

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF POWER ENGINEERING AND ECOLOGY

**PROPOJENÍ ELEKTROENERGETICKÝCH  
ZDROJŮ V PLZNI – OSTROVNÍ PROVOZ**  
CONNECTION OF ELECTRIC POWER SOURCES  
IN CITY OF PILSEN – ISLAND PERFORMANCE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. VÁCLAV MUŽÍK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Prof. Ing. ZDENĚK VOSTRACKÝ, DrSc., dr. h. c.**

PLZEŇ 2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav MUŽÍK**  
Osobní číslo: **E12N0121P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Propojení elektroenergetických zdrojů v Plzni**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zpracujte energetickou bilanci v oblasti Plzně s ohledem na ostrovní režim.
2. Proveďte výpočet ampacity současných vedení v zamýšleném propojení Plzeňské energetiky a Plzeňské teplárenské.
3. Analyzujte síť s ohledem na ostrovní provoz v přechodném a trvalém stavu.
4. Navrhněte optimální provoz a konkrétní postupy pro ostrovní režim.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


1. Kodexy přenosové a distribuční soustavy
2. Petr Toman, Jiří Drápela, Stanislav Mišák, Jaroslava Orságová, Martin Paar, David Topolánek a kol.: Provoz distribučních soustav, ISBN 978-80-01-04935-8
3. Vokurka, S.: Výzkumné zprávy ČEZ a PRE
4. Referáty CIGRE a konference
5. Literatura: Elektroenergetika

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Zdeněk Vostracký, DrSc., dr. h. c.  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013  
Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2014

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



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

V Plzni dne 14. října 2013

## Abstrakt

Následující text představuje diplomovou práci na téma propojení elektroenergetických zdrojů v Plzni a detailně se zabývá problematikou ostrovního provozu. První část obsahuje spíše teoretické informace k pochopení souvislostí, definování ostrovního provozu a problému řešeného v diplomové práci. Dále je řešena problematika propojení zdroje prvního se zdrojem druhým na úrovni 110 kV za účelem napájení vlastní spotřeby pro rozběh výroby elektrické energie. Následující kapitola řeší výpočet parametrů vedení a ostatních prvků, ale také přechodové jevy, které v průběhu spínání vznikají, na konci je také nastíněna problematika modelování přechodových jevů a provozu. Dále se práce krátce zastavuje u rozboru ampacity a potenciálního využití při výpočtech. Následuje otázka řešení kvality elektrické energie a to především s ohledem na frekvenci a bilanci činných výkonů. Další částí práce je detailní analýza spotřeby a výroby na území města Plzně a okolí, která vyústí do pomyslného vrcholu práce – modelování přechodových jevů při spínacích procesech a modelování provozu ostrovního režimu. Závěrem je diskutován výsledek, zamyšlení nad průběhem práce a nastínění možného pokračování.

## Klíčová slova

Ostrovní provoz, propojení zdrojů, ampacita, vlastní spotřeba, provozní parametry, přechodové jevy, modelování, Dynast, PowerWorld, bilance činných výkonů, regulace frekvence

## Abstract

Mužík, Václav. *Connection of electric power sources in city of Pilsen*

Following thesis represents master's thesis study of connection of electric power sources in city of Pilsen more focused on island performance. First part contains more likely theoretical information to understand the context, to define island performance and the problem solved in this master's thesis. Next part deals with issues of connection between the first and second power source on voltage level 110 kV to provide power supply for starting up the second power source. Following chapter solves the calculation of operating parameters of transmission lines and other parts of the transmission and distribution and also deals with transient responses that occur during the switching in the transmission system, in the end of chapter are mentioned modern approaches to modelling in electrical engineering. The thesis stops for few pages to solve ampacity – theoretically and flows in to decision if ampacity can be used in this case. Next is the question about quality of electrical energy, specially focused on frequency and performance balance. Following chapter shows a detailed analysis of generation and consumption of electrical energy in city of Pilsen and flows in to an imaginary top of this thesis – modelling of transient responses during connecting the power sources and modelling the island performance under normal operation. In the end of this thesis is discussed the result, progress of the work and possible future of this topic – island performance.

## Keywords

Island performance, connection of power sources, ampacity, self-consumption, operating parameters, transient responses, modelling, Dynast, PowerWorld, performance balance, regulation of frequency

## Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma „Propojení elektroenergetických zdrojů v Plzni“ vypracoval samostatně pod vedením pana Prof. Ing. Zdeňka Vostrackého, DrSc., dr. h. c.. Při tvorbě jsem používal odbornou literaturu uvedenou v seznamu.

Dále také prohlašuji, že veškerý software, který byl použit k vypracování této diplomové práce, je legální a jeho použití odpovídá používané licenci.

.....

Václav Mužík

12. května 2014

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Prof. Ing. Zdeňkovi Vostrackému, DrSc., dr. h. c. a Ing. Aleši Krutinovi za ochotnou a nadšenou pomoc při vytváření této práce, jejich volný čas věnovaný konzultacím a rady pro tvorbu tohoto dokumentu.

Dále děkuji všem odborníkům z praxe za jejich pomoc při řešení praktických problémů.

Také bych chtěl poděkovat rodině, přátelům a blízkým za jejich podporu při studiu.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>10</b>
1.1	Členění práce .....	10
	Seznam obrázků .....	12
	Seznam tabulek.....	14
	Seznam symbolů.....	15
<b>2</b>	<b>Ostrovní provoz</b> .....	<b>17</b>
2.1	Technická definice.....	17
2.2	Propojení elektroenergetických zdrojů .....	17
2.3	Normativní přístup .....	18
2.3.1	Norma ČSN EN 50 160 .....	18
2.3.2	Norma ČSN 60-909-0.....	18
2.3.3	Další normy a zákony.....	18
2.3.4	Kodex přenosové soustavy .....	19
2.3.5	Ostrovní provoz jako podpůrná služba ČEPS.....	19
2.4	Přechod do provozu v ostrovním provozu.....	19
2.5	Rekonfigurace sítě .....	19
2.5.1	Úroveň 110 kV.....	21
2.5.2	Úroveň 22 kV.....	22
2.6	Výběr propojení PE, a.s. s PT, a.s. ....	22
2.7	Náhradní schéma .....	23
<b>3</b>	<b>Provozní stavy</b> .....	<b>31</b>
3.1	Ustálený stav .....	31
3.2	Přechodový jev .....	31
3.3	Vedení naprázdno .....	32
3.4	Do zátěže .....	33
3.5	Do zkratu .....	33
3.6	Parametry potřebné pro modelování a výpočty .....	34
3.7	Teorie výpočtů.....	35
3.8	Modelovací nástroje .....	37
3.9	Dynast .....	38
3.10	PowerWorld.....	38
<b>4</b>	<b>Kvalita elektrické energie</b> .....	<b>40</b>
4.1	Kvalita elektrické energie .....	40
4.2	Optimální rekonfigurace sítě .....	41
4.3	Vlastní spotřeba .....	41

4.4	Typy odběratelů - SZD .....	41
4.5	DDZ .....	42
4.6	Účíník.....	42
4.7	Bilance činných výkonů a regulace frekvence .....	42
4.8	Kontrola stability napětí .....	45
4.9	Výkonová rezerva.....	45
4.10	Regulace .....	46
<b>5</b>	<b>Ampacita vedení.....</b>	<b>47</b>
5.1	Ampacita – Přetížení vedení vlivem ampacity .....	47
5.2	Výpočet ampacity venkovních vedení .....	47
5.3	Změna proudové zatížitelnosti .....	48
5.4	Využití v této DP .....	49
<b>6</b>	<b>Energetická bilance.....</b>	<b>50</b>
6.1	Charakter elektrické sítě.....	50
6.2	Schéma elektrické sítě .....	50
6.3	110 kV .....	50
6.4	Varianta A.....	52
6.5	Varianta B.....	52
6.6	Varianta C – záložní vedení .....	53
6.7	22 kV .....	54
6.8	Uvažované zdroje.....	54
6.9	ELÚ III.....	54
6.10	TEPLÁRNA PLZEŇ .....	58
6.11	Analýza spotřeby .....	60
6.12	Rozdělení dle SZD .....	62
6.13	DDZ .....	62
<b>7</b>	<b>Analýza provozních stavů .....</b>	<b>64</b>
7.1	Náhradní schéma modelu v prostředí DYNAST .....	64
7.2	Popis spínání.....	65
7.3	Spínání výroby ELÚ III .....	65
7.4	Detail vedení naprázdno .....	68
7.5	Pokles napětí při spínání zátěže (Vlastní spotřeby PT) .....	70
7.6	Výpadek zátěže a vypínání .....	71
7.7	Vyhodnocení .....	74
7.8	Modelování provozu .....	74



<b>8</b>	<b>Konkrétní situace .....</b>	<b>77</b>
8.1	Situace 1.....	77
8.2	Situace 2.....	77
8.3	Situace 3.....	77
8.4	Situace 4.....	78
<b>9</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>79</b>
9.1	Zhodnocení postupu,.....	79
9.2	Zhodnocení metod .....	79
9.3	Přínosy .....	80
9.4	Možný vývoj.....	80
<b>10</b>	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>81</b>
	Seznam příloh .....	83

# 1 Úvod

Jako téma mé diplomové práce jsem si vybral propojení elektroenergetických zdrojů v Plzni. Konkrétněji řešení provozu okolí města Plzně v ostrovním režimu. Myslím, že schopnost provozovat Plzeňsko bez příspěvku zdrojů elektrické energie mimo region je technologickou „třešničkou“ a projevem jistého luxusu a dovedností. Plzeň byla vždy velmi vyspělým městem s technologickou tradicí - ať už jako kolébka knihtisku v našich zemích nebo jako světové pivovarnické město. Není náhodou, že zrovna Plzeň po nocích svítila obloukovými lampami Františka Křížíka a že v Plzni byla založena Emilem Škodou společnost Škoda.

Kde jinde by se nabízela myšlenka soběstačného systému fungujícího jako malý ostrov uprostřed Evropy. Tuto myšlenku jsem jednoduše nemohl nechat netknoutou, a proto jsem si ji vybral jako téma diplomové práce.

Cílem mého snažení bude zjistit, zda je výroba elektrické energie v Plzni schopna pokrýt spotřebu ve městě a okolí. Před samotným spuštěním ostrovního provozu se budu zabývat především spojením zdrojů elektrické energie na úrovni 110 kV a napájením vlastní spotřeby rozbíhajícího se zdroje.

## 1.1 Členění práce

V následujících 8 kapitolách rozdělují čtenáři problematiku propojení elektroenergetických zdrojů v Plzni do dvou pomyslných částí – teoretickou a praktickou, která se zabývá konkrétním modelem ostrovního provozu Plzeňska.

Nejprve se zabývám definováním samotného provozu v ostrovním režimu z technického i legislativního hlediska.

Dále popisují fungování v ostrovním provozu a jeho specifika spojená s přechodem z běžného stavu do stavu ostrovního. S tím je spojeno řešení elektrického propojení jednotlivých zdrojů na hladině 110 kV.

Další kapitola zachycuje problematiku jednotlivých provozních stavů soustavy při spouštění ostrovního režimu – do zátěže, zkratu, stavu naprázdno a také řešení přechodného jevu společně s řešením ustáleného stavu. Pro následné výpočty hovořím o potřebných parametrech pro výpočet, estimaci a modelování těchto stavů. Také zmiňuji moderní přístup k modelování a výpočtu zmíněných stavů.

Součástí teoretické části je také řešení otázky kvality elektrické energie nastolené v legislativním úvodu diplomové práce. S tímto podtématem je spojena problematika

optimální rekonfigurace sítě, vlastní spotřeba výroben, ale také odběratelů samotných, účinníku a například stability napětí.

Následující kapitola se zabývá otázkou ampacity vedení, vlivu teploty na vedení, výpočet a poznatky z dosavadního výzkumu a implementace výsledků v praxi.

Další kapitola je pomyslným úvodem do praktické části této diplomové práce. Presentuji v ní energetickou bilanci v oblasti Plzeňska, její charakter, specifika, také popis a umístění hlavních zdrojů pro potenciální ostrovní provoz.

Další kapitola vyplývá z předchozí a řeší stav propojení zdrojů, analýzu elektrických cest na úrovni 110 kV z hlediska modelování nejen přechodných a ustálených jevů, ale také z hlediska zátěže, zkratů a přetížení. Výsledkem kapitoly je výběr optimálního propojení zdrojů na úrovni 110 kV.

Závěrem práce je uvedení konkrétních situací, které mohou reálně nastat a přechod do nich. Také popisují pozitiva a rizika jednotlivých variant.

Poslední kapitola pojednává o mém osobním hodnocení postupu při tvorbě diplomové práce a použitých metod. Úplným závěrem hodnotím přínosy a možný vývoj mé práce v budoucnosti.

## Seznam obrázků

Obr. 2.1 – Schéma 110 kV a 400 kV v okolí Plzně .....	20
Obr. 2.2 – Schéma vedení 110 kV (r. 2004) .....	21
Obr. 2.3 – Gama články .....	24
Obr. 2.4 - Typy konstrukcí stožárů.....	25
Obr. 2.5 – Náhradní schéma transformátoru .....	27
Obr. 2.6 – Náhradní schéma výroby.....	29
Obr. 2.7 – Náhradní schéma spotřeby.....	30
Obr. 3.1 – Náhradní schéma obvodu – vedení naprázdno.....	32
Obr. 3.2 – Náhradní schéma obvodu – připojená zátěž.....	33
Obr. 3.3 – Náhradní schéma obvodu – třífázový zkrat.....	34
Obr. 3.4 – Náhradní schéma vedení.....	35
Obr. 3.5 – Blokové schéma částí modelačního prostředí Dynast.....	38
Obr. 3.6 - Ukázky z programu PowerWorld Simulator (převzato z webu powerworld.com)...	39
Obr. 5.1 – Proudová zatížitelnost – bezvětří (převzato viz zdroje) .....	48
Obr. 5.2 – Proudová zatížitelnost – vítr 0,6 m/s (převzato viz zdroje) .....	49
Obr. 6.1 – Schéma vedení – Varianta A .....	52
Obr. 6.2 – Schéma vedení – Varianta B .....	53
Obr. 6.3 – Schéma vedení – Varianta C .....	53
Obr. 6.4 – Schéma výroby v ELÚ III .....	58
Obr. 6.5 – Schéma výroby v PT.....	60
Obr. 6.6 – Podíl spotřeby elektrické energie .....	61
Obr. 6.7 – Porovnání výroby se spotřebou .....	61
Obr. 6.8 – Vývoj celkové spotřeby v Plzni.....	62
Obr. 6.9 – Denní diagram zatížení – spotřeba jen města.....	63
Obr. 6.10 – Denní diagram zatížení – spotřeba Plzeňska.....	63
Obr. 7.1 – Náhradní schéma modelu v prostředí Dynast .....	64
Obr. 7.2 – Celkový průběh spínání – Varianta A.....	66
Obr. 7.3 – Celkový průběh spínání – Varianta B.....	66
Obr. 7.4 – Spínací proces – Proud svorkami TG 8 – Varianta A.....	67
Obr. 7.5 – Spínací proces – Proud svorkami TG 8 – Varianta B.....	67
Obr. 7.6 – Napětí na straně 22 kV – Průběh spínání – Varianta A.....	68
Obr. 7.7 – Celkový průběh spínání – Varianta C .....	68
Obr. 7.8 – Přepětí v průběhu spínání 1206 - Varianta A .....	69
Obr. 7.9 - Přepětí v průběhu spínání 1213 - Varianta B.....	69
Obr. 7.10 - Přepětí v průběhu spínání 1202 - Varianta C.....	69

Obr. 7.11 – Pokles napětí – Varianta A .....	70
Obr. 7.12 – Pokles napětí – Varianta B .....	70
Obr. 7.13 – Pokles napětí – Varianta C .....	71
Obr. 7.14 – Napětí při výpadku zátěže – Varianta A .....	71
Obr. 7.15 – Napětí při výpadku zátěže – Varianta B .....	72
Obr. 7.16 – Proud při výpadku zátěže – Varianta A .....	72
Obr. 7.17 – Proud při výpadku zátěže – Varianta B .....	73
Obr. 7.18 – Napětí při vypínacím procesu – Varianta A .....	73
Obr. 7.19 – Proud při vypínacím procesu – Varianta A .....	74
Obr. 7.20 – Vytížení prvků 05:00 .....	75
Obr. 7.21 – Vytížení prvků 06:00 .....	75
Obr. 7.22 – Vytížení prvků 07:00 .....	75
Obr. 7.23 – Vytížení prvků 17:00 .....	76

## Seznam tabulek

Tabulka 4.1 – Způsoby regulace v závislosti na provozu .....	44
Tabulka 4.2 – Frekvenční pásma provozu .....	44
Tabulka 4.3 – Frekvenční odlehčování zátěže .....	46
Tabulka 6.1 – Parametry venkovních vedení (110 kV) .....	51
Tabulka 6.2 – Parametry vedení – Varianta A .....	52
Tabulka 6.3 – Parametry vedení – Varianta B .....	53
Tabulka 6.4 – Parametry vedení – Varianta C .....	54
Tabulka 6.5 – Parametry TG 8 .....	55
Tabulka 6.6 – Parametry TG 9 .....	55
Tabulka 6.7 – Parametry TG 10 .....	55
Tabulka 6.8 – Parametry transformace 6/22 kV .....	56
Tabulka 6.9 – Turbogenerátorů PT .....	59
Tabulka 6.10 – Parametry transformace 10,5/110 kV .....	59
Tabulka 6.11 – Parametry vlastní spotřeby PT .....	59

## Seznam symbolů

Značka	Jednotka	Význam
$\lambda$	[m]	Vlnová délka
$c$	[m/s]	Rychlost světla
$f$	[Hz]	Frekvence
$R$	[ $\Omega$ ]	Odpor
$L$	[H]	Indukčnost
$C$	[F]	Kapacita
$G$	[S]	Svod
$L_p$	[H]	Provozní indukčnost
$C_p$	[F]	Provozní kapacita
$\omega$	[rad s <sup>-1</sup> ]	Úhlová rychlost
$T$	[ $\Omega \cdot \frac{mm^2}{m}$ ]	Odpor měrný
$l$	[m]	Délka
$S$	[mm <sup>2</sup> ]	Obsah
$t$	[s]	Čas
$k_g$	[-]	Vliv okolní teploty
$k_s$	[-]	Vliv skinefektu
$k_e$	[-]	Vliv kroucení vodičů
$k_p$	[-]	Vliv průhybu
$c$	[ $\frac{kJ}{kg} \cdot K$ ]	Tepelná kapacita
$u_k$	[%]	Napětí nakrátko
$i_0$	[%]	Napětí naprázdno
$U$	[V]	Napětí
$S$	[VA]	Zdánlivý výkon
$\Delta P_0$	[% , W]	Činné ztráty naprázdno
$\Delta P_k$	[% , W]	Činné ztráty nakrátko
$Z$	[ $\Omega$ ]	Impedance
$X$	[ $\Omega$ ]	Reaktance
$Y_g$	[S]	Admitance
$I_k$	[A]	Zkratový proud

Značka	Jednotka	Význam
$x'_d$	[ $\Omega$ ]	Přechodná reaktance
$S_k$	[VA]	Zkratový výkon
N	[-]	Počet závitů
I	[A]	Proud
n	[-]	Počet svazků
$\cos \varphi$	[-]	Účinník
$P_G$	[W]	Výkon generovaný
$P_S$	[W]	Výkon spotřebovaný
$P_Z$	[W]	Výkon ztrátový
$\Omega$	[J]	Úhlová rychlost rotoru
$N_T$	[W]	Mechanický výkon turbín
G	[W]	Regulační odchylka
$P_j$	[W]	Joulovy ztráty
$P_s$	[W]	Ohřev slunečním zářením
$P_c$	[W]	Ohřev korónou
$m_c$	[kg]	Hmotnost
$P_\omega$	[W]	Ochlazení výparem vody
$P_r$	[W]	Ochlazení tepelným zářením
$P_k$	[W]	Ochlazení prouděním vzduchu



## 2 Ostrovní provoz

Provoz v ostrovním režimu je velmi specifickým provozem ať už z hlediska technického, ale i z hlediska legislativního. V České republice se s tímto stavem energetického systému nesetkáváme příliš běžně, a proto bych rád na několika následujících řádcích vydefinoval samotný pojem z obou hledisek. Tato kapitola také pojednává o přechodu do ostrovního režimu a činnostech spojených s tímto přechodem.

### 2.1 Technická definice

Ostrovní provoz je schopnost elektroenergetického systému pokrývat nezávisle na provozu a dodávce elektrické energie z nadřazené soustavy (ať už distribuční nebo přenosové) spotřebu.

S ostrovním provozem v určitém slova smyslu se setkáváme u elektráren pracujících jen do vlastní spotřeby, tedy nedodávající elektrickou energii do sítě. Z tohoto hlediska je ostrovní provoz na stanoveném území rozšířením výroby do vlastní spotřeby. Při ostrovním provozu na určitém území může být využita část distribuční i přenosové soustavy.

Z této definice tedy vyplývá, že vždy záleží na vztažných podmínkách, pokud dojde k rozpadu soustavy UCTE, může ostrov tvořit Česká republika nebo Maďarsko, dojde-li k rozpadu naší přenosové soustavy, může se rozpadnout na několik regionálních ostrovů – jedním z nich může být právě ostrov města Plzně a okolí - Plzeňska.

### 2.2 Propojení elektroenergetických zdrojů

Na území města Plzně se nacházejí dva klasické tepelné zdroje elektrické energie spalující především hnědé uhlí – elektrárna společnosti Plzeňská energetika, a.s. (stále ještě historicky označovaná jako ELÚ III) a Plzeňská teplárenská, a.s. (dále PT).

Nejproblematictější stavem z hlediska přechodu do ostrovního provozu se jeví řídky vyskytující se situace, kdy je PT mimo provoz, dojde k výpadku dodávky elektrické energie a je nutný přechod do ostrovního režimu. PT bohužel nedokáže začít vyrábět elektrickou energii „ze tmy“, tedy ze stavu, kdy není kryta počáteční vlastní spotřeba elektrárny. V tuto chvíli je nutno připojit ELÚ III k PT a napájet ji po dobu než dokáže PT hradit vlastní spotřebu sama.

## 2.3 Normativní přístup

V následujících několika subkapitolách rozvedu přístup jednotlivých norem k problematice ostrovního provozu. V některých se pojem vyskytuje přímo a z některých selektuji informace týkající se kvality elektrické energie.

### 2.3.1 Norma ČSN EN 50 160

Tato norma pojednává obecně o kvalitě elektrické energie v distribuční soustavě. Definuje, hodnoty napětí, při kterých je efektivní soustavu držet v chodu. Ačkoliv v ní není ostrovní provoz zmíněn přímo, využiji ji pro kontrolu kvality elektrické energie v průběhu spínání vlastní spotřeby (pokles napětí) a v určení provozních podmínek.

### 2.3.2 Norma ČSN 60-909-0

Tato norma definuje zkratové poměry. Jelikož se tato diplomová pojednává o spojení dvou zdrojů, musím uvažovat i možnost zkratu při spojení zdrojů. Zkrat může nastat ve stavu beznapěťovém - povětrností vlivy.

Oproti stavu „normálnímu“, kdy v případě zkratu drží provoz systému zbytek elektrické sítě, se zde zapíná jeden zdroj přímo do spotřeby, popřípadě jiného zdroje. Vypínání zkratu přímo za elektrárnou je nejen fyzikálně velmi nepříjemná záležitost, ale také velmi ohrožuje provozuschopnost. Pokud se v soustavě nalézá jediný zdroj, nelze si dovolit jeho ztrátu provozem do zkratu popřípadě neschopností rychlé odezvy dovolit.

### 2.3.3 Další normy a zákony

- Energetický zákon 458/2000 Sb.
  - o Energetický zákon je jakýmsi kodexem provozu energetického kodexu.
- Vyhláška 540/2005 Sb.
  - o Tato vyhláška pojednává o kvalitě elektrické energie. Specifikuje ji blíže než norma ČSN EN 51 160.
- PPDS
  - o Pravidla provozování distribuční soustavy určují podmínky, za jakých lze distribuční soustavu provozovat, kdy jsou splněny podmínky pro připojení do distribuční soustavy atd.

### 2.3.4 Kodex přenosové soustavy

Podle kodexu přenosové soustavy je ostrovní provoz definován jako stabilní, mimořádný provoz části elektrizační soustavy (po jejich oddělení od ostatní soustavy jako důsledek poruchy, do které může pracovat několik zdrojů (bloků, elektráren). Lze tedy říci, že ostrovní provoz vzniká většinou při poruše, kdy postižená část ztrácí synchronní spojení se zbytkem soustavy a pracuje asynchronně (s frekvencí odlišnou od jmenovité). [3]

### 2.3.5 Ostrovní provoz jako podpůrná služba ČEPS

Společnost ČEPS, a.s. definuje schopnost ostrovního provozu jako jednu z kategorií podpůrných služeb (PpS). Na svých webových stránkách uvádí, že „Ostrovní provoz (OP) je schopnost elektrárenského bloku pracovat do vydělené části vnější sítě, tzv. ostrova. Ostrovní provoz se vyznačuje velkými nároky na regulační schopnosti bloku. Tato schopnost je nezbytná pro předcházení a řešení stavu nouze. Vyznačuje se značnými změnami frekvence a napětí v souvislosti s tím, že blok pracuje do izolované části soustavy.“ [10]

Dále uvádí, že požadavky na schopnosti bloku, který má být provozován v ostrovním provozu, jsou:

- Přechod do ostrovního provozu
- Ostrovní provoz
- Opětné připojení ostrova k soustavě
- Dostupnost služby

## 2.4 Přechod do provozu v ostrovním provozu

Přechod do ostrovního provozu je předcházen a spojen s mnoha činnostmi, bez kterých by tato myšlenka zůstala pouhou ideou, a energetický systém by se okamžitě rozpadl. V následujících subkapitolách řeším spojování zdrojů, najíždění a rekonfigurace sítí před přechodem do ostrovního režimu.

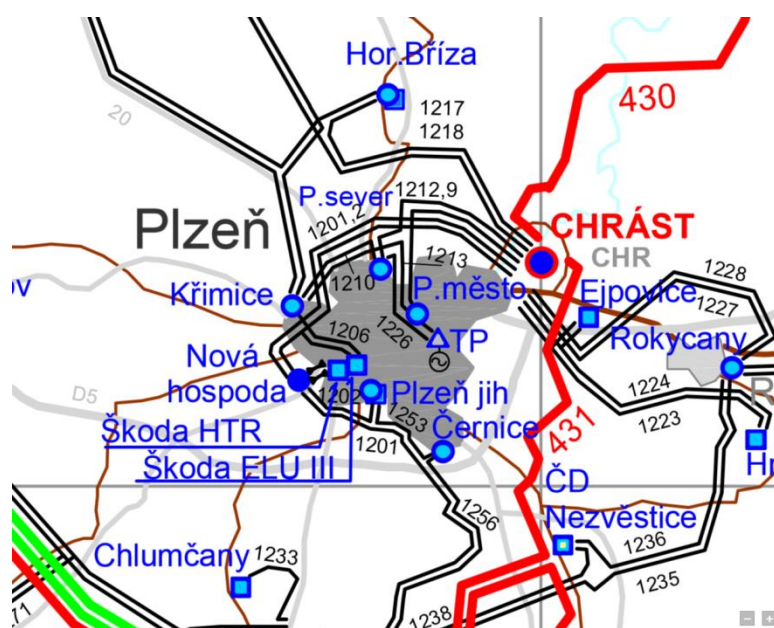
## 2.5 Rekonfigurace sítě

V případě přechodu systému do provozu v ostrovním režimu je nejdříve ze všeho nutno uvést síť do konfigurace vhodné pro provoz v tomto režimu. V diplomové práci je uvažována lokalizace iniciační události mimo prostředí „ostrova“. Důvod pro přechod do ostrovního

režimu vyvolaný událostí uvnitř systému by vedl k odpojení daného zdroje, spotřeby či jiného prvku. Vznik potřeby ostrovního provozu založený na vnitřní chybě systému je tedy nejen nepravděpodobný, ale v praxi by se řešil zmíněným postupem.

Rekonfigurací sítě pro uvedení do ostrovního režimu rozumíme odepnutí daného úseku – města či objektu od všech vnějších zdrojů, které danou oblast napájí. V ČR se setkáváme se zásobováním elektrickou energií ze strany přenosové soustavy (400 kV, 220 kV a ojediněle 110 kV) do soustavy distribuční (110 kV a níže) v podobě předání na velkých rozvodnách, kde dojde k transformaci z napětí 400 kV na hodnoty distribuční soustavy. Ve většině případů jsou velké aglomerace napájeny z těchto rozveden na hladině 110 kV do menších rozveden přímo ve městě, kde dochází k transformaci na nižší hodnoty napětí 22 kV a níže (0,4 kV). Před zahájením samotného ostrovního provozu musí dojít k odpojení galvanického spojení se zbytkem distribuční soustavy, popřípadě přenosové soustavy na všech napěťových hladinách zajišťující přívody elektrické energie do dané oblasti.

V případě města Plzně jsou to přívody do rozvodny Chrást (400 kV – linky 430 a 431) napájející sever města Plzně a okolí a rozvodny Přeštice (400 kV – linky 431, 432 a 442, 220 kV – linky 216, 221 a 222) napájející jih Plzně a okolí. Zde dochází k přechodu z přenosové soustavy (ČEPS a.s.) na soustavu distribuční (ČEZ a.s.) a transformaci na úroveň 110 kV.

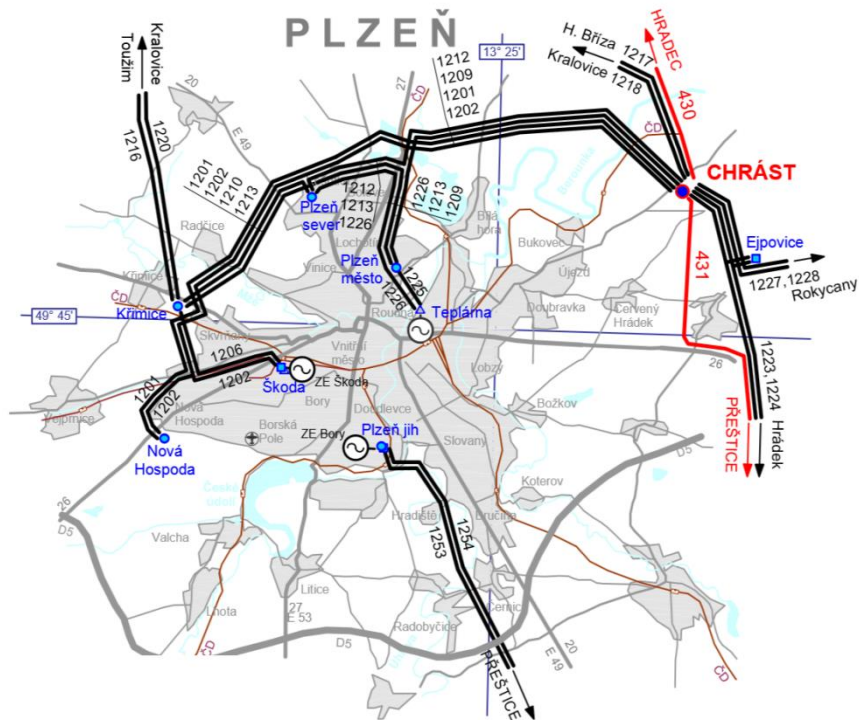


Obr. 2.1 – Schéma 110 kV a 400 kV v okolí Plzně

Pomocí linek 1201, 1202, 1209, 1212 vedoucích z rozvodny Chrást je postupně zajištěna dodávka elektrické energie do rozveden Plzeň město, Plzeň sever, Křimice, Nová Hospoda, Škoda. Rozvodna Chrást může také zajišťovat dodávku elektrické energie na RZ Plzeň-jih a Černice díky propojení 1201 a 1202 přes RZ Nová hospoda. Z rozvodny Přeštice

je na úrovni 110 kV prostřednictvím linek 1256 a 1201 zásobována elektrickou energií rozvodna Plzeň jih a Černice.

Předchozí i následující obrázek ilustruje rozložení vedení 110 kV kolem města Plzně a elektrické stanice, do kterých vedení ústí. Vzhledem k datu tvorby mapy 2004 je nutno uvažovat změnu a to především v podobě výstavby rozvodny Černice, která se nachází na jihovýchodním předměstí Plzně a její propojení s RZ Plzeň-jih.



Obr. 2.2 – Schéma vedení 110 kV (r. 2004)

### 2.5.1 Úroveň 110 kV

Na úrovni 110 kV je alespoň z počátku provoz z hlediska propojení elektroenergetických zdrojů technicky jednodušší. Nepopíratelnou výhodou je schopnost dálkového ovládání. Při zahrnutí do vypínacího plánu v případě přechodu do ostrovního režimu si lze soustavu předem připravit. Lze postupně odpojit od zbytku elektrizační soustavy, odepnout spotřebu a připravit vodivou cestu z jednoho zdroje do druhého. V případě uvažování redundance se mohou i na území Plzeňska připravit cesty dvě pro případ poruchy.

Dalším pozitivem je možnost odepnutí spotřeby na úrovni 22 kV na rozvodných místech, tedy k propojení dochází pouze zdroje s druhým zdrojem. V tomto případě odpadá testování na zapojování s uvažováním spotřeby. Výhodou je také fakt, že při úspěšném rozjezdu obou zdrojů elektrické energie lze postupně rekonfigurovat síť 110 kV a tím

obnovovat dodávku v určitých částech města. Dalším nesporným pozitivem je větší přenosová kapacita vedení 110 kV oproti 22 kV. [20]

### 2.5.2 Úroveň 22 kV

Charakteristika sítí 22 kV se od vyšších napěťových hladin, především 110 kV liší v mnohem větším množství vodivých cest mezi dvěma body. Z toho vyplývá, že lze velmi dobře nalézt alternativní cestu při poruchových stavech nebo řešení propojení dvou míst. Velkou nevýhodou však zůstává neschopnost dálkového ovládní většiny uzlů. V praxi to tedy znamená, že musí přijet pracovník energetických závodů a manipulaci musí provést ručně. To vidím například v průběhu noci nebo různých povětrnostních podmínkách jako zásadní překážku. S manipulacemi je také spojena časová prodleva, která z hlediska norem a stupně zajištění dodávky elektrické energie musí být co nejkratší.

Vzhledem k výkonům nutným k rozběhu objektu PT (řešeno dále v práci) nebudu uvažovat spojení zdrojů na úrovni 22 kV.

### 2.6 Výběr propojení PE, a.s. s PT, a.s.

Z předchozích subkapitol plyne, že výběr vodivé cesty pro propojení elektroenergetických zdrojů je z důvodů manipulovatelnosti, spolehlivosti a také hlediska elektrického reálný na úrovni 110 kV.

Nejnutnější podmínkou vedení pro účely spojení zdrojů a provoz v ostrovním režimu je schopnost přenášet potřebný výkon – tedy dostatečná kapacita nejen vedení, ale také všech pomocných zařízení jako například vypínače, transformátory, ochrany nebo obslužná zařízení. Pro případ potřeby přechodu do režimu ostrovního provozu je nutno všechna zařízení předem připravit a dimenzovat pro tyto účely.

Postup kontroly je následující. Vedení na obou napěťových hladinách musí být otestována na průběh přechodného děje - prudké změny napětí a proudů, možnost selhání některých prvků vedení. Dále musí být otestována na chod v ustáleném stavu pro výběr optimální cesty. Z důvodu zajištění stability dodávky, bezpečnosti a spolehlivosti provozu nemohou tyto dva stavy být testovány v reálném provozu.

Pro veškerou simulaci provozních stavů využívám moderních simulačních prostředí Dynast a PowerWorld, které na problematiku přechodových jevů a ustálených stavů nahlíží velmi komplexně a odpovídají realitě.

Výběr ideálního vedení pro propojení elektroenergetických zdrojů pak proběhne na základě výsledků, které určí, jaké vedení dokáže přenést výkon při nejmenších ztrátách, spolehlivě a ekonomicky efektivně.

## 2.7 Náhradní schéma

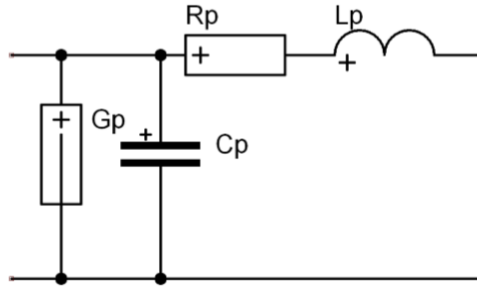
Pro simulace přechodných a ustálených stavů je nutné fyzické vedení a uspořádání obvodu převést do náhradního schématu, které reprezentuje jeho elektrické vlastnosti.

K modelům vedení přistupujeme z několika hledisek, zda jsou venkovní či kabelová, krátká nebo dlouhá nebo zda se řeší symetrický a naopak nesymetrický problém. Vzhledem k provozu na různých napěťových hladinách, požadované přesnosti a rychlosti nebo analýze specifických fyzikálních vlastností volíme různé druhy modelů. Základními modely jsou pasivní dvojbrany. Podle topologie se dělí na články T,  $\Pi$ ,  $\Gamma$  (levý a pravý) T atd. Prvky ve člancích pak reprezentují parametry modelovaného vedení. [1]

Každé vedení je určeno jeho charakteristickými vlastnostmi popsanými následujícími veličinami:

- Indukčnost
  - o Vlastní vnější
  - o Vlastní vnitřní
  - o Vzájemnou
- Kapacita
  - o Proti zemi
  - o Mezifázová
- Odpor
- Svod

Vedení modelujeme pomocí dvojbranů. Vzhledem k uvažování délek vedení do 20 km volím jako ideální náhradní schéma v podobě  $\Gamma$ -článku. Přesnost výpočtů je dostatečná pro vedení délky 100 km venkovního typu a do 25 km kabelového typu vvn. Tento model je vhodný pro krátká vedení bez potřeby vnitřní analýzy a při řešení symetrického problému.



Obr. 2.3 – Gama článek

Na obrázku je vidět zvolený dvojbřan.  $R_p$  reprezentuje náhradní provozní činný odpor,  $L_p$  náhradní provozní indukčnost,  $C_p$  náhradní provozní kapacitu a  $G_p$  náhradní provozní svod. Podmínky pro využití modelů se soustředěnými parametry - dvojbřany jsou následující:

- Délka vlny signálu je mnohem větší než délka samotného vedení

$$\lambda = \frac{c}{f} [m] \quad (2.8-1)$$

- Symetrické vedení (nebo transponované)
- Pasivní parametry (R,L,C,G) jsou konstantní
- Sinusový průběh proud a napětí

Náhradní provozní indukčnost vedení je složena ze složek vlastní vnější, vnitřní a vzájemné indukčnosti. Je dána vztahem

$$L_p = 0,46 \cdot \log \frac{d}{r} + 0,05 [mH/km] \quad (2.8-2)$$

$$L_p \approx 1 mH/km \quad (2.8-3)$$

ze kterého plyne, že je indukčnost dána především konstrukčním uspořádáním zkoumaného vedení.

Náhradní provozní kapacita je opět složena ze dvou složek – kapacity mezifázové a proti zemi. Výsledný vztah pro výpočet náhradní provozní kapacity je

$$C_p = \frac{1}{(D - D')} \quad (2.8-4)$$



kde

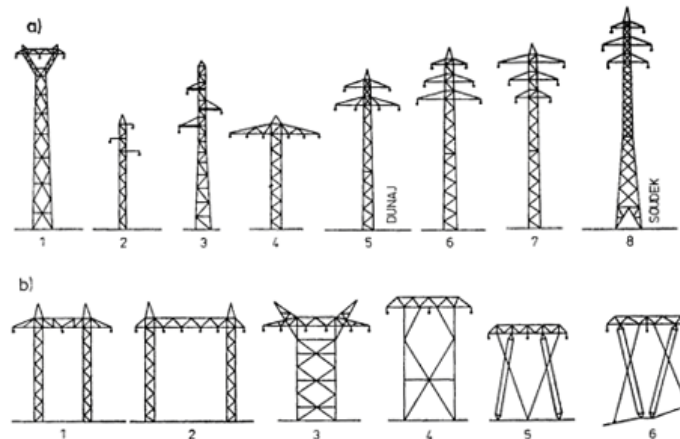
$$D' = 41,4 \cdot 10^6 \cdot \log \frac{\sqrt{(2h_{stř})^2 + d_{stř}^2}}{d_{stř}} \quad (2.8-5)$$

a

$$D = 41,4 \cdot 10^6 \cdot \log \frac{2 \cdot h_{stř}}{r_{stř}} \quad (2.8-6)$$

$$C_p \approx 10 \text{ nF/km} \quad (2.8-7)$$

Analogicky s provozní indukčností i zde hraje roli konstrukční uspořádání vedení – například typ vedení (viz obrázek).



Obr. 2.4 - Typy konstrukcí stožárů

Náhradní provozní činný odpor je dán fyzikálními vlastnostmi vodičů – průřez, délka a vlastnosti použitého materiálu. Při výpočtu se zahrnují i fyzikální vlivy jako teplota okolí, vliv kroucení vodičů, průhyb vodiče dle řetězovky, vliv skin efektu, volba sazkového vodiče – dva druhy materiálu a další. Základní hodnota je určena vztahem

$$R_{ss} = \frac{\rho \cdot l}{S} [\Omega] \quad (2.8-8)$$

kde  $\rho$  je rezistivita materiálu pro 20°C,  $l$  reprezentuje délky vodiče a  $S$  průřez použitého materiálu. Přesný výpočet  $R_p$  vychází ze vztahu

$$R = R_{ss} \cdot k_{\vartheta} \cdot k_S \cdot k_e \cdot k_p \quad (2.8-9)$$

kde  $R_{SS}$  je výsledný odpor s uvažováním svazkového vodiče,  $k_{\vartheta}$  reprezentuje vliv okolní teploty,  $k_S$  vliv skinefektu,  $k_e$  vliv kroucení vodičů a  $k_p$  průhyb vodiče.

Náhradní provozní svod  $G_p$  respektuje fyzikální okolnosti jako

- Vzdálenost vodič od sebe a od konstrukce stožáru
- Tvar, materiál a čistota izolátoru
- Velikost provozovaného napětí
- Vlhkost vzduchu odhadovaná nadmořskou výškou
- Poloměr a nerovnosti povrchu vodiče

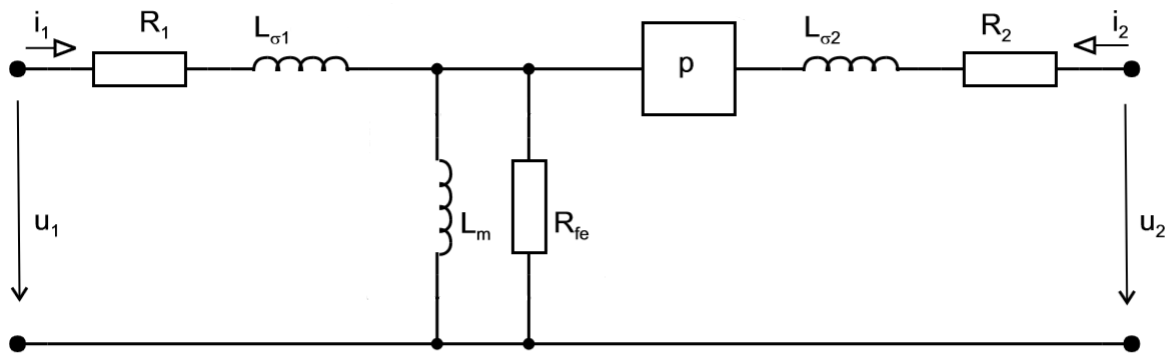
Hodnoty svodu jsou velmi specifické pro každé vedení a velmi obtížně určitelné pomocí obecných vztahů. Hodnoty vycházejí spíše z empirických poznatků a jsou určeny tabulkami pro konkrétní druh vedení.

Hodnoty provozních parametrů u kabelových vedení jsou v případě provozního činného odporu a indukčnosti velmi podobná jako u venkovních vedení. Znatelný rozdíl je u provozní kapacity, která má oproti venkovnímu vedení vyšší hodnoty. Skutečnost je dána vztahem

$$C_p = C_0 = \frac{0,0242 \cdot \varepsilon_r}{\log \frac{R}{r}} [nF/km] \quad (2.8-10)$$

Z důvodu nedostupnosti parametrů reálných vedení v okolí Plzeňska volím data z obecných tabulek pro jednotlivá vedení. Vzhledem ke krátké vzdálenosti vedení do 20 km soudím, že rozdíl mezi skutečnou a tabulkovou hodnotou se na výsledku příliš neprojeví. Pro základní popis skutečnosti je tedy dostačující. Tabulkové hodnoty jsou pro úrovně 110 kV i 22 kV, kabelové i venkovní vedení. [7] [8]

Vzhledem k faktu, že při propojování energetického systému se využívá různých napěťových hladin, je nutné použití transformátorů. Transformátor je elektrický netočivý stroj, který lze popisovat náhradním schématem. Náhradní schéma je tvořeno kombinací R,L prvků, jejichž vlastnosti musí být zahrnuty do výpočtů celé sítě – mají na ní také vliv. V případě provozu jsou využívány transformátory energetické (blokové – vývod elektrické energie z elektrárny) a distribuční (využití především k transformaci z vvn na vn a popřípadě dále na nn). Transformátor se obecně nahrazuje následujícím schématem



Obr. 2.5 – Náhradní schéma transformátoru (převzato z [12])

Toto náhradní schéma popisuje chod transformátoru v běžných režimech a lze pomocí něho zachytit charakteristické průběhy a chování tohoto stroje. Předpokladem je použití v síti 50 Hz při zatíženích daných výrobcem na štítku transformátoru.

Odpory  $R_1$  a  $R_2$  popisují odpory primárního a sekundárního vinutí,  $L_{\sigma 1}$  a  $L_{\sigma 2}$  reprezentují rozptylové indukčnosti vinutí,  $L_m$  je hlavní (magnetizační) indukčnost a  $R_{Fe}$  nahrazuje ztráty v železe transformátoru. Parametr  $p$  reprezentuje převod transformátoru a v tomto modelu tedy není nutno přepočítávat hodnoty sekundárního vinutí na vinutí primární.

Málokdy jsou však hodnoty prvků v náhradním schématu známy od výrobce. Ve většině případů jsou reprezentovány štítkovými hodnotami, pomocí kterých lze prvky dopočítat. Jako základní parametry štítku jsou

- $u_k$  - Napětí nakrátko [%]
- $i_0$  - Proud naprázdno [%]
- $U_N$  - Jmenovité napětí [V]
- $S_N$  - Jmenovitý výkon [VA]
- $\Delta P_0$  - Ztráty naprázdno [W, %]
- $\Delta P_K$  - Ztráty nakrátko [W, %]

Jednotlivé prvky náhradního schématu pak lze přepočítat dle následujících vztahů

$$R_{1,2} = \left(\frac{\Delta P_K}{100}\right) \cdot \left(\frac{U_N^2}{S_N}\right) [\Omega] \quad (2.8-11)$$

$$Z_{1,2} = \left(\frac{U_K}{100}\right) \cdot \left(\frac{U_N^2}{S_N}\right) [\Omega] \quad (2.8-12)$$

$$X_{\sigma 1, \sigma 2} = \sqrt{(Z_K^2 - R_K^2)} [\Omega] \quad (2.8-13)$$

$$L_{\sigma 1, \sigma 2} = \frac{X_s}{\omega} [H] \quad (2.8-14)$$

$$G_{Fe} = \left( \frac{\Delta P_0}{100} \right) \cdot \left( \frac{S_N}{U_N^2} \right) [S] \quad (2.8-15)$$

$$R_{Fe} = \frac{1}{G_{Fe}} [\Omega] \quad (2.8-16)$$

$$Y_g = \left( \frac{I_0}{100} \right) \cdot \left( \frac{S_N}{U_N^2} \right) [S] \quad (2.8-17)$$

$$X_m = \frac{1}{\sqrt{(Y_g^2 - G_{Fe}^2)}} [\Omega] \quad (2.8-18)$$

$$L_m = \frac{X_m}{\omega} [H] \quad (2.8-19)$$

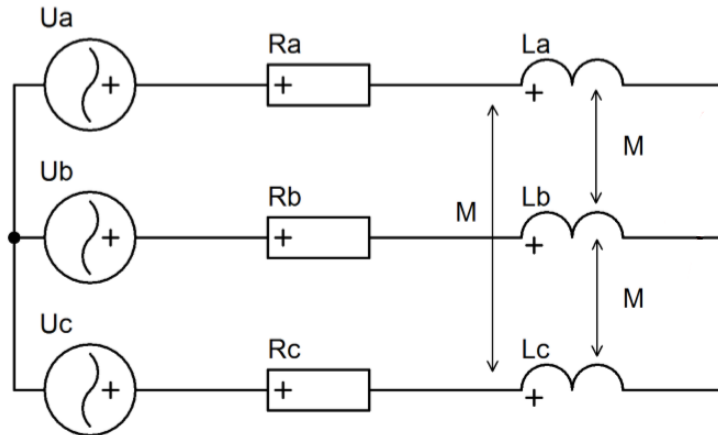
Dalším prvkem v celkovém náhradním schématu je samotná výroba elektrické energie, která je nejčastěji vyjádřena náhradním schématem generátoru, respektive alternátoru. Toto nahrazení lze použít za respektování následujících předpokladů:

- Konstantní rychlost točivých strojů, také frekvence elektrických veličin
- Použití soustředěných parametrů (při 50 Hz lze použít pro základní popis reality)
- Zjednodušené respektování rotorových vinutí (především tlum)cích obvodů
- Lineární charakter všech prvků (zanedbání sycení)
- Sinusové rozložení magnetického napětí ve vzduchové mezeře
- Symetrické uspořádání statorů bez vlivu drážkování

Vzhledem k časové konstantě určené poměrem  $L / R$  má smysl vyšetřovat přechodové děje vyšetřovat v rozmezí 0,01 – 0,2 sekundy. Veškeré aktivní parametry lze odvodit od časových průběhů proudů. Pro potřeby této diplomové práce je použití tohoto způsobu výpočtu optimální z důvodu rozhodování, zda průběhy vyhoví podmínkám daným normami, které mají relativně velkou toleranci, není tedy potřeba řešení s přesností desetin až setin procent.

[8] [12]

Zdroj je tedy nahrazen následujícím schématem



Obr. 2.6 – Náhradní schéma výroby

Kde  $U_a, U_b, U_c$  jsou tvrdé zdroje napětí,  $R_a, R_b, R_c$  reprezentují odpory vinutí a  $L_a, L_b, L_c$  jsou indukčnosti vinutí. V praxi jsou hodnoty prvků jednotlivých vinutí velmi obtížně zjistitelné. Pro základní potřeby a popis skutečnosti se udávají následující parametry:

- $D/Y$  - Zapojení zdroje hvězda / trojúhelník [-]
- $U_N$  - Jmenovité napětí [V]
- $S_{ks}$  - Zkratový výkon [MVA]
- $f$  - Frekvence [Hz]

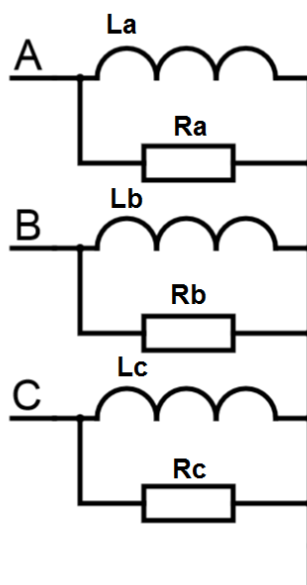
K hodnotám odporů a indukčností se pak lze dostat pomocí následujících vztahů

$$Z_k = \frac{U_N^2}{S_{ks}} [\Omega] \quad (2.8-20)$$

$$L_k = \frac{Z_k}{2\pi f} [H] \quad (2.8-21)$$

Hodnota odporu se obvykle pohybuje kolem  $1 \cdot 10^{-6} \Omega$ . [8]

Jako poslední zbývá definovat náhradní schéma spotřeby. Vzhledem k uvažovanému charakteru spotřeby zdrojů (nejdříve Teplárna a pak zbytek spotřeby města Plzně) a předpokladu vykompenzované elektrické sítě, předpokládám spíše převahu induktivní zátěže a tedy náhradu spotřeby schématem tvořeným prvky R a L. [8]



Obr. 2.7 – Náhradní schéma spotřeby

Zátěž je dána hodnotami

- $P$  - Činný odběr zátěže [kW]
- $Q$  - Jalový odběr zátěže [kVAr]
- $U_N$  - Jmenovité napětí zátěže [kV]
- $f$  - Jmenovitá frekvence sítě [Hz]

Odpory a indukčnosti jsou pak vyjádřeny těmito vztahy

$$L_z = \frac{1000 \cdot U_N^2}{2\pi f Q} [H] \quad (2.8-22)$$

$$R_z = \frac{1000 \cdot U_N^2}{P} [\Omega] \quad (2.8-23)$$

## 3 Provozní stavy

Ostrovní provoz energetického systému je výsledkem několika procesů. Samotnému cíli předchází množství potenciálních stavů. Stejně tak se v případě potřeby může ostrovní provoz rozjíždět do mnoha předem neznámých stavů, na které musí být velmi flexibilně reagováno, jinak dojde ke zhroucení snahy o provoz do ostrova. V této kapitole jsou různé provozní stavy diskutovány včetně zahrnutí spojení elektroenergetických zdrojů.

### 3.1 Ustálený stav

Jak bylo řečeno v úvodu této kapitoly, ostrovní provoz je již výsledkem snažení dispečerského řízení a směrnic, které do tohoto stavu navádějí. V případě propojení velkých zdrojů elektrické energie za účelem provozu v ostrovním režimu uvažujeme elektrické propojení na úrovni 110 kV. Ustáleným stavem rozumíme okamžik, kdy je zátěž konstantní a dojde k odeznění všech přechodových jevů. Ustálený stav je mnohdy teoretickou záležitostí, protože v praxi dochází k neustálým změnám.

### 3.2 Přechodový jev

Je obecně známo, že přechodový jev nastává v časovém intervalu mezi dvěma ustálenými stavy. V případě propojení elektroenergetických zdrojů mezi stavem, kdy je vedení v beznapěťovém stavu a ve stavu, kdy je připnuta zátěž – spotřeba druhého zdroje.

Vzniká v obvodech, kde jsou umístěny prvky schopny hromadit elektrickou energii, tedy cívka a kondenzátor. Z předchozí kapitoly, která pojednávala mimo jiné i o náhradním schématu vedení je patrné, že v uvažovaném náhradním obvodu se nachází velké množství těchto prvků – kapacit a indukčností. Akumulovaná energie se při skokové změně napětí či proudu nemůže z fyzikálního i matematického hlediska měnit také skokově nýbrž spojitě. Veličiny, které se mění spojitě, se nazývají stavové veličiny. Pro výpočty v obvodech pak platí následující vztahy mezi napětím a proudem.

$$i_c = C \cdot \frac{du_c}{dt}, u_l = L \cdot \frac{di_l}{dt} \quad (3.2-1)$$

Ze vztahů plyne, že stavovou veličinou v případě kapacity je napětí a v případě cívky proud.

Charakter přechodového jevu je dán konfigurací obvodu a velikostí jednotlivých veličin. V případě propojení elektroenergetických zdrojů se jedná z důvodu existence množství akumulčních prvků v náhradním obvodu o přechodový děj vyššího řádu. Při řešení přechodových jevů vyšších řádů se zabýváme průběhem, který určuje řešení charakteristické rovnice. Děje mohou být aperiodické, na mezi aperiodicity a kmitavé. [7]

Distribuční sítě jsou z hlediska přechodových jevů navrženy tak, aby ke kmitavým jevům v průběhu spínání a manipulací nedocházelo. V praxi pak přechodový jev zaniká s časovou konstantou  $\tau$ . Přechodovým jevem se v této diplomové práci zabírám z hlediska kontroly ochran a dovoleného přetížení vedení při přivedení napětí na vedení v bez zátěžovém stavu a v momentu připnutí zátěže (zdroj, zátěž na hladině 22 kV). V průběhu přechodového jevu může dojít k velkému výkyvu napětí a proudů, což je spojeno s riziky selhání izolace, vypnutí vypínače či jinými poruchovými stavy. V případě rozjíždění ostrovního provozu si nelze tyto chyby nepředvídat kvůli potřebě rychlého průběhu. [7]

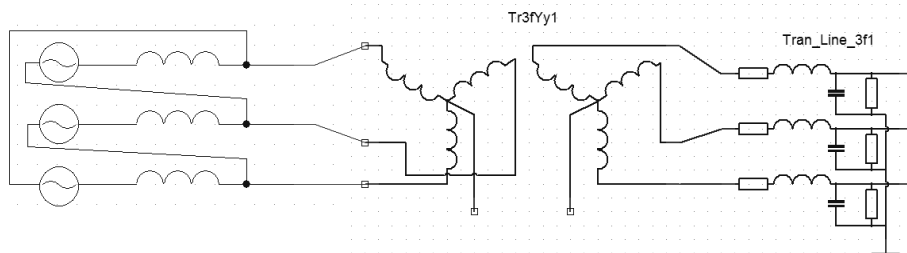
Problematikou samotného výpočtu se budu zabývat v následujících kapitolách.

### 3.3 Vedení naprázdno

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, vedení se může nacházet v několika základních provozních stavech, které je nutno testovat na průběh přechodového jevu a na ustálený stav.

Jedním ze stavů je, když dojde ke spojení nezátíženého vedení se zdrojem a připraví se vodivá cesta ke spotřebě. V takovou chvíli se v náhradním schématu obvodu nachází prvky reprezentující generátor (výrobu), transformátory (na úrovně 22 kV a 110 kV) a samotné vedení (úroveň 22 kV či 110 kV).

V případě stavu naprázdno kontroluji možné přepětí v průběhu přechodového jevu a časovou konstantu z důvodu nechtěného vybavení či naopak možného selhání ochran. Sepnutí vedení do tohoto stavu je předpokladem pro další krok – připojení zátěže. Testuji sepnutí i odepnutí vedení.



Obr. 3.1 – Náhradní schéma obvodu – vedení naprázdno

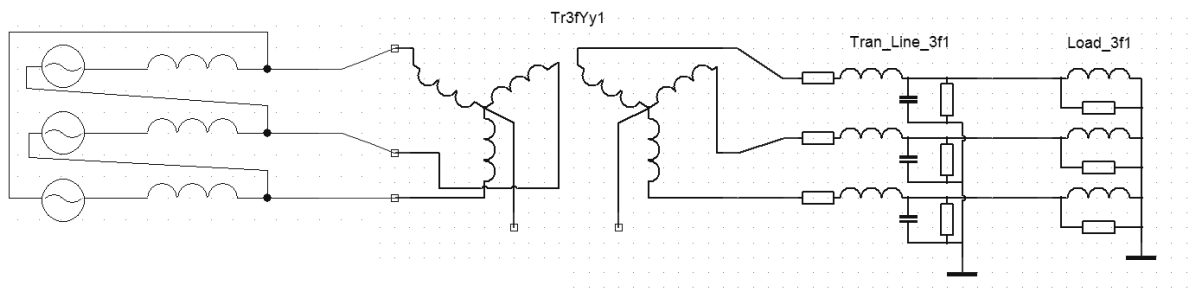


### 3.4 Do zátěže

Při připojení zátěže dochází ke změně náhradního schématu v podobě připojení modelové R,L zátěže reprezentující vlastní spotřebu teplárny, která spojení potřebuje pro svůj rozběh. Údaje vlastní spotřeby vycházejí obecně z technických požadavků provozovatelů tepláren či elektráren.

V tomto stavu sleduji pokles odezvy zdroje na skokové připnutí spotřeby. Opět pozorováním průběhu přechodového děje a ustáleného stavu. Při najíždění teplárny dochází k mnoha skokovým připojením dodatečných spotřebičů, na který musí být zdroj dimenzován. Z hlediska dimenzování zdroje ELÚ III na rychlý rozběh by neplynulá regulace spotřeby neměla být problémem a zdroj by měl být schopen pružně reagovat na požadavky spotřeby. Více o této problematice v kapitole věnované popisu zdrojů – níže.

Důležitým měřítkem je v tomto stavu pokles napětí, který vypovídá o tvrdosti zdroje. Stejně jako v předchozím případě, testuji zapojení na zapojení i odpojení zátěže.

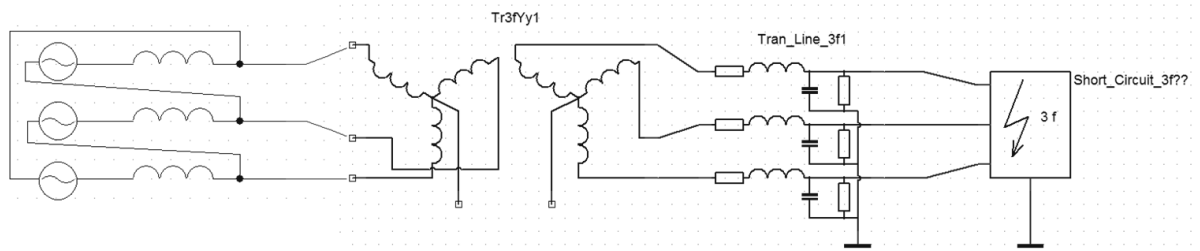


Obr. 3.2 – Náhradní schéma obvodu – připojená zátěž

### 3.5 Do zkratu

Přechod do provozu v ostrovním režimu je činnost, která v praxi vzniká velmi ojediněle a je většinou výsledkem nepříznivých vlivů na přenosovou a popřípadě distribuční soustavu. Takovou iniciační událostí mohou být například přírodní živly. V takovém případě může jednoduše dojít k poruchovým stavům při spínání především venkovních vedení, na které je třeba myslet předem.

V praxi mohou nastat tři stavy, dojde k přerušení jednoho či více vodičů na vedení, zemní spojení nebo zkrat na jedné či více fázích. Nejfatálnější následky v průběhu přechodu do ostrovního režimu a v krajním případě i úplné znemožnění by mohl způsobit zkrat, který by nebyl v dostatečně včasné době vypnut. [1]



Obr. 3.3 – Náhradní schéma obvodu – třífázový zkrat

### 3.6 Parametry potřebné pro modelování a výpočty

V této podkapitole se snažím napsat výčet parametrů, které jsou potřebné pro výpočty v diplomové práci a jejich stručný popis. Rozdělil jsem je na tři kategorie – výroba, přenos, spotřeba

Výroba:

#### Generátor

D / Y	-	Zapojení vinutí generátorů	[-]
$U_n$	-	Jmenovité napětí	[V]
$S_{ks}$	-	Zkratový výkon	[MVA]
f	-	Frekvence	[Hz]

#### Transformátor

D / Y	-	Zapojení	[-]
$N_1$	-	Počet vinutí primárního vinutí	[-]
$N_2$	-	Počet vinutí sekundárního vinutí	[-]
$S_N$	-	Jmenovitý zdánlivý výkon	[MVA]
$I_0$	-	Proud naprázdno	[%]
$U_k$	-	Napětí nakrátko	[%]
$\Delta P_k$	-	Činné ztráty nakrátko	[%]
$\Delta P_0$	-	Činné ztráty naprázdno	[%]

Přenos:

**Transformátor** – stejně jako předchozí

**Vedení**

$S$	-	Průřez vodiče	[mm <sup>2</sup> ]
$n$	-	Počet svazků	[-]
$R_p$	-	Podélný činný provozní odpor	[Ω/km]
$L_p$	-	Podélná provozní indukčnost	[H/km]
$C_p$	-	Příčná provozní kapacita	[nF/km]
$G_p$	-	Příčný provozní svod	[S/km]
$l$	-	Délka vedení	[km]

**Spotřeba:**

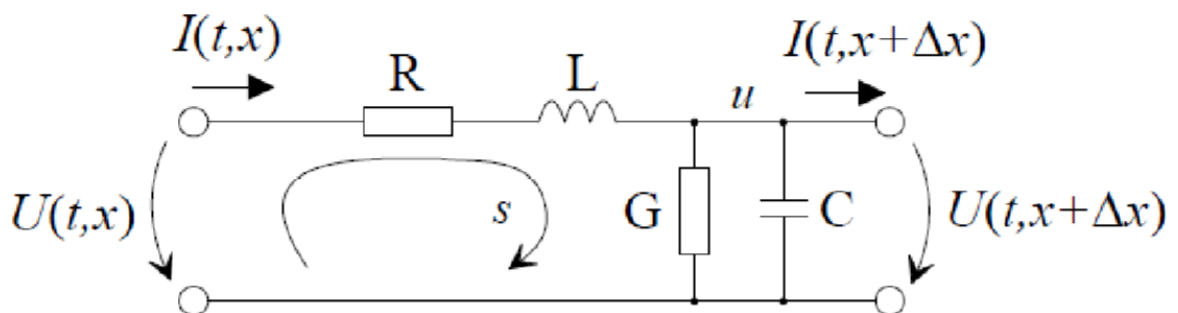
$P$	-	Činný odběr zátěže	[kW]
$Q$	-	Jalový odběr zátěže	[kVAr]
$U_N$	-	Jmenovité napětí	[kV]
$\cos \varphi$	-	Účinník	[-]

**3.7 Teorie výpočtů**

Tato podkapitola nastiňuje problematiku výpočtu rychlých jevů na vedeních (například přechodový jev). Pro využití vztahů pro homogenní vedení musím uvažovat několik podmínek.

- symetrické nebo transponované vedení
- pasivní parametry (R,L,C,G) jsou konstantní
- napětí a proudy mají sinusový průběh

Pokud jsou tyto podmínky splněny, lze zakreslit náhradní schéma v následujícím tvaru



Obr. 3.4 – Náhradní schéma vedení

Pro schéma pak platí vlnové rovnice pro homogenní vedení

$$u_{(t,x+\Delta x)} = u_{(t,x)} + \frac{\partial u_{(t,x)}}{\partial x} \cdot \Delta x \quad (3.7-1)$$

$$i_{(t,x+\Delta x)} = i_{(t,x)} + \frac{\partial i_{(t,x)}}{\partial x} \cdot \Delta x \quad (3.7-2)$$

Úpravou pro uzel **u** a smyčku **s** dostávám rovnice

$$-u_{(t,x)} + R \cdot \Delta x \cdot i_{(t,x)} + L \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial i_{(t,x)}}{\partial t} + u_{(t,x)} + \frac{\partial u_{(t,x)}}{\partial x} \cdot \Delta x = 0 \quad (3.7-3)$$

$$-i_{(t,x)} + i_{(t,x)} + \frac{\partial i_{(t,x)}}{\partial x} \cdot \Delta x + G \cdot \Delta x \cdot u_{(t,x)} + C \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial u_{(t,x)}}{\partial t} = 0 \quad (3.7-4)$$

Další úpravou získávám rovnice

$$\frac{\partial^2 u_{(t,x)}}{\partial x^2} = LC \cdot \frac{\partial^2 u_{(t,x)}}{\partial t^2} + (LG + RC) \cdot \frac{\partial u_{(t,x)}}{\partial t} + RG \cdot u_{(t,x)} \quad (3.7-5)$$

$$\frac{\partial^2 i_{(t,x)}}{\partial x^2} = LC \cdot \frac{\partial^2 i_{(t,x)}}{\partial t^2} + (LG + RC) \cdot \frac{\partial i_{(t,x)}}{\partial t} + RG \cdot i_{(t,x)} \quad (3.7-6)$$

Pro ustálený harmonický stav lze rovnice vyjádřit jako

$$-\frac{dU_{(x)}}{dx} = (R + j\omega L) \cdot I_{(x)} \quad (3.7-7)$$

$$-\frac{dI_{(x)}}{dx} = (G + j\omega C) \cdot U_{(x)} \quad (3.7-8)$$

Dále upravuji

$$\frac{d^2 U_{(x)}}{dx^2} - (R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C) \cdot U_{(x)} = 0 \quad (3.7-9)$$

$$\frac{d^2 I_{(x)}}{dx^2} - (R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C) \cdot I_{(x)} = 0 \quad (3.7-10)$$

Řešením s integračními konstantami A a B jsou tvary

$$U_{(x)} = Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x} \quad (3.7-11)$$

$$I_{(x)} = -\frac{1}{(R + j\omega L)} \cdot \frac{dU_{(x)}}{dx} \quad (3.7-12)$$

kde

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)} \quad (3.7-13)$$

Parametr  $\gamma$  je označován jako činitel šíření a skládá se z činitele tlumení  $\alpha$  a činitele fázového natočení  $\beta$ . Pro činitel šíření platí

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (3.7-14)$$

Vlnové rovnice je také možno řešit zjednodušením pomocí zanedbání některých prvků za předpokladu, že nepočítáme například ztráty (bezeztrátové vedení) nebo nepotřebujeme hloubkovou analýzu. U napěťových hladin 400 kV a 220 kV lze zanedbat odpor a například u 110 kV odpor a svod. [7] [8]

Výše popisovaná metoda platí pro vedení ve stavu naprázdno. V případě zatížení a výskytu dalších prvků v náhradním schématu se rovnice popisující jevy na vedeních mnohonásobně zesložitují. Proto volím cestu modelovacích nástrojů, které rovnice sestavují automaticky, počítají v rámci několika milisekund a dokáží oproti řešení na papíru podat flexibilnější výsledek bez numerických chyb.

### 3.8 Modelovací nástroje

Tato diplomová práce se zabývá řešením ostrovního provozu především ze stránky teoretické. Bylo by velmi náročné ať už z hlediska materiálního nebo ekonomické testovat funkčnost ostrovního provozu v praxi, nehledě na rizika plynoucí z omezení dodávky či rozsáhlejší poruchy při chybách.

K těmto účelům se v dnešní době informačních technologií přímo vybízí využití moderních modelovacích nástrojů, které dokážou s velkou přesností modelovat fyzikální jevy a odrážet tak skutečnost bez nutnosti fyzické přítomnosti modelu. To vše pod náklady za software a případné licence. V dnešní době je možné spočítat složitý matematický jev za několik málo desetin sekundy na průměrném PC. S jistotou bezchybnosti postupu a výpočetních úkonů. Proto si myslím, že zvolení vhodných prostředí pro modelování přechodových jevů a ustáleného stavu je klíčem ke správnému obrazu fyzikální reality.

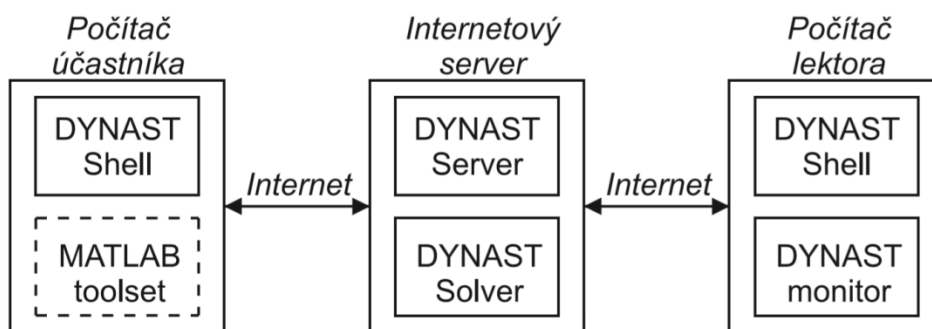
### 3.9 Dynast

Program Dynast (Dynamika a Statika) je simulační systém určený k simulaci a ke statické, časové a kmitočtové analýze lineární i nelineárních dynamických soustav. Cílem práce v tomto prostředí je napodobování chování předem určených soustav, průběhy jejich veličin v závislosti na rozličných parametrech.

Samotné modelování začíná popisem systému algebraicko-diferenciálními rovnicemi s podmíněnými a logickými výrazy, blokovými schémata, branovými schémata a jejich kombinací. Rovnice potřebné pro simulaci jsou formulovány samotným programem Dynast. Ovšem v každý moment lze přepínat mezi formou grafickou a kódem samotným.

Dynast je může být používán také na osobním počítači uživatele – Dynast Shell, který slouží k přípravě zadání řešené úlohy a odeslání požadavků. Pro řešení úlohy se využívá části Dynast Solver, který může být nainstalován také na PC nebo častěji na serverech – zdarma nebo na serverech vlastnících patřičnou licenci.

Při modelování této diplomové práce využívám online solveru ČVUT, který je zdarma. Umožňuje plnohodnotnou práci s jedinou nevýhodou možné časové odezvy při řešení složitějšího problému. Program je vyvíjen v rámci ČVUT, je uživatelsky jednoduchý a je v něm možné psaní vlastních blokových schémat pro specifické úlohy. Program je poskytován pro studijní účely zdarma. [7] [21]



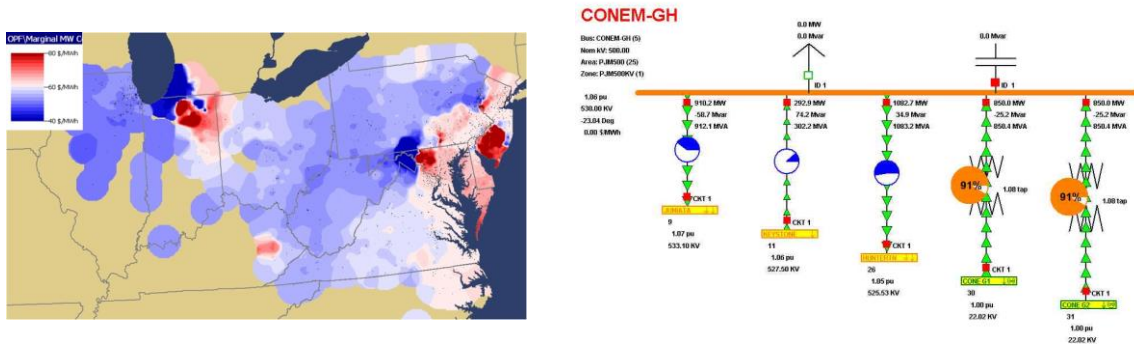
Obr. 3.5 – Blokové schéma částí modelačního prostředí Dynast

### 3.10 PowerWorld

Oproti předchozímu modelovacímu prostředí se prostředí PowerWorld nezabývá samotnými fyzikálními jevy, jakým je například přechodový jev, ale jedná se o nástroj komplexní, který se využívá pro potřeby plánování přenosové soustavy, systémové operátory, tréninky, výuku a pro potřeby informací a analýzy energetické soustavy v uživatelsky přátelském prostředí.

Společnost PowerWorld vyrábí několik utilit, které využíváme při různých potřebách analýzy – vizualizační nástroje pracující s real-time daty (Retriever), výpočty parametrů třífázových vedení včetně návrhu stožárů (TransLineCalc), interaktivní simulační prostředí vysokonapěťových soustav s časovou simulací několika minut až několik dnů (Simulator) a tréninkové programy z řady Trainer.

Pro potřeby této diplomové práce využívám PowerWorld Simulator, který dokáže i v základní verzi interaktivně simulovat činnost vysokonapěťový energetický systém. Software obsahuje vysoce efektivní analýzu toku výkonů a dokáže řešit systémy o velikosti až 100 000 uzlů. Tento software využívám na analýzu ustáleného stavu, toku výkonů a analýzu proveditelnosti ostrovního provozu Plzeňska. Program je poskytován pro studijní účely zdarma. [18]



Obr. 3.6 - Ukázky z programu PowerWorld Simulator (převzato z webu powerworld.com)

## 4 Kvalita elektrické energie

Schopnost udržovat systém v režimu ostrovního režimu je bez řízení kvality elektrické energie jen dovedností samou o sobě, ale její potenciál využití spotřebiteli je mizivý, ruku v ruce se spolehlivostí, bezpečností a dobou maximálního možného provozu. Normy jasně stanovují, v jakých mezích se jednotlivé parametry elektrické energie mohou pohybovat. Pro ostrovní parametry jsou stěžejní hodnoty frekvence, účinníku a v neposlední řadě výkonová bilance (rezerva). Pro efektivní chod je velmi důležitý výchozí stav, ze kterého soustava do ostrovního režimu přechází a s tím spojená vhodná rekonfigurace sítě, dále je řešena vlastní spotřeba elektráren.

### 4.1 Kvalita elektrické energie

Kvalitu elektrické energie v našem případě, tedy distribuční soustavě definuje norma ČSN EN 50 160. Z této normy vyplývá, že je nutno sledovat odchylku následujících veličin:

- frekvence
- symetrie fází (velikost a posun o 120 stupňů)
- velikost a odchylka (+/- 10%  $U_N$ )
- stálost
  - o kolísání (flickr)
  - o rychlé změny
- kvalita napěťové křivky – deformace sinusového průběhu
  - o vyšší harmonické, impulsní přepětí
- poklesy a přerušení
- přepětí

Odchylky od hodnot určených normou mají vliv na správnou funkci spotřebičů zapojených v síti. Ačkoliv se daný systém v případě této diplomové práce nachází v ostrovním režimu, je nutné, aby byl řízen dle norem a byla zajištěna kvalita dodávky.

Například u žárovek a zářivek pokles napětí velmi ovlivňuje jejich světelný výkon, přepětí pak rapidně snižuje životnost až o 25%. Jelikož je moment asynchronních motorů úměrný druhé mocnině napětí, dochází k deformaci momentové charakteristiky. [22]



Pokles napětí (při dodržení parametrů frekvence a podmínek výkonové bilance) v důsledku zatížení nebo délky vedení je možné řešit využitím odboček transformátoru, který zpravidla poskytuje minimální možnost regulace v rozmezí  $\pm 5\%$ .

#### 4.2 Optimální rekonfigurace sítě

Pod pojmem optimální rekonfigurace je myšlena příprava především vedení na chod v ostrovním režimu.

V případě uvažovaném v této diplomové práci (ELÚ III vyrábí jen pro vlastní spotřebu a přilehlý areál Škody a Teplárna je odstavena) musí nejdříve dojít k odpojení napájení města Plzně od zbytku přenosové soustavy na úrovni 400 kV. K tomu dojde na rozvodnách Chrást a Přeštice. Také musí být odpojena vedení úrovně 110 kV 1216 a 1220, která vedou směrem Toužim a Kralovice.

Dalším krokem je výběr jedné z navrhovaných variant propojení objektu ELÚ III a Teplárny na úrovni 110 kV a postupné propojení těchto zdrojů.

V případě úspěšného propojení následuje postupné napájení jednotlivých rozvodů města Plzně.

Posledním úkolem je udržení ostrovního provozu a předvídání například poruchových provozních stavů.

#### 4.3 Vlastní spotřeba

Je nutné myslet na vlastní spotřebu elektráren a to s přihlédnutím k faktu, že s narůstající výrobou roste i jejich vlastní spotřeba. Vlastní spotřeba se v průběhu výroby mění, zprvu je její změna nelineární, protože je nutné, aby pracovaly technologické celky, které zajišťují chod nezávisle na velikosti vyráběného výkonu. Vlastní spotřeba se se zvyšující výrobou linearizuje a její přírůstek v závislosti na vzrůstu vyráběného výkonu se snižuje.

Stejným důsledkem je i nárůst účinnosti celého cyklu zdroje elektrické energie s rostoucím vyráběným výkonem. Proto není vhodné nevyužívat potenciální výkon elektrárny – vysoká spotřeba / malá účinnost.

#### 4.4 Typy odběratelů - SZD

Odběratelé elektrické energie jsou rozděleni do tří skupin stupně zabezpečení dodávky, které určují hrozby, které plynou z nedodání (ohrožení životů, zdraví a velkého provozu atd.) Bohužel data o rozdělení spotřeby podle SZD jsou interní záležitostmi společnosti ČEZ

Distribuce, a.s. je v případě nefunkčnosti ostrovního provozu nutno pamatovat na jednotlivé stupně (1. A 2.) a zajistit alespoň jejich bezpečnost.

#### 4.5 DDZ

DDZ města vychází z interních firemních dokumentů – měření na úrovni 22 kV. Obvykle se provádějí v létě a v zimě. Z těchto dat lze postavit kompletní toky činných výkonů ve městě v měřítku 24 hodin.

#### 4.6 Účinník

Se snižující se hodnotou účinníku  $\cos \varphi$  se zvětšuje odpovídající jalový výkon. Jelikož je jalový výkon  $Q$  jednou ze složek zdánlivého výkonu  $S$ , odpovídá tomu i nárůst zdánlivého výkonu, který je nutný vyrobit v elektrárnách a přenést přes vedení.

Tuto neblahou skutečnost lze omezit kompenzací účinníku, kdy se v prostoru spotřeby umístí kompenzační zařízení, které dodává jalový výkon „lokálně“ a kompenzuje tím účinník  $\cos \varphi$  na vyšší hodnotu. Tím dochází k odlehčení nejen přírodních vedení, která jsou dimenzována právě na zdánlivý výkon, ale také snížení potřebného vyráběného výkonu.

Kompenzace účinníku je v České republice běžným jevem, proto uvažuji pro potřeby této diplomové práce účinník  $\cos \varphi$  v mezích 0,95 – 0,98.

#### 4.7 Bilance činných výkonů a regulace frekvence

Udržení výkonové rovnováhy činných výkonů je naprosto základním požadavkem provozu jakékoliv elektrizační soustavy a libovolné velikost. Tato rovnováha je dlouhodobě zajištěna na velkoobchodním trhu se silovou elektřinou na základě bilaterálních smluv. V propojené soustavě je výkonová rovnováha dána vztahem

$$\sum P_G = \sum P_S + \sum P_Z \text{ [MW]} \quad (4.7-1)$$

kde  $\sum P_G$  reprezentuje sumární výkon dodávaný generátory,  $\sum P_S$  reprezentuje celkovou spotřebu včetně uvažování vlastní spotřeby a  $\sum P_Z$  vyjadřuje celkové ztráty v systému. Za ustáleného stavu platí tato rovnice na úrovni celého propojeného systému. [4] [1]

Pokud dojde k výpadku jednoho zdroje o velikost  $\Delta P_x$ , je jeho výkon nahrazen ostatními pracujícími generátory v závislosti na vzdálenosti od výpadku. Přenosová soustava je na tento případ připravena kritériem „N-1“, které počítá s tím, že při výpadku libovolného

prvku soustavy (ať už blok, vedení, transformátor atd.) jsou udrženy normální parametry chodu sítě, přičemž může dojít ke krátkodobému lokálnímu omezení spotřeby. [25]

Pro pochopení a smysl regulace v modelacích v této diplomové práci vyjadřují průběh doregulování soustavy pomocí pohybové rovnice pro elektromechanický vyrovnávací děj

$$I \cdot \Omega_0 \cdot \frac{d\Omega}{dt} = N_T - P_E \quad (4.7-2)$$

$I$  je moment setrvačnosti soustrojí,  $\Omega_0$  je synchronní úhlová rychlost rotoru,  $N_T$  je mechanický výkon turbíny a  $P_E$  je elektrický výkon na svorkách generátoru. [3] [4]

Průběh regulace je v základu takový, že při okamžiku výpadku výkonu dojde k poklesu pravé strany rovnice do záporných hodnot, fyzikálně začne soustrojí zpomalovat. Primární regulátor frekvence na tento pokles reaguje tím, že otevře regulační ventil turbíny a zajistí větší přísun páry a tím zvýší výkon. Výkon turbíny je proporcionálně úměrný odchylce frekvence od jmenovité hodnoty (viz následující vztah).

$$\Delta N_T = -K \cdot \Delta f [MW], \quad K = 100 \cdot \frac{P_N}{\delta \cdot f_n} [MW/Hz] \quad (4.7-3)$$

$K$  je výkonové číslo turbosoustrojí,  $P_N$  je jmenovitý elektrický výkon bloku,  $\delta$  reprezentuje statiku primární regulace v procentech a  $f_n$  je jmenovitá frekvence. Při dostatečné výkonové rezervě systému dojde k přerozdělení v poměru velikosti výkonových čísel a frekvence se vrátí na svou původní hodnotu. V opačném případě dojde ke snížení frekvence a hrozí frekvenční kolaps. Tento princip je nazýván primární regulací frekvence. Celý proces by měl proběhnout do 30 sekund od vzniku stavu. [3] [4]

Dalším nástrojem pro pokrytí výkonové bilance a regulace frekvence je sekundární regulace  $f$  a  $P$ . Regulace je plně automatická a je umístěna na dispečinku provozovatele přenosové soustavy ČEPS, a.s. Regulační odchylka regulátoru se počítá následujícím způsobem

$$G = dP + K \cdot \Delta f [MW] \quad (4.7-4)$$

$dP$  vyjadřuje odchylku od plánovaného předávaného výkonu a  $K$  je pak parametr regulátoru, který se určuje jako primární regulační rezerva podle velikosti konkrétní oblasti. Sekundární regulace navazuje na primární a snaží se nahradit výkon, který byl do sítě dodán zafungováním primární regulace do 15 minut od vzniku výpadku, v případě potřeby může dispečer využít i rychle startujících rezerv jako jsou například přečerpávací vodní elektrárny.

Dalším prvkem navazujícím na činnost sekundární regulace je regulace terciální, která se využije při vyčerpání všech sekundárních regulačních záloh. Terciální zálohy jsou zdroje elektrické energie, které jsou schopny najet na plný výkon za velmi krátkou dobu (rychle startující desetiminutová záloha, dispečerská záloha a jiné). [3] [4]

V případě provozu v ostrovním režimu dále platí rovnice 4.7-1 s jediným rozdílem, kdy už se nelze spoléhat při změně potřebného výkonu na princip solidarity, ale veškerou regulaci musí elektrárna provést velmi rychle sama. Pro porovnání způsobu provozování při jednotlivých stavech je vytvořena následující tabulka

	Standardní provoz	Ostrovní provoz
Udržení výkonové bilance	Komplexní systémová služba zajištěna provozovatelem PS	Regulace otáček turbín, součinnost provozovatelů sítí a elektráren, frekvenční odlehčování
Primární pokrytí $\Delta P$	Primární regulace f	Proporcionální regulace otáček, frekvenční odlehčování
Sekundární pokrytí $\Delta P$	Sekundární regulace f a P	Změna základního otevření ventilů, změna zatížení, centrální regulace frekvence

Tabulka 4.1 – Způsoby regulace v závislosti na provozu

Při standardním provozu je udržována frekvence na 50 Hz, přičemž za běžné pásmo se považují výchylky v rozmezí  $\pm 200$  mHz. Vybočení mimo tuto hranici je řešeno Frekvenčním plánem, který vychází z vyhlášky č. **219/2001 Sb. o stavech nouze v elektroenergetice**. Frekvenční plán vymezuje tři pásma provozu vzhledem ke změnám frekvence (viz následující tabulka).

Typ elektrárny	Uhelná	Jaderná		Vodní	Přečerpávací		Paroplynové
		EDU	ETE		Turbína	Čerpání	
Provoz							
Normální bez omezení	48,5-50,5	48,5-50,5		48,5-50,5	48,5-50,5	49,5-50,5	48,5-51,5
Časové omezení P a $\cos \varphi$	46-48,5 50,5-53	47,5-48,5 50,5-52	47,9-48,5 50,5-51,5	46-48,5 50,5-53	46-48,5 50,5-53	49-49,5 50,5-52	48-48,5 51,5-52
nepřípustný	53 < f < 46	52 < f < 47,5	51,5 < f < 47,9	53 < f < 46	53 < f < 46	52 < f < 49	52 < f < 48

Tabulka 4.2 – Frekvenční pásma provozu

Postup při poklesu nebo nárůstu frekvence je v normách řešen přechodem nejdříve přechodem přečerpávacích elektráren do vlastní spotřeby z čerpání a při poklesu přechod do

turbínového režimu. Při vstupu do pásma nepřipustného provozu následuje přechod jaderných elektráren a paroplynových do vlastních spotřeb, po nich následuje zbytek elektráren. [3] [4]

Na samotný provoz v ostrovním režimu lze aplikovat několik faktů z předchozích odstavců. V případě provozu v ostrovním režimu se přechází do otáčkové regulace, musí být zajištěna součinnost výrobců s největšími spotřebiteli – obvykle velké strojírenské společnosti (v Plzni například Škoda nebo Brush) aby se zamezilo velkým  $\Delta P$ , udržovat frekvenci v rozmezí  $\pm 200$  mHz, při překročení hranice 200 mHz dojde k vypínání zátěže dle plánu frekvenčního odlehčování. [3] [4]

Jak plyne z této podkapitoly, frekvence je absolutně nejdůležitějším parametrem v ostrovním provozu, protože odráží výkonovou potřebu a v případě rapidního poklesu nebo nárůstu může dojít k poškození zařízení a rozsáhlým poruchám. Klade se zde velký důraz na regulaci, která probíhá v otáčkovém režimu. V dnešní době jsou používány digitální regulátory otáček, které mají rychlou odezvu. Klíčem je však dostatečná výkonové rezerva a schopnost rychlé změny výkonu. Více bude o této problematice pojednáno při modelování provozu ostrovního režimu v prostředí PowerWorld.

#### 4.8 Kontrola stability napětí

Tato subkapitola odráží skutečnosti norem, které se kvalitou napětí zabývají, konkrétně kontrola stability napětí spočívá v sestavení náhradního schématu dané konfigurace a kontrola při následujících stavech:

- připojení zdroje na vedení naprázdno – 110 kV
- připojení vedení k druhému zdroji na úrovni 110 kV
- připojení spotřeby
- paralelní chod zdrojů s připojenou spotřebou

První dva body jsou zkoumány pomocí simulačního prostředí Dynast a jelikož další dva body jsou spíše zkoumáním provozu samotného, je využito prostředí PowerWorld.

#### 4.9 Výkonová rezerva

Výkonová rezerva vychází z předchozí kapitoly, která říká, že při nedostatku výkonové rezervy se dříve nebo později dostane systém do frekvenčního kolapsu, zareagují ochrany a elektrárny spadnou do vlastního ostrovního provozu – budou vyrábět jen na vlastní spotřebu.

Tento stav je velmi nutné ohlídat, protože to je nejen problém z hlediska opakování celého procesu znovu, ale může dojít k poškození samotných elektráren, které musí skokově spadnout z nominálního výkonu na 10-15%.

Pro velmi rychlou výkonovou rezervu v rozmezí 5-10 MW by mohly sloužit malé vodní elektrárny nebo kogenerační zdroje elektrické energie, jejichž výkon je z fyzikální podstaty dobře regulovatelný a velmi rychle dostupný. Detailní informace o těchto zdrojích a jejich regulaci jsou bohužel interními záležitostmi vlastníků.

#### 4.10 Regulace

Jak bylo řečeno v předchozích kapitolách, v ostrovním režimu dochází k přechodu na otáčkovou regulaci z důvodu udržení požadovaných hodnot frekvence. V případě poklesu frekvence pod normou stanovené hodnoty se postupuje podle frekvenčního odlehčování zátěže (viz následující tabulka)

Stupeň	1.	2.	3.	4.
Mezní frekvence [Hz]	<b>49</b>	<b>48,7</b>	<b>48,4</b>	<b>48,1</b>
Objem odlehčované zátěže [%]	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>14</b>

*Tabulka 4.3 – Frekvenční odlehčování zátěže*

Dále se regulace musí zabývat rozdělením dodávky elektrické energie dle stupně zabezpečení dodávky. Musí být zajištěn provoz zařízení, která svou nefunkčností nebo výpadkem mohou ohrozit lidské životy nebo zdraví. Pokud je to možné, tak v případě nutnosti zajistit jejich bezpečné odstavení z důvodu potřeby větší výkonové rezervy. [3]

V neposlední řadě nutně komunikovat s provozovatelem přenosové soustavy ČEPS, a.s. z důvodu spolupráce na obnově provozu přenosové soustavy na území ČR.

## 5 Ampacita vedení

Tato kapitola pojednává o objevu moderní energetiky nazývaném ampacita. Nejprve zmiňuji teoretické nutnosti k pochopení problematiky a návrhu venkovních vedení, dále se zabývám příklady změny proudové zatížitelnosti v závislosti na změně parametrů okolí. Závěrem diskutuji, zda je možné vliv ampacity aplikovat obecně a zda je možné ji využít i pro problematiku této diplomové práce.

### 5.1 Ampacita – Přetížení vedení vlivem ampacity

Při návrhu venkovního se vychází z normy na dovolené proudové zatížení, která určí, jaký je maximální proud protékající daným vodičem při nejnepříznivějších podmínkách, z čehož se poté odvíjí maximální výkonová přenosová kapacita vodiče a popřípadě venkovního vedení.

Zásadním faktem při návrhu je maximální teplota vodiče a jeho bezprostředního okolí. Z těchto podmínek je stanovena přenosová kapacita vedení. Vnější podmínky v bezprostředním okolí vodiče jsou silně závislé na povětrnostních a klimatických podmínkách a především vlivem proudění větru a okolní teploty se hodnoty maximálního přenášeného výkonu mění. [2]

Proto tato velmi často skloňovaná problematika otevřela možnosti snižování ekonomických nákladů a také umožňuje dimenzování přesně na míru dané lokality a provozu. Ampacita také posiluje možnost rozšíření přenosové kapacity stávajících vedení. Je třeba podotknout, že se ale jedná o dočasné využití a nelze využívat dlouhodobě. Uvažuje se o využití spíše pro přetoky nebo nárazové krizové situace, kterou může být například ostrovní provoz na území Plzeňska. [2]

### 5.2 Výpočet ampacity venkovních vedení

Pro výpočet ampacity venkovních vedení je používáno několik komplexních modelačních nástrojů (Matlab – Simulink, Ansys) a bohužel není možné v rozsahu této práce počítat i ampacitu jednotlivých vedení, přesto uvádím rovnice, které popisují tepelné poměry na venkovních vedeních. [2]

Nejdříve je určena teplota vodiče závislá na protékajícím proudu, charakteristice vodiče a parametrech okolí – sluneční svit, okolní teplota a rychlost se směrem větru. Jak je vyjádřeno v práci Ing. Jaroslava Šnajdra (viz zdroje), v ustáleném stavu lze výše popsany fakt vyjádřit jako :

tepelný příkon = chlazení

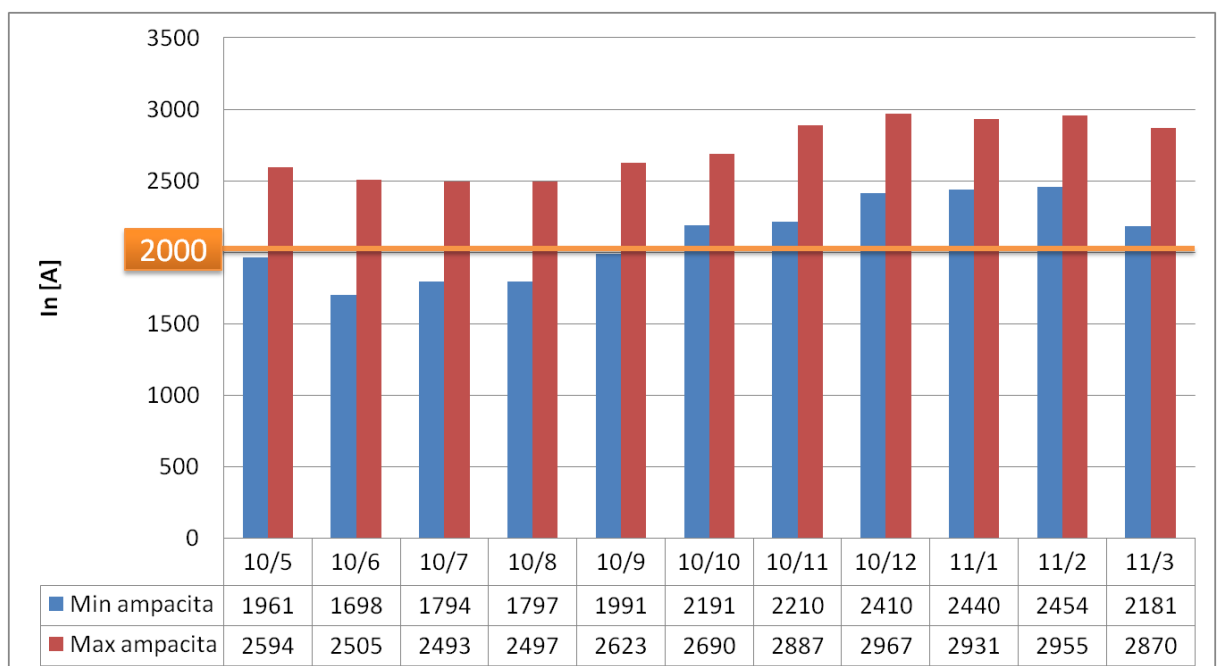
Pro popisování obecného dynamického děje se pak v praxi využívá následujícího vztahu:

$$P_j + P_s + P_c = m_c \cdot c_c \cdot \frac{dT}{dt} + P_r + P_k + P_w \quad (5.2-1)$$

kde  $P_j$  reprezentuje Joulovy ztráty,  $P_s$  ohřev slunečním zářením,  $P_c$  ohřev korónou,  $m_c$  hmotnost vodiče,  $c_c$  tepelnou jímavost vodiče,  $P_r$  ochlazování tepelným zářením,  $P_k$  ochlazování prouděním vzduchu a  $P_w$  ochlazování výparem vody. [2]

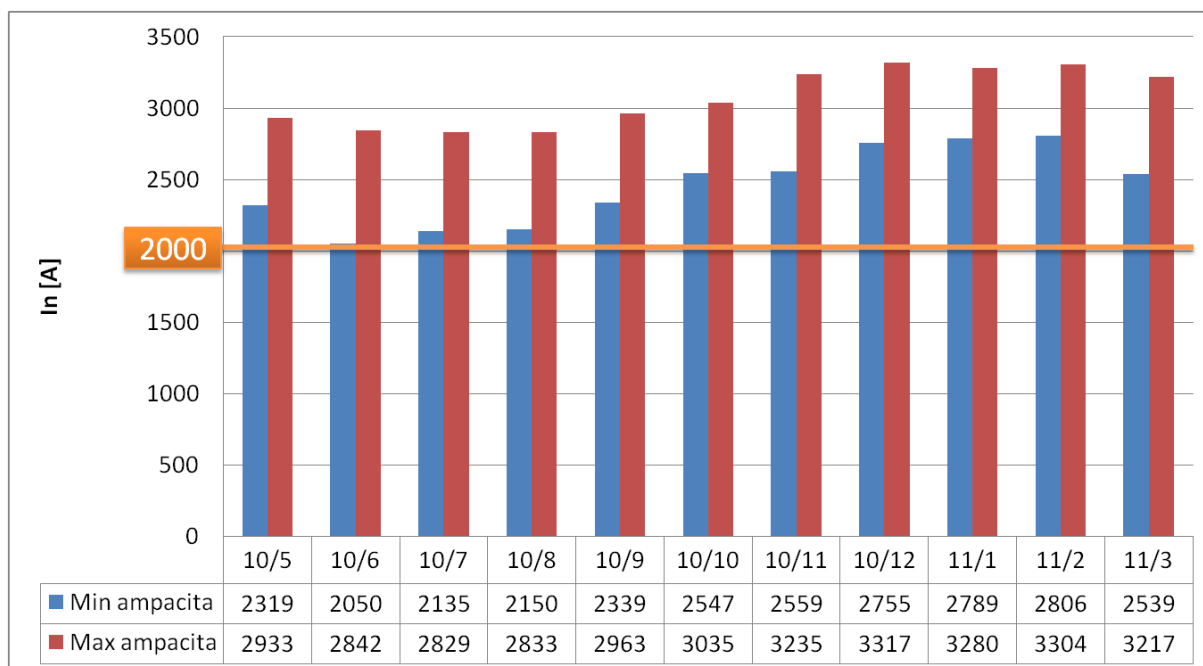
### 5.3 Změna proudové zatížitelnosti

Z následujících obrázků plyne, že proudová zatížitelnost vedení se pohybuje v závislosti na uvažování rychlosti a směru větru oproti například volbě stavu bezvětřného stavu, kdy je změna proudové zatížitelnosti pochopitelně nižší. [2]



Obr. 5.1 – Proudová zatížitelnost – bezvětří (převzato z [2])





Obr. 5.2 – Proudová zatížitelnost – vítr 0,6 m/s (převzato z [2])

Obecně lze na základě zjištění ve zkoumání problematiky ampacity říci, že při vhodných klimatických podmínkách se možná proudová přetížitelnost pohybuje v rozmezí +10 % až +50 % při velmi nízkých teplotách okolí vodiče (například zimní větrná noc). [2]

#### 5.4 Využití v této DP

Obecně soudím, že nejnepříznivější podmínky, na které je venkovní vedení dimenzováno, jsou dosaženy jen velmi zřídka, proto můžeme s jistou částí maximální ampacity počítat ve většině provozních stavů. V reálném provozu za šťastných podmínek bych uvažoval ampacitu maximálně ve velikosti 30 % maximálního přenosové kapacity vedení.

Využití v této diplomové práci bych viděl využití ampacity v případě nutného přetížení vedení především na severu Plzně, kde jsou umístěny rozvodny Křimice, Plzeň-sever a Plzeň-město. Přes tyto stanice je přenášen výkon jednak pro zajištění vlastní spotřeby objektu PT, ale také je napájen sever města. Linky jsou dvojité a výkon lze v případě potřeby rozložit i na souběžné vedení úrovně 110 kV, v čase než by k tomu došlo, by ampacity mohla být krátkodobě využita.

## 6 Energetická bilance

Touto kapitolou se přesouvám ze spíše teoretické části práce do části praktické. Než začnu řešit jednotlivé situace, které mohou před a při provozu v ostrovním režimu a propojování elektroenergetických zdrojů nastat, popíši charakter výroby, spotřeby a specifika provozu Plzeňska. Z této kapitoly budu také vycházet v následujících kapitolách při modelování a predikci jednotlivých stavů.

### 6.1 Charakter elektrické sítě

Pro charakterizaci systému na území města Plzně vycházím z energetické koncepce. V energetické koncepci je zmíněno, že došlo k rapidní modernizaci distribuční soustavy na území Plzeňska po roku 2007 z důvodu zastaralé sítě a obav z toho, že může dojít k přetížení a odřiznutí částí města od dodávky elektrické energie. Modernizace proběhla úspěšně a důkazem toho je, že i v průběhu menšího orkánu, který byl na jiných místech České republiky ničivým, území města Plzně zůstalo netknuté. Za své mluví také velmi malá poruchovost. Vedení je velmi dobře dimenzováno pro potřeby Plzeňska a také dobře geograficky rozloženo. [9]

### 6.2 Schéma elektrické sítě

Jak již bylo nastoleno v teoretické části, jako náhradní schéma vedení 110 kV jsem za splnění všech předpokladů zvolil gama článek, který mi při uvažování vzdáleností do 20 kilometrů přijde vhodný pro popis chování sítě především v přechodovém jevu, ale i ustáleném.

### 6.3 110 kV

Pro propojení rozveden Škoda a Plzeň město, popřípadě Teplárna lze na úrovni 110 kV uvažovat linky 1202, 1206, 1209, 1210, 1213, 1225 a 1226. Při výběru vodivých cest je možné postupovat z pohledu matematické kombinatoriky a nalézt všechna možná spojení. Ovšem z hlediska praktického využití se jeví nejlepší vybrat nejkratší možné spojení s nejmenším množstvím uzlů stále však s ohledem na redundanci. Čím jednodušší a kratší bude vedení, tím je menší pravděpodobnost poruchy. [20]

Varianty propojení na úrovni 110 kV jsou tři. Dvě (varianta A, varianta B) vycházejí z využití linky 1206 a třetí (dále varianta C) z linky 1202. Variantu C uvažují jako záložní řešení. Vzdálenostně je složitější, ovšem pokud by nastala porucha na vedení 1206, jeví se jako jediné řešení na úrovni 110 kV.

Z důvodu nedostupnosti reálných provozních parametrů uvažovaných vedení vycházím z obecných běžných dostupných provozních parametrů venkovních vedení. Potřebné parametry znázorňuje následující tabulka:

Parametry venkovních vedení - 110 kV						
Provedení	Vodiče AlFe [mm <sup>2</sup> ]	Konstrukce stožáru	R	X	B	I <sub>z</sub>
			[Ω.km <sup>-1</sup> ]	[Ω.km <sup>-1</sup> ]	[μS.km <sup>-1</sup> ]	[A]
Dvojité	150/6	Soudek	0,2	0,422	2,713	510
	185/6	Soudek	0,156	0,4143	2,766	580
	210/3	Soudek	0,13	0,4023	2,852	620
	<b>240/6</b>	<b>Soudek</b>	<b>0,125</b>	<b>0,407</b>	<b>2,817</b>	<b>670</b>
	450/6	Soudek	0,065	0,3854	2,982	950
	<b>670/8</b>	<b>Donau</b>	<b>0,042</b>	<b>0,3661</b>	<b>3,142</b>	<b>1200</b>

Tabulka 6.1 – Parametry venkovních vedení (110 kV) (Převzato z [7])

Hodnoty zvýrazněných vedení jsou použita pro modelování v této diplomové práci.

Jmenovitý zdánlivý třífázový výkon přenášený vedením typu soudek je roven

$$\begin{aligned}
 S_{N_{sou}} &= 3 \cdot U_f \cdot I_{Z_{sou}} = 3 \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot I_{Z_{sou}} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{Z_{sou}} \\
 &= \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 670 = 127,652 \text{ MVA}
 \end{aligned}
 \tag{6.3-1}$$

$$\begin{aligned}
 S_{N_{do}} &= 3 \cdot U_f \cdot I_{Z_{do}} = 3 \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot I_Z = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{Z_{do}} = \\
 &= \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 1200 = 228,630 \text{ MVA}
 \end{aligned}
 \tag{6.3-2}$$

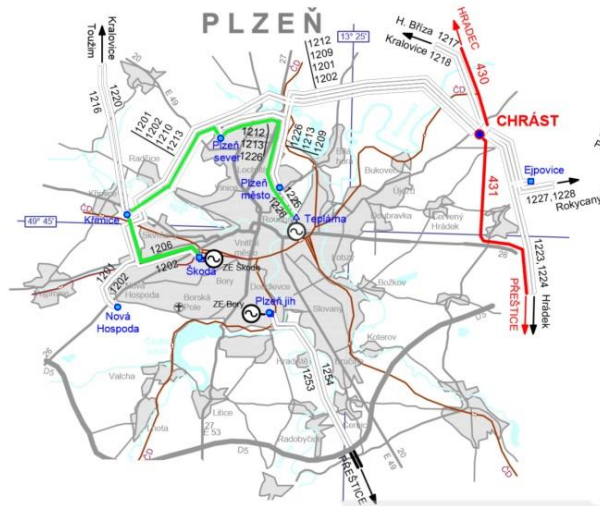
Parametry vedení jsou vztaheny na jeden kilometr a pro výpočty je nutno tyto parametry vynásobit délkou daného úseku vedení.

Při uvažování vlivu ampacity, o které je pojednáno v předchozí kapitole lze využít přetížení vedení až o 30% při vhodných klimatických podmínkách. Lze tudíž počítat, že maximální přenášený zdánlivý výkon může dosáhnout u vedení typu Soudek až 165,940 MVA a u vedení typu Donau až 297,219 MVA. Pokud simulace ukáže, že některé vedení nestačí pro přenášení výkonu, budu uvažovat i vliv ampacity.

Při sestavování náhradních schémat provádí násobení mezi relativními provozními parametry vedení a délkou prostředí Dynast i PowerWorld automaticky.

#### 6.4 Varianta A

Rozvodna Škoda – 1206 – rozvodna Křimice – 1210 – rozvodna Plzeň-sever – 1226 – Teplárna



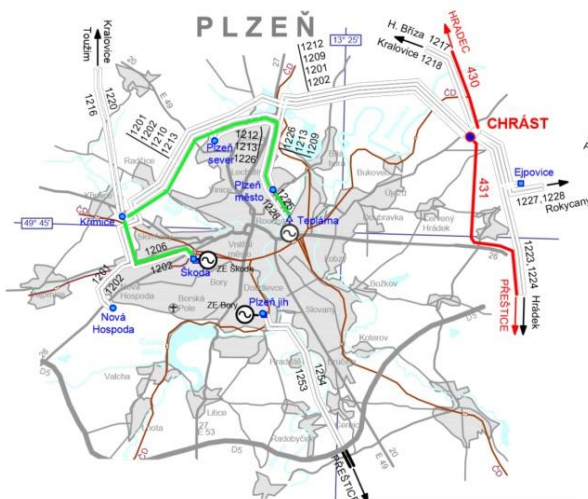
Obr. 6.1 – Schéma vedení – Varianta A

Číslo vedení [-]	1206	1210	1226
Délka [km]	3,35	4,2	6,36
Typ vedení [-]	Dvojité	Dvojité	Dvojité
Konstrukce [-]	Soudek	Soudek	Soudek

Tabulka 6.2 – Parametry vedení – Varianta A

#### 6.5 Varianta B

Rozvodna Škoda – 1206 – rozvodna Křimice – 1213 – rozvodna Plzeň-město – 1225 – Teplárna



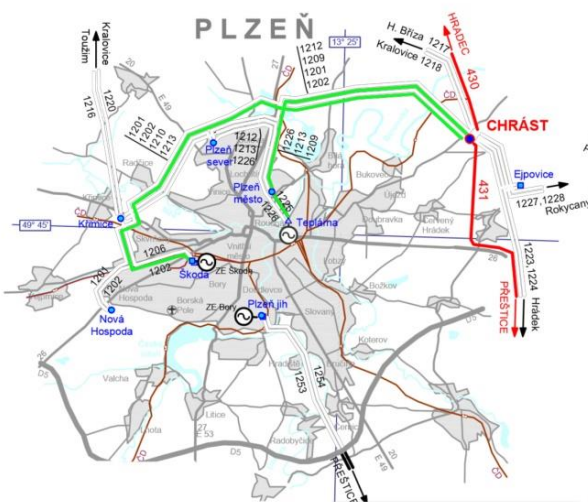
Obr. 6.2 – Schéma vedení – Varianta B

Číslo vedení [-]	<b>1206</b>	<b>1213</b>	<b>1225</b>
Délka [km]	3,35	9,29	1,11
Typ vedení [-]	Dvojité	Dvojité	Dvojité
Konstrukce [-]	Soudek	Soudek	Soudek

Tabulka 6.3 – Parametry vedení – Varianta B

### 6.6 Varianta C – záložní vedení

Rozvodna Škoda – 1202 – rozvodna Chrást – 1209 – rozvodna Plzeň-město – 1225 - Teplárna



Obr. 6.3 – Schéma vedení – Varianta C

Číslo vedení [-]	1202	1209	1225
Délka [km]	17,52	10,11	1,11
Typ vedení [-]	Dvojité	Dvojité	Dvojité
Konstrukce [-]	Donau	Donau	Soudek

Tabulka 6.4 – Parametry vedení – Varianta C

## 6.7 22 kV

Vedení na úrovni 22 kV v této diplomové práci není modelováno, je však využito schéma rozvodů na této napěťové úrovni a také zimní měření, které dovoluje sestavit denní diagram zatížení a také simulovat provoz v ostrovním provozu. Oba dokumenty jsou interními dokumenty společnosti ČEZ Distribuce.

## 6.8 Uvažované zdroje

Pro předvídatelnost tohoto modelu ostrovního provozu na území Plzeňska uvažuji využití dvou konvenčních zdrojů elektrické energie – objekt ELÚ III a Teplárnu Plzeň. Na území města Plzně je instalováno několik dalších zdrojů elektrické energie – fotovoltaická elektrárna o elektrickém výkonu 11,249 MW, malé vodní elektrárny o elektrickém výkonu 2,287 MW a malé kogenerační zdroje o elektrickém výkonu 3,6 MW, jejichž provoz však není předvídatelný a je obtížně regulovatelný. V případě nedostatku výkonu pro pokrytí nutných potřeb ostrova tyto zdroje uvažuji jako zálohy, které tuto rezervu mohou za specifických podmínek pokrýt. Celkový elektrický výkon instalovaný na území města Plzně je 279,236 MW.

Z energetické koncepce města Plzně plyne, že výkon vyrobený na území města Plzně je schopen zhruba pokrýt i příkon. [9]

## 6.9 ELÚ III

Elektrárna ELÚ III je v současné době majetkem společnosti Plzeňská energetika a.s. Celkový instalovaný výkon elektrárny je 111,6 MW. Má velmi široké portfolio služeb: výroba elektřiny, poskytování podpůrných služeb (primární, výkonová regulace, start ze tmy, provoz v ostrovním režimu) a také centrální zásobování teplem. Vyrobená elektrická energie slouží k pokrytí vlastní spotřeby a přilehlého areálu a primárně k dodávce do distribuční sítě.

Elektrárna vyrábí teplo ve třech kotlích K 1, K 3, K 4 na hnědé uhlí a v jednom kotli K 5 se spaluje těžký topný olej. Pára je pak vedena do parních kondenzačních turbín turbogenerátorů TG 8, TG 9 a TG 10. Pára po expanzi vstupuje do kondenzátoru. Pro účely

zásobování teplem se využívá regulovaných odběrů páry z turbín. V následujících tabulkách uvádím provozní parametry synchronních strojů.

<b>Alternátor TG 8</b>	
Výkon [kW]	<b>30 500</b>
Výrobce	<b>Škoda</b>
Zapojení [-]	<b>Hvězda</b>
Napětí [V]	<b>6300 ± 5%</b>
Účinnost [-]	<b>0.8</b>
Frekvence [Hz]	<b>50</b>
Otáčky [ot/min]	<b>3000</b>

Tabulka 6.5 – Parametry TG 8

<b>Alternátor TG 9</b>	
Výkon [kW]	<b>28 000</b>
Výrobce	<b>Škoda</b>
Zapojení [-]	<b>Hvězda</b>
Napětí [V]	<b>6300 ± 5%</b>
Účinnost [-]	<b>0.7</b>
Frekvence [Hz]	<b>50</b>
Otáčky [ot/min]	<b>3000</b>

Tabulka 6.6 – Parametry TG 9

<b>Alternátor TG 10</b>	
Výkon [kW]	<b>33 000</b>
Výrobce	<b>Škoda</b>
Zapojení [-]	<b>Hvězda</b>
Napětí [V]	<b>6300 ± 5%</b>
Účinnost [-]	<b>0.75</b>
Frekvence [Hz]	<b>50</b>
Otáčky [ot/min]	<b>3000</b>

Tabulka 6.7 – Parametry TG 10

Výstupní napětí ze synchronních alternátorů je 6,3 kV a je transformátory TTG 8, TTG 9 a TTG 10 transformováno na úroveň 22 kV v rozvodně, která je umístěna v objektu

elektrárny. Všechny transformátory jsou olejové. Také umožňují regulaci napětí na sekundárních svorkách v rozmezí  $\pm 5\%$ . Jejich parametry jsou v následující tabulce. [13]

Transformace 6/22 kV			
Parametry	TTG 8	TTG 9	TTG 10
S [MVA]	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>20</b>
$U_1$ [kV]	<b>6,3</b>	<b>6,3</b>	<b>6,3</b>
$U_2$ [kV]	<b>23 <math>\pm</math> 5%</b>	<b>23 <math>\pm</math> 5%</b>	<b>23 <math>\pm</math> 5%</b>
$I_{2N}$ [kA]	<b>3,666</b>	<b>3,666</b>	<b>1,833</b>
$u_k$ [%]	<b>12,5</b>	<b>12,5</b>	<b>9,9</b>
Zapojení [-]	<b>YNd1, S1</b>	<b>YNd1</b>	<b>YNd1, S1</b>

Tabulka 6.8 – Parametry transformace 6/22 kV

V objektu elektrárny jsou instalovány také záložní dieselové motorgenerátorové zdroje o elektrickém výkonu 3 x 6,7 MW. Zajišťují zpravidla podpůrné služby pro společnost ČEPS – zajištění stability, bezpečnosti dodávky regulace a podobně. Řadí se mezi rychlé zdroje a dokáže dosáhnout svého maximálního výkonu do dvou minut od spuštění. Z důvodu náročnosti na množství paliva nelze provoz motorgenerátorů uvažovat dlouhodobě, ale jsou ideálním nástrojem pro velmi rychlou regulaci při zajišťování výkonové bilance a frekvence.

Pro potřeby sestavení náhradního schématu propojení elektrárny ELÚ III s Teplárnou je nutné vypočítat zkratový výkon  $S_k$  jednotlivých turbogenerátorů. Výpočet je v souladu s normou ČSN 60-909-0. Vztah pro výpočet zkratového proudu je následující

$$I_k = \frac{1,05 \cdot U_f}{X'_d} [A] \quad (6.9-1)$$

Z důvodu nedostatku parametrů pro výpočet zkratového výkonu vycházím z předpokladu, že relativní přechodnou reaktanci  $x'_d$  v procentech je možno považovat rovnou za 30%. Nejdříve je nutno přepočítat reaktanci z relativních hodnot na hodnoty absolutní

$$X'_d = \frac{x'_d}{100} \cdot \frac{U^2}{S_N} [\Omega] \quad (6.9-2)$$

$$X'_{d_{TGS}} = \frac{30}{100} \cdot \frac{6300^2}{\frac{30,5 \cdot 10^6}{0,8}} = 0,3123 [\Omega] \quad (6.9-3)$$



Obdobně pak pro TG 9 a TG 10 vyjdou přechodné reaktance

$$X'_{d\_TG9} = 0,2976[\Omega] \quad (6.9-4)$$

$$X'_{d\_TG10} = 0,2706[\Omega] \quad (6.9-5)$$

Dále lze vypočítat zkratový proud podle vztahu

$$I_k = \frac{1,05 \cdot U_f}{X'_d} [A] \quad (6.9-6)$$

$$I_{k\_TG8} = \frac{1,05 \cdot \frac{6300}{\sqrt{3}}}{0,3123} = 12\,229,17 [A] \quad (6.9-7)$$

Stejným způsobem i pro TG 9 a TG 10

$$I_{k\_TG9} = 12\,833,24 [A] \quad (6.9-8)$$

$$I_{k\_TG10} = 14\,113,72 [A] \quad (6.9-9)$$

Posledním vztahem se dostávám ke zkratovému výkonu TG 8

$$S_k = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_k [VA] \quad (6.9-10)$$

$$S_{k\_TG8} = \sqrt{3} \cdot 6300 \cdot 12229,17 = 133,437 [MVA] \quad (6.9-11)$$

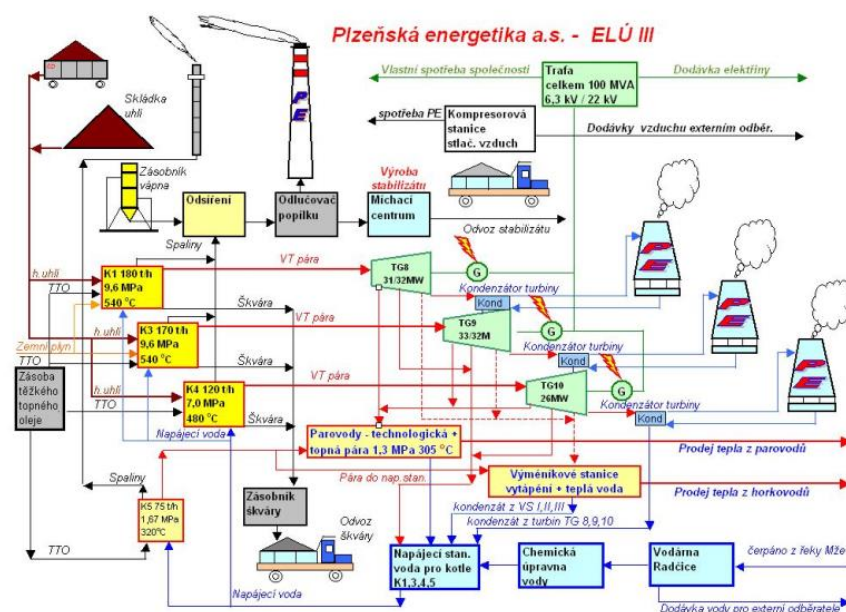
$$S_{k\_TG9} = \sqrt{3} \cdot 6300 \cdot 12833,24 = 140 [MVA] \quad (6.9-12)$$

$$S_{k\_TG10} = \sqrt{3} \cdot 6300 \cdot 14113,72 = 154 [MVA] \quad (6.9-13)$$

Z dostupných materiálů plyne, že při 31% zatížení ELÚ III – 35 MW po dobu jedné hodiny je vlastní spotřeba přibližně rovna 25% - 8,9 MW vzhledem k vyráběnému výkonu a 8% vzhledem k celkovému instalovanému výkonu. Při zatížení 63% - 70,3 MW po dobu jedné hodiny je vlastní spotřeba rovna 16% - 11,68 MW vzhledem k vyráběnému výkonu a 10,5% vzhledem k celkovému instalovanému výkonu. [13]

Předpokládám, že při nárůstu výkonu o další třetinu vzroste přímo úměrně a lineárně i vlastní spotřeba o 1-2 %. Při maximálním výkonu by tedy byla vlastní spotřeba rovna 12%, tedy 13,3 MW, což odpovídá při účinníku  $\cos \varphi = 0,95$  zdánlivému výkonu 14 MVA. Z této skutečnosti plyne, že maximální dodávaný zdánlivý výkon do sítě distribuční soustavy (úroveň 110 kV) je  $S_{N\_ELÚ\ III}$  roven 108,125 MVA.

Z hodnot jmenovitých výkonů vedení na úrovni 110 kV plyne, že jsou na tento výkon dimenzována a mohou tedy bezpečně přenést výkon do Teplárny. Transformátory TTG8, TTG9 a TTG10 jsou bohužel dimenzovány v součtu na celkový zdánlivý výkon 100 MVA. V areálu, kde se nachází i samotná ELÚ III je však umístěna i spotřeba v podobě společností Škoda, které elektrickou energii spotřebovávají na úrovni 22 kV, lze tedy předpokládat, že výkon přes 100 MVA nebude nutno nikdy přenášet přes vedení 110 kV. V případě vzniku krizového stavu bude areál Škody snižovat či dokonce zastavovat výrobu, což nebude skokový proces a na jeho konci bude zajisté stále nějaký příkon. V případě nutnosti by se celkem jednalo o přetížení kolem 8 %.



Obr. 6.4 – Schéma výroby v ELÚ III (převzato z <http://www.pe.cz>)

## 6.10 TEPLÁRNA PLZEŇ

V teplárenském zdroji se tepelná energie vyrábí v kotlích, které využívají různé palivo. Kotle K2 a K3 využívají hnědé uhlí a standardně pracují jen v zimním období pro pokrytí potřeb centrálního zásobování teplem. Kotle K4 a K5 používají hnědé uhlí také a spolu s kotli K6 (spaluje hnědé uhlí a biomasu) a K7 (spaluje pouze biomasu) zajišťují výrobu páry pro strojovnu. Kotle K4, K5 a K6 dodávají páru pro turbosoustrojí TG1 a TG2 – blok 1. Kotel K7 dodává páru pro turbosoustrojí TG3 – také samostatný blok. [15]

Celkový instalovaný elektrický výkon na třech turbosoustrojích je 150,5 MW. Výkony jednotlivých turbosoustrojí jsou zapsány v následující tabulce. Napěťová úroveň na svorkách generátorů je 10,5 kV.

Název turbosoustrojí	Elektrický výkon P [MW]	U [kV]
TG1	70	10,5
TG2	67	10,5
TG3	13,5	10,5

Tabulka 6.9 – Turbogenerátorů PT

Výkon je vyvedený z elektrárny třemi transformátory TTG1, TTG2 a TTG3 do distribuční sítě (110 kV). Parametry transformátorů jsou v následující tabulce:

Transformace 10,5/110 kV			
Parametry	TTG 1	TTG 2	TTG 3
S [MVA]	63	80	16
U <sub>1</sub> [kV]	10,5	10,5	10,5
U <sub>2</sub> [kV]	110	110	110

Tabulka 6.10 – Parametry transformace 10,5/110 kV

Detailní data vlastní spotřeby bohužel nejsou k dispozici, ale vycházím z předpokladu, že při plné výrobě musí fungovat nejdůležitější stroje zajišťující provoz, které mají obecně v elektrárnách největší podíl na vlastní spotřebě. Následující tabulka je jejich výčtem. [14]

Zařízení	Elektrický výkon P [MW]
Horkovodní čerpadla	5,8
Napáječky kotlů	8,88
Kouřové ventilátory	4,54
Uhelné mlýny	2,1

Tabulka 6.11 – Parametry vlastní spotřeby PT

Celková hodnota elektrického výkonu vlastní spotřeby je součtem výše psaných zařízení a dalších obslužných zařízení (dopravníky, řízení atd.) a pohybuje se kolem 26 MW. To odpovídá 17,27 % z celkového instalovaného výkonu. Využitelný výkon pro potřeby zásobování elektrickou energií je tedy 124,5 MW. Při uvažování účinníku  $\cos \varphi = 0,95$  se pak zdánlivý výkon  $S_{N\_Tep}$  rovná

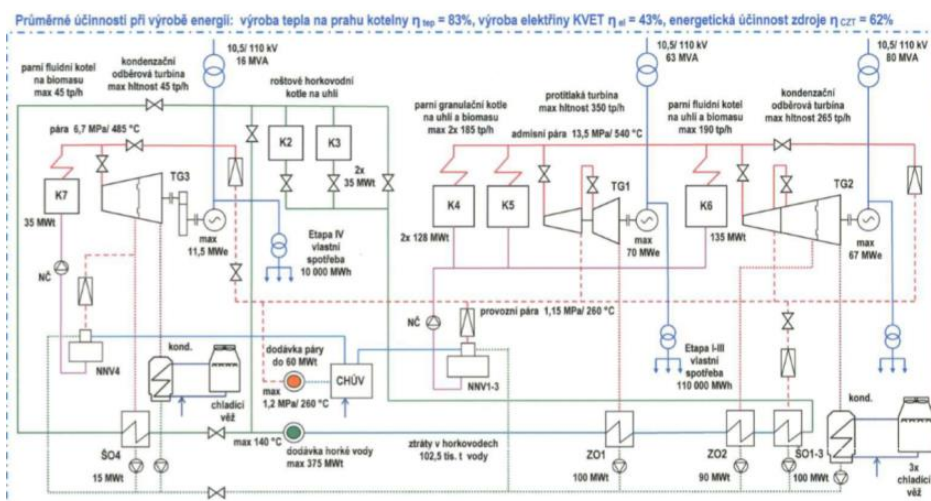
$$S_{N\_tep} = \frac{P_{N\_Tep}}{\cos \varphi} = \frac{124,5}{0,95} = 131,05 \text{ [MVA]} \quad (6.10-1)$$

Výstupní transformátory jsou na tento výkon velmi dobře dimenzovány.

Celkový zdánlivý elektrický výkon obou elektráren dodávaný do sítě je tedy roven

$$S_{N\_celk} = S_{N\_ELÚ III} + S_{N\_tep} = 108,125 + 131,05 = 233,175 \text{ [MVA]} \quad (6.10-2)$$

Plzeňská teplárenská je také dodavatelem podpůrných služeb pro provozovatele přenosové soustavy – ČEPS, a.s. Rezervuje tedy a dodává primární regulaci frekvence, sekundární regulaci výkonu a minutovou zálohu MZ 15+. Tyto skutečnosti vypovídají o schopnosti rychlé odezvy a regulaci, které jsou v provozu v ostrovním režimu nutné k udržení výkonové bilance a mezních hodnot frekvence.



Obr. 6.5 – Schéma výroby v PT (převzato z <http://www.plzenskateplarenska.cz>)

### 6.11 Analýza spotřeby

Spotřebu elektrické energie v Plzni lze rozdělit do 5 sektorů:

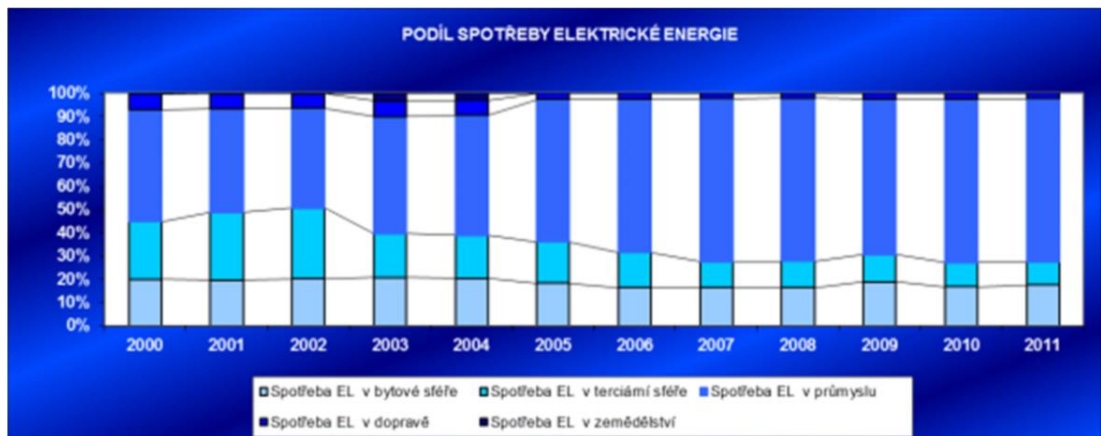
- Spotřeba v bytové sféře
- Spotřeba v terciální sféře
- Spotřeba v průmyslu
- Spotřeba v dopravě
- Spotřeba v zemědělství

Největší podíl na spotřebě má pochopitelně i z historického hlediska a tradice města průmysl. Od poklesu v roce 2009 v průmyslové sféře z důvodu hospodářské krize spotřeba mírně roste, má však každý rok vyrovnaný charakter.

Bytová sféra prochází rozvojem a zároveň i modernizací, tudíž na jedné straně roste počet nových staveb a s tím i nárůst spotřebičů, na druhou stranu modernizace přináší energeticky mnohem méně náročnější budovy a spotřebiče. Odchylka se pohybuje v rozmezí  $\pm 4\%$ .

V terciální sféře došlo v letech 2007 až 2011 k poklesu spotřeby elektřiny o 37 %. Důvodem jsou modernizace a energeticky úsporná opatření.

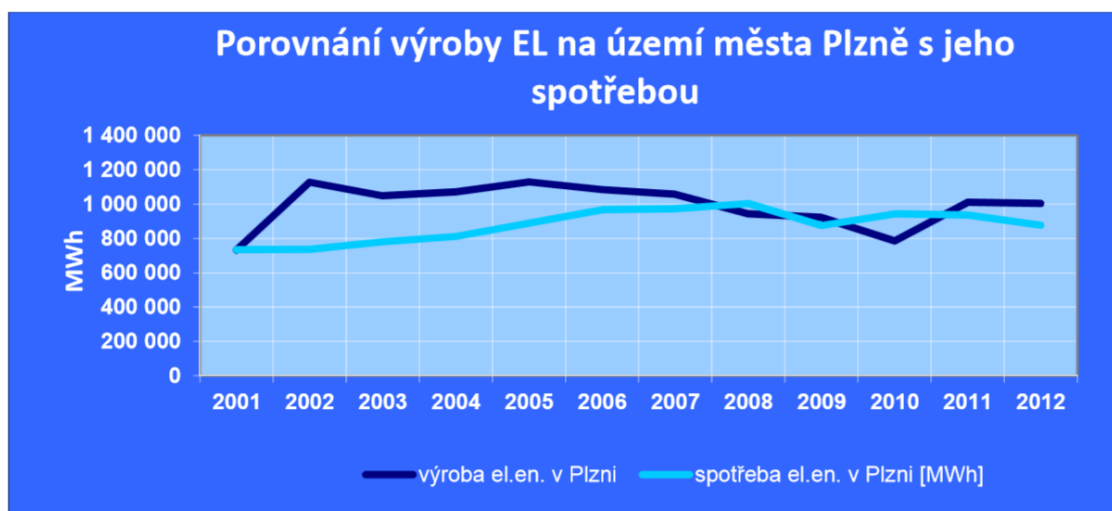
Doprava (trakce) na území města Plzně snížila v letech 2007 až 2011 spotřebu elektrické energie o 8 % i navzdory faktu, že se počet najetých kilometrů zvyšuje. Tohoto výsledku je dosaženo využitím vozidel s rekuperací elektrické energie – každý rok je zařazeno více než 10% vozidel s rekuperací z celkové vozové základny.



Obr. 6.6 – Podíl spotřeby elektrické energie (převzato z [26])

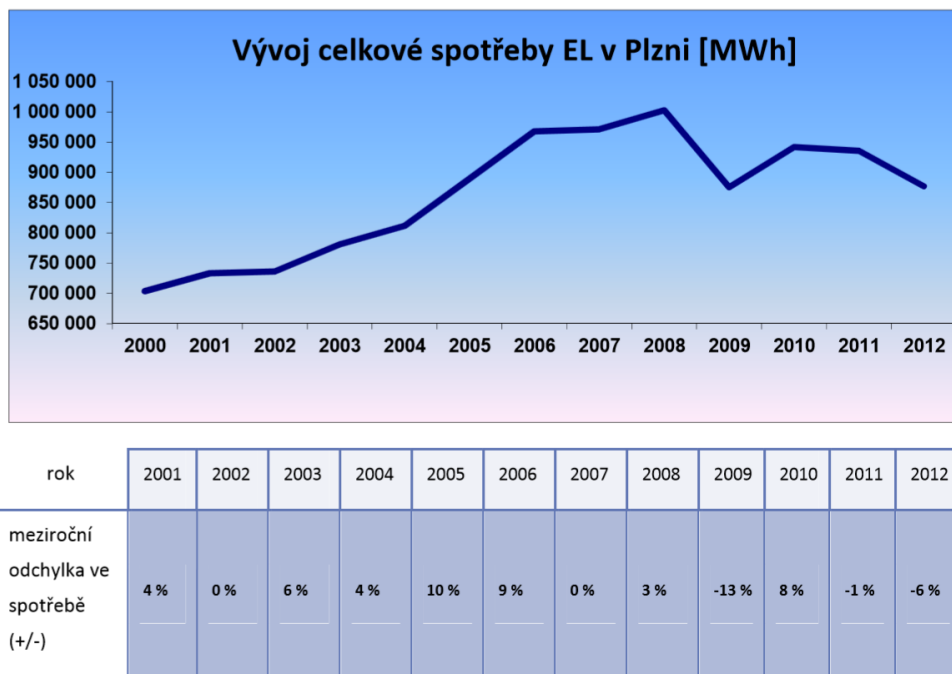
Z dostupných materiálů plyne, že celková spotřeba elektrické energie od roku 2011 dále klesá – v roce 2012 o 6 % (oproti roku 2011). Dalším pozitivem pro provoz v ostrovním režimu je fakt, že se na území města Plzně více elektrické energie vyrobí, než se spotřebuje (viz obrázek). [26]

Kladnou bilanci potvrzuje i skutečnost, že společností Plzeňská teplárenská, a.s. a ČEZ a.s. se v minulých letech úspěšně podařilo na krátký čas odzkoušet a udržet město v ostrovním provozu.



Obr. 6.7 – Porovnání výroby se spotřebou (převzato z [11])

Celková spotřeba města za rok se pohybuje mezi 900 až 950 GWh. Vývoj a podíl je zobrazen na následujících obrázcích. [11]



Obr. 6.8 – Vývoj celkové spotřeby v Plzni (převzato z [11])

## 6.12 Rozdělení dle SZD

Součástí provozní dokumentace energetického systému je také rozpis odběru elektrické energie rozdělený dle stupně zabezpečení dodávky. Tyto dokumenty jsou bohužel neveřejné a pro využití v této diplomové práci je nebylo možné využít.

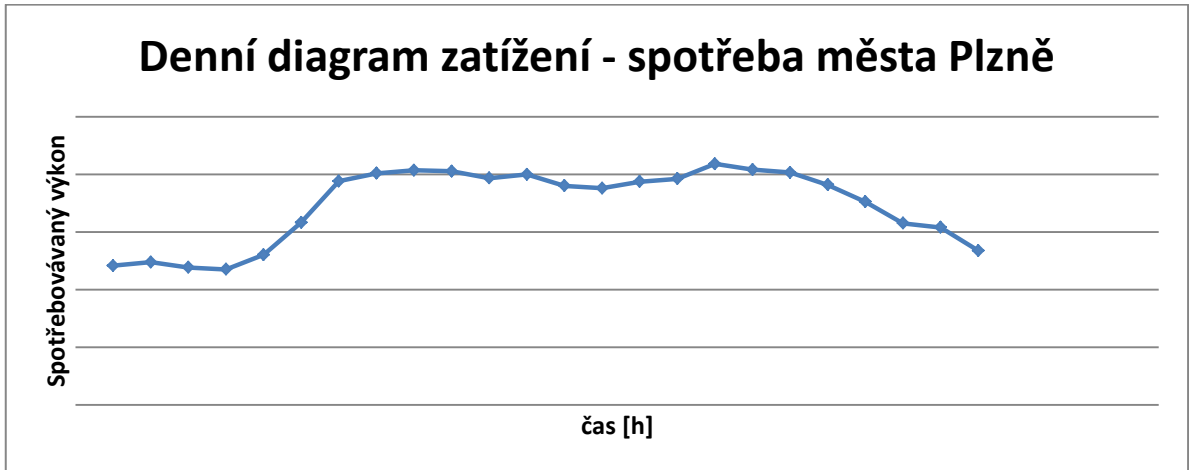
Přesto je však nutné pamatovat, že v případě neschopnosti pokrytí energetických potřeb celého systému musí být zajištěna i v ostrovním provozu dodávka energie do objektů jako jsou nemocnice (Lochtín, Bory) nebo musí být zajištěno bezpečné odstavení velkých provozů jako například hutě, slévárny, železárny, kde výpadek znamená ohrožení životů nebo zdraví či nevratné poškození zařízení (Škoda, Brush).

## 6.13 DDZ

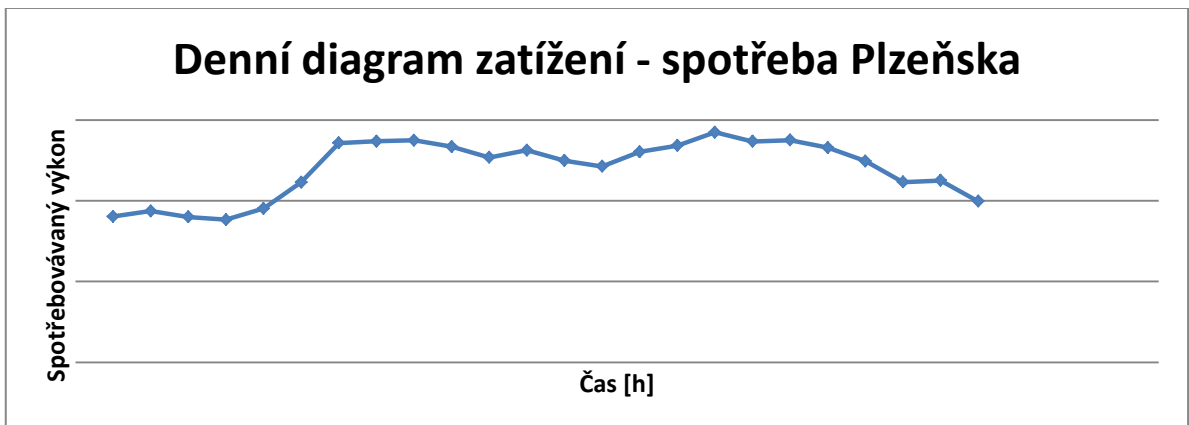
Z denního diagramu zatížení plyne denní spotřeba území města Plzně a také přilehlého okolí. Vzhledem k faktu, že informace, ze kterých je čerpáno jsou obsaženy v interních firemních dokumentech, uvádím denní diagram zatížení pouze orientační bez označení os. Záměrně není uvedeno, o jaký výkon se jedná. Uvádím diagramy dva, jeden je pro vnitřní

spotřebu města Plzně a druhý při započtení spotřeby okolí (nelze specifikovat – součástí interní dokumentace společnosti ČEZ Distribuce). [17]

Pro potřeby simulace provozu v ostrovním režimu vycházím z měření výkonů v jednotlivých elektrických stanicích na transformátorech 110 kV / 22 kV, více bude upřesněno v kapitole zabývající se simulací v prostředí PowerWorld.



Obr. 6.9 – Denní diagram zatížení – spotřeba jen města

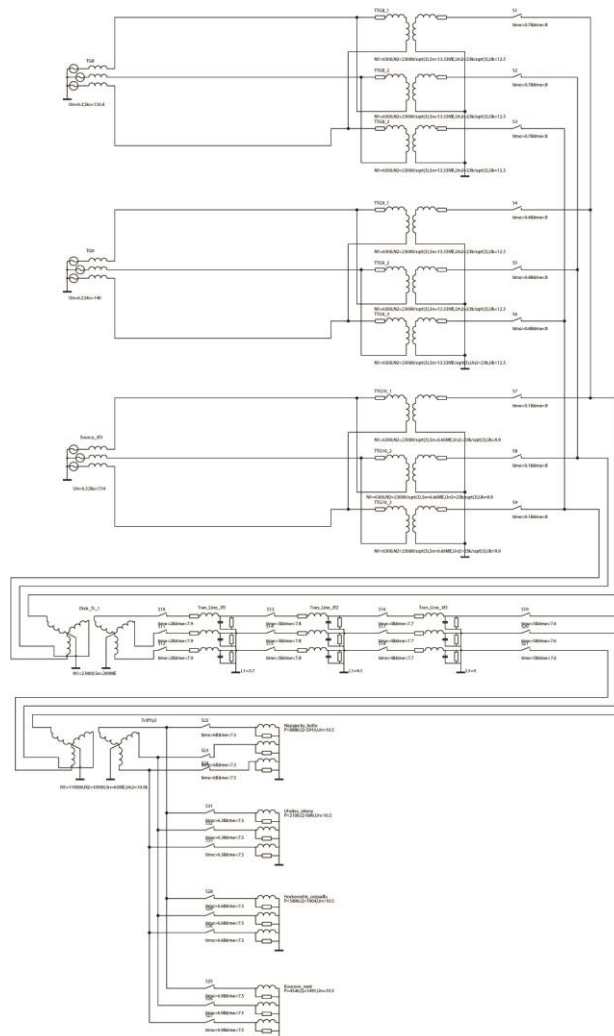


Obr. 6.10 – Denní diagram zatížení – spotřeba Plzeňska

## 7 Analýza provozních stavů

Jak bylo řešeno již v předchozích kapitolách, stavů, ze kterých a do kterých se může energetický systém dostat v průběhu přechodu do ostrovního režimu je velké množství. Některé jsou více pravděpodobné a některé méně. Na mnoho z nich se lze předem připravit, ovšem některé jsou nepředvídatelné a operativně jsou mnohdy obtížně odstranitelné. V této kapitole se věnuji stavům, které předcházejí ostrovnímu provozu nebo ze kterých se ostrovní provoz spouští. Také diskutuji možné jevy, které mohou při přechodu nastat. S tím je samozřejmě také spojeno řešení vodivého propojení společně pracujících zdrojů elektrické energie.

### 7.1 Náhradní schéma modelu v prostředí DYNAST



Obr. 7.1 – Náhradní schéma modelu v prostředí Dynast



## 7.2 Popis spínání

Spínací proces začíná připojováním jednotlivých turbosoustrojí do úrovně 110 kV, tedy připojení k distribučnímu transformátoru 22 kV / 110 kV. Turbosoustrojí TTG 10 se připojí v čase 0,1 s, dále následuje TTG 9 v čase 0,4 s a jako poslední TTG 8 v čase 0,7 s.

K připojení prvního vedení naprázdno dochází v čase 2 s, druhé vedení 3 s a poslední vedení v čase 4 s. Když jsou vedení pod napětím, dochází k připojení transformátoru umístěného v objektu PT v čase 5 s.

Posledním krokem při zapínacím procesu je zapojení vlastní spotřeby v objektu PT – v čase 6 s napáječky kotlů, 6,3 s uhelné mlýny, 6,6 s horkovodní čerpadla a jako poslední kouřové ventilátory v čase 6,9 s.

Simulace v prostředí Dynast zkoumá i chování soustavy při případném výpadku zátěže v důsledku poruchy nebo havárie na zařízení. Dochází k výpadku 100 % zátěže v čase 7,5 s.

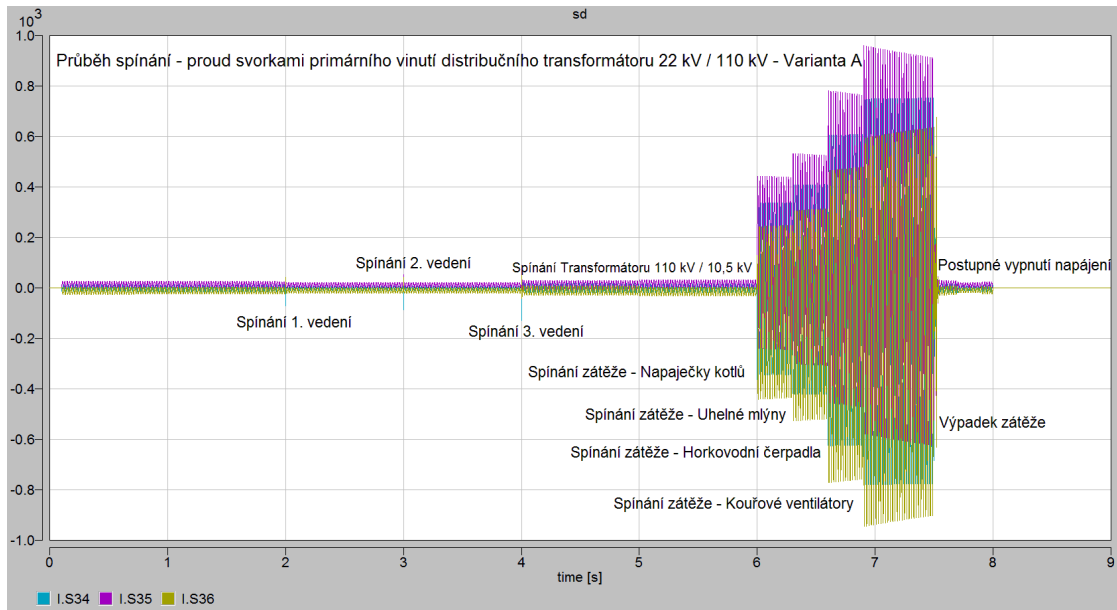
Na tento stav v simulaci navazuje vypínání celé soustavy – v 7,6 s transformátor v objektu PT, v 7,7 s třetí vedení 110 kV, v 7,8 s druhé vedení 110 kV a v 7,9 s první vedení 110 kV. Po tomto následuje společné vypnutí výroby od distribučního transformátoru v čase 8 s. Tímto simulace v prostředí DYNAST končí.

Časy spínání jsem určil empiricky, kdy dojde k utlumení přechodového jevu a další spínání tím není ovlivněno. Po ukončení simulace probírám výběr nejlepšího vedení pro simulaci provozu vycházejícího z reálných dat DDZ v prostředí PowerWorld.

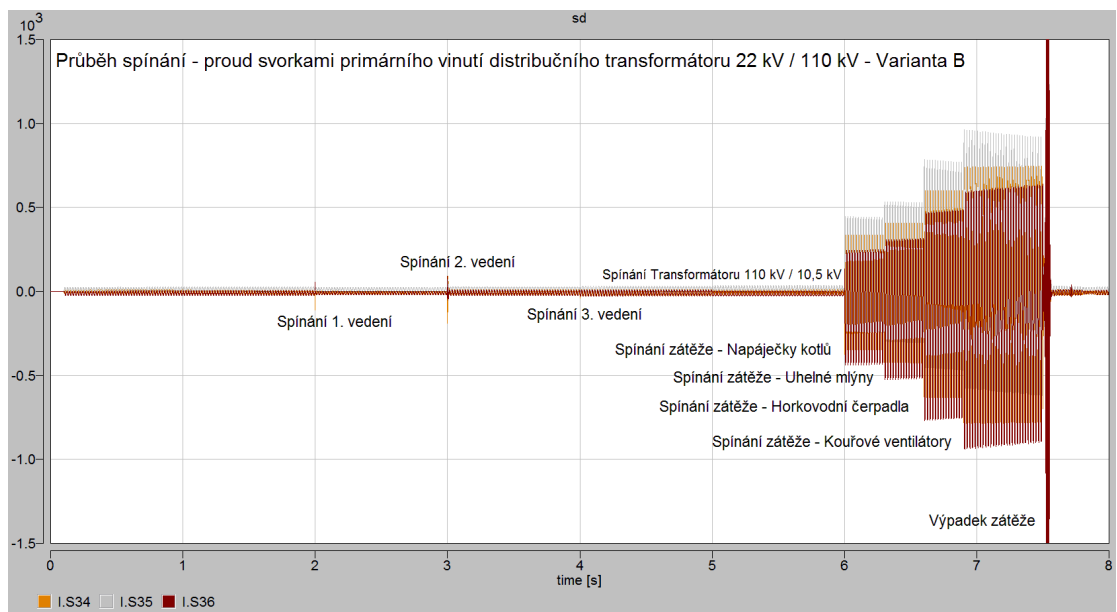
## 7.3 Spínání výroby ELÚ III

Průběh spínacího procesu byl namodelován pro všechny varianty vedení (A, B, C). V případě Varianty C se jedná o záložní vedení, proto bude i navzdory dobrým výsledkům uvažováno jako záložní. Výběr vhodnější ze dvou vedení proběhne na základě lepších výsledků při spínání, výpadku zátěže a vypínání.

V této kapitole jsou vybrány charakteristické průběhy z modelování v prostředí Dynast, na kterých názorně uvádím rozdíly v jednotlivých variantách vedení – je to především kvůli rozsahu samotné práce. Všechny materiály každé varianty jsou poskytnuty v rámci příloh tohoto dokumentu v plnohodnotné velikosti.



Obr. 7.2 – Celkový průběh spínání – Varianta A

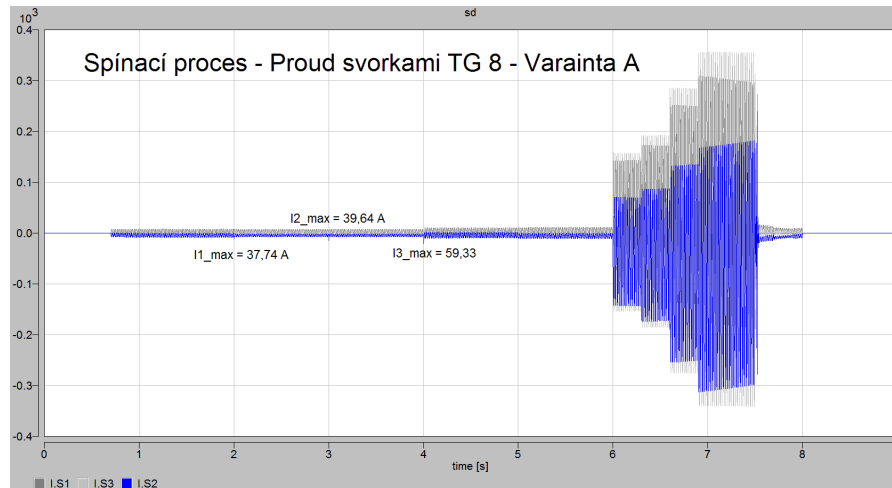


Obr. 7.3 – Celkový průběh spínání – Varianta B

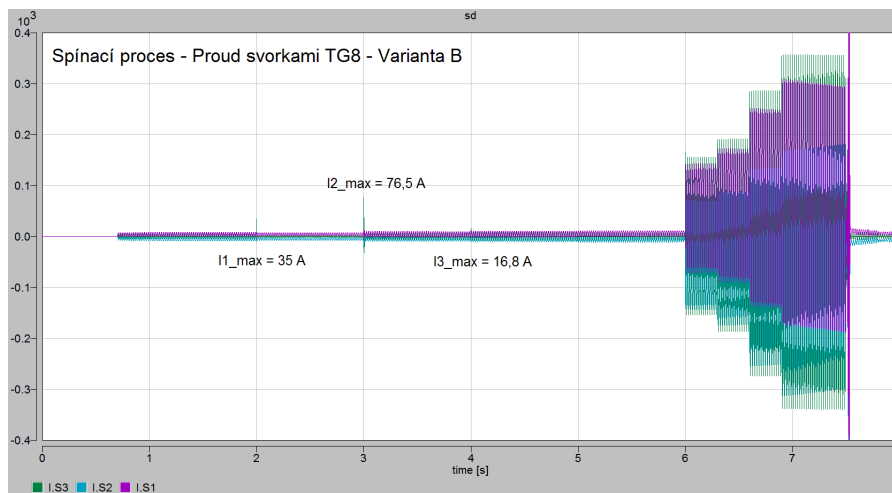
Na obrázcích 8.1 a 8.2 je vidět proud protékající svorkami TG 8, pro výběr vedení je rozhodující především jeho chování ve stavu naprázdno, ale jak je patrné výběr vedení by měl vliv i na průběh přechodového děje při výpadku zátěže na konci spínání, kde u varianty B oproti variantě A dochází k velkému rozkmitu proudu nad maximální hodnotu předchozího provozního proudu.

Na následujících obrázcích 8.3 a 8.4 jsou zvýrazněny proudy, které protékají svorkami TG 8 v průběhu spínání vedení jednotlivých variant. Lze říci, že v tomto ohledu jsou si varianty podobné, protože maximální proud, který proteče v okamžiku sepnutí jednoho

z vedení u varianty A je roven 59,33 A, u varianty je roven 76,5 A, z hlediska doby trvání tohoto proudu do 0,05 s a v porovnání s provozními proudy nijak provoz neohrožuje a nelze tedy na základě tohoto faktu rozhodnout, které vedení má být vybráno. U TG 9 a TG 10 je průběh téměř totožný s TG 8. V případě četnosti těchto proudových skoků hrozí mechanické namáhání turbosoustrojí – zákmity.

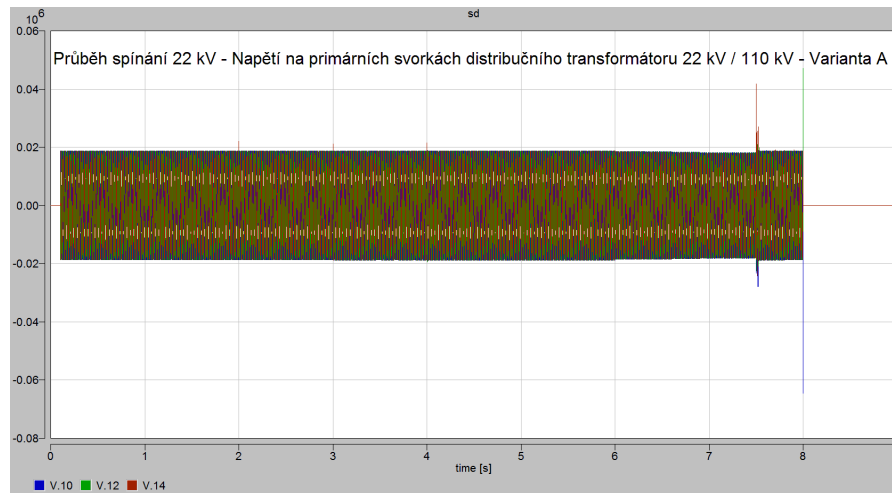


Obr. 7.4 – Spínací proces – Proud svorkami TG 8 – Varianta A



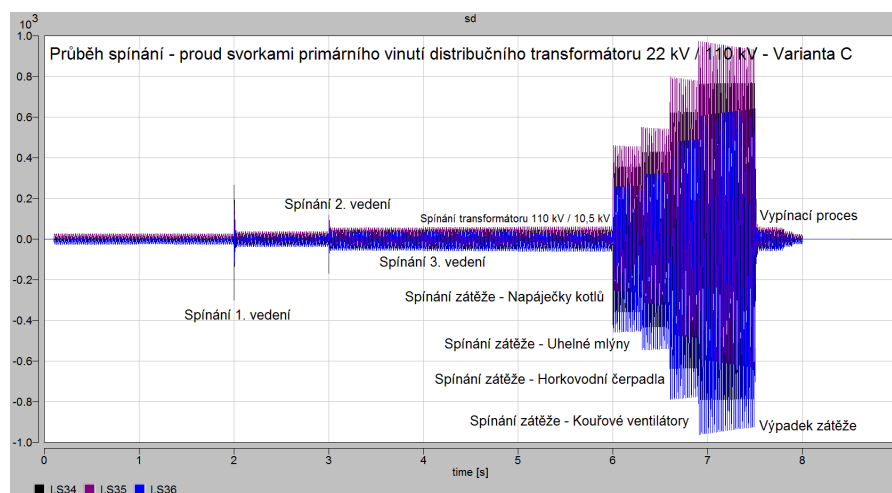
Obr. 7.5 – Spínací proces – Proud svorkami TG 8 – Varianta B

Pro ilustraci uvádím průběh napětí na úrovni 22 kV – Varianta A. V sekundách 2, 3 a 4 je vidět přepětí vytvořené spínáním. Detail přepětí bude diskutován v následující kapitole. Dále je vidět pokles napětí v důsledku připínání spotřeby od šesté sekundy a v čase 7,5 s je patrný výpadek zátěže.



Obr. 7.6 – Napětí na straně 22 kV – Průběh spínání – Varianta A

Na dalším obrázku je vidět proud primárními svorkami distribučními transformátory v průběhu spínání. Oproti obr 8.1 a 8.2 je patrné proudové maximum v okamžiku sepnutí 1. vedení.

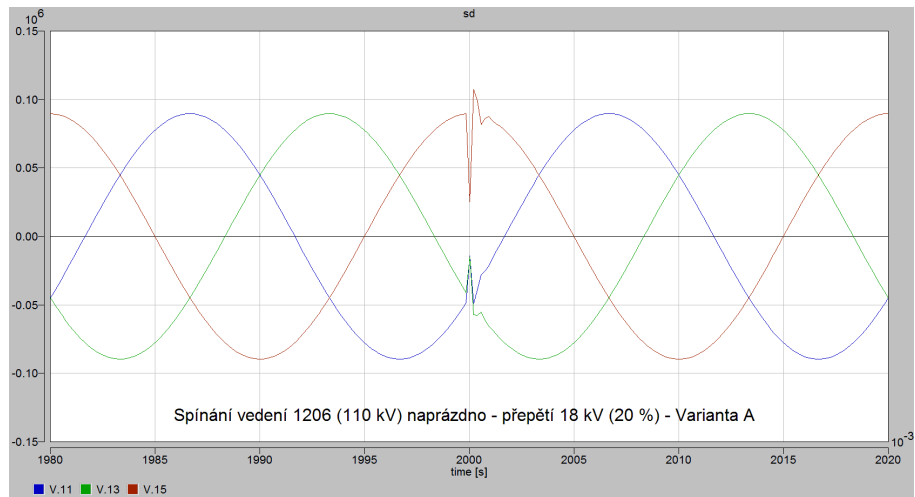


Obr. 7.7 – Celkový průběh spínání – Varianta C

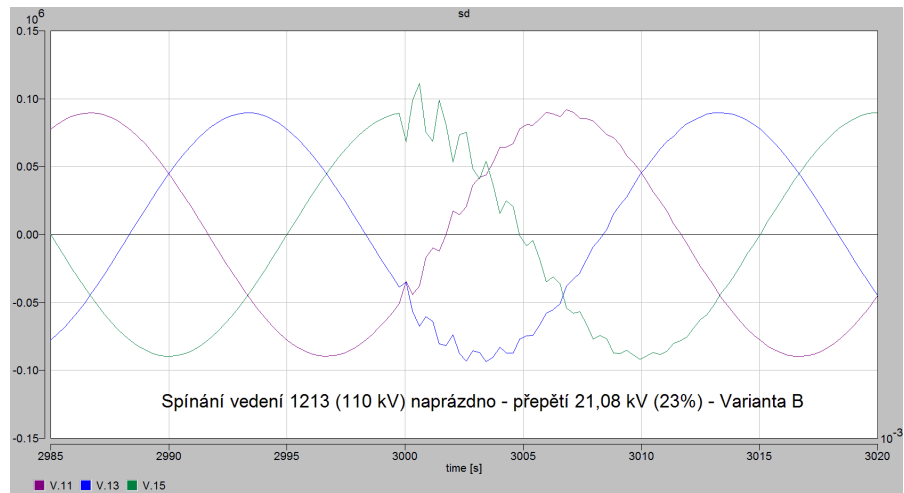
#### 7.4 Detail vedení naprázdno

V této podkapitole se zabývám porovnáním jednotlivých variant z hlediska přepětí v průběhu spínání vedení naprázdno na úrovni 110 kV. Přepětí v případě spínání má mnoho neblahých vlivů, jako například nechtěné vybavení ochran, namáhání izolace, poškození izolace, přeskoky nebo možné poškození elektronických systémů vlivem silného impulsu.

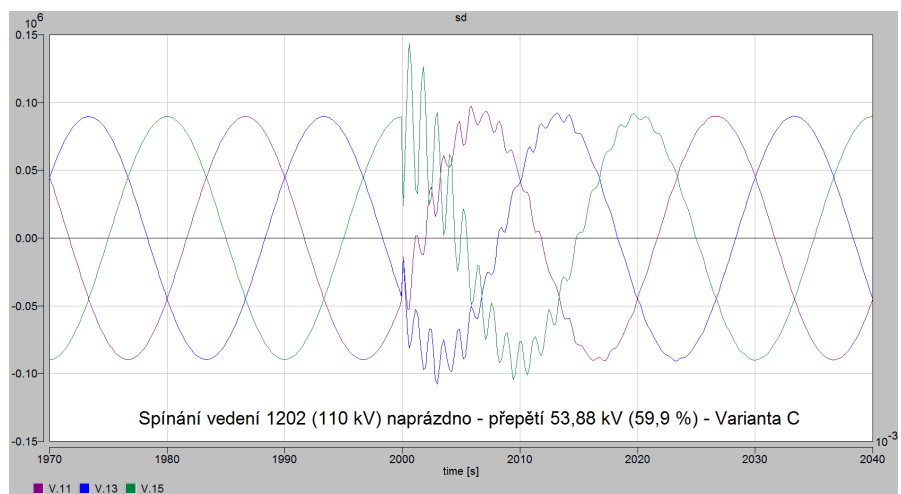
Na následujících třech obrázcích je možné vidět detail spínání vedení jednotlivých variant. Jsou vybrány vedení, při jejichž sepnutí se objevilo největší přepětí. Největší přepětí se objeví na variantě C – 53,88 kV (59,9%), poté na variantě B – 21,08 kV (23%) a na variantě A – 18 kV (20%). Přepětí se pohybuje od 1% - 60%.



Obr. 7.8 – Přepětí v průběhu spínání 1206 - Varianta A



Obr. 7.9 - Přepětí v průběhu spínání 1213 - Varianta B

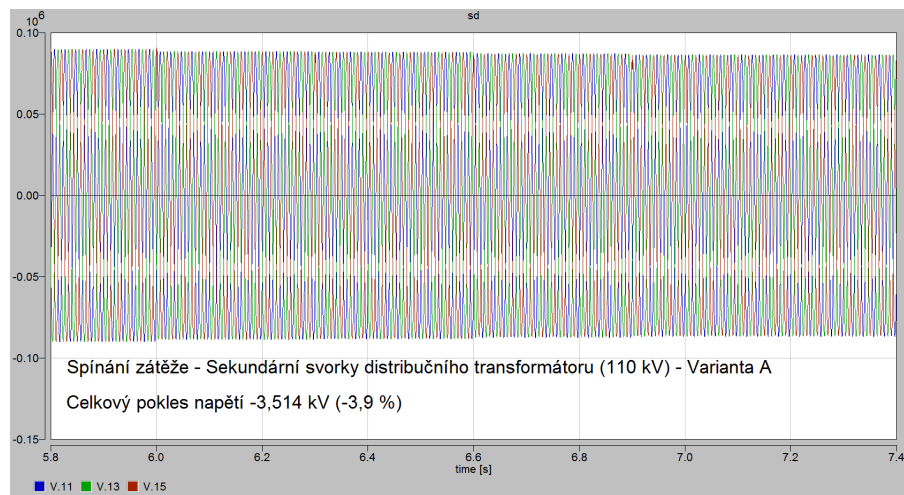


Obr. 7.10 - Přepětí v průběhu spínání 1202 - Varianta C

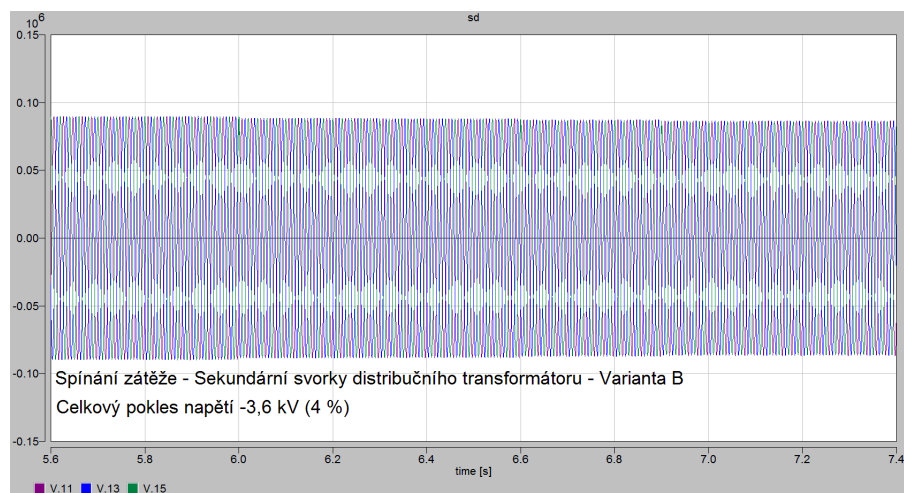
### 7.5 Pokles napětí při spínání zátěže (Vlastní spotřeby PT)

Dalším rozhodujícím faktem je úbytek napětí, který se ve stavu naprázdno projevuje především vlivem délky vedení a je také rozhodujícím faktem při výběru vodivé cesty, dále je pokles dán také zátěží připojenou na konci vedení. V případě vysoké tvrdosti zdroje a transformátorů je pokles malý, nesmí však přesáhnout 10 % jmenovité hodnoty. Při takto krátkých spojeních jsem nepředpokládal velký úbytek při provozu naprázdno, ale spíše při zatíženém stavu.

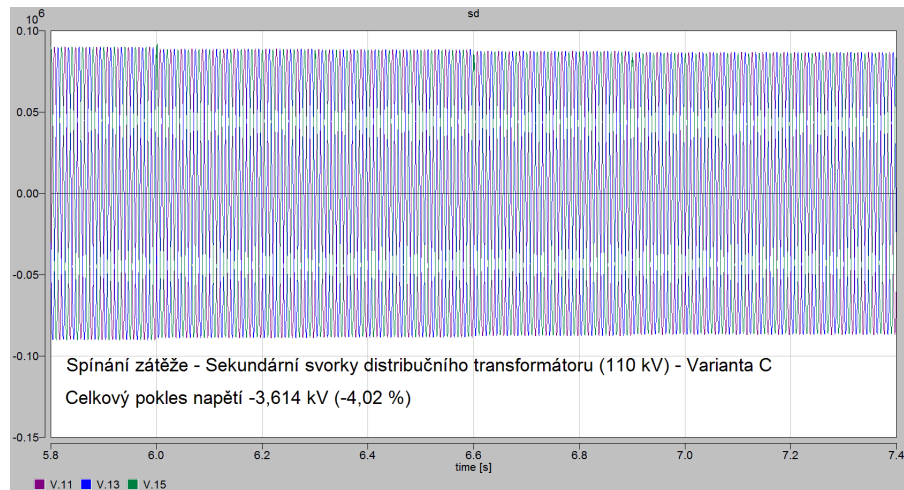
Pokles napětí je u všech variant téměř stejný a pohybuje se kolem 4 %. Nejlépe je na tom varianta A s poklesem jen 3,9 %. U všech variant bych navrhol využití regulace napětí pomocí odboček na transformátoru, které regulaci v rozsahu  $\pm 5\%$  standardně zvládají.



Obr. 7.11 – Pokles napětí – Varianta A



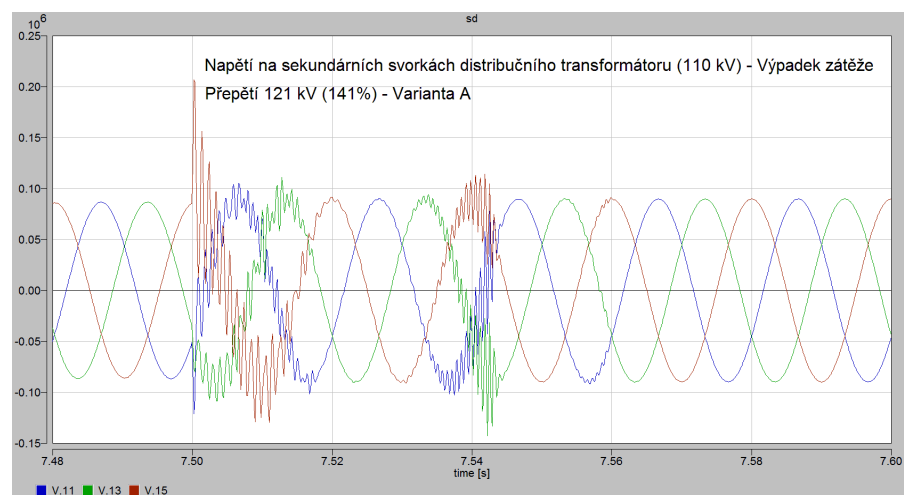
Obr. 7.12 – Pokles napětí – Varianta B



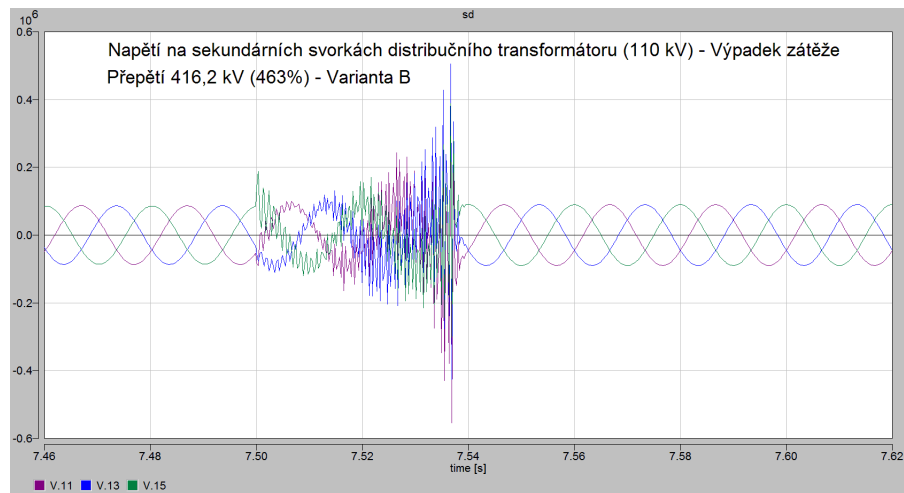
Obr. 7.13 – Pokles napětí – Varianta C

## 7.6 Výpadek zátěže a vypínání

V případě výpadku zátěže v důsledku havárie nebo chyby obsluhy dojde k odlehčení výroby o přibližně 26 MW, což představuje přibližně čtvrtinu instalovaného výkonu. Ve chvíli, kdy je objekt PT jediným odběratelem elektrické energie z ELÚ III je tento výpadek téměř neregulovatelný (dle neoficiálních informací v současné době na skokovém pádu do vlastní spotřeby ELÚ III pracuje) a představuje největší ohrožení při rozběhu ostrovního provozu. Tomuto stavu se musí za každou cenu předcházet. Jak vypovídá simulace, účinky proudů a napětí by byly pro zařízení v elektrárnách a také zařízení zajišťující přenos fatální a destrukční.



Obr. 7.14 – Napětí při výpadku zátěže – Varianta A

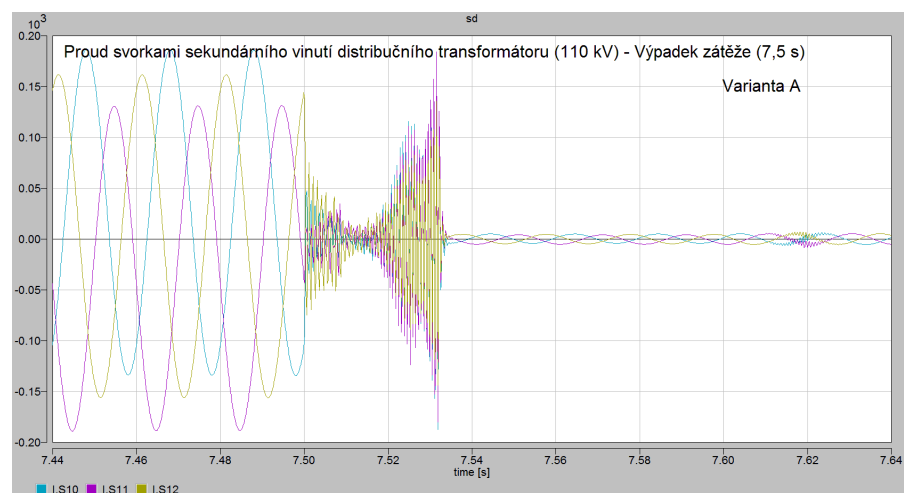


Obr. 7.15 – Napětí při výpadku zátěže – Varianta B

Na předchozích obrázcích je vidět průběh přechodového děje při výpadku zátěže. V obou případech by došlo k vybavení všech přepětových ochranných zařízení a nejspíše k poškození mnoha zařízení v elektrárnách i stanicích a vedení samotného. Děj odeznívá až po 0,04 s, vyznačuje se vysokým frekvenčním obsahem, který má velmi rušivé projevy a může způsobit selhání instalovaných ochranných zařízení. U varianty C se přepětí pohybuje kolem 100%.

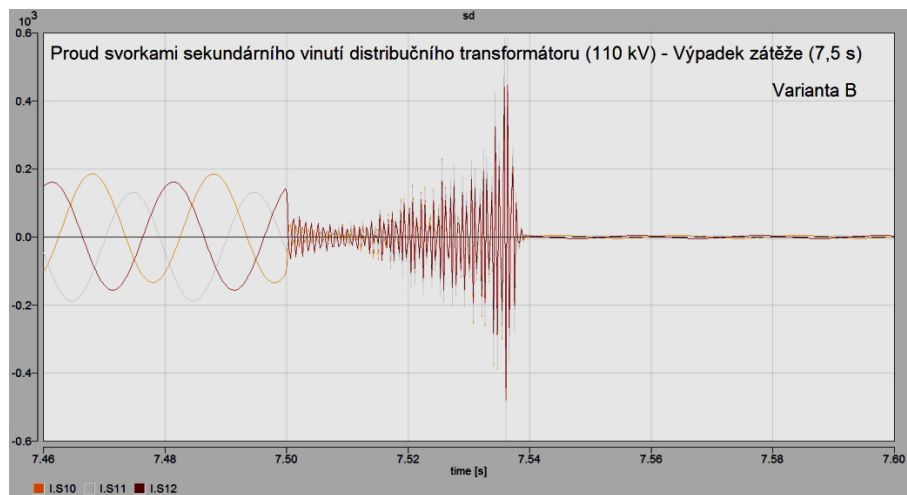
Na obrázcích 8.14 a 8.15 je vidět průběh proudu po výpadku zátěže. V čase 7,5 až 7,51 dochází k poklesu proudu a do času přibližně 7,54 dochází k opětovnému nárůstu nad předchozí maximální hodnotu. Tento časový úsek představuje ohromnou energii, která se může projevit převážně mechanicky, dojde tedy k mechanickému poškození vypínačů, vedení, pevně uložených kabelů a podobně. U varianty V dojde dokonce k nárůstu na dvojnásobek maximální hodnoty proudu při zapojené zátěži.

Mírnější odezvu na výpadek zátěže má varianta A. Překvapivě se dobře chová při tomto stavu varianta C, kde nedojde k tak velkému nárůstu proudu.



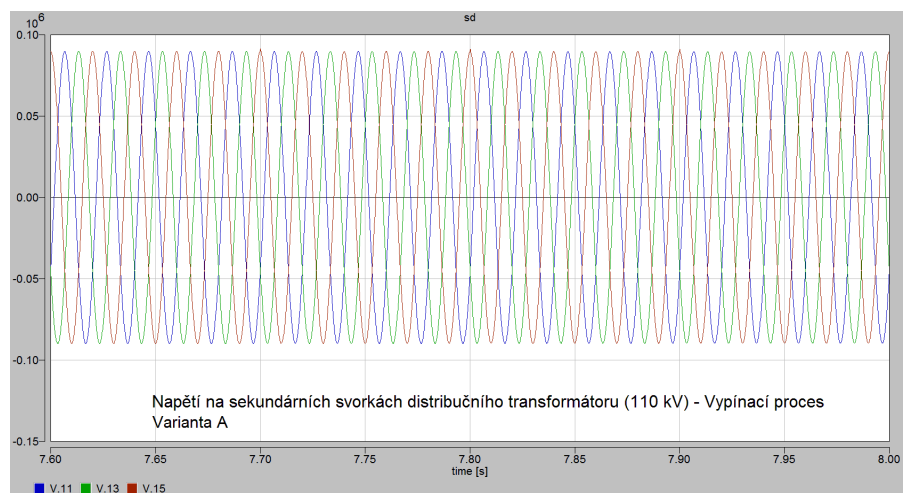
Obr. 7.16 – Proud při výpadku zátěže – Varianta A



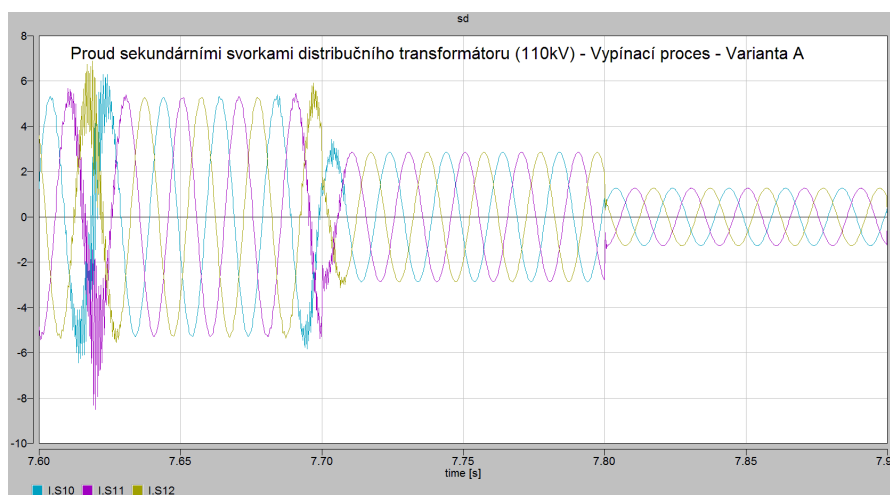


Obr. 7.17 – Proud při výpadku zátěže – Varianta B

Ilustrativně uvádím průběh napětí na distribučním transformátoru v průběhu vypínacího procesu. Všechny tři varianty zvládají vypínání bez větších napěťových kmitů. Dochází jen k deformaci sinusového průběhu proudu, jako například u varianty A do doby 0,01 s. Na tyto jevy je vedení z podstaty fungování v normálním provozu dimenzováno.



Obr. 7.18 – Napětí při vypínacím procesu – Varianta A



Obr. 7.19 – Proud při vypínacím procesu – Varianta A

## 7.7 Vyhodnocení

Ze simulace zabývající se především přechodovými jevy při zajišťování napájení vlastní spotřeby objektu PT plyne, že největším rizikem je výpadek zátěže, která může osahovat až 26 MW. Následky tohoto stavu by zapříčinily s největší pravděpodobností neschopnost pokračovat v přípravě na ostrovní provoz.

Z hlediska přepětí při spínání vedení naprázdno jsou na tom vedení a jednotlivé varianty velmi podobně. Jako vhodnější se jeví Varianta A, která by potřebovala ještě detailnější analýzu s vlivem ochrany a různých prvků, pro obecný popis však výsledky simulace stačí. Také je potvrzeno, že varianta C může být uvažována jako náhradní vedení v případě poškození linky 1206.

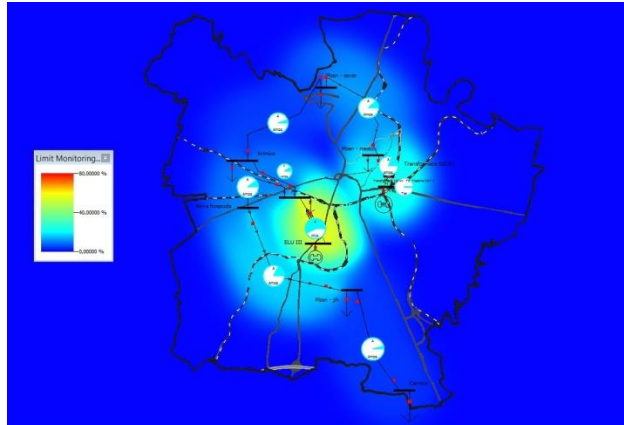
## 7.8 Modelování provozu

Na základě rozhodnutí o využití varianty A pro spojení objektu ELÚ III s PT je možné začít modelovat samotný provoz v ostrovním režimu. Všechny dostupné hodnoty vedení, dále hodnoty turbosoustrojí a transformátorů vloženy do prostředí PowerWorld. Pro přenos elektrické energie na úrovni 110 kV je vždy uvažováno jedno dvojitě vedení o stejných provozních parametrech jako varianta A.

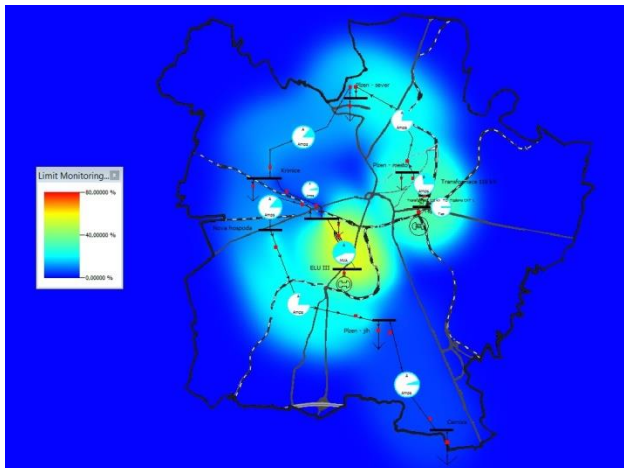
Dále je využito měření toku výkonů při transformaci 110 kV / 22 kV. Součet těchto výkonů představuje celkový aktuální příkon města Plzně a okolí. Vzhledem k interní povaze dat o výkonech není možné uvádět hodnoty výkonů a časy. Proto jsem volil funkci contouring v prostředí PowerWorld, která vytvoří barevně proměnou mapu, symbolizující procentuální

vytížení prvku – výroba, přenos, transformace, uzel atd. Pro názornost jsem volil změnu barev od modré (nejnižší zatížení) k červené (největší zatížení) v rozsahu 0 % - 80 %.

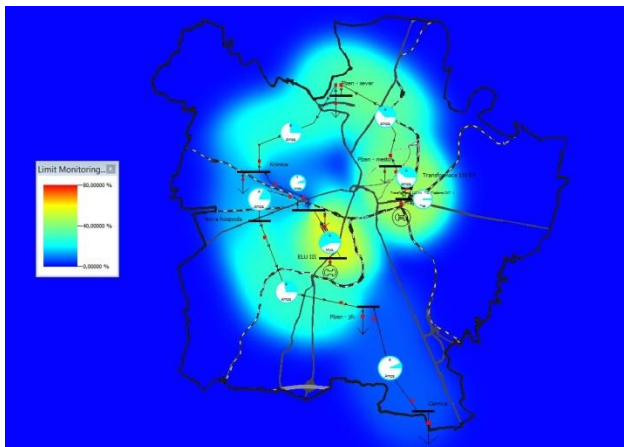
Na následujících třech obrázcích je vidět vývoj spotřeby a odezva výroby v časech 05:00 až 07:00. Barevné mapy jsou podkresleny územím města Plzně. Výkon z RZ Černice a RZ Křimice však teče i mimo hranice města.



Obr. 7.20 – Vytížení prvků 05:00

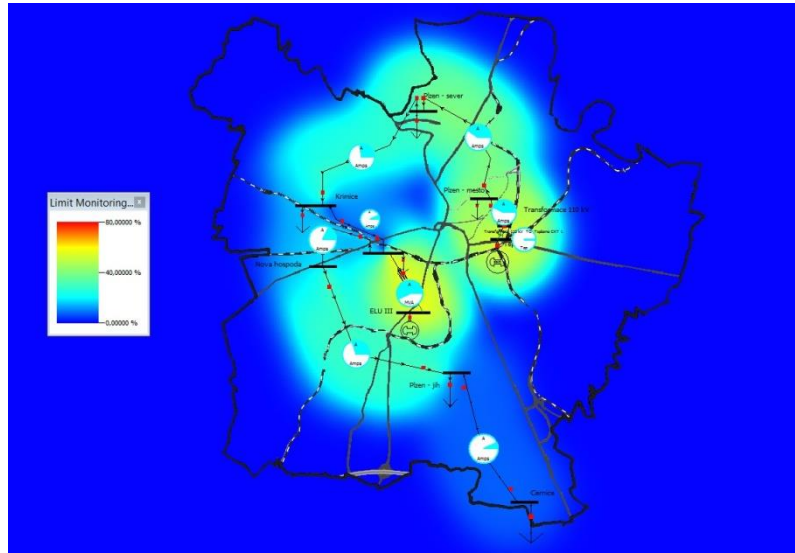


Obr. 7.21 – Vytížení prvků 06:00



Obr. 7.22 – Vytížení prvků 07:00

Změna výkonu je velmi plynulá, tudíž nepředstavuje velké regulační riziko a na tuto skutečnost musí být brán zřetel. Při velké změně výkonu by mohlo dojít k narušení bilance činných výkonů a kolísání frekvence. Na dalším obrázku je vidět maximální odběr města a okolí v 17:00. Z legendy po boku hranic města lze odečíst, že se zatížení na některých místech pohybuje mezi 60% - 80% což říká, že oba zdroje mají dostatečný prostor pro regulaci a vzájemnou výpomoc.



Obr. 7.23 – Vytížení prvků 17:00

V průběhu regulace byl dokonce odzkoušen funkční provoz po jistou dobu do dvou malých ostrovů ( ELÚ III – Křimice, Nová hospoda, Plzeň-jih, Černice a PT – Plzeň-město, Plzeň-sever). Vzhledem k udržení velké rezervy pro regulaci doporučuji tento stav pouze dočasně.

**Touto simulací je završena honba za odpovědí na otázku realizovatelnosti ostrovního provozu. Simulace v prostředí Dynast potvrdila nalezení vhodného spojení pro napájení vlastní spotřeby PT a simulace v PowerWorld potvrzuje schopnost udržet ostrovní provoz za normálních podmínek bez uvažování malých zdrojů elektrické energie, které by ještě potenciálně mohly zvýšit výkonovou rezervu pro regulaci nebo potřeby provozovatele přenosové soustavy.**

Všech 24 obrázků z modelování jednoho dne ostrovního provozu je zahrnuto v přílohách tohoto dokumentu.

## 8 Konkrétní situace

Tato kapitola se zabývá otázkou čtyř základních situací, které mohou v reálném provozu nastat a nastiňuje jejich řešení a přechod z nich až už do stavu ostrovního provozu nebo normálních podmínek. Vždy je zmíněno, z jakého stavu se systém do přechodných podmínek dostává.

### 8.1 Situace 1

Situace, kterou se zabývá z většiny tato diplomová práce, je stav, kdy objekt PT je mimo provoz a při výpadku napájení není schopen „najat ze tmy“. V tomto případě je nutno předem rekonfigurovat síť tak, aby výroba ELÚ III pokryla vlastní spotřebu, spotřebu přilehlého areálu Škoda a pomocí vedení (viz varianta A) zásobila vlastní spotřebu PT. V tomto případě je omezena spotřeba na všech rozvodnách, protože rozběh PT společně s vlastní spotřebou ELÚ III a areálem Škody potřebuje většinu dostupného výkonu ELÚ III.

Po rozběhu PT dochází k postupnému zapojování spotřeby dle SZD nebo zapínacího plánu.

Na tuto situaci se lze dobře připravit vypínacím plánem a včasnou rekonfigurací sítě. Negativem je bezesporu nutnost omezení dodávky elektrické energie do většiny města. Dalším problémem je časová náročnost - zatápění kotlů i za využití plynových hořáků pro rychlejší rozběh trvá několik hodin.

### 8.2 Situace 2

Ani jeden ze zdrojů – ELÚ III a PT není ve chvíli přechodu v provozu.

Tato situace je velmi nepravděpodobná, ale by byla řešena rozběhem objektu ELÚ III ze tmy. Další kroky by byly stejné jako v kapitole 8.1.

### 8.3 Situace 3

Oba zdroje – ELÚ III a PT jsou plně funkční a dodávají výkon do sítě.

V tomto případě musí dojít k velmi rychlému rozpoznání potřeby provozu v ostrovním režimu, protože může dojít k pádu frekvence v síti a automatickému přechodu do vlastní spotřeby. Společně s výpadkem dodávky elektrické energie ze strany přenosové soustavy by došlo k přerušení dodávky do města Plzně a opakoval by se postup obnovy dodávky jako v podkapitole 9.1. Proto musí dojít k co nejrychlejší rekonfiguraci na RZ Přeštice a RZ

Chrást, kde dojde k odpojení ostrova od zbytku přenosové soustavy. Dále musí být odpojena i vedení 1216 a 1220, která vedou směrem Toužim a Kralovice.

Pokud se podaří včas síť rekonfigurovat, nastupuje řízení provozu v ostrovním režimu (viz simulace PowerWorld).

#### 8.4 Situace 4

Pomocí ostrova se obnovuje provoz přenosové soustavy.

Pokud je ostrov v provozu, je nutné udržovat výkonovou rezervu nejen pro regulaci, ale také pro možnost obnovy provozu přenosové soustavy. Za ideálních podmínek, omezení průmyslových provozů a dodávky ze všech dostupných zdrojů elektrické energie je volných až 50% celkového instalovaného výkonu na území města Plzně – to odpovídá přibližně 100 MW. Z toho vyplývá důležitost komunikace s provozovatelem přenosové soustavy za účelem výpomoci při obnově provozu přenosové soustavy.

## 9 Závěr

V průběhu psaní mé diplomové práce jsem se zabýval provozem Plzeňska v ostrovním režimu. Každým řádkem jsem se nořil hlouběji a hlouběji do problematiky energetiky v tak širokém měřítku, které jsem si při výběru nedokázal ani představit. S každým řádkem ale také rostlo nadšení pro tuto problematiku, řekl bych třešničku elektroenergetiky. Desítky předchozích stránek mimo potvrzení faktu schopnosti provozu v ostrovním režimu říkají však něco jiného – Plzeň je město s ohromnou historií a technologickou tradicí a z pohledu české energetiky unikát, který se může pyšnit schopností „svítit si, když musí mít ostatní zhasnuto“.

Tato diplomová práce je nejen vyvrcholením mého pětiletého studia na ZČU, ale také vyvrcholením vztahu k městu, ve kterém žiji.

### 9.1 Zhodnocení postupu,

Při tvorbě této diplomové práce jsem postupoval tak, že jsem nejprve shromáždil potřebné teoretické znalosti pro řešení problematiky provozu v ostrovním režimu. Zprvu se zdála problematika jednoznačná, ale při rozkrývání začalo být jasné, že se jedná o velmi komplexní energetickou úlohu, která sahá od zajištění dodávky uhlí až po přechodové jevy na alternátorech. Veškeré informace jsem se snažil čtenáři podat stručně a výstižně, i přesto je informací velké množství.

Dále jsem shromáždil informace o provozovateli jednotlivých zdrojů elektrické energie a o zdrojích samotných. Pro modelování bylo nutné množství dat vypočítat, přepočítat nebo připravit pro prostředí modelovacích nástrojů.

Dále jsem postupoval tak, že jsem modelování rozdělil na dvě části, protože jedno prostředí je výhodnější spíše pro modelování přechodových jevů a druhé pro modelování provozu. Z výstupů z těchto modelů vyvozují závěry a nastiňují možný vývoj do budoucna.

### 9.2 Zhodnocení metod

V této části bych rád zhodnotil relevanci výsledků dosažených při počítání a modelování.

Velká část vstupů při počítání je přímo od provozovatelů zdrojů elektrické energie nebo distribuční soustavy, takže se v práci ve většině případů počítalo s reálnými hodnotami, které tedy odráží skutečnost.

Bohužel některá data jako například reálné provozní parametry vedení, účinník některých zařízení nebo vlastní detail vlastní spotřeby PT musela být zvolena nebo v ydedukována a zde vidím riziko nepřesnosti některých výpočtů. Přesto si však myslím, že výsledky odrážejí skutečnost.

### 9.3 Přínosy

Jako největší přínos hodnotím potvrzení možnosti přechodu do ostrovního provozu Plzeňska v situaci, kdy je PT mimo provoz a také potvrzení schopnosti ostrovní provoz udržet. Dalším přínosem je bezesporu analýza spotřeby a výroby na území města Plzně, napájení města. Co se teoretických informací týče, velmi detailně je zpracována regulace frekvence a bilance činných výkonů v ostrovním provozu.

Jako poslední přínos bych hodnotil komplexní analýzu možnosti provozu v ostrovním režimu, ze které vychází mnoho cest pro další možný vývoj a pokračování či detailnější zpracování.

### 9.4 Možný vývoj

V rozsahu této diplomové práce nebylo bohužel možné tuto velmi zajímavou disciplínu prozkoumat hlouběji. I tak je popsáno mnohem více stránek, než bylo určeno zadáním, ale problematika je tak široká, že jedna diplomová práce nestačí.

Co se vývoje týče, na diplomovou práci by šlo navázat detailním rozбором regulace frekvence a pokrývání bilance činných výkonů v ostrovních provozech obecně. Existuje mnoho diagramů, které popisují blackouty po celém světě a detailně zachycují změnu frekvence a odezvu regulace.

Posunem práce směrem k realitě by byla implementace 100% reálných parametrů jednotlivých prvků, aby modely odrážely realitu v měřítku 1:1.

Zajímavou myšlenkou je rozdělení města Plzně do dvou menších ostrovů ELÚ III – Křimice, Nová hospoda, Plzeň-jih, Černice a PT – Plzeň-město, Plzeň-sever, jejichž realizaci potvrdila zkouška v prostředí PowerWorld.

Samostatnou otázkou je dostupnost instalovaného výkonu a připravenost všech zařízení pro pokrytí potřeb města Plzně. S tím je spojeno i prozkoumání maximální doby trvání v ostrovním provozu, kdy není dodáváno palivo zdrojům elektrické energie (s největší pravděpodobností nefunguje vlaková doprava atd.), odhaduji, že je to několik dní.



## 10 Seznam použitých zdrojů

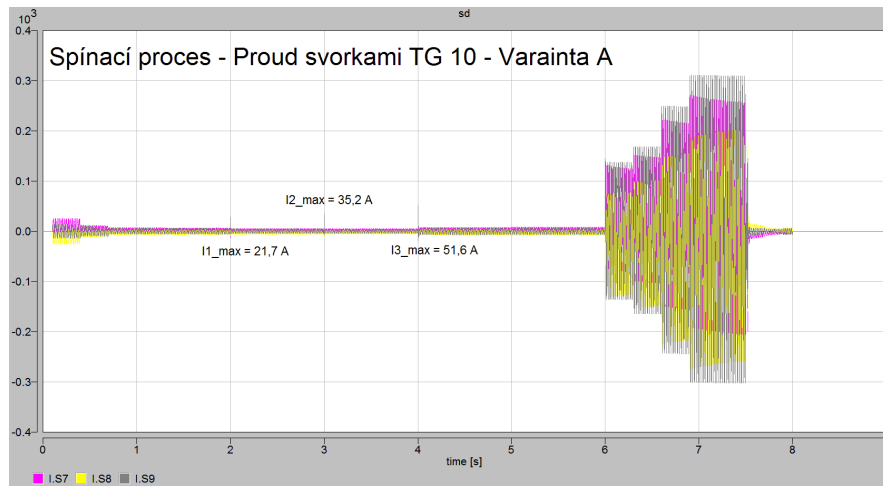
- [1] IBLER, Zbyněk; KARTÁK, Jan; MERTLOVÁ, Jiřina; IBLER, Zbyněk. Technický průvodce energetika. BEN – technická literatura. Praha, 2002. 615 s. ISBN 80-7300-026-1
- [2] ŠNAJDR, J. Ohřev materiálu proměnlivého průřezu dynamickým proudovým zatížením. Plzeň : 2012, 53 s.
- [3] MÁASLO, Jan. Regulace frekvence – bilance činných výkonů v ostrovním provozu (OP) [materiály k přednášce].
- [4] MÁASLO, Jan. Řízení frekvence – bilance činných výkonů v ES [materiály k přednášce].
- [5] PETRUŽELA, Ivan. Ostrovní provoz, Blackout [materiály k přednášce], Praha 2006. 32s. Dostupné z: [home.pilsfree.net/fantom/FEL/MR/FEL\\_CVUT/lekce13\\_06.pdf](http://home.pilsfree.net/fantom/FEL/MR/FEL_CVUT/lekce13_06.pdf)
- [6] MUŠEK, Josef. Aplikace pro řešení poměrů na vedení s rozprostřenými parametry. Plzeň, 2012. Diplomová práce. ZČU.
- [7] NOHÁČ, Karel. Modelování elektrických sítí [materiály k přednáškám], Plzeň 2013 Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~nohac/MS/>
- [8] NOHÁČ, Karel. Přejímové jevy v elektrizačních soustavách [materiály k přednáškám], Plzeň 2013 Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~nohac/PJS/>
- [9] STATUTÁRNÍ MĚSTO PLZEŇ. Územní energetická koncepce města Plzně: Aktualizace 2007. Plzeň, 2007. Dostupné z: <http://energetika.plzen.eu/koncepcni-dokumenty/uzemni-energeticka-koncepce/uzemni-energeticka-koncepce.aspx>
- [10] URL: <http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Podpurne-sluzby/KategoriePpS/Stranky/OP.aspx>
- [11] MAGISTRÁT MĚSTA PLZNĚ. Energetika Plzně v datech. Plzeň, Srpen 2013. Dostupné z: [http://energetika.plzen.eu/Files/energetika/koncepcni\\_dokumenty/ostatni\\_koncepce/EnerEnergetika2013.pdf](http://energetika.plzen.eu/Files/energetika/koncepcni_dokumenty/ostatni_koncepce/EnerEnergetika2013.pdf)
- [12] NOVÁK, Miroslav. Přejímový děj při zapnutí transformátoru: Způsoby omezování zapínacího proudu. Liberec, 2003. Disertační práce.
- [13] OUHRABKA, Jan. Optimalizace vlastní spotřeby tepelné elektrárny. Plzeň, 2013. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=53555>. Diplomová práce. ZČU.
- [14] KAPLAN, A. Analýza energetické bilance v teplárně a návrh na inovaci. Electro scope. 2012, III, s. 4. Dostupné z: [http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/PDF/Rocnik2012/Cislo3\\_2012/r6c4c5.pdf](http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/PDF/Rocnik2012/Cislo3_2012/r6c4c5.pdf)

- [15] HROMÁDKA, Aleš. Kombinovaná výroba tepla a elektřiny v Plzeňské teplárenské, a.s. Plzeň, 2013. Dostupné z:  
<https://portal.zcu.cz/StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=53782>.  
Bakalářská práce. ZČU.
- [16] PAŠEK, Václav. Energetická bilance vlastní spotřeby elektřiny elektrárny středního výkonu. Plzeň, 2011. Dostupné z:  
<https://portal.zcu.cz/StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=36897>.  
Disertační práce. ZČU.
- [17] Interní dokumenty společnosti ČEZ Distribuce, a.s. – schéma 22 kV, data zimního měření 22 kV
- [18] URL: <http://www.powerworld.com/>
- [19] CIESLAR, Stanislav. Ostrovní provoz - řešení budoucnosti. All for power. 2012, 4., s. 2. Dostupné z: [www.allforpower.cz](http://www.allforpower.cz)
- [20] Veřejně dostupná schémata sítí 110 kV – velké aglomerace, celá ČR
- [21] HEŘMAN, Mann a Machal ŠEVČENKO. Snadné počítačové modelování dynamických soustav: Příručka k internetovému kurzu a simulačnímu systému DYNAST. Praha, 2008. Dostupné z: <http://virtual.cvut.cz/dynastcz/prirucka.pdf>
- [22] Studijní texty z přednášek předmětu “Průmyslová energetika”, ZČU 2013
- [23] URL: <http://www.plzenskateplarenska.cz>
- [24] URL: <http://www.pe.cz>
- [25] URL: <http://www.ceps.cz>
- [26] STATUTÁRNÍ MĚSTO PLZEŇ. Vyhodnocení naplňování ÚEKmP - 2012. Plzeň, 2013. Dostupné z:  
[http://energetika.plzen.eu/Files/energetika/koncepcni\\_dokumenty/uzemni\\_koncepce/naplnovaniUEKmp\\_2012\\_komprimovana.pdf](http://energetika.plzen.eu/Files/energetika/koncepcni_dokumenty/uzemni_koncepce/naplnovaniUEKmp_2012_komprimovana.pdf)

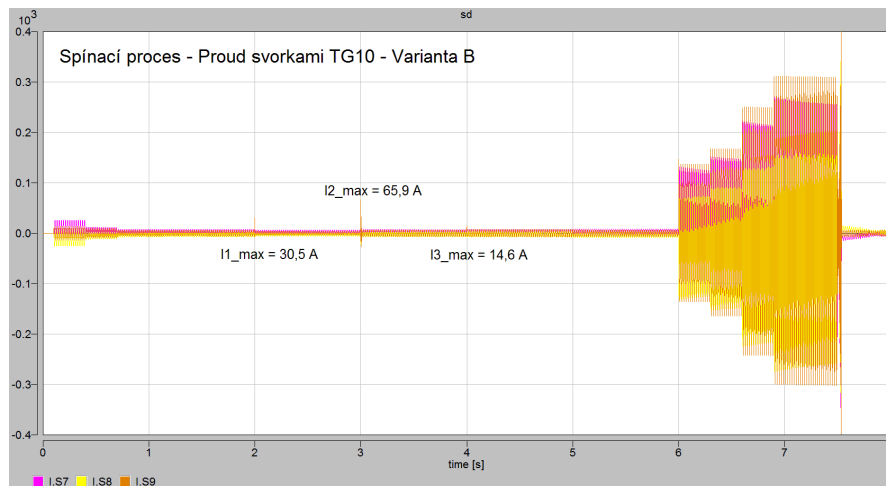
## Seznam příloh

Příloha A – Proud svorkami TG 10 – Varianta A.....	84
Příloha B – Proud svorkami TG 10 – Varianta B.....	84
Příloha C – Proud svorkami TG 9 – Varianta A .....	84
Příloha D – Proud svorkami TG 9 – Varianta B .....	85
Příloha E – Napětí 22 kV – Varianta B.....	85
Příloha F – Napětí 22 kV – Varianta C.....	85
Příloha G – Proud transformátorem 110 kV – Varianta B .....	86
Příloha H – Proud transformátorem 110 kV – Varianta C .....	86
Příloha I – Přepětí 1226 – Varianta A .....	86
Příloha J – Přepětí 1210 – Varianta A .....	87
Příloha K – Přepětí 1206 – Varianta B.....	87
Příloha L – Přepětí 1225 – Varianta B .....	87
Příloha M – Přepětí 1209 – Varianta C.....	88
Příloha N – Přepětí 1225 – Varianta C .....	88
Příloha O – Výpadek zátěže - Napětí – Varianta C.....	88
Příloha P – Výpadek zátěže – Proud – Varianta C .....	89
Příloha Q – Vypínací proces – Varianta B .....	89
Příloha R – Vypínací proces – Varianta C .....	89
Příloha S – Procentuální zatížení v průběhu 24 hodin .....	90

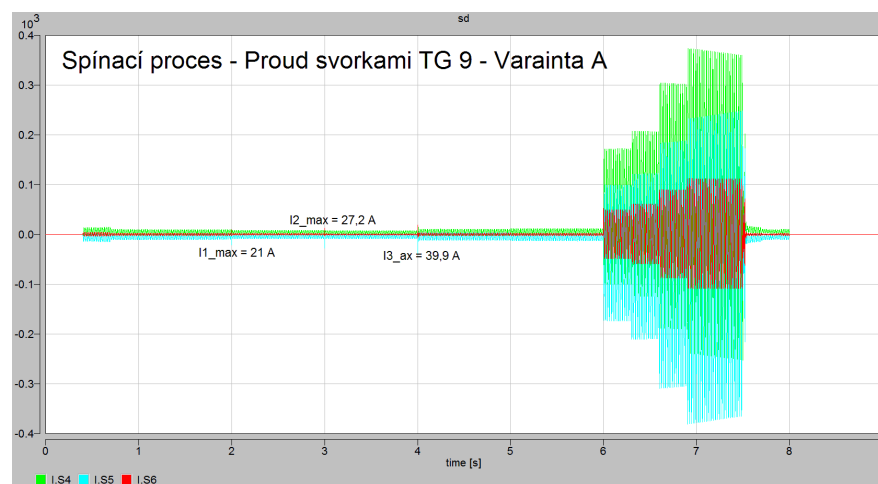
## Příloha A – Proud svorkami TG 10 – Varianta A



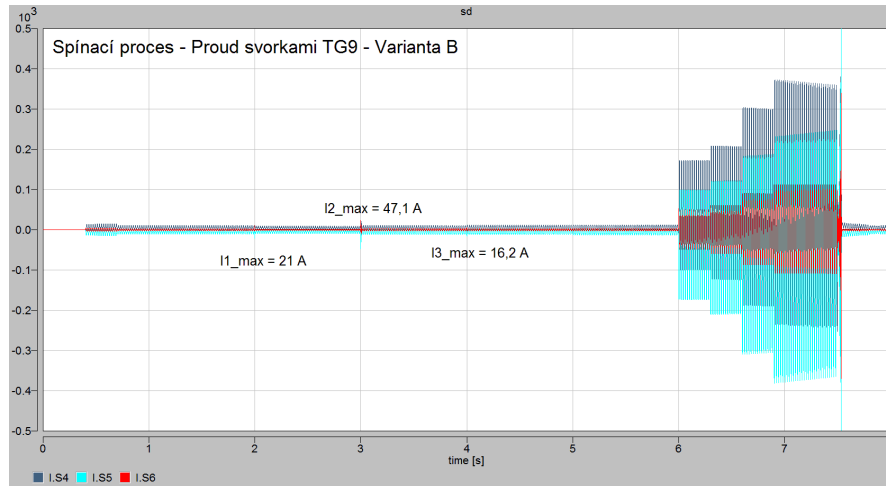
## Příloha B – Proud svorkami TG 10 – Varianta B



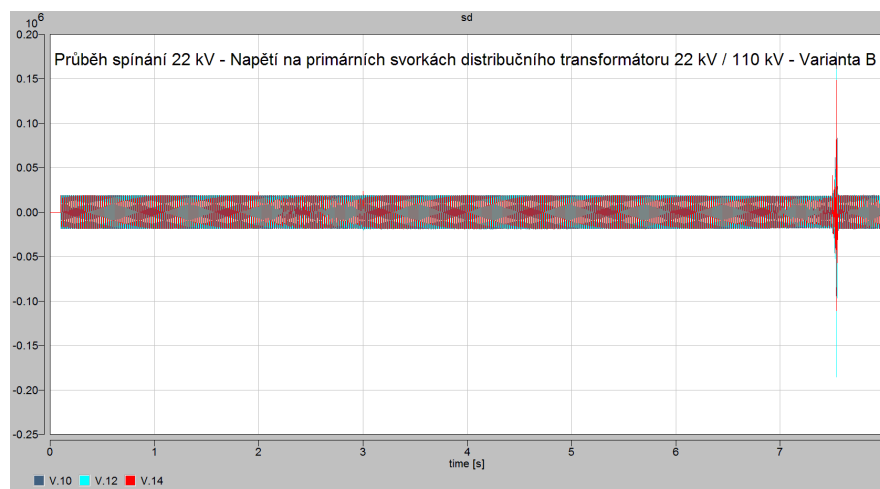
## Příloha C – Proud svorkami TG 9 – Varianta A



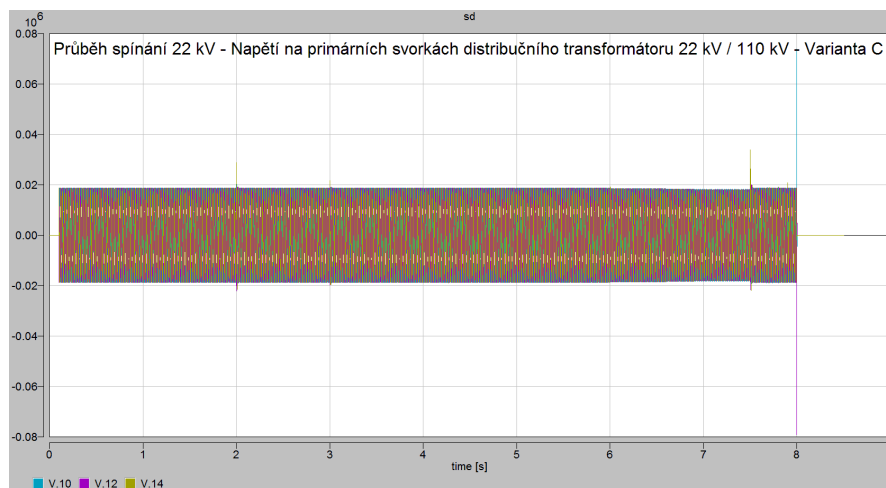
## Příloha D – Proud svorkami TG 9 – Varianta B



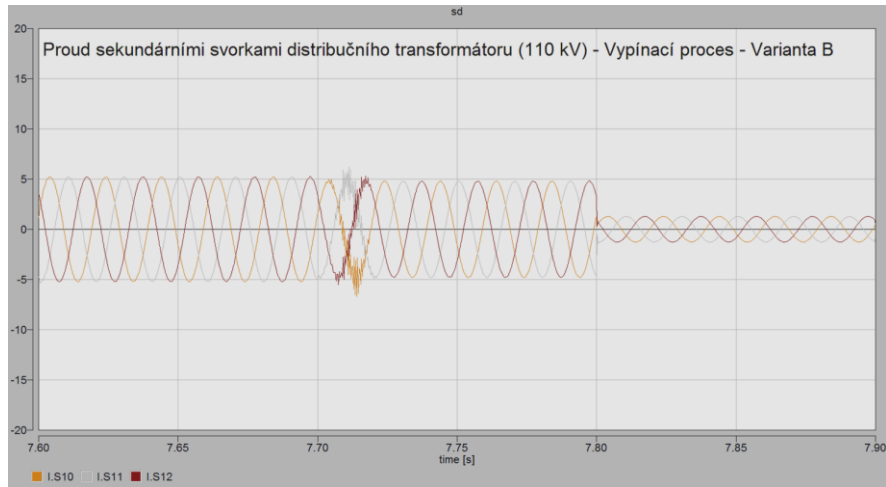
## Příloha E – Napětí 22 kV – Varianta B



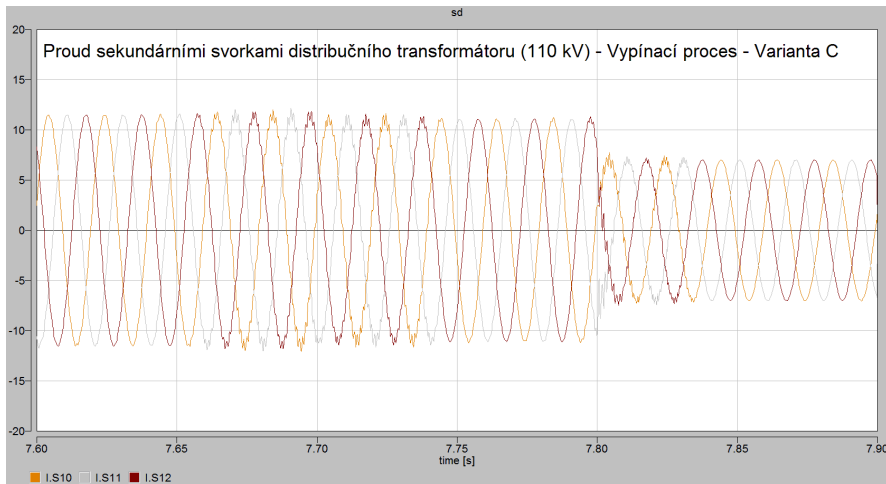
## Příloha F – Napětí 22 kV – Varianta C



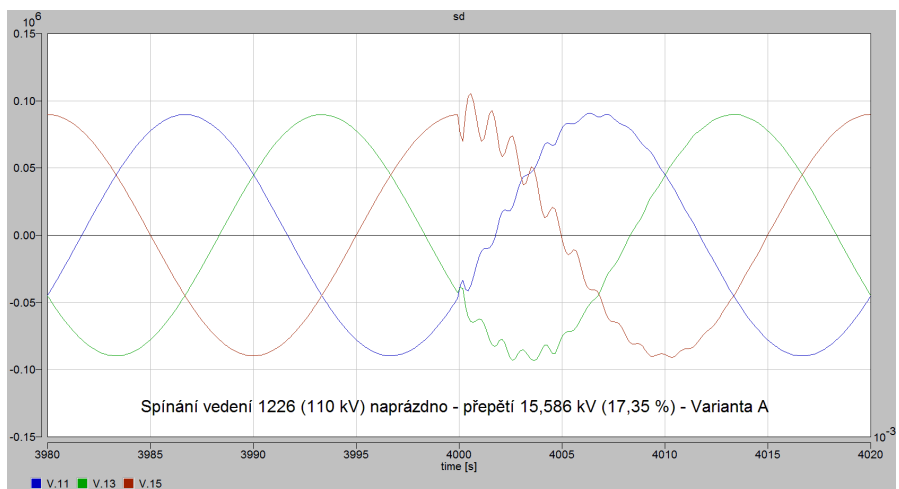
## Příloha G – Proud transformátorem 110 kV – Varianta B



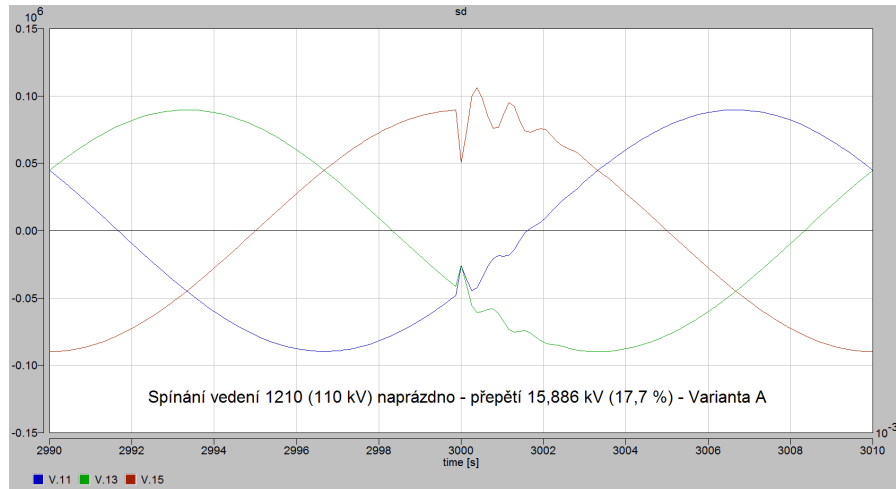
## Příloha H – Proud transformátorem 110 kV – Varianta C



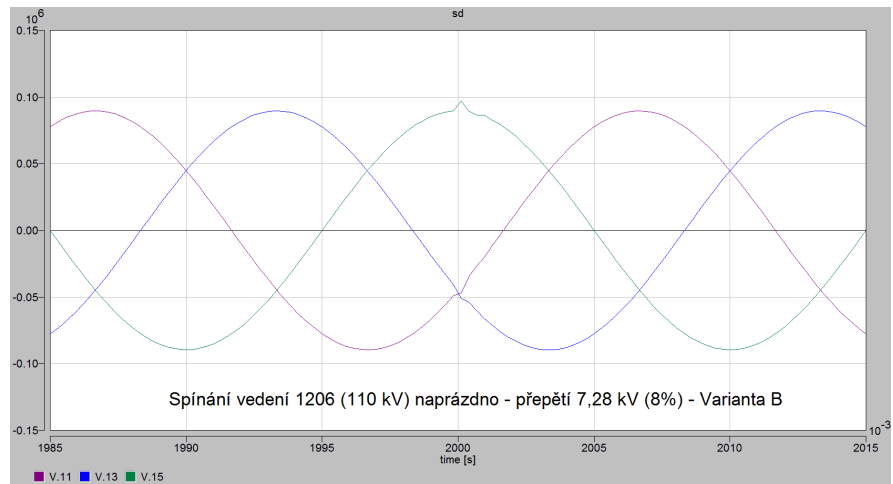
## Příloha I – Přepětí 1226 – Varianta A



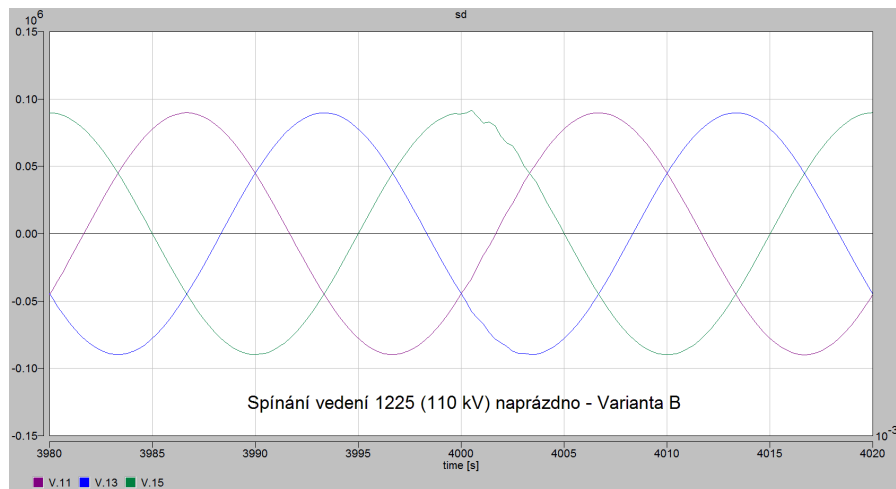
### Příloha J – Přepětí 1210 – Varianta A



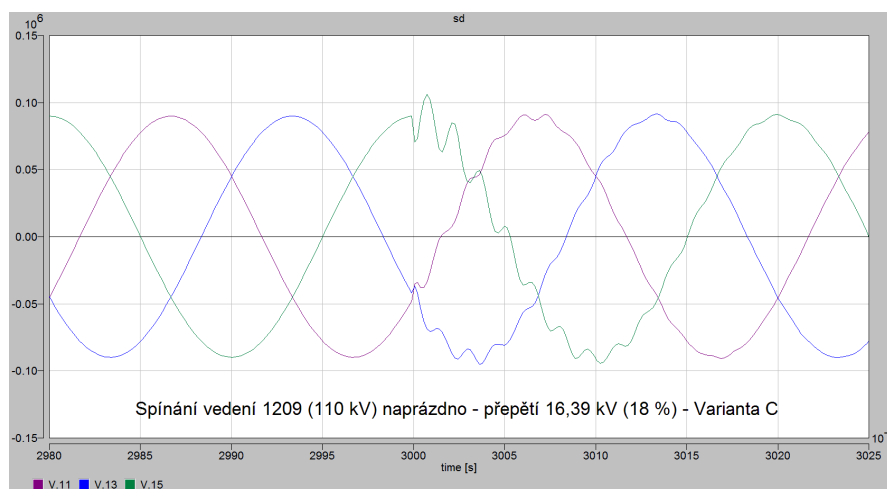
### Příloha K – Přepětí 1206 – Varianta B



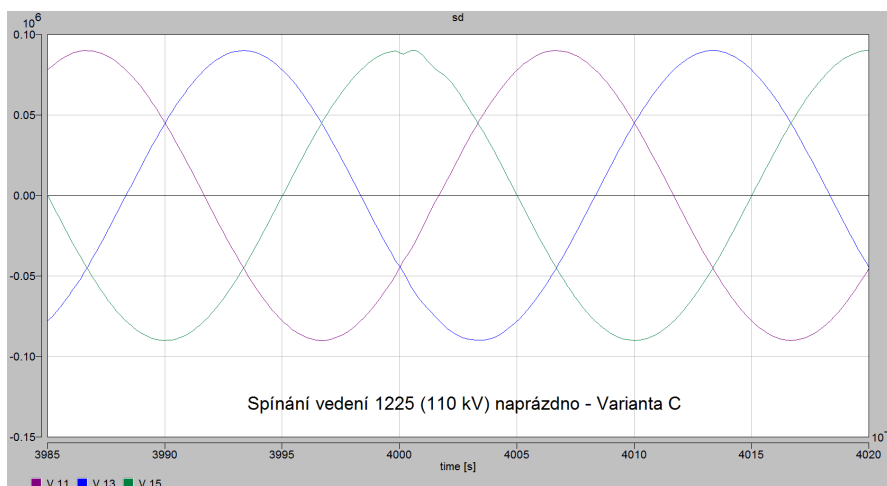
### Příloha L – Přepětí 1225 – Varianta B



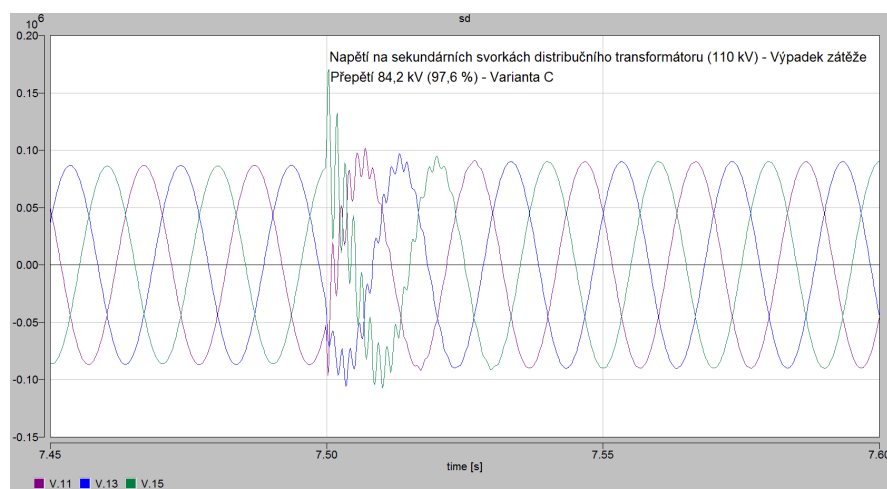
## Příloha M – Přepětí 1209 – Varianta C



## Příloha N – Přepětí 1225 – Varianta C

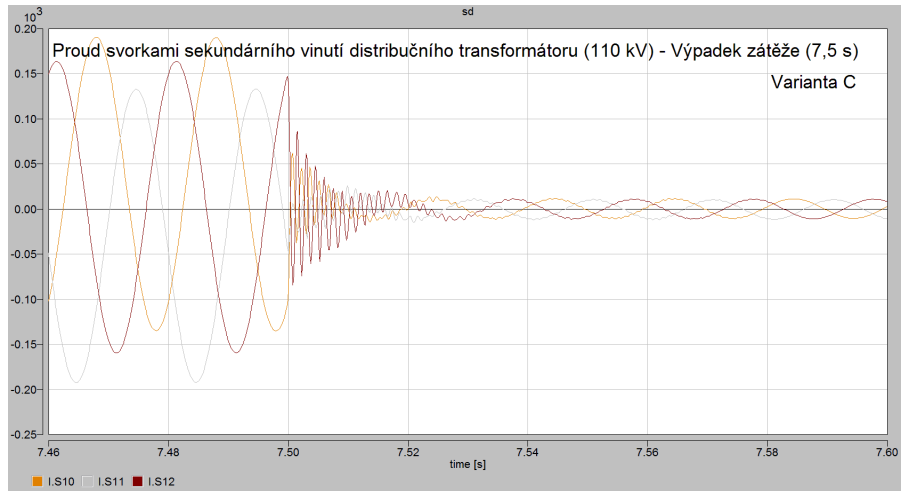


## Příloha O – Výpadek zátěže - Napětí – Varianta C

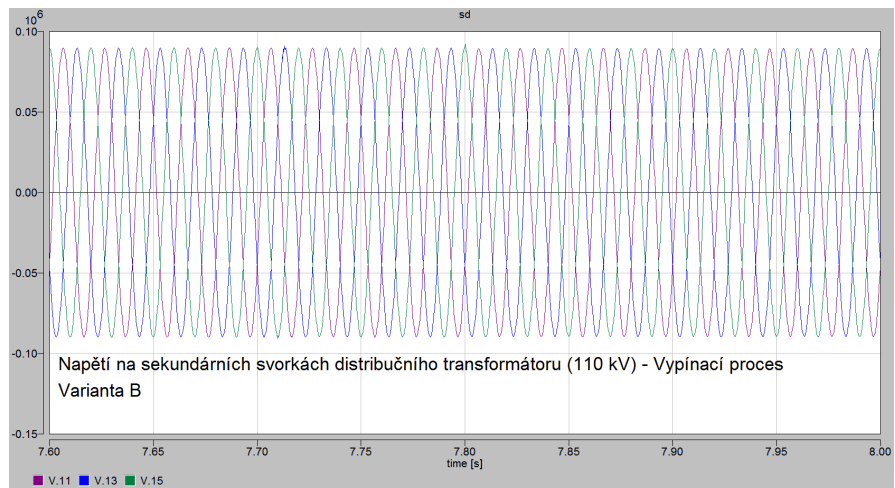




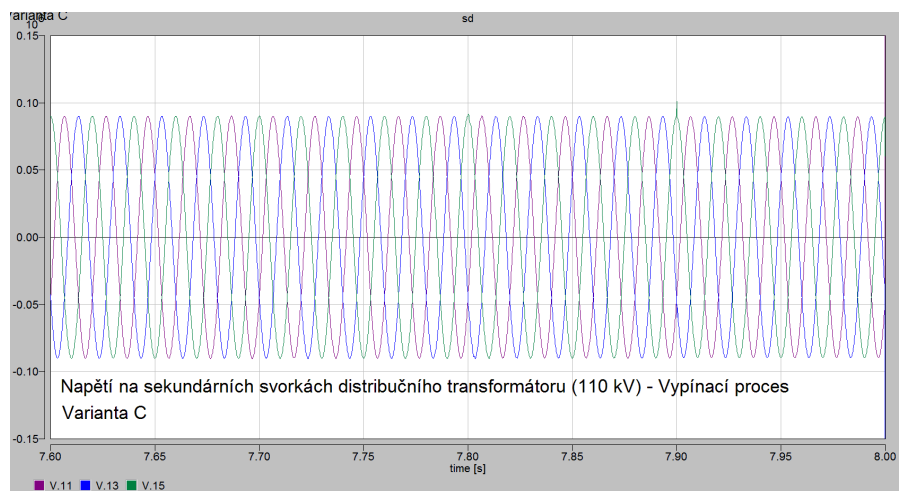
## Příloha P – Výpadek zátěže – Proud – Varianta C



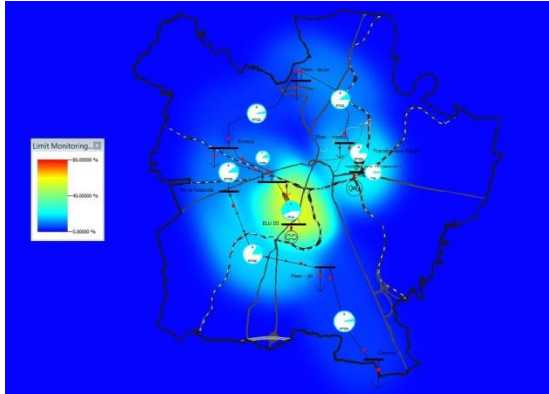
## Příloha Q – Vypínací proces – Varianta B



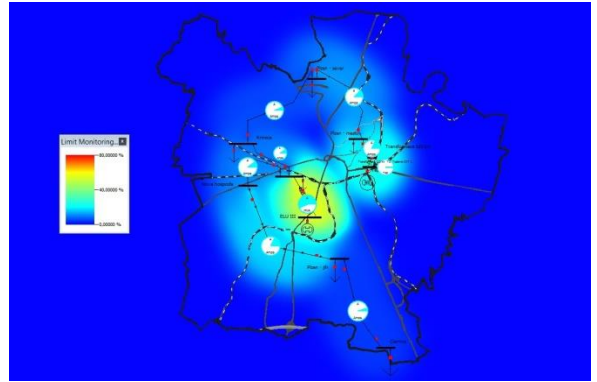
## Příloha R – Vypínací proces – Varianta C



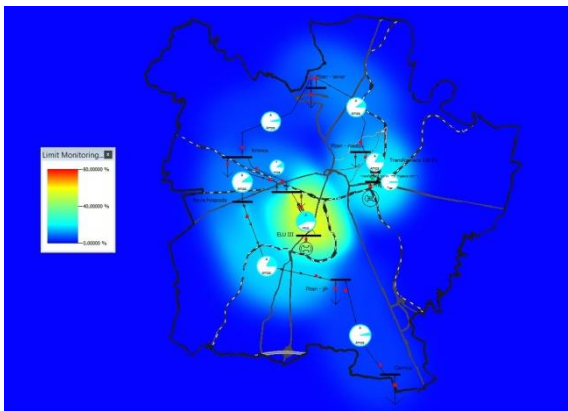
Příloha S – Procentuální zatížení v průběhu 24 hodin



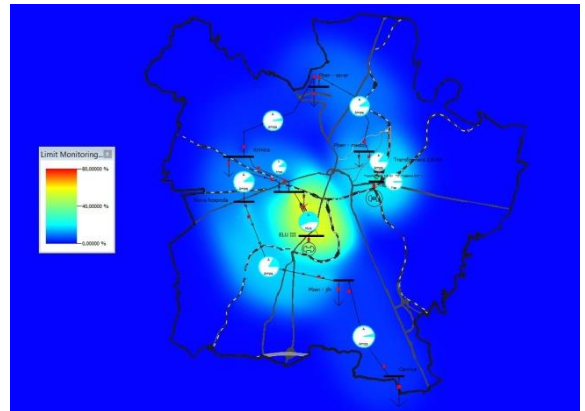
01:00



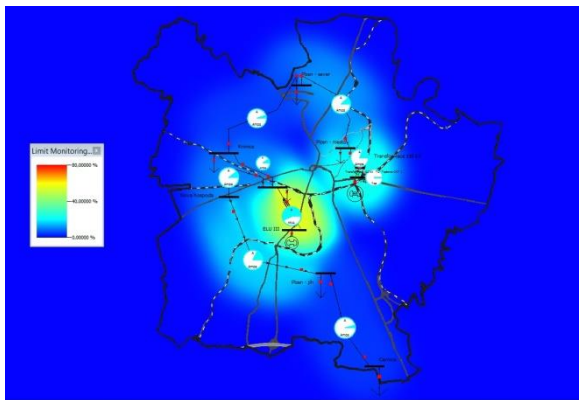
02:00



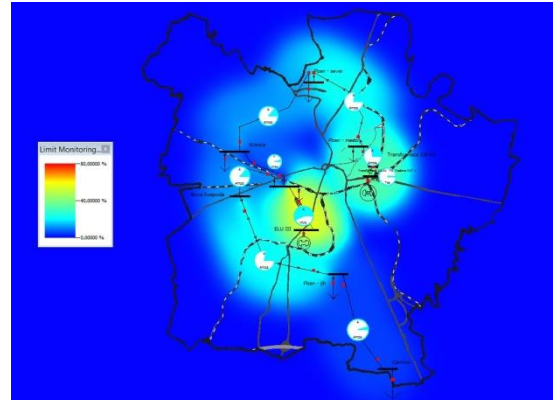
03:00



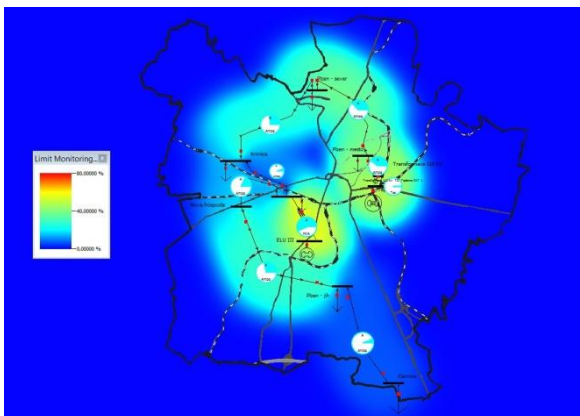
04:00



05:00

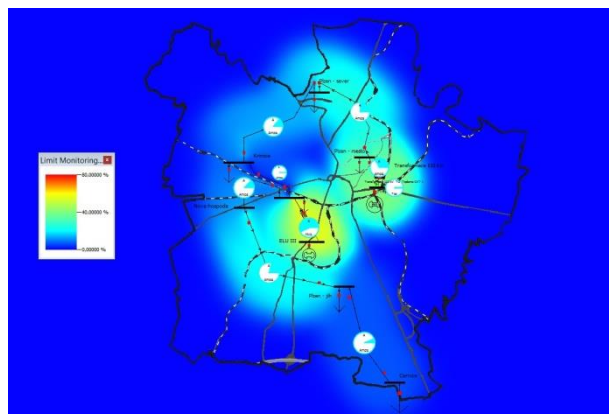
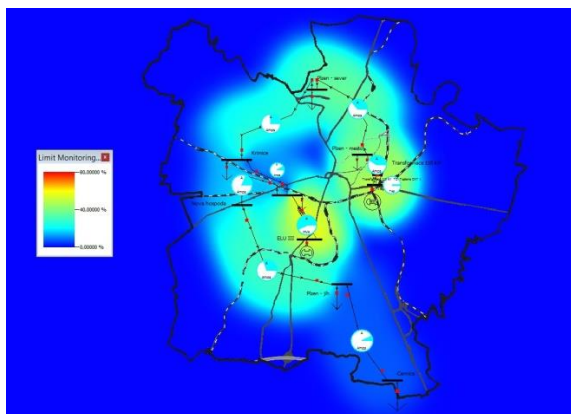


06:00

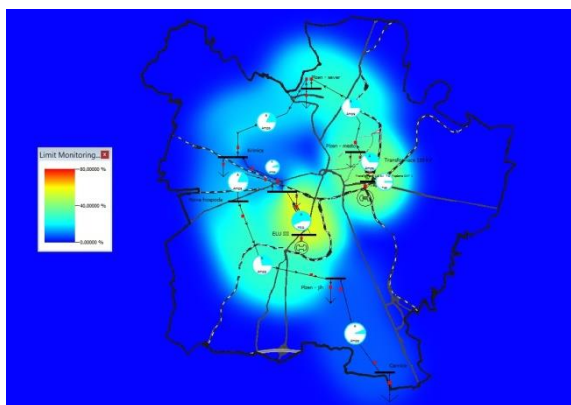


08:00

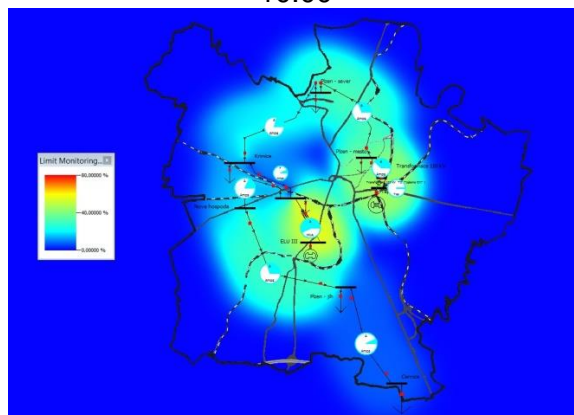
07:00



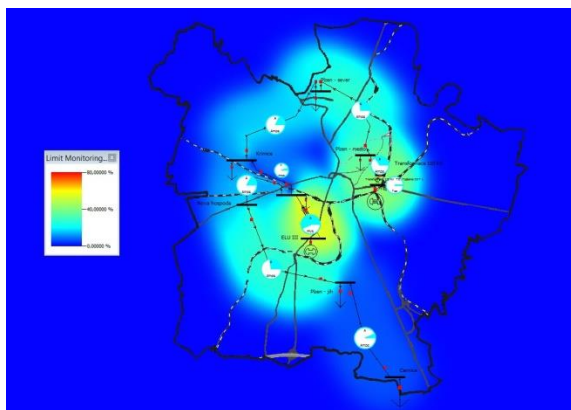
09:00



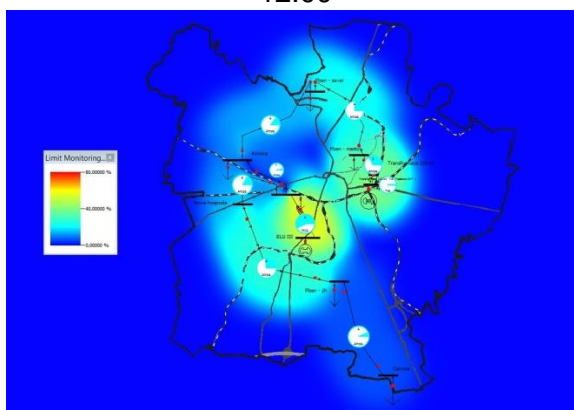
10:00



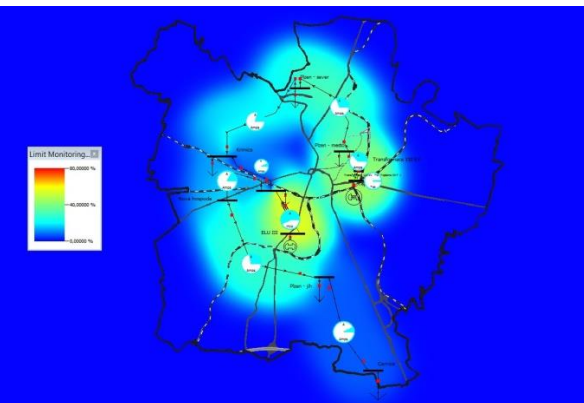
11:00



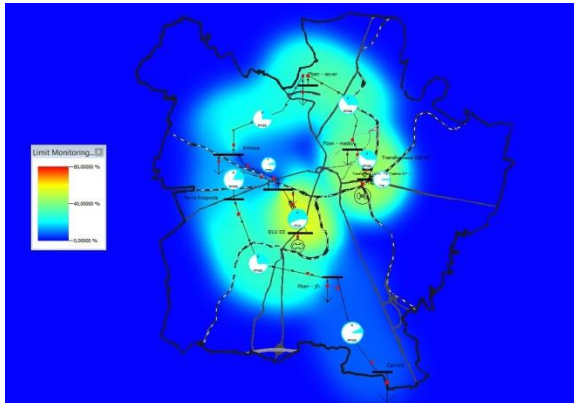
12:00



13:00



14:00

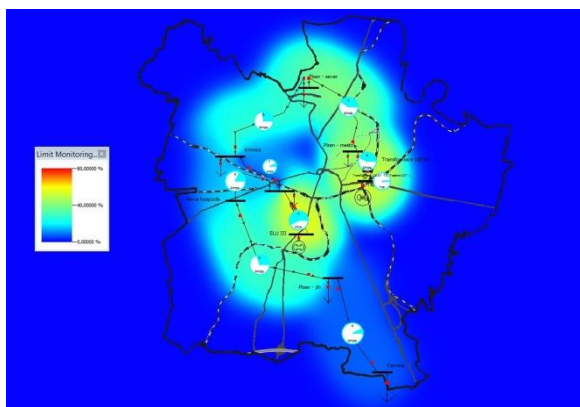


15:00

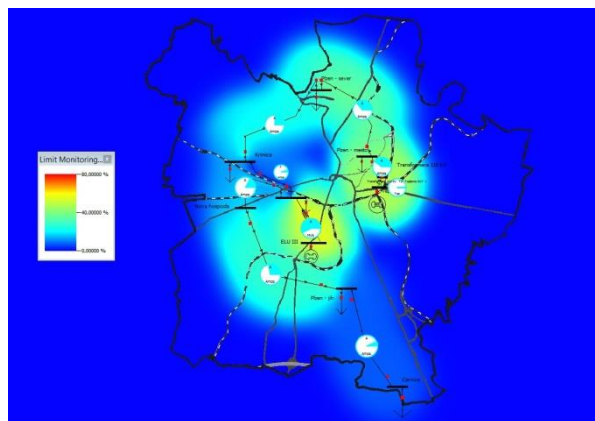


16:00

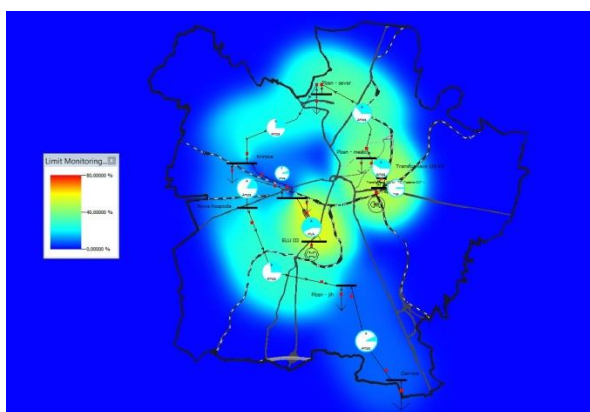




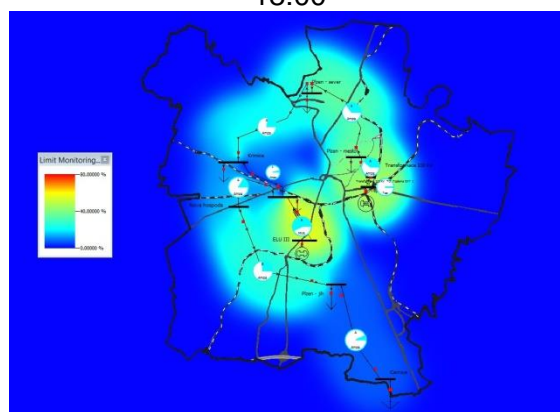
17:00



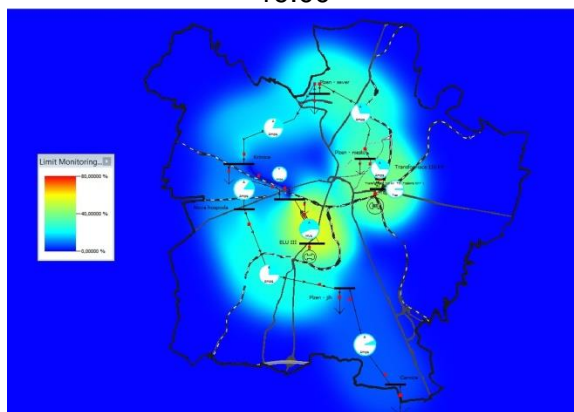
18:00



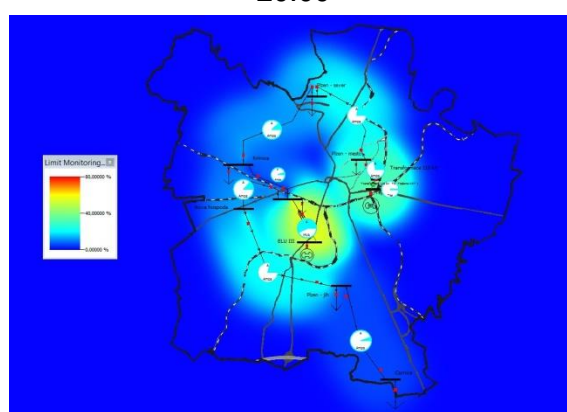
19:00



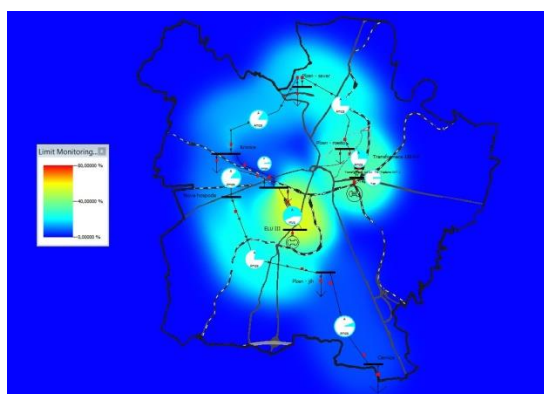
20:00



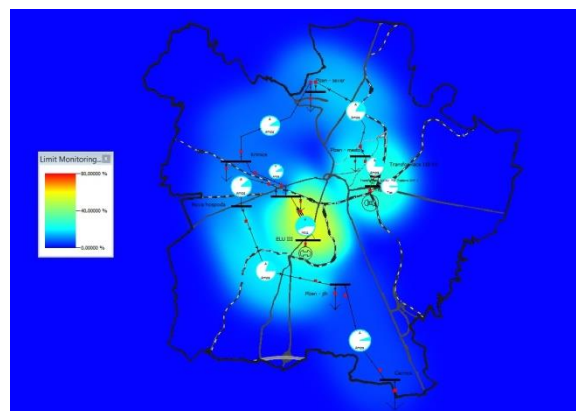
21:00



22:00



23:00



0:00