



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky

Využitie HVDC technológie v distribučnej sústave pre  
zvýšenie resiliencie kritickej infraštruktúry  
Use of HVDC technology in the distribution system to  
strengthen the resilience of critical infrastructure

Diplomová práca

Študijný program : Elektrotechnika, energetika a management

Študijný odbor : Elektroenergetika

Vedúci práce : Prof. Ing. Josef Tlustý, CSc.

Bc. Katarína Čerňanová



# Zadanie



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čerňanová** Jméno: **Katarína** Osobní číslo: **420325**  
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 HVDC technologie v distribuční soustavě pro zvýšení resilience kritické infrastruktury**

Název diplomové práce anglicky:

**Use of HVDC technology in the distribution system to strengthen the resilience of critical infrastructure**

Pokyny pro vypracování:

1. Popište systém kritické infrastruktury a možnosti její resilience
2. Popište možnosti využití HVDC technologie pro posílení distribuční soustavy
3. Navrhněte opatření pro zvýšení resilience distribuční soustavy pro zásobování městských aglomerací
4. Proveďte případovou studii pro vybranou část distribuční soustavy s využitím a bez využití HVDC technologie. Při vyhodnocení výsledků se zaměřte na statickou stabilitu a zatížení komponent distribuční soustavy.

Seznam doporučené literatury:

1. KIM, Chan-Ki, Vijay K. SOOD, Gil-Soo JANG, Seong-Joo LIM a Seok-Jin LEE. HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems. Wiley-IEEE Press, 2009. ISBN 978-0-470-82295-1.
2. KUNDUR, Prabha. Power System Stability and Control. 1. vyd. New York: Electric Power Research Institute, 1994, ISBN 978-0-07-035958-1
3. SACCOMANNO, Fabio. Electric power systems: analysis and control. Hoboken, NJ: John Wiley, c2003, xiii, 730 p. ISBN 04-712-3439-7

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**prof. Ing. Josef Tlustý, CSc., katedra elektroenergetiky FEL**

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

Datum zadání diplomové práce: **17.01.2020** Termín odevzdání diplomové práce: **22.05.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

prof. Ing. Josef Tlustý, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna 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 studentky



## Prehlásenie

Prehlasujem, že som predloženú diplomovú prácu na tému „Využitie HVDC technológie v distribučnej sústave pre zvýšenie resiliencie kritickej infraštruktúry“ vypracovala samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a že som uviedla všetky použité informačné zdroje v súlade s Metodickým pokynom o dodržovaní etických princípov pri príprave vysokoškolských záverečných prác.

V Prahe, dňa 22.5.2020

Bc. Katarína Čerňanová



## Pod'akovanie

Na tomto mieste by som rada poďakovala všetkým, ktorí mi umožnili dokončenie tejto práce a absolvovanie štúdia. Poďakovanie patrí hlavne vedúcemu mojej diplomovej práce Prof. Ing. Josefovi Tlustému CSc. za cenné rady a prínosné konzultácie. Veľká vďaka patrí mojím rodičom a zbytku rodiny za veľkú podporu počas celého štúdia.





# Abstrakt

Cieľom tejto práce je overenie prínosu HVDC technológie pre zvýšenie resiliencie distribučnej sústavy. Práca je členená do troch častí. Prvá, rešeršná časť, práce sa zaoberá legislatívnym rámcom a vymedzením pojmov a definícií súvisiacich s resilienciou distribučnej sústavy a prehľadom o histórii a súčasných technológiách HVDC. Druhá, metodická, časť práce sa zaoberá popisom použitej Newton-Raphsonovej iteratívnej metódy pre riešenie ustáleného stavu striedavej elektrickej siete a modifikáciou tejto metódy pre riešenie ustáleného stavu striedavej siete s HVDC systémom. Na úvodné časti nadväzuje praktická časť práce – prípadová štúdia. Cieľom prípadovej štúdie je overenie možnosti ostrovnej prevádzky VVN distribučnej sústavy s a bez HVDC technológie pre zásobovanie kritickej infraštruktúry husto osídlených mestských aglomerácií. Výsledky študovaných variant sú analyzované na základe zaťaženia prvkov sústavy a uhlov uzlových napätí študovanej siete. Výsledky potvrdzujú predpoklad, že HVDC technológia do veľkej miery rozšíri možnosti zásobovania vybraných uzlov Prahy v prípade mimoriadneho stavu v elektrizačnej sústave.

## Klíčové slová

Kritická infraštruktúra, resiliencia, HVDC, LCC, Newton-Raphsonova iteratívna metóda, ostrovná prevádzka, ustálený stav sústavy, prípadová štúdia

## Abstract

The aim of this work is to verify the contribution of HVDC technology to increase the resilience of the distribution system. The work is divided into three parts. The first, research part of the work is focused on the legislative framework and definitions of terms related to the resilience of the distribution system and critical infrastructure and an overview of the history and current technologies of HVDC. The second, methodical, part of the work is focused on the description of the used Newton-Raphson iterative method for solving the steady state of the AC electrical network (load flow problem) and the modification of this method for solving the steady state of the AC network with HVDC system. The introductory part is followed by a practical part of the work - a case study. The aim of the case study is to verify the possibility of island operation of the HV distribution system with and without HVDC technology for the supply of critical infrastructure to densely populated urban agglomerations. The results of the studied variants are analyzed on the basis of the load of the system elements and the angles of the node voltages of the studied network. The results confirm the assumption that HVDC technology will greatly expand the possibilities of supplying selected nodes of Prague city in the event of an emergency state in the power system system.

## Key words

Critical Infrastructure, Resilience, HVDC, LCC, Newton-Raphson Iterative Method, Island Operation, Steady State, Load Flow, Case Study



# Obsah

<b>Prehlásenie</b> .....	<b>v</b>
<b>PodĎakovanie</b> .....	<b>vii</b>
<b>Abstrakt</b> .....	<b>ix</b>
<b>Obsah</b> .....	<b>11</b>
<b>Zoznam skratiek a symbolov</b> .....	<b>14</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>15</b>
<b>1 Kritická infraštruktúra</b> .....	<b>16</b>
1.1 Legislatívny rámec .....	16
1.1.1 Zákon č. 458/2000 Sb. – Energetický zákon .....	16
1.1.2 Zákon č.240/2000 Sb. – Krízový zákon .....	16
1.1.3 Vyhláška č.80/2010 Sb. o stave núdze .....	17
1.1.4 Štátna energetická koncepcia.....	18
1.1.5 Kódex prenosovej sústavy .....	19
1.2 Pojem resielencia .....	21
1.2.1 Faktory determinujúce resilienciu prvkov .....	21
1.2.2 Faktory determinujúce robustnosť.....	23
1.2.3 Faktory determinujúce obnoviteľnosť.....	23
1.2.4 Faktory determinujúce adaptabilitu .....	23
1.3 Štandardné možnosti resiliencie kritickej infraštruktúry .....	24
1.3.1 Distribučná sústava VVN .....	24
1.3.2 Zdrojová základňa.....	24
1.3.3 Distribučná sústava VN.....	24
1.4 Využitie pokročilých technológií pre zvýšenie resiliencie kritickej infraštruktúry.....	24
<b>2 Technológia HVDC</b> .....	<b>26</b>
2.1 História HVDC .....	26
2.2 Popis technológie HVDC.....	27
2.2.1 Rozdelenie z hľadiska technológie výkonovej elektrotechniky .....	27
2.2.2 Prevedenia LCC HVDC systému .....	29

2.3	Výhody a nevýhody HVDC .....	32
2.3.1	Technické aspekty HVDC systémov .....	32
2.3.2	Ekonomické aspekty HVDC systémov .....	32
2.3.3	Enviromentálne aspekty HVDC systémov .....	33
2.4	Potenciál využitia HVDC technológie pre zvýšenie resiliencie kritickej infraštruktúry .....	34
<b>3</b>	<b>Ustálený chod striedavých elektrických sietí .....</b>	<b>35</b>
3.1	Definícia problému ustáleného chodu striedavých elektrických sietí a možnosti riešenia.....	36
3.2	Newton-Raphsonová iteratívna metóda .....	39
3.2.1	Algoritmus Newton-Raphsonovej iteratívnej metódy .....	39
3.2.2	Vstupné dáta potrebné pre výpočet .....	40
3.2.3	Výstupy Newton-Raphsonovej iteračnej metódy.....	41
<b>4</b>	<b>Ustálený chod striedavých elektrických sietí s HVDC prenosom .....</b>	<b>42</b>
4.1	Možnosti zahrnutia HVDC systému do striedavej elektrickej siete.....	42
4.2	Implementácia HVDC systému do Newton-Raphsonovej iteratívnej metódy (prístup „unified“)	43
4.2.1	Použitá náhrada HVDC prenosu .....	43
4.2.2	Rovnicový popis usmerňovača .....	43
4.2.3	Rovnicový popis invertoru .....	44
4.2.4	Rovnicový popis zohľadňujúci pracovný režim HVDC .....	45
4.2.5	Modifikácia Newton-Raphsonovej iteratívnej metódy .....	45
<b>5</b>	<b>Prípadová štúdia .....</b>	<b>48</b>
5.1	Zadanie prípadovej štúdie .....	48
5.2	Popis analyzovaných zapojení .....	48
5.2.1	1. etapa ostrovnej prevádzky .....	52
5.2.2	2. etapa ostrovnej prevádzky .....	53
5.2.3	3. etapa ostrovnej prevádzky .....	54
5.2.4	4. etapa ostrovnej prevádzky .....	55
5.2.5	5. etapa ostrovnej prevádzky .....	56
5.2.6	6. etapa ostrovnej prevádzky bez HVDC a s využitím HVDC .....	58

5.3	Detailné vstupné dáta 6. etapy ostrovnej prevádzky.....	60
5.4	Hodnotiace kritéria.....	61
<b>6</b>	<b>Výsledky prípadovej štúdie .....</b>	<b>63</b>
6.1	Vyhodnotenie 1. až 5. etapy ostrovnej prevádzky .....	63
6.2	Vyhodnotenie 6. etapy ostrovnej prevádzky s a bez HVDC.....	65
<b>Záver .....</b>		<b>67</b>
<b>Referencie .....</b>		<b>68</b>
<b>Príloha A – výsledky uzly 1. – 5. etapa .....</b>		<b>70</b>
<b>Príloha B – výsledky vetvy 1. – 5. etapa.....</b>		<b>71</b>
<b>Príloha C – výsledky uzly 6. etapa bez HVDC.....</b>		<b>73</b>
<b>Príloha D – výsledky uzly 6. etapa s HVDC .....</b>		<b>75</b>
<b>Príloha E– výsledky vetvy 6. etapa bez HVDC .....</b>		<b>77</b>
<b>Príloha F – výsledky vetvy 6. etapa s HVDC.....</b>		<b>81</b>

## Zoznam skratiek a symbolov

AC – striedavý prúd

APG – Austrian power grid

ASEA - Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget

DC – jednosmerný prúd (direct current)

ECHV – elektrárň Chvaletice

EORK – elektrárň Orlík

ES ČR – elektrizačná sústava Českej republiky

ETEM – elektrárň Temelín

GE - General Electric Company

GTO – gate turn off thyristor

HDO – hromadné diaľkové ovládanie

HVDC – High voltage direct current

IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor

LCC – line commutated converter

PI ČEPS – prevádzková inštrukcia Českej energetickej prenosovej sústavy

PSE - Polish power system

SEPS - Slovenská elektrizačná prenosová sústava

VN – vysoké napätie

VS – vlastná spotreba

VSC – voltage source converter

VVN – veľmi vysoké napätie

ZVN – zvlášť vysoké napätie

## Úvod

V súčasnej modernej spoločnosti vyznačujúcej sa rýchlym tempom rozvoja a rastu sa do značnej miery zvyšujú riziká spojené s mimoriadnymi situáciami. Z hľadiska bezpečnosti obyvateľstva je preto v súčasnosti čoraz častejšie skloňovaný pojem kritickej infraštruktúry a jej resiliencie. Táto práca sa bude zameriavať na resilienciu kritickej infraštruktúry v oblasti zásobovania elektrickou energiou. Cieľom bude nájsť perspektívnu technológiu pre zvýšenie resiliencie kritickej infraštruktúry prostredníctvom VVN distribúcie a príslušných výrobných zdrojov v oblasti husto osídlených mestských aglomerácií Hlavného mesta Prahy a Stredočeského kraja. Pre tento účel bola vybraná technológia HVDC (High Voltage Direct Current).

Práca je rozčlenená do troch celkov, pričom každý celok je tvorený dvomi kapitolami. Prvý celok má rešeršný charakter a je zameraný na problematiku resiliencie kritickej infraštruktúry a HVDC systémy. Druhý celok má metodologický charakter ktorý je zameraný na metódy analýzy ostrovnej prevádzky sústavy počas mimoriadnych stavov. Tretí celok je tvorený prípadovou štúdiou zásobovania Hlavného mesta Prahy a Stredočeského kraja prostredníctvom elektrárne Kladno a VVN distribučnej sústavy.

Prvá kapitola pláče „Kritická infraštruktúra“ sa zameriava na definovanie legislatívneho rámca v danej oblasti, výklad základných pojmov a spojitostí. V tejto kapitole začína vymedzenie na možnosti využitia HVDC systému pre zvýšenie resiliencie kritickej infraštruktúry.

Druhá kapitola poskytuje prehľad o HVDC technológii. Historický vývoj tejto technológie v čase ukazuje, že v súčasnosti sa jedná overenú a spoľahlivú technológiu, ktorá sa stáva i finančne dostupnou. Táto technológia sa vyznačuje radou výhodných vlastností pre študované využitie pre systém kritickej infraštruktúry (riadený prenos vysokých výkonov a možnosť VVN káblových vedení a vonkajších vedení s miernejšími požiadavkami na koridor).

Tretia kapitola sa zameriava na metodológiu analýzy vybranej oblasti elektrizačnej sústavy pomocou výpočtu ustáleného chodu siete. Pre účely tejto práce bola zvolená Newton-Raphsonova iteratívna metóda, ktorá je detailne popísaná v tejto kapitole. Popis je doplnený i o formuláre pre zber vstupných dát.

Štvrtá kapitola sa zameriava na metodológiu analýzy vybranej oblasti elektrizačnej sústavy pomocou výpočtu ustáleného chodu siete s uvažovaním HVDC prenosu. Analýza systému, kde dochádza ku kombináciám striedavej elektrickej siete a jednosmerného systému prináša z výpočtového hľadiska komplikácie. V kapitole je popísaný matematický popis pre implementáciu HVDC systému do úlohy riešenia ustáleného chodu sústavy pomocou Newton-Raphsonovej iteratívnej metódy.

Piata kapitola je zameraná na zadanie prípadovej štúdie, jedná sa o špecifikovanie študovanej časti elektrizačnej sústavy. Špecifikované sú uzlové parametre a parametre vetví. Zároveň boli pre účely prípadovej štúdie navrhnuté etapy pre postupné rozširovanie ostrovnej prevádzky zásobovanej a udržiavanej prostredníctvom elektrárne Kladno. V prvej etape je uvažované s napájaním kritickej infraštruktúry mesta Kladno, v záverečnej etape je uvažované s napájaním kritickej infraštruktúry značnej časti Stredočeského kraja i Prahy. V poslednej etape sú analyzované aj zvýšené požiadavky na odber činného výkonu v Prahe. V tejto etape je uvažované nasadenie HVDC systému.

V poslednej šiestej kapitole sú zhrnuté výsledky prípadovej štúdie, ktoré hodnotia percentuálne zaťaženie vedení v študovanej časti siete a uhly fázorov uzlových napätí ktoré naznačujú pomery ohľadom statickej a dynamickej stability. Výsledky štúdie prinášajú závery v prospech využitia HVDC technológie.

# 1 Kritická infraštruktúra

## 1.1 Legislatívny rámec

V rámci energetického odvetvia je v Českej republike v platnosti viacero zákonov, vyhlášok a ďalších dokumentov ktoré sa zaoberajú bezpečnosťou a spoľahlivosťou prevádzky elektrizačnej sústavy a pojednávajú o krízových situáciách. V tejto kapitole zhrniem dokumenty, ktoré sú dôležité pre túto prácu a bližšie sa budem venovať ich vybraným častiam, ktoré súvisia s témou kritickej infraštruktúry.

Medzi základné legislatívne dokumenty patria :

- Zákon č. 458/2000 Sb. - Zákon o podmienkach podnikania a o výkone štátnej správy v energetických odvetviach a o zmene niektorých zákonov (energetický zákon) [1]
- Zákon č. 240/2000 Sb. – Zákon o krízovom riadení a o zmene niektorých zákonov (krízový zákon) [2]
- Vyhláška č. 80/2010 Sb. – Vyhláška o stave núdze v elektroenergetike a o obsahových náležitostiach havarijného plánu [3]
- Štátna energetická koncepcia [4]
- Kódex prenosovej sústavy [5]

### 1.1.1 Zákon č. 458/2000 Sb. – Energetický zákon

V energetickom zákone [1] je okrem iného v §54 popísaný stav núdze. Podľa tohto zákona je stav núdze definovaný ako stav, ktorý vznikol v elektrizačnej sústave v dôsledku niekoľkých faktorov a spôsobuje náhly a významný nedostatok elektriny alebo ohrozenie celistvosti elektrizačnej sústavy, prípadne ohrozenie bezpečnosti a spoľahlivosti prevádzky elektrizačnej sústavy buď na celom území štátu alebo vo vybranej oblasti.

Medzi faktory ktoré môžu spôsobiť stav núdze patria živelné udalosti, teroristický čin, havária, prípadne porucha na výrobných, prenosových alebo distribučných zariadeniach, opatrenie štátnych orgánov za núdzového stavu, stavu ohrozenia štátu alebo počas vojnového stavu, ďalej nevyrovnané bilancie elektrizačnej sústavy, prenos poruchy zo zahraničnej elektrizačnej sústavy alebo ohrozenie fyzickej bezpečnosti osôb.

Podľa tohto zákona má prevádzkovateľ prenosovej sústavy pre celé územie vyhlásiť presný čas vzniku alebo ukončenia stavu núdze a to prostredníctvom hromadných oznamovacích prostriedkov a prostriedkov dispečerského riadenia. Ďalej tieto informácie prevádzkovateľ prenosovej sústavy okamžite oznamuje ministerstvu, Energetickému regulačnému úradu, Ministerstvu vnútra, operátorovi trhu, krajským úradom a Magistrátu hlavného mesta Prahy. Prevádzkovateľ prenosovej sústavy riadi činnosti pri predchádzaní stavu núdze a pri stave núdze, kedy sú všetci účastníci trhu s elektrinou povinní podriaďiť sa obmedzeniam spotreby elektrickej energie prípadne zmene dodávky elektrickej energie.

### 1.1.2 Zákon č.240/2000 Sb. – Krízový zákon

Krízový zákon [2] sa zaoberá krízovým riadením a stanovuje pôsobnosť a právomoc štátnych orgánov a orgánov územných a samosprávnych celkov. Ďalej určuje práva a povinnosti fyzických a právnických osôb pri príprave na krízové situácie, ktoré nesúvisia s obranou pred vonkajším napadnutím.

Definície dôležitých pojmov:



- Kritická infraštruktúra – prvok alebo systém prvkov kritickej infraštruktúry, ktoré by v prípade narušenia ich funkcie mali závažný dopad na bezpečnosť štátu, na zabezpečenie základných životných potrieb obyvateľstva, na zdravie osôb alebo na ekonomiku štátu.
- Krízové riadenie – súhrn riadiacich činností orgánov krízového riadenia, ktoré sú zamerané na analýzu a vyhodnotenie bezpečnostných rizík a na plánovanie, organizáciu, realizáciu a kontrolu vykonávaných činností v súvislosti s prípravou na krízové situácie a ich riešenie, alebo v súvislosti s ochranou kritickej infraštruktúry.
- Krízová situácia – je mimoriadna udalosť podľa zákona č. 23/2000 Sb. o integrovanom záchrannom systéme, alebo narušenie kritickej infraštruktúry, prípadne iné nebezpečie pri ktorom je vyhlásený stav ohrozenia štátu, stav nebezpečia alebo núdzový stav
- Krízové opatrenie – technické alebo organizačné opatrenie určené na riešenie krízovej situácie a odstránenie jej následkov.

V prípade, že sú ohrozené životy, zdravie, majetok alebo životné prostredie a intenzita ohrozenia nemá značný rozsah pričom ohrozenie nie je možné odvrátiť bežnou činnosťou správnych úradov, orgánov krajov a obcí, činnosťou integrovaného záchranného systému, prípadne subjektov kritickej infraštruktúry, môže sa ako bezodkladné opatrenie vyhlásiť Stav nebezpečia. Tento stav sa môže vyhlásiť len na nevyhnutne dlhú dobu, maximálne však na 30 dní. Stav nebezpečia pre územie kraja alebo jeho časť vyhlasuje hejtman kraja, v Prahe ho vyhlasuje primátor hlavného mesta Prahy a okamžite o tom informuje vládu, Ministerstvo vnútra, susedné kraje a prípadne ďalšie dotknuté kraje. V prípade, že vzniknuté ohrozenie nie je možné odstrániť v rámci stavu nebezpečia, hejtman požiada vládu o vyhlásenie núdzového stavu.

Ďalej sú v tomto zákone definované práva a povinnosti. Čo sa týka subjektov kritickej infraštruktúry, tieto subjekty sú zodpovedné za ochranu prvku kritickej infraštruktúry a za účelom tejto ochrany majú povinnosť :

- a) vypracovať plán krízovej pripravenosti subjektu kritickej infraštruktúry do 1 roku odo dňa keď bol prvok kritickej infraštruktúry určený,
- b) umožniť príslušnému ministerstvu alebo inému správnomu úradu vykonať kontrolu plánu krízovej pripravenosti daného subjektu,
- c) oznámiť príslušnému ministerstvu alebo inému správnomu úradu informácie o organizačnej, výrobnnej alebo inej zmene, ktoré by mohli mať vplyv na určenie prvku kritickej infraštruktúry.

V pláne krízovej pripravenosti subjektu kritickej infraštruktúry sú identifikované možné ohrozenia funkcie prvku kritickej infraštruktúry a zároveň sú tam stanovené opatrenia na jeho ochranu.

### 1.1.3 Vyhláška č.80/2010 Sb. o stave núdze

Táto vyhláška [3] hovorí o obmedzení spotreby elektrickej energie a riadení zmien dodávok elektrickej energie do elektrizačnej sústavy.

V §1 tejto vyhlášky sú popísané spôsoby ktorými je možné obmedziť odoberaný výkon zo sústavy alebo meniť výkon, ktorý je do sústavy dodávaný. Ďalej sa tento paragraf venuje obmedzeniu spotreby elektriny. Na území kde bol vyhlásený stav núdze alebo kde hrozí tento stav je obmedzenie spotreby dané príslušným stupňom regulačného plánu, vypínacieho plánu, operatívnym vypnutím časti zariadenia alebo automatickým pôsobením frekvenčných relé. Toto obmedzenie podľa regulačného plánu sa nevzťahuje na technologickú vlastnú spotrebu elektrickej energie pre výrobu elektrickej energie a pre výrobu a dodávku tepla.

V nasledujúcom §2 je určené, že postup a rozsah obmedzenia odoberaného výkonu prípadne zmeny dodávaného výkonu v prípade stavu núdze spracováva technický dispečing prevádzkovateľa prenosovej sústavy v spolupráci s technickými dispečingmi prevádzkovateľov distribučných sústav, ktoré sú priamo pripojené na prenosovú sústavu. Plán zníženia odoberaného výkonu vypínaním vybraných spotrebičov je súčasťou programu vysielania signálu HDO.

Z dôvodu obmedzenia spotreby elektrickej energie pri stave núdze sú zákazníci zaradení do regulačných stupňov podľa regulačného plánu. Zaradenie do regulačných stupňov č.1 a č.2 vykonáva prevádzkovateľ distribučnej sústavy, zaradenie do regulačných stupňov č.3 až č.7 vykonáva buď prevádzkovateľ prenosovej sústavy alebo distribučnej sústavy na základe zmluvy alebo obchodník s elektrinou prípadne výrobca elektriny na základe zmluvy.

V prípade, že hrozí reálne riziko vzniku stavu núdze, môže prevádzkovateľ prenosovej alebo distribučnej sústavy vyhlásiť výstražný stupeň, ktorý je súčasťou regulačného plánu. Pri predchádzaní stavu núdze je obmedzenie spotreby elektrickej energie a zmena dodávky elektrickej energie vykonávaná buď automaticky podľa frekvenčného plánu alebo technickým dispečingom príslušného prevádzkovateľa sústavy.

Stav núdze je spravidla vyhlasovaný a odvolávaný vopred, avšak v prípade rýchleho rozpadu elektrizačnej sústavy môže byť tento stav vyhlásený dodatočne.

#### 1.1.4 Štátna energetická koncepcia

Hlavným cieľom Štátnej energetickej koncepcie [4] je zaistiť spoľahlivú a bezpečnú dodávku energie pre potreby obyvateľstva Českej republiky ako aj pre potreby ekonomiky Českej republiky. Snahou je aby táto dodávka energie bola šetrná k životnému prostrediu a aby bola za prijateľné a konkurencieschopné ceny. Cieľom je tiež zaistiť neprerušené dodávky energie počas krízových situácií k zabezpečeniu prežitia obyvateľstva a fungovania dôležitých zložiek štátu.

V rámci energetickej koncepcie Českej republiky do roku 2040 sú určené strategické priority energetiky Českej republiky:

- Priorita I – Vyvážený energetický mix
- Priorita II – Úspory a energetická účinnosť
- Priorita III – Infraštruktúra a medzinárodná spolupráca
- Priorita IV – Výskum, vývoj a inovácie
- Priorita V – Energetická bezpečnosť

Pre účely tejto práce je zaujímavá najmä Priorita V – Energetická bezpečnosť. Hlavnými cieľmi tejto priority je zvýšenie energetickej bezpečnosti a odolnosti Českej republiky a posilnenie schopnosti zaistiť nevyhnutné dodávky energií v prípade nahromadenia porúch, viacnásobných útokov proti kritickej infraštruktúre a v prípade dlhšie trvajúcej krízy v zásobovaní palivami.

Motívom tejto priority je vytvoriť predpoklady pre diverzifikované dodávky strategických palivo-energetických surovín. K dosiahnutiu tohto cieľu by mala prispieť diverzifikácia zdrojových oblastí surovín ako aj diverzifikácia prepravných ciest. Ďalej v domácom prostredí by sa mali vytvárať predpoklady pre stabilné dodávky elektrickej energie, plynu a tepla ako by sa mala udržiavať aj efektívna štruktúra štátnych hmotných rezerv strategických surovín.

Jedným z cieľov do budúcnosti je udržanie dovoznej závislosti Českej republiky v oblasti plyných a kvapalných palív maximálne na súčasnej úrovni. Ďalším cieľom je využívať hlavne domáce palivo-energetické zdroje, vytvárať priestor na ich vyhľadávanie, územnú a legislatívnu ochranu a nepripustiť

zmenu energetického mixu v prospech surovín, ktoré musí Česká republika dovážať, ich využívanie je neekonomické a nie je konkurencieschopné.

Medzi cieľmi do budúcnosti je aj udržanie rezerv strategických palivo-energetických surovín pri ktorých Česká republika nedisponuje ich primárnymi zdrojmi alebo len v obmedzenom množstve. Ďalej je záujem vytvárať systém dlhodobých zásob jadrového paliva či zabezpečovať ochranu energetickej infraštruktúry.

Do budúcnosti je snaha sústrediť sa na prípravu ostrovných prevádzok pre riešenie núdzových stavov, udržanie dostatočnej výšky regulačného výkonu a skvalitnenie právneho rámca pre zaistenie bezpečnosti prevádzky prvkov energetickej infraštruktúry.

Vybrané ciele stratégie do roku 2040:

- Podporovať projekty vzájomného prepájania kritickej infraštruktúry s dôrazom na severojužné prepojenie
- Zaistiť dlhodobu potrebný objem dodávok uhlia pre teplárenstvo vzhľadom na znižujúce sa ťažiteľné zásoby
- Zvýšiť podiel sústav zásobovania teplom, ktoré využívajú viacpalivové systémy a sú schopné rýchlej zmeny paliva na aspoň 30 % pre prípad krátkodobého zaskoku
- Udržiavať núdzové zásoby ropy a ropných produktov na úrovni minimálne 90 dní čistých dovozov
- Podporovať projekty, ktoré zaisťujú kapacitu zásobníkov plynu na území Českej republiky vo výške 35 – 40 % ročnej spotreby plynu
- Zaistiť podmienky pre chod prepravnej sústavy v reverznom smere a kapacity pre dodávky plynu zo severu či západu na úrovni aspoň 40 mil. m<sup>3</sup>/deň
- Udržiavať zásoby palivových článkov prevádzkovateľmi jadrových elektrární také, aby garantovali plnú prevádzku zariadenia na dobu aspoň 4 rokov
- Dopracovať územné energetické koncepcie tak aby zaisťovali pre väčšie mestá nevyhnutné dodávky energie v ostrovných prevádzkach v prípade núdzového stavu

#### 1.1.5 Kódex prenosovej sústavy

Kódex prenosovej sústavy [5] je z hľadiska spracovávanej problematiky významný najmä plánom obnovy po výpadku sústavy, ktorý je popísaný v časti V. Elektrizácia sústavy je navrhovaná a prevádzkovaná v súlade so spoľahlivostným kritériom N-1, pričom v prípadoch súvisiacich s vyvedením jadrových elektrární je navrhovaná a prevádzkovaná v súlade s kritériom N-2. Pravdepodobnosť poruchy v takto navrhutej sústave je nízka, avšak môžu sa vyskytnúť náhodné javy vedúce k rozsiahlej poruche alebo až k totálnemu výpadku sústavy, teda k Black-outu. Takýto výpadok sústavy so sebou prináša značné hospodárske straty, ktoré sú ovplyvnené hlavne dobou trvania poruchy resp. výpadku. Účelom plánu obnovy po výpadku sústavy je teda hlavne skrátiť dobu trvania výpadku.

#### **Stratégia obnovy**

Z pohľadu elektrickej polohy je elektrizácia sústavy Českej republiky takzvanou vnútornou sústavou. Jedná sa o elektricky kompaktný celok, ktorý je napojený na päť energetických spoločností v susedných štátoch. Konkrétne ide o napojenie na Nemecko (50 Hertz Transmission, TenneT), Rakúsko (APG), Poľsko (PSE) a Slovensko (SEPS). Toto napojenie je realizované pomocou jedenástich vedení 400 kV a šiestich vedení 220 kV.

Hlavná stratégia obnovy sústavy po poruche Black-out je založená na charaktere sústavy, teda že ide o tzv. vnútornú sústavu a ďalej je založená na niekoľkých vodných elektrárnach, ktoré sú schopné štartu

z tmy. Elektrárňou ktorá je schopná štartu z tmy je schopná uvedenia do prevádzky bez napätia z vonkajšej siete. Tieto bloky vodných elektrární sú na pokyn dispečera ČEPS uvádzané do prevádzky samostatne.

### Priority

Obnova napájania po poruche typu Black-out má určené nasledujúce priority:

1. Vlastná spotreba jadrových elektrární
2. Vlastná spotreba systémových klasických elektrární
3. Hlavné mesto Praha
4. Veľké mestské aglomerácie
5. Ostatní spotrebitelia

### Princípy obnovy sústavy

V prípade potreby obnovy sústavy je niekoľko možností ako sa to môže realizovať:

**Obnova napätia zo susedných prenosových sústav** -Výhodou tohto spôsobu je možnosť získať rýchlym spôsobom stabilné napätie a preto je tento spôsob obnovy uprednostňovaný. Dispečing Českej energetickej prenosovej sústavy (ďalej ČEPS) zistí možnosti získania napätia a dohodne možné veľkosti výkonu, s dispečerom susednej spoločnosti si dohodne potrebné manipulácie a približnú veľkosť poskytnutého výkonu, čo sa rádovo pohybuje okolo 200 MW s postupným nábehom. Medzi prevádzkovateľmi susedných prenosových sústav a ČEPS sú uzavreté prevádzkové dohody, ktoré zahŕňajú potrebné opatrenie. Ďalej má pre tento účel ČEPS spracovaný postup v prevádzkovej inštrukcii PI 620-5 Koordinácia obnovy sústavy po poruche typu Black-out. V tejto inštrukcii sú popísané postupy a priority pri obnove napájania v prihraničných oblastiach, základné upozornenia pre manipulácie, možné veľkosti pripojovaných oblastí a ďalšie dôležité technické a organizačné informácie o elektrárňach a rozvodniach. Dispečing ČEPS zaisťuje zapínanie jednotlivých 400kV a 220kV vedení, transformátorov a kompenzačných prostriedkov a zakresľuje ich do takzvanej slepej mapy. V súčinnosti s dispečingmi prevádzkovateľov distribučnej sústavy sa vykonáva postupné fázovanie a kruhovanie obnovených častí systému, k čomu sa využívajú prevádzkové inštrukcie PI ČEPS 620-5 Koordinácia obnovy sústavy po poruche typu Black-out, PI ČEPS 620-11 Prevádzka a fázovanie ostrovov a PI ČEPS 620-12 Odstraňovanie porúch v prevádzke prenosovej a distribučných sústav.

- a) **Obnova napájania z elektrární schopných štartu z tmy** - Najvyššiu prioritu pri obnove napájania majú vlastné spotreby jadrových elektrární a preto má ČEPS v spolupráci s partnermi spracované prevádzkové inštrukcie pre obidve jadrové elektrárne v elektrizačnej sústave. Jedná sa o tieto dokumenty :
- a. PI 628-1 Obnovenie napájania VS EDUK po poruche typu black-out
  - b. PI 628-3 Obnovenie napájania VS ETEM po poruche typu black-out

V prípade, že nie je možné zaistiť napájanie zo zahraničných sústav, dispečing ČEPS postupuje podľa prevádzkových inštrukcií pre obnovu napájania z elektrární schopných štartu z tmy. Pre tento účel ČEPS vydáva prevádzkové inštrukcie pre obnovu napätia v dopredu určených lokalitách – PI 620-13: Obnova napájania VS ECHV z EORK a princípy obnovy sústavy ES ČR s účasťou ECHV. Do budúcnosti sa predpokladá, že budú pripravené postupy a prevádzkové inštrukcie aj pre ďalšie ostrovy a elektrárne pripojené do prenosovej sústavy. Dispečing ČEPS určí poradie v ktorom budú jednotlivé miesta obnovované a koordináciu postupného fázovania a kruhovania obnovených častí sústavy.

- b) **Distribučné sústavy** - Za obnovu napájania distribučnej sústavy je zodpovedný prevádzkovateľ distribučnej sústavy. Miestom obnovy distribučnej sústavy s prenosovou sústavou sú vypínače 110 kV na transformátoroch 400/110 kV a 220/110 kV.

## 1.2 Pojem resielencia

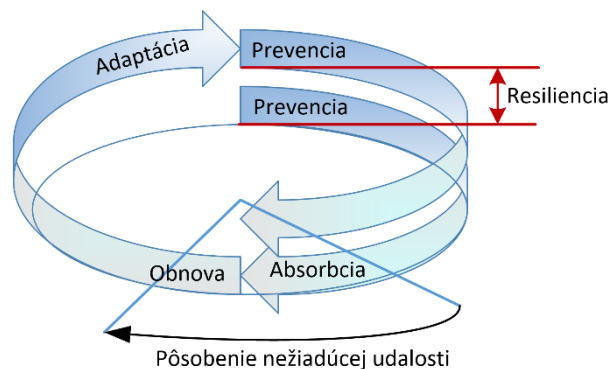
Resiliencia bola skloňovaným pojmom počas 16. a 17. storočia predovšetkým v priemysle, ako vlastnosť materiálu. Označuje schopnosť a ochotu sa prispôbiť v reálnom čase novým hrozbám. Prvé zmienky o resiliencii boli v súvislosti s pružnosťou, vzhľadom k zemetraseniu. Resiliencia je teda schopnosť systému absorbovať rušenie, a ešte udržať jeho základnú funkciu a štruktúru.

Resiliencia v kontexte kritickej infraštruktúry predstavuje schopnosť subsystémov kritickej infraštruktúry zaistiť a udržovať svoje funkcie pri nežiadúcej udalosti. Je to vnútorná pripravenosť prvkov či subsystémov na negatívne pôsobenie vnútorných či vonkajších faktorov pri týchto udalostiach. Je to schopnosť prvku absorbovať, adaptovať sa a rýchlo obnoviť činnosť prvku z dôsledkov pôsobenia nežiadúcej udalosti. Ide teda o posúdenie robustnosti, obnoviteľnosti (technická resiliencia) a adaptability (organizačná resiliencia) [7]. V tomto dokumente bola resiliencia kritickej infraštruktúry prvý krát definovaná komplexne. Resilienciou a ochranou kritickej infraštruktúry sa intenzívne zaoberá Presidential Decision Directive [6].

Zabezpečenie ochrany prvkov kritickej infraštruktúry je proces managementu ochrany a spočíva v posilňovaní resiliencie a zvládání rizík. To zahŕňa aplikáciu jednej alebo viacerých možností k minimalizácii rizík tzn. retenciou rizika, transferom rizika, redukcíou rizika a/alebo vyhnutím sa riziku. [10].

### 1.2.1 Faktory determinujúce resilienciu prvkov

Základnou podmienkou posilňovania resiliencie je jednoznačné vymedzenie faktorov, ktorými je determinovaná. Resiliencia v kritickej infraštruktúre predstavuje cyklický proces, ktorý sa skladá z fázy zdokonaľovania prevencie, absorpcie, obnovy a adaptácie systému. Na obrázku 1.1 je zobrazený jeden cyklus, kedy dochádza k posilneniu resiliencie na novú úroveň. Rozdiel úrovní  $\Delta$  sa dá chápať ako miera posilnenia resiliencie.

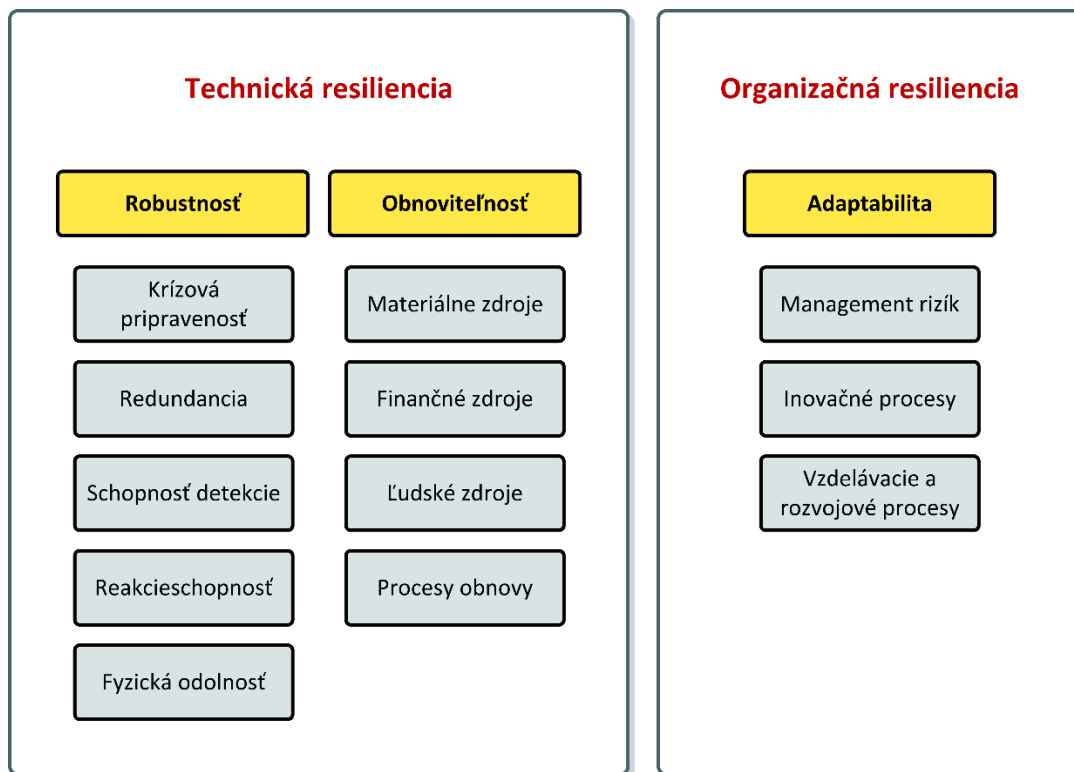


Obr. 1.1: Cyklický proces resiliencie [8]

Prvú fázu cyklu resiliencie predstavuje prevencia. Realizáciou preventívnych opatrení sa systém pripravuje na nežiadúce udalosti. Výsledným stavom prevencie je pripravenosť, v okamžiku pôsobenia nežiadúcich udalostí prechádza systém z fázy prevencie do fázy absorpcie. Tá je determinovaná robustnosťou subsystému kritickej infraštruktúry. Jeho podstatou je schopnosť absorbovať pôsobenie nežiadúcej udalosti. Keď pomine pôsobenie takejto udalosti, nastáva fáza obnovy. Jedná sa o schopnosť systému obnoviť svoju činnosť na pôvodnú, alebo požadovanú úroveň výkonu. K tomu sú dôležité dostupné zdroje a čas pre realizáciu jednotlivých procesov. Poslednou fázou cyklu resiliencie kritickej infraštruktúry je adaptácia. Ta je charakterizovaná schopnosťou organizácie sa adaptovať na prípadné opakovanie nežiadúcej udalosti. Adaptácia je determinovaná vnútornými procesmi organizácie, ktoré vedú

k posilňovaniu resiliencie, tj. inovačné procesy, management rizík, vzdelávacie a rozvojové procesy. Je to dlhodobá a dynamicky pôsobiaca schopnosť adaptovať sa na zmenu situácie.

Ako už bolo vyššie uvedené, resilienciu môžeme rozdeliť do dvoch oblastí. Na oblasť technickú a organizačnú. Medzi technickú resilienciu môžeme zaradiť robustnosť a obnoviteľnosť. Posilňovanie technickej resiliencie je realizované výhradne len vo vzťahu ku konkrétnemu prvku. Ďalšou oblasťou je organizačná resiliencia, ktorá je determinovaná úrovňou vnútorných procesov, do ktorých patrí management rizík, inovačné procesy, vzdelávacie a rozvojové procesy (adaptácia). Rozdelenie zobrazuje obrázok 1.2.



Obr. 1.2: Komponenty determinujúce resilienciu [8]

Resilienciu môžeme chápať ako stav, ktorý je formovaný tromi typmi faktorov: faktory determinujúce resilienciu (tj. komponenty a premenné technickej a organizačnej resiliencie), faktory limitujúce resilienciu (tj. napr. právna úprava prevádzky infraštruktúr alebo úroveň disponibilných finančných zdrojov) a faktory ovplyvňujúce resilienciu (tj. napr. hrozby či nástroje posilňovania resiliencie). V nasledujúcom texte je venovaná pozornosť determinujúcim faktorom.

Prvou oblasťou je technická resiliencia a je determinovaná robustnosťou a obnoviteľnosťou prvkov. Do tejto oblasti spadajú technologická a fyzická ochrana jednotlivých prvkov kritickej infraštruktúry.

Druhou oblasťou je management organizácie. Tento typ resiliencie sa označuje ako organizačná resiliencia [9] a tá je determinovaná úrovňou vnútorných procesov organizácie, ktorých podstatou je vytváranie čo najlepších podmienok pre adaptáciu prvkov kritickej infraštruktúry na pôsobenie nežiadúcej udalosti. Komponenty sú prezentované na obrázku.

### 1.2.2 Faktory determinujúce robustnosť

Robustnosť je schopnosť prvku absorbovať pôsobenie dopadov nežiadúcej udalosti. Absorbované môžu byť prostredníctvom štrukturálnych vlastností budov alebo použitých technológií (tj. štrukturálnej robustnosti) alebo prostredníctvom bezpečnostných opatrení (tj. robustnosť zabezpečenia). Robustnosť je určená nasledujúcimi premennými:

- krízová pripravenosť (súbor opatrení ku zvýšeniu pripravenosti prvku kritickej infraštruktúry na nežiadúce udalosti)
- redundancia (schopnosť okamžitého nahradenia výkonu náhradným zdrojom narušenej časti prvku alebo posilnenie jeho kapacít)
- schopnosť detekcie (čas k rozpoznaní nežiadúcej udalosti)
- reakcie schopnosť (pravdepodobnosť a/alebo čas zásahu vedúceho k eliminácii príčin nežiadúcej udalosti alebo minimalizácii ich následkov)
- fyzická odolnosť (súbor technických prostriedkov a organizačných či režimových opatrení pre zvýšenie fyzickej odolnosti prvku kritickej infraštruktúry voči nežiadúcim udalostiam. [8])

Prvok sa stáva rezistentný, ak dosiahne 100% úroveň robustnosti proti dopadom nežiadúcej udalosti. Znamená to, že je schopný odolať jej účinkom bez poznateľných negatívnych dopadov.

### 1.2.3 Faktory determinujúce obnoviteľnosť

Obnoviteľnosť je schopnosť prvku obnoviť svoju činnosť na pôvodnú alebo požadovanú úroveň poskytovaných služieb po ukončení pôsobenia dopadov nežiadúcej udalosti. Za obnoviteľnosť je považovaná teda len oprava alebo náhrada poškodených alebo zničených komponentov prvku. Obnoviteľnosť je determinovaná nasledujúcimi premennými:

- materiálne zdroje (dostupnosť komponentov k realizácii opravy alebo náhrady poškodených alebo zničených častí prvku)
- finančné zdroje (dostupnosť financií, umožňujúcich rýchlu obnovu prvku)
- ľudské zdroje (dostupnosť pracovníkov s potrebnou kvalifikáciou)
- procesy obnovy (procesy podporujúce rýchlu obnovu na požadovaný výkon)

### 1.2.4 Faktory determinujúce adaptabilitu

Adaptabilita je schopnosť organizácie pripraviť prvok na opakované pôsobenie už prebehnutých nežiadúcej udalosti. Predstavuje dlhodobú pôsobiacu schopnosť organizácie prispôbiť sa na zmenenú situáciu. Základnými procesmi posilňujúcimi adaptabilitu prvkov kritickej infraštruktúry na nežiadúce udalosti sú:

- management rizík (vnútorný proces k zaisťovaniu bezpečnosti a posilňovaniu resiliencie už vo fáze prevencie. Management rizík spočíva v koordinácii činností pre vedenie a riadenie organizácie s ohľadom na riziká [11])
- inovačné procesy
- vzdelávacie a rozvojové procesy.

### 1.3 Štandardné možnosti resiliencie kritickej infraštruktúry

V rámci tejto práce sa budeme zaoberať možnosťami technickej resiliencie v rámci distribučnej sústavy elektrickej energie. Pre tento účel je potrebné urobiť radu opatrení v oblasti VVN distribučnej sústavy, VN distribučnej sústavy a zdrojovej základne v rámci študovanej časti sústavy.

#### 1.3.1 Distribučná sústava VVN

U distribučnej sústavy VVN je potrebné zaistenie spoľahlivej prevádzky i v prípade mimoriadnych stavov, medzi ktoré patrí napríklad ostrovná prevádzka. V rámci tohto stavu dochádza ku zmenám výkonových tokov, čo môže mať za dôsledok preťažovanie niektorých liniek, čo vedie k ďalšiemu rozvratu systému. Z hľadiska chránenia je potrebné aby bol systém ochrán vybavený schopnosťou adaptácie na iný prevádzkový stav (napríklad znížené skratové prúdy v priebehu ostrovnej prevádzky sústavy). V prípade absencie tejto funkcie môže dôjsť k havárii týchto zariadení, čo opäť vedie k rozvratu systému. Časť VVN distribučnej sústavy zaisťujúca napájanie pre objekty kritickej infraštruktúry je teda nosnou časťou systému pre prenos elektrickej energie od výrobných zdrojov do objektov kritickej infraštruktúry.

#### 1.3.2 Zdrojová základňa

U zdrojovej základne sú z hľadiska resiliencie mimoriadne dôležité technologické funkcionality umožňujúce ostrovnú prevádzku, štart z tmy a prevádzku v rozsiahlom výkonovom pásme. U technologických celkov výrobných zdrojov zapojených do systému kritickej infraštruktúry je preto potrebné disponovať certifikáciou pre vyššie uvedené funkcie.

#### 1.3.3 Distribučná sústava VN

Napájanie kritickej infraštruktúry je obvykle realizované na hladine VN a preto i tento systém vyžaduje značnú pozornosť. Vzhľadom na rozsiahlosť distribučnej sústavy VN a stupeň automatizácie tejto sústavy, musí v priebehu krízovej situácie často dochádzať k obnoveniu napájania nie len pre objekty kritickej infraštruktúry, ale aj pre objekty iné na rovnakom vývode. Táto skutočnosť má za následok predĺženie času potrebného pre obnovenie napájania objektov kritickej infraštruktúry (manuálna manipulácia prvkov VN distribučnej sústavy priamo v mieste ich lokalizácie) alebo významné navýšenie požiadavky na dodávaný výkon (čo je v prípade ostrovnej prevádzky faktor prinášajúci ďalšie komplikácie). Zvyšovanie technickej resiliencie v tomto prípade je umožnené prostredníctvom plnej automatizácie s možnosťou diaľkového ovládania u všetkých prvkov VN vývodov napájajúcich objekty kritickej infraštruktúry. Vzhľadom na rozsiahlosť VN distribučnej sústavy je tento proces časovo i investične veľmi náročný.

### 1.4 Využitie pokročilých technológií pre zvýšenie resiliencie kritickej infraštruktúry

Kritická infraštruktúra je najčastejšie skloňovaným pojmom najmä v oblasti veľkých mestských aglomerácií, kde je vysoká koncentrácia obyvateľstva a tým i objektov kritickej infraštruktúry. Elektrizované sústavy sú v týchto oblastiach často veľmi rozsiahle čo sa týka počtu prvkov, komplikovanosti množstva spotrebovanej energie. Vzhľadom na veľmi finančne i časovo náročné investičné akcie do líniových stavieb, elektrických staníc a distribučných staníc, mnoho prvkov tohto systému vyžaduje posilnenie. Ako významný problém sa javí komplikovaný a takmer nerealizovateľný proces výstavby VVN vedení s vyššou menovitou zaťažiteľnosťou, ktoré sú kľúčové pre napájanie týchto oblastí najmä v mimoriadnych stavoch (napríklad straty napájania z uzlov prenosovej sústavy). Pri týchto mimoriadnych stavoch je pre napájanie



objektov kritickej infraštruktúry zaistiť napájanie z blízkych dostupných zdrojov s využitím VVN distribučnej sústavy.

Ako perspektívne riešenie pre tento účel sa javí technológia HVDC, ktorá umožňuje káblové vedenie na hladine VVN, má menej náročné požiadavky na koridor a umožňuje plne riadiť veľkosť prenášaného výkonu. V ďalších častiach tejto práce sa špecializujeme práve na túto technológiu a ukážeme si jej možný prínos v prípadovej štúdií.

## 2 Technológia HVDC

Cieľom kapitoly zameranej na HVDC (High Voltage Direct Current) technológie je priblížiť históriu vzniku tejto technológie, jej základné princípy, technologické prevedenia, realizačné aspekty a možnosti využitia v systéme kritickej infraštruktúry. Jednotlivým témam bude venovaná širšia pozornosť v nasledujúcich podkapitolách.

### 2.1 História HVDC

Vývoj HVDC technológie započal v 30. rokoch 20. storočia. V tomto období vývoj neprebíhal len vo Švédsku, v literatúre dominujú články od nemeckých autorov, výskumníkov z Ruska, Francúzska, Švajčiarska a Spojených štátov amerických, ktoré sa venovali téme konverzie striedavého prúdu na prúd jednosmerný. V publikovaných prácach sa autori zaoberajú vývojom teórie, ktorá sa týka statických prevodníkov, ďalej ekonomikou DC prenosových systémov v súvislosti so vzdialenosťou pri ktorej by bolo DC vedenie ekonomicky výhodnejšie než AC vedenie, topológiou konvertorových systémov, vývojom konvertorových ventilov, ktoré sú potrebné pre realizáciu prevodníkov HVDC a izolačnými systémami v zariadeniach. V tomto období boli zdokumentované aj postavené demonštračné systémy.

V štyridsiatych rokoch po skončení druhej svetovej vojny bol veľký dopyt po elektrickej energii. Pre využívanie vodnej energie bolo väčšinou potrebné vybudovať dlhé prenosové linky, keďže vodné zdroje sa typicky nachádzajú v horských regiónoch a oblasti kde sa koncentrovala populácia boli väčšinou vzdialené. Napríklad vo Švédsku sa vodné zdroje nachádzajú na severe krajiny pričom populácia sa koncentrovala na juhu krajiny, čo nie je výnimočné, avšak vzdialenosti medzi elektrárňami a centrami spotreby sú dlhšie než v iných krajinách. Odborníci v tých časoch rozhodli, že technológia HVDC nie je dostatočne vyvinutá a preto sa rozhodli pre sériovo kompenzované 380 kV striedavé vedenie. Záujem o HVDC však naďalej pretrvával a zameriavali sa na rôzne témy ako sú napríklad aspekty jednosmerných prenosových systémov prostredníctvom nadzemných vedení a káblov, štúdie návratových ciest cez zem, testovacie laboratória a ďalšie demonštrácie uskutočniteľnosti týchto projektov. V roku 1945 Swedish State Power Board (neskôr Vattenfall) a ASEA skonštruovali 50 km dlhé testovacie vedenie medzi mestami Trollhättan a Mellerud vo Švédsku a v meste Trollhättan vybudovali skúšobňu tyristorov. Tento testovací projekt poskytol spoločnosti ASEA značné poznatky a skúsenosti o vývoji konvertorových technológií.

V päťdesiatych rokoch sa vývoj technológii HVDC zrýchlil a to pravdepodobne preto, že táto technológia sa javila byť komerčne realizovateľná. Literatúra sa venuje tým istým témam ako v 30. rokoch ale tentokrát podrobnejšie. Medzi nové témy patrilo použitie fyzických simulátorov na navrhovanie DC systémov, modelovanie zariadení a rádiové rušenie z konvertorov. Ďalšou aplikáciou HVDC systémov by bolo ich využitie na miestach, kde sú AC systémy tak málo rozvinuté, že zaistenie stabilnej prevádzky je náročné. Bol to prípad v Rusku, kde z dôvodu rozľahlosti a riedkosti populačných centier je ekonomicky náročné vybudovať silný, integrovaný striedavý prenosový systém. Uskutočniteľnou možnosťou bol HVDC prenos pre vysoko výkonové vedenia na dlhé vzdialenosti. V blízkej dobe dostala spoločnosť ASEA žiadosť o HVDC vo Švédsku, aby zabezpečili zásobovanie ostrova Gotland v Baltskom mori lacnou vodnou energiou zo švédskej pevniny. Od konca štyridsiatych rokov do polovice šesťdesiatych rokov je história HVDC mimo Ruska skutočnou históriou spoločnosti ASEA, pretože neexistoval žiaden ďalší dodávateľ HVDC ventilov. Záujem o technológiu HVDC bol taký veľký, že v júni roku 1952 v Anglicku začal vychádzať špeciálny časopis s názvom Direct Current, ktorý sa okrem HVDC prenosu venoval aj trakcii, výrobe a využitiu nízkeho jednosmerného napätia a ďalej sa venoval výskumu a vývoju. Zakladateľom a prvým redaktorom bol J.H.M. Sykes, časopis fungoval asi 15 rokov až do predčasnej smrti jeho zakladateľa. Prvú obchodnú objednávku na HVDC systém dostala spoločnosť ASEA od spoločnosti Vattenfall na 20 MW, 100 kV podmorský kábel medzi Švédskou pevninou a ostrovom Gotland v roku 1950.

Začiatkom 60. rokov spoločnosť ASEA dostala 3 objednávky na HVDC prenosové systémy. Prvou z nich bol projekt Cook Straits 600 MW, 250 kV z vodnej elektrárne Benmore, ktorá sa nachádza na južnom ostrove Nového Zélandu, pričom vedenie malo smerovať na severnú stranu prielivu. V tomto systéme bolo využité dlhé nadzemné vedenie aj podmorský kábel cez Cookov prieliv. Druhou objednávkou bolo 250 MW, 275 kV prepojenie medzi Švédskom a Dánskom. Tretia objednávka bola na Sakuma projekt v Japonsku, 300 MW a 2x125 kV, back-to-back, frekvenčný menič 50/60 Hz, čo bola nová aplikácia. Všetky tieto systémy boli uvedené do prevádzky v roku 1965. Vedenie spoločnosti ASEA si uvedomilo, že nemôže pokračovať ako jediný dodávateľ technológie HVDC a preto uzavreli licenčné zmluvy so spoločnosťou English Electric vo Veľkej Británii (teraz súčasťou Arevy) a so spoločnosťou General Electric Company v Spojených štátoch amerických. V dôsledku toho bola ďalšia obchodná objednávka na DC projekt zadaná spoločnosti English Electric. Išlo o 200 MW, 200 kV podmorské káblivé vedenie medzi ostrovom Sardínia a talianskou pevninou, ktoré bolo uvedené do prevádzky v roku 1967.

Od počiatku 70. rokov sa začalo objavovať väčšie množstvo HVDC systémov v oblasti Severnej Ameriky a začali sa formovať takzvané multi-terminal systémy. V tomto období sa začali významne prejavovať problémy s prepätiami v DC systéme. Vtedajšie technológie pre obmedzovanie striedavých prepätí neboli pre DC prepätia účinné. Po určitej dobe sa tento problém podarilo vyriešiť spoločnosti GE, ktorá vyvinula obmedzovače prepätia pre HVDC systémy. V priebehu 70. rokov došlo k ďalšiemu prielomu technológií a to k prvému využitiu počítačovo riadeného (v reálnom čase) HVDC systému v spoločnosti Bonneville Power Authority (BPA) v kanadskom Vancouveri. Ďalšou významnou novinkou bol počiatok tyristorovej technológie (dovtedy ortuťové usmerňovače). K prvému použitiu došlo koncom 70. rokov v Južnej Afrike v projekte konzorcia AEG, BBC a Siemens. Následne bola technológia vyvinutá iv GE a následne v spolupráci využívaná v projektoch ASEA. [12]

V nasledujúcom období dochádzalo ku zlepšovaniu technických parametrov tyristorovej HVDC technológie, tj. Zvyšovanie menovitého výkonu a menovitého napätia. Postupne dochádzalo k rozširovaniu HVDC technológie pre stále väčšie a väčšie projekty v rôznych častiach sveta (Južná Amerika, Afrika, India). [13]

Najnovším trendom v oblasti HVDC technológií sú systémy postavené na báze VSC (Voltage Source Converter) s využitím výkonových IGBT tranzistorov. Táto technológia však v súčasnosti nedosahuje také výkonové parametre ako tyristorová technológia LCC (Line Commutated Converter).

## 2.2 Popis technológie HVDC

### 2.2.1 Rozdelenie z hľadiska technológie výkonovej elektrotechniky

V oblasti HVDC technológií sú v súčasnej dobe z hľadiska technológie výkonovej elektroniky dostupné dve základné technológie:

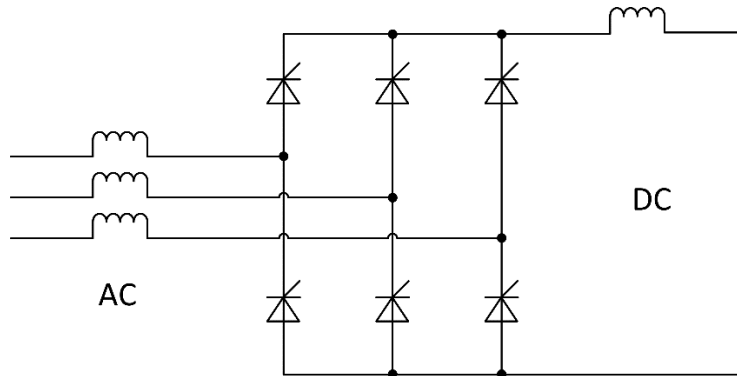
- a) LCC (Line Comutated Converter)
- b) VSC (Voltage Source Converter)

LCC technológia je postavená na báze výkonových usmerňovačov a invertorov (typicky v 6 alebo 12 pulznom zapojení) na báze tyristorov. Parametre v súčasnosti vyrábaných tyristorov (rádovo do 10 kA a 10KV) umožňujú na základe ich sériového radenia dosahovať vysoké výkony usmerňovačov/invertorov. LCC HVDC systémy majú teda nasledujúce typické parametre:

- Menovitý prenositeľný výkon 150 až 3000 MW
- Menovité napätie 180 až 500 kV
- Minimálny skratový výkon 2,5 násobok menovitého výkonu (pre zaistenie komutácie)

- Odoberaný jalový výkon na strane usmerňovača i invertora približne 0,5 násobok menovitého výkonu
- Prevádzka od 0,1 násobku menovitého výkonu

Jedná sa o dlhodobu funkčne overené riešenie, ktoré je využívané vo väčšine súčasne existujúcich aplikácií. Zjednodušená schéma HVDC systému LCC technológie je ilustrovaná na obrázku 2.1.

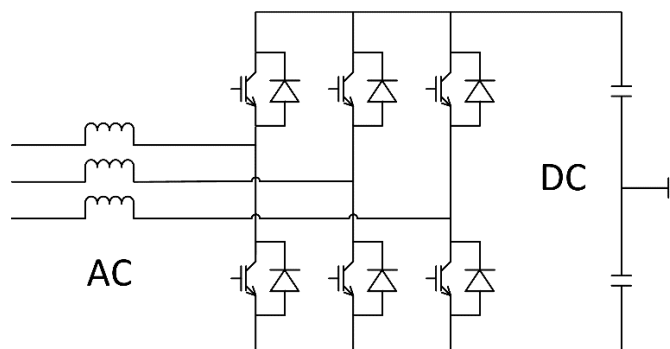


Obr. 2.1: Zjednodušená ilustračná schéma LCC HVDC (usmerňovač/invertor)

VSC technológia je postavená na základe meniča v mostíkovom zapojení s vypínateľnými spínacími prvkami výkonovej elektroniky. V počiatkoch technológie boli využívané tyristory GTO (Gate Turned Off), avšak v súčasnosti sú výhradne využívané IGBT tranzistory. Pre riadenie tohto typu HVDC systému je použitá pulzne-šírková modulácia obvykle s modulačnou frekvenciou 1kHz. Pre súčasné VSC HVDC systémy sú typické nasledujúce parametre:

- Menovitý prenositeľný výkon do 500 MW
- Menovité napätie do 150 kV
- Umožňuje plné riadenie činného i jalového výkonu
- Nezávislé na skratovom výkone v mieste pripojenia do AC siete

Jedná sa o riešenie ktoré je v súčasnosti využívané len zriedkavo. Dôvodom je chýlostivosť IGBT technológie a vyššie investičné náklady ako v prípade LCC technológie. Zjednodušená schéma HVDC systému VSC technológie je ilustrovaná na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Zjednodušená ilustračná schéma VSC HVDC (jeden terminál)

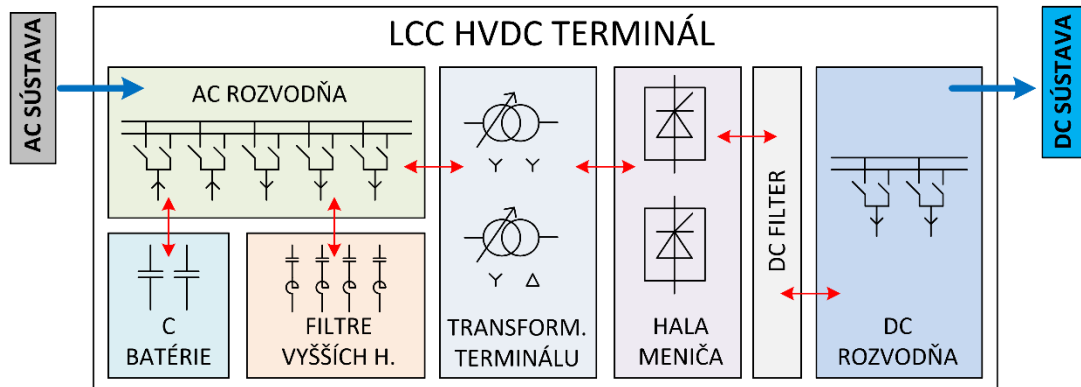
Vzhľadom na overenosť a dostupnosť technológie LCC HVDC, bude táto technológia uvažovaná v ďalších častiach tejto práce.

## 2.2.2 Prevedenia LCC HVDC systému

V ďalšej práci uvažujeme LCC HVDC systém, pretože oproti VSC HVDC vyžaduje nižšie investičné náklady, má nižšie činné straty a jedná sa o overené riešenie pre HV a EHV systémy. LCC HVDC systém ktorý je možné rozdeliť na dva typy technologických celkov:

- HVDC terminály
- HVDC vedenia

Prvým typom technologických celkov sú HVDC terminály, v ktorých dochádza ku konverzií medzi striedavým a jednosmerným systémom. Typický terminál LCC HVDC systému je popísaný na obrázku 2.3.



Obr. 2.3: LCC HVDC terminál a jeho základné prvky[15][16]

Podľa obrázku 2.3 LCC HVDC terminál je tvorený nasledujúcimi súčasťami:

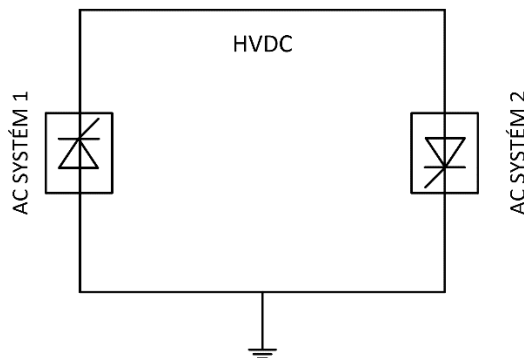
1. **AC rozvodňa** – jedná sa o elektrickú stanicu, kde je terminál HVDC pripojený do striedavej elektrickej siete. Do tejto elektrickej stanice sú pripojené vedenia striedavej elektrickej siete zaústené do HVDC terminálu, kompenzačné kondenzátorové batérie, filtre vyšších harmonických a transformátory usmerňovača/invertora.
2. **Kompenzačné kondenzátorové batérie** – tyristorový usmerňovač/invertor sa z hľadiska jalového výkonu správa ako spotrebič. Tento jalový výkon môže dosahovať až 50% veľkosti menovitého výkonu usmerňovača. Takýto odber jalového výkonu by bol nežiadúcou záťažou pre striedavú elektrickú sieť a čiastočne by obmedzoval prínosné vlastnosti HVDC systému. Pre kompenzáciu tohto jalového výkonu sa používajú kompenzačné kondenzátorové batérie rozdelené do niekoľkých stupňov, ktoré sú zapínané podľa aktuálnej potreby.
3. **Filtre vyšších harmonických** – tyristorový usmerňovač/invertor sa prejavuje ako zariadenie s nelineárnou volt-ampérovou charakteristikou. Tieto zariadenia sa prejavujú ako zdroje vyšších harmonických rušení (6 pulzné zapojenie usmerňovača/invertora generuje vyššie harmonické  $6 \cdot k \pm 1$ ,  $k = 1 \dots n$  a 12 pulzné zapojenie  $12 \cdot k \pm 1$ ,  $k = 1 \dots n$ ). V sústavách VVN a ZVN sú takéto rušenia značne problematické a preto sú pre ne stanovené prísne limity. Z tohto dôvodu je nutné použitie pasívnych filtrov vyšších harmonických pre zamedzenie šírenia rušenie do striedavej elektrickej siete.
4. **Transformátory usmerňovača/invertora** – sú špecifické zariadenia z hľadiska konštrukcie. Pri návrhu týchto transformátorov musí byť zohľadnené viacero nepriaznivých okolností. Transformátory v týchto aplikáciách musia byť odolné voči rušeniam vyššími harmonickými, musia byť odolné voči javu „DC“ magnetizácie ich magnetického obvodu a musia byť odolné napäťovým úrovňam na AC i DC strane. Tieto transformátory sú dôležité z hľadiska komutácie usmerňovača/invertora, sú vybavené odbočkami pre prispôbenie požadovaného napätia (vplyv

veľkosti AC napätia a požadované DC napätia). Ďalším špecifikom je, že v prípade 6 pulzného zapojenia usmerňovača/invertora je potrebný 3 fázový dvojvinuťový transformátor alebo 3 jednofázové dvojvinuťové jednotky. V prípade 12 pulzného zapojenia je potrebný trojfázový 3 vinuťový transformátor alebo 3 jednofázové trojvinuťové jednotky (pre zaistenie 6 napätí s fázovým posunom 60 °). Často sa jedná o rozmerné stroje a preto sa vzhľadom na dopravné možnosti častejšie využívajú jednofázové jednotky.

5. **Hala výkonového meniča** – slúži pre umiestnenie polovodičového meniča (tyristorové reťazce usmerňovača/invertora) vrátane podporných systémov a riadiaceho systému. Výkonové polovodičové súčiastky v HVDC aplikáciách sú pomerne chýlostivé a tomu musia zodpovedať i priestory ich inštalácie. U výkonových polovodičových súčiastok je mimoriadne dôležitý spoľahlivý chladiaci systém (vodné chladenie demineralizovanou alebo deionizovanou vodou alebo vzduchové chladenie) a ochranné systémy (vzhľadom k sériovému radenie polovodičových súčiastok).
6. **DC filter** – slúži na vyhladenie napätia na jednosmernom výstupe usmerňovača
7. **DC rozvodňa** – slúži ako elektrická stanica pre manipuláciu v jednosmernej časti HVDC terminálu. Táto časť je špecifická tým, že všetky komponenty sú zvláštne navrhnuté a testované pre systém jednosmerného vysokého napätia. Z DC rozvodni je vyvedený výkon do jednosmerných vedení HVDC systému.

Druhým typom technologických celkov LCC HVDC sú vedenia a tie sa rozdeľujú v závislosti od typu systému na tri základné typy:

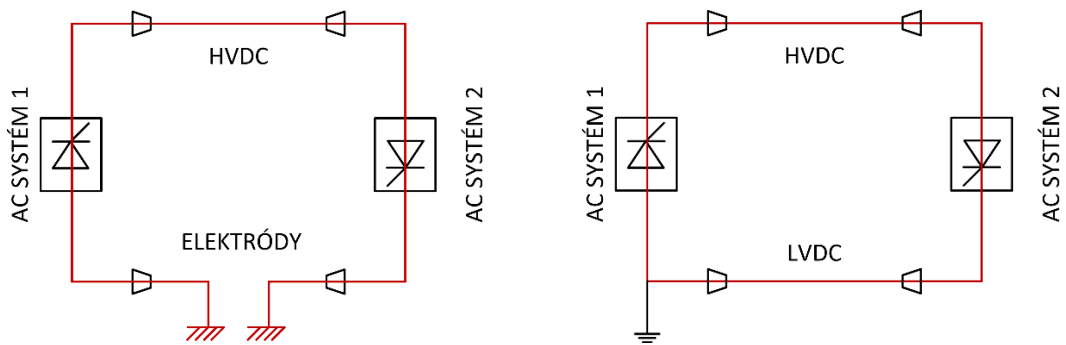
1. **Back-to-Back spojky** – Usmerňovač a invertor sú umiestnené v jednej elektrickej stanici. Toto usporiadanie umožňuje prepojenie dvoch striedavých elektrických sústav ktoré nemôžu byť synchronne prepojené (napríklad z dôvodu odlišnej systémovej frekvencie). Ďalším dôvodom tohto usporiadania je možnosť riadenia požadovaného toku činného výkonu medzi prepojenými striedavými sústavami. Základné usporiadanie Back-to-Back spojky je ilustrované na obrázku 2.4.



Obr. 2.4: Konfigurácia Back-to-Back spojky [16]

2. **Monopolárne HVDC systémy** – Usmerňovač a invertor sú umiestnené v termináloch, ktoré sú vzájomne prepojené HVDC vedením. HVDC vedenie môže byť realizované ako vzdušná linka alebo ako káblové vedenie (typicky prekonávanie vodných plôch). Z hľadiska prevedenia HVDC vedenia monopolárnych systémov sú používané 2 konfigurácie. Prvá konfigurácia je s návratovou cestou vedenou zemou, čo znamená že polarita je vedená vodičom a návratová cesta 0 potenciálu je uvažovaná zemou, k čomu sú v oboch termináloch inštalované zodpovedajúce uzemňovacie elektródy. Jedná sa o ekonomicky najmenej náročnú variantu (len jeden vodič a nižšie činné straty). Nevýhodou sú rušivé vplyvy zemných jednosmerných prúdov a to najmä v oblastiach kde sa vyskytujú iné inštalácie. Pre odstránenie týchto negatívnych efektov sa používa druhý variant s metalickou návratovou cestou, ktorá vyžaduje druhý vodič (zvýšené investičné náklady a činné straty). Na vybavenie HVDC vedení sú kladené oproti vybaveniu pre striedavé siete zvláštne

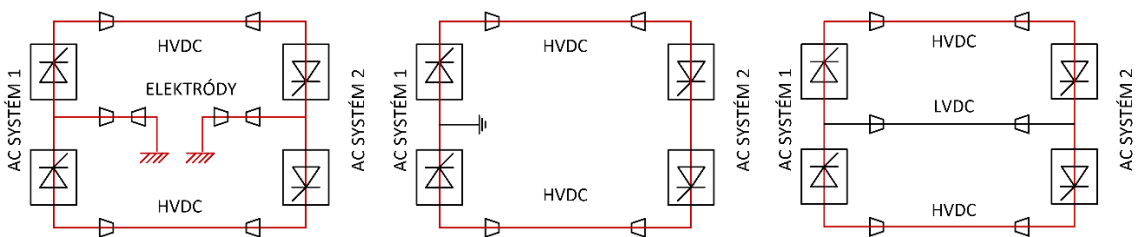
požiadavky. Základné usporiadanie monopolárnych HVDC systémov bez a s návratovou cestou je ilustrované na obrázku 2.5.



Obr. 2.5: Konfigurácie monopolárnych systémov HVDC, s návratovou cestou v zemi za pomoci uzemňovacích elektród (vľavo) a s návratovou cestou realizovanou návratovým vodičom (vpravo) [16]

3. Bipolárne HVDC systémy – Usmerňovač aj inverter sú podobne ako v prípade monopolárnych systémov sú umiestnené v termináloch, ktoré sú vzájomne prepojené HVDC vedením. HVDC vedenie môže byť realizované ako vzdušná linka alebo ako káblové vedenie (typicky prekonávanie vodných plôch). Dôvodom používania bipolárnych systémov je najmä vyšší stupeň flexibility. U bipolárneho systému je možné vykonávať údržbu i za prevádzky pri obmedzenom výkone (prechod do monopolárneho režimu), v prípade monopolárneho systému je nevyhnutná úplná odstávka zariadenia. Bipolárny systém má tiež výhodu v prípade porúch, pretože i pri vyradení časti prvkov je stále možná prevádzka v obmedzenom monopolárnom režime. Z hľadiska návratovej cesty v prípade bipolárnych systém existujú tri varianty:
  - a) S metalickou návratovou cestou (umožňuje monopolárnu prevádzku, ale jedná sa o najnákladnejšie riešenie)
  - b) S návratovou cestou vedenou zemou pomocou uzemňovacích elektród (umožňuje monopolárnu prevádzku)
  - c) Bez návratovej cesty (neumožňuje monopolárnu prevádzku, ale jedná sa o najmenej nákladné prevedenie bipolárneho systému)

Základné usporiadania bipolárnych HVDC systémov sú ilustrované na obrázku 2.6.



Obr. 2.6: Konfigurácie bipolárnych systémov HVDC, s návratovou cestou v zemi za pomoci uzemňovacích elektród (vľavo), bez návratovej cesty (uprostred) a s návratovou cestou realizovanou návratovým vodičom (vpravo) [16]

## 2.3 Výhody a nevýhody HVDC

HVDC systémy sú v súčasnosti výhodné pre požitie v moderných elektrizačných sústavách z viacerých aspektov. Tieto aspekty je možné rozdeliť na aspekty technické, ekonomické a enviromentálne.

### 2.3.1 Technické aspekty HVDC systémov

Hlavnými výhodami HVDC systémov z hľadiska technických aspektov sú rozšírené funkcionality oproti konvenčným systémom striedavých elektrických sústav. Za najvýraznejšie výhody HVDC systémov je možné považovať [13]-[17]:

- Možnosť prepojenia dvoch striedavých elektrizačných sústav u ktorých nie je možné synchronne prepojenie (napríklad z dôvodov odlišnej frekvencie)
- Možnosť riadenia prenášaného činného výkonu
- Parametre prevádzkovej indukčnosti a kapacity vedenia nie sú limitujúce, čo znamená že je možné realizovať dlhé vzdušné i káblové DC vedenia, na rozdiel od AC vedení
- Neuplatňuje sa Ferrantihov jav
- Neuplatňuje sa skin efekt, čo znamená že vodiče sú efektívne využité na celom svojom priereze
- Zvlášť výhodou je teoreticky neobmedzená dĺžka káblových vedení (u AC káblových vedení obmedzenie do 40 km). Táto vlastnosť je jediným technologicky realizovateľným riešením pre podmorské vedenia dlhších vzdialeností a **oblasti veľkých miest a mestských aglomerácií.**
- Možnosti podpory stability elektrizačnej sústavy
- Možnosť tlmenia výkonových oscilácií

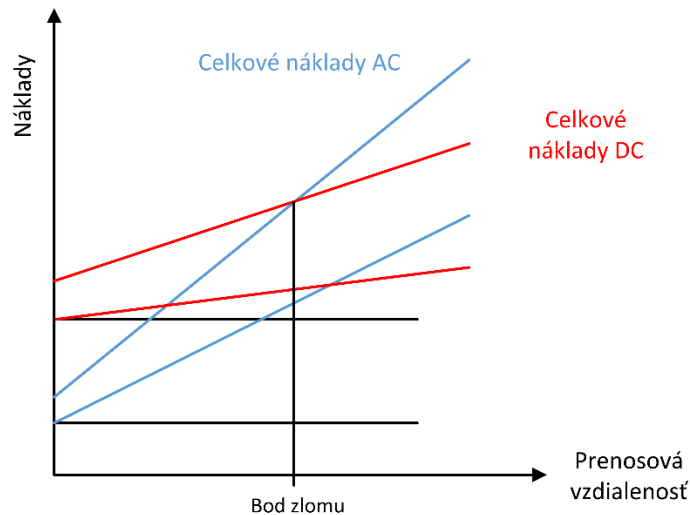
Medzi nevýhody HVDC systémov z hľadiska technologických aspektov je možné zaradiť nasledujúce[13]-[17]:

- Zložitosť HVDC terminálov, ktoré sú vybavené mnohými podpornými technológiami
- Komplikovanejšia údržba oproti štandardnému AC systému

### 2.3.2 Ekonomické aspekty HVDC systémov

Ekonomické aspekty HVDC systémov sú zhodnotené na základe fixných nákladov a nákladov variabilných v závislosti na vzdialenosti prenosu. HVDC systém sa vyznačuje vyššími fixnými nákladmi spôsobených hlavne HVDC terminálmi a variabilnými nákladmi, ktoré sú tvorené najmä činnými stratami. U AC systémov je situácia opačná. Fixné náklady na striedavé elektrické stanice a vedenia sú nižšie v porovnaní s HVDC, ale variabilné náklady na činné straty v závislosti na vzdialenosti prenosu stúpajú strmšie ako v prípade HVDC. Porovnanie nákladových kriviek v závislosti na vzdialenosti prenosu výkonu ukazuje obrázok 2.7. [16].





Obr. 2.7: Porovnanie nákladových kriviek HVDC systému a AC systému v závislosti na vzdialenosti prenosu výkonu [16]

Na obrázku 2.7 je viditeľný zlomový bod, bod v ktorom sa pretína krivka celkových nákladov HVDC a AC systémov. Pre vzdialenosti za týmto bodom sú celkové náklady HVDC systému nižšie ako v prípade AC systému a preto je tento systém pre dlhé vzdialenosti prenosu ekonomicky výhodnejší. Literatúra [16] uvádza že zlomový bod je približne pri vzdialenostiach 400 až 500 km.

U tohto hodnotenia je však dôležité poznamenať, že jestvuje rada prípadov kde vyššie náklady na HVDC sú druhoradá záležitosť. Deje sa tak typicky v prípadoch kedy nie je dostupné iné technologické riešenie, ale sú nutne vyžadované niektoré funkcionality HVDC systému, ktorými konvenčný AC systém nedisponuje.

### 2.3.3 Enviromentálne aspekty HVDC systémov

V súčasnosti je prikladaný čoraz väčší dôraz na enviromentálne aspekty. Hlavným cieľom je minimalizovanie zásahov do rázu krajiny a eliminovanie nepriaznivých účinkov na životné prostredie. Hlavnými výhodami HVDC systémov z hľadiska enviromentálnych aspektov sú:

- Menšia priestorová náročnosť koridorov vedení
- Možnosť využitia súčasných koridorov pre zvýšenie prenosovej kapacity
- Širšie možno využívanie podzemných káblových vedení
- Usporiadanie vonkajšieho vedenia s menším počtom vodičov, čo vedie ku kompaktniejšiemu tvaru stožiarov a na okolitú krajinu pôsobí menej rušivým dojmom.

Medzi nevýhody HVDC systémov z hľadiska enviromentálnych aspektov je možné zaradiť nasledujúce:

- Vyššia priestorová náročnosť HVDC terminálov
- Potenciálne nepriaznivé vplyvy systémov bez metalickej návratovej cesty

## 2.4 Potenciál využitia HVDC technológie pre zvýšenie resiliencie kritickej infraštruktúry

Z hľadiska technologických a enviromentálnych aspektov môže byť práve HVDC technológia jednou z efektívnych možností zvýšenia resiliencie kritickej infraštruktúry a to najmä v oblastiach veľkých miest a mestských aglomerácií. Tieto oblasti sú obvykle v prípade mimoriadnych situácií a výpadkov elektrickej energie veľmi zraniteľné a systém kritickej infraštruktúry je pre ne kľúčový. Potenciál HVDC technológie spočíva najmä v nasledujúcich bodoch:

- Riadenie prenášaného činného výkonu (zásobovanie veľkých miest)
- Podpora stability systému (hlavne v postupnom zaistovaní napájania objektov kritickej infraštruktúry v režime ostrovnej prevádzky výrobných zdrojov dostupných v danej oblasti)
- Zvýšenie prenosovej schopnosti
- Realizačné aspekty (možnosť využitia dlhých DC káblových vedení VVN, nižšia priestorová náročnosť vonkajších DC vedení).

### 3 Ustálený chod striedavých elektrických sietí

V oblasti elektroenergetiky sú výpočty ustáleného chodu sústavy jedným zo základných typov numerickej analýzy striedavých elektrických sietí. V zahraničnej literatúre je výpočet ustáleného chodu označovaný pojmami „Power Flow“ alebo „Load Flow“. Cieľom výpočtu ustáleného chodu sústavy je znalosť všetkých uzlových parametrov danej sústavy. Každý uzol sústavy je charakterizovaný nasledovnými parametrami:

- Uzlový činný výkon  $P$  (znamienko odlišuje či je výkon dodávaný do uzlu alebo odoberaný)
- Uzlový jalový výkon  $Q$  (znamienko odlišuje či je výkon dodávaný do uzlu alebo odoberaný)
- Veľkosť napätia v uzle  $U$
- Uhol napätia v uzle  $\delta$

Pomocou vymenovaných parametrov je možné analyzovať ďalšie parametre ako sú napríklad zaťaženie vedení spájajúcich jednotlivé uzly, činné straty v celej sústave, skratové pomery a ďalšie. U uzlov sústavy je pre riešenie ustáleného chodu striedavej elektrickej siete veľmi dôležité rozdelenie uzlov podľa typu:

1.  $U\delta$  (Slack) - hodnota napätia a uhol napätia sú známe. V tomto type uzlu sa dopočítavajú hodnoty činného a jalového výkonu. Tento uzol slúži na vyrovnávanie výkonovej bilancie ostatných uzlov a hradí straty činného a jalového výkonu v sieti. Bilančný uzol sa volí len jeden a najčastejšie je do neho pripojený zdroj výkonu alebo ekvivalent inej robustnej sústavy. Pomocou výpočtov ustáleného chodu sa pre tento typ uzlu dopočítava  $P$  a  $Q$ .
2.  $PQ$  - v tomto type uzlu sú definované hodnoty činného a jalového výkonu a bežne sa jedná o uzly so záťažou (odbery zo sústavy). Pomocou výpočtov ustáleného chodu sa pre tento typ uzlu dopočítava  $U$  a  $\delta$ .
3.  $PU$  - v tomto type uzlu je definovaná hodnota činného výkonu a absolútna hodnota (veľkosť) napätia. V tomto prípade sa jedná o uzly generátorov s reguláciou napätia a činného výkonu. Typicky sa jedná o pripojenie elektrárenských blokov. Pomocou výpočtov ustáleného chodu sa pre tento typ uzlu dopočítava  $Q$  a  $\delta$ .

Pre výpočty ustáleného chodu sústavy sa používajú určité zjednodušenia a konvencie:

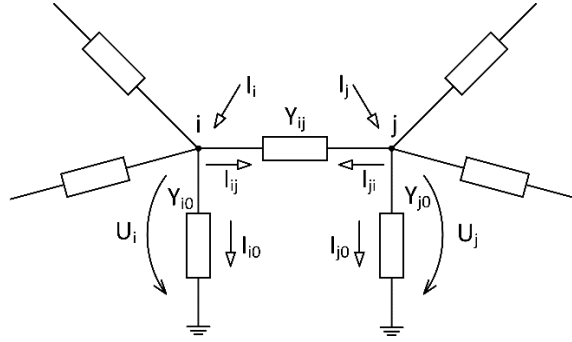
- Sieť je modelovaná jednopólovo, čo znamená že sa jedná o symetrickú sústavu
- Výpočty uvažujú pre sínusový priebeh základnej harmonickej
- Pre prehľadnosť sú využívané pomerné jednotky
- Používajú sa dve znamienkové konvencie pre výkony, zdrojovo a spotrebičovo orientovaný systém. U zdrojového systému sú výkony dodávané do uzlov s kladným znamienkom a výkony odoberané z uzlov so záporným znamienkom. U spotrebičového systému je to naopak a teda výkony dodávané do uzlov sú so záporným znamienkom a výkony odoberané z uzlov sú s kladným znamienkom.

V oblasti elektroenergetiky sú výpočty ustáleného chodu striedavej siete využívané predovšetkým pre efektívnu prevádzku existujúcich sústav a pre plánovanie budúcich expanzií a modifikácií sústavy. Výpočty ustáleného chodu sú tiež významným nástrojom pre kontingenčnú analýzu sústavy.

V nasledujúcich podkapitolách si predstavíme definíciu problému výpočtu ustáleného stavu, najčastejšie používané metódy a detailnejší popis využitia Newton-Raphsonovej metódy.

### 3.1 Definícia problému ustáleného chodu striedavých elektrických sietí a možnosti riešenia

Pre definovanie problému ustáleného chodu sústavy budeme uvažovať  $n$ -uzlovú sieť. Pre zostavenie požadovaných rovníc si v prvom kroku definujeme uzlový prúd v  $i$ -tom uzle podľa schém na obrázku 3.1 podľa rovnice (3.1).



Obr. 3.1: Schéma časti sústavy pre definovanie uzlového prúdu  $i$ -teho uzlu.

$$\hat{I}_i = \hat{U}_i \sum_{j=0}^n \hat{Y}_{ij} - \sum_{j=1}^n \hat{Y}_{ij} \hat{U}_j \quad j \neq i \quad (3.1)$$

kde  $\hat{I}_i$  je uzlové prúd  $i$ -teho uzlu,  $n$  je počet uzlov spojených s uzlom  $i$ ,  $\hat{Y}_{ij}$  je admittancia medzi uzlom  $i$  a  $j$ ,  $j$  je index uzlov spojených s uzlom  $i$ . Pre index  $j = 0$  sa jedná o prúd admittanciou v uzle  $i$  zvedený do zeme.

Ďalej je potrebné vyjadriť uzlový výkon v  $i$ -tom uzle. To je možné na základe uzlového prúdu a uzlového napätia v uzle  $i$  s použitím rovnice (3.2).

$$\hat{S}_i = P_i + jQ_i = \hat{U}_i \hat{I}_i^* \quad (3.2)$$

Ďalej si z rovnice (3.2) vyjadríme uzlový prúd podľa rovnice (3.3).

$$\hat{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\hat{U}_i^*} \quad (3.3)$$

Do rovnice (3.3) dosadíme za uzlový prúd podľa rovnice (3.1) a získame novú rovnicu (3.4).

$$\hat{U}_i = \frac{\frac{P_i - jQ_i}{\hat{U}_i^*} + \sum_{j=1}^n \hat{Y}_{ij} \hat{U}_j}{\sum_{j=0}^n \hat{Y}_{ij}} \quad j \neq i \quad (3.4)$$

V rovnici (3.4) je viditeľné že uzlové napätie  $\hat{U}_i$  vystupuje na pravej i ľavej strane rovnice, čo predurčuje použitie iteratívnych metód pre riešenie ustáleného chodu sústavy. Rovnica (3.4) však vyjadruje napätie, čo je hľadaná veličina pre PQ uzol a PU uzol. Pre PU uzol ďalej potrebujeme poznať rovnicu pre jalový výkon a pre U $\delta$  uzol potrebujeme poznať činný i jalový výkon. Tieto výkony si môžeme vyjadriť z rovnice (3.4) a dostaneme výsledné vzťahy pre činné výkony (3.5) a jalové výkony (3.6).

$$P_i = \operatorname{Re} \left\{ \hat{U}_i^* \left( \hat{U}_i \sum_{j=0}^n \hat{Y}_{ij} - \sum_{j=1}^n \hat{Y}_{ij} \hat{U}_j \right) \right\} \quad j \neq i \quad (3.5)$$

$$Q_i = -Im \left\{ \hat{U}_i^* \left( \hat{U}_i \sum_{j=0}^n \hat{Y}_{ij} - \sum_{j=1}^n \hat{Y}_{ij} \hat{U}_j \right) \right\} \quad j \neq i \quad (3.6)$$

Pomocou rovníc (3.4) až (3.6) dokážeme definovať problém ustáleného chodu sústavy. Pre výpočty rozsiahlejších sietí je vhodnejšie zavedenie všeobecného maticového popisu. V prvom kroku si zavedieme admitančnú maticu ktorá popisuje sieť. Tá je tvorená diagonálnymi prvkami (3.7) a mimodiagonálnymi prvkami (3.8).

$$\hat{Y}_{(i,i)} = \sum_{j=0}^n \hat{Y}_{ij} \quad j \neq i \quad (3.7)$$

$$\hat{Y}_{(i,j)} = -\hat{Y}_{ij} \quad j \neq i \quad (3.8)$$

Pri vyjadrení uzlových výkonov budeme vychádzať z rovnice (3.7), ktorá bude uvedená v maticovom zápise. Index  $n$  označuje počet uzlov.

$$[\hat{S}] = [\hat{U}_{diag}][\hat{I}^*] = [\hat{U}_{diag}][\hat{Y}^*][\hat{U}^*] \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{S}_1 \\ \hat{S}_2 \\ \vdots \\ \hat{S}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{U}_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \hat{U}_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \hat{U}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{Y}_{1,1}^* & \hat{Y}_{1,2}^* & \cdots & \hat{Y}_{1,n}^* \\ \hat{Y}_{2,1}^* & \hat{Y}_{2,2}^* & \cdots & \hat{Y}_{2,n}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{Y}_{n,1}^* & \hat{Y}_{n,2}^* & \cdots & \hat{Y}_{n,n}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_1^* \\ \hat{U}_2^* \\ \vdots \\ \hat{U}_n^* \end{bmatrix}$$

Po roznásobení matice z rovnice (3.7) dostaneme všeobecný vzťah (3.8) pre zdanlivý výkon  $i$ -teho uzlu.

$$\hat{S}_i = \hat{U}_i \sum_{j=1}^n \hat{Y}_{i,j}^* \hat{U}_j^* \quad (3.8)$$

Z admitančnej matice si v exponenciálnom tvare vyjadríme napätie (3.9) a admitanciu (3.10).

$$\hat{U}_i = |\hat{U}_i| e^{j \cdot Arg(\hat{U}_i)} = U_i e^{j \delta_i} \quad (3.9)$$

$$\hat{Y}_{i,j} = |\hat{Y}_{i,j}| e^{j \cdot Arg(\hat{Y}_{i,j})} = Y_{i,j} e^{j \varepsilon_{i,j}} \quad (3.10)$$

Následne tieto vyjadrené rovnice dosadíme do rovnice (3.8) a dostaneme upravený vzťah pre zdanlivé výkony v uzloch (3.11).

$$\hat{S}_i = U_i e^{j \delta_i} \sum_{j=1}^n Y_{i,j} e^{-j \varepsilon_{i,j}} * U_j e^{-j \delta_j} = U_i \sum_{j=1}^n Y_{i,j} * U_j * e^{j(\delta_i - \delta_j - \varepsilon_{i,j})} \quad (3.11)$$

Ďalej si potrebujeme vyjadriť činný a jalový výkon, k čomu použijeme rovnicu (3.12). Kosínus bude udávať činný výkon (3.13) a sínus bude udávať jalový výkon (3.14).

$$e^{j \varphi} = \cos(\varphi) + j * \sin(\varphi) \quad (3.12)$$

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^n Y_{i,j} * U_j * \cos(\delta_i - \delta_j - \varepsilon_{i,j}) \quad (3.13)$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} * U_j * \sin(\delta_i - \delta_j - \varepsilon_{ij}) \quad (3.14)$$

kde  $P_i$  je uzlový činný výkon i-teho uzlu,  $Q_i$  je uzlový jalový výkon i-teho uzlu,  $Y_{ij}$  je veľkosť admitancie prvku admitančnej matice z jej i-teho riadku a j-teho stĺpca,  $U_i$  a  $U_j$  sú veľkosti uzlových napätí i-teho respektíve j-teho uzlu,  $\delta_i$  a  $\delta_j$  sú uhly uzlových napätí i-teho respektíve j-teho uzlu a  $\varepsilon_{ij}$  je uhol admitancie prvku admitančnej matice z jej i-teho riadku a j-teho stĺpca.

Riešenie ustáleného chodu sústavy v praxi znamená riešenie sústavy nelineárnych rovníc k čomu sú využívané iteratívne metódy. V súčasnosti existujú 4 hlavné možnosti pre riešenie problému ustáleného chodu sústavy:

1. Gauss-Seidelova metóda – jedná sa o staršiu iteratívnu metódu, v súčasnosti menej používaná pre pomalšiu konvergenciu.
2. Newton-Raphsonová metóda – najčastejšie používaná iteratívna metóda.
3. Fast Decoupled Newton-Raphsonová metóda – jedná sa o Newton-Raphsonovú metódu zjednodušenú za účelom rýchlejšej konvergenzie (zanedbanie odporov,  $\sin \delta_{ij} \approx \delta_{ij}$ , veľkosť napätí vo všetkých uzloch 1 p.j.)
4. HELM metóda – moderná metóda (2012) založená na pokročilých teóriách komplexnej analýzy

Pre potreby tejto diplomovej práce sa javí ako najúčelnejšie použitie Newton-Raphsonovej metódy, a preto jej ďalej bude venovaná pozornosť.

## 3.2 Newton-Raphsonová iteratívna metóda

Pre splnenie cieľov práce bude ďalej používaná Newton-Raphsonova iteratívna metóda. Základom pre realizáciu Newton-Raphsonovej metódy budú rovnice (3.13) a (3.14) odvodené v predchádzajúcej podkapitole.

### 3.2.1 Algoritmus Newton-Raphsonovej iteratívnej metódy

Pri realizácii Newton-Raphsonovej metódy si na úvod spravme predstavu o počte neznámych a počte rovníc. Každý typ uzlu (U $\delta$ , PU a PQ) je definovaný štyrmi veličinami (U,  $\delta$ , P a Q) a z nich sú vždy dve známe a dve neznáme. Musíme však zohľadniť skutočnosť, že pri znalosti admitančnej matice a U a  $\delta$  v každom uzle vieme dopočítať všetky uzlové P a Q. Newton-Raphsonovú metódu môžeme teda realizovať nasledujúcim spôsobom:

1. Odhadneme neznáme  $U^k$  a  $\delta^k$  v nulte iterácii, teda pre  $k=0$  (pre PQ uzly U aj  $\delta$ , pre PU uzly len  $\delta$  a pre uzol U $\delta$  nič neodhadujeme, lebo obe veličiny poznáme).
2. Vypočítame výkony  $P^k$  a  $Q^k$  ktoré sú známe pomocou odhadnutých hodnôt podľa rovníc (3.13) a (3.14) (Pre PQ uzly vypočítame P aj Q, pre PU uzly vypočítame len P a pre pre uzol U $\delta$  nič nepočítame, lebo obe veličiny poznáme )
3. Podľa rovnice (3.15) vypočítame defekt výkonov.

$$\Delta PQ^k = PQ_{zadané} - PQ^k \quad (3.15)$$

Kde  $\Delta PQ^k$  je defekt výkonov,  $PQ_{zadané}$  su zadané hodnoty uzlových činných a jalových výkonov (pre PQ uzly P aj Q, pre PU uzly len P a pre uzol U $\delta$  nič) a  $PQ^k$  sú odhadnuté hodnoty výkonov vypočítané v kroku 2.

4. Zostavíme Jakobiho funkcionálnu maticu zo všeobecných vzťahov pre činný a jalový výkon (rovnice (3.13) a (3.14)). Pre Jakobiho funkcionálnu maticu platí maticová rovnica (3.16).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^k \\ \vdots \\ \Delta P_{n_{PQ+PU}}^k \\ \Delta Q_1^k \\ \vdots \\ \Delta Q_{n_{PQ}}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1^k}{\partial \delta_1} & \cdots & \frac{\partial P_1^k}{\partial \delta_{n_{PQ+PU}}} & \frac{\partial P_1^k}{\partial U_1} & \cdots & \frac{\partial P_1^k}{\partial U_{n_{PQ}}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{n_{PQ+PU}}^k}{\partial \delta_1} & \cdots & \frac{\partial P_{n_{PQ+PU}}^k}{\partial \delta_{n_{PQ+PU}}} & \frac{\partial P_{n_{PQ+PU}}^k}{\partial U_1} & \cdots & \frac{\partial P_{n_{PQ+PU}}^k}{\partial U_{n_{PQ}}} \\ \frac{\partial Q_1^k}{\partial \delta_1} & \cdots & \frac{\partial Q_1^k}{\partial \delta_{n_{PQ+PU}}} & \frac{\partial Q_1^k}{\partial U_1} & \cdots & \frac{\partial Q_1^k}{\partial U_{n_{PQ}}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{n_{PQ}}^k}{\partial \delta_1} & \cdots & \frac{\partial Q_{n_{PQ}}^k}{\partial \delta_{n_{PQ+PU}}} & \frac{\partial Q_{n_{PQ}}^k}{\partial U_1} & \cdots & \frac{\partial Q_{n_{PQ}}^k}{\partial U_{n_{PQ}}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta_1^k \\ \vdots \\ \Delta \delta_{n_{PQ+PU}}^k \\ \Delta U_1^k \\ \vdots \\ \Delta U_{n_{PQ}}^k \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

kde  $n_{PQ+PU}$  je súčet počtu PU uzlov a PU uzlov a  $U_{n_{PQ}}$  je počet PQ uzlov. Rovnicu (3.16) je možné zapísať skrátene podľa (3.17). Jakobiho matica označuje označenie J.

$$\begin{bmatrix} \Delta P^k \\ \Delta Q^k \end{bmatrix} = [J] \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta^k \\ \Delta U^k \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

5. V kroku 3 sme určili defekty činných a jalových výkonov. Ďalej potrebuje určiť korekcie ulov  $\Delta \delta^k$  a veľkostí uzlových napätí  $\Delta U^k$ . Toto je možné riešením maticovej rovnice (3.17) nasledovne podľa (3.18). Pre tento krok potrebuje vytvoriť inverznú Jakobiho maticu.

$$[J^{-1}] \cdot \begin{bmatrix} \Delta P^k \\ \Delta Q^k \end{bmatrix} = [J^{-1}] \cdot [J] \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta^k \\ \Delta U^k \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \Delta \delta^k \\ \Delta U^k \end{bmatrix} = [J^{-1}] \cdot \begin{bmatrix} \Delta P^k \\ \Delta Q^k \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

6. V poslednom kroku korigujeme odhanuté uhly  $\Delta \delta^k$  a veľkostí uzlových napätí  $\Delta U^k$  z prvého kroku podľa rovnice (3.19). Získame tak nové odhad hodnôt ktoré by mali byť presnejšie.

$$\delta U^{k+1} = \delta U^k + \Delta \delta U^k \quad (3.19)$$

7. Postup opakujeme od bodu 2 dovtedy, kým úloha nebude konvergovať, tj. rozdiel hodnôt dvoch po sebe idúcich iterácií bude menší než požadovaná tolerancia  $\epsilon$ .

Pre implementáciu popísaného algoritmu je dostupné niekoľko softvérov, v tejto práci budeme ďalej využívať prostredie MATLAB.

### 3.2.2 Vstupné dáta potrebné pre výpočet

Pre implementovanie Newton-Raphsonovej metódy je potrebná znalosť topológie siete vrátane parametrov prvkov a parametre jednotlivých uzlov. Metóda teda pracuje s dvomi vstupnými súbormi dát. Prvým vstupným súborom je súbor popisujúci uzly. Tento súbor obsahuje číslo uzlu, meno uzlu, typ uzlu (PQ, PU, U $\delta$ ), podľa typu uzlu napätie v danom uzle, dodávaný a odoberaný výkon pre daný uzol opäť v závislosti na type uzlu. Vstupné dáta je možné zbierať do pripraveného formulára podľa tabuľky 3.1.

Číslo uzlu	Názov uzlu	Menovité napätie [kV]	Zadané napätie [p.j.]	Typ Uzlu	Odoberaný činný výkon [MW]	Odoberaný jalový výkon [MVar]	Dodaný činný výkon [MW]	Dodaný jalový výkon [MVar]
1	Uzol A	110	0	PQ	10	5	0	0
2	Uzol B	110	1,03	PU	0	0	20	0
3	Uzol B	110	1,05	U $\delta$	0	0	0	0
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
n	Uzol X	110	0	PQ	12	2	0	0

Zadané hodnoty

Vypočítané hodnoty

Tab. 3.1: Ukážka štruktúry vstupných dát pre Newton-Raphsonovú metódu.

Druhým súborom vstupných dát je súbor popisujúci vetvy. Tento súbor popisuje spojenia medzi jednotlivými uzlami a obsahuje číslo vetvy, názov vetvy, číslo počiatočného uzlu vetvy, číslo konečného uzlu vetvy, pozdĺžny odpor a reaktancia vetvy, susceptanciu vetvy a prevod transformátoru (ak je vetva reprezentovaná transformátorom). Vstupné dáta je možné zbierať do pripraveného formulára podľa tabuľky 3.1.

Číslo vetvy	Názov vetvy	Počiatočný uzol	Konečný uzol	R [ $\Omega$ ]	X [ $\Omega$ ]	B [1/ $\Omega$ ]	Prevod transformátoru [-]
1	Vedenie A	1	2	0,1	0,7	20	1
2	Vedenie B	1	3	2	14	79	1
3	Vedenie C	2	4	1	7	60	1
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
n	Vedenie X	2	3	0,5	2	50	1

Tab. 3.2: Ukážka štruktúry vstupných dát vetví pre Newton-Raphsonovú metódu.



Po prevedení informácií o študovanej sústave do formy podľa tabuľky 3.1 a 3.2 je možné spustiť výpočet pomocou Newton-Raphsonovej iteratívnej metódy.

### 3.2.3 Výstupy Newton-Raphsonovej iteračnej metódy

Základným výstupom Newton-Raphsonovej iteratívnej metódy je tabuľka uzlov obsahujúca identifikátor uzlu, veľkosti napätia v uzloch  $U$ , uhly napätí v uzloch  $\delta$ , činné uzlové výkony a jalové uzlové výkony. Pre analýzu striedavých elektrických sietí je však potrebné poznať aj iné parametre. Pre analýzu zaťaženia prvkov je dôležité určenie prúdov jednotlivých vetví (kontrola zaťažiteľnosti vedení a iných prvkov) (3.20), výkony prenášané jednotlivými vetvami (3.21) a (3.22) a činné a jalové (jalový výkon vstrebávaný/dodávaný vedeniami a transformátormi) straty v sústave (3.23 a 3.24).

$$\hat{I}_{ij} = (\hat{U}_i - \hat{U}_j) \hat{Y}_{ij} \quad (3.20)$$

Kde  $\hat{I}_{ij}$  je prúd vetvou z uzlu  $i$  do uzlu  $j$ ,  $\hat{U}_i$  je fázové napätie v uzle  $i$ ,  $\hat{U}_j$  je fázové napätie v uzle  $j$  a  $\hat{Y}_{ij}$  je prvok admitančnej matice v  $i$ -tom riadku a  $j$ -tom stĺpci.

$$P_{ij} = \text{Re}\{3 * \hat{U}_i * \hat{I}_{ij}^*\} \quad (3.21)$$

$$Q_{ij} = \text{Im}\{3 * \hat{U}_i * \hat{I}_{ij}^*\} \quad (3.22)$$

$$\Delta P_{tot} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (3.23)$$

$$\Delta Q_{tot} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (3.24)$$

kde  $P_i$  je činný uzlový výkon  $i$ -teho uzlu,  $Q_i$  je jalový uzlový výkon  $i$ -teho uzlu a  $n$  je celkový počet uzlov analyzovanej siete.

Postupy popísané v tejto kapitole práce vychádzajú z referencií [18] - [21].

## 4 Ustálený chod striedavých elektrických sietí s HVDC prenosom

Predošlá kapitola sa zaoberala výpočtom ustáleného chodu striedavých elektrických sietí. Pre zhodnotenie prínosu jednosmerného prenosu je potrebné túto technológiu implementovať do výpočtov ustáleného chodu sústavy.

### 4.1 Možnosti zahrnutia HVDC systému do striedavej elektrickej siete

V prípade jednoduchého HVDC systému (dva uzly s terminálmi spojené jedným HVDC vedením) sú dve možnosti pre riešenie striedavej elektrickej siete s týmto systémom:

1. Zjednodušená implementácia cez vstupné dátové súbory striedavej elektrickej siete pre Newton-Raphsonovú iteratívnu metódu
2. Implementácia modelu usmerňovača a invertoru do Newton-Raphsonovej iteratívnej metódy.

Prvá uvedená metóda je do veľkej miery zjednodušená a vyžaduje si množstvo predpokladov. Najvýznamnejšie zjednodušenia a predpoklady tejto metódy sú nasledovné:

- V obidvoch termináloch (usmerňovač i inverter) sú kompenzované jalové výkony, a z toho vyplýva, že tieto uzly sa pre striedavú sieť javia ako odber/dodávka činného výkonu
- Možnosť implementácie strát systému v závislosti na požadovanom prenose činného výkonu
- Model neumožňuje implementáciu regulácie napätia v uzle (HVDC technológia umožňuje), napätie v uzloch terminálov HVDC je dané pomermi v striedavej sieti
- Neumožňuje implementáciu rôznych riadiacich funkcií HVDC systému, a ďalšie obmedzenia

Metódu je možné implementovať jednoduchou úpravou vstupných dát uzlov pre Newton-Raphsonovú iteratívnu metódu. V Počiatočnom termináli HVDC (usmerňovač) špecifikujeme odber činného výkonu  $P_1$  podľa rovnice (4.1).

$$P_1 = \frac{P_2}{1 - k_{\Delta p}} \quad (4.1)$$

kde  $P_2$  požadovaný činný výkon prenášaný HVDC, tj. výkon ktorý, ktorý bude dodaný do koncového terminálu HVDC (inverter) a  $k_{\Delta p}$  je koeficient činných strát HVDC systému, ktorý vyjadruje percentuálne straty celého HVDC systému. Implementácia tejto metódy je jednoduchá, vzhľadom k tomu že nie je potrebné zasahovať do algoritmov Newton-Raphsonovej iteratívnej metódy, avšak je to za cenu značných zjednodušujúcich predpokladov.

Druhá možnosť implementácie HVDC prenosu do výpočtov ustáleného chodu striedavých elektrických sietí je omnoho náročnejšia a vyžaduje priamy zásah do algoritmu Newton-Raphsonovej metódy. Podľa literatúry [22] - [24] sú pre tento problém používané dva prístupy. Prvý prístup je takzvaný sekvenčný, ktorý rieši zvlášť jednosmerný systém a zvlášť striedavý systém. Pri použití iteratívnych metód to znamená, že najprv sa rieši úloha konvergencie jednosmernej siete a potom striedavej siete. Tento prístup je jednoduchší na implementáciu, avšak u tohto prístupu dochádza často k problémom s konvergenciou riešenie (úloha buď nekonverguje, alebo konverguje po vysokom počte iterácií). Príčinou je, že iteratívny cyklus pre striedavú sieť je vnorený v iteratívnom cykle pre striedavú sieť. Druhý používaný prístup nazývaný ako „zjednotený“ (z anglického unified), je podobný klasickej implementácii Newton-

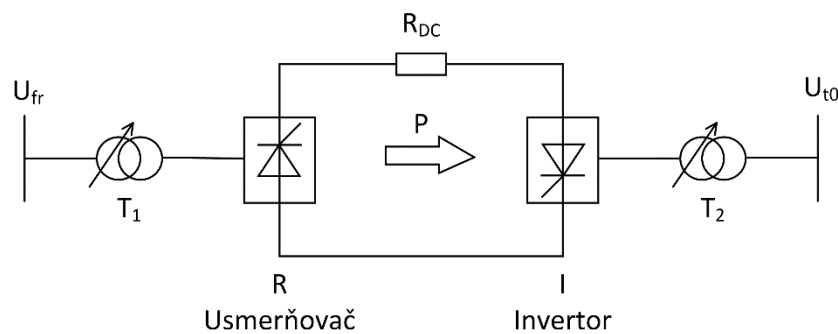
Raphsonovej metódy pre ustálený chod striedavej siete s tým, že rovnice sú rozšírené o rovnice činných a jalových výkonov sú rozšírené o rovnice HVDC systému. Rozšírené sú aj premenné, okrem uhlov a veľkostí uzlových napätí metóda pracuje i s veličinami HVDC systému. Táto metóda je z výpočtového hľadiska rýchla a so spoľahlivou konvergenciou. Nevýhodou metódy je komplikovanejšia implementácia, pretože systém rovníc i jakobiho funkcionálna matica sa značne rozširujú. V práci budeme s touto metódou pracovať ďalej, jej popisu budú venované nasledujúce podkapitoly.

## 4.2 Implementácia HVDC systému do Newton-Raphsonovej iteratívnej metódy (prístup „unified“)

Implementáciu HVDC systému do Newton-Raphsonovej iteratívnej metódy pomocou „unified“ prístupu zrealizujeme rovnicovým popisom súčastí HVDC systému a vybraných regulačných rovníc tohto systému.

### 4.2.1 Použitá náhrada HVDC prenosu

Pre odvodenie modifikovanej Newton-Raphsonovej iteratívnej metódy budeme uvažovať LCC HVDC systém. Náhradná schéma takéhoto systému je znázornená na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Náhradná schéma LCC HVDC systému pre zavedenie veličín

Význam veličín na obrázku 4.1 je nasledovný:  $U_{fr}$  je veľkosť napätia v uzle pripojenia HVDC terminálu ktorý je v režime usmerňovača (odoberá činný výkon zo striedavej siete),  $U_{t0}$  je veľkosť napätia v uzle pripojenia HVDC terminálu, ktorý je v režime invertoru (dodáva činný výkon do striedavej siete),  $T_1$  a  $T_2$  sú transformátory usmerňovača a invertoru (umožňujú zmenu prevodu pomocou prepínača odbočiek),  $R_{DC}$  je jednosmerný odpor HVDC vedenia (zahrňuje i odpor metalickej návratovej cesty v prípade unipolárneho HVDC systému, alebo druhej polaroty v prípade bipolárneho HVDC systému).

### 4.2.2 Rovnicový popis usmerňovača

V prvom kroku si zavedieme rovnice popisujúce terminál s usmerňovačom. Pre jednosmerné napätie  $U_{dr}$  na strane usmerňovača platí rovnica (4.2).

$$U_{dr} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot t_1 \cdot U_{fr} \cdot \cos \alpha \quad (4.2)$$

Kde  $t_1$  je prevod transformátora  $T_1$ ,  $U_{fr}$  je napätie na strane striedavej siete transformátora pred usmerňovačom a  $\alpha$  je riadiaci uhol usmerňovača. Prúd pretekajúci HVDC vedením  $I_d$  môžeme popísať pomocou rovnice (4.3).

$$U_{di} = U_{dr} - R_{line} \cdot I_d \quad (4.3)$$

kde  $U_{di}$  je jednosmerné napätie na strane invertora,  $R_{line}$  je odpor HVDC vedenia. Ďalej popíšeme prúd primárnym vinutím transformátor T1 (vinutie na strane striedavej sústavy)  $I_1$  pomocou rovnice (4.4).

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot t_1 \cdot I_d \quad (4.4)$$

Pre vyjadrenie činného a jalového výkonu odoberaného zo siete na strane usmerňovača je potrebné prijať zjednodušujúce predpoklady. Prvým predpokladom je že transformátor usmerňovača je bezstratový, druhým predpokladom je, že zanedbáme magnetizáciu magnetického obvodu transformátoru. Činné a jalové výkony teda môžeme vyjadriť podľa (4.5) a (4.6).

$$P_{dr} = U_d \cdot I_d = U_{fr} \cdot I_1 \cdot \cos \alpha \quad (4.5)$$

$$Q_{dr} = U_{fr} t_1 I_1 \cdot \sin \alpha \quad (4.6)$$

kde  $P_{dr}$  je činný výkon odoberaný HVDC terminálom (terminál s usmerňovačom) zo striedavej siete a  $Q_{dr}$  jalový výkon odoberaný HVDC terminálom (terminál s usmerňovačom) zo striedavej siete.

Pre HVDC terminál s usmerňovačom máme teda štyri premenné ktoré sa uplatnia vo vektore premenných (4.7).

$$[\bar{x}] = [U_{dr}, I_d, t_1, \cos \alpha]^T \quad (4.7)$$

#### 4.2.3 Rovnicový popis invertoru

V druhom kroku si zavedieme rovnice popisujúce terminál s invertorom. Pre jednosmerné napätie  $U_{di}$  na strane usmerňovača platí rovnica (4.8).

$$U_{di} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot t_2 \cdot U_{t0} \cdot \cos \gamma \quad (4.8)$$

kde  $t_2$  je prevod transformátoru T2,  $U_{t0}$  je napätie na strane striedavej siete transformátora pred invertorom a  $\gamma$  je uhol vypnutia tyristorov invertoru (z anglického extinction angle).

Pre použitie pomerných hodnôt je potrebné dbať na invariantnosť výkonov a preto sa napríklad u jednosmerných prúdov prejavia určité rozdiely podľa rovníc (4.9) a (4.10).

$$I_1[A] = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d[A] \quad (4.9)$$

$$I_1[p.u.] = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot \sqrt{3} \cdot I_d [p.u.] \quad (4.10)$$

Do vektora premenných teda pridanú veličiny  $U_{di}$ ,  $t_2$  a  $\cos \gamma$ . Vektor premenných bude mať teda tvar podľa rovnice (4.11).

$$[X] = [U_{dr}, t_1, \cos \alpha, U_{di}, t_2, \cos \gamma, I_d]^T \quad (4.11)$$

#### 4.2.4 Rovnicový popis zohľadňujúci pracovný režim HVDC

Rovnicovým popisom usmerňovača, invertoru a HVDC vedenia máme popísaný celý HVDC systém. Vektor premenných (4.11) má 7 nezávislých premenných, z čoho vyplýva, že pre jednoznačné riešenie prevádzkového stavu HVDC budeme potrebovať 7 rovníc. Základný popis HVDC je možný pomocou 3 rovníc (4.12) až (4.14). Ostávajúce 4 rovnice popisujú pracovný režim usmerňovača, tj. jedná sa o riadiace rovnice (4.15) až (4.18).

$$U_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot t_1 \cdot U_{fr} \cdot \cos \alpha \quad (4.12)$$

$$U_{di} = U_{dr} - R_{line} \cdot I_d \quad (4.13)$$

$$U_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot t_2 \cdot U_{t0} \cdot \cos \gamma \quad (4.14)$$

$$t_1 = t_{1set} \quad (4.15)$$

$$t_2 = t_{2set} \quad (4.16)$$

$$P_{DCset} = U_{dr} \cdot I_d \quad (4.17)$$

$$U_{di} = U_{diset} \quad (4.18)$$

kde  $t_{1set}$  je nastavený prevod transformátora usmerňovača,  $t_{2set}$  je nastavený prevod transformátora invertoru,  $P_{DCset}$  je nastavený požadovaný výkon prenášaný HVDC a  $U_{diset}$  je nastavené požadované jednosmerné napätie na strane invertoru. Posledné 4 rovnice je možné zvoliť aj inak, špecifikovaním iných premenných vystupujúcich vo vektore premenných (4.11).

#### 4.2.5 Modifikácia Newton-Raphsonovej iteratívnej metódy

Pre implementáciu HVDC systému do algoritmu pre riešenie ustáleného chodu sústavy pomocou Newton-Raphsonovej iteratívnej metódy bude potrebné začlenenie nových rovníc a neznámych. Začneme popisom zmeny výpočtu korekcií veľkostí neznámych veličín (v prípade len striedavej siete sú to veľkosti neznámych napätí a uhlov napätí (3.18), v prípade DC siete sú to navyše neznáme týkajúce sa HVDC, teda vektor (4.11)). Korekcie neznámych veličín určíme podľa modifikovanej rovnice (4.19).

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \delta_t \\ \Delta U \\ \Delta U_t \\ \Delta x \end{bmatrix} = [J]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta P_t \\ \Delta Q \\ \Delta Q_t \\ \Delta R \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

kde  $\Delta \delta$  je stĺpcový vektor korekcií uhlov uzlových napätí uzlov, v ktorých sa nenachádzajú HVDC terminály,  $\Delta \delta_t$  je stĺpcový vektor korekcií uhlov uzlových napätí uzlov, v ktorých sa nachádzajú HVDC terminály,  $\Delta U$  je stĺpcový vektor korekcií veľkostí uzlových napätí uzlov, v ktorých sa nenachádzajú HVDC terminály,  $\Delta U_t$  je stĺpcový vektor korekcií veľkostí uzlových napätí uzlov, v ktorých sa nachádzajú HVDC terminály,  $\Delta x$  je stĺpcový vektor korekcií neznámych veličín HVDC systému (4.11),  $[J]^{-1}$  je inverzná Jakobiho funkcionálna matica,  $\Delta P$  a  $\Delta Q$  sú stĺpcové vektory defektov známych uzlových činných a jalových výkonov, v ktorých sa nenachádzajú HVDC terminály,  $\Delta P_t$  a  $\Delta Q_t$  sú stĺpcové vektory defektov známych uzlových činných a jalových výkonov, v ktorých sa nachádzajú HVDC terminály a  $\Delta R$  je stĺpcový vektor s vyjadrením defektov známych veličín z rovníc (4.12) až (4.18).

Vzhľadom k doplneniu nových rovníc je potrebná i modifikácia Jakobiho funkcionálnej matice, ktorá bude mať tvar podľa rovnice (4.20).

$$[J] = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta_t} & \frac{\partial \Delta P}{\partial U} & \frac{\partial \Delta P}{\partial U_t} & \frac{\partial \Delta P}{\partial x} \\ \frac{\partial \Delta P_t}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta P_t}{\partial \delta_t} & \frac{\partial \Delta P_t}{\partial U} & \frac{\partial \Delta P_t}{\partial U_t} & \frac{\partial \Delta P_t}{\partial x} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial \delta_t} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial U} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial U_t} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial x} \\ \frac{\partial \Delta Q_t}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta Q_t}{\partial \delta_t} & \frac{\partial \Delta Q_t}{\partial U} & \frac{\partial \Delta Q_t}{\partial U_t} & \frac{\partial \Delta Q_t}{\partial x} \\ \frac{\partial R}{\partial \delta} & \frac{\partial R}{\partial \delta_t} & \frac{\partial R}{\partial U} & \frac{\partial R}{\partial U_t} & \frac{\partial R}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Popis veličín je obdobný ako v prípade rovnice (4.19). Odhad neznámych pre ďalšiu iteráciu budeme korigovať podľa rovnice (4.21).

$$\begin{bmatrix} \delta \\ \delta_t \\ U \\ U_t \\ x \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} \delta \\ \delta_t \\ U \\ U_t \\ x \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \delta_t \\ \Delta U \\ \Delta U_t \\ \Delta x \end{bmatrix}_k \quad (4.21)$$

Špecifikujeme rovnice pre výpočet defektov uzlových výkonov. Pre defekty uzlových výkonov pre uzly s HVDC terminálmi platia rovnice (4.22) a (4.23).

$$\Delta P_{it} = P_{set_i} - \sum_{j=1}^n P_{ij} - P_{dc_i} \quad (4.22)$$

$$\Delta Q_{it} = Q_{set_i} - \sum_{j=1}^n Q_{ij} - Q_{dc_i} \quad (4.23)$$

kde  $\Delta P_{it}$  a  $\Delta Q_{it}$  sú defekty činných a jalových uzlových výkonov v uzloch s HVDC terminálmi,  $P_{set_i}$  a  $Q_{set_i}$  sú zadané uzlové činné a jalové uzlové výkony v uzloch s HVDC terminálmi,  $\sum_{j=1}^n P_{ij}$  a  $\sum_{j=1}^n Q_{ij}$  sú bilancie výkonov vstupujúcich/vystupujúcich z daných uzlov striedavými vedeniami určené podľa (3.13) a (3.14) a  $P_{dc_i}$  a  $Q_{dc_i}$  sú výkony odoberané/dodávané HVDC terminálmi. Tieto výkony je možné pre inverter popísať rovnicami (4.24) a (4.25) a pre usmerňovač podľa (4.26) a (4.27).

$$P_{dc_i} = P_{dc_{set}} \quad (4.24)$$

$$Q_{dc_i} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot I_d \cdot U_i \cdot t_i \cdot \sin \alpha \quad (4.25)$$

$$P_{dc_i} = P_{dc_{setj}} + R_{dc} \cdot I_d^2 \quad (4.26)$$

$$Q_{dc_i} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot I_d \cdot U_i \cdot t_i \cdot \sin \gamma \quad (4.27)$$

Pre uzly bez HVDC terminálov platia rovnice (4.28) a (4.29).

$$\Delta P_i = P_{set_i} - \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad (4.28)$$

$$\Delta Q_i = Q_{set_i} - \sum_{j=1}^n Q_{ij} \quad (4.29)$$

Takto rozšírená Newton-Raphsonová metóda je využitá k riešeniu ustáleného chodu striedavej siete s jednoduchým HVDC prenosom medzi dvomi uzlami. V „multiterminal“ HVDC systéme by bola táto implementácia omnoho zložitejšia.

## 5 Prípadová štúdia

Cieľom prípadovej štúdie je poukázať na možnosť posilnenia distribučnej sústavy v stave zásobovania kritickej infraštruktúry časti Stredočeského kraja a časti Hlavného mesta Prahy. V prvotných výpočtových variantoch bude analyzované postupné oživenie ostrovnej prevádzky za pomoci elektrárenských blokov v Kladne. V štádiu kedy bude ostrovná prevádzka distribučnej sústavy 110 kV rozšírená zo Stredočeského kraja do severnej a západnej časti Prahy, bude prípadová štúdia analyzovať využitie HVDC technológie pre zvýšenie resiliencie kritickej infraštruktúry.

### 5.1 Zadanie prípadovej štúdie

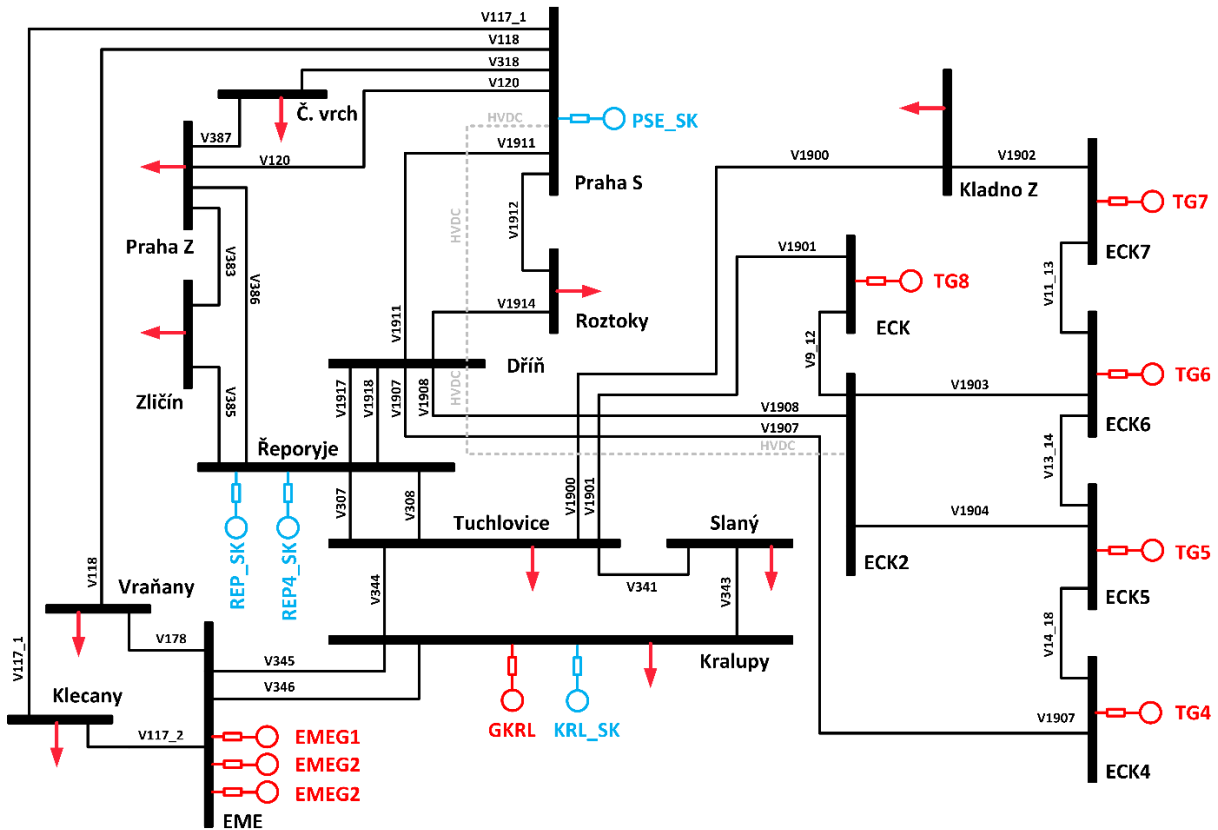
Prípadová štúdia bude realizovaná pre distribučnú sústavu 110 kV v oblasti Stredočeského kraja a Hlavného mesta Prahy. Sústava bude špecifikovaná v ďalších podkapitolách. Ako zjednodušujúci predpoklad je možné uvažovať, že v prípade mimoriadnej situácie si napájanie kritickej infraštruktúry bude vyžadovať pokrytie 1/3 spotreby v uzloch analyzovanej siete oproti normálnej prevádzke. Výpočty budú rozdelené do krokov, ktoré je potrebné uskutočniť od štartu z tmy pre vybranú časť sústavy až po zaistenie napájania kritickej infraštruktúry v severných a západných častiach Prahy s využitím elektrárenských blokov elektrárne Kladno. Pre vyhodnotenie sú významné nasledujúce kritéria:

- Zaťaženie existujúcich vedení
- Výkonová bilancia
- Uhlová stabilita systému

### 5.2 Popis analyzovaných zapojení

Pre upresnenie zadania je potrebné predstaviť základné zapojenie študovanej časti sústavy. Schéma tohto zapojenia je ilustrovaná na obrázku 5.1.





Obr. 5.1: Študovaná sústava v základnom zapojení

Na obrázku 5.1 je znázornené zapojenie študovanej sústavy. V schéme je viditeľné niekoľko zdrojov, modré reprezentujú pripojenie k iným častiam elektrizačnej sústavy (takzvaný skratový ekvivalent), červené predstavujú elektrárenské bloky. Prehľad zadaných parametrov týchto zdrojov je zhrnutý v tabuľke 5.1.

Označenie	Menovité napätie [kV]	Menovitý výkon [MVA]	Skratový výkon [MVA]	Dodávaný činný výkon [MW]	Nastavená veľkosť uzlového napätia [p.j.]	Umiestnenie	Typ uzlu
GKRL	11,5	10	-	10	1,05	Kralupy	PU
EMEG1	11,5	63	-	62,118	1,05	EME	PU
EMEG2	11,5	60	-	59,16	1,05	EME	PU
EMEG6	11,5	60	-	59,16	1,05	EME	PU
TG8	11,5	63	-	62,181	1,05	bb	PU
TG4	11,5	160	-	157,12	1,05	ECK4	PU
TG5	11,5	160	-	157,12	1,05	ECK5	PU
TG6	11,5	74	-	73,334	1,05	ECK6	PU
TG7	11,5	137,5	-	135	1,05	ECK7	PU
PSE_SK	110	-	104,5	-	-	Praha S	PQ
KRL_SK	110	-	330	-	-	Kralupy	PU
REP_SK	110	-	300	-	-	Řeporyje	Uδ
REP4_SK	400	-	17259	-	-	Řeporyje	Uδ

Tab. 5.1: Zdroje a skratové ekvivalenty v základnom zapojení študovanej sústavy

Ďalšou sadou vstupných dát pre základné zapojenie študovanej sústavy je prehľad parametrov jednotlivých uzlov. Zadané parametre uzlov sú zhrnuté v tabuľke 5.2.

Číslo uzlu	Meno uzlu	Menovité napätie uzlu [kV]	Zadané uzlové napätie [p.j.]	Typ uzlu	Odber P [MW]	Odber Q [MVar]	Dodávka P [MW]	Dodávka Q [MVar]
1	ŘEPORYJE	110	1,05	PQ	333	42	0	0
2	TUCHLOVICE	110	0	PQ	23	3	0	0
3	KRALUPY	110	1,05	PQ	61	4	10	0
4	EME	110	1,05	PQ	17	2	120	0
5	KLADNO_Z	110	0	PQ	41	7	0	0
6	DŘÍŇ	110	0	PQ	37	3	0	0
7	ROZTOKY	110	0	PQ	4	2	0	0
8	PRAHA_S	110	0	PQ	100	10	0	0
9	ECK	110	1,05	PU	0	0	0	0
10	SLANÝ	110	0	PQ	24	4	0	0
11	ECK_7	110	1,05	Uδ	0	0	135	0
12	ECK_2	110	0	PQ	9	4	0	0
13	ECK_6	110	1,05	PU	38	15	73,33	0
14	ECK_5	110	1,05	PU	0	0	157,12	0
15	ZLIČÍN	110	0	PQ	44	5	0	0
16	PRAHA_Z	110	0	PQ	120	33	0	0
17	ČERVENÝ_VRCH	110	0	PQ	48	11	0	0
18	ECK_4	110	1,05	PU	0	0	157,12	0
19	KLEČANY	110	0	PQ	20	1	0	0
20	VRAŇANY	110	0	PQ	3	1	0	0

Tab. 5.2: Vstupné dáta špecifikujúce jednotlivé uzly študovanej sústavy v základnom zapojení

Poslednou sadou vstupných dát su parametre vetví spojujúce uzly študovanej sústavy. Zadané parametre vetví sú zhrnuté v tabuľke 5.3.

Číslo vetvy	Názov vetvy	Počiatočný uzol	Konečný uzol	R [ $\Omega$ ]	X [ $\Omega$ ]	B [ $1/\Omega$ ]	Prevod TRF [-]	Maximálny dovolený prúd [A]
1	V 308	1	2	4,55	12,45	84	1	486
2	V 1912	7	8	0,78	2,09	14	1	486
3	V 1901	2	9	2,67	7,95	55	1	486
4	V 1914	6	7	2,53	8,35	58,5	1	486
5	V 346	3	4	3,45	9,05	60,5	1	486
6	V 345	3	4	3,45	9,05	60,5	1	486
7	V 341	2	10	2,84	9	61	1	579
8	V 1900	2	5	1,45	4,06	27,5	1	486
9	V 307	1	2	4,55	12,45	84	1	486
10	V 1907	6	18	0,14	1,31	19	1	1650
11	V 1904	12	14	0,08	0,7	12	1	1650
12	V 1903	12	13	0,15	0,85	10,5	1	825
13	V 1902	5	11	1,94	6,73	51,5	1	486
14	V 1908	6	12	0,07	0,66	7,5	1	1650
15	V 1917	1	6	0,91	8	66,5	1	1074
16	V 1918	1	6	0,91	8	66,5	1	1074
17	V 1911	6	8	3,23	10,15	70,5	1	486
18	V 344	2	3	5	15,2	103	1	486
19	V 345	3	4	3,45	9,05	60,5	1	486
20	V 346	3	4	3,45	9,05	60,5	1	486
21	V 343	3	10	4,85	13,9	93,5	1	486
22	V 386	1	16	0,62	5,45	43,5	1	1074
23	V 387	16	17	0,35	2,13	16	1	825
24	V 389	8	17	1,83	4,82	32,5	1	486
25	V 120	8	16	2,19	6,95	48	1	486
26	V 383	15	16	0,32	2,86	22,5	1	1074
27	V 385	1	15	0,31	2,74	21,5	1	1074
28	V 117_1	8	19	0,81	2,796	19,094	1	579
29	V 117_2	4	19	4,061	14,021	95,756	1	579
30	V 118	8	20	3,31	11,5	78,5	1	579
31	V 178	4	20	1,59	5,52	37,5	1	579
32	V 11_13	11	13	0,1	0,4	0,0001	1	10000
33	V 13_14	13	14	0,1	0,4	0,0001	1	10000
34	V 14_18	14	18	0,1	0,4	0,0001	1	10000
35	V 9_12	9	12	0,1	0,4	0,0001	1	10000

Tab. 5.3: Vstupné dáta špecifikujúce jednotlivé vetvy študovanej sústavy v základnom zapojení

V tejto časti sú špecifikované všetky potrebné vstupné dáta pre výpočet ustáleného chodu študovanej sústavy v základnom zapojení. Pre štúdium ostrovnej prevádzky vybranej oblasti s cieľom napájania

spotreby kritickej infraštruktúry bude postup jednotlivých etáp rozširovania ostrovnej prevádzky nasledovný:

1. V prvom kroku dôjde k oživeniu bloku TG8 elektrárne Kladno (pôsobí v úlohe U $\delta$  uzlu). Tento blok je realizovaný technológiou plynovej turbíny a vďaka vybavenie dieselgenerátorom umožňuje štart z tmy. V tomto štádiu vytvorený ostrov bude napájať kritickú infraštruktúru v uzloch Dříň a Kladno západ.
2. Nasleduje zachovanie odberov, s rozdielom že je spustený blok TG7 elektrárne Kladno (TG7 preberá úlohu U $\delta$  uzlu a uzol s TG8 je prevádzkovaný ako PU uzol). Tento blok je realizovaný ako tepelný uhoľný blok. V tomto štádiu vytvorený ostrov bude napájať kritickú infraštruktúru v uzloch Dříň, Kladno západ a navyše rozvodne elektrárne ECK2 a ECK6.
3. Oproti predošlej variante zdrojová základňa ostáva nezmenená. Na strane spotreby pribudne napájanie uzlov Praha sever a Řeporyje.
4. Zdrojová základňa je rozšírená o uhoľné bloky TG4 a TG5 elektrárne Kladno. Tieto bloky pracujú ako PU uzly. Na strane spotreby je systém bez zmien.
5. Dôjde k oživeniu všetkých uzlov študovanej siete okrem uzlov Červený vrch, Zličín a Praha západ. Na strane výrobných zdrojov nedochádza ku zmene.
6. Dôjde k oživeniu uzlov Červený vrch, Zličín a Praha západ. Na strane výroby dôjde k spusteniu TG6. V tejto variante bude testované navyšovanie odoberaných výkonov v uzloch Praha sever a Řeporyje.
7. Totožné ako predošlá konfigurácia s tým že dôjde k oživeniu HVDC prenosu z uzlu ECK2 do uzlu Praha sever. Bude testované postupné navyšovanie výkonov odberu v uzle Praha sever a Řeporyje a ďalej budú testované rôzne veľkosti prenášaných výkonov cez HVDC linku.

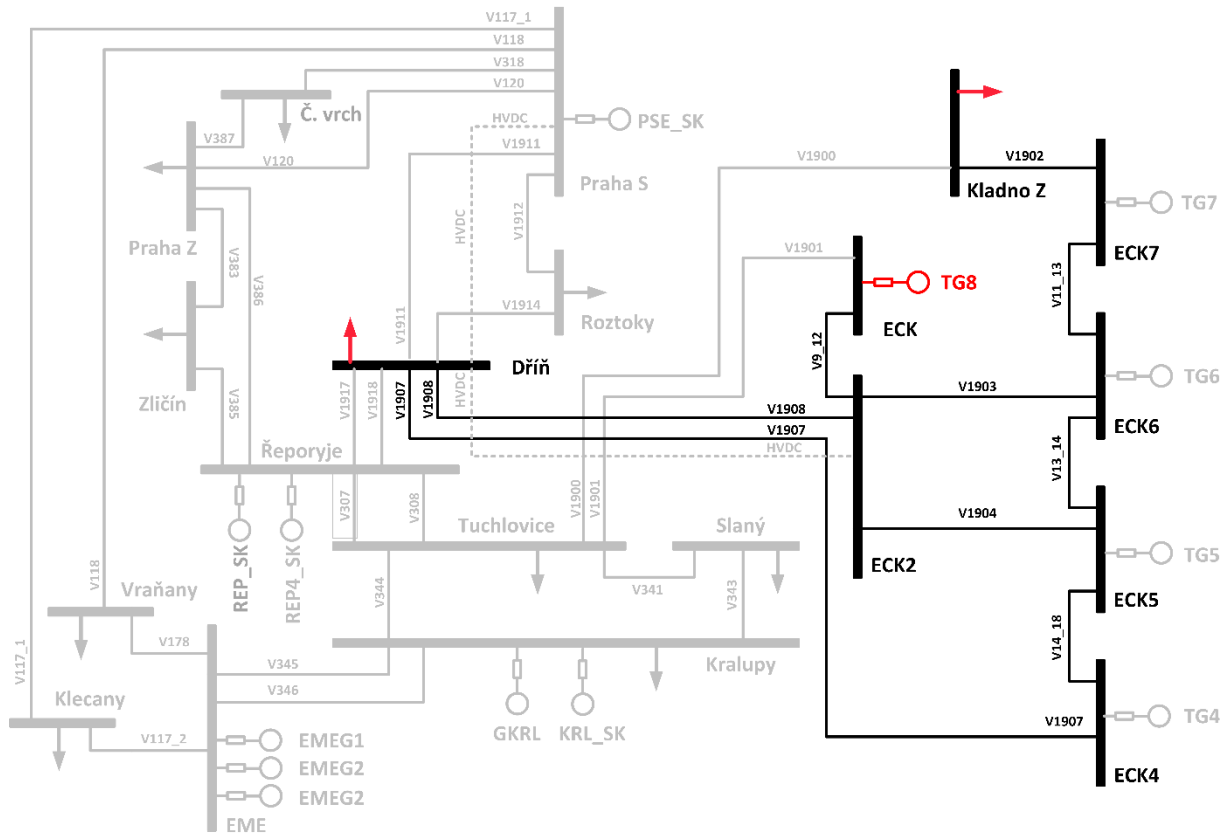
#### 5.2.1 1. etapa ostrovnej prevádzky

Pre prvú etapu ostrovnej prevádzky v prípadovej štúdii uvažujeme špecifikáciu uzlových parametrov podľa tabuľky 5.4. Z hľadiska zdrojov je v prevádzke TG8 umiestnený v uzle ECK, z hľadiska spotreby sú aktívne uzly Dříň a Kladno západ. Parametre vetví sú špecifikované v tabuľke 5.3 pričom aktívne vetvy (vedenia) sú viditeľné na schéme v obrázku 5.2.

Meno uzlu	Menovité napätie uzlu [kV]	Zadané uzlové napätie [p.j.]	Typ uzlu	Odber P [MW]	Odber Q [MVar]	Dodávka P [MW]	Dodávka Q [MVar]
KLADNO_Z	110	-	PQ	13,7	2,3	0,0	0,0
DŘÍŇ	110	-	PQ	12,3	1,0	0,0	0,0
ECK	110	1,05	U $\delta$	0,0	0,0	62 <sup>1)</sup>	0,0
ECK_7	110	-	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0
ECK_2	110	-	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0
ECK_6	110	-	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0
ECK_5	110	-	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0
ECK_4	110	-	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0

1) jedná sa o maximálnu hodnotu, skutočná hodnota bude určená výpočtom

Tab. 5.4: Vstupné dáta špecifikujúce jednotlivé uzly študovanej sústavy v 1. etape ostrovnej prevádzky



Obr. 5.2: Študovaná sústava v 1. etape ostrovnej prevádzky

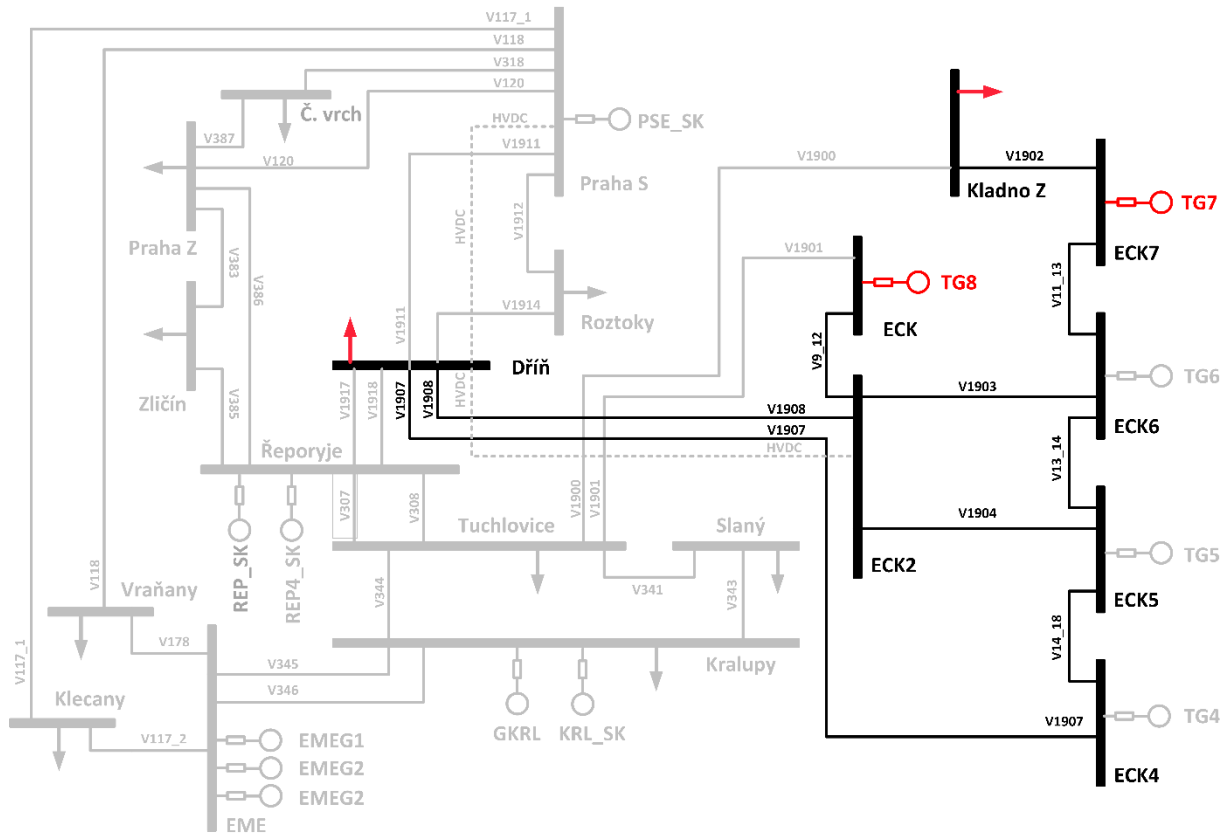
### 5.2.2 2. etapa ostrovnej prevádzky

Pre druhú etapu ostrovnej prevádzky v prípadovej štúdii uvažujeme špecifikáciu uzlových parametrov podľa tabuľky 5.5. Z hľadiska zdrojov je v prevádzke TG8 umiestnený v uzle ECK a TG7 umiestnený v uzle ECK7, z hľadiska spotreby sú aktívne uzly Dříň, Kladno západ, ECK2 a ECK6. Parametre vetví sú špecifikované v tabuľke 5.3 pričom aktívne vetvy (vedenia) sú viditeľné na schéme v obrázku 5.3.

Meno uzlu	Menovité napätie uzlu [kV]	Zadané uzlové napätie [p.j.]	Typ uzlu	Odber P [MW]	Odber Q [MVar]	Dodávka P [MW]	Dodávka Q [MVar]
KLADNO_Z	110	-	PQ	13,7	2,3	0,0	0,0
DŘÍŇ	110	-	PQ	12,3	1,0	0,0	0,0
ECK	110	1,05	PU	0,0	0,0	31,0	0,0
ECK_7	110	1,05	U $\delta$	0,0	0,0	135 <sup>1)</sup>	0,0
ECK_2	110	-	PQ	3,0	1,3	0,0	0,0
ECK_6	110	-	PQ	12,7	5,0	0,0	0,0
ECK_5	110	-	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0
ECK_4	110	-	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0

1) jedná sa o maximálnu hodnotu, skutočná hodnota bude určená výpočtom

Tab. 5.5: Vstupné dáta špecifikujúce jednotlivé uzly študovanej sústavy v 2. etape ostrovnej prevádzky



Obr. 5.3: Študovaná sústava v 2. etape ostrovej prevádzky

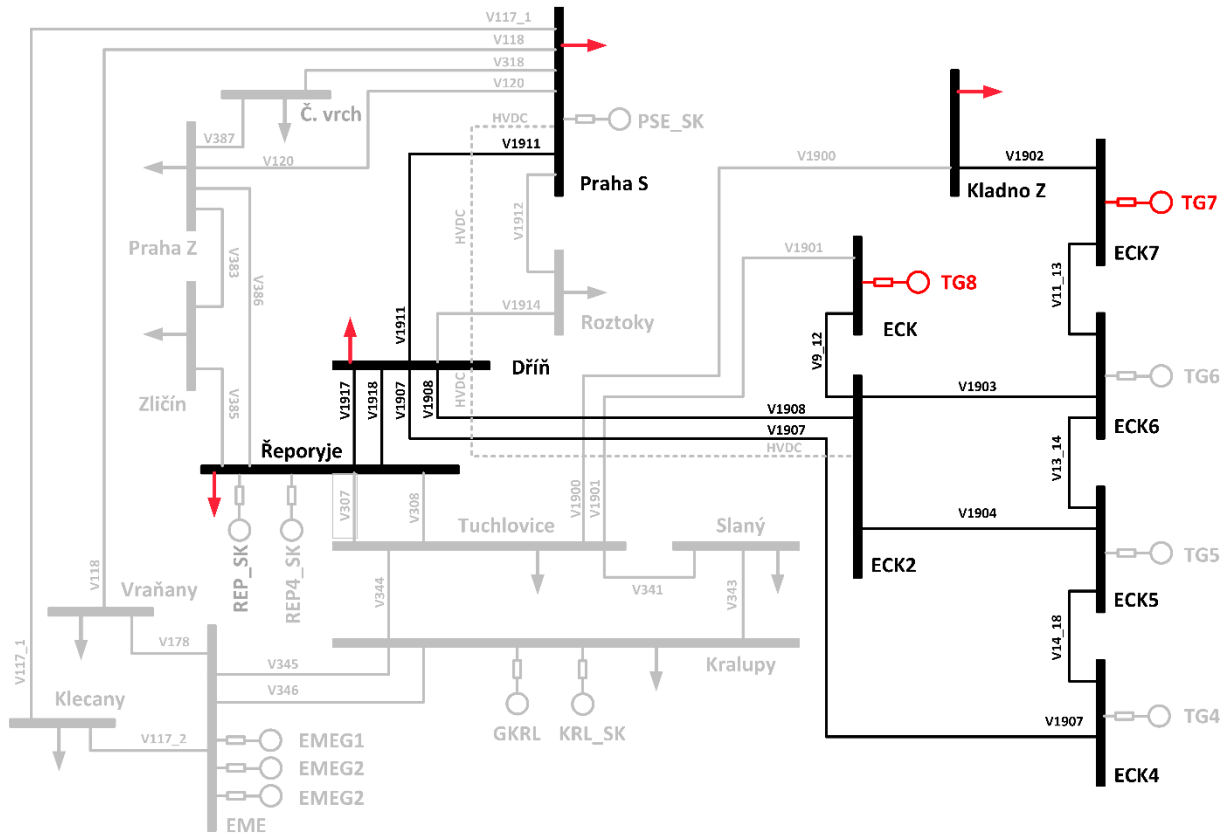
### 5.2.3 3. etapa ostrovej prevádzky

Pre tretiu etapu ostrovej prevádzky v prípadovej štúdii uvažujeme špecifikáciu uzlových parametrov podľa tabuľky 5.6. Z hľadiska zdrojov je v prevádzke TG8 umiestnený v uzle ECK a TG7 umiestnený v uzle ECK7, z hľadiska spotreby sú aktívne uzly Dříň, Kladno západ, ECK2, ECK6, Řeporyje a Praha sever. Parametre vetví sú špecifikované v tabuľke 5.3 pričom aktívne vetvy (vedenia) sú viditeľné na schéme v obrázku 5.4.

Meno uzlu	Menovité napätie uzlu [kV]	Zadané uzlové napätie [p.j.]	Typ uzlu	Odber P [MW]	Odber Q [MVar]	Dodávka P [MW]	Dodávka Q [MVar]
ŘEPORYJE	110	0	PQ	111,0	14,0	0,0	0,0
KLADNO_Z	110	0	PQ	13,7	2,3	0,0	0,0
DŘÍŇ	110	0	PQ	12,3	1,0	0,0	0,0
PRAHA_S	110	0	PQ	33,3	3,3	0,0	0,0
ECK	110	1,05	PU	0,0	0,0	62,0	0,0
ECK_7	110	1,05	Uδ	0,0	0,0	135 <sup>1)</sup>	0,0
ECK_2	110	0	PQ	3,0	1,3	0,0	0,0
ECK_6	110	1,05	PQ	12,7	5,0	0,0	0,0
ECK_5	110	1,05	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0
ECK_4	110	1,05	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0

1) jedná sa o maximálnu hodnotu, skutočná hodnota bude určená výpočtom

Tab. 5.6: Vstupné dáta špecifikujúce jednotlivé uzly študovanej sústavy v 3. etape ostrovej prevádzky



Obr. 5.4: Študovaná sústava v 3. etape ostrovej prevádzky

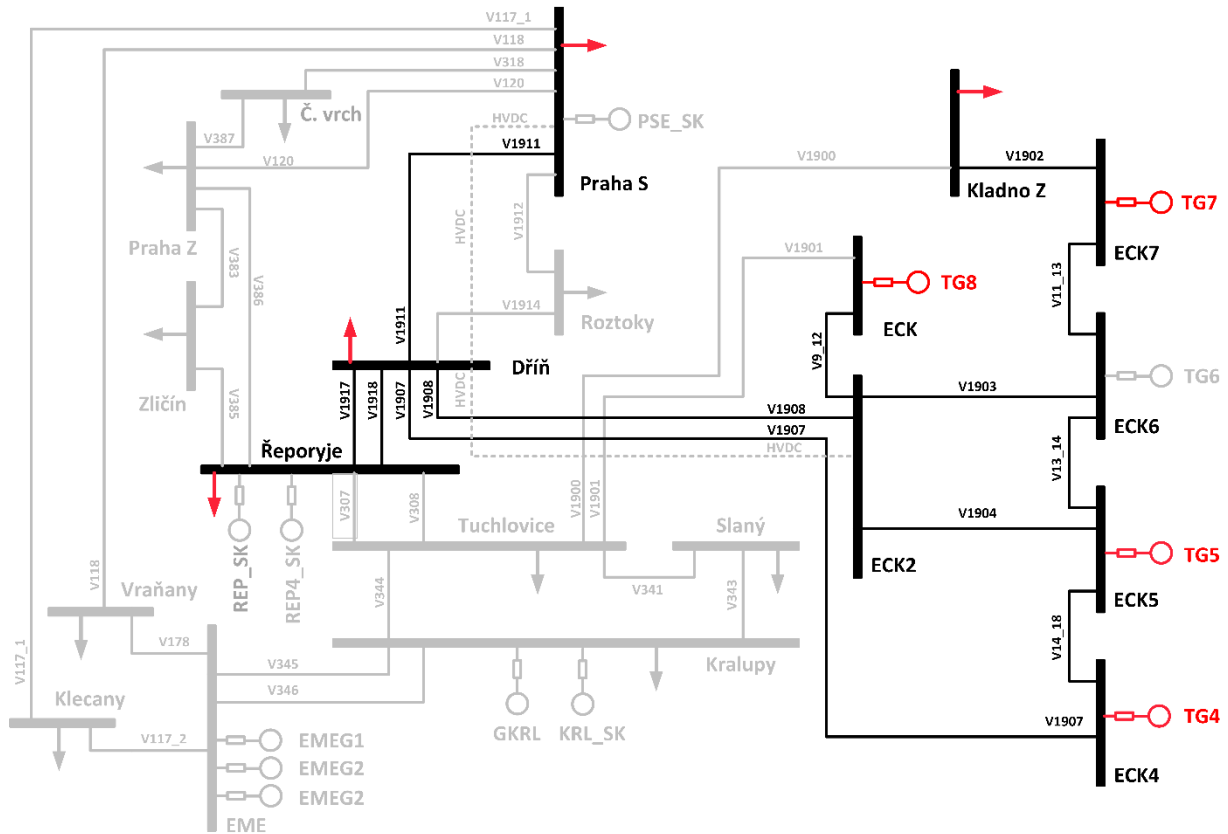
#### 5.2.4 4. etapa ostrovej prevádzky

Pre štvrtú etapu ostrovej prevádzky v prípadovej štúdii uvažujeme špecifikáciu uzlových parametrov podľa tabuľky 5.7. Z hľadiska zdrojov je v prevádzke TG8 umiestnený v uzle ECK, TG7 umiestnený v uzle ECK7, TG4 a TG5 v uzloch ECK4 a ECK5, z hľadiska spotreby sú aktívne uzly Dříň, Kladno západ, ECK2, ECK6, Řeporyje a Praha sever. Parametre vetví sú špecifikované v tabuľke 5.3 pričom aktívne vetvy (vedenia) sú viditeľné na schéme v obrázku 5.5.

Meno uzlu	Menovité napätie uzlu [kV]	Zadané uzlové napätie [p.j.]	Typ uzlu	Odber P [MW]	Odber Q [MVar]	Dodávka P [MW]	Dodávka Q [MVar]
ŘEPORYJE	110	-	PQ	111,0	14,0	0,0	0,0
KLADNO_Z	110	-	PQ	13,7	2,3	0,0	0,0
DŘÍŇ	110	-	PQ	12,3	1,0	0,0	0,0
PRAHA_S	110	-	PQ	33,3	3,3	0,0	0,0
ECK	110	1,05	PU	0,0	0,0	0,0	0,0
ECK_7	110	1,05	Uδ	0,0	0,0	135 <sup>1)</sup>	0,0
ECK_2	110	-	PQ	3,0	1,3	0,0	0,0
ECK_6	110	-	PQ	12,7	5,0	0,0	0,0
ECK_5	110	1,05	PU	0,0	0,0	52,4	0,0
ECK_4	110	1,05	PU	0,0	0,0	52,4	0,0

1) jedná sa o maximálnu hodnotu, skutočná hodnota bude určená výpočtom

Tab. 5.7: Vstupné dáta špecifikujúce jednotlivé uzly študovanej sústavy v 4. etape ostrovej prevádzky



Obr. 5.5: Študovaná sústava v 4. etape ostrovnej prevádzky

### 5.2.5 5. etapa ostrovnej prevádzky

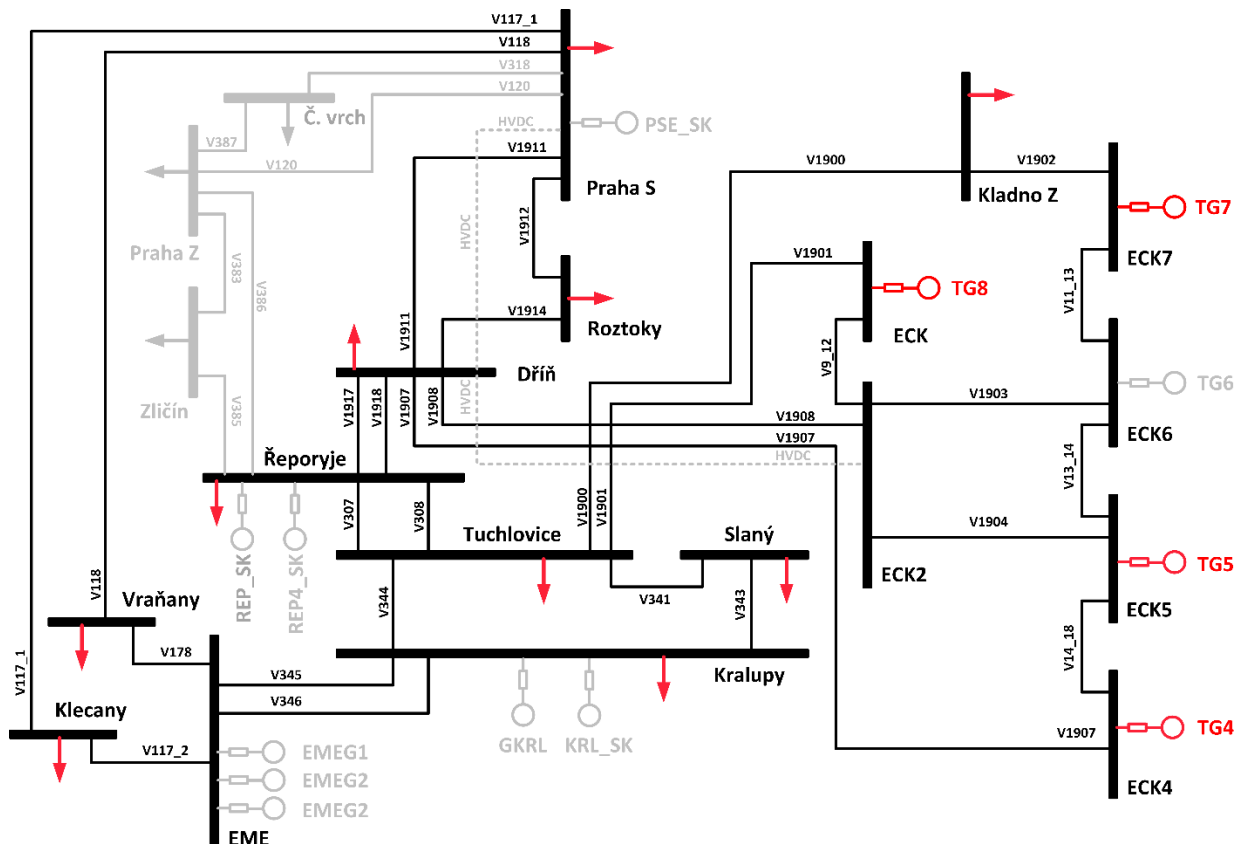
Pre piatu etapu ostrovnej prevádzky v prípadovej štúdii uvažujeme špecifikáciu uzlových parametrov podľa tabuľky 5.8. Z hľadiska zdrojov je v prevádzke TG8 umiestnený v uzle ECK, TG7 umiestnený v uzle ECK7, TG4 a TG5 v uzloch ECK4 a ECK5, z hľadiska spotreby sú aktívne všetky uzly základného zapojenia okrem uzlov Červený vrch, Zličín a Praha západ. Parametre vetví sú špecifikované v tabuľke 5.3 pričom aktívne vetvy (vedenia) sú viditeľné na schéme v obrázku 5.6.



Meno uzlu	Menovité napätie uzlu [kV]	Zadané uzlové napätie [p.j.]	Typ uzlu	Odber P [MW]	Odber Q [MVar]	Dodávka P [MW]	Dodávka Q [MVar]
ŘEPORYJE	110	-	PQ	111,0	14,0	0,0	0,0
TUCHLOVICE	110	-	PQ	7,7	1,0	0,0	0,0
KRALUPY	110	-	PQ	20,3	1,3	0,0	0,0
EME	110	-	PQ	5,7	0,7	0,0	0,0
KLADNO_Z	110	-	PQ	13,7	2,3	0,0	0,0
DŘÍŇ	110	-	PQ	12,3	1,0	0,0	0,0
ROZTOKY	110	-	PQ	1,3	0,7	0,0	0,0
PRAHA_S	110	-	PQ	33,3	3,3	0,0	0,0
ECK	110	1,05	PU	0,0	0,0	31,0	0,0
SLANÝ	110	-	PQ	8,0	1,3	0,0	0,0
ECK_7	110	1,05	Uδ	0,0	0,0	135 <sup>1)</sup>	0,0
ECK_2	110	-	PQ	3,0	1,3	0,0	0,0
ECK_6	110	-	PQ	12,7	5,0	0,0	0,0
ECK_5	110	1,05	PU	0,0	0,0	78,6	0,0
ECK_4	110	1,05	PU	0,0	0,0	78,6	0,0
KLEČANY	110	-	PQ	6,7	0,3	0,0	0,0
VRAŇANY	110	-	PQ	1,0	0,3	0,0	0,0

1) jedná sa o maximálnu hodnotu, skutočná hodnota bude určená výpočtom

Tab. 5.8: Vstupné dáta špecifikujúce jednotlivé uzly študovanej sústavy v 5. etape ostrovnej prevádzky



Obr. 5.6: Študovaná sústava v 5. etape ostrovnej prevádzky

## 5.2.6 6. etapa ostrovnej prevádzky bez HVDC a s využitím HVDC

Pre šiestu etapu ostrovnej prevádzky v prípadovej štúdii uvažujeme špecifikáciu uzlových parametrov podľa tabuľky 5.9. Z hľadiska zdrojov je v prevádzke TG8 umiestnený v uzle ECK, TG7 umiestnený v uzle ECK7, TG4 a TG5 v uzloch ECK4 a ECK5 s oproti predošlej fáze i TG6 v uzle ECK6, z hľadiska spotreby sú aktívne všetky uzly základného zapojenia. Parametre vetví sú špecifikované v tabuľke 5.3 pričom aktívne vetvy (vedenia) sú viditeľné na schéme v obrázku 5.7. a pre variantu na obrázku 5.8 Pre túto etapu bude testované i zvýšenie odberov v uzloch Praha sever a Řeporyje, varianty špecifikuje tabuľka 5.10.

Meno uzlu	Menovité napätie uzlu [kV]	Zadané uzlové napätie [p.j.]	Typ uzlu	Odber P [MW]	Odber Q [MVar]	Dodávka P [MW]	Dodávka Q [MVar]
ŘEPORYJE	110	-	PQ	od 111 <sup>2)</sup>	od 14 <sup>2)</sup>	0,0	0,0
TUCHLOVICE	110	-	PQ	7,7	1,0	0,0	0,0
KRALUPY	110	-	PQ	20,3	1,3	0,0	0,0
EME	110	-	PQ	5,7	0,7	40,0	0,0
KLADNO_Z	110	-	PQ	13,7	2,3	0,0	0,0
DŘÍŇ	110	-	PQ	12,3	1,0	0,0	0,0
ROZTOKY	110	-	PQ	1,3	0,7	0,0	0,0
PRAHA_S	110	-	PQ	od 33 <sup>2)</sup>	od 3,3 <sup>2)</sup>	0,0	0,0
ECK	110	1,05	PU	0,0	0,0	Od 31	0,0
SLANÝ	110	-	PQ	8,0	1,3	0,0	0,0
ECK_7	110	1,05	Uδ	0,0	0,0	135 <sup>1)</sup>	0,0
ECK_2	110	-	PQ	3,0	1,3	0,0	0,0
ECK_6	110	1,05	PU	12,6	5,0	Od 37	0,0
ECK_5	110	1,05	PU	0,0	0,0	Od 78,6	0,0
ZLIČÍN	110	-	PQ	14,6	1,6	0,0	0,0
PRAHA_Z	110	-	PQ	40,0	11,0	0,0	0,0
ČERVENÝ_VRCH	110	-	PQ	16,0	3,7	0,0	0,0
ECK_4	110	1,05	PU	0,0	0,0	Od 78,5	0,0
KLEČANY	110	-	PQ	6,6	0,3	0,0	0,0
VRAŇANY	110	-	PQ	1,0	0,3	0,0	0,0

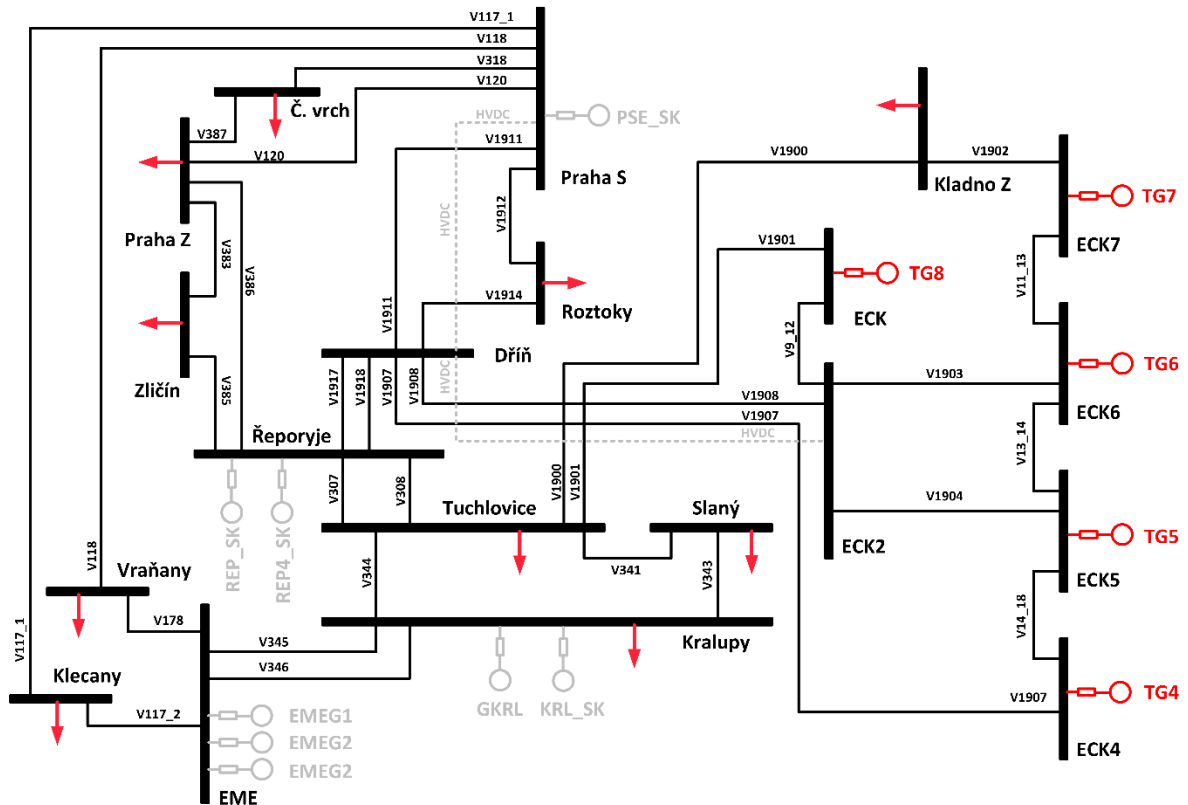
1) jedná sa o maximálnu hodnotu, skutočná hodnota bude určená výpočtom  
2) v závislosti od požiadavky pre dané uzly

Tab. 5.9: Vstupné dáta špecifikujúce jednotlivé uzly študovanej sústavy v 6. etape ostrovnej prevádzky

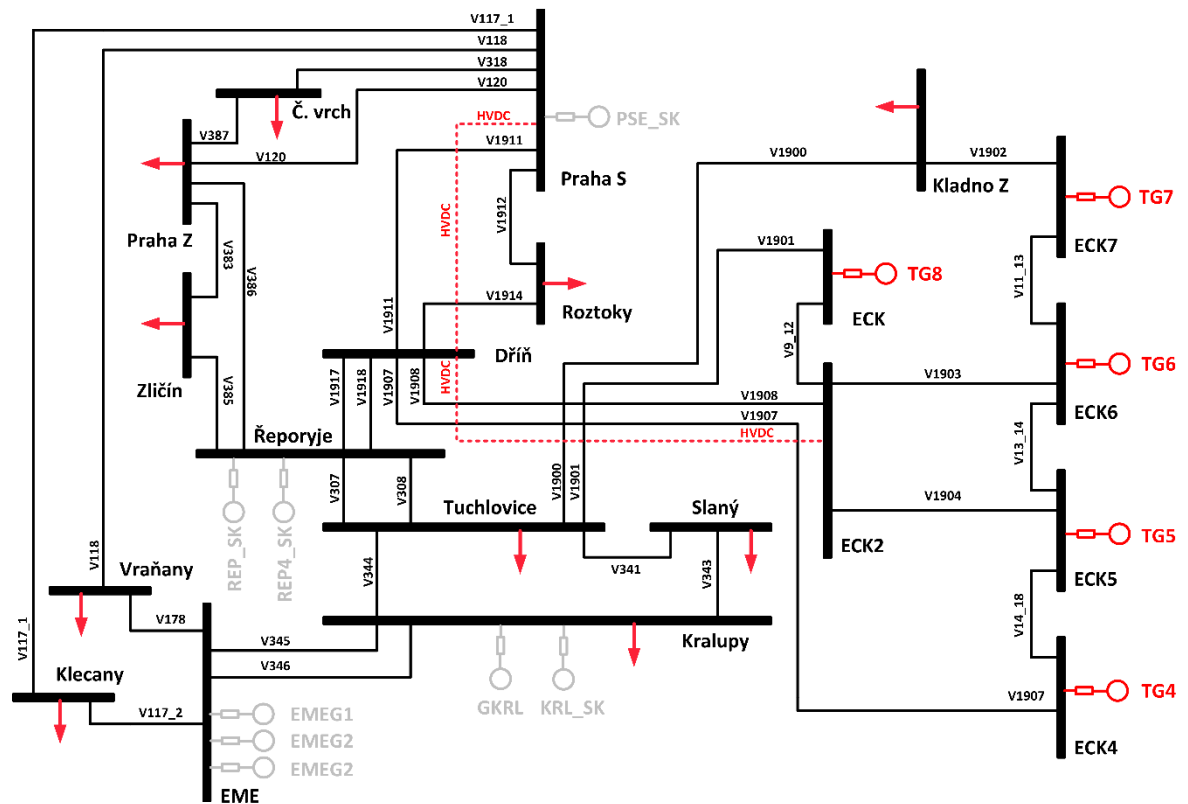
Označenie variantu	Praha Sever		Řeporyje	
	Odber P [MW]	Odber Q [MVar]	Odber P [MW]	Odber Q [MVar]
A	33	3	111	14
B	33	3	311	39
C	83	8	261	33
D	133	13	211	27
E	183	18	161	20
F	233	23	111	14
G	283	28	111	14
H	333	33	111	14

Dochádza k obmedzeniu dodávky v iných uzloch

Tab. 5.10: Varianty odberov výkonov v uzloch Praha sever a Řeporyje v 6. etape ostrovnej prevádzky



Obr. 5.7: Študovaná sústava v 6. etape ostrovnej prevádzky bez HVDC



Obr. 5.8: Študovaná sústava v 6. etape ostrovnej prevádzky s HVDC

### 5.3 Detailné vstupné dáta 6. etapy ostrovnej prevádzky

Uzol	Typ uzlu	Etapa 6, variant A			Etapa 6, variant B			Etapa 6, variant C			Etapa 6, variant D		
		Odber P [MW]	Odber Q [MVar]	Dodávka P [MW]	Odber P [MW]	Odber Q [MVar]	Dodávka P [MW]	Odber P [MW]	Odber Q [MVar]	Dodávka P [MW]	Odber P [MW]	Odber Q [MVar]	Dodávka P [MW]
ŘEPORYJE	PQ	111,0	14,0	0,0	311,0	39,2	0,0	261,0	32,9	0,0	211,0	26,6	0,0
TUCHLOVICE	PQ	7,7	1,0	0,0	7,7	1,0	0,0	7,7	1,0	0,0	7,7	1,0	0,0
KRALUPY	PQ	20,3	1,3	0,0	20,3	1,3	0,0	20,3	1,3	0,0	20,3	1,3	0,0
EME	PQ	5,7	0,7	0,0	5,7	0,7	0,0	5,7	0,7	0,0	5,7	0,7	0,0
KLADNO_Z	PQ	13,7	2,3	0,0	13,7	2,3	0,0	13,7	2,3	0,0	13,7	2,3	0,0
DŘÍŇ	PQ	12,3	1,0	0,0	12,3	1,0	0,0	12,3	1,0	0,0	12,3	1,0	0,0
ROZTOKY	PQ	1,3	0,7	0,0	1,3	0,7	0,0	1,3	0,7	0,0	1,3	0,7	0,0
PRAHA_S	PQ	33,3	3,3	0,0	33,3	3,3	0,0	83,3	8,3	0,0	133,3	13,3	0,0
ECK	PU	0,0	0,0	31,0	0,0	0,0	62,0	0,0	0,0	62,0	0,0	0,0	62,0
SLANÝ	PQ	8,0	1,3	0,0	8,0	1,3	0,0	8,0	1,3	0,0	8,0	1,3	0,0
ECK_7	Uδ	0,0	0,0	135,0	0,0	0,0	135,0	0,0	0,0	135,0	0,0	0,0	135,0
ECK_2	PQ	3,0	1,3	0,0	3,0	1,3	0,0	3,0	1,3	0,0	3,0	1,3	0,0
ECK_6	PU	12,7	5,0	37,0	12,7	5,0	73,0	12,7	5,0	73,0	12,7	5,0	73,0
ECK_5	PU	0,0	0,0	78,6	0,0	0,0	157,0	0,0	0,0	157,0	0,0	0,0	157,0
ZLIČÍN	PQ	14,7	1,7	0,0	14,7	1,7	0,0	14,7	1,7	0,0	14,7	1,7	0,0
PRAHA_Z	PQ	40,0	11,0	0,0	40,0	11,0	0,0	40,0	11,0	0,0	40,0	11,0	0,0
ČERVENÝ_VRCH	PQ	16,0	3,7	0,0	16,0	3,7	0,0	16,0	3,7	0,0	16,0	3,7	0,0
ECK_4	PU	0,0	0,0	78,6	0,0	0,0	157,0	0,0	0,0	157,0	0,0	0,0	157,0
KLEČANY	PQ	6,7	0,3	0,0	6,7	0,3	0,0	6,7	0,3	0,0	6,7	0,3	0,0
VRAŇANY	PQ	1,0	0,3	0,0	1,0	0,3	0,0	1,0	0,3	0,0	1,0	0,3	0,0
<b>SUMA</b>		<b>307,3</b>	<b>49,0</b>	<b>360,1</b>	<b>507,3</b>	<b>74,2</b>	<b>584,0</b>	<b>507,3</b>	<b>72,9</b>	<b>584,0</b>	<b>507,3</b>	<b>71,6</b>	<b>584,0</b>

Tab. 5.11: Detailná špecifikácia uzlových výkonov pre 6. etapu pre varianty A, B, C a D

Uzol	Typ uzlu	Etapa 6, variant E			Etapa 6, variant F			Etapa 6, variant G			Etapa 6, variant H		
		Odber P [MW]	Odber Q [MVar]	Dodávka P [MW]	Odber P [MW]	Odber Q [MVar]	Dodávka P [MW]	Odber P [MW]	Odber Q [MVar]	Dodávka P [MW]	Odber P [MW]	Odber Q [MVar]	Dodávka P [MW]
ŘEPORYJE	PQ	161,0	20,3	0,0	111,0	14,0	0,0	111,0	14,0	0,0	111,0	14,0	0,0
TUCHLOVICE	PQ	7,7	1,0	0,0	7,7	1,0	0,0	7,7	1,0	0,0	5,8	0,8	0,0
KRALUPY	PQ	20,3	1,3	0,0	20,3	1,3	0,0	20,3	1,3	0,0	15,3	1,0	0,0
EME	PQ	5,7	0,7	0,0	5,7	0,7	0,0	5,7	0,7	0,0	4,3	0,5	0,0
KLADNO_Z	PQ	13,7	2,3	0,0	13,7	2,3	0,0	13,7	2,3	0,0	10,3	1,8	0,0
DŘÍŇ	PQ	12,3	1,0	0,0	12,3	1,0	0,0	12,3	1,0	0,0	9,3	0,8	0,0
ROZTOKY	PQ	1,3	0,7	0,0	1,3	0,7	0,0	1,3	0,7	0,0	1,0	0,5	0,0
PRAHA_S	PQ	183,3	18,3	0,0	233,3	23,3	0,0	283,3	28,3	0,0	333,3	33,3	0,0
ECK	PU	0,0	0,0	62,0	0,0	0,0	62,0	0,0	0,0	62,0	0,0	0,0	62,0
SLANÝ	PQ	8,0	1,3	0,0	8,0	1,3	0,0	8,0	1,3	0,0	6,0	1,0	0,0
ECK_7	Uδ	0,0	0,0	135,0	0,0	0,0	135,0	0,0	0,0	135,0	0,0	0,0	135,0
ECK_2	PQ	3,0	1,3	0,0	3,0	1,3	0,0	3,0	1,3	0,0	2,3	1,0	0,0
ECK_6	PU	12,7	5,0	73,0	12,7	5,0	73,0	12,7	5,0	73,0	9,5	3,8	73,0
ECK_5	PU	0,0	0,0	157,0	0,0	0,0	157,0	0,0	0,0	157,0	0,0	0,0	157,0
ZLIČÍN	PQ	14,7	1,7	0,0	14,7	1,7	0,0	14,7	1,7	0,0	11,0	1,3	0,0
PRAHA_Z	PQ	40,0	11,0	0,0	40,0	11,0	0,0	40,0	11,0	0,0	30,0	8,3	0,0
ČERVENÝ_VRCH	PQ	16,0	3,7	0,0	16,0	3,7	0,0	16,0	3,7	0,0	12,0	2,8	0,0
ECK_4	PU	0,0	0,0	157,0	0,0	0,0	157,0	0,0	0,0	157,0	0,0	0,0	157,0
KLEČANY	PQ	6,7	0,3	0,0	6,7	0,3	0,0	6,7	0,3	0,0	5,0	0,3	0,0
VRAŇANY	PQ	1,0	0,3	0,0	1,0	0,3	0,0	1,0	0,3	0,0	0,8	0,3	0,0
<b>SUMA</b>		<b>507,3</b>	<b>70,3</b>	<b>584,0</b>	<b>507,3</b>	<b>69,0</b>	<b>584,0</b>	<b>557,3</b>	<b>74,0</b>	<b>584,0</b>	<b>566,6</b>	<b>71,1</b>	<b>584,0</b>

Tab. 5.12: Detailná špecifikácia uzlových výkonov pre 6. etapu pre varianty E, F, G a H

Šiesta etapa ostrovnej prevádzky je významná v tom že dochádza k nasadeniu HVDC. Táto etapa je rozdelená do viacerých variantov podľa tabuľky 5.10, ktoré sa odlišujú vo veľkosti odberov v uzloch Praha sever a Řeporyje. Detailná špecifikácia uzlových výkonov pre tieto varianty je zhrnutá v tabuľke 5.11 pre varianty bez HVDC a v tabuľke 5.12 pre varianty s HVDC. Tabuľka 5.13 špecifikuje uvažovaný nastavený prenášaný činný výkon HVDC systému z uzlu ECK do uzlu Praha sever.

Varianta	Etapa 6, variant A	Etapa 6, variant B	Etapa 6, variant C	Etapa 6, variant D	Etapa 6, variant E	Etapa 6, variant F	Etapa 6, variant G	Etapa 6, variant H
Výkon prenášaný HVDC [MW]	50	200	200	200	200	250	300	300

Tab. 5.13: Špecifikácia výkonov prenášaných prostredníctvom HVDC z uzlu ECK2 do Uzlu Praha sever pre 6. etapu ostrovnej prevádzky

## 5.4 Hodnotiace kritéria

Hodnotenie prínosu HVDC technológie bude realizované v nasledujúcej kapitole na základe dvoch hlavných kritérií. Prvým kritériom bude percentuálne zaťaženie vetví (vedení). Vo výstupoch budú indikované 4 úrovne:

1. Úroveň – zaťaženie vedenia do 33,33% maximálneho dovoleného trvalého prúdu, indikované zelenou farbou
2. Úroveň - zaťaženie vedenia od 33,33% do 66,66% maximálneho dovoleného trvalého prúdu, indikované oranžovou farbou
3. Úroveň - zaťaženie vedenia od 66,66% do 100% maximálneho dovoleného trvalého prúdu, indikované červenou farbou
4. Úroveň – zaťaženie vedenia nad 100% maximálneho dovoleného trvalého prúdu, indikované sýtou červenou farbou so žltým písmom

Z hľadiska hodnotenia podľa tohto kritéria je 3. úroveň riziková a 4. úroveň nepripustná, v týchto prípadoch hrozí vypnutie vedení na popud pôsobenia ochrán, čo by malo za následok rozpad ostrovnej prevádzky.

Druhým kritériom sú uhly uzlových napätí ktoré sú indikátorom statickej a dynamickej stability. Pomocou výpočtu ustáleného stavu sústavy získame veľkosti aj uhly uzlových napätí. Vysoké rozdiely uhlov medzi uzlami študovanej sústavy sú indikátormi blížiacich sa problémov so statickou a dynamickou stabilitou systému. Navyše musíme uvážiť, že pre hodnotenie stability prenosu je vyžadovaná znalosť uhlu napätia na začiatku a na konci prenosu. V použitej metóde však neurčujeme uhol medzi indukovaným napätím generátoru a miestom pripojenia elektrárenského bloku. Tento rozdiel týchto uhlov pre jednotlivé bloky si určíme podľa rovnice (6.1).

$$\delta_{gen} = \tan^{-1} \left( \frac{\left( u_{kT} * \frac{U_{NT}^2}{S_{NT}} + x_{gen} * \frac{U_{Ngen}^2}{S_{Ngen}} \right) * \frac{S_{Ngen}}{\sqrt{3} * U_{Ngen}}}{\frac{U_{Ngen}}{\sqrt{3}}} \right) \quad (6.1)$$

kde  $\delta_{gen}$  je rozdiel uhlu indukovaného napätia generátoru a napätia v mieste pripojenia bloku do sústavy,  $u_{kT}$  je napätie nakrátko blokového transformátoru,  $U_{NT}$  je menovité napätie blokového transformátoru na strane generátoru,  $S_{NT}$  je menovitý výkon blokového transformátoru,  $x_{gen}$  je reaktancia generátoru,

$U_{Ngen}$  je menovité napätie generátoru,  $S_{Ngen}$  je menovitý výkon generátoru. Pomocou (6.1) si určíme rozdiely uhlov pre študovanú sústavu, výsledky sú zhrnuté v tabuľke 5.14.

Generátor	Uzol	$U_{Ngen}$ [kV]	$S_{Ngen}$ [MVA]	$x_{gen}$ [p.j.]	$U_{NT}$ [kV]	$S_{NT}$ [MVA]	$u_{kT}$ [p.j.]	$\delta_{gen}$ [°]
TG8	ECK	11,5	63	0,17	11,5	60	0,12	16,2
TG4	ECK4	11,5	160	0,15	11,5	156	0,13	15,6
TG5	ECK5	11,5	160	0,15	11,5	156	0,13	15,7
TG6	ECK6	11,5	74	0,12	11,5	90	0,12	12,2
TG7	ECK7	11,5	137,5	0,15	11,5	156	0,13	14,7

Tab. 5.14: Výpočet rozdielu uhlov indukovaného napätia generátoru a napätia v mieste pripojenia bloku do sústavy.

Z hľadiska statickej stability je maximálny teoreticky dovolený uhol  $90^\circ$ , pričom reálne s uvažovaním dynamickej stability je akceptovateľný limit  $35^\circ$ .

## 6 Výsledky prípadovej štúdie

Výsledky prípadovej štúdie sú rozčlenené do dvoch podkapitol. Prvá podkapitola sumarizuje výsledky výpočtov pre základne etapy ostrovnej prevádzky tj. etapy 1 až 5 a etapu 6A. Uvedené etapy počítajú len so zásobovaním objektov kritickej infraštruktúry. Druhá etapa bude zameraná na výsledky 6 etapy, kde je uvažované i s navyšovaním výkonu dodávaného do Prahy.

### 6.1 Vyhodnotenie 1. až 5. etapy ostrovnej prevádzky

Výsledky simulácií ostrovnej prevádzky ukazujú že v prípade prvej etapy až etapy 6A, teda od štartu elektrárne Kladno z tmy po stav uspokojenia napájania podľa požiadaviek objektov kritickej infraštruktúry vo všetkých študovaných uzloch nedochádza k žiadnemu preťažovaniu vedení sústavy. Preukazujú to výsledky zhrnuté v tabuľke 6.1. V zriedkavých prípadoch, najmä u etapy 6A zaťaženie niektorých vedení prekročí 33 % (V1912, V1901, V1914, V1903, V1902, V1908 a V1911). Čo sa týka uhlovej stability tak pre tieto prípady sú maximálne rozdiely medzi uzlami do 3 stupňov (tabuľka 6.2) čo aj po uvážení tabuľky 5.14 neprináša zvýšené riziko vo významnej miere.

Vedenie	Percentuálne zaťaženie vedenia [%]					
	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5	Etapa 6A
V 308	0,0	0,0	0,0	0,0	11,4	17,0
V 1912	0,0	0,0	0,0	0,0	26,7	42,8
V 1901	0,0	0,0	0,0	0,0	36,1	44,0
V 1914	0,0	0,0	0,0	0,0	28,3	44,6
V 346	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	0,6
V 345	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	0,6
V 341	0,0	0,0	0,0	0,0	11,3	13,3
V 1900	0,0	0,0	0,0	0,0	21,0	30,3
V 307	0,0	0,0	0,0	0,0	11,4	17,0
V 1907	0,4	0,4	15,1	20,4	23,3	29,8
V 1904	2,2	2,4	4,2	11,9	17,8	22,5
V 1903	5,2	6,0	24,6	18,3	20,5	38,7
V 1902	15,0	15,0	15,0	15,0	35,7	45,1
V 1908	3,5	3,5	35,4	30,1	26,4	38,2
V 1917	0,0	0,0	27,3	27,3	22,3	28,8
V 1918	0,0	0,0	27,3	27,3	22,3	28,8
V 1911	0,0	0,0	36,5	36,5	28,8	45,6
V 344	0,0	0,0	0,0	0,0	12,4	16,0
V 345	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
V 346	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
V 343	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	7,1
V 386	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,4
V 387	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8
V 389	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,8
V 120	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,6
V 383	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9
V 385	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,8
V 117_1	0,0	0,0	0,0	0,0	10,5	8,1
V 117_2	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4	2,0
V 118	0,0	0,0	0,0	0,0	5,8	3,5
V 178	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	2,4
V 11_13	0,7	0,4	5,8	2,0	0,9	2,3
V 13_14	0,3	0,3	3,1	0,4	1,5	0,3
V 14_18	0,1	0,1	2,5	0,6	0,3	0,8
V 9_12	1,4	1,6	3,5	1,7	0,7	1,3

Tab. 6.1: Porovnanie zaťaženia vedení študovanej sústavy pre ostrovnú prevádzku (etapy 1 – 6A)

Uzol	Uhol uzlového napätia [°]					
	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5	Etapa 6A
ŘEPORYJE	-	-	-2,55	-2,34	-1,91	-2,59
TUCHLOVICE	-	-	-	-	-1,32	-1,71
KRALUPY	-	-	-	-	-2,09	-2,71
EME	-	-	-	-	-2,00	-2,72
KLADNO_Z	-0,48	-0,38	-0,38	-0,38	-0,96	-1,21
DŘÍŇ	-0,07	0,01	-0,64	-0,43	-0,38	-0,63
ROZTOKY	-	-	-	-	-1,32	-2,10
PRAHA_S	-	-	-2,08	-1,87	-1,54	-2,46
ECK	0,00	0,10	-0,24	-0,12	-0,16	-0,33
SLANÝ	-	-	-	-	-1,81	-2,29
ECK_7	-0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ECK_2	-0,04	0,04	-0,33	-0,17	-0,15	-0,30
ECK_6	-0,07	0,01	-0,19	-0,07	-0,03	-0,08
ECK_5	-0,06	0,02	-0,29	-0,06	0,02	-0,09
ZLIČÍN	-	-	-	-	-	-2,84
PRAHA_Z	-	-	-	-	-	-2,91
ČERVENÝ_VRCH	-	-	-	-	-	-2,87
ECK_4	-0,07	0,02	-0,37	-0,08	0,03	-0,12
KLEČANY	-	-	-	-	-1,68	-2,57
VRAŇANY	-	-	-	-	-1,87	-2,66

Tab. 6.2: Porovnanie uhlov napätí študovanej sústavy pre ostrovnú prevádzku (etapy 1 – 6A)



## 6.2 Vyhodnotenie 6. etapy ostrovnej prevádzky s a bez HVDC

Výsledky simulácií ostrovnej prevádzky ukazujú, že v prípade etapy 6A až etapy 6H, teda pri prevádzke všetkých uzlov študovanej sústavy s napájaním z elektrárne Kladno a splnením zásobovania objektov kritickej infraštruktúry, sa javia ako problematické hlavne varianty so zvýšenou požiadavkou odberu činného výkonu v uzle Praha sever a čiastočne Praha Řeporyje. Preukazujú to výsledky zhrnuté v tabuľke 6.3. Slabé súčasti systému je možné identifikovať hlavne vo vedeniach V1912, V1914, V1901 a V1911 kde je u variantov B – E zaťaženie vyššie ako 66 % a u variantov F – H je dokonca vyššie ako 100 %, čo znamená kolaps systému. Navrhnuté riešenie s využitím HVDC systému z uzlu ECK2 do uzlu Praha sever uvedené problémy odstráni a zaťaženie problematických vedení poklesne do intervalu 33 % až 66%. Nasadenie HVDC systému však prináša jeden negatívny jav a to je zvýšené zaťaženie vedenia V1903, ktoré stúpne. Tento jav je spôsobený tým že v uzle ECK 2 (terminál HVDC) je lokalizovaný veľký odber HVDC systému. Jedná sa však o vedenie a uzol v malej vzdialenosti od areálu elektrárne Kladno.

Vedenie	Percentuálne zaťaženie vedenia [%], hodnota vyššia ako 100% predstavuje preťažené vedenie, ktoré vypnú ochrany															
	Etapa 6, variant A		Etapa 6, variant B		Etapa 6, variant C		Etapa 6, variant D		Etapa 6, variant E		Etapa 6, variant F		Etapa 6, variant G		Etapa 6, variant H	
	Bez HVDC	S HVDC	Bez HVDC	S HVDC	Bez HVDC	S HVDC	Bez HVDC	S HVDC	Bez HVDC	S HVDC	Bez HVDC	S HVDC	Bez HVDC	S HVDC	Bez HVDC	S HVDC
V 308	17,0	15,2	41,5	34,4	37,2	30,1	33,0	25,7	28,7	21,4	24,5	15,3	26,9	15,8	28,6	17,3
V 1912	42,8	27,8	63,8	7,4	73,6	14,9	83,5	24,1	93,4	33,8	103,4	29,0	118,4	29,3	128,2	38,6
V 1901	44,0	38,1	73,8	50,0	72,2	48,3	70,6	46,6	69,1	44,9	67,7	37,5	72,7	36,3	71,7	35,1
V 1914	44,6	29,4	66,2	8,2	76,3	16,3	86,6	25,7	97,0	35,5	107,5	30,7	123,4	31,0	133,4	40,1
V 346	0,6	1,4	0,8	5,6	2,3	4,2	3,8	2,7	5,3	1,2	6,8	1,4	8,5	1,3	10,5	0,9
V 345	0,6	1,4	0,8	5,6	2,3	4,2	3,8	2,7	5,3	1,2	6,8	1,4	8,5	1,3	10,5	0,9
V 341	13,3	11,1	14,0	5,4	16,0	7,3	18,1	9,3	20,1	11,3	22,2	11,1	24,5	11,3	24,0	10,6
V 1900	30,3	26,1	52,8	36,4	51,6	35,1	50,5	33,8	49,4	32,6	48,4	27,3	55,5	30,0	58,0	32,3
V 307	17,0	15,2	41,5	34,4	37,2	30,1	33,0	25,7	28,7	21,4	24,5	15,3	26,9	15,8	28,6	17,3
V 1907	29,8	26,8	53,2	41,5	53,4	41,5	53,6	41,6	53,9	41,7	54,2	39,0	59,0	40,6	60,8	42,2
V 1904	22,5	24,9	39,3	48,9	39,3	48,8	39,3	48,8	39,4	48,7	39,5	51,1	42,9	56,8	43,8	57,6
V 1903	38,7	42,1	56,5	69,9	56,6	69,9	56,9	70,0	57,3	70,1	57,7	73,7	71,0	89,9	75,2	93,7
V 1902	45,1	41,0	67,9	51,4	66,7	50,0	65,6	48,7	64,5	47,5	63,5	42,2	70,7	44,9	69,5	43,5
V 1908	38,2	28,2	66,0	27,1	66,4	27,0	67,0	27,0	67,6	27,2	68,3	18,3	77,1	17,2	80,8	19,9
V 1917	28,8	25,7	57,2	45,1	53,2	41,0	49,2	37,0	45,3	32,9	41,4	25,9	44,4	25,8	44,7	26,0
V 1918	28,8	25,7	57,2	45,1	53,2	41,0	49,2	37,0	45,3	32,9	41,4	25,9	44,4	25,8	44,7	26,0
V 1911	45,6	29,9	67,7	8,1	78,1	16,4	88,7	26,1	99,4	36,2	110,2	31,2	126,6	31,5	137,0	40,9
V 344	16,0	12,1	17,3	1,8	20,9	5,3	24,5	8,8	28,2	12,4	31,8	12,1	36,1	12,3	37,1	13,1
V 345	0,6	1,4	0,8	5,6	2,3	4,2	3,8	2,7	5,3	1,2	6,8	1,4	8,5	1,3	10,5	0,9
V 346	0,6	1,4	0,8	5,6	2,3	4,2	3,8	2,7	5,3	1,2	6,8	1,4	8,5	1,3	10,5	0,9
V 343	7,1	4,5	8,0	2,4	10,3	0,7	12,7	2,5	15,1	4,9	17,5	4,7	20,3	4,9	21,8	6,3
V 386	7,4	3,8	3,7	18,7	4,3	12,5	10,4	6,5	16,9	3,4	23,5	4,9	27,6	5,2	29,1	6,0
V 387	2,8	7,6	15,5	35,5	7,3	27,3	2,5	19,1	9,9	11,1	18,2	8,2	23,5	8,3	28,4	4,7
V 389	21,8	30,5	44,1	78,8	29,8	64,5	15,6	50,2	3,1	36,0	13,4	30,5	22,1	30,6	34,6	18,5
V 120	16,6	25,2	38,8	73,5	24,5	59,2	10,4	44,9	4,8	30,7	18,4	25,3	27,2	25,4	38,4	14,7
V 383	3,9	2,1	6,8	21,7	2,4	15,6	6,8	9,6	13,0	4,3	19,3	3,6	23,3	4,0	25,6	4,2
V 385	10,8	7,1	2,3	14,6	7,5	8,6	13,7	3,6	20,1	5,5	26,5	7,8	30,5	8,0	31,1	8,3
V 117_1	8,1	10,8	7,3	18,1	4,9	15,6	2,8	13,2	1,9	10,7	3,5	11,0	6,2	10,9	11,5	6,1
V 117_2	2,0	4,7	1,2	11,9	1,6	9,5	4,0	7,0	6,5	4,6	9,1	4,9	12,0	4,8	15,9	2,1
V 118	3,5	6,1	2,9	13,3	1,8	10,9	3,2	8,5	5,5	6,2	7,9	6,4	10,7	6,4	14,8	3,6
V 178	2,4	5,0	1,6	12,2	1,3	9,8	3,6	7,4	6,1	5,0	8,6	5,2	11,5	5,2	15,5	2,3
V 11_13	2,3	2,5	0,2	1,0	0,2	1,0	0,3	1,0	0,4	1,0	0,5	1,3	3,0	3,9	3,6	4,5
V 13_14	0,3	0,3	1,4	1,7	1,3	1,7	1,3	1,7	1,2	1,7	1,2	1,7	0,2	0,5	0,6	0,1
V 14_18	0,8	0,3	0,4	1,5	0,5	1,5	0,5	1,5	0,6	1,5	0,6	1,9	1,4	1,7	1,7	1,4
V 9_12	1,3	1,1	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,2	2,4	2,4	2,5	2,5

Tab. 6.3: Porovnanie zaťaženia vedení študovanej sústavy pre ostrovnú prevádzku varianty 6A – 6H s a bez HVDC systémom

Čo sa týka uhlovej stability tak situácia je podobná ako v prípade zaťaženia vedení (tabuľka 6.4). Zväčšený uhol uzlových napätí sa prejavuje takmer u všetkých uzlov ktoré nie sú lokalizované v bezprostrednej vzdialenosti od elektrárne Kladno. Pre najproblematickejší variant H niektoré uhly dosahujú odchýlky takmer 7 stupňov od bilančného uzlu. Keď uvážime i korekciu o hodnoty korigované o hodnoty v tabuľke 5.14, dostávame sa na hodnoty uhlov prenosu aj 23 stupňov, čo už je v prípade ostrovnej prevádzky výstraha. Použitie HVDC systému z uzlu ECK2 do uzlu Praha sever tieto riziká tiež do značnej miery obmedzí (ako v prípade zaťaženia vedení). Záverom je že HVDC systém umožní v ostrovnej

prevádzke dodávať do uzlu Praha sever viac ako 330 MW a spoločne pre uzly Praha Sever a Řeporyje takmer 450 MW.

Uzol	Uhol uzlového napätia [°]															
	Etapa 6, variant A		Etapa 6, variant B		Etapa 6, variant C		Etapa 6, variant D		Etapa 6, variant E		Etapa 6, variant F		Etapa 6, variant G		Etapa 6, variant H	
	Bez HVDC	S HVDC	Bez HVDC	S HVDC	Bez HVDC	S HVDC	Bez HVDC	S HVDC	Bez HVDC	S HVDC	Bez HVDC	S HVDC	Bez HVDC	S HVDC	Bez HVDC	S HVDC
ŘEPORYJE	-2,59	-2,31	-4,87	-3,72	-4,59	-3,44	-4,31	-3,16	-4,03	-2,88	-3,76	-2,33	-4,21	-2,47	-4,31	-2,57
TUCHLOVICE	-1,71	-1,53	-2,69	-1,95	-2,63	-1,90	-2,58	-1,84	-2,53	-1,79	-2,49	-1,56	-2,80	-1,68	-2,82	-1,70
KRALUPY	-2,71	-2,29	-3,77	-2,05	-3,94	-2,22	-4,12	-2,38	-4,29	-2,55	-4,47	-2,29	-5,05	-2,42	-5,12	-2,48
EME	-2,72	-2,24	-3,80	-1,84	-4,03	-2,06	-4,25	-2,28	-4,48	-2,50	-4,72	-2,23	-5,37	-2,36	-5,51	-2,50
KLADNO_Z	-1,21	-1,09	-1,81	-1,36	-1,78	-1,32	-1,75	-1,29	-1,72	-1,26	-1,69	-1,11	-1,88	-1,19	-1,86	-1,16
DŘÍŇ	-0,63	-0,57	-0,89	-0,63	-0,90	-0,64	-0,91	-0,64	-0,92	-0,65	-0,93	-0,60	-1,17	-0,76	-1,25	-0,83
ROZTOKY	-2,10	-1,52	-3,06	-0,74	-3,41	-1,07	-3,75	-1,40	-4,10	-1,74	-4,46	-1,50	-5,22	-1,64	-5,63	-2,03
PRAHA_S	-2,46	-1,75	-3,60	-0,75	-4,03	-1,16	-4,47	-1,58	-4,91	-2,00	-5,36	-1,71	-6,25	-1,85	-6,76	-2,32
ECK	-0,33	-0,34	-0,36	-0,42	-0,36	-0,42	-0,36	-0,42	-0,36	-0,42	-0,37	-0,43	-0,54	-0,62	-0,58	-0,66
SLANÝ	-2,29	-2,01	-3,31	-2,18	-3,34	-2,21	-3,38	-2,25	-3,41	-2,28	-3,45	-2,03	-3,87	-2,16	-3,87	-2,15
ECK_7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ECK_2	-0,30	-0,33	-0,33	-0,43	-0,33	-0,44	-0,34	-0,44	-0,34	-0,44	-0,35	-0,47	-0,51	-0,65	-0,55	-0,69
ECK_6	-0,08	-0,08	-0,01	-0,03	-0,01	-0,03	-0,01	-0,03	-0,01	-0,04	-0,02	-0,04	-0,10	-0,13	-0,12	-0,15
ECK_5	-0,09	-0,09	0,04	0,03	0,04	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	-0,11	-0,12	-0,14	-0,15
ZLIČÍN	-2,84	-2,46	-4,87	-3,35	-4,75	-3,22	-4,63	-3,09	-4,51	-2,97	-4,40	-2,47	-4,94	-2,62	-5,06	-2,73
PRAHA_Z	-2,91	-2,44	-4,69	-2,77	-4,74	-2,81	-4,78	-2,84	-4,83	-2,88	-4,87	-2,45	-5,53	-2,59	-5,71	-2,76
ČERVENÝ VRCH	-2,87	-2,33	-4,46	-2,24	-4,62	-2,40	-4,79	-2,55	-4,96	-2,71	-5,13	-2,32	-5,86	-2,47	-6,12	-2,70
ECK_4	-0,12	-0,10	0,03	0,08	0,02	0,08	0,02	0,07	0,01	0,07	0,00	0,08	-0,15	-0,06	-0,20	-0,10
KLECANY	-2,57	-1,90	-3,71	-1,00	-4,10	-1,38	-4,50	-1,77	-4,91	-2,15	-5,32	-1,87	-6,18	-2,01	-6,60	-2,40
VRAŇANY	-2,66	-2,10	-3,76	-1,50	-4,05	-1,78	-4,34	-2,07	-4,64	-2,35	-4,94	-2,08	-5,67	-2,21	-5,93	-2,45

Tab. 6.4: Porovnanie uhlov napätí študovanej sústavy pre ostrovnú prevádzku pre varianty 6A – 6H s i bez HVDC

Detailný prehľad kompletných výsledkov výpočtov je obsiahnutý v prílohách A – F na konci dokumentu.

## Záver

Úlohou práce bolo analyzovať možnosti resiliencie kritickej infraštruktúry s využitím HVDC technológie. Úvodná rešeršná kapitola sa zaoberá definíciou kritickej infraštruktúry a jej resiliencie s detailným výkladom legislatívy a ďalších pojmov. Zároveň naznačuje možnosti zvýšenia resiliencie kritickej infraštruktúry s využitím HVDC technológie. Druhá kapitola popisuje históriu, vývoj technológie, aktuálne používané prevedenia a niektoré realizačné aspekty HVDC technológie. Tretia kapitola popisuje metodiku pre riešenie ustáleného chodu striedavej elektrickej siete s využitím Newton-Raphsonovej iteratívnej metódy. V štvrtej kapitole je predstavená modifikovaná Newton-Raphsonová iteratívna metóda umožňujúca výpočet ustáleného stavu striedavej siete s HVDC prenosom, pomocou špecifikovania prídavných rovníc HVDC a príslušných premenných. Jedná sa o takzvanú „jednotnú“ (unified method) kde odhad veličín striedavého systému i jednosmerného systému prebieha v rámci jedného iteratívneho cyklu. Významnou časťou práce je prípadová štúdia obsiahnutá v piatej a šiestej kapitole práce. V piatej kapitole sú popísané scenáre výpočtov pre ostrovnú prevádzku distribučnej sústavy Stredočeského kraja a Prahy napájanej z elektrárne Kladno. Jednotlivé scenáre sa odlišujú počtom odberov a elektrárenských blokov zapojených do ostrovnej prevádzky zaisťujúcej napájanie objektov kritickej infraštruktúry. V poslednej etape rozširovania ostrovnej prevádzky je uvažované so zvýšeným prenosom výkonu do Prahy. Pre tento prípad je analyzovaný možný prínos HVDC systému s maximálnym prenášaným výkonom 300 MW.

Výsledky prípadovej štúdie ukazujú, že v prípade ostrovnej prevádzky a zvýšenej požiadavky výkonu v uzloch Praha sever a Řeporyje by u súčasných striedavých vedení dochádzalo k preťažovaniu, čo nesie priame riziko rozpadu ostrovnej prevádzky. Problematická je najmä dodávka výkonu do uzlu Praha sever, kde sa začínajú objavovať problémy už pri odbere 84 MW. Najväčšie riziko preťaženia sa prejavuje u vedení V 1911, V1912, V1914 a V1901. Pre vyriešenie tejto problematiky v prípadovej štúdii uvažujeme HVDC vedenie z uzla ECK2 do uzla Praha sever. Výsledky prípadovej štúdie ukazujú, že predošlé problémy pominú a v uzle Praha sever je možný odber až 334 MW. Technicky je možný súčtový odber uzlov Praha sever a Řeporyje na úrovni takmer 450 MW (s obmedzením odberu v ostatných uzloch študovanej siete). Pre vyšší výkon dodávaný do Prahy v tomto režime ostrovnej prevádzky sa už prejavuje obmedzenie výkonom elektrárne Kladno a vedením V1903, ktorého zaťaženie pri výkone HVDC 300 MW dosahuje 94 %.

Záverom prípadovej štúdie jasne poukazujú, že pre dané problémy má HVDC systém pozitívne účinky. Problematika kritickej infraštruktúry je však pomerne široká oblasť a implementácia HVDC je jedným z dielčích opatrení pre zvýšenie resiliencie kritickej infraštruktúry. HVDC systém má množstvo realizačných aspektov ktoré bude potrebné v ďalšej práci zvážiť.

## Referencie

- [1] Zákon č. 458/2000 Sb.: o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon). In: . Praha, ročník 2000, číslo 458. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-458#cast1-hlava1>.
- [2] Zákon č. 240/2000 Sb.: o krizovém řízení a o změně některých zákonů (krizový zákon). In.: Praha, ročník 2000, číslo 240. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-240#p3>.
- [3] Vyhláška č. 80/2010 Sb.: o stavu nouze v elektroenergetice a o obsahových náležitostech havarijního plánu. In: . Praha, ročník 2010, číslo 80. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2010-80#p6>.
- [4] Státní energetická koncepce [online]. Praha: MPO, 2015. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/dokument158059.html>.
- [5] Kodex přenosové soustavy [online]. Praha, 2018. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>.
- [6] PPD-21: *Critical Infrastructure Security and Resilience* [online]. United States. White House Office, 12.2.2013 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.hsdl.org/?view&did=731087>.
- [7] *CRITICAL INFRASTRUCTURE RESILIENCE FINAL REPORT AND RECOMMENDATIONS* [online]. National Infrastructure Advisory Council, 2009 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/niac-critical-infrastructure-resilience-final-report-09-08-09-508.pdf>.
- [8] REHAK, David, Pavel SENOVSKY a Simona SLIVKOVA. *Resilience of Critical Infrastructure Elements and Its Main Factors*. Systems [online]. 2018, 6(2) [cit. 2020-05-18]. DOI: 10.3390/systems6020021. ISSN 2079-8954. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2079-8954/6/2/21>.
- [9] DENYER, David. *Organizational Resilience: A summary of academic evidence, business insights and new thinking* [online]. BSI and Cranfield School of Management, 2017 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.cranfield.ac.uk/~media/images-for-new-website/som-media-room/images/organisational-report-david-denyer.ashx>
- [10] ISO/IEC 27001:2013 Information technology — Security techniques — Information security management systems — Requirements. 2013.
- [11] ISO 31000:2018 Risk management — Guidelines. 2018.
- [12] LONG, Willis a Stig NILSSON. *HVDC Transmission: Yesterday and Today*. IEEE power & energy magazine [online]. 2007 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: [https://ethw.org/w/images/4/48/Ref2\\_Long\\_Nilsson\\_2007\\_IEEE\\_PE\\_Magazine.pdf](https://ethw.org/w/images/4/48/Ref2_Long_Nilsson_2007_IEEE_PE_Magazine.pdf)
- [13] KIM, Chan-Ki, Vijay K. SOOD, Gil-Soo JANG, Seong-Joo LIM a Seok-Jin LEE. *HVDC TRANSMISSION Power Conversion Applications in Power Systems*. Wiley - IEEE Press, 2009. ISBN 978-0-470-82295-1.
- [14] RAGHUNAM, Laveen. *HVDC TRANSMISSION* [online]. 2018 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/LaveenRaghunam/315564438-hvdctransmissionppt>
- [15] *Introducing HVDC* [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: [http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/c71c66c1f02e6575c125711f004660e6/d8e7ec7508118cf7c1257c670040069e/\\$FILE/Introducing+HVDC.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/c71c66c1f02e6575c125711f004660e6/d8e7ec7508118cf7c1257c670040069e/$FILE/Introducing+HVDC.pdf)
- [16] *High Voltage Direct Current Transmission* [online]. 2011 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: [https://www.brown.edu/Departments/Engineering/Courses/ENGN1931F/HVDC\\_Proven\\_TechnologySiemens.pdf](https://www.brown.edu/Departments/Engineering/Courses/ENGN1931F/HVDC_Proven_TechnologySiemens.pdf)
- [17] RUDERVALL, Roberto, J.P. CHARPENTIER a Raghuvier SHARMA. *High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper* [online]. 2000 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/hamerly1/docs/energyweek00.pdf>
- [18] *USTÁLENÉ CHODY V UZLOVÝCH SÍŤÍCH: Výukový materiál z predmetu Přenos a rozvod elektrické energie -Katedra elektroenergetiky ČVUT FEL*. Dostupné také z: [https://www.powerwiki.cz/attach/PRE/PRE\\_pr01\\_ustalene\\_stavy.pdf](https://www.powerwiki.cz/attach/PRE/PRE_pr01_ustalene_stavy.pdf)

- [19] DOLEŽAL, Jaroslav. *Základní výpočet ustáleného chodu Basic Power Flow: Výukový materiál z predmetu Řízení elektroenergetických soustav - Katedra elektroenergetiky ČVUT FEL*. Dostupné také z: [https://www.powerwiki.cz/attach/RES/2010\\_A1M1RES\\_PR5.pdf](https://www.powerwiki.cz/attach/RES/2010_A1M1RES_PR5.pdf)
- [20] KUNDUR, Prabha. *Power System Stability and Control*. Electric Power Research Institute, 1994. ISBN 978-0-07-035958-1.
- [21] SACCOMANNO, Fabio. *Electric Power Systems: Analysis and Control*. John Wiley, 2003. ISBN 0-471-23439-7.
- [22] SHENG-HUEI, Lee a Chu CHIA-CHI. *A Web-based Power Flow Calculation of Large-Scale Power Systems Embedded with VSC-based HVDC systems*. 2005 IEEE/PES Transmission [online]. IEEE, 2005, 1-9 [cit. 2020-05-22]. DOI: 10.1109/TDC.2005.1547123. ISBN 0-7803-9114-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1547123/>
- [23] DJEHAF, Mohammed Abdeljalil, Youcef DJILANI KOBIBI a Sid Ahmed ZIDI. *AC Versus DC Link Comparison Based on Power Flow Analysis of a Multimachine Power System*. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies [online]. 2014 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/273036574\\_AC\\_Versus\\_DC\\_Link\\_Comparison\\_Based\\_on\\_Power\\_Flow\\_Analysis\\_of\\_a\\_Multimachine\\_Power\\_System](https://www.researchgate.net/publication/273036574_AC_Versus_DC_Link_Comparison_Based_on_Power_Flow_Analysis_of_a_Multimachine_Power_System)
- [24] BONDHALA, Ummaiah. *Power Flow Studies of an AC-DC Transmission System*. 2011. Indian Institute of Technology Hyderabad

## Príloha A – výsledky uzly 1. – 5. etapa

1. Etapa - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
KLADNO_Z	1,046	-0,48	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,050	-0,07	-12,33	-1,00
ECK	1,050	0,00	26,04	2,13
ECK_7	1,049	-0,10	0,00	0,00
ECK_2	1,050	-0,04	0,00	0,00
ECK_6	1,050	-0,07	0,00	0,00
ECK_5	1,050	-0,06	0,00	0,00
ECK_4	1,050	-0,07	0,00	0,00

2. Etapa - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
KLADNO_Z	1,047	-0,38	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,050	0,01	-12,33	-1,00
ECK	1,050	0,10	31,00	-0,98
ECK_7	1,050	0,00	10,70	9,45
ECK_2	1,050	0,04	-3,00	-1,33
ECK_6	1,050	0,01	-12,67	-5,00
ECK_5	1,050	0,02	0,00	0,00
ECK_4	1,050	0,02	0,00	0,00

3. Etapa - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,038	-2,55	-111,00	-14,00
KLADNO_Z	1,047	-0,38	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,047	-0,64	-12,33	-1,00
PRAHA_S	1,036	-2,08	-33,33	-3,33
ECK	1,050	-0,24	62,00	24,92
ECK_7	1,050	0,00	125,02	4,49
ECK_2	1,049	-0,33	-3,00	-1,33
ECK_6	1,049	-0,19	-12,67	-5,00
ECK_5	1,049	-0,29	0,00	0,00
ECK_4	1,048	-0,37	0,00	0,00

4. Etapa - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,040	-2,34	-111,00	-14,00
KLADNO_Z	1,047	-0,38	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,048	-0,43	-12,33	-1,00
PRAHA_S	1,037	-1,87	-33,33	-3,33
ECK	1,050	-0,12	31,00	8,66
ECK_7	1,050	0,00	51,12	-0,31
ECK_2	1,049	-0,17	-3,00	-1,33
ECK_6	1,050	-0,07	-12,67	-5,00
ECK_5	1,050	-0,06	52,37	8,55
ECK_4	1,050	-0,08	52,37	11,93

5. Etapa - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,041	-1,91	-111,00	-14,00
TUCHLOVICE	1,043	-1,32	-7,67	-1,00
KRALUPY	1,039	-2,09	-20,33	-1,33
EME	1,040	-2,00	-5,67	-0,67
KLADNO_Z	1,045	-0,96	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,049	-0,38	-12,33	-1,00
ROZTOKY	1,043	-1,32	-1,33	-0,67
PRAHA_S	1,041	-1,54	-33,33	-3,33
ECK	1,050	-0,16	31,00	13,13
SLANÝ	1,041	-1,81	-8,00	-1,33
ECK_7	1,050	0,00	49,94	2,47
ECK_2	1,050	-0,15	-3,00	-1,33
ECK_6	1,050	-0,03	-12,67	-5,00
ECK_5	1,050	0,02	78,56	2,38
ECK_4	1,050	0,03	78,56	5,10
KLECANY	1,041	-1,68	-6,67	-0,33
VRAŇANY	1,040	-1,87	-1,00	-0,33

## Príloha B – výsledky vetvy 1. – 5. etapa

1. Etapa - výsledky vetvy							
Meno vetvy	Počiatočný uzol	P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVar]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]
V 1907	DŘÍŇ	-1,40	-0,13	1,40	7,36	1650,00	0,45
V 1904	ECK_2	6,88	0,59	6,90	36,23	1650,00	2,20
V 1903	ECK_2	8,22	0,74	8,25	43,31	825,00	5,25
V 1902	KLADNO_Z	-13,67	-2,33	13,86	72,77	486,00	14,97
V 1908	DŘÍŇ	-10,94	-0,87	10,97	57,58	1650,00	3,49
V 11_13	ECK_6	13,70	1,75	13,81	72,47	10000,00	0,72
V 13_14	ECK_5	5,48	0,88	5,55	29,12	10000,00	0,29
V 14_18	ECK_4	-1,40	0,12	1,40	7,36	10000,00	0,07
V 9_12	ECK	26,04	2,13	26,12	137,11	10000,00	1,37

2. Etapa - výsledky vetvy							
Meno vetvy	Počiatočný uzol	P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVar]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]
V 1907	DŘÍŇ	-1,19	-0,61	1,34	7,03	1650,00	0,43
V 1904	ECK_2	7,60	-1,04	7,67	40,28	1650,00	2,44
V 1903	ECK_2	9,25	-1,60	9,38	49,25	825,00	5,97
V 1902	KLADNO_Z	-13,67	-2,33	13,86	72,77	486,00	14,97
V 1908	DŘÍŇ	-11,14	-0,39	11,15	58,52	1650,00	3,55
V 11_13	ECK_7	-2,99	7,71	8,27	43,40	10000,00	0,43
V 13_14	ECK_6	-6,41	1,24	6,53	34,28	10000,00	0,34
V 14_18	ECK_5	1,19	0,36	1,24	6,53	10000,00	0,07
V 9_12	ECK	31,00	-0,98	31,02	162,79	10000,00	1,63

3. Etapa - výsledky vetvy							
Meno vetvy	Počiatočný uzol	P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVar]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]
V 1907	DŘÍŇ	-47,46	-3,43	47,59	249,77	1650,00	15,14
V 1904	ECK_2	-12,46	3,91	13,06	68,55	1650,00	4,15
V 1903	ECK_2	-38,55	2,09	38,61	202,66	825,00	24,56
V 1902	KLADNO_Z	-13,67	-2,33	13,86	72,77	486,00	14,97
V 1908	DŘÍŇ	-109,92	-16,93	111,21	583,72	1650,00	35,38
V 1917	ŘEPORYJE	-55,50	-7,00	55,94	293,61	1074,00	27,34
V 1918	ŘEPORYJE	-55,50	-7,00	55,94	293,61	1074,00	27,34
V 1911	DŘÍŇ	33,61	3,28	33,77	177,26	486,00	36,47
V 11_13	ECK_7	111,32	2,75	111,36	584,48	10000,00	5,84
V 13_14	ECK_6	59,99	-0,49	60,00	314,90	10000,00	3,15
V 14_18	ECK_5	47,50	3,47	47,63	250,00	10000,00	2,50
V 9_12	ECK	62,00	24,92	66,82	350,72	10000,00	3,51

4. Etapa - výsledky vetvy							
Meno vetvy	Počiatočný uzol	P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVAR]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]
V 1907	DŘÍŇ	-63,53	-8,97	64,16	336,74	1650,00	20,41
V 1904	ECK_2	-37,13	-5,17	37,48	196,74	1650,00	11,92
V 1903	ECK_2	-28,78	0,75	28,79	151,11	825,00	18,32
V 1902	KLADNO_Z	-13,67	-2,33	13,86	72,77	486,00	14,97
V 1908	DŘÍŇ	-93,85	-11,37	94,54	496,20	1650,00	30,07
V 1917	ŘEPORYJE	-55,50	-7,00	55,94	293,61	1074,00	27,34
V 1918	ŘEPORYJE	-55,50	-7,00	55,94	293,61	1074,00	27,34
V 1911	DŘÍŇ	33,61	3,28	33,77	177,25	486,00	36,47
V 11_13	ECK_7	37,43	-2,06	37,48	196,74	10000,00	1,97
V 13_14	ECK_6	-4,04	-6,27	7,46	39,13	10000,00	0,39
V 14_18	ECK_5	11,20	-2,80	11,54	60,58	10000,00	0,61
V 9_12	ECK	31,00	8,66	32,19	168,94	10000,00	1,69

5. Etapa - výsledky vetvy							
Meno vetvy	Počiatočný uzol	P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVAR]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]
V 308	ŘEPORYJE	-10,55	0,37	10,56	55,41	486,00	11,40
V 1912	ROZTOKY	24,73	0,14	24,73	129,82	486,00	26,71
V 1901	TUCHLOVICE	-33,42	0,83	33,43	175,47	486,00	36,10
V 1914	DŘÍŇ	26,20	0,47	26,20	137,53	486,00	28,30
V 346	KRALUPY	-2,24	-0,39	2,28	11,95	486,00	2,46
V 345	KRALUPY	-2,24	-0,39	2,28	11,95	486,00	2,46
V 341	TUCHLOVICE	12,47	-0,30	12,48	65,49	579,00	11,31
V 1900	TUCHLOVICE	-19,36	2,11	19,48	102,23	486,00	21,03
V 307	ŘEPORYJE	-10,55	0,37	10,56	55,41	486,00	11,40
V 1907	DŘÍŇ	-73,06	-6,19	73,32	384,82	1650,00	23,32
V 1904	ECK_2	-55,85	-1,24	55,87	293,23	1650,00	17,77
V 1903	ECK_2	-32,15	2,56	32,26	169,30	825,00	20,52
V 1902	KLADNO_Z	-33,07	0,03	33,07	173,57	486,00	35,71
V 1908	DŘÍŇ	-82,32	-11,12	83,07	436,00	1650,00	26,42
V 1917	ŘEPORYJE	-44,95	-7,37	45,55	239,07	1074,00	22,26
V 1918	ŘEPORYJE	-44,95	-7,37	45,55	239,07	1074,00	22,26
V 1911	DŘÍŇ	26,66	0,32	26,66	139,95	486,00	28,80
V 344	TUCHLOVICE	11,46	-0,90	11,50	60,34	486,00	12,42
V 343	KRALUPY	-4,43	-0,26	4,44	23,31	486,00	4,80
V 117_1	PRAHA_S	11,58	-1,11	11,63	61,05	579,00	10,54
V 117_2	EME	-4,90	-0,01	4,90	25,70	579,00	4,44
V 118	PRAHA_S	6,27	-1,28	6,40	33,61	579,00	5,81
V 178	EME	-5,26	0,14	5,26	27,62	579,00	4,77
V 11_13	ECK_7	16,71	2,63	16,91	88,76	10000,00	0,89
V 13_14	ECK_6	-28,13	0,25	28,13	147,64	10000,00	1,48
V 14_18	ECK_5	-5,45	1,36	5,61	29,47	10000,00	0,29
V 9_12	ECK	-2,65	14,01	14,26	74,85	10000,00	0,75



## Príloha C – výsledky uzly 6. etapa bez HVDC

6. Etapa, variant A - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,035	-2,59	-111,00	-14,00
TUCHLOVICE	1,040	-1,71	-7,67	-1,00
KRALUPY	1,035	-2,71	-20,33	-1,33
EME	1,035	-2,72	-5,67	-0,67
KLADNO_Z	1,043	-1,21	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,048	-0,63	-12,33	-1,00
ROZTOKY	1,038	-2,10	-1,33	-0,67
PRAHA_S	1,035	-2,46	-33,33	-3,33
ECK	1,050	-0,33	31,00	24,63
SLANÝ	1,037	-2,29	-8,00	-1,33
ECK_7	1,050	0,00	84,95	-9,06
ECK_2	1,049	-0,30	-3,00	-1,33
ECK_6	1,050	-0,08	24,33	7,65
ECK_5	1,050	-0,09	78,56	1,14
ZLIČÍN	1,033	-2,84	-14,67	-1,67
PRAHA_Z	1,032	-2,91	-40,00	-11,00
ČERV_VRCH	1,031	-2,87	-16,00	-3,67
ECK_4	1,050	-0,12	78,56	17,20
KLECANY	1,035	-2,57	-6,67	-0,33
VRAŇANY	1,035	-2,66	-1,00	-0,33

6. Etapa, variant B - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,019	-4,87	-311,00	-39,23
TUCHLOVICE	1,032	-2,69	-7,67	-1,00
KRALUPY	1,026	-3,77	-20,33	-1,33
EME	1,026	-3,80	-5,67	-0,67
KLADNO_Z	1,038	-1,81	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,045	-0,89	-12,33	-1,00
ROZTOKY	1,029	-3,06	-1,33	-0,67
PRAHA_S	1,025	-3,60	-33,33	-3,33
ECK	1,050	-0,36	62,00	47,10
SLANÝ	1,029	-3,31	-8,00	-1,33
ECK_7	1,050	0,00	66,50	3,79
ECK_2	1,049	-0,33	-3,00	-1,33
ECK_6	1,050	-0,01	60,33	10,14
ECK_5	1,050	0,04	157,00	0,31
ZLIČÍN	1,017	-4,87	-14,67	-1,67
PRAHA_Z	1,017	-4,69	-40,00	-11,00
ČERV_VRCH	1,018	-4,46	-16,00	-3,67
ECK_4	1,050	0,03	157,00	33,33
KLECANY	1,025	-3,71	-6,67	-0,33
VRAŇANY	1,026	-3,76	-1,00	-0,33

6. Etapa, variant C - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,021	-4,59	-261,00	-32,92
TUCHLOVICE	1,033	-2,63	-7,67	-1,00
KRALUPY	1,025	-3,94	-20,33	-1,33
EME	1,024	-4,03	-5,67	-0,67
KLADNO_Z	1,038	-1,78	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,045	-0,90	-12,33	-1,00
ROZTOKY	1,027	-3,41	-1,33	-0,67
PRAHA_S	1,022	-4,03	-83,33	-8,33
ECK	1,050	-0,36	62,00	45,93
SLANÝ	1,029	-3,34	-8,00	-1,33
ECK_7	1,050	0,00	66,37	3,40
ECK_2	1,049	-0,33	-3,00	-1,33
ECK_6	1,050	-0,01	60,33	9,86
ECK_5	1,050	0,04	157,00	-0,06
ZLIČÍN	1,019	-4,75	-14,67	-1,67
PRAHA_Z	1,018	-4,74	-40,00	-11,00
ČERV_VRCH	1,018	-4,62	-16,00	-3,67
ECK_4	1,050	0,02	157,00	32,46
KLECANY	1,022	-4,10	-6,67	-0,33
VRAŇANY	1,024	-4,05	-1,00	-0,33

6. Etapa, variant D - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,022	-4,31	-211,00	-26,61
TUCHLOVICE	1,033	-2,58	-7,67	-1,00
KRALUPY	1,024	-4,12	-20,33	-1,33
EME	1,023	-4,25	-5,67	-0,67
KLADNO_Z	1,039	-1,75	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,045	-0,91	-12,33	-1,00
ROZTOKY	1,025	-3,75	-1,33	-0,67
PRAHA_S	1,019	-4,47	-133,33	-13,33
ECK	1,050	-0,36	62,00	45,28
SLANÝ	1,028	-3,38	-8,00	-1,33
ECK_7	1,050	0,00	66,58	3,06
ECK_2	1,049	-0,34	-3,00	-1,33
ECK_6	1,050	-0,01	60,33	9,76
ECK_5	1,050	0,03	157,00	-0,22
ZLIČÍN	1,020	-4,63	-14,67	-1,67
PRAHA_Z	1,018	-4,78	-40,00	-11,00
ČERV_VRCH	1,017	-4,79	-16,00	-3,67
ECK_4	1,050	0,02	157,00	32,04
KLECANY	1,019	-4,50	-6,67	-0,33
VRAŇANY	1,022	-4,34	-1,00	-0,33

6. Etapa, variant E - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,024	-4,03	-161,00	-20,31
TUCHLOVICE	1,033	-2,53	-7,67	-1,00
KRALUPY	1,022	-4,29	-20,33	-1,33
EME	1,020	-4,48	-5,67	-0,67
KLADNO_Z	1,039	-1,72	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,045	-0,92	-12,33	-1,00
ROZTOKY	1,022	-4,10	-1,33	-0,67
PRAHA_S	1,016	-4,91	-183,33	-18,33
ECK	1,050	-0,36	62,00	45,16
SLANÝ	1,028	-3,41	-8,00	-1,33
ECK_7	1,050	0,00	67,14	2,77
ECK_2	1,049	-0,34	-3,00	-1,33
ECK_6	1,050	-0,01	60,33	9,82
ECK_5	1,050	0,03	157,00	-0,18
ZLIČÍN	1,021	-4,51	-14,67	-1,67
PRAHA_Z	1,018	-4,83	-40,00	-11,00
ČERV_VRCH	1,016	-4,96	-16,00	-3,67
ECK_4	1,050	0,01	157,00	32,10
KLECANY	1,016	-4,91	-6,67	-0,33
VRAŇANY	1,019	-4,64	-1,00	-0,33

6. Etapa, variant F - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,025	-3,76	-111,00	-14,00
TUCHLOVICE	1,033	-2,49	-7,67	-1,00
KRALUPY	1,020	-4,47	-20,33	-1,33
EME	1,018	-4,72	-5,67	-0,67
KLADNO_Z	1,039	-1,69	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,045	-0,93	-12,33	-1,00
ROZTOKY	1,019	-4,46	-1,33	-0,67
PRAHA_S	1,012	-5,36	-233,33	-23,33
ECK	1,050	-0,37	62,00	45,56
SLANÝ	1,027	-3,45	-8,00	-1,33
ECK_7	1,050	0,00	68,04	2,53
ECK_2	1,049	-0,35	-3,00	-1,33
ECK_6	1,050	-0,02	60,33	10,06
ECK_5	1,050	0,02	157,00	0,06
ZLIČÍN	1,021	-4,40	-14,67	-1,67
PRAHA_Z	1,018	-4,87	-40,00	-11,00
ČERV_VRCH	1,016	-5,13	-16,00	-3,67
ECK_4	1,050	0,00	157,00	32,62
KLECANY	1,013	-5,32	-6,67	-0,33
VRAŇANY	1,016	-4,94	-1,00	-0,33

6. Etapa, variant G - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,023	-4,21	-111,00	-14,00
TUCHLOVICE	1,031	-2,80	-7,67	-1,00
KRALUPY	1,016	-5,05	-20,33	-1,33
EME	1,013	-5,37	-5,67	-0,67
KLADNO_Z	1,038	-1,88	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,044	-1,17	-12,33	-1,00
ROZTOKY	1,014	-5,22	-1,33	-0,67
PRAHA_S	1,006	-6,25	-283,33	-28,33
ECK	1,050	-0,54	62,00	54,28
SLANÝ	1,024	-3,87	-8,00	-1,33
ECK_7	1,050	0,00	120,88	-8,44
ECK_2	1,049	-0,51	-3,00	-1,33
ECK_6	1,050	-0,10	60,33	14,52
ECK_5	1,050	-0,11	157,00	4,90
ZLIČÍN	1,018	-4,94	-14,67	-1,67
PRAHA_Z	1,014	-5,53	-40,00	-11,00
ČERV_VRCH	1,011	-5,86	-16,00	-3,67
ECK_4	1,050	-0,15	157,00	42,02
KLECANY	1,007	-6,18	-6,67	-0,33
VRAŇANY	1,011	-5,67	-1,00	-0,33

6. Etapa, variant H - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,022	-4,31	-111,00	-14,00
TUCHLOVICE	1,032	-2,82	-5,75	-0,75
KRALUPY	1,016	-5,12	-15,25	-1,00
EME	1,012	-5,51	-4,25	-0,50
KLADNO_Z	1,038	-1,86	-10,25	-1,75
DŘÍŇ	1,044	-1,25	-9,25	-0,75
ROZTOKY	1,011	-5,63	-1,00	-0,50
PRAHA_S	1,002	-6,76	-333,33	-33,33
ECK	1,050	-0,58	62,00	55,71
SLANÝ	1,025	-3,87	-6,00	-1,00
ECK_7	1,050	0,00	131,85	-12,25
ECK_2	1,049	-0,55	-2,25	-1,00
ECK_6	1,050	-0,12	63,50	15,23
ECK_5	1,050	-0,14	157,00	6,48
ZLIČÍN	1,017	-5,06	-11,00	-1,25
PRAHA_Z	1,013	-5,71	-30,00	-8,25
ČERV_VRCH	1,010	-6,12	-12,00	-2,75
ECK_4	1,050	-0,20	157,00	45,37
KLECANY	1,004	-6,60	-5,00	-0,25
VRAŇANY	1,009	-5,93	-0,75	-0,25

## Príloha D – výsledky uzly 6. etapa s HVDC

6. Etapa, variant A s HVDC - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,036	-2,31	-111,00	-14,00
TUCHLOVICE	1,041	-1,53	-7,67	-1,00
KRALUPY	1,037	-2,29	-20,33	-1,33
EME	1,038	-2,24	-5,67	-0,67
KLADNO_Z	1,043	-1,09	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,048	-0,57	-12,33	-1,00
ROZTOKY	1,041	-1,52	-1,33	-0,67
PRAHA_S	1,039	-1,75	16,67	-3,33
ECK	1,050	-0,34	31,00	23,98
SLANÝ	1,038	-2,01	-8,00	-1,33
ECK_7	1,050	0,00	84,70	-10,08
ECK_2	1,049	-0,33	-53,50	-1,33
ECK_6	1,050	-0,08	24,33	8,37
ECK_5	1,050	-0,09	78,56	2,56
ZLIČÍN	1,035	-2,46	-14,67	-1,67
PRAHA_Z	1,034	-2,44	-40,00	-11,00
ČERV_VRCH	1,034	-2,33	-16,00	-3,67
ECK_4	1,050	-0,10	78,56	13,39
KLECANY	1,038	-1,90	-6,67	-0,33
VRAŇANY	1,038	-2,10	-1,00	-0,33

6. Etapa, variant B s HVDC - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,024	-3,72	-311,00	-39,23
TUCHLOVICE	1,036	-1,95	-7,67	-1,00
KRALUPY	1,036	-2,05	-20,33	-1,33
EME	1,037	-1,84	-5,67	-0,67
KLADNO_Z	1,041	-1,36	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,046	-0,63	-12,33	-1,00
ROZTOKY	1,041	-0,74	-1,33	-0,67
PRAHA_S	1,040	-0,75	166,67	-3,33
ECK	1,050	-0,42	62,00	44,23
SLANÝ	1,035	-2,18	-8,00	-1,33
ECK_7	1,050	0,00	65,68	-0,53
ECK_2	1,049	-0,43	-205,00	-1,33
ECK_6	1,050	-0,03	60,33	13,06
ECK_5	1,050	0,03	157,00	6,10
ZLIČÍN	1,024	-3,35	-14,67	-1,67
PRAHA_Z	1,025	-2,77	-40,00	-11,00
ČERV_VRCH	1,027	-2,24	-16,00	-3,67
ECK_4	1,050	0,08	157,00	17,90
KLECANY	1,039	-1,00	-6,67	-0,33
VRAŇANY	1,038	-1,50	-1,00	-0,33

6. Etapa, variant C s HVDC - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,026	-3,44	-261,00	-32,92
TUCHLOVICE	1,037	-1,90	-7,67	-1,00
KRALUPY	1,035	-2,22	-20,33	-1,33
EME	1,036	-2,06	-5,67	-0,67
KLADNO_Z	1,041	-1,32	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,046	-0,64	-12,33	-1,00
ROZTOKY	1,039	-1,07	-1,33	-0,67
PRAHA_S	1,038	-1,16	116,67	-8,33
ECK	1,050	-0,42	62,00	41,94
SLANÝ	1,035	-2,21	-8,00	-1,33
ECK_7	1,050	0,00	64,64	-0,94
ECK_2	1,049	-0,44	-205,00	-1,33
ECK_6	1,050	-0,03	60,33	12,38
ECK_5	1,050	0,02	157,00	5,25
ZLIČÍN	1,026	-3,22	-14,67	-1,67
PRAHA_Z	1,026	-2,81	-40,00	-11,00
ČERV_VRCH	1,027	-2,40	-16,00	-3,67
ECK_4	1,050	0,08	157,00	15,94
KLECANY	1,037	-1,38	-6,67	-0,33
VRAŇANY	1,036	-1,78	-1,00	-0,33

6. Etapa, variant D s HVDC - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,029	-3,16	-211,00	-26,61
TUCHLOVICE	1,038	-1,84	-7,67	-1,00
KRALUPY	1,034	-2,38	-20,33	-1,33
EME	1,034	-2,28	-5,67	-0,67
KLADNO_Z	1,041	-1,29	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,046	-0,64	-12,33	-1,00
ROZTOKY	1,037	-1,40	-1,33	-0,67
PRAHA_S	1,035	-1,58	66,67	-13,33
ECK	1,050	-0,42	62,00	40,14
SLANÝ	1,035	-2,25	-8,00	-1,33
ECK_7	1,050	0,00	63,91	-1,31
ECK_2	1,049	-0,44	-205,00	-1,33
ECK_6	1,050	-0,03	60,33	11,86
ECK_5	1,050	0,02	157,00	4,60
ZLIČÍN	1,027	-3,09	-14,67	-1,67
PRAHA_Z	1,027	-2,84	-40,00	-11,00
ČERV_VRCH	1,027	-2,55	-16,00	-3,67
ECK_4	1,050	0,07	157,00	14,42
KLECANY	1,035	-1,77	-6,67	-0,33
VRAŇANY	1,035	-2,07	-1,00	-0,33

6. Etapa, variant E s HVDC - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,031	-2,88	-161,00	-20,31
TUCHLOVICE	1,038	-1,79	-7,67	-1,00
KRALUPY	1,033	-2,55	-20,33	-1,33
EME	1,033	-2,50	-5,67	-0,67
KLADNO_Z	1,042	-1,26	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,047	-0,65	-12,33	-1,00
ROZTOKY	1,035	-1,74	-1,33	-0,67
PRAHA_S	1,032	-2,00	16,67	-18,33
ECK	1,050	-0,42	62,00	38,83
SLANÝ	1,035	-2,28	-8,00	-1,33
ECK_7	1,050	0,00	63,50	-1,62
ECK_2	1,049	-0,44	-205,00	-1,33
ECK_6	1,050	-0,04	60,33	11,50
ECK_5	1,050	0,02	157,00	4,14
ZLIČÍN	1,029	-2,97	-14,67	-1,67
PRAHA_Z	1,027	-2,88	-40,00	-11,00
ČERV_VRCH	1,027	-2,71	-16,00	-3,67
ECK_4	1,050	0,07	157,00	13,34
KLECANY	1,032	-2,15	-6,67	-0,33
VRAŇANY	1,033	-2,35	-1,00	-0,33

6. Etapa, variant F s HVDC - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,034	-2,33	-111,00	-14,00
TUCHLOVICE	1,039	-1,56	-7,67	-1,00
KRALUPY	1,034	-2,29	-20,33	-1,33
EME	1,034	-2,23	-5,67	-0,67
KLADNO_Z	1,042	-1,11	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,047	-0,60	-12,33	-1,00
ROZTOKY	1,036	-1,50	-1,33	-0,67
PRAHA_S	1,033	-1,71	16,67	-23,33
ECK	1,050	-0,43	62,00	37,42
SLANÝ	1,036	-2,03	-8,00	-1,33
ECK_7	1,050	0,00	63,18	-2,92
ECK_2	1,049	-0,47	-255,50	-1,33
ECK_6	1,050	-0,04	60,33	12,07
ECK_5	1,050	0,01	157,00	5,36
ZLIČÍN	1,031	-2,47	-14,67	-1,67
PRAHA_Z	1,030	-2,45	-40,00	-11,00
ČERV_VRCH	1,029	-2,32	-16,00	-3,67
ECK_4	1,050	0,08	157,00	8,88
KLECANY	1,033	-1,87	-6,67	-0,33
VRAŇANY	1,034	-2,08	-1,00	-0,33

6. Etapa, variant G s HVDC - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,033	-2,47	-111,00	-14,00
TUCHLOVICE	1,039	-1,68	-7,67	-1,00
KRALUPY	1,033	-2,42	-20,33	-1,33
EME	1,033	-2,36	-5,67	-0,67
KLADNO_Z	1,042	-1,19	-13,67	-2,33
DŘÍŇ	1,047	-0,76	-12,33	-1,00
ROZTOKY	1,035	-1,64	-1,33	-0,67
PRAHA_S	1,032	-1,85	16,67	-28,33
ECK	1,050	-0,62	62,00	42,93
SLANÝ	1,035	-2,16	-8,00	-1,33
ECK_7	1,050	0,00	113,88	-15,11
ECK_2	1,049	-0,65	-306,00	-1,33
ECK_6	1,050	-0,13	60,33	16,47
ECK_5	1,050	-0,12	157,00	10,63
ZLIČÍN	1,031	-2,62	-14,67	-1,67
PRAHA_Z	1,029	-2,59	-40,00	-11,00
ČERV_VRCH	1,028	-2,47	-16,00	-3,67
ECK_4	1,050	-0,06	157,00	12,03
KLECANY	1,032	-2,01	-6,67	-0,33
VRAŇANY	1,033	-2,21	-1,00	-0,33

6. Etapa, variant H s HVDC - výsledky uzly				
Názov uzlu	Veľkosť napätia [p.j.]	Uhol napätia [°]	Uzlový výkon P [MW]	Uzlový výkon Q [MVA]
ŘEPORYJE	1,033	-2,57	-111,00	-14,00
TUCHLOVICE	1,040	-1,70	-5,75	-0,75
KRALUPY	1,033	-2,48	-15,25	-1,00
EME	1,033	-2,50	-4,25	-0,50
KLADNO_Z	1,043	-1,16	-10,25	-1,75
DŘÍŇ	1,047	-0,83	-9,25	-0,75
ROZTOKY	1,033	-2,03	-1,00	-0,50
PRAHA_S	1,029	-2,32	-33,33	-33,33
ECK	1,050	-0,66	62,00	42,48
SLANÝ	1,036	-2,15	-6,00	-1,00
ECK_7	1,050	0,00	123,33	-18,94
ECK_2	1,049	-0,69	-305,25	-1,00
ECK_6	1,050	-0,15	63,50	16,51
ECK_5	1,050	-0,15	157,00	11,39
ZLIČÍN	1,031	-2,73	-11,00	-1,25
PRAHA_Z	1,029	-2,76	-30,00	-8,25
ČERV_VRCH	1,028	-2,70	-12,00	-2,75
ECK_4	1,050	-0,10	157,00	13,54
KLECANY	1,030	-2,40	-5,00	-0,25
VRAŇANY	1,032	-2,45	-0,75	-0,25

## Príloha E– výsledky vetvy 6. etapa bez HVDC

6. Etapa, variant A - výsledky vetvy							
Meno vetvy	Počiatkový uzol	P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVAR]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]
V 308	ŘEPORYJE	-15,75	0,27	15,75	82,69	486,00	17,01
V 1912	ROZTOKY	39,58	1,52	39,61	207,90	486,00	42,78
V 1901	TUCHLOVICE	-40,72	-2,33	40,78	214,06	486,00	44,05
V 1914	DŘIŇ	41,24	2,49	41,32	216,85	486,00	44,62
V 346	KRALUPY	0,23	-0,47	0,52	2,74	486,00	0,56
V 345	KRALUPY	0,23	-0,47	0,52	2,74	486,00	0,56
V 341	TUCHLOVICE	14,65	-0,67	14,66	76,95	579,00	13,29
V 1900	TUCHLOVICE	-28,01	0,79	28,03	147,10	486,00	30,27
V 307	ŘEPORYJE	-15,75	0,27	15,75	82,69	486,00	17,01
V 1907	DŘIŇ	-92,75	-13,01	93,66	491,59	1650,00	29,79
V 1904	ECK_2	-70,64	-3,01	70,71	371,12	1650,00	22,49
V 1903	ECK_2	-60,80	1,61	60,82	319,24	825,00	38,70
V 1902	KLADNO_Z	-41,77	-1,43	41,79	219,36	486,00	45,13
V 1908	DŘIŇ	-118,31	-21,44	120,23	631,07	1650,00	38,25
V 1917	ŘEPORYJE	-57,44	-13,03	58,89	309,12	1074,00	28,78
V 1918	ŘEPORYJE	-57,44	-13,03	58,89	309,12	1074,00	28,78
V 1911	DŘIŇ	42,13	2,38	42,20	221,48	486,00	45,57
V 344	TUCHLOVICE	14,74	-1,45	14,81	77,75	486,00	16,00
V 345	KRALUPY	0,23	-0,47	0,52	2,74	486,00	0,56
V 346	KRALUPY	0,23	-0,47	0,52	2,74	486,00	0,56
V 343	KRALUPY	-6,58	0,19	6,59	34,57	486,00	7,11
V 386	ŘEPORYJE	14,13	5,39	15,12	79,37	1074,00	7,39
V 387	PRAHA_Z	-4,08	1,49	4,34	22,78	825,00	2,76
V 389	PRAHA_S	20,13	1,70	20,21	106,05	486,00	21,82
V 120	PRAHA_S	15,28	1,23	15,33	80,46	486,00	16,56
V 383	ZLIČÍN	6,57	4,64	8,04	42,21	1074,00	3,93
V 385	ŘEPORYJE	21,25	6,13	22,11	116,07	1074,00	10,81
V 117_1	PRAHA_S	8,85	-1,35	8,96	47,01	579,00	8,12
V 117_2	EME	-2,18	0,22	2,19	11,50	579,00	1,99
V 118	PRAHA_S	3,58	-1,52	3,89	20,43	579,00	3,53
V 178	EME	-2,58	0,37	2,60	13,67	579,00	2,36
V 11_13	ECK_7	42,93	-10,70	44,24	232,20	10000,00	2,32
V 13_14	ECK_6	6,40	-1,60	6,60	34,63	10000,00	0,35
V 14_18	ECK_5	14,29	-3,57	14,73	77,29	10000,00	0,77
V 9_12	ECK	-10,06	22,01	24,20	127,02	10000,00	1,27

6. Etapa, variant B - výsledky vetvy					
P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVAR]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]
-38,46	0,60	38,46	201,87	486,00	41,54
58,93	3,57	59,04	309,88	486,00	63,76
-68,19	-3,82	68,30	358,49	486,00	73,76
60,99	5,85	61,27	321,56	486,00	66,16
0,73	-0,26	0,77	4,04	486,00	0,83
0,73	-0,26	0,77	4,04	486,00	0,83
15,45	-0,27	15,46	81,12	579,00	14,01
-48,87	-0,47	48,87	256,50	486,00	52,78
-38,46	0,60	38,46	201,87	486,00	41,54
-164,83	-28,78	167,33	878,24	1650,00	53,23
-123,43	-8,03	123,69	649,19	1650,00	39,34
-88,69	-2,65	88,73	465,73	825,00	56,45
-62,80	-3,20	62,88	330,06	486,00	67,91
-201,72	-48,37	207,44	1088,76	1650,00	65,99
-114,41	-24,39	116,98	613,99	1074,00	57,17
-114,41	-24,39	116,98	613,99	1074,00	57,17
62,43	5,81	62,70	329,11	486,00	67,72
15,95	-0,86	15,98	83,86	486,00	17,26
0,73	-0,26	0,77	4,04	486,00	0,83
0,73	-0,26	0,77	4,04	486,00	0,83
-7,38	-0,15	7,38	38,74	486,00	7,97
-6,47	3,81	7,50	39,39	1074,00	3,67
-24,39	-0,07	24,39	128,02	825,00	15,52
40,65	3,86	40,83	214,31	486,00	44,10
35,77	3,32	35,93	188,57	486,00	38,80
-13,47	3,14	13,83	72,58	1074,00	6,76
1,20	4,54	4,69	24,64	1074,00	2,29
7,85	-1,73	8,04	42,19	579,00	7,29
-1,18	0,62	1,33	6,99	579,00	1,21
2,59	-1,90	3,21	16,87	579,00	2,91
-1,59	0,77	1,76	9,26	579,00	1,60
3,10	-0,78	3,20	16,79	10000,00	0,17
-25,35	6,35	26,13	137,14	10000,00	1,37
8,13	-2,03	8,38	43,99	10000,00	0,44
-7,16	41,12	41,74	219,08	10000,00	2,19

6. Etapa, variant C - výsledky vetvy							
Meno vetvy	Počiatkový uzol	P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVAR]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]
V 308	ŘEPORYJE	-34,48	0,57	34,49	181,01	486,00	37,25
V 1912	ROZTOKY	68,02	3,93	68,14	357,62	486,00	73,58
V 1901	TUCHLOVICE	-66,70	-3,80	66,81	350,67	486,00	72,15
V 1914	DŘÍŇ	70,31	7,00	70,66	370,86	486,00	76,31
V 346	KRALUPY	2,10	-0,19	2,11	11,07	486,00	2,28
V 345	KRALUPY	2,10	-0,19	2,11	11,07	486,00	2,28
V 341	TUCHLOVICE	17,68	-0,08	17,68	92,77	579,00	16,02
V 1900	TUCHLOVICE	-47,77	-0,44	47,77	250,73	486,00	51,59
V 307	ŘEPORYJE	-34,48	0,57	34,49	181,01	486,00	37,25
V 1907	DŘÍŇ	-165,53	-27,71	167,84	880,92	1650,00	53,39
V 1904	ECK_2	-123,42	-7,66	123,66	649,02	1650,00	39,33
V 1903	ECK_2	-89,00	-2,30	89,03	467,31	825,00	56,64
V 1902	KLADNO_Z	-61,69	-3,14	61,77	324,21	486,00	66,71
V 1908	DŘÍŇ	-203,55	-46,59	208,82	1096,01	1650,00	66,42
V 1917	ŘEPORYJE	-106,35	-23,02	108,82	571,14	1074,00	53,18
V 1918	ŘEPORYJE	-106,35	-23,02	108,82	571,14	1074,00	53,18
V 1911	DŘÍŇ	72,03	6,98	72,36	379,81	486,00	78,15
V 344	TUCHLOVICE	19,30	-0,57	19,31	101,36	486,00	20,86
V 345	KRALUPY	2,10	-0,19	2,11	11,07	486,00	2,28
V 346	KRALUPY	2,10	-0,19	2,11	11,07	486,00	2,28
V 343	KRALUPY	-9,57	-0,24	9,57	50,26	486,00	10,34
V 386	ŘEPORYJE	6,68	5,62	8,73	45,83	1074,00	4,27
V 387	PRAHA_Z	-11,42	1,75	11,55	60,63	825,00	7,35
V 389	PRAHA_S	27,53	1,62	27,58	144,76	486,00	29,79
V 120	PRAHA_S	22,67	1,12	22,70	119,14	486,00	24,52
V 383	ZLIČÍN	-0,68	4,89	4,94	25,93	1074,00	2,41
V 385	ŘEPORYJE	14,00	6,34	15,37	80,65	1074,00	7,51
V 117_1	PRAHA_S	5,09	-1,85	5,41	28,40	579,00	4,90
V 117_2	EME	1,58	0,74	1,75	9,17	579,00	1,58
V 118	PRAHA_S	-0,14	-2,02	2,02	10,61	579,00	1,83
V 178	EME	1,14	0,88	1,44	7,58	579,00	1,31
V 11_13	ECK_7	4,11	-1,03	4,24	22,23	10000,00	0,22
V 13_14	ECK_6	-24,65	6,17	25,41	133,39	10000,00	1,33
V 14_18	ECK_5	8,83	-2,21	9,10	47,79	10000,00	0,48
V 9_12	ECK	-5,63	40,10	40,49	212,51	10000,00	2,13

6. Etapa, variant D - výsledky vetvy						
P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVAR]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]	
-30,53	0,50	30,54	160,27	486,00	32,98	
77,15	4,45	77,28	405,62	486,00	83,46	
-65,26	-3,95	65,38	343,16	486,00	70,61	
79,72	8,42	80,16	420,74	486,00	86,57	
3,48	-0,12	3,48	18,27	486,00	3,76	
3,48	-0,12	3,48	18,27	486,00	3,76	
19,91	0,15	19,91	104,51	579,00	18,05	
-46,73	-0,52	46,73	245,26	486,00	50,46	
-30,53	0,50	30,54	160,27	486,00	32,98	
-166,31	-27,08	168,50	884,42	1650,00	53,60	
-123,48	-7,48	123,70	649,27	1650,00	39,35	
-89,45	-2,07	89,47	469,61	825,00	56,92	
-60,64	-3,19	60,72	318,70	486,00	65,58	
-205,53	-45,48	210,51	1104,87	1650,00	66,96	
-98,32	-21,81	100,71	528,60	1074,00	49,22	
-98,32	-21,81	100,71	528,60	1074,00	49,22	
81,70	8,43	82,13	431,08	486,00	88,70	
22,67	-0,21	22,67	119,01	486,00	24,49	
3,48	-0,12	3,48	18,27	486,00	3,76	
3,48	-0,12	3,48	18,27	486,00	3,76	
-11,77	-0,37	11,78	61,82	486,00	12,72	
19,87	7,65	21,29	111,75	1074,00	10,41	
1,58	3,63	3,96	20,79	825,00	2,52	
14,45	-0,49	14,46	75,90	486,00	15,62	
9,60	-0,95	9,65	50,66	486,00	10,42	
12,15	6,79	13,92	73,04	1074,00	6,80	
26,83	8,35	28,11	147,51	1074,00	13,73	
2,32	-1,97	3,04	15,96	579,00	2,76	
4,35	0,88	4,44	23,31	579,00	4,03	
-2,87	-2,14	3,58	18,80	579,00	3,25	
3,88	1,02	4,01	21,06	579,00	3,64	
5,39	-1,35	5,56	29,19	10000,00	0,29	
-23,81	5,96	24,55	128,84	10000,00	1,29	
9,62	-2,40	9,91	52,02	10000,00	0,52	
-4,14	39,42	39,64	208,05	10000,00	2,08	

6. Etapa, variant E - výsledky vetvy							
Meno vetvy	Počiatkový uzol	P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVAR]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]
V 308	ŘEPORYJE	-26,60	0,38	26,61	139,64	486,00	28,73
V 1912	ROZTOKY	86,33	5,12	86,48	453,92	486,00	93,40
V 1901	TUCHLOVICE	-63,87	-4,26	64,01	335,97	486,00	69,13
V 1914	DŘÍŇ	89,21	10,12	89,78	471,23	486,00	96,96
V 346	KRALUPY	4,86	-0,02	4,86	25,52	486,00	5,25
V 345	KRALUPY	4,86	-0,02	4,86	25,52	486,00	5,25
V 341	TUCHLOVICE	22,16	0,43	22,17	116,35	579,00	20,09
V 1900	TUCHLOVICE	-45,74	-0,72	45,74	240,10	486,00	49,40
V 307	ŘEPORYJE	-26,60	0,38	26,61	139,64	486,00	28,73
V 1907	DŘÍŇ	-167,18	-26,88	169,33	888,73	1650,00	53,86
V 1904	ECK_2	-123,60	-7,49	123,83	649,92	1650,00	39,39
V 1903	ECK_2	-90,03	-1,98	90,05	472,65	825,00	57,29
V 1902	KLADNO_Z	-59,64	-3,35	59,73	313,52	486,00	64,51
V 1908	DŘÍŇ	-207,66	-45,04	212,49	1115,28	1650,00	67,59
V 1917	ŘEPORYJE	-90,30	-20,77	92,66	486,36	1074,00	45,28
V 1918	ŘEPORYJE	-90,30	-20,77	92,66	486,36	1074,00	45,28
V 1911	DŘÍŇ	91,46	10,17	92,02	482,99	486,00	99,38
V 344	TUCHLOVICE	26,07	0,22	26,07	136,81	486,00	28,15
V 345	KRALUPY	4,86	-0,02	4,86	25,52	486,00	5,25
V 346	KRALUPY	4,86	-0,02	4,86	25,52	486,00	5,25
V 343	KRALUPY	-13,98	-0,51	13,99	73,43	486,00	15,11
V 386	ŘEPORYJE	33,10	9,90	34,55	181,33	1074,00	16,88
V 387	PRAHA_Z	14,60	5,58	15,63	82,03	825,00	9,94
V 389	PRAHA_S	1,41	-2,47	2,84	14,92	486,00	3,07
V 120	PRAHA_S	-3,43	-2,89	4,48	23,51	486,00	4,84
V 383	ZLIČÍN	25,01	8,82	26,52	139,17	1074,00	12,96
V 385	ŘEPORYJE	39,71	10,58	41,10	215,71	1074,00	20,09
V 117_1	PRAHA_S	-0,45	-2,09	2,14	11,23	579,00	1,94
V 117_2	EME	7,13	1,05	7,21	37,83	579,00	6,53
V 118	PRAHA_S	-5,61	-2,26	6,05	31,75	579,00	5,48
V 178	EME	6,62	1,19	6,73	35,33	579,00	6,10
V 11_13	ECK_7	6,97	-1,74	7,18	37,69	10000,00	0,38
V 13_14	ECK_6	-22,82	5,71	23,53	123,48	10000,00	1,23
V 14_18	ECK_5	10,48	-2,62	10,80	56,71	10000,00	0,57
V 9_12	ECK	-2,72	39,10	39,20	205,72	10000,00	2,06

6. Etapa, variant F - výsledky vetvy					
P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVAR]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]
-22,70	0,22	22,70	119,13	486,00	24,51
95,56	5,94	95,74	502,51	486,00	103,40
-62,53	-4,73	62,71	329,12	486,00	67,72
98,79	12,11	99,53	522,39	486,00	107,49
6,25	0,09	6,25	32,82	486,00	6,75
6,25	0,09	6,25	32,82	486,00	6,75
24,43	0,76	24,44	128,28	579,00	22,16
-44,81	-1,02	44,82	235,25	486,00	48,41
-22,70	0,22	22,70	119,13	486,00	24,51
-168,12	-27,14	170,30	893,85	1650,00	54,17
-123,79	-7,68	124,03	650,98	1650,00	39,45
-90,75	-2,03	90,77	476,42	825,00	57,75
-58,70	-3,63	58,81	308,69	486,00	63,52
-209,94	-45,27	214,77	1127,24	1650,00	68,32
-82,31	-19,91	84,68	444,45	1074,00	41,38
-82,31	-19,91	84,68	444,45	1074,00	41,38
101,31	12,20	102,04	535,59	486,00	110,20
29,48	0,73	29,49	154,78	486,00	31,85
6,25	0,09	6,25	32,82	486,00	6,75
6,25	0,09	6,25	32,82	486,00	6,75
-16,20	-0,69	16,21	85,09	486,00	17,51
46,37	12,37	47,99	251,89	1074,00	23,45
27,64	7,58	28,67	150,46	825,00	18,24
-11,60	-4,32	12,38	64,97	486,00	13,37
-16,42	-4,70	17,08	89,63	486,00	18,44
37,89	10,99	39,46	207,09	1074,00	19,28
52,63	13,02	54,22	284,57	1074,00	26,50
-3,22	-2,23	3,91	20,54	579,00	3,55
9,92	1,25	10,00	52,47	579,00	9,06
-8,35	-2,40	8,68	45,58	579,00	7,87
9,38	1,39	9,48	49,76	579,00	8,59
8,83	-2,21	9,10	47,76	10000,00	0,48
-21,68	5,43	22,35	117,30	10000,00	1,17
11,43	-2,86	11,78	61,85	10000,00	0,62
-1,34	39,14	39,16	205,55	10000,00	2,06

6. Etapa, variant G - výsledky vetvy							
Meno vetvy	Počiatkový uzol	P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVAR]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]
V 308	ŘEPORYJE	-24,90	0,28	24,90	130,68	486,00	26,89
V 1912	ROZTOKY	109,41	7,31	109,66	575,55	486,00	118,43
V 1901	TUCHLOVICE	-67,00	-6,08	67,28	353,11	486,00	72,66
V 1914	DŘÍŇ	113,25	15,50	114,31	599,97	486,00	123,45
V 346	KRALUPY	7,85	0,25	7,85	41,21	486,00	8,48
V 345	KRALUPY	7,85	0,25	7,85	41,21	486,00	8,48
V 341	TUCHLOVICE	27,04	1,22	27,07	142,07	579,00	24,54
V 1900	TUCHLOVICE	-51,36	-0,90	51,37	269,60	486,00	55,47
V 307	ŘEPORYJE	-24,90	0,28	24,90	130,68	486,00	26,89
V 1907	DŘÍŇ	-182,61	-32,36	185,45	973,38	1650,00	58,99
V 1904	ECK_2	-134,37	-9,73	134,72	707,11	1650,00	42,86
V 1903	ECK_2	-111,63	-0,95	111,64	585,94	825,00	71,02
V 1902	KLADNO_Z	-65,32	-3,71	65,43	343,41	486,00	70,66
V 1908	DŘÍŇ	-236,73	-52,56	242,50	1272,79	1650,00	77,14
V 1917	ŘEPORYJE	-88,19	-22,02	90,90	477,10	1074,00	44,42
V 1918	ŘEPORYJE	-88,19	-22,02	90,90	477,10	1074,00	44,42
V 1911	DŘÍŇ	116,19	15,66	117,24	615,34	486,00	126,61
V 344	TUCHLOVICE	33,41	1,42	33,44	175,53	486,00	36,12
V 345	KRALUPY	7,85	0,25	7,85	41,21	486,00	8,48
V 346	KRALUPY	7,85	0,25	7,85	41,21	486,00	8,48
V 343	KRALUPY	-18,74	-0,94	18,77	98,50	486,00	20,27
V 386	ŘEPORYJE	54,57	14,43	56,44	296,25	1074,00	27,58
V 387	PRAHA_Z	35,69	9,26	36,87	193,52	825,00	23,46
V 389	PRAHA_S	-19,59	-5,80	20,43	107,22	486,00	22,06
V 120	PRAHA_S	-24,40	-6,14	25,16	132,06	486,00	27,17
V 383	ZLIČÍN	45,85	12,81	47,60	249,85	1074,00	23,26
V 385	ŘEPORYJE	60,61	15,05	62,45	327,78	1074,00	30,52
V 117_1	PRAHA_S	-6,39	-2,39	6,82	35,80	579,00	6,18
V 117_2	EME	13,12	1,52	13,20	69,30	579,00	11,97
V 118	PRAHA_S	-11,48	-2,56	11,76	61,73	579,00	10,66
V 178	EME	12,54	1,66	12,65	66,38	579,00	11,46
V 11_13	ECK_7	54,92	-13,68	56,60	297,07	10000,00	2,97
V 13_14	ECK_6	3,46	-0,86	3,56	18,71	10000,00	0,19
V 14_18	ECK_5	25,98	-6,48	26,78	140,53	10000,00	1,41
V 9_12	ECK	-5,94	46,12	46,50	244,07	10000,00	2,44

6. Etapa, variant H- výsledky vetvy					
P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVAR]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]
-26,44	0,12	26,44	138,78	486,00	28,56
118,39	8,03	118,66	622,82	486,00	128,15
-66,17	-5,80	66,42	348,64	486,00	71,74
122,32	17,45	123,56	648,52	486,00	133,44
9,69	0,50	9,70	50,91	486,00	10,48
9,69	0,50	9,70	50,91	486,00	10,48
26,43	1,24	26,46	138,89	579,00	23,99
-53,73	-0,64	53,74	282,05	486,00	58,03
-26,44	0,12	26,44	138,78	486,00	28,56
-188,09	-34,11	191,16	1003,34	1650,00	60,81
-137,38	-10,50	137,78	723,17	1650,00	43,83
-118,25	-0,67	118,25	620,64	825,00	75,23
-64,31	-2,95	64,38	337,89	486,00	69,52
-247,93	-54,88	253,93	1332,81	1650,00	80,78
-88,84	-22,11	91,55	480,50	1074,00	44,74
-88,84	-22,11	91,55	480,50	1074,00	44,74
125,58	17,70	126,82	665,64	486,00	136,96
34,34	1,84	34,38	180,47	486,00	37,13
9,69	0,50	9,70	50,91	486,00	10,48
9,69	0,50	9,70	50,91	486,00	10,48
-20,12	-1,26	20,16	105,81	486,00	21,77
57,74	14,80	59,60	312,84	1074,00	29,13
43,30	10,54	44,56	233,90	825,00	28,35
-31,09	-7,64	32,02	168,04	486,00	34,58
-34,68	-7,86	35,56	186,66	486,00	38,41
50,72	13,32	52,44	275,23	1074,00	25,63
61,82	15,18	63,65	334,10	1074,00	31,11
-12,34	-2,84	12,67	66,48	579,00	11,48
17,46	2,07	17,58	92,27	579,00	15,94
-16,07	-2,97	16,35	85,79	579,00	14,82
16,93	2,17	17,07	89,61	579,00	15,48
66,93	-16,66	68,97	361,98	10000,00	3,62
11,99	-2,99	12,35	64,84	10000,00	0,65
31,49	-7,86	32,46	170,34	10000,00	1,70
-5,08	47,91	48,17	252,85	10000,00	2,53



## Príloha F – výsledky vetvy 6. etapa s HVDC

6. Etapa, variant A s HVDC - výsledky vetvy							
Meno vetvy	Počiatkový uzol	P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVAR]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]
V 308	ŘEPORYJE	-14,07	-0,01	14,07	73,85	486,00	15,20
V 1912	ROZTOKY	25,67	1,95	25,75	135,14	486,00	27,81
V 1901	TUCHLOVICE	-35,13	-2,71	35,24	184,94	486,00	38,05
V 1914	DŘÍŇ	27,15	2,32	27,25	143,01	486,00	29,43
V 346	KRALUPY	-1,26	-0,41	1,33	6,96	486,00	1,43
V 345	KRALUPY	-1,26	-0,41	1,33	6,96	486,00	1,43
V 341	TUCHLOVICE	12,25	-0,65	12,27	64,39	579,00	11,12
V 1900	TUCHLOVICE	-24,19	0,68	24,20	127,03	486,00	26,14
V 307	ŘEPORYJE	-14,07	-0,01	14,07	73,85	486,00	15,20
V 1907	DŘÍŇ	-83,59	-11,66	84,40	442,98	1650,00	26,85
V 1904	ECK_2	-78,15	-2,49	78,19	410,41	1650,00	24,87
V 1903	ECK_2	-66,09	2,26	66,13	347,09	825,00	42,07
V 1902	KLADNO_Z	-37,92	-1,47	37,95	199,20	486,00	40,99
V 1908	DŘÍŇ	-86,32	-19,83	88,56	464,84	1650,00	28,17
V 1917	ŘEPORYJE	-51,20	-12,15	52,62	276,19	1074,00	25,72
V 1918	ŘEPORYJE	-51,20	-12,15	52,62	276,19	1074,00	25,72
V 1911	DŘÍŇ	27,64	2,22	27,73	145,54	486,00	29,95
V 344	TUCHLOVICE	11,13	-1,43	11,22	58,89	486,00	12,12
V 345	KRALUPY	-1,26	-0,41	1,33	6,96	486,00	1,43
V 346	KRALUPY	-1,26	-0,41	1,33	6,96	486,00	1,43
V 343	KRALUPY	-4,21	0,09	4,21	22,11	486,00	4,55
V 386	ŘEPORYJE	6,10	4,79	7,76	40,72	1074,00	3,79
V 387	PRAHA_Z	-11,99	0,95	12,02	63,10	825,00	7,65
V 389	PRAHA_S	28,10	2,41	28,20	148,03	486,00	30,46
V 120	PRAHA_S	23,24	1,91	23,32	122,39	486,00	25,18
V 383	ZLIČÍN	-1,24	4,09	4,27	22,43	1074,00	2,09
V 385	ŘEPORYJE	13,44	5,52	14,53	76,25	1074,00	7,10
V 117_1	PRAHA_S	11,86	-1,44	11,95	62,70	579,00	10,83
V 117_2	EME	-5,17	0,34	5,19	27,22	579,00	4,70
V 118	PRAHA_S	6,55	-1,61	6,75	35,41	579,00	6,12
V 178	EME	-5,54	0,49	5,56	29,17	579,00	5,04
V 11_13	ECK_7	46,56	-11,60	47,98	251,85	10000,00	2,52
V 13_14	ECK_6	4,74	-1,18	4,88	25,63	10000,00	0,26
V 14_18	ECK_5	5,11	-1,28	5,26	27,62	10000,00	0,28
V 9_12	ECK	-4,38	21,24	21,68	113,81	10000,00	1,14

6. Etapa, variant B s HVDC- výsledky vetvy						
P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVAR]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]	
-31,87	-0,75	31,88	167,31	486,00	34,43	
3,41	5,94	6,84	35,92	486,00	7,39	
-45,97	-5,67	46,32	243,11	486,00	50,02	
4,75	5,87	7,55	39,64	486,00	8,16	
-5,21	0,06	5,21	27,32	486,00	5,62	
-5,21	0,06	5,21	27,32	486,00	5,62	
5,93	0,02	5,93	31,14	579,00	5,38	
-33,68	-1,12	33,70	176,88	486,00	36,39	
-31,87	-0,75	31,88	167,31	486,00	34,43	
-128,28	-23,59	130,43	684,57	1650,00	41,49	
-153,51	-5,82	153,62	806,30	1650,00	48,87	
-109,94	0,04	109,94	577,05	825,00	69,95	
-47,47	-3,45	47,60	249,83	486,00	51,41	
-73,99	-42,12	85,14	446,88	1650,00	27,08	
-89,68	-21,96	92,33	484,59	1074,00	45,12	
-89,68	-21,96	92,33	484,59	1074,00	45,12	
4,61	5,91	7,50	39,35	486,00	8,10	
1,59	-0,45	1,65	8,66	486,00	1,78	
-5,21	0,06	5,21	27,32	486,00	5,62	
-5,21	0,06	5,21	27,32	486,00	5,62	
2,08	-0,67	2,18	11,45	486,00	2,36	
-38,21	2,77	38,31	201,07	1074,00	18,72	
-55,78	-1,79	55,81	292,94	825,00	35,51	
72,62	7,32	72,98	383,07	486,00	78,82	
67,71	6,68	68,04	357,11	486,00	73,48	
-44,39	1,85	44,43	233,18	1074,00	21,71	
-29,70	3,43	29,90	156,92	1074,00	14,61	
19,87	-2,14	19,98	104,89	579,00	18,12	
-13,12	1,25	13,18	69,19	579,00	11,95	
14,47	-2,29	14,65	76,90	579,00	13,28	
-13,39	1,38	13,47	70,67	579,00	12,21	
17,87	-4,46	18,42	96,70	10000,00	0,97	
-31,87	7,99	32,86	172,47	10000,00	1,72	
-28,54	7,15	29,42	154,40	10000,00	1,54	
15,59	37,98	41,06	215,48	10000,00	2,15	

6. Etapa, variant C s HVDC - výsledky vetvy							
Meno vetvy	Počiatkový uzol	P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVAR]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]
V 308	ŘEPORYJE	-27,82	-0,65	27,83	146,05	486,00	30,05
V 1912	ROZTOKY	12,43	5,99	13,79	72,40	486,00	14,90
V 1901	TUCHLOVICE	-44,37	-5,30	44,68	234,53	486,00	48,26
V 1914	DŘÍŇ	13,81	6,03	15,06	79,07	486,00	16,27
V 346	KRALUPY	-3,85	0,06	3,85	20,21	486,00	4,16
V 345	KRALUPY	-3,85	0,06	3,85	20,21	486,00	4,16
V 341	TUCHLOVICE	8,10	0,04	8,10	42,51	579,00	7,34
V 1900	TUCHLOVICE	-32,45	-0,85	32,46	170,35	486,00	35,05
V 307	ŘEPORYJE	-27,82	-0,65	27,83	146,05	486,00	30,05
V 1907	DŘÍŇ	-128,74	-21,52	130,53	685,10	1650,00	41,52
V 1904	ECK_2	-153,32	-5,03	153,40	805,17	1650,00	48,80
V 1903	ECK_2	-109,88	0,70	109,88	576,75	825,00	69,91
V 1902	KLADNO_Z	-46,23	-3,15	46,34	243,21	486,00	50,04
V 1908	DŘÍŇ	-75,38	-38,83	84,79	445,04	1650,00	26,97
V 1917	ŘEPORYJE	-81,53	-20,08	83,96	440,70	1074,00	41,03
V 1918	ŘEPORYJE	-81,53	-20,08	83,96	440,70	1074,00	41,03
V 1911	DŘÍŇ	13,92	6,06	15,18	79,70	486,00	16,40
V 344	TUCHLOVICE	4,86	-0,41	4,87	25,59	486,00	5,26
V 345	KRALUPY	-3,85	0,06	3,85	20,21	486,00	4,16
V 346	KRALUPY	-3,85	0,06	3,85	20,21	486,00	4,16
V 343	KRALUPY	-0,09	-0,67	0,67	3,53	486,00	0,73
V 386	ŘEPORYJE	-25,24	3,93	25,54	134,05	1074,00	12,48
V 387	PRAHA_Z	-42,94	-0,25	42,94	225,39	825,00	27,32
V 389	PRAHA_S	59,49	4,92	59,70	313,33	486,00	64,47
V 120	PRAHA_S	54,60	4,32	54,77	287,48	486,00	59,15
V 383	ZLIČÍN	-31,75	3,15	31,90	167,44	1074,00	15,59
V 385	ŘEPORYJE	-17,07	4,61	17,68	92,81	1074,00	8,64
V 117_1	PRAHA_S	17,11	-2,24	17,26	90,57	579,00	15,64
V 117_2	EME	-10,39	1,26	10,47	54,93	579,00	9,49
V 118	PRAHA_S	11,74	-2,40	11,99	62,91	579,00	10,86
V 178	EME	-10,69	1,40	10,78	56,60	579,00	9,78
V 11_13	ECK_7	18,09	-4,52	18,64	97,86	10000,00	0,98
V 13_14	ECK_6	-31,60	7,92	32,58	170,98	10000,00	1,71
V 14_18	ECK_5	-28,07	7,03	28,94	151,89	10000,00	1,52
V 9_12	ECK	17,22	36,14	40,03	210,13	10000,00	2,10

6. Etapa, variant D s HVDC - výsledky vetvy						
P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVAR]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]	
-23,79	-0,59	23,80	124,92	486,00	25,70	
21,49	6,18	22,36	117,35	486,00	24,15	
-42,81	-5,09	43,12	226,30	486,00	46,56	
22,93	6,44	23,82	125,00	486,00	25,72	
-2,49	0,08	2,49	13,07	486,00	2,69	
-2,49	0,08	2,49	13,07	486,00	2,69	
10,28	0,10	10,28	53,96	579,00	9,32	
-31,26	-0,69	31,27	164,14	486,00	33,77	
-23,79	-0,59	23,80	124,92	486,00	25,70	
-129,28	-19,86	130,80	686,51	1650,00	41,61	
-153,20	-4,41	153,26	804,40	1650,00	48,75	
-109,95	1,23	109,95	577,11	825,00	69,95	
-45,04	-2,97	45,14	236,91	486,00	48,75	
-76,90	-36,17	84,98	446,04	1650,00	27,03	
-73,40	-18,36	75,66	397,12	1074,00	36,98	
-73,40	-18,36	75,66	397,12	1074,00	36,98	
23,30	6,47	24,19	126,94	486,00	26,12	
8,14	-0,31	8,15	42,78	486,00	8,80	
-2,49	0,08	2,49	13,07	486,00	2,69	
-2,49	0,08	2,49	13,07	486,00	2,69	
-2,25	-0,69	2,36	12,38	486,00	2,55	
-12,21	5,30	13,32	69,89	1074,00	6,51	
-30,07	1,34	30,10	157,98	825,00	19,15	
46,40	2,66	46,47	243,93	486,00	59,19	
41,52	2,10	41,57	218,20	486,00	44,90	
-19,06	4,57	19,60	102,90	1074,00	9,58	
-4,40	5,98	7,42	38,93	1074,00	3,63	
14,35	-2,35	14,54	76,31	579,00	13,18	
-7,65	1,31	7,76	40,73	579,00	7,03	
9,01	-2,51	9,36	49,11	579,00	8,48	
-7,98	1,44	8,11	42,59	579,00	7,36	
18,57	-4,64	19,14	100,44	10000,00	1,00	
-31,19	7,81	32,15	168,75	10000,00	1,69	
-27,53	6,90	28,38	148,97	10000,00	1,49	
18,81	34,63	39,41	206,85	10000,00	2,07	

6. Etapa, variant E s HVDC - výsledky vetvy							
Meno vetvy	Počiatočný uzol	P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVAR]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]
V 308	ŘEPORYJE	-19,79	-0,57	19,80	103,91	486,00	21,38
V 1912	ROZTOKY	30,58	6,53	31,27	164,13	486,00	33,77
V 1901	TUCHLOVICE	-41,31	-5,04	41,61	218,42	486,00	44,94
V 1914	DŘÍŇ	32,12	7,12	32,90	172,69	486,00	35,53
V 346	KRALUPY	-1,13	0,11	1,13	5,93	486,00	1,22
V 345	KRALUPY	-1,13	0,11	1,13	5,93	486,00	1,22
V 341	TUCHLOVICE	12,47	0,20	12,47	65,47	579,00	11,31
V 1900	TUCHLOVICE	-30,14	-0,63	30,14	158,22	486,00	32,55
V 307	ŘEPORYJE	-19,79	-0,57	19,80	103,91	486,00	21,38
V 1907	DŘÍŇ	-129,90	-18,61	131,22	688,74	1650,00	41,74
V 1904	ECK_2	-153,13	-3,97	153,18	804,00	1650,00	48,73
V 1903	ECK_2	-110,14	1,64	110,15	578,14	825,00	70,08
V 1902	KLADNO_Z	-43,91	-2,89	44,00	230,94	486,00	47,52
V 1908	DŘÍŇ	-78,56	-34,14	85,66	449,58	1650,00	27,25
V 1917	ŘEPORYJE	-65,30	-16,79	67,42	353,88	1074,00	32,95
V 1918	ŘEPORYJE	-65,30	-16,79	67,42	353,88	1074,00	32,95
V 1911	DŘÍŇ	32,76	7,15	33,53	175,99	486,00	36,21
V 344	TUCHLOVICE	11,45	-0,15	11,45	60,11	486,00	12,37
V 345	KRALUPY	-1,13	0,11	1,13	5,93	486,00	1,22
V 346	KRALUPY	-1,13	0,11	1,13	5,93	486,00	1,22
V 343	KRALUPY	-4,43	-0,74	4,49	23,58	486,00	4,85
V 386	ŘEPORYJE	0,85	6,87	6,93	36,36	1074,00	3,39
V 387	PRAHA_Z	-17,17	2,99	17,43	91,46	825,00	11,09
V 389	PRAHA_S	33,33	0,52	33,34	174,98	486,00	36,00
V 120	PRAHA_S	28,47	0,01	28,47	149,42	486,00	30,75
V 383	ZLIČÍN	-6,35	6,12	8,82	46,29	1074,00	4,31
V 385	ŘEPORYJE	8,32	7,54	11,23	58,95	1074,00	5,49
V 117_1	PRAHA_S	11,58	-2,47	11,85	62,17	579,00	10,74
V 117_2	EME	-4,90	1,38	5,09	26,72	579,00	4,62
V 118	PRAHA_S	6,28	-2,63	6,81	35,75	579,00	6,17
V 178	EME	-5,27	1,52	5,48	28,78	579,00	4,97
V 11_13	ECK_7	19,31	-4,82	19,90	104,45	10000,00	1,04
V 13_14	ECK_6	-30,64	7,68	31,58	165,77	10000,00	1,66
V 14_18	ECK_5	-26,92	6,74	27,75	145,64	10000,00	1,46
V 9_12	ECK	20,34	33,46	39,16	205,52	10000,00	2,06

6. Etapa, variant F s HVDC - výsledky vetvy						
P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVAR]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]	
-14,12	-0,87	14,15	74,28	486,00	15,28	
25,81	7,47	26,87	141,02	486,00	29,02	
-34,26	-5,52	34,70	182,12	486,00	37,47	
27,30	7,88	28,41	149,12	486,00	30,68	
-1,24	0,22	1,26	6,63	486,00	1,36	
-1,24	0,22	1,26	6,63	486,00	1,36	
12,28	0,37	12,29	64,50	579,00	11,14	
-25,24	-0,79	25,26	132,56	486,00	27,28	
-14,12	-0,87	14,15	74,28	486,00	15,28	
-121,43	-16,48	122,54	643,17	1650,00	38,98	
-160,64	-3,18	160,67	843,30	1650,00	51,11	
-115,75	2,56	115,78	607,69	825,00	73,66	
-38,98	-2,96	39,09	205,19	486,00	42,22	
-48,36	-31,06	57,48	301,67	1650,00	18,28	
-50,98	-14,50	53,00	278,20	1074,00	25,90	
-50,98	-14,50	53,00	278,20	1074,00	25,90	
27,80	7,94	28,91	151,74	486,00	31,22	
11,16	0,10	11,16	58,59	486,00	12,06	
-1,24	0,22	1,26	6,63	486,00	1,36	
-1,24	0,22	1,26	6,63	486,00	1,36	
-4,24	-0,92	4,34	22,78	486,00	4,69	
5,94	8,05	10,00	52,50	1074,00	4,89	
-12,15	4,14	12,84	67,39	825,00	8,17	
28,27	-0,78	28,28	148,43	486,00	30,54	
23,41	-1,28	23,44	123,05	486,00	25,32	
-1,40	7,26	7,39	38,79	1074,00	3,61	
13,27	8,70	15,87	83,30	1074,00	7,76	
11,83	-2,69	12,13	63,65	579,00	10,99	
-5,14	1,60	5,38	28,26	579,00	4,88	
6,52	-2,84	7,11	37,34	579,00	6,45	
-5,51	1,73	5,77	30,30	579,00	5,23	
23,97	-5,98	24,71	129,69	10000,00	1,30	
-31,60	7,92	32,58	170,99	10000,00	1,71	
-35,40	8,87	36,50	191,57	10000,00	1,92	
27,50	31,90	42,12	221,06	10000,00	2,21	

6. Etapa, variant G s HVDC - výsledky vetvy							
Meno vetvy	Počiatkový uzol	P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVAR]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]
V 308	ŘEPORYJE	-14,57	-0,95	14,60	76,62	486,00	15,76
V 1912	ROZTOKY	25,64	8,92	27,15	142,50	486,00	29,32
V 1901	TUCHLOVICE	-32,95	-6,63	33,61	176,43	486,00	36,30
V 1914	DŘÍŇ	27,13	9,35	28,70	150,63	486,00	30,99
V 346	KRALUPY	-1,16	0,35	1,22	6,38	486,00	1,31
V 345	KRALUPY	-1,16	0,35	1,22	6,38	486,00	1,31
V 341	TUCHLOVICE	12,41	0,59	12,43	65,23	579,00	11,27
V 1900	TUCHLOVICE	-27,77	-0,41	27,77	145,75	486,00	29,99
V 307	ŘEPORYJE	-14,57	-0,95	14,60	76,62	486,00	15,76
V 1907	DŘÍŇ	-126,28	-18,30	127,60	669,71	1650,00	40,59
V 1904	ECK_2	-178,37	-3,71	178,40	936,38	1650,00	56,75
V 1903	ECK_2	-141,16	5,02	141,25	741,37	825,00	89,86
V 1902	KLADNO_Z	-41,52	-2,62	41,60	218,35	486,00	44,93
V 1908	DŘÍŇ	-42,31	-33,59	54,02	283,55	1650,00	17,19
V 1917	ŘEPORYJE	-50,55	-15,20	52,78	277,05	1074,00	25,80
V 1918	ŘEPORYJE	-50,55	-15,20	52,78	277,05	1074,00	25,80
V 1911	DŘÍŇ	27,63	9,45	29,20	153,28	486,00	31,54
V 344	TUCHLOVICE	11,36	0,43	11,36	59,65	486,00	12,27
V 345	KRALUPY	-1,16	0,35	1,22	6,38	486,00	1,31
V 346	KRALUPY	-1,16	0,35	1,22	6,38	486,00	1,31
V 343	KRALUPY	-4,37	-1,13	4,52	23,70	486,00	4,88
V 386	ŘEPORYJE	5,95	8,83	10,65	55,89	1074,00	5,20
V 387	PRAHA_Z	-12,14	4,91	13,10	68,74	825,00	8,33
V 389	PRAHA_S	28,26	-1,54	28,30	148,55	486,00	30,56
V 120	PRAHA_S	23,40	-2,04	23,49	123,29	486,00	25,37
V 383	ZLIČÍN	-1,39	8,02	8,14	42,70	1074,00	3,98
V 385	ŘEPORYJE	13,28	9,46	16,31	85,60	1074,00	7,97
V 117_1	PRAHA_S	11,66	-2,95	12,03	63,14	579,00	10,91
V 117_2	EME	-4,98	1,87	5,32	27,91	579,00	4,82
V 118	PRAHA_S	6,36	-3,10	7,08	37,16	579,00	6,42
V 178	EME	-5,35	2,00	5,71	29,95	579,00	5,17
V 11_13	ECK_7	72,11	-17,94	74,31	390,00	10000,00	3,90
V 13_14	ECK_6	-8,99	2,25	9,26	48,62	10000,00	0,49
V 14_18	ECK_5	-30,54	7,65	31,49	165,27	10000,00	1,65
V 9_12	ECK	28,82	36,34	46,38	243,44	10000,00	2,43

6. Etapa, variant H s HVDC - výsledky vetvy						
P z poč. uzlu [MW]	Q z poč. uzlu [MVAR]	Veľkosť S z poč. uzlu [MVA]	Prúd [A]	Prúdový limit [A]	Zaťaženie [%]	
-16,03	-0,99	16,06	84,28	486,00	17,34	
34,50	9,23	35,72	187,46	486,00	38,57	
-31,94	-5,83	32,47	170,42	486,00	35,07	
35,77	9,84	37,10	194,70	486,00	40,06	
0,64	0,50	0,81	4,23	486,00	0,87	
0,64	0,50	0,81	4,23	486,00	0,87	
11,73	0,41	11,74	61,60	579,00	10,64	
-29,93	0,17	29,93	157,12	486,00	32,33	
-16,03	-0,99	16,06	84,28	486,00	17,34	
-131,38	-18,40	132,66	696,28	1650,00	42,20	
-181,08	-3,74	181,12	950,64	1650,00	57,61	
-147,16	5,83	147,28	773,02	825,00	93,70	
-40,28	-1,50	40,31	211,58	486,00	43,54	
-52,80	-33,48	62,52	328,17	1650,00	19,89	
-51,10	-14,78	53,19	279,18	1074,00	25,99	
-51,10	-14,78	53,19	279,18	1074,00	25,99	
36,58	9,99	37,92	199,00	486,00	40,95	
12,16	0,52	12,17	63,89	486,00	13,15	
0,64	0,50	0,81	4,23	486,00	0,87	
0,64	0,50	0,81	4,23	486,00	0,87	
-5,69	-1,29	5,83	30,60	486,00	6,30	
8,93	8,56	12,37	64,94	1074,00	6,05	
-4,70	5,72	7,40	38,84	825,00	4,71	
16,74	-3,47	17,10	89,73	486,00	18,46	
13,11	-3,83	13,65	71,66	486,00	14,74	
3,31	7,95	8,61	45,20	1074,00	4,21	
14,31	8,99	16,90	88,70	1074,00	8,26	
5,70	-3,47	6,67	35,03	579,00	6,05	
-0,70	2,26	2,36	12,41	579,00	2,14	
1,77	-3,57	3,98	20,91	579,00	3,61	
-1,01	2,34	2,55	13,40	579,00	2,31	
82,81	-20,59	85,33	447,88	10000,00	4,48	
-1,15	0,29	1,19	6,23	10000,00	0,06	
-25,43	6,37	26,22	137,61	10000,00	1,38	
29,84	36,73	47,33	248,41	10000,00	2,48	