http://www.hks.harvard.edu/hepg/Papers/NYISO.blackout.report.8.Jan.04.pdf>
- [11] MÁŠLO, Karel. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. [Praha]: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.
- [12] ANDERSSON, G., P. DONALEK, R. FARMER, et al. Causes of the 2003 Major Grid Blackouts in North America and Europe, and Recommended Means to Improve System Dynamic Performance. In: *IEEE Transactions on Power Systems*. IEEE, 2005, s. 1922-1928. ISSN 0885-8950. Dostupné z: doi:10.1109/TPWRS.2005.857942
- [13] Obří "blackout" zahalil v roce 2003 část USA a Kanady do tmy. In: *OEnergetice.cz* [online]. 2024 [cit. 2024-02-06]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/obri-blackout-zahalil-v-roce-2003-cast-usa-a-kanady-do-tmy>
- [14] LARSSON, S. a A. DANELL. The black-out in southern Sweden and eastern Denmark, September 23, 2003. In: *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*. IEEE, 2006, s. 309-313. ISBN 1-4244-0177-1. Dostupné z: doi:10.1109/PSCE.2006.296324
- [15] SCHMIDTHALER, Michael a Johannes REICHL. Assessing the socio-economic effects of power outages ad hoc. In: *Computer Science - Research and Development*. 2016, s. 157-161. ISSN 1865-2034. Dostupné z: doi:10.1007/s00450-014-0281-9
- [16] *FINAL REPORT of the Investigation Committee on the 28 September 2003 Blackout in Italy*. 2004. Dostupné také z: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/ce/otherreports/20040427_UCTE_IC_Final_report.pdf

- [17] BERIZZI, A. The Italian 2003 blackout. In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004*. IEEE, 2004, s. 1673-1679. ISBN 0-7803-8465-2. Dostupné z: doi:10.1109/PES.2004.1373159
- [18] Biggest Blackouts In History: Italy 2003. In: *The Blackout report* [online]. c2024 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <https://www.theblackoutreport.co.uk/2021/09/28/italy-blackout-2003/>
- [19] *Final Report System Disturbance on 4 November 2006*. 2007. Dostupné také z: <https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/ce/otherreports/Final-Report-20070130.pdf>
- [20] 2006 European blackout. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2006_European_blackout&oldid=1197965670
- [21] *Continental Europe Synchronous Area Separation on 08 January 2021*. 2021. Dostupné také z: https://eepublicdownloads.azureedge.net/clean-documents/SOC%20documents/SOC%20Reports/entso-e_CESysSep_Final_Report_210715.pdf
- [22] ENTSO-E: Incident z 8. ledna měl počátek v chorvatské rozvodně. *OEnergetice.cz* [online]. 2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/prenos-elektriny/entso-e-incident-8-ledna-mel-pocatek-chorvatske-rozvodne#comments>
- [23] PTÁČEK, Jiří. *Rozdělení evropské propojené soustavy na dvě části vlivem poruchy v Chorvatsku v lednu 2021*. 2021. Dostupné také z: https://www.egubrno.cz/wp-content/uploads/2021/11/Ptacek_Rozdeleni_ES_Tabor2.pdf
- [24] Jaderná elektrárna Dukovany. *Skupina ČEZ* [online]. c2024 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/edu>

- [25] Česká přenosová a distribuční soustava - 2. díl: Rozvodny přenosové soustavy. *OEnergetice.cz* [online]. 2024 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/prenos-elektriny/ceska-prenosova-a-distribucni-soustava-2-dil-rozvodny-prenosove-soustavy>
- [26] *Open Infrastructure Map* [online]. 2024 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://openinframap.org>
- [27] Jaderná elektrárna Temelín. *Skupina ČEZ* [online]. c2024 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/ete>
- [28] Činnosti | Sev.en Česká energie. *Skupina | Sev.en Česká energie* [online]. c2022 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.7.cz/cz/cinnosti/#elektrina-a-teplo>
- [29] Kdyby Evropa v zimě zhasla, Prahu zachrání Teplárna Kladno. *Kladenské listy* [online]. c2017 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://kladenske-listy.cz/231011/kdyby-evropa-v-zime-zhasla-prahu-zachrani-teplarna-kladno/>
- [30] Elektrárny Pruněřov. *Skupina ČEZ* [online]. c2024 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarny-prunerov-58176>
- [31] ČEPS provedla zkoušku Startu ze tmy. *OEnergetice.cz* [online]. 2024 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/prenos-elektriny/ceps-provedla-zkousku-startu-ze-tmy>
- [32] Elektrárny Tušimice. *Skupina ČEZ* [online]. c2024 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarny-tusimice-58175>
- [33] Provozované paroplynové a plynové elektrárny a teplárny. *Skupina ČEZ* [online]. c2024 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/paroplynovе-a-plynovе-zdroje/provozovane-paroplynovе-elektrarny>

- [34] Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně. *Skupina ČEZ* [online]. c2024 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/dlouhe-strane-58155>
- [35] RYCHLY, Oldrich, Tomas LINHART a Martin PISTORA. Black start test of pumped storage Dlouhé stráně. In: *2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)* [online]. IEEE, 2018, s. 1-4 [cit. 2024-05-14]. ISBN 978-1-5386-4612-0. Dostupné z: doi:10.1109/EPE.2018.8395955
- [36] V případě blackoutu umožní elektrárna Dlouhé stráně black start. *Skupina ČEZ* [online]. c2024 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/v-pripade-blackoutu-umozni-elektrarna-dlouhe-strane-black-start-68390>
- [37] Vodní elektrárna Orlík. *Skupina ČEZ* [online]. c2024 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/orlik-58164>
- [38] Z Orlíku bude přečerpávací elektrárna. *Novinky.cz* [online]. c2003–2024 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/clanek/domaci-z-orliku-bude-precerpavaci-elektrarna-40444497>
- [39] ČEPS provedla zkoušku Startu ze tmy s najetím elektrárny Tušimice 2. *OEnergetice.cz* [online]. 2024 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/prenos-elektriny/ceps-provedla-zkousku-startu-ze-tmy-s-najetim-elektrarny-tusimice-2>
- [40] Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice. *Skupina ČEZ* [online]. c2024 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/dalesice-58156>
- [41] ČEZ v Dalešicích překonal dosavadní rekord ve výrobě elektřiny. *Skupina ČEZ* [online]. c2024 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/cez-v-dalesicich-prekonal-dosavadni-rekord-ve-vyrobe-elektriny-124785>

- [42] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [43] YAN, W., Q. HONG, D. LIU a A. DÝŠKO. FEASIBILITY STUDIES ON BLACK START CAPABILITY OF DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES. In: *The 10th Renewable Power Generation Conference (RPG 2021)* [online]. Institution of Engineering and Technology, 2021, s. 869-875 [cit. 2024-05-06]. ISBN 978-1-83953-606-9. Dostupné z: doi:10.1049/icp.2021.2257
- [44] Z historie větrných elektráren. *Odborné časopisy* [online]. c2014-2024 [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/z-historie-vetrnych-elektren--13364>
- [45] Z historie využívání energie větru v českých zemích. *ČSVE - Česká společnost pro větrnou energii* [online]. c2021 [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://csve.cz/clanky/z-historie-vyuzivani-energie-vetru-v-ceskych-zemich/36>
- [46] Velikost větrné elektrárny a její vývoj. *ČSVE - Česká společnost pro větrnou energii* [online]. c2021 [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://csve.cz/clanky/velikost-vetrne-elektarny-a-jeji-vyvoj/110>
- [47] Větrné elektrárny - princip, rozdělení, elektrárny v ČR. *OEnergetice.cz* [online]. 2024 [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/vetrne-elektarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni>
- [48] Aktuální instalace. *ČSVE - Česká společnost pro větrnou energii* [online]. c2021 [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://csve.cz/clanky/aktualni-instalace-vte-cr/120>
- [49] Fotovoltaické elektrárny - princip funkce a součásti, elektrárny v ČR. *OEnergetice.cz* [online]. 2024 [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/fotovoltaicka-elektarna-princip-funkce-a-soucasti>
- [50] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY ČESKÉ REPUBLIKY 2022*. 2023. Dostupné také z: <https://eru.gov.cz/sites/default/files/obsah/prilohy/eruelektro2022.pdf>

- [51] Typy střídačů. *WATTControl* [online]. c2024 [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://www.wattcontrol.cz/stridace/>
- [52] ELIA TRANSMISSION BELGIUM. *STUDY ON THE REVIEW OF THE BLACK START ANCILLARY SERVICES*. 2018. Dostupné také z: https://www.elia.be/-/media/project/elia/elia-site/public-consultations/20181005_consultation_document_1_note_a_review_blackstart_2018_en.pdf
- [53] TYRBACH, Jaromír. *Ferrantiho jev, vlnová impedance a přirozený výkon vedení* [Online]. 2007. Dostupné také z: https://projekty.osu.cz/akreditace2017/Ferrantiho_jev.pdf