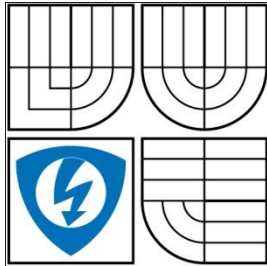


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

NÁVRH ROZVOJE A ŘEŠENÍ KONFIGURACE SÍTĚ 22 kV

DISTRIBUTION NETWORK DEVELOPMENT AND CONFIGURATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR POSPÍŠIL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DAVID TOPOLÁNEK



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Petr Pospíšil

ID: 78396

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Návrh rozvoje a řešení konfigurace sítě 22 kV

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznámení se s problematikou řešení ustáleného chodu, nastudování metod výpočtu UCH a volba nejvhodnější metody výpočtu.
2. Úvod do problematiky predikce růstu zatížení v elektrizační soustavě.
3. Návrh rozvoje a řešení konfigurace zadané sítě

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 24.5.2010

Vedoucí práce: Ing. David Topolánek

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Petr Pospíšil
Bytem: Felberova 677/11, 56802, Svitavy - Lány
Narozen/a (datum a místo): 9.5.1986, Boskovice
(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno,
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako.....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Návrh rozvoj a řešení konfigurace sítě 22 kV
Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. David Topolánek
Ústav: Ústav elektroenergetiky
Datum obhajoby VŠKP: 10. 6. 2010

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- | | | | |
|---------------------------------------------|---|-----------------|---|
| <input type="checkbox"/> tištěné formě | – | počet exemplářů | 1 |
| <input type="checkbox"/> elektronické formě | – | počet exemplářů | 1 |

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

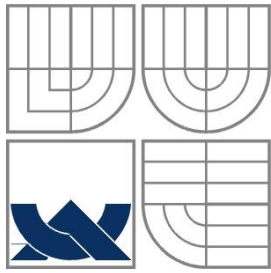
Bibliografická citace práce:

POSPIŠIL, P. *Návrh rozvoje a řešení konfigurace sítě 22 kV*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 68 stran. Vedoucí diplomové práce Ing. David Topolánek.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Davidovi Topolánkovi, dále pak panu Ing. Janovi Benešovi za cenné rady a připomínky k mé práci a svým rodičům za podporu během celé doby mého studia.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

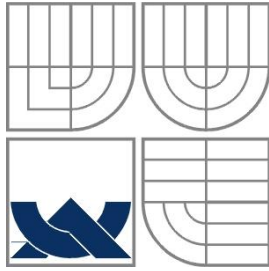
Návrh rozvoje a řešení konfigurace sítě 22 kV

Bc. Petr Pospíšil

vedoucí: Ing. David Topolánek

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2010

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering

Master's Thesis

Distribution Network Development and Configuration

by

Bc. Petr Pospíšil

Supervisor: Ing. David Topolánek
Brno University of Technology, 2010

Brno

ABSTRAKT

Tématem této diplomové práce je návrh a řešení konfigurace sítě 22 kV v dané části města Brna. Přesně se jedná o městskou oblast Trnitá, ve které se během následujících pěti let očekávají investiční záměry.

Práce je rozdělena na dvě části. Pro lepší porozumění problematice, se první, teoretická část zabývá popisem elektrizační soustavy (dělení elektrizační soustavy podle hladiny napětí, druhy vedení, druhy sítí a další části ES), řešení ustáleného chodu sítí (výpočet ustáleného chodu jako lineární a nelineární úloha, eliminace bilančního uzlu, iterační metody) a charakteristika distribuční sítě města Brna. Druhá část této diplomové práce se zabývá samotným návrhem rozvoje a řešením konfigurace sítě v závislosti na předpokládaném vývoji zatížení v oblasti Trnitá. Výsledkem je návrh na zbudování nové trafostanice 110/22 kV Opuštěná vybavené třemi transformátory, každý o jmenovitém výkonu $S_N = 40 \text{ MVA}$, a návrh změn v konfiguraci sítě 22 kV nutných jak pro zajištění napájení nových odběrů, tak pro zachování napájení stávajících odběrů.

KLÍČOVÁ SLOVA: distribuční síť, nízké napětí, vysoké napětí, kabelové vedení, rozvoj a řešení konfigurace sítě 22 kV

ABSTRACT

The theme of this master's thesis is distribution network development and configuration in the part of Brno – Trnitá. There is expected to be investments there in the next few years.

The thesis consists of two parts. For better understanding of this problem, the first theoretical part concerns with the description of electrical network (subdivision in accordance with voltage levels, conductor types, network types and other electrical network parts), solution of grid's steady state (as a linear task and also non-linear task, elimination of the balancing node, the iterative method) and Brno distribution network characteristics. The second part concerns with distribution network development and configuration depending on anticipated load development in Trnitá. The result is proposal for transformer station construction Opuštěná fitted with three transformers of nominal output $S_N = 40 \text{ MVA}$ and network configuration change required both for providing new consumption supply as well as sustaining current one.

KEYWORDS: distribution network, low voltage, high voltage, cable line, distribution network development and configuration

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	12
SEZNAM TABULEK.....	13
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	14
1 ÚVOD 16	
2 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA V ČESKÉ REPUBLICE.....	17
2.1 DĚLENÍ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY PODLE HLADINY NAPĚTÍ	17
2.1.1 PŘENOSOVÁ SOUSTAVA.....	17
2.1.2 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA	18
2.2 DRUHY ELEKTRICKÝCH VEDENÍ.....	18
2.2.1 VENKOVNÍ VEDENÍ.....	18
2.2.2 KABELOVÁ VEDENÍ	19
2.3 DRUHY SÍTÍ	19
2.3.1 SÍŤE PAPERKOVÉ	19
2.3.2 SÍŤE OKRUŽNÍ	20
2.3.3 ZAUZLENÁ A MŘÍŽOVÁ SÍŤ	20
2.4 DALŠÍ ČÁSTI ES.....	22
2.4.1 TRANSFORMOVNY.....	22
2.4.2 SPÍNACÍ STANICE.....	23
2.4.3 MĚNÍRNY	23
2.4.4 KOMPENZAČNÍ STANICE	24
2.4.5 KOLEKTORY.....	24
3 ZPŮSOBY VÝPOČTU SÍTÍ VN V USTÁLENÉM STAVU	25
3.1 OBECNÁ METODA ŘEŠENÍ UZLOVÝCH SÍTÍ	25
3.2 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU ES V PRAXI	28
3.2.1 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍŤE NEWTON-RAPHSONOVOU ITERAČNÍ METODOU.....	31
3.2.2 ZHODNOCENÍ UVEDENÝCH METOD VÝPOČTU USTÁLENÉHO CHODU SÍŤE.....	36
4 CHARAKTERISTIKA DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY MĚSTA BRNA	38
4.1 ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE	38
4.2 NAPÁJECÍ SÍŤ 110 kV	38
4.3 TRANSFORMOVNY 110/22 kV	39
4.4 SÍŤ 22 kV	45
4.5 SPOTŘEBITELÉ ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	45
4.6 PLÁNOVANÝ ROZVOJ DS MĚSTA BRNA.....	45
5 URČENÍ TRENDU SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE	47
5.1 VYROVNÁNÍ POMOCÍ LINEÁRNÍ FUNKCE	47
5.2 VYROVNÁNÍ POMOCÍ EXPONENCIÁLNÍ FUNKCE	49
5.3 URČENÍ SPRÁVNOSTI VYROVNÁVACÍ FUNKCE	51
5.4 STANOVENÍ PLOŠNÉHO VÝVOJE ZATÍŽENÍ ŘEŠENÉ OBLASTI V LETECH 2010 AŽ 2015.....	52

6 NÁVRH ROZVOJE A ŘEŠENÍ KONFIGURACE SÍTĚ 22 KV V OBLASTI TRNITÁ	54
6.1 POPIS OBLASTI TRNITÁ.....	54
6.2 PŘEDPOKLÁDANÝ VÝVOJ V DANÉ OBLASTI	54
6.3 NÁVRH ŘEŠENÍ KONFIGURACE SÍTĚ PRO DANÝ VÝVOJ.....	55
6.3.1 NÁVRH TRANSFORMAČNÍ STANICE	55
6.3.2 ŘEŠENÍ KONFIGURACE SÍTĚ	57
7 PŘEDPOKLÁDANÁ FINANČNÍ NÁROČNOST PROJEKTU	59
8 ZÁVĚR	62
POUŽITÁ LITERATURA	64
PŘÍLOHA A MAPA NÁVRHU KONFIGURACE SÍTĚ 22 KV V OBLASTI TRNITÁ.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
PŘÍLOHA B TOPOLOGICKÉ SCHÉMA NAVRŽENÉ KONFIGURACE SÍTĚ 22 KV V OBLASTI TRNITÁ.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
PŘÍLOHA C POMĚRNÉ PROUDOVÉ ZATÍŽENÍ NÁVRHU KONFIGURACE SÍTĚ 22 KV V OBLASTI TRNITÁ.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
PŘÍLOHA D SCHÉMA POMĚRNÉHO NAPĚTÍ NÁVRHU KONFIGURACE SÍTĚ 22 KV V OBLASTI TRNITÁ.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1: Zjednodušená struktura elektrizační soustavy ČR [1].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2-2 Paprsková síť</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2-3 Okružní síť [12].....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2-4 Zauzlená síť [12]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2-5 Zjednodušená mřížová síť [12]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2-6 Klasická mřížová síť [12]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-1 K modifikované metodě uzlových napětí [1].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3-2: Fázorový diagram</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 4-1: Celkové zatížení distribučních transformačních stanic.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 4-2: Zatížení vybraných transformací na přípojnicích vn</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 4-3: Zatížení vybraných transformací na přípojnicích vn</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 4-4: Zatížení jednotlivých transformací k roku 2010 odvozené z měřených dat.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 4-5: Plánovaný rozvoj DS 110 kV [9]</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 5-1: Plošný vývoj zatížení řešené oblasti při použití lineární vyrovnávací funkce.....</i>	<i>53</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 3-1: Znaménková konvence pro zadané činné a jalové výkony v i-tém uzlu ES [5].</i>	28
<i>Tab. 4-1: Jmenovité výkony transformačních stanic</i>	38
<i>Tab. 4-2: Celkové instalované výkony jednotlivých transformací</i>	39
<i>Tab. 4-3: Naměřené hodnoty proudového maxima při soudobém zatížení</i>	40
<i>Tab. 4-4: Maximální soudobé zatížení jednotlivých transformací</i>	40
<i>Tab. 4-5: Zatížení transformačních stanic k roku 2010 odvozené z měřených dat</i>	43
<i>Tab. 4-6: Plánovaný rozvoj DS 110 kV</i>	46
<i>Tab. 5-1: Tabulka hodnot pro výpočet parametrů a, b lineární funkce</i>	48
<i>Tab. 5-2: Tabulka hodnot pro výpočet parametrů a, b exponenciální funkce</i>	50
<i>Tab. 5-3: Výchozí hodnoty potřebné pro posouzení správnosti volby dané funkce</i>	51
<i>Tab. 5-4: Vypočtené hodnoty potřebné pro posouzení správnosti volby dané funkce pro lineární funkci</i>	51
<i>Tab. 5-5: Vypočtené hodnoty potřebné pro posouzení správnosti volby dané funkce pro exponenciální funkci</i>	51
<i>Tab. 5-6: Činitelé určující správnost zvolené vyrovnávací funkce</i>	52
<i>Tab. 5-7: Plošný vývoj zatížení</i>	52
<i>Tab. 6-1: Zatížení transformačních stanic k roku 2010 odvozené z měřených dat</i>	56
<i>Tab. 7-1: Investiční náklady na vedení 110 kV</i>	59
<i>Tab. 7-2: Investiční náklady na trafostanici 110/22 kV</i>	60
<i>Tab. 7-3: Investiční náklady kabelového vedení 22 kV</i>	61

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

a.s.	akciová společnost
BNC	transformační stanice Černovice
BNJ	spínací stanice Jílová
BNP	spínací stanice Příkop
BNS	spínací stanice Klusáčkova
BNT	transformační stanice Brno - Teplárna
BOB	transformační stanice Bohunice
ČEPS, a.s	provozovatel české energetické přenosové soustavy
ČSN	česká technická norma
ČR	Česká republika
DS	distribuční soustava
ES	elektrizační soustava
HUV	transformační stanice Husovice
KV	transformační stanice Komárov
LI	transformační stanice Líšeň
MEY	transformační stanice Medlánky
nn	hladina nízkého napětí
PS	přenosová soustava
TR	transformační stanice
UCTE	unie pro koordinaci přenosu elektrické energie
vn	hladina vysokého napětí
vvn	hladina velmi vysokého napětí

Symboly:

a	parametr rovnice	-
b	parametr rovnice	-
d	průměrná absolutní odchylka	W
F	funkce	-
\vec{i}_i	fázor proudu v i -tém uzlu soustavy	A
\vec{I}_i^*	komplexně sdružený fázor proudu	A
\vec{I}_{ij}	fázor proudu mezi uzly i a j	A

J	Jacobián	-
k	pořadí iterace	-
n	počet měření	-
P_i	činný výkon v i -tém uzlu soustavy	W
ΔP_i	diference činného výkonu v i -tém uzlu soustavy	W
Q_i	jalový výkon v i -tém uzlu soustavy	VAr
ΔQ_i	diference jalového výkonu v i -tém uzlu soustavy	VAr
\bar{S}_i	zdánlivý výkon v i -tém uzlu soustavy	VA
\bar{S}_i^*	komplexně sdružený fázor zdánlivého výkonu	VA
\bar{U}_i	fázor napětí v uzlu i	V
\bar{U}_i^*	komplexně sdružený fázor napětí	V
U_s	sdružené napětí	V
$\Delta \bar{U}_i$	diference fázoru napětí v i -tém uzlu soustavy	V
V	variační součinitel	%
\bar{Y}_{ij}	podélná admitance mezi uzly i a j	S
α	fázový posun fázoru proudu vůči reálné ose	°
δ	fázový posun fázoru napětí vůči reálné ose	°
$\Delta \delta_i$	diference fázového posunu napětí v i -tém uzlu soustavy	°
ε	zadaná přesnost výpočtu	-
σ	průměrná směrodatná odchylka	W
φ	fázový posun mezi fázory napětí a proudu	°

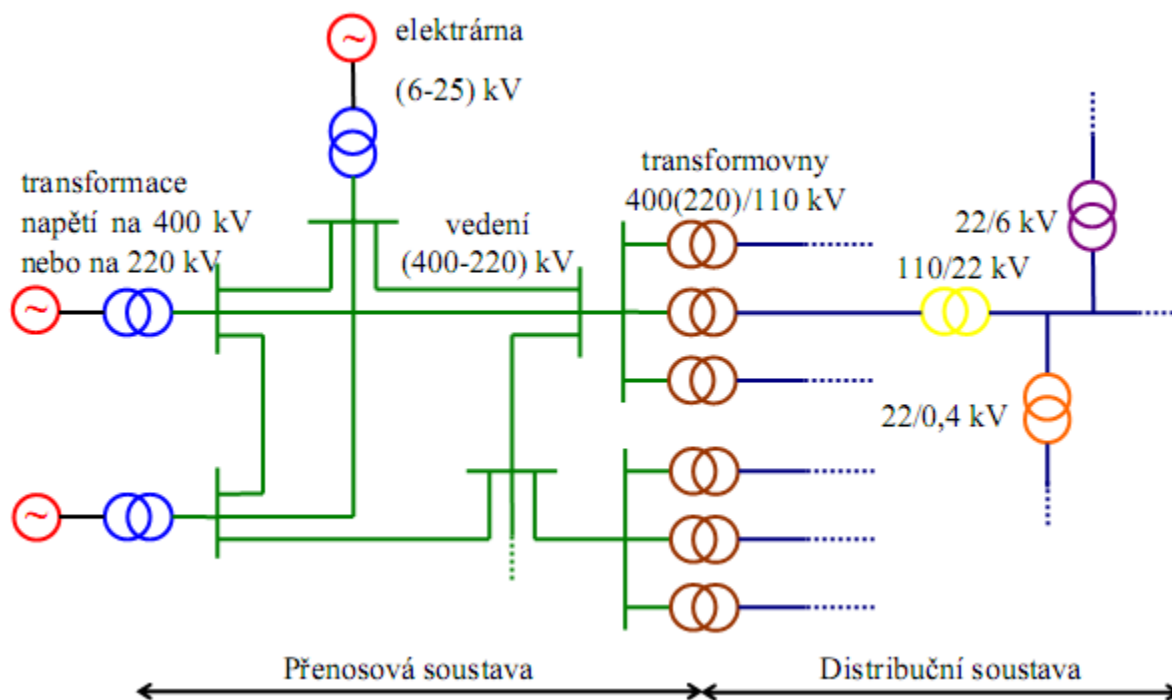
1 ÚVOD

Distribuční soustava (DS) představuje komplex elektrických zařízení (elektrických vedení, transformátorů, kompenzačních prostředků, atd.), které tvoří nedílnou součást elektroenergetických systémů. V souvislosti s rostoucími požadavky na množství, kvalitu a spolehlivost dodávky elektrické energie je nutné průběžně provádět rekonstrukci stávajících elektrických zařízení. Současný rostoucí počet průmyslových, obchodních a zábavných center v Brně vyžaduje také výstavbu nových kapacit (transformačních a spínacích stanic, vedení) a to tak, aby byla vždy spotřebitelům zaručena dodávka elektrické energie v požadovaném množství a předepsané kvalitě.

Pro ochranu spotřebitelů elektrické energie byla v roce 2005 vydána vyhláška č. 540/2005 Sb. o kvalitě dodávek elektřiny a souvisejících služeb v elektroenergetice. Na základě této vyhlášky má konečný zákazník právo požadovat od provozovatele DS náhradu za nedodržení příslušných ukazatelů kvality a spolehlivosti dodávky elektřiny. Limity standardů obsažených ve výše uvedené vyhlášce stanovuje Energetický regulační úřad ČR. V budoucnu lze očekávat jejich zpřísnění a tím tlak na energetické společnosti, aby neustále zvyšovaly spolehlivost elektroenergetických systémů.

2 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA V ČESKÉ REPUBLICE

Elektrizační soustava (ES) je vzájemně propojený soubor zařízení zahrnující elektrárny; zařízení pro přenos, transformaci a distribuci elektrické energie; systémy měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky a neposlední řadě spotřebiče elektrické energie.



Obr. 2-1: Zjednodušená struktura elektrizační soustavy ČR [1]

2.1 Dělení elektrizační soustavy podle hladiny napětí

Struktura elektrizační soustavy je znázorněna na obrázku Obr. 2-1. Z něj lze vysledovat její posloupnost. Elektrárny dodávají přes své blokové transformátory energii do přenosové soustavy. Z přenosové soustavy jsou následně napájeny rozvodné soustavy. Přenosové a rozvodné soustavy se neliší pouze svými napěťovými úrovněmi, ale také způsobem spojení elektrického středu se zemí. Podle hladiny napětí dělíme ES (viz. Obr. 2-1) na přenosovou (PS) a distribuční (DS) neboli rozvodnou soustavu.

2.1.1 Přenosová soustava

PS se používá pro přenos velkých výkonů na velké vzdálenosti. V české republice do PS řadíme elektrické sítě s napětím 400 kV a 220 kV a je provozována s uzemněným uzlem. PS propojuje všechny významné subjekty v ES v ČR. Od roku 1995 je trvale připojena k západoevropské soustavě UCTE a vlastní ji společnost ČEPS, a.s.

2.1.2 Distribuční soustava

DS tvoří soubor zařízení pro rozvod (distribuci) elektrické energie z nadřazené PS nebo ze zdrojů zapojených do ní ke koncovým uživatelům. V České republice se jedná o zařízení s napětím 110 kV a nižším. Soustava s napětíovou hladinou 110 kV je provozována stejně jako PS s uzemněným uzlem, soustavy s napětím 22 kV a 35 kV mají uzel od země izolovaný, nebo připojený přes zhášecí tlumivku nebo přes rezistor. V soustavách 400/230 V poté převažují sítě, v nichž jsou uzly vinutí transformátoru připojeny na potenciál země.

2.2 Druhy elektrických vedení

Elektrické vedení je základním prvkem přenosových a distribučních sítí a představuje soubor vodičů, izolačních materiálů a konstrukcí určených pro přenos elektrické energie mezi dvěma body elektrické sítě, mezi jejími uzly. Elektrická vedení je možné dělit na kabelová a venkovní.

2.2.1 Venkovní vedení

Venkovní vedení tvoří holé vodiče, které jsou nad zemí (terénem) vedeny pomocí izolátorů a vhodných podpěrných stožárů. Používají se tam, kde je pro ně dostatek prostoru a kde není nadměrná hustota zatížení. Při výstavbě nových vedeních jsou preferovány, přestože jejich náklady na provoz a údržbu jsou vyšší než u kabelových vedení. Významnou roli při rozhodování o výstavbě nového vedení hrají investiční náklady. Ty jsou u venkovních vedení v porovnání s vedením kabelovým značně nižší. Dle hladiny napětí používaných v ČR lze venkovní vedení naší distribuční soustavy dělit:

Vedení 110 kV

Vedení 110 kV (vvn), které složí k přenosu velkých výkonů z místa propojení s přenosovou soustavou do míst s velkou koncentrací odběrů. Délky těchto vedení mohou činit i několik desítek kilometrů. Tato vedení musí být vysoce spolehlivá. S tím souvisí jejich poměrně vysoké investiční a provozní náklady. Tato vedení bývají většinou dvojitá a provozují se jako okružní rozvod. Tvoří je holá ocelohliníkové lana AlFe.

Vedení 22 kV

Vedení 22 kV (vn) se využívají pro přenos elektrické energie do center její spotřeby, jako jsou obce, města a velkoodběratelé. Tato vedení jsou kratší než vedení 110 kV. Rovněž se u nich vyžaduje vysoká spolehlivost dodávky, ovšem ne tak velká, jak je tomu u vedení 110 kV. Provozují se jako okružní i paprsková síť. Pro vedení vn se používají ocelohliníkové vodiče AlFe, jednoduché izolované vodiče AFXz nebo SAX a slané izolované vodiče SAXKA nebo DISTRI.

Vedení 400 V

Nejnižší hladina napětí používaná v naší rozvodné soustavě je 400 V. Stejně jako u všech předchozích hodnot napětí (400, 220, 110, 35 a 22 kV) se jedná o hodnotu sdruženou. Tedy o hodnotu, kterou bychom teoreticky naměřili voltmetrem mezi dvěma různými fázemi souměrné trojfázové soustavy. Vedení 400 V má omezené možnosti přenosu výkonu na určitou vzdálenost, která je zejména limitována úbytkem napětí na vedení. Pro tato vedení se používají holé vodiče AlFe, izolované vodiče nebo závěsné kabely.

2.2.2 Kabelová vedení

Kabelová vedení nachází uplatnění tam, kde nelze z prostorových, bezpečnostních případně jiných důvodů (silná námrazová oblast, chemicky agresivní prostředí) použít vedení venkovní. Pořizovací náklady těchto vedení jsou oproti venkovním vedením podstatně vyšší. Kabelová vedení naší DS lze opět rozdělit:

Vedení 110 kV

Tato vedení se díky vysokým investičním nákladům a jejich technické náročnosti používají ojediněle. Můžeme se s nimi setkat v oblastech, které je nutné zásobit velkými výkony, jedná se tedy především o velká města a průmyslové zóny. Umístění kabelového vedení 110 kV je realizováno převážně v kolektorech. Málokdy je možné využít instalaci kabelového vedení 110 kV ve volném terénu.

Vedení 22 kV

Vedení 22 kV jsou v největší míře zastoupeny v kabelových rozvodech velkých měst. Nejčastěji se provozují jako okružní síť. Jsou na ně kladeny velké nároky, co se týče pronikání vlhkosti. V současné době se nejčastěji používají kabely s izolací ze zesíleného polyetylenu. Mezi nejčastěji žádané kabely patří typy AXEKVCEY, AXEKVCY, AVXEKVCE, AVXEKVCEY, CXEKVCY a CXEKVCEY.

Vedení 400 V

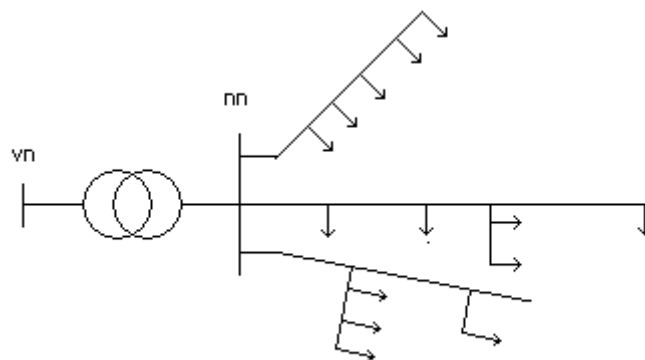
Vedení se jmenovitým napětím 400 V slouží k rozvodu elektrické energie od transformátorů 22/0,4 kV až do rozvodné skříně spotřebitele. Hlavní kabelová vedení nn se navrhují a provozují převážně jako okružní vedení, rozpojené na jednotlivé paprsky.

2.3 Druhy sítí

Distribuční síť se podle požadované spolehlivosti a kvality dodávky elektrické energie musí vhodným způsobem zapojit. Síť je možné dle zapojení dělit:

2.3.1 Síť paprskové

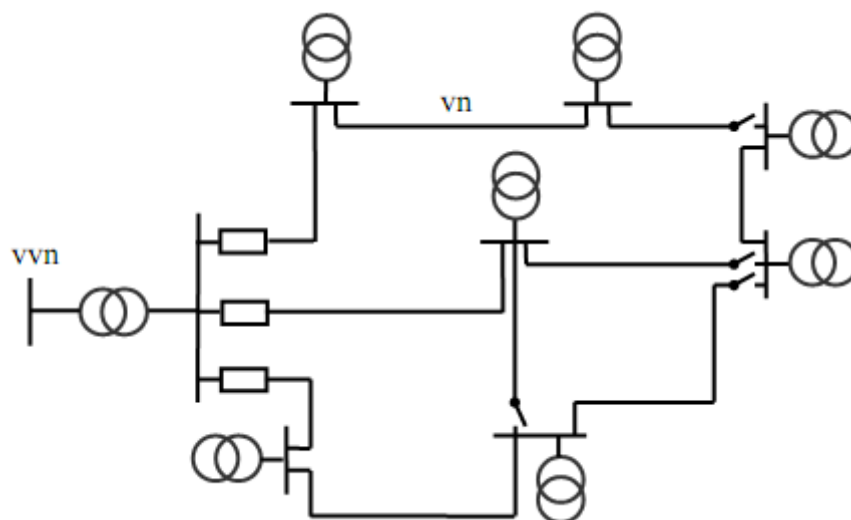
Jsou to takové sítě, u nichž vedení, a to buď venkovní nebo kabelové, vycházející z napájecího uzlu (ze spínací stanice nebo transformovny) zásobuje jednotlivé odběry. Každý vývod je samostatný a nelze je vzájemně spojovat. Tento druh sítí se převážně používá ve venkovských obcích, malých městech a v průmyslu pro napětí 110 kV a 22 kV, ale také u 400/230 V, kde není nutná velká spolehlivost dodávky elektrické energie. Při poruše nebo zkratu na takovém vedení dochází k výpadku a přerušení dodávky elektřiny konečnému zákazníkovi. Tento nedostatek je kompenzován nízkými investičními a provozními náklady.



Obr. 2-2 Paprsková síť

2.3.2 Síť okružní

Okružní síť se skládá z okružních vedení, jejichž oba konce jsou připojeny na totéž napájecí místo, takže každý odběr se může napájet ze dvou stran, což zlepšuje bezpečnost dodávky elektrické energie při poruše na okružním vedení. Kvůli vzájemnému propojení, na které je potřeba vedení větších délek, jsou dražší než paprskové. Jejich hlavní výhodou je přirozené rozdělení toků proudu a tím snížení ztrát na vedení a zlepšení úbytku napětí. Provoz těchto sítí je přehledný a nenáročný. Tento způsob rozvodu se používá především k napájení větších měst a větších obcí pro nízké, ale i vysoké napětí.

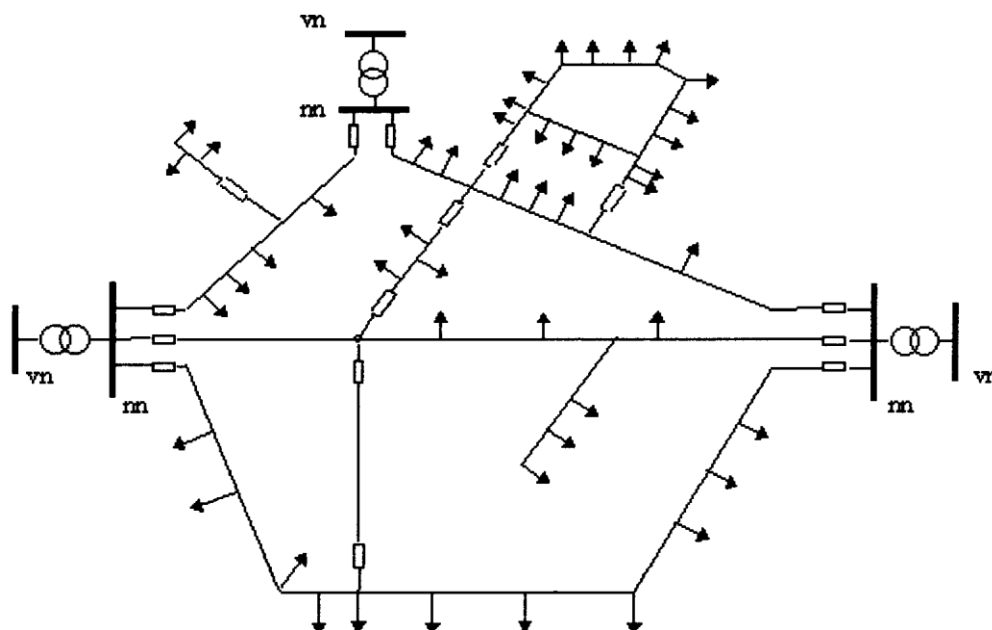


Obr. 2-3 Okružní síť [12]

2.3.3 Zauzlená a mřížová síť

Zauzlené sítě se používají především u sítí nn ve větších městech s velkou hustotou zástavby. Uzlová síť zabezpečuje provoz a zlepšuje bezpečnost dodávky elektrické energie, jelikož každý odběr se může napájet z několika stran. Napětíové poměry jsou v této síti nejvýhodnější, kolísání napětí je v ní nejmenší a rozloženo rovnoměrněji a průřezy vodičů jsou menší než u sítí okružních. Rozšířit síť nebo rozmnožit počet stanic je snadné, ochrana proti zkratům je však

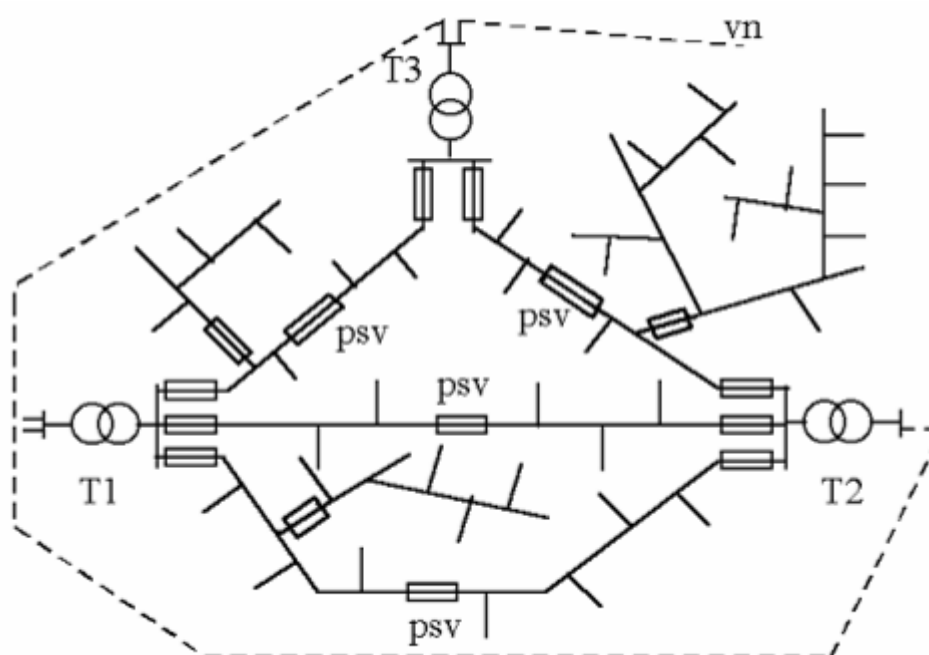
obtížnější než u ostatních typů sítí, neboť mají větší zkratové proudy. Zvláštním typem sítě uzlové je síť mřížová.



Obr. 2-4 Zauzlená síť [12]

Mřížová zjednodušená síť

Zjednodušenou mřížovou síť lze vytvořit tehdy, pracují-li do společné sítě alespoň dva transformátory. Mezi těmito stanicemi je spojení hlavními vedeními, obvykle s většími průřezy, jištěnými výkonovými pojistkami. Ve vhodných místech těchto magistrál, nejlépe v místech tzv. kritického průřezu, jsou slabší pojistky zvané pojistky slabé vazby. Zjednodušená mřížová síť reaguje na poruchy na straně nn, nikoliv na straně vn. Ze schématu je zřejmé, že distribuční transformátory jsou napájeni jedním vedením vn, obvykle venkovním.



Obr. 2-5 Zjednodušená mřížová síť [12]

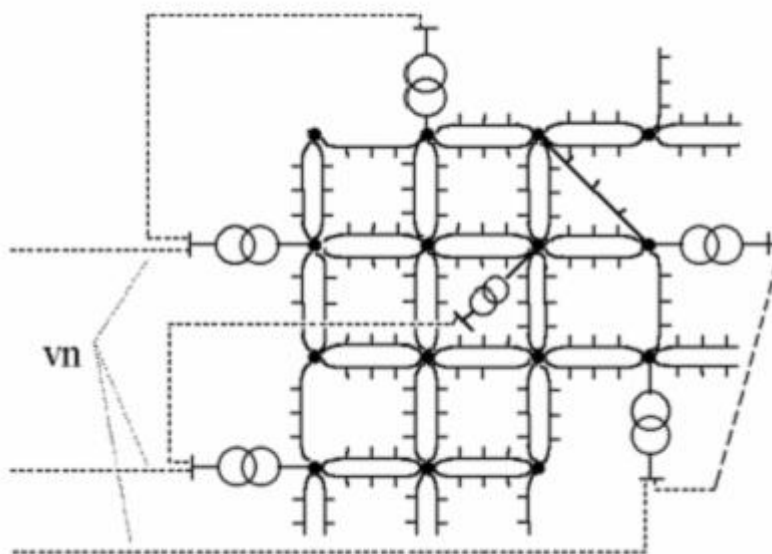
Klasické mřížová síť

Klasická mřížová síť se hodí do větších měst s měrnou hustotou 500 až 1000 kW/km² a více, kde je několik transformoven napájených nejméně dvěma, lépe třemi až pěti napáječi vn. V klasické síti se projeví lepší bezpečnost zásobování odběratelů při poruše některého napáječe vn.

Výhody mřížových sítí:

- Lepší využití transformátorů i vedení. Transformátory si vzájemně pomáhají, zatížení se rozdělí rovnoměrněji, takže při stejném zatížení se oproti paprskovému nebo okružnímu rozvodu ušetří na počtu transformoven.
- Zmenší se úbytky i kolísání napětí, úroveň napětí je rovnoměrnější.
- Zmenší se ztráty v síti.
- Lze připojovat větší soustředná zatížení (např. motory nakrátko) tzn., že domovní výtahy nezpůsobují nepříjemné blikání světla.
- Velká výhoda mřížových sítí je, že při neustálém zvětšování spotřeby elektrické energie není třeba síť rekonstruovat, neboť stačí do vhodných míst sítě umístit další transformovny.

Nevýhoda mřížových sítí - větší zkratové proudy v síti nn.



Obr. 2-6 Klasická mřížová síť [12]

2.4 Další části ES

Mezi další části ES patří transformovny, spínací stanice, měnirny, kompenzační stanice a také kolektory.

2.4.1 Transformovny

Jak už z názvu vyplývá, transformovny slouží k transformaci (změně) hladiny napětí. Součástí transformoven jsou transformátory hlavní a vlastní spotřeby a pomocná zařízení

(přípojnice, vypínače, ochrany apod.) Transformovny jsou vazebními body mezi komplexem sítí s vyšším a nižším napětím. Z hlediska velikostí převodních napětí je lze dělit:

Napájecí transformovny:

Jsou to transformovny, v nichž se transformuje napětí ze 110 kV na 22 kV. Tyto stanice se budují v optimálním místě výhodném pro další rozvod elektřiny, Pokud daná lokalita disponuje dostatkem prostoru, budují se jako venkovní. Tam, kde jsou stísněné prostorové podmínky, např. centra měst, se používají transformovny vnitřní. I přes značné zdražení to obvykle jsou zařízení s elektronegativní plynem SF₆.

Distribuční transformovny

Jsou to transformovny sloužící pro převod napětí z 22 kV na 0,4 kV. Využívají se k zásobování měst a obcí elektrickou energií. Konstruují se ve třech provedeních – věžové, sloupové nebo jako kiosky. Dnes se dává přednost kioskovým, obvykle vybaveným jedním transformátorem o výkonu 630 kVA. Ve městech jsou řešeny dle prostorových možností buď jako samostatně stojící kiosky nebo jsou vestavěné v budovách. Mohou disponovat maximálně dvěma transformátory o výkonu 2 x 630 kVA. V menších obcích, kde se neočekává růst zatížení, se mohou stavět sloupové DT s transformátorem do výkonu 400 kVA.

Odběratelské transformovny

Tyto transformovny se ve svém provedení nijak neliší od distribučních transformoven. Rozdíl mezi odběratelskými a distribučními transformovny spočívá v tom, že distribuční transformovny jsou ve vlastnictví distribučních společností, kdežto odběratelské stanice jsou majetkem samotných odběratelů elektrické energie.

2.4.2 Spínací stanice

Úkolem spínacích stanic je rozvod elektrické energie se stejným napětím. Spínací stanice nám také umožňují provádět provozní manipulace v ES, čímž se výrazně zvyšuje její spolehlivost. V případě poruchy nám totiž umožňují eliminovat poruchu na co nejmenší počet odběratelů. Budují se buď samostatně, nebo jako součást jiné elektrické stanice (transformovny, elektrárny). Klasická spínací stanice se vyskytuje v novější době méně často, protože s ohledem na hospodárnost výstavby a provozu se do uzlů elektrizační soustavy obvykle soustřeďuje též napájení sítí nižšího napětí, což vede k použití transformoven.

2.4.3 Měnírny

Měnírna neboli měničová stanice, je elektrická stanice, která slouží k přeměně střídavého elektrického proudu na proud jiného kmitočtu nebo na proud stejnosměrný a také zajišťuje jeho rozvod. Měníčová stanice může rovněž měnit proud stejnosměrný na střídavý (tzv. střídač). S měnírny se můžeme setkat ve městech, kde jsou jejich prostřednictvím napájeny trakční vedení městských dopravních podniků.

Hlavní elektrickou částí měničové stanice jsou skupiny zařízení, sloužící ke změně kmitočtu nebo k usměrnění střídavého proudu, tj. frekvenční měniče a usměrňovače. Ostatní skupiny zařízení, např. spínací přístroje, transformátory, atd. se volí podle účelu a velikosti měničové stanice a uspořádání je podobné jako v transformovně.

2.4.4 Kompenzační stanice

Kompenzační stanice používáme pro paralelní nebo sériovou kompenzaci. Paralelní kompenzace nám umožňuje zmírnit nepříznivý vliv jalové induktivní složky proudu, kterou odebírá spotřebič, v prvcích ES. Pomocí sériové kompenzace zmenšujeme výslednou induktivní reaktanci vedení. Účelem toho je zmenšení úbytku napětí na vedení a přizpůsobení jeho parametrů odebíranému výkonu tak, aby vedení pracovalo v oblasti s nejvyšší účinností [1].

2.4.5 Kolektory

Kolektory jsou podzemní objekty, do nichž se pokládají sítě různých typů (kabelová vedení, telekomunikační sítě, ale také například parovody, vodovody či kanalizaci). Na rozdíl od běžné pokládky kabelového vedení přímo do země jsou neustále přístupné, a tím nám umožňují jednoduché rekonstrukce a obměny sítí. Při klasickém ukládání jednotlivých inženýrských sítí přímo do země se při jejich opravě nebo výměně nevyhne výkopům, které jsou finančně náročné a značně omezují dopravu ve městech. Rovněž při tomto způsobu uložení lze jen stěží odhalit poruchy menšího rozsahu na vodovodních nebo parovodních systémech. Kolektory všechny tyto problémy odstraňují. Kolektory se dělí na primární (hlubinné) a sekundární (podpovrchové).

Ražení kolektorů v centrech se provádí tunelovací metodou s okamžitou aktivací ostění. Pro stavby mimo historickou část města se používá metoda hloubení z povrchu. Vlastní těleso kolektoru je obdélníkového profilu a je provedeno z železobetonu.

Primární kolektory

Primární kolektory se umísťují až do hloubky 25 až 35 m pod povrch v závislosti na geologické skladbě podloží. Pro hlavní trasy se používají kolektory s kruhovým profilem s průměrem 5,1 metrů s rovným dnem o světlé výšce 4 metry. V primárních kolektorech mohou být uloženy všechny druhy inženýrských sítí mimo plynovodu a kanalizace.

Sekundární kolektory

Sekundární kolektory se nacházejí v hloubce asi 5 metrů pod povrchem. Jejich příčný profil je závislý na obsazení inženýrskými sítěmi. Do sekundárních kolektorů lze uložit všechny druhy inženýrských sítí kromě plynovodu. Těmito kolektory jsou vedeny energetická média až do jednotlivých domovních bloků. Pokud pro nedostatek místa nelze zajistit přívod inženýrských sítí v kolektoru až k jednotlivým domům, provede se zbylá část zasíťování energokanály.

3 ZPŮSOBY VÝPOČTU SÍTÍ VN V USTÁLENÉM STAVU

Předpokládáme, že se řešená síť vn nachází v ustáleném stavu. Ustáleným stavem rozumíme, že v uvažované soustavě nedochází ke krátkodobým přechodným jevům, jejichž příčinou mohou být zkraty, údery blesku do vedení nebo do jejich blízkosti, připojování nebo odpojování vedení, zdrojů, kompenzačních prvků apod. Ve skutečnosti ustálený stav v elektrizační soustavě nenastane nikdy, příčinou je neustále se měnící zatížení spotřebičů a zdrojů připojených v soustavě. Tyto změny bývají obvykle malé, proto je při výpočtu zanedbáváme.

Úkolem výčtu sítí vn je určit proudové a napěťové rozdělení, případně ztráty výkonu v jednotlivých prvcích soustavy. Znalost těchto veličin je nutná pro řízení provozu ES a vypočítané údaje jsou používány jako výchozí pro navrhování dalšího rozvoje ES. Sítě vn často řešíme s těmito zjednodušujícími předpoklady [1]:

- a) Neuvažuje se příčná admitance všech prvků soustavy (vedení, transformátorů, atd.).
- b) Parametry jednotlivých prvků soustavy jsou konstanty nezávislé na proudu a napětí.
- c) Napětí zdrojů a proudy odběrů jsou harmonickými funkcemi času s frekvencí 50 Hz.
- d) U trojfázových soustav předpokládáme symetrii prvků v parametrech a u odběrů a zdrojů v proudech a napětích.
- e) Odběry jsou zadány pomocí proudů nezávislých na napětí, které je na jejich svorkách.

3.1 Obecná metoda řešení uzlových sítí

Z výše uvedených předpokladů lze k výpočtu použít všechny metody řešení lineárních obvodů (metodu smyčkových proudů, uzlových napětí, superpozici, Theveninovu větu a transfiguraci). Vhodnost použití těchto metod se posuzuje podle počtu neznámých, které je v daném obvodu třeba vyčíslit a podle zadání zdrojů a spotřebičů.

Podrobnou analýzou náhradních schémat rozvodných soustav lze prokázat, že k jejich řešení je nejvhodnější zvolit metodu uzlových napětí. Krátce to můžeme zdůvodnit takto [1]:

- a) Kostra schématu sítě má téměř vždy více paralelních větví, než je počet nezávislých smyček. Uzlových napětí je proto méně než smyčkových proudů, tzn., že dostaneme méně neznámých.
- b) Zdroje jsou častěji zadávány jako ideální zdroje proudu a odběry pomocí na napětí nezávislých proudů nebo výkonů, což je pro metodu uzlových napětí vhodné.
- c) Případné křížení větví schématu nekomplikuje u této metody jeho popis.

Vzhledem ke zmíněnému zadání odběrů a zdrojů a k zanedbání příčných admitancí všech prvků sítě nelze použít metodu uzlových napětí bez úprav. Je zapotřebí provést modifikaci této metody, nahradit neznámá uzlová napětí fázory úbytků napětí v uzlech. Odvození je možné provést síť na Obr. 3-1 *K modifikované metodě uzlových napětí* [1].

Proudy v podélných admitancích vyjádříme pomocí uzlových napětí. Pro proud v podélné admitanci \bar{Y}_{ij} platí

$$\bar{I}_{ij} = (\bar{U}_i - \bar{U}_j) \bar{Y}_{ij}. \quad (3.1)$$

Podle I. Kirchhoffova zákona proud v uzlu 1 je

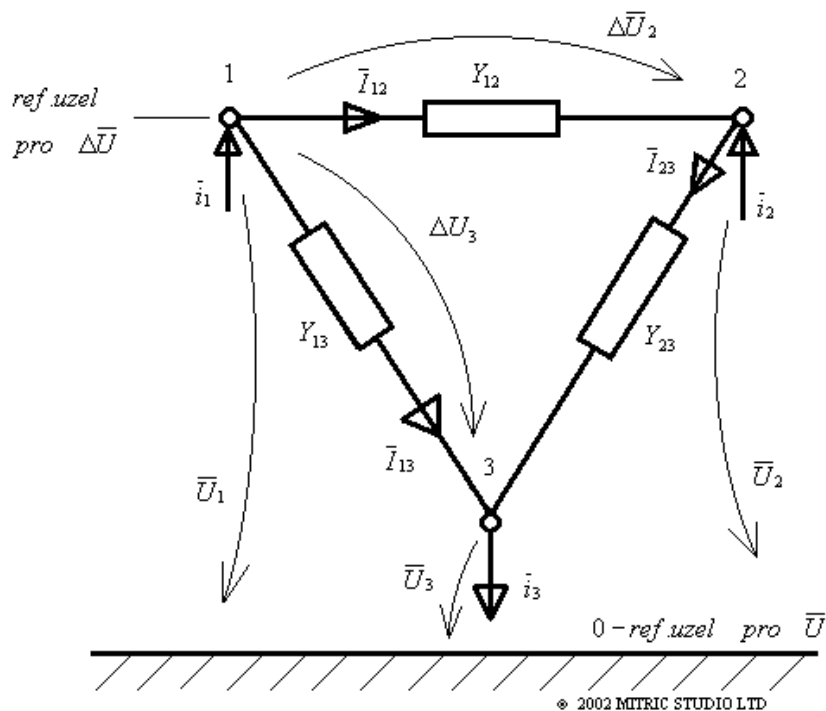
$$\bar{i}_1 = (\bar{U}_1 - \bar{U}_2) \bar{Y}_{12} - (\bar{U}_1 - \bar{U}_3) \bar{Y}_{13} = \bar{U}_1 (\bar{Y}_{12} + \bar{Y}_{13}) - \bar{U}_2 \bar{Y}_{12} - \bar{U}_3 \bar{Y}_{13}. \quad (3.2)$$

Tímto způsobem vyjádříme i zbývající dva proudy \bar{i}_2 a \bar{i}_3

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \\ -\bar{i}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & -\bar{Y}_{12} & -\bar{Y}_{13} \\ -\bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & -\bar{Y}_{23} \\ -\bar{Y}_{31} & -\bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

kde $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3$ jsou neznámá uzlová napětí

$\bar{i}_1, \bar{i}_2, \bar{i}_3$ jsou zadané uzlové proudy, se znaménkem + jsou zadány dodávky a se znaménkem – odběry.



Obr. 3-1 K modifikované metodě uzlových napětí [1]

Předchozí soustavu rovnic lze zkráceně zapsat v maticovém zápise

$$[\bar{i}] = [\bar{Y}] [\bar{U}], \quad (3.4)$$

kde prvky admitanční uzlové matice $[\bar{Y}]$ jsou sestaveny podle algoritmu vyplývajícího z druhého Kirchhoffova zákona.

Admitanční uzlová matice má tyto vlastnosti [1]:

a) je souměrná podle hlavní diagonály, pro její prvky platí

$$\bar{Y}_{ij} = \bar{Y}_{ji} \quad \text{pro } i \neq j. \quad (3.5)$$

b) Prvky hlavní diagonály \bar{Y}_{ii} jsou kladné a jsou to součty admitancí všech větví, které v náhradním schématu vycházejí z i -tého uzlu.

$$\bar{Y}_{ii} = \sum_{k=1}^m \bar{Y}_{ik}, \quad (3.6)$$

kde m je počet větví, které jsou spojeny v i -tém uzlu.

c) Mimo diagonální prvky \bar{Y}_{ij} jsou záporně uvažované admitance větví spojujících v náhradním schématu uzly i a j .

d) Protože náhradní schéma neobsahuje ani jedno vodivé spojení, platí pro každý řádek nebo sloupec matice $[\bar{Y}]$

$$\bar{Y}_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \bar{Y}_{ij} = 0 \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, n, \quad (3.7)$$

tj. součet prvků v každém řádku nebo sloupci je nula. Matice $[\bar{Y}]$ je tedy singulární (její determinant je roven 0) a soustava rovnic (3.3) nemá řešení pro neznámá uzlová napětí.

Tuto vlastnost lze odstranit, vyjádříme-li si uzlová napětí pomocí fázorů úbytků napětí měřených v jednom z uzlů sítě (např. k uzlu 1) a napětí tohoto uzlu (referenčního uzlu fázorů úbytků napětí).

$$\bar{U}_i = \bar{U}_1 + \Delta \bar{U}_i \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, n; \quad \Delta \bar{U}_1 = 0. \quad (3.8)$$

Dosazením rovnice (3.8) do rovnice (3.2) dostaneme

$$\begin{aligned} \bar{i}_1 &= (\bar{U}_1 + \Delta \bar{U}_1) \bar{Y}_{11} - (\bar{U}_1 + \Delta \bar{U}_2) \bar{Y}_{12} - (\bar{U}_1 + \Delta \bar{U}_3) \bar{Y}_{13} = \\ &= \bar{U}_1 \underbrace{(\bar{Y}_{11} - \bar{Y}_{12} - \bar{Y}_{13})}_{=0} + \Delta \bar{U}_1 \bar{Y}_{11} - \Delta \bar{U}_2 \bar{Y}_{12} - \Delta \bar{U}_3 \bar{Y}_{13} = -\Delta \bar{U}_2 \bar{Y}_{12} - \Delta \bar{U}_3 \bar{Y}_{13} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Po této substituci bude mít soustava rovnic (3.4) tvar

$$[\bar{i}] = [\bar{Y}] [\Delta \bar{U}]. \quad (3.10)$$

Protože úbytek napětí v referenčním uzlu pro fázory úbytků napětí je roven nule, sníží se počet neznámých $[\Delta \bar{U}]$ v soustavě rovnic (3.10) o jednu. Soustavu rovnic pro náhradní schéma (Obr. 3-1) se třemi uzly lze přepsat na tvar:

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_2 \\ -\bar{i}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{22} & -\bar{Y}_{23} \\ -\bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\bar{U}_2 \\ \Delta\bar{U}_3 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

V případě sítě s n uzly, ve které byl jeden uzel zvolen za referenční uzel pro fázory úbytků napětí, řeší se neznámé fázory úbytků napětí ze soustavy $n-1$ rovnic

$$[\bar{i}] = [\bar{Y}]' [\Delta\bar{U}]. \quad (3.12)$$

Matice admitancí $[\bar{Y}]'$ má oproti matici $[\bar{Y}]$ nenulový determinant, protože součet prvků této matice alespoň v jednom řádku a sloupci není nulový. Ze soustavy rovnic (3.12) lze vypočítat úbytky napětí

$$[\Delta\bar{U}] = [\bar{Y}]'^{-1} [\bar{i}] \quad (3.13)$$

a při znalosti napětí referenčního uzlu \bar{U}_1 lze určit fázory zbylých uzlových napětí pomocí rovnice (3.8). Proudové rozdělení v elektrické síti pak stanovíme podle rovnice (3.1) [1].

3.2 Výpočet ustáleného chodu ES v praxi

Obecná metoda řešení uzlových sítí představuje z matematického hlediska lineární úlohu. Používá se často pro přibližné (orientační) výpočty, kde velké přesnost výpočtu není nutná. V praxi bývají odběry a dodávky v uzlech ES zadávány nikoli pomocí proudů, jak je tomu u obecné metody řešení uzlových sítí, ale pomocí činných a jalových výkonů. Takže pro i -tý uzel ES platí

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{U}_i \bar{I}_i^*, \quad (3.14)$$

kde \bar{I}_i^* je komplexně sdružený proud k proudu \bar{I}_i . Pro znaménka u činného a jalového výkonu v rovnici (3.14) platí konvence, která je přehledně zobrazena v Tab. 3-1.

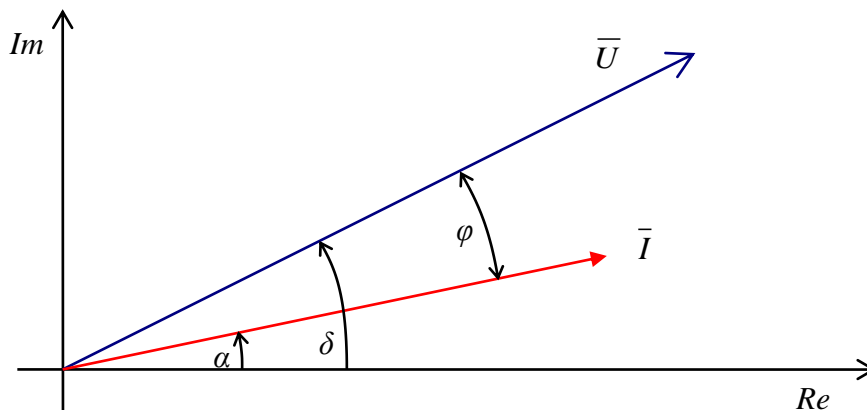
Tab. 3-1: Znaménková konvence pro zadané činné a jalové výkony v i -tém uzlu ES [5].

Uzel	Zdroj	Odběr
Posun proudu	$P > 0$	$P < 0$
induktivní $\varphi > 0$	$Q > 0$	$Q < 0$
kapacitní $\varphi < 0$	$Q < 0$	$Q > 0$

V Tab. 3-1 φ udává fázový posun napětí a proudu. Rovnici (3.14) lze také přepsat na tvar

$$\bar{S}_i = U_i \angle \delta_i I_i \angle -\alpha_i = U_i I_i \angle \delta_i - \alpha_i = U_i I_i \angle \varphi_i = S_i (\cos \varphi_i + j \sin \varphi_i). \quad (3.15)$$

V rovnici (3.15) úhel δ_i vyjadřuje fázový posun napětí v i -tém uzlu vůči reálné ose, úhel α_i určuje fázový posun proudu vůči reálné ose. Pro úplnost uvádíme fázorový diagram (Obr. 3-2) o případ, že proud je zpožděn za napětím u zdroje činného výkonu.



Obr. 3-2: Fázorový diagram

Na Obr. 3-2 je zobrazena situace pro induktivní posun proudu vůči napětí pro zdroj činného výkonu. Tzn., že $\varphi > 0$ a $P > 0$, pak podle znaménkové konvence (Tab. 3-1) je $Q > 0$.

Z rovnice (3.14) vyjádříme proud

$$\bar{I}_i = \frac{\bar{S}_i^*}{\bar{U}_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*}. \quad (3.16)$$

Pro obecnou elektrickou síť určíme pomocí metody uzlových napětí proud v jejím i -tém uzlu, přitom předpokládáme eliminaci bilančního uzlu (odhad napětí v uzlu 1)

$$\bar{I}_i = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j, \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n. \quad (3.17)$$

Položíme-li do rovnosti pravé strany rovnic (3.16) a (3.17), obdržíme důležitý vztah popisující poměry v ES

$$\frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j, \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n. \quad (3.18)$$

Vzhledem k tomu, že jsou zadány výkony v uzlech sítě (dodávky a odběry), napětí bilančního uzlu a admitance \bar{Y}_{ij} vede výpočet neznámých uzlových napětí k řešení soustavy nelineárních (kvadratických) rovnic (3.18). Pro řešení těchto rovnic se v praxi používají iterační metody (Gauss-Seidlova a Newtonova iterační metoda).

Poté, co vypočítáme napětí v jednotlivých uzlech ES, již není problém stanovit proudové rozdělení v soustavě, určit činné a jalové ztráty v jednotlivých prvcích soustavy.

Pro úplnost je třeba uvést, že uzly ES při řešení ustáleného chodu klasifikujeme do tří základních skupin podle toho, které uzlové veličiny (absolutní hodnota napětí, úhel napětí, činný a jalový výkon) jsou v daném uzlu známy.

V *bilančním uzlu* (U, δ) je zadáno napětí a jeho úhel. Tento uzel má za úkol hradit případnou nerovnováhu v bilanci uzlových výkonů a navíc musí hradit ztráty činného a jalového výkonu v síti. Za bilanční uzel by měl být tedy volen uzel, který má k dispozici zdroj výkonu.

Odběrové a zdrojové uzly (P, Q) jsou zadány činným a jalovým výkonem buď dodávaným do uzlu, nebo odebíraným v uzlu. Odběry a dodávky rozlišujeme znaménky podle Tab. 3-1.

Regulační neboli kompenzační uzly (U, P) jsou uzly se zadaným činným výkonem a absolutní hodnotou napětí.

Neznámé uzlové veličiny v jednotlivých typech uzlů ES jsou pak předmětem výpočtu ustáleného chodu ES.

Bez dalšího podrobného zdůvodňování je chod sítě určitý, soustava rovnic (3.18) je řešitelná, jsou-li fyzikální uzlové veličiny chodu ES zadány následovně [1]:

- k napětí,
- jeden úhel fázoru napětí,
- Nejvýše $n - 1$ činných výkonů,
- nejvýše $n - k$ jalových výkonů,

dále musí platit, že napětí nelze volit za nezávisle proměnou v tom uzlu, ve kterém je zadán činný a jalový výkon ani v uzlu sousedním.

V praktických úlohách lze podmínkám určitosti sítě vyhovět, rozdělíme-li uzly ES takto [1]:

- jeden bilanční uzel,
- k odběrových a zdrojových uzlů,
- $n-k-1$ regulačních uzlů.

Výpočet ustáleného chodu sítě Gauss-Seidlovou metodou

Máme řešit soustavu nelineárních rovnic ve tvaru

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_2 \\ &: \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_n \end{aligned} \tag{3.19}$$

Vhodně zvolenou úpravou ji přepíšeme na tvar

$$\begin{aligned} x_1 &= y_1 + \phi_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ x_2 &= y_2 + \phi_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &: \\ x_n &= y_n + \phi_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \tag{3.20}$$

Pak iterační postup výpočtu kořenů můžeme zapsat následovně

$$\begin{aligned}x_1^{(k+1)} &= y_1 + \phi_1(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \\x_2^{(k+1)} &= y_2 + \phi_2(x_1^{(k+1)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \\&\vdots \\x_n^{(k+1)} &= y_n + \phi_n(x_1^{(k+1)}, x_2^{(k+1)}, \dots, x_{n-1}^{(k+1)}, x_n^{(k)})\end{aligned}\quad (3.21)$$

Horní index $(k+1)$ v soustavě rovnic (3.21) označuje pořadí iterace. Při výpočtu první iterace ($k = 0$) vycházíme z nulté aproximace, tj. odhadu kořenů $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$.

Výpočet končí až rozdíl

$$|x_i^{(k+1)} - x_i^{(k)}| \leq \varepsilon \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, n, \quad (3.22)$$

kde ε je zadaná přesnost výpočtu. Při řešení soustavy rovnic (3.21) předpokládáme, že jsou splněny podmínky konvergence.

Nyní aplikujeme uvedený obecný postup Gauss-Seidlový iterační metody na řešení soustavy nelineárních rovnic (3.18). Nejprve uvedenou soustavu rovnic rozepíšeme a tři části

$$\frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} = \sum_{j=1}^{i-1} \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j + \bar{Y}_{ii} \bar{U}_i + \sum_{j=i+1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j. \quad (3.23)$$

Z této rovnice vyjádříme napětí \bar{U}_i , čímž dostaneme vhodný tvar rovnic pro iterační výpočet

$$\bar{U}_i = \frac{1}{\bar{Y}_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} - \sum_{j=1}^{i-1} \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j - \sum_{j=i+1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j \right) \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n. \quad (3.24)$$

Převědeme rovnici (3.24) do iteračního tvaru podle (3.21)

$$\bar{U}_i^{(k+1)} = \frac{1}{\bar{Y}_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{(\bar{U}_i^{(k)})^*} - \sum_{j=1}^{i-1} \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j^{(k)} \right) \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n. \quad (3.25)$$

Výpočet můžeme ukončit, je-li pro všechny i splněna podmínka

$$|\bar{U}_i^{(k+1)} - \bar{U}_i^{(k)}| \leq \varepsilon. \quad (3.26)$$

3.2.1 Výpočet ustáleného chodu sítí Newton-Raphsonovou iterační metodou

Máme řešit soustavu nelineárních rovnic (3.19). Nejdříve provedeme odhad kořenů v nulté iteraci $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$. Odhady kořenů se liší od jejich přesné hodnoty o $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$. Přesná hodnota kořenů je tedy $x_1 = x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2 = x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n = x_n^{(0)} + \Delta x_n$. Původní soustavu rovnic (3.19) můžeme přepsat do tvaru

$$\begin{aligned}
f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_1 \\
f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_2 \\
&\vdots \\
f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_n
\end{aligned} \tag{3.27}$$

Každou rovnici této soustavy můžeme rozepsat na Taylorovu řadu funkce více proměnných v bodě $x_i^{(0)}$. Jsou-li odhady kořene blízké přesné hodnotě, můžeme zanedbat druhé a vyšší derivace, neboť konvergují k nule. Například první rovnici soustavy (3.27) můžeme přepsat na tvar

$$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n = y_1, \tag{3.28}$$

kde $\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_i} \right|_0$ je hodnota parciální derivace v bodě $x_i^{(0)}$ atd.

Označíme-li výraz $f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) = y_1^{(0)}$ pak rovnici (3.28) můžeme přepsat na tvar

$$\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n = y_1 - y_1^{(0)} = \Delta y_1^{(0)}, \tag{3.29}$$

kde $\Delta y_1^{(0)}$ je rozdíl zadané hodnoty pravé strany y_1 a hodnoty $y_1^{(0)}$ určené dosazením odhadu kořenů do rovnice (3.28).

Analogickou úpravou zbývajících rovnic soustavy (3.27) obdržíme soustavu lineárních rovnic pro výpočet neznámých diferencí $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & & & \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta y_1^{(0)} \\ \Delta y_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta y_n^{(0)} \end{bmatrix} \tag{3.30}$$

Tuto rovnici lze zkráceně přepsat na tvar

$$[J] \cdot [\Delta x] = [\Delta y], \tag{3.31}$$

kde $[J]$ je matice parciálních derivací často označovaná jako Jacobián. Ze soustavy rovnic (3.31) vypočítáme vektor hledaných diferencí $[\Delta x]$ a určíme nové opravené odhady kořenů

$$x_i^{(1)} = x_i^{(0)} + \Delta x_i \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, n, \quad (3.32)$$

které použijeme pro výpočet další iterace.

Obecně lze iterační proces postupného zpřesňování kořenů soustavy rovnic (3.19) zapsat následovně

$$\begin{aligned} [\Delta x^{(k)}] &= [J^{(k)}]^{-1} \cdot [\Delta y^{(k)}] \\ x_i^{(k+1)} &= x_i^{(k)} + \Delta x_i^{(k)} \end{aligned} \quad (3.33)$$

kde horní index k určuje k -tou iteraci. Při tom předpokládáme, že existují spojité derivace $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}$ pro $i, j = 1, 2, \dots, n$. Pak je zajištěna jednoznačnost řešení a konvergence iteračního postupu.

Aplikujeme nyní tuto metodu na rovnice popisující ustálený chod sítě. Rovnici (3.18) přepíšeme do tvaru

$$P_i - jQ_i = \bar{U}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.34)$$

Pravou stranu rovnice rozepíšeme na reálnou a imaginární složku v polárním tvaru

$$\bar{U}_i = U_i \angle \delta_i; \quad \bar{U}_i^* = U_i \angle -\delta_i; \quad \bar{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \alpha_{ij}. \quad (3.35)$$

Dosazením polárního tvaru napětí a admitance do rovnice (3.34) dostáváme po úpravě s použitím vztahů pro $\cos(-x) = \cos(x)$ a $\sin(-x) = -\sin(x)$

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^n U_i U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \\ Q_i &= \sum_{j=1}^n U_i U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \end{aligned} \right\} \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.36)$$

To je soustava $2(n-1)$ pro $(n-1)$ neznámých napětí a jejich úhlů. Ve všech uzlech máme zadané dodávané či odebírané činné a jalové výkony kromě bilančního uzlu, kde je zadáno napětí U a jeho úhel δ . Pro výpočet diferencí ΔU_i a $\Delta \delta_i$ po dosazení rovnic (3.36) do soustavy (3.33) dostáváme

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial U_2}, & \frac{\partial P_2}{\partial U_3}, & \dots, & \frac{\partial P_2}{\partial U_n}, & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}, & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3}, & \dots, & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial P_3}{\partial U_2}, & \frac{\partial P_3}{\partial U_3}, & \dots, & \frac{\partial P_3}{\partial U_n}, & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2}, & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3}, & \dots, & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial U_2}, & \frac{\partial P_n}{\partial U_3}, & \dots, & \frac{\partial P_n}{\partial U_n}, & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}, & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_3}, & \dots, & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial U_2}, & \frac{\partial Q_2}{\partial U_3}, & \dots, & \frac{\partial Q_2}{\partial U_n}, & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}, & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3}, & \dots, & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial U_2}, & \frac{\partial Q_3}{\partial U_3}, & \dots, & \frac{\partial Q_3}{\partial U_n}, & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2}, & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3}, & \dots, & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial U_2}, & \frac{\partial Q_n}{\partial U_3}, & \dots, & \frac{\partial Q_n}{\partial U_n}, & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}, & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_3}, & \dots, & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \\ \vdots \\ \Delta U_n \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Důležité je si uvědomit, že ΔU_i v této rovnici neznamená úbytek napětí, ale diferencii odhadu uzlového napětí od přesné hodnoty kořenů rovnice (3.36). Soustavu rovnic (3.37) můžeme zkráceně zapsat pomocí matic rozdělením na pole ve tvaru

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial U} \right] & \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] & \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\Delta U] \\ [\Delta \delta] \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Nyní vypočítáme prvky Jacobiánu v rovnici (3.37) derivováním rovnic (3.36) podle jednotlivých proměnných

a) výpočet prvků matice $\left[\frac{\partial P}{\partial U} \right]$

- diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = 2U_i Y_{ii} \cos \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.39)$$

- mimodiagonální prvky pro $i \neq j$

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_i Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.40)$$

b) výpočet prvků matice $\left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right]$

- diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.41)$$

- mimodiagonální prvky pro $i \neq j$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = U_i U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.42)$$

c) výpočet prvků matice $\left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right]$

- diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = -2U_i Y_{ii} \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.43)$$

- mimodiagonální prvky pro $i \neq j$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = U_i Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.44)$$

d) výpočet prvků matice $\left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right]$

- diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.45)$$

- mimodiagonální prvky pro $i \neq j$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -U_i U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.46)$$

Stručná rekapitulace postupu výpočtu ustáleného chodu sítě Newton-Raphsonovou iterační metodou:

1) V nultém iteračním kroku $k = 0$ odhadneme napětí v uzlech sítě a jejich úhly (obvykle $\bar{U}_i^{(0)} = \bar{U}_1$ pro $i = 2, 3, \dots, n$).

2) Tyto napětí dosadíme do rovnic (3.36) a vypočteme difference výkonů

$$\begin{aligned}\Delta P_i^{(0)} &= P_{i(\text{zadané})} - P_i(U_1, U_2^{(0)}, \dots, U_n^{(0)}, \delta_1, \delta_2^{(0)}, \dots, \delta_n^{(0)}) \\ \Delta Q_i^{(0)} &= Q_{i(\text{zadané})} - Q_i(U_1, U_2^{(0)}, \dots, U_n^{(0)}, \delta_1, \delta_2^{(0)}, \dots, \delta_n^{(0)})\end{aligned}\quad (3.47)$$

3) Dosazením odhadnutých napětí v nultém iteračním kroku do rovnic (3.39) až (3.46) vypočítáme hodnoty prvků Jacobiánu.

4) Vyřešením soustavy lineárních rovnic (3.37) dostáváme difference $\Delta U_i^{(0)}$ a $\Delta \delta_i^{(0)}$ v nulté iteraci.

5) Vypočítáme opravené hodnoty napětí a jejich úhlů na konci prvního iteračního kroku

$$\left. \begin{aligned}U_i^{(1)} &= U_i^{(0)} + \Delta U_i^{(0)} \\ \delta_i^{(1)} &= \delta_i^{(0)} + \Delta \delta_i^{(0)}\end{aligned} \right\} \text{ pro } i = 2, 3, \dots, n. \quad (3.48)$$

6) Zpřesněnými hodnotami napětí a jejich úhlů nahradíme původní odhady a opět provedeme iterační výpočet podle bodů ad 2) až ad 6). Výpočet ukončíme, jakmile jsou splněny nerovnice

$$\left. \begin{aligned}|P_i^{(k)}| &\leq \varepsilon \\ |Q_i^{(k)}| &\leq \varepsilon\end{aligned} \right\} \text{ pro } i = 2, 3, \dots, n, \quad (3.49)$$

kde ε je zvolená přesnost rozdílu zadaných výkonů a výkonů vypočítaných dosazením vypočtených napětí a jejich úhlů do rovnice (3.37).

3.2.2 Zhodnocení uvedených metod výpočtu ustáleného chodu sítě

Jak již bylo řečeno, úkolem výčtu sítí vn je určit proudové a napěťové rozdělení, případně ztráty výkonu v jednotlivých prvcích soustavy. Řešení sítí je prováděno s jistými, výše uvedenými, zjednodušujícími předpoklady.

Při sestavení základních rovnic ustáleného chodu je poté možné použít některou z metod řešení lineárních obvodů (metodu smyčkových proudů, uzlových napětí, atd.). Vhodnost použití těchto metod se posuzuje podle počtu neznámých, které je v daném obvodu třeba vyčíslit a podle zadání zdrojů a spotřebičů. Metoda uzlových napětí se v praxi používá nejčastěji pro jednoduchý algoritmus výpočtu vlastních a vzájemných uzlových admitancí (případně impedancí) a snadnou konfiguraci sítě (propojení jednotlivých větví), kdy případné křížení větví schématu nekomplikuje u této metody jeho popis, jak již bylo popsáno v příslušné kapitole.

Metoda uzlových napětí tvoří základ pro obecnou metodu řešení uzlových sítí. Tato metoda představuje z matematického hlediska lineární úlohu. Proto se používá často pro přibližné (orientační) výpočty, kde velká přesnost výpočtu není nutná. V praxi však bývají odběry a dodávky v uzlech ES zadávány nikoli pomocí proudů, jak je tomu u obecné metody řešení uzlových sítí, ale pomocí činných a jalových výkonů. To znamená, že výpočet neznámých

uzlových napětí vede k řešení soustavy nelineárních (kvadratických) rovnic (3.18). Pro řešení těchto rovnic se v praxi používají iterační metody (Gauss-Seidlova a Newtonova iterační metoda).

Gauss-Seidlova metoda se vyznačuje jednoduchým algoritmem výpočtu a potřebuje oproti jiným iteračním metodám poměrně krátkou dobu výpočtu na jeden iterační krok. Nevýhodou je však její relativně malá konvergence. Dále je potřeba volit vysokou přesnost výpočtu (velmi malé ϵ), jinak se může stát, že nepřesně vypočítaná napětí způsobí značnou chybu v tocích výkonů a uzlových bilancích výkonů. Tyto nevýhody odstraňuje do jisté míry Newton-Raphsonova iterační metoda.

Newton-Raphsonova iterační metoda v porovnání s Gauss-Seidlovou metodou velmi rychle konverguje a potřebný počet iterací k dosažení požadované přesnosti řešení málo závisí na rozlehlosti sítě. Její nevýhodou je poměrně značný nárok na paměť počítače při výpočtů diferencí kořenů. Zároveň řešení soustavy rovnic (3.37) značně prodlužuje výpočtový čas potřebný na jednu iteraci.

Návrh rozvoje a řešení konfigurace sítě 22 kV v dané části Brna bude prováděn v programu PAS DAISY Off-Line v.4.00 Bizon. Výpočet ustáleného chodu v tomto programu probíhá modifikovanou metodou Newton-Raphson, která představuje v současnosti světový standard pro řešení úloh ustáleného chodu. Tím je zaručena rychlá a spolehlivá konvergence výpočtu. V použité metodě není nutné provádět sestavení a triangulace Jakobiánu v každé iteraci, čímž se urychluje výpočet. Podle požadované přesnosti výpočtu a stavu sítě končí výpočet obvykle za 3 až 6 iterací. Výpočet probíhá samostatně pro každou samostatnou uzlovou soustavu v síti [8].

4 CHARAKTERISTIKA DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY MĚSTA BRNA

Distribuční soustavu na území statutárního města Brna a celého Jihomoravského kraje provozuje v podstatě jediná regionální distribuční energetická akciová společnost a tou je E.ON Distribuce, a.s.

4.1 Zdroje elektrické energie

Město Brno je zásobováno elektrickou energií ze dvou napájecích transformačních stanic, ze Sokolnic a Čebína. V Čebíně jsou v současnosti instalovány tři transformátory 400/110 kV o celkovém instalovaném výkonu 950 MVA. Sokolnice disponují čtyřmi transformátory PS/110 kV s celkovým instalovaným výkonem 1150 MW. Rozdělení výkonů na jednotlivé transformátory v obou výše zmíněných transformovných je uvedeno v následující tabulce.

Tab. 4-1: Jmenovité výkony transformačních stanic

Transformační stanice	Čebín	Sokolnice
Počet a jmenovitý výkon transformátorů 400/110kV	2x350 MVA 1x250 MVA	1x350 MVA
Počet a jmenovitý výkon transformátorů 400/220kV	-	1x400 MVA
Počet a jmenovitý výkon transformátorů 220/110kV	-	2x200 MVA
Suma jmenovitých výkonů	950 MVA	1150 MVA

Mezi významné zdroje elektrické energie v Brně patří také teplárny. Teplárna Červený mlýn dodává do sítě E.ON cca 80 MW, vyvedení výkonu je realizováno kabelovým vedením 110 kV do transformovny v Medlánkách. Dalším zdrojem elektrické energie je teplárna Brno – Špitálka, která dodává do sítě E.ON cca 40 MW. Ostatní zdroje zásobující některé průmyslové závody v Brně jsou méně významné, jejich podíl nepřesahuje výši 20 MW [9].

4.2 Napájecí síť 110 kV

Napájecí síť 110 kV je tvořena dvojitým okružním vedením, propojuje napájecí transformační stanice (Čebín a Sokolnice) s distribučními transformačními stanicemi. Soustava 110 kV je provozována odděleně. Z transformovny Čebín jsou v základním provozním stavu napájeny transformovny Medlánky, Bohunice, Komárov, Líšeň a Husovice. Ze Sokolnic jsou potom napájeny průmyslové odběry cementárna a výtopna Maloměřice, Zetor, Královopolská, ČD Modřice a distribuční transformovna Teplárna a Černovice. Transformační stanice Líšeň, Husovice a Komárov jsou tvořeny systémem dvou přípojnic 110 kV, přičemž jedna je napájena z uzlu Sokolnice a druhá z uzlu Čebín [9].

4.3 Transformovny 110/22 kV

Město Brno je napájeno z následujících transformačních stanic 110/22 kV: Bohunice (BOB), Husovice (HUV), Černovice (BNC), Komárov (KV), Líšeň (LI), Medlánky (MEY), Teplárna (BNT). Všechny tyto napájecí transformovny jsou dvoupřípojnicové podélně dělené. Výjimku tvoří transformace Teplárna, která je trojpřípojnicová podélně dělená. Některé transformace jsou vybaveny tzv. pomocnou přípojnici, která je schopna převzít zatížení při poruše na hlavní přípojnici. Pomocnou přípojnici mají transformovny BNT, BOB a HUV, ostatní transformační stanice nejsou pomocnou přípojnici vybaveny. Celkové instalované výkony jednotlivých transformací jsou uvedeny v Tab. 4-2. V transformačních stanicích KV, BOB, MEY a HUV jsou instalovány vždy dva transformátory, každý s instalovaným výkonem 40 MVA, transformace Teplárna disponuje čtyřmi transformátory 40 MVA, v transformovně Líšeň jsou dva transformátory, jeden transformátor o výkonu 40 MVA a druhý o výkonu 25 MVA. Od roku 2007 je v provozu transformace Černovice, která disponuje zatím pouze jedním transformátorem o výkonu 25 MVA. Kromě uvedených transformačních stanic jsou v síti 110 kV odběratelské stanice (Brno-Modřice ČD (MED), Brno-Červený Mlýn (ČML), Brno-Zetor (ZET), Brno-Královopolská (KPO), Výtopna Maloměřice (VMA), Brno-Zbrojovka (ZBB), které nepracují jako distribuční.

Tab. 4-2: Celkové instalované výkony jednotlivých transformací

Trafostanice	KV	LI	BOB	MEY	HUV	BNT	BNC	Celkem
Instalovaný výkon	MVA	MVA	MVA	MVA	MVA	MVA	MVA	MVA
	80	65	80	80	80	160	25	570

Všechny napájecí transformovny s výjimkou transformace Teplárna jsou rozmístěny v okrajových částech Brna. Hlavní výhodou tohoto uspořádání je snadné napájení sídlišť, která leží především na periferii města. Ovšem při této konfiguraci transformoven mohou nastat problémy se zásobováním elektrickou energií ve středu města. Z okrajových transformoven jsou ve vnitřní části města napájeny pomocí sítě 22 kV některé spínací stanice vn bez instalovaného zdroje (např. Příkop (BNP), Klusáčkova (BNS), Jílová (BNJ)). Zatížení těchto spínacích stanic přesahuje 20 MW, což z hlediska provozu sítě 22 kV představuje zvýšené nároky na krytí provozních nákladů a také snížení spolehlivosti dodávky elektrické energie. Tyto nedostatky lze odstranit úpravou sítě 110 kV a zejména posílením vnitřních částí města vybudováním transformací 110/22 kV.

Z naměřených hodnot zimního proudového maxima na kmenových linkách (na výstupu z jednotlivých transformací) při soudobém zatížení lze při dané hladině napětí určit maximální odebíraný výkon.

Tab. 4-3: Naměřené hodnoty proudového maxima při soudobém zatížení

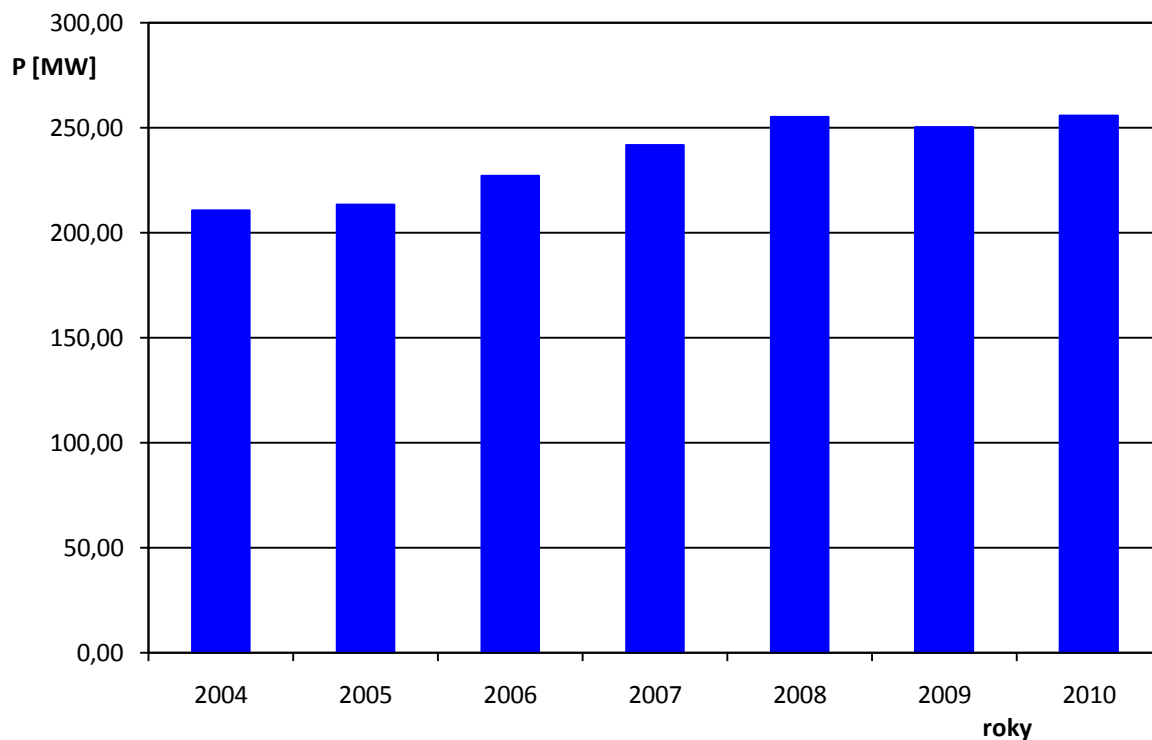
rok	KV	LI	BOB	MEY	HUV	BNT	BNC	Celkem
	<i>I</i> [A]	<i>I</i> [A]	<i>I</i> [A]	<i>I</i> [A]	<i>I</i> [A]	<i>I</i> [A]	<i>I</i> [A]	<i>I</i> [A]
2004	602	407	932	893	904	1879	-	5617
2005	757	396	957	833	867	1880	-	5690
2006	786	425	929	910	928	2071	-	6049
2007	918	368	975	977	971	2064	169	6442
2008	977	392	1065	1000	1005	2177	181	6797
2009	957	364	1070	1012	988	2094	181	6666
2010	935	456	1146	955	1089	2071	163	6815

Hodnoty v Tab 4-3 byly naměřeny firmou E.ON. Pro určení maximálního odebíraného výkonu z jednotlivých transformací při soudobém zatížení volím jednotné napětí na jejich výstupu a to 22,8 kV.

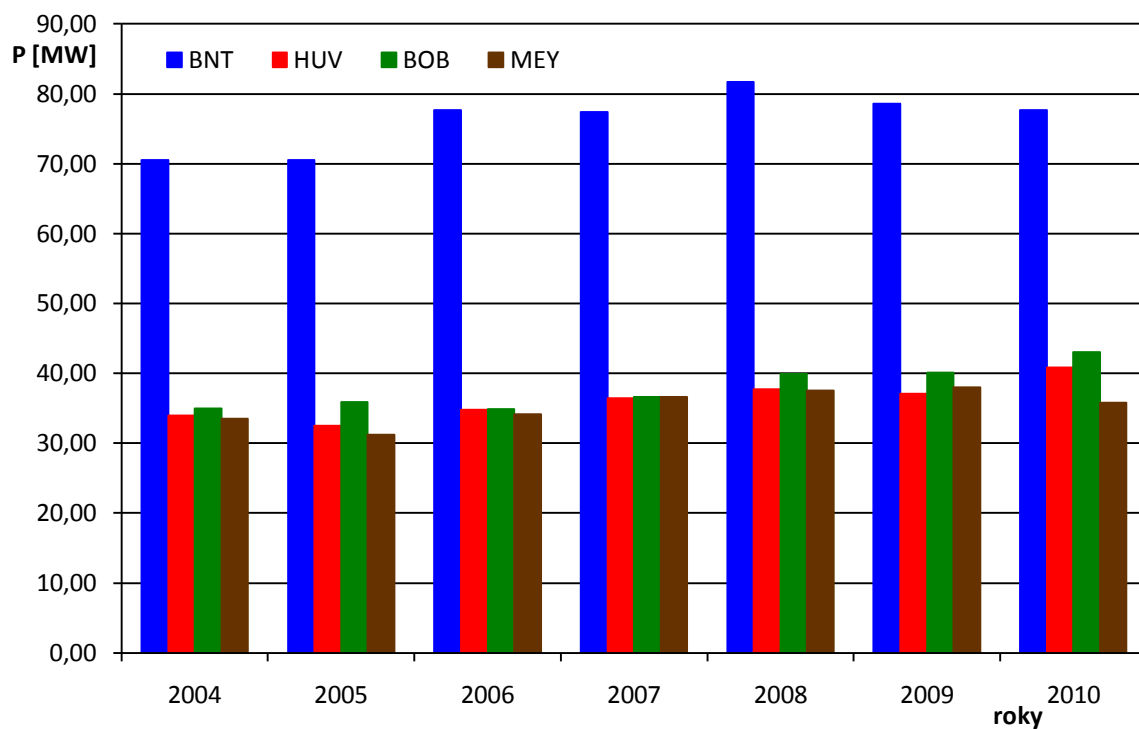
Tab. 4-4: Maximální soudobé zatížení jednotlivých transformací

rok	KV	LI	BOB	MEY	HUV	BNT	BNC	Celkem
	<i>P</i> [MW]	<i>P</i> [MW]	<i>P</i> [MW]	<i>P</i> [MW]	<i>P</i> [MW]	<i>P</i> [MW]	<i>P</i> [MW]	<i>P</i> [MW]
2004	22,58	15,27	34,97	33,50	33,91	70,49	-	210,73
2005	28,40	14,86	35,90	31,25	32,53	70,53	-	213,47
2006	29,49	15,94	34,85	34,14	34,82	77,70	-	226,94
2007	34,44	13,81	36,58	36,65	36,43	77,43	6,34	241,68
2008	36,65	14,71	39,95	37,52	37,70	81,67	6,79	255,00
2009	35,90	13,66	40,14	37,97	37,07	78,56	6,79	250,08
2010	35,08	17,11	42,99	35,83	40,86	77,70	6,12	255,67

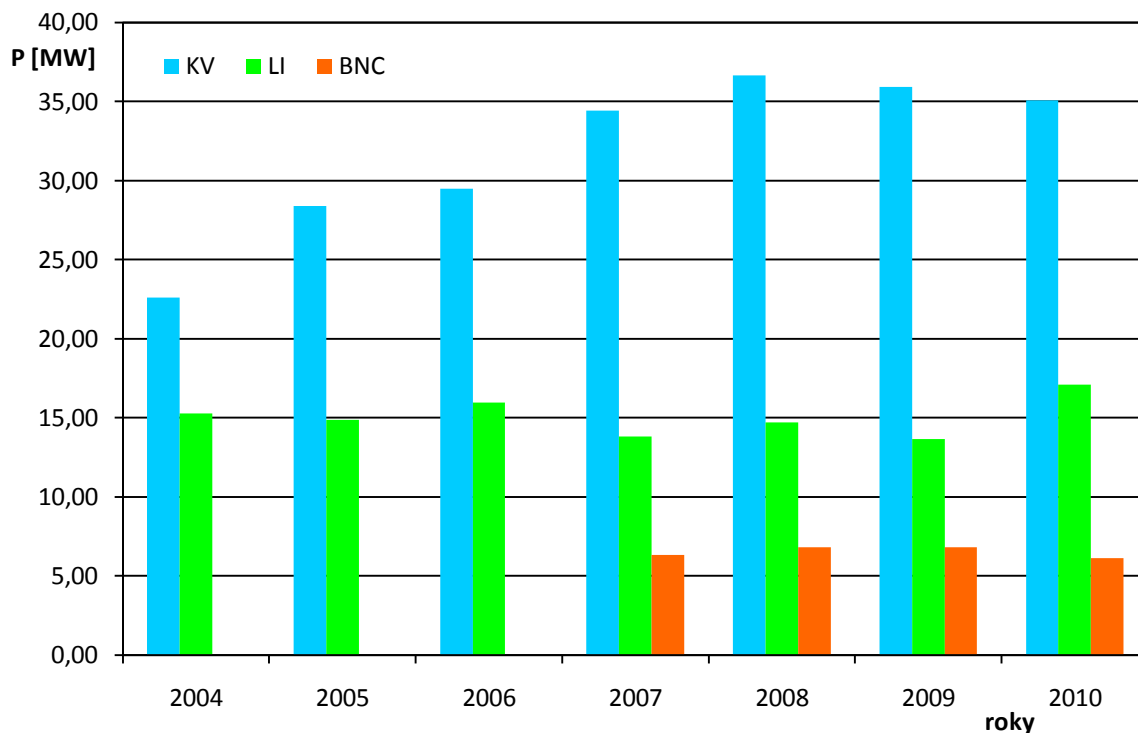
Z vypočítaných hodnot maxima odebíraného výkonu i z grafického zobrazení vývoje zatížení je vidět, že celkové zatížení transformačních stanic roste. Nejedná se ovšem o zcela lineární růst, protože spotřeba elektrické energie závisí především na charakteru zimy v daném roce.



Obr. 4-1: Celkové zatížení distribučních transformačních stanic



Obr. 4-2: Zatížení vybraných transformací na přípojnicích vn



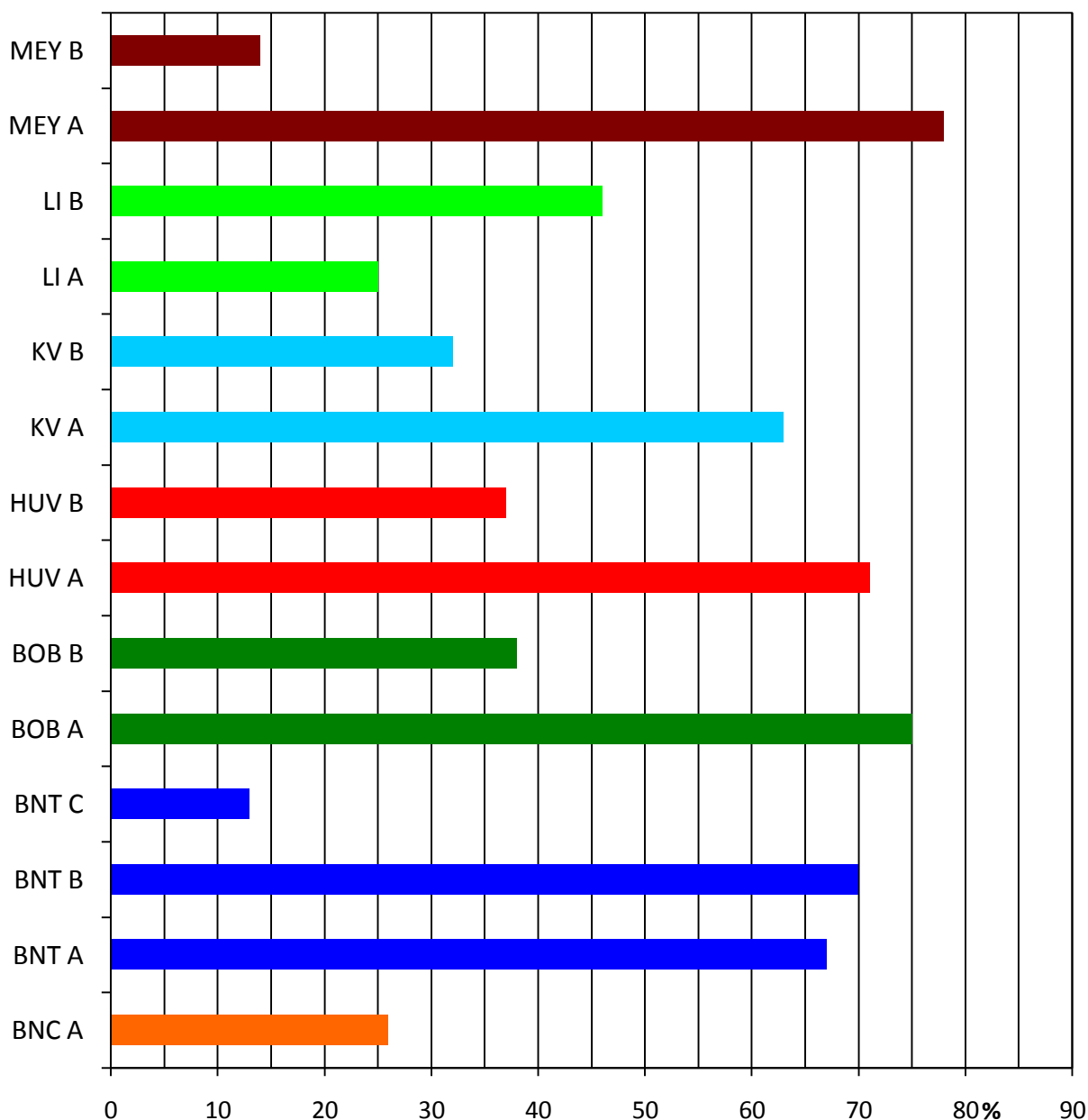
Obr. 4-3: Zatížení vybraných transformací na přípojnicích vn

Vývoj zatížení na jednotlivých transformovnách je různý. V Tab. 4-4 jsou tučně zvýrazněny maximální hodnoty zatížení dosažené na jednotlivých transformacích pro období 2004 až 2010.

Zatížení transformátorů instalovaných v transformačních stanicích je různé. Převážná většina transformačních stanic je vybavena dvěma transformátory. Jeden, který pracuje do kabelové sítě, je uzemněn přes odpor (bývá obvykle připojen na přípojnicí 22 kV s označením "A"). Druhý transformátor, který napájí venkovní vedení, je uzemněn přes zhášecí (Petersenovu) tlumivku (pracuje do přípojnice s označením "B"). U Teplárny Brno jsou všechny transformátory na straně vn uzemněny přes odpor, napájí totiž pouze kabelovou sítí. Rozdělení zatížení pro rok 2010 (zimní měření) mezi jednotlivé transformátory ve stanicích je uvedeno v Tab. 4-5. Pro provoz transformace Teplárna – Brno je důležité, že do jedné ze tří přípojnic 22 kV (dle aktuální konfigurace) je zapojen synchronní generátor energie.

Tab. 4-5: Zatížení transformačních stanic k roku 2010 odvozené z měřených dat

stanice a přípojnice	instalovaný výkon <i>S</i>	Zatížení <i>P</i>	využití transformátoru
	[MVA]	[MW]	[%]
BNC A	25	6,2	26
BNC B	0	0	0
BNC A+B	25	6,2	-
BNT A	40	25,4	67
BNT B	40	26,7	70
BNT C	40	4,9	13
BNT A+B+C	120	57	-
BOB A	40	28,5	75
BOB B	40	14,6	38
BOB A+B	80	43,1	-
HUV A	40	27	71
HUV B	40	14,1	37
HUV A+B	80	41,1	-
KV A	40	23,8	63
KV B	40	12,1	32
KV A+B	80	35,9	-
LI A	40	9,5	25
LI B	25	11	46
LI A+B	65	20,5	-
MEY A	40	29,8	78
MEY B	40	5,4	14
MEY A+B	80	35,2	-
celkem	530	239	-



Obr. 4-4: Zatížení jednotlivých transformací k roku 2010 odvozené z měřených dat

Tab 4-5 i výše uvedený obrázek (obr. 4-4) potvrzují, že zatížení transformátorů instalovaných v transformačních stanicích je různé, obvykle transformátor pracující do kabelové sítě je podstatně více zatížen než druhý transformátor napájecí venkovní vedení. Problematikou hospodárného zatížení transformátorů a postupu při jejich možném přetížení se budeme věnovat v další kapitole.

Současná měření spotřeby elektrické energie naznačují, že v budoucnu mohou být dosažena maxima zatížení nikoliv v zimě, jak je tomu doposud, ale v létě. K této situaci může dojít díky rostoucímu počtu instalací klimatizací do nejrůznějších objektů.

4.4 Síť 22 kV

Vedení o hladině napětí 22 kV propojuje napájecí transformační stanice s distribučními stanicemi nebo přímo s odběrateli elektrické energie na hladině vn. Vedení v centru města jsou převážně kabelová, na periferie města se instalují ve většině případů venkovní vedení. Více o jednotlivých typech vedení, která tvoří síť vn v Brně, je již uvedeno v kapitole 2.2.

4.5 Spotřebitelé elektrické energie

Odběratele elektrické energie dělíme do čtyř kategorií A, B, C a D. Skupinu A tvoří spotřebitelé, kteří odebírají elektrickou energii na hladině vvn, patří mezi ně např. Zetor Tractors, a.s. a Královopolská, a.s. Do kategorie B řadíme odběratele ze zařízení na úrovni vn, jedná se především o průmyslové závody a obchodní řetězce. Skupinu C a D tvoří maloodběratele (odebírají elektrickou energii na úrovni nn). Maloodběratele dále dělíme na bytový odběr (kategorie D) a nebytový odběr (kategorie C).

4.6 Plánovaný rozvoj DS města Brna

Společnost E.ON Distribuce, a.s. má zpracovány koncepty rozvoje napájecího systému pro zásobování města Brna elektrickou energií [9]. Výstavba nových plánovaných elektrických zařízení pro zajištění spolehlivého chodu DS města Brna je zobrazena na Obr. 4-5. Z uvedeného obrázku plyne, že společnost E.ON Distribuce, a.s. má v úmyslu výstavbou nových transformačních stanic 110/22 kV (Klusáčkova, Příkop a Opuštěná) výrazně posílit vnitřní vazbu DS na hladině 110 kV. Tímto opatřením se vytvoří tři nové smyčky na 110 kV, které výrazně zvýší spolehlivost DS a odlehčí stávající transformace (Medlánský, Komárov a Teplárna) a spínací stanice (Klusáčkova a Příkop). Nově vystavěné transformace bude navzájem mezi sebou a se stávajícími transformacemi propojovat jednoduché nebo zdvojené kabelové vedení. Výstavba další transformační stanice Moravany je naplánována pro posílení DS jižní části Brna. Jejím cílem by mělo být odlehčení stávajících transformací - Medlánek, Komárova a zejména Bohunic.

5 URČENÍ TRENDU SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE

V elektrárenské praxi se sleduje vývoj zatížení každým rokem ať již celé elektrizační soustavy, nebo jejich jednotlivých částí. Tyto statistické údaje jsou důležité pro posouzení možného vzrůstu zatížení v blízké budoucnosti. V některých časových obdobích bývá růst zatížení menší (v době stagnace hospodářství), jindy opět větší (v obdobích intenzivní výstavby a růstu průmyslu) [4].

Metody stanovující vývoj spotřeby elektrické energie umožňují určit s dostatečnou přesností vývoj zatížení na dobu asi 5 až 10 let dopředu. Vždy je třeba vycházet ze zkušeností, ze studia rozvoje energetiky, společnosti, urbanistických záměrů, vývoje elektrických spotřebičů apod. Vývoj spotřeby elektrické energie může například ovlivnit její cena, nové způsoby vytápění, větrání a chlazení objektů atd.

Ke stanovení vývoje spotřeby elektrické energie se v praxi nejčastěji používá *metoda extrapolace* a *metoda rozpočtová*. Metoda extrapolace vychází z vyrovnání dosavadního vývoje a extrapoluje vývoj do budoucnosti, a to za předpokladu, že vlivy působící na vývoj v budoucnosti se nebudou podstatně lišit od vlivů v minulosti. Z matematických funkcí, které vyrovnávají statistické údaje sledovaného jevu, se volí ty, které nejlépe vystihují skutečný trend růstu. V současnosti se nejčastěji používají následující funkce:

a) Lineární funkce

$$y = ax + b, \quad (5.1)$$

b) Exponenciální funkce

$$y = ab^x. \quad (5.2)$$

Pro výpočet koeficientů a a b se používá metody nejmenších čtverců nebo již upravených vztahů.

Rozpočtová metoda určuje spotřebu elektrické energie součtem potřeb v jednotlivých odvětvích hospodářství, přičemž tyto potřeby se stanoví podle předpokládané výroby. Tato metoda je krátkodobá, vhodná v případech, kdy dynamika výroby je známa s dostatečnou přesností.

V našem případě trend růstu zatížení určíme pomocí metody extrapolace. Metodu rozpočtovou nemůžeme použít, neboť nemáme k dispozici potřebné údaje.

5.1 Vyrovnání pomocí lineární funkce

K bodům získaným měřeními a výpočtem budeme hledat pomocí metody nejmenších čtverců lineární funkci, která nejlépe charakterizuje jejich rozložení v souřadném systému x, y . Aby byla přímka co nejlépe proložena danými body, musí platit následující rovnice

$$F = \sum_{i=1}^n (y - y_i)^2 = \min. \quad (5.3)$$

Rovnice přímky je $y = ax_i + b$, po dosazení do rovnice (5.3) dostaneme

$$F = \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)^2 = \min. \quad (5.4)$$

Podmínka minima pro proměnné a a b je

$$\frac{\partial F}{\partial a} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial b} = 0. \quad (5.5)$$

Provedeme první derivace rovnice (5.4) podle proměnných a a b

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial a} &= \sum_{i=1}^n 2(ax_i + b - y_i)x_i = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial b} &= \sum_{i=1}^n 2(ax_i + b - y_i) = 0. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Úpravou rovnic (5.6) dostaneme tzv. normální rovnice přímky (5.7)

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n x_i y_i &= a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i, \\ \sum_{i=1}^n y_i &= a \sum_{i=1}^n x_i + nb. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Z těchto rovnic již není problém určit neznámé a a b , n v rovnici (5.7) značí počet měření.

Rovnice (5.7) jsou použity k odvození rovnice (5.1) v konkrétním tvaru charakterizující vývoj zatížení v řešené oblasti Brna.

Tab. 5-1: Tabulka hodnot pro výpočet parametrů a , b lineární funkce

rok	x_i	y_i	$x_i y_i$	x_i^2
2004	-3	210,73	-632,19	9
2005	-2	213,47	-426,94	4
2006	-1	226,94	-226,94	1
2007	0	241,68	0	0
2008	1	255,00	255	1
2009	2	250,08	500,16	4
2010	3	255,67	767,01	9
Σ	0	1653,57	236,1	28

Veličina v Tab. 5-1 označená jako y_i udává vývoj zatížení v řešené oblasti.

Po dosazení hodnot z Tab. 5-1 do rovnic (5.7) obdržíme parametry a a b

$$236,1 = 28a + 0b \Rightarrow a = 8,432 \quad (5.8)$$

$$1653,57 = 0a + 7b \Rightarrow b = 236,224$$

Výsledná lineární funkce, která nejlépe charakterizuje rozložení zadaných bodů, má tvar:

$$y = 8,432x + 236,224 \quad (5.9)$$

Určení trendu zatížení:

Pro lineární závislost nelze trend zatížení vyjádřit v procentech, musí proto být určen jako meziroční nárůst zatížení v MW. Trend nárůstu zatížení se určí jako rozdíl zatížení v daném roce a zatížení v roce předcházejícím.

Pro rok 2004 ($x = -3$) je zatížení podle rovnice 4.9.

$$P_{2004} = 8,432 \cdot (-3) + 236,224 = 210,927 \text{ MW}$$

Pro následující rok ($x = -2$) je zatížení podle rovnice 4.9.

$$P_{2005} = 8,432 \cdot (-2) + 236,224 = 219,36 \text{ MW}$$

Nyní již lze určit trend nárůstu zatížení jako rozdíl zatížení v roce 2004 a 2005

$$P_{Trend} = P_{2005} - P_{2004} = 219,36 - 210,927 = 8,433 \text{ MW} \quad (5.10)$$

Z rovnice (5.10) plyne, že meziroční nárůst zatížení stanovený z lineární vyrovnávací funkce (5.9) je 8,433 MW.

5.2 Vyrovnání pomocí exponenciální funkce

Nejvhodnější parametry exponenciální funkce k daným bodům se hledají obdobným způsobem jako v předešlém případě. Vyjde se z rovnice exponenciály $y = ab^{x_i}$. Pro zjednodušení výpočtu je účelnější si převést uvedenou rovnici na její logaritmický tvar

$$\log y = \log a + x_i \log b. \quad (5.11)$$

Dále hledáme minimum funkce

$$F = \sum_{i=1}^n (\log a + x_i \log b - \log y_i)^2 = \min. \quad (5.12)$$

Z podmínky $\frac{\partial F}{\partial a} = 0$ vyplývá

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^n (\log a + x_i \log b - \log y_i)^2}{\partial a} = 0. \quad (5.13)$$

Po úpravě obdržíme

$$n \log a + \log b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n \log y_i. \quad (5.14)$$

Z druhé podmínky $\frac{\partial F}{\partial b} = 0$ dostaneme obdobně po úpravách

$$\log a \sum_{i=1}^n x_i + \log b \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i \log y_i. \quad (5.15)$$

Podrobné odvození rovnic (5.14) a (5.15) potřebných pro určení parametrů a a b je uvedeno v literatuře [11].

Pro odvození konkrétní rovnice exponenciály charakterizující průběh zatížení v řešené oblasti bude využito rovnic (5.14) a (5.15).

Tab. 5-2: Tabulka hodnot pro výpočet parametrů a , b exponenciální funkce

rok	x_i	y_i	$\log y_i$	$x_i \log y_i$	x_i^2
2004	-3	210,73	2,324	-6,971	9
2005	-2	213,47	2,329	-4,659	4
2006	-1	226,94	2,356	-2,356	1
2007	0	241,68	2,383	0,000	0
2008	1	255,00	2,407	2,407	1
2009	2	250,08	2,398	4,796	4
2010	3	255,67	2,408	7,223	9
Σ	0	1653,57	16,605	0,440	28

Po dosazení hodnot z Tab. 5-2 do rovnic (5.14) a (5.15) obdržíme parametry a a b

$$7 \log a + 0 \log b = 16,605 \Rightarrow a = 235,582 \quad (5.16)$$

$$0 \log a + 28 \log b = 0,440 \Rightarrow b = 1,037$$

Exponenciální funkce, která nejlépe popisuje rozložení zadaných bodů, má tvar

$$y = 235,582 \cdot 1,037^x \quad (5.17)$$

Z rovnice (5.17) vyplývá přímo hodnota meziročního nárůstu zatížení. V tomto případě zatížení roste rychlostí 3,7% ročně.

5.3 Určení správnosti vyrovnávací funkce

Správnost vybrané funkce je možné posoudit podle několika činitelů:

a) podle průměrné absolutní odchylky

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - y'_i|}{n}, \quad (5.18)$$

b) podle průměrné směrodatné odchylky

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{n}}, \quad (5.19)$$

c) podle variačního součinitele

$$V = \frac{n\sigma}{\sum_{i=1}^n y'_i}. \quad (5.20)$$

Tab. 5-3: Výchozí hodnoty potřebné pro posouzení správnosti volby dané funkce

rok	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Σ
x_i	-3	-2	-1	0	1	2	3	0
y_i	210,73	213,47	226,94	241,68	255,00	250,08	255,67	1653,57

Tab. 5-4: Vypočtené hodnoty potřebné pro posouzení správnosti volby dané funkce pro lineární funkci

rok	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Σ
y_{iL}	210,93	219,36	227,79	236,22	244,66	253,09	261,52	1653,57
$ y_i - y_{iL} $	0,20	5,89	0,85	5,46	10,34	3,01	5,85	31,60
$ y_i - y_{iL} ^2$	0,04	34,69	0,73	29,77	107,00	9,05	34,22	215,49

Tab. 5-5: Vypočtené hodnoty potřebné pro posouzení správnosti volby dané funkce pro exponenciální funkci

rok	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Σ
y_{iE}	211,25	219,07	227,18	235,58	244,30	253,34	262,71	1653,43
$ y_i - y_{iE} $	0,52	5,60	0,24	6,10	10,70	3,26	7,04	33,46
$ y_i - y_{iE} ^2$	0,28	31,37	0,06	37,19	114,52	10,61	49,58	243,60

Tab. 5-6: Činitelé určující správnost zvolené vyrovnávací funkce

funkce	$y = 8,432x + 236,224$	$y = 235,582 \cdot 1,037^x$
d [MW]	4,5140	4,7800
σ [MW]	5,5484	5,8991
V [%]	2,3488	2,4975

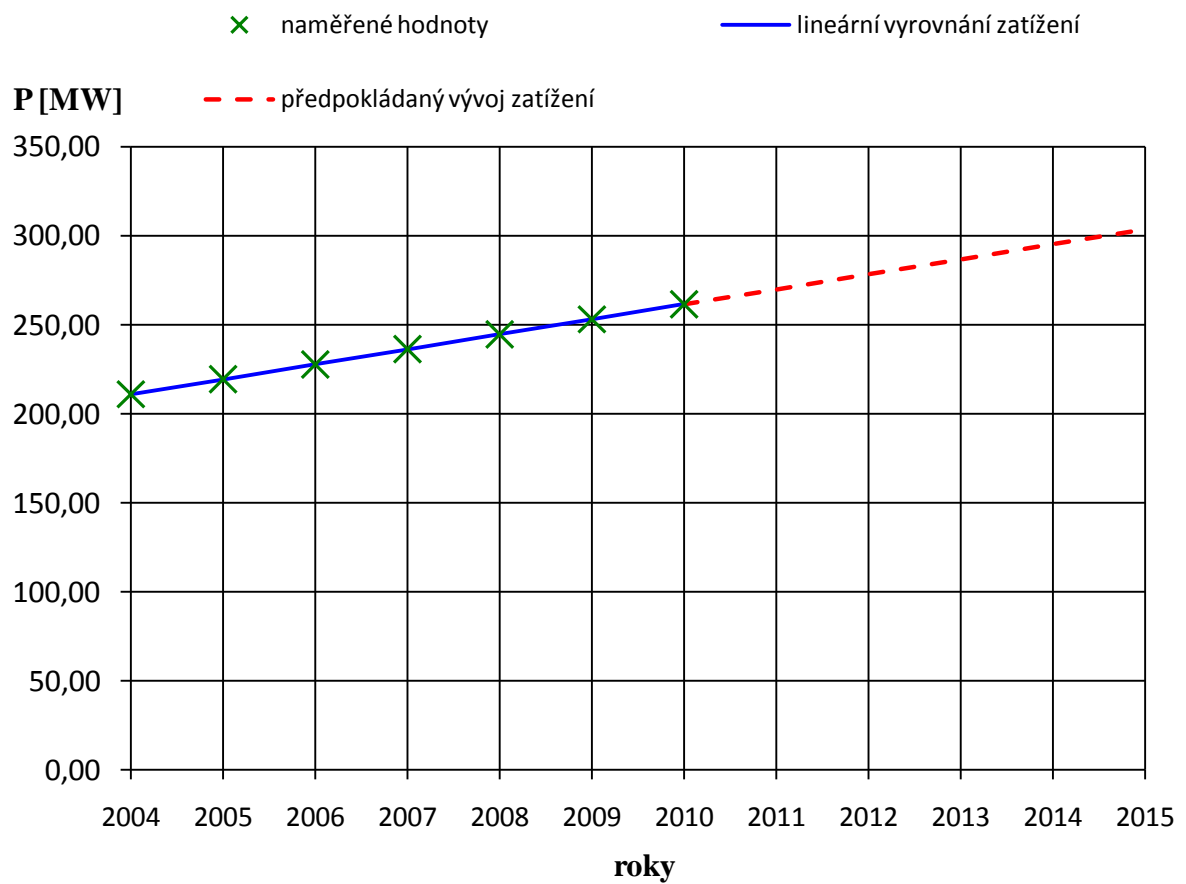
Z Tab. 5-6 je vidět, že při proložení naměřených bodů pomocí lineární funkce se dopouštíme menší chyby. Proto za optimální vyrovnávací funkci budeme uvažovat rovnici.

5.4 Stanovení plošného vývoje zatížení řešené oblasti v letech 2010 až 2015

Bude se předpokládat, že plošný vývoj zatížení bude mít lineární průběh definovaný rovnicí (5.9). V Tab. 5-7 a na Obr. 5-1 jsou zobrazeny hodnoty vývoje zatížení podle zvolené vyrovnávací funkce. Ovšem je nutné zdůraznit, že tento vývoj zatížení zohledňuje pouze předpokládaný nárůst vřeužitečné spotřeby elektřiny, nezahrnuje v sobě růst zatížení spojený s investicemi do nové technologie, zahájením popřípadě významným rozšířením stávající výroby nebo otevřením obchodního nebo administrativního centra. Celkový vývoj zatížení lze určit, započítá-li se do plošného vývoje zatížení rezervované příkony velkoodběratelů.

Tab. 5-7: Plošný vývoj zatížení

rok	2011	2012	2013	2014	2015
x_i	4	5	6	7	8
$y_i = P$ [MW]	269,952	278,384	286,816	295,248	303,68



Obr. 5-1: Plošný vývoj zatížení řešené oblasti při použití lineární vyrovnávací funkce

6 NÁVRH ROZVOJE A ŘEŠENÍ KONFIGURACE SÍTĚ 22 kV V OBLASTI TRNITÁ

6.1 Popis oblasti Trnitá

Řešená oblast města Brna zahrnuje městskou čtvrť Trnitá, která je na severní straně ohraničena ulicí Křenová, na západní straně ulicí Uhelná a železniční tratí souběžně s řekou Svratkou. Na jižní straně tou samou tratí a dále ulicemi Kšírova, Černovická a na východní straně tvoří hranici řeka Svitava.

Sídlí zde mnoho významných podniků a firem. Jako (z energetického hlediska) nejvýznamnější lze jmenovat Galerii Vaňkovka, Dopravní podnik, UAN Zvonařka, Hlavní nádraží, Katastrální úřad, Tesco, Lacrum, Technoplyn, Transportbeton, Kovopodnik, Centrokov, Feramo, Prakom, Autonova a další.

Co se týče zalidnění, patří tato městská část se svými 8 500 obyvateli spíše k méně zalidněným oblastem Brna. Což je dáno svým geografickým umístěním jižně od centra Brna, kde současné vlakové nádraží odděluje tuto část od středu Brna.

6.2 Předpokládaný vývoj v dané oblasti

Tato oblast se díky své poloze v blízkosti středu města a malé míře zastavěných ploch přímo nabízí k různým investičním záměrům ve formě výstavby nových objektů. Tyto záměry jsou navíc podpořeny plánovaným největším investičním počinem v dějinách města Brna, a sice přesunem vlakového nádraží ze současné pozice v blízkosti centra asi jeden kilometr jižně. Tato výstavba sebou samozřejmě přinese velmi nutnou energetickou přestavbu stávajícího napájení oblasti. Firma E.ON Distribuce, a.s. poskytla pro účely této práce seznam objektů Tab. 6-1, které by měli být v horizontu následujících čtyř až pěti let zájem v této oblasti vystavěny nebo rozšířeny. V tabulce jsou přehledně zaznamenány předpokládané termíny realizace jednotlivých projektů a dále jejich očekávané odběry. Ve většině případů se jedná o objekty pro komerční využití.

Tab. 6-1: Předpokládané nové odběry v oblasti Trnitá

Objekt	Termín realizace	Očekávaný odběr [MW]
AUPARK	2012	4,5
MĚNÍRNA M1 Trnitá	2013	2,5
MĚNÍRNA M2 Vodařská	2013	1,2
Čerpací stanice Jeneweinova	2012	0,3
DTS ZVONAŘKARAMPY	2013	0,6
DTS OPUŠTĚNÁUHELNÁ	2013	0,4
Čerpací stanice hradilová komora 1	2013	0,7
Čerpací stanice hradilová komora 2	2013	0,5
Čerpací stanice pro zastřešení	2013	0,6
Předávací stanice SŽDS	2013	0,4
Komerční objekt TS 1	2013	3
Komerční objekt TS 2	2013	3
Komerční objekt TS 3	2013	3
Komerční objekt TS 4	2013	3
APOLO	2015	3
Parkovací dům Trnitá	2012	0,5
Předpokládaný nový objekt 1	2014	1,5
Předpokládaný nový objekt 2	2014	1,8
Předpokládaný nový objekt 3	2014	4
Předpokládaný nový objekt 4	2014	3,5
Rozšíření Galerie Vaňkovka	2015	0,5

6.3 Návrh řešení konfigurace sítě pro daný vývoj

Jak již bylo uvedeno v Tab. 4-6: *Plánovaný rozvoj DS 110 kV*, je po roce 2012 plánována výstavba nové distribuční transformovny 110/22 kV Opuštěná, kterou bude zajištěno napájení oblasti jižního centra, přičemž samotná výstavba bude mimo jiné souviset s plánovanou realizací přesunu železničního uzlu města Brna. Samozřejmě bude tato distribuční stanice využita také pro napájení nových objektů z Tab. 6-2. Pro provozování tohoto stavu byl proveden výpočet ustáleného chodu v programu PAS DAISY Off-Line v.4.00 Bizon. Záměrem celého návrhu bylo, aby nedocházelo k přetěžování pokud možno žádných prvků DS (transformátory, vedení).

6.3.1 Návrh transformační stanice

Na základě vypočítaných hodnot výkonového zatížení vedení napojených na transformační stanici Opuštěná se určilo její vybavení. Návrh počítá s osazením stanice třemi transformátory, každý o jmenovitém výkonu $S_N = 40 \text{ MVA}$. Stanice bude zatížena výkonem $P = 72,72 \text{ MW}$.

Tab. 6-1: Zatížení transformačních stanic k roku 2010 odvozené z měřených dat

přípojnice	instalovaný výkon S	Zatížení P	využití transformátoru
	[MVA]	[MW]	[%]
A	40	24,07	63
B	40	25,54	67
C	40	23,11	61
A+B+C	120	72,72	-

Pro vyhodnocení vypočítaných hodnot zatížení jednotlivých transformátorů bylo určeno nejprve jejich hospodárné zatížení. Ve většině transformačních stanic jsou instalovány transformátory s následujícími štičkovými parametry:

- jmenovitý výkon transformátoru: $S_n = 40 \text{ kVA}$;
- ztráty činného výkonu naprázdno: $\Delta P_0 = 40 \text{ kW}$;
- ztráty činného výkonu nakrátko: $\Delta P_k = 207 \text{ kW}$;
- procentní proud naprázdno: $i_0 = 1\%$;
- procentní napětí nakrátko: $u_k = 11\%$.

Pro výpočet hospodárného zatížení transformátoru je zapotřebí uvést některé další údaje, které byly poskytnuty firmou E.ON Distribuce, a.s.:

- doba plných ztrát: $T_\Delta = 2500 \text{ h} \cdot r^{-1}$;
- měrný činitel ztrát: $k_\Delta = 0,15 \text{ kW} \cdot \text{kVA} r^{-1}$;
- celkové roční procento (úroky, odpisy, údržba): $p = 16\% \cdot r^{-1}$;
- měrné náklady na výkon: $n_p = 7000 \text{ Kč} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot r^{-1}$;
- měrné náklady na energii: $n_w = 1,5 \text{ Kč} \cdot \text{kWh}^{-1}$;
- celkové investiční náklady: $K_{iT} = 15 \cdot 10^6 \text{ Kč}$.

- Výpočet jalového výkonu naprázdno a nakrátko:

$$\Delta Q_0 = S_n \cdot \frac{i_0}{100\%} = 40 \cdot 10^3 \text{ kVA} \cdot \frac{1\%}{100\%} = 400 \text{ kVA}$$

$$\Delta Q_k = S_n \cdot \frac{u_k}{100\%} = 40 \cdot 10^3 \text{ kVA} \cdot \frac{11\%}{100\%} = 4400 \text{ kVA}$$

- Výpočet ročních nákladů odvozených z investičních nákladů:

$$N_{IT} = K_{IT} \cdot \frac{P}{100\%} = 15 \cdot 10^6 \text{ Kč} \cdot \frac{16\% \cdot r^{-1}}{100\%} = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Kč} \cdot r^{-1}$$

- Výpočet celkových měrných nákladů na ztráty:

$$n_{\Delta} = n_p + n_w \cdot T_{\Delta} = 7000 \text{ Kč} \cdot kW^{-1} \cdot r^{-1} + 1,5 \text{ Kč} \cdot kWh^{-1} \cdot 2500 \text{ h} \cdot r^{-1} = 10750 \text{ Kč} \cdot kW^{-1} \cdot r^{-1}$$

- Výpočet celkových měrných nákladů na ztráty naprázdno:

$$n_{\Delta}^0 = n_p + n_w \cdot T = 7000 \text{ Kč} \cdot kW^{-1} \cdot r^{-1} + 1,5 \text{ Kč} \cdot kWh^{-1} \cdot 8760 \text{ h} \cdot r^{-1} = 20140 \text{ Kč} \cdot kW^{-1} \cdot r^{-1}$$

- Výpočet hospodárného zatížení:

$$S_h = S_n \cdot \sqrt{\frac{N_{IT} + (\Delta P_0 + \Delta Q_0 \cdot k_{\Delta}) \cdot n_{\Delta}^0}{(\Delta P_k + \Delta Q_k \cdot k_{\Delta}) \cdot n_{\Delta}}} =$$

$$= 40 \cdot 10^3 \text{ kVA} \cdot \sqrt{\frac{2,4 \cdot 10^6 \text{ Kč} \cdot r^{-1} + (40 \text{ kW} + 400 \text{ kVA} \cdot 0,15 \text{ kW} \cdot kVAr^{-1}) \cdot 20140 \text{ Kč} \cdot kW^{-1} \cdot r^{-1}}{(207 \text{ kW} + 4400 \text{ kVA} \cdot 0,15 \text{ kW} \cdot kVAr^{-1}) \cdot 10750 \text{ Kč} \cdot kW^{-1} \cdot r^{-1}}} =$$

$$= \underline{\underline{27527 \text{ kVA}}}$$

Z výše uvedeného výpočtu plyne, že provoz transformátorů o jmenovitém výkonu 40 MVA je nejehospodárnější při zatížení 69 % z nominálního výkonu. Vnitřní směrnice firmy E.ON Distribuce, a.s. uvádí, že při zatížení nad 75 % je již třeba zvažovat instalaci nebo výměnu transformátoru, pro zatížení přesahující 80 % je výměna (instalace) transformační jednotky nutná. Zatížení navržených transformátorů je tedy v normě.

6.3.2 Řešení konfigurace sítě

S uvažováním stavby nové stanice je nutné provést určité změny v konfiguraci stávající sítě 22kV. Na všechna nová vedení bude použit vodič typu A2XS(F)2Y (A - hliníkové jádro, 2X - zesílená XLPE izolace, S - měděné drátěné stínění, (F) - podélná odolnost proti vodě, 2Y – PE vnější plášť) o jmenovitém průřezu 240 mm². Každé vedení je provedeno ve dvojpotahu – souběhem dvou kabelů.

Stávající vedení VN269 a VN270 spojující BNT a BNJ budou rozpojena a zatažena ke stanici Opuštěná, tím bude propojena se stanicí BNT. Z Opuštěné budou vyvedeny nové napáječe BNJ, které se napojí v místě rozpojení na již stávající vedení. Na vedení VN269 se poté napojí nové objekty 1 až 4. Vedení VN270 bude sloužit jako záložní napáječ pro novou stanici.

Vedení VN1360 a VN1361, která nyní prochází kolektorem. Tato vedení budou také rozpojena a zatažena do trafostanice. Nové vedení se opět naspojkuje na rozpojené konce. Na část vedení VN1360, vedoucí v původním směru od Opuštěné, se připojí objekty APOLO, DTS OPUŠTĚNÁ-UHELNÁ a Čerpací stanice hradilová komora 1 a 2.

Stejná operace se provede i se stávajícím vedením VN1342. Na vedení pokračujícímu od rozvodny se připojí objekty AUPARK, DTS ZVONAŘKARAMPY, Parkovací dům Trnitá a Předávací stanice SŽDS. Napojení objektu Předávací stanice SŽDS se uskuteční prodloužením vedení od odběru Rosická ČD k předávací stanici.

Poslední dvě změny budou provedeny vytažením dvou nových vedení z Opuštěné, kdy pomocí jednoho budou napájeny objekty MĚNÍRNA M1 Trnitá a Komerční objekt TS3 a TS4(2x1110m), a pomocí druhého objekty Komerční objekt TS1 a TS2 a Čerpací stanice pro zastřešení (2x1650m). Obě vedení jsou naspojována na stávající vedení VN231. Částí vedení pokračující od místa naspojení směrem k ulici Kšírova napájí poslední dva objekty Čerpací stanice Jeneweinova a MĚNÍRNA M2 Vodařská.

Všechny tyto popsané změny v konfiguraci sítě, které jsou zakresleny v mapě návrhu konfigurace sítě 22kV v oblasti Trnitá v příloze A, si vyžádají položení zhruba 7200 m kabelu v souběhu. Další přílohy jsou schémata navržených změn vytvořená v programu Bizon, a to topologické schéma (B), poměrné proudové zatížení (C) a poměrné napětí (D).

Vnitřní směrnice firmy E.ON Distribuce, a.s. uvádí, že při zatížení elektrických vedení do 70 % jmenovitého proudu a možném výpadku sousedního vedení, jsou schopna zbylá vedení bez poruchy převzít zatížení porušeného vedení. Tato hranice je nastavena i pro výpočet ustáleného chodu DS v programu Bizon. Vedení, jejichž proudová zatížení přesahují 70 % jejich nominální hodnoty, jsou označena jako přetížená z hlediska bezpečného a spolehlivého provozu DS. Ze schématu přílohy C vyplývá, že takové vedení se v tomto řešení konfigurace nevyskytuje.

7 PŘEDPOKLÁDANÁ FINANČNÍ NÁROČNOST PROJEKTU

Aby bylo možné určit celkové investiční náklady na tento projekt, je nutné si uvědomit, že konečná cena v sobě nezahrnuje pouze cenu za navrhovanou změnu konfigurace sítě a stavbu trafostanice. Realizace takového projektu je totiž souhrn aktivit, které je nutno také nacenit.

Například u trafostanice lze rozdělit náklady na stavební, technologické a projekční. V nákladech na stavební část je zahrnuta cena pořízení pozemku, za postavení budovy, za úpravu okolí (příjezdová komunikace) a zajištění inženýrských sítí. Náklady na technologickou část jsou náklady na vybavení stavby – pořizovací cena transformátorů, cena rozváděčů vn a rozvodny nn a za jejich montáž, cena za zajištění vlastní spotřeby a její montáž, cena za řídicí a přenosová zařízení, atd. Toto všechno muselo být projektanty navrženo, jejich práce je zahrnuta v nákladech na projekční část.

Celkové investiční náklady činí 301 114 109 Kč bez DPH a jsou rozepsány v jednotlivých níže uvedených tabulkách. Sumy za jednotlivé položky jsou stanoveny podle aktuálních ceníků firmy E.ON.

Tab. 7-1: Investiční náklady na vedení 110 kV

Vedení 110kV – připojení Opuštěné	
<i>Stavební část</i>	
Propojovací šachta, kolektor	19 000 000 Kč
Ochranná opatření	3 200 000 Kč
Ocelové konstrukce	5 000 000 Kč
Stavební část - celkem	27 200 000 Kč
<i>Technologická část</i>	
Kabelové vedení 110kV včetně příslušenství a montáže	750 m 14 625 000 Kč
Spojky a koncovky včetně montáže	310 770 Kč
Optika	1 400 000 Kč
Přeložky, úpravy vodovodu a horkovodu	1 200 000 Kč
Technologická část – celkem	17 535 770 Kč
<i>Projekční část</i>	
Projekt	4 026 219 Kč
Inženýring	2 684 146 Kč
GZS	2 684 146 Kč
Projekční část - celkem	9 394 512 Kč
Cena celkem (bez DPH)	54 130 282 Kč

Tab. 7-2: Investiční náklady na trafostanici 110/22 kV

R110/22 kV Brno Opuštěná		
<i>Stavební část</i>		
Příjezdová komunikace		900 000 Kč
Stavební část, budova		31 000 000 Kč
Pozemek		9 000 000 Kč
Inženýrské sítě, voda, kanalizace		1 450 000 Kč
Stavební část - celkem		42 350 000 Kč
<i>Technologická část</i>		
Transformátory 110 kV	3 ks	47 700 000 Kč
Uzlový odporník	3 ks	1 200 000 Kč
Omezovače přepětí, součtová trafa, skříně, dozbrojení, náklady na pořízení		800 000 Kč
Montáž transformátorů, odporníků		3 000 000 Kč
Zapouzdřený rozvaděč 110kV	6 polí	37 200 000 Kč
Kabelové koncovky a kabely k trafům		2 600 000 Kč
Montáž rozvaděče		2 500 000 Kč
Rozvodna 22kV		15 000 000 Kč
Vlastní spotřeba	1	250 000 Kč
Rozvaděč vlastní spotřeby	1	1 000 000 Kč
Střídač a rozvaděč 230V AC	1	350 000 Kč
Zásuvková skříň, doprava		70 000 Kč
Montáž vlastní spotřeby		360 000 Kč
Řídící systém		19 850 000 Kč
Přenosové zařízení		1 790 000 Kč
Speciální měření		650 000 Kč
VRN-mimo GZS		2 000 000 Kč
Technologická část - celkem		136 320 000 Kč
<i>Projekční část</i>		
Projekt		12 493 600 Kč
Inženýring		9 370 200 Kč
GZS		6 246 800 Kč
Projekční část - celkem		28 110 600 Kč
Cena celkem (bez DPH)		210 830 600 Kč

Tab. 7-3: Investiční náklady kabelového vedení 22 kV

Kabelová síť 22 kV		
<i>Technologická část</i>		
Souběh 2 kabely 3x (22-NA2XS(F)2Y 1x240 mm ²) - město	7200 m	16 819 200 Kč
Kabelová spojka VN 3 žíly včetně zemních prací ručně	20	220 000 Kč
Rozvaděč VN 3K	21 ks	2 142 000 Kč
Vyzbrojení vývodové skříně	42 ks	2 520 000 Kč
Rozvaděč do 630kVA - RST do 1000A (jistič + 8x odpínač 400A) + SVS-V	6 ks	858 000 Kč
Startovací jáma	20 ks	78 000 Kč
Kabelová koncovka VN vnitřní včetně T adaptéru	42	630 000 Kč
Trubka HDPE	2000 m	850 000 Kč
Protlak do prům. 110 - 315 mm řízený	150 m	676 500 Kč
Trubka ochranná plastová prům. 200 mm	150 m	18 000 Kč
Multikanálové trasy	400 m	900 000 Kč
Chodník - Zámková dlažba - nový materiál	180 m ²	126 000 Kč
Vozovka - Asfalt - nový materiál	250 m ²	226 000 Kč
Náhrady škod, věcná břemena, smluvní pokuty, rekultivace		2 000 000 Kč
Poplatky		600 000 Kč
Zkoušky VN		630 000 Kč
Revize		85 000 Kč
Geometrické zaměření		500 000 Kč
Technologická část – celkem		29 878 700 Kč
<i>Projekční část</i>		
Projekt		2 689 083 Kč
Inženýring		1 792 722 Kč
GZS (Globální zařízení staveniště)		1 792 722 Kč
Projekční část - celkem		6 274 527 Kč
Cena celkem (bez DPH)		36 153 227 Kč

8 ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla vypracována pro účely firmy E.ON Distribuce a.s. Cílem práce byl návrh rozvoje a řešení konfigurace sítě 22 kV v dané části města Brna. Jednalo se o městskou oblast Trnitá, ve které jsou v horizontu následujících pěti let plánovány četné investiční záměry. Tyto počiny jsou navíc podpořeny plánovanou největší investicí v dějinách města Brna, a sice přesunem vlakového nádraží ze současné pozice v blízkosti centra asi jeden kilometr jižně. Jak již bylo řečeno, tato výstavba sebou samozřejmě přinese velmi nutnou energetickou přestavbu stávajícího napájení oblasti.

V první části projektu nazvané elektrizační soustava v ČR je popsáno dělení ES podle napěťových hladin, druhy elektrických vedení, konfigurace elektrických sítí a další části ES.

Znalost veličin charakterizujících danou síť, jako je proudové a napěťové rozdělení, případně ztráty výkonu v jednotlivých prvcích, je nutná pro řízení provozu ES a dále jsou tyto údaje používány jako výchozí pro navrhování dalšího rozvoje ES. Pro řešení ustáleného chodu sítí je možné použít jednu z metod popsanych v druhé kapitole této práce.

Dále byla provedena charakteristika DS města Brna a určení trendu spotřeby elektrické energie. Pro určení trendu spotřeby byly použity výsledky měření soudobého zatížení transformačních stanic z let 2004 - 2010. Ke stanovení trendu nárůstu zatížení byla použita metoda extrapolační, která vychází z vyrovnání dosavadního vývoje a extrapoluje tento vývoj do budoucnosti, a to za předpokladu, že vlivy působící na vývoj v budoucnosti se nebudou podstatně lišit od vlivů v minulosti. Statisticky získanými hodnotami byly proloženy dvě různé matematické funkce (lineární a exponenciální) a určilo se, která z nich lépe vystihuje měřená data. Z Tab. 5-6 plyne, že za správnější vyrovnávací funkci lze považovat funkci lineární $y = 8,433x + 236,224$. Z této rovnice lze určit meziroční nárůst zatížení, který činí 8,433 MW. Samozřejmě i ve spotřebě elektrické energie se projevil vliv celosvětové hospodářské krize, čímž může být určování trendu její spotřeby negativně ovlivněno.

Následně byl proveden návrh rozvoje a řešení konfigurace sítě v dané části Brna, kdy se vycházelo z koncepce rozvoje DS města Brna. Pro řešení návrhu a jeho ověření výpočty byl použit programový systém pro výpočty režimů elektroenergetických sítí PAS DAISY Off-Line v.4.00 Bizon. Tento program provádí výpočet ustáleného chodu modifikovanou metodou Newton-Raphson, která představuje v současnosti světový standard pro řešení úloh ustáleného chodu. Tím je zaručena rychlá a spolehlivá konvergence výpočtu. Hlavní snahou návrhu bylo, aby nedocházelo k přetěžování pokud možno žádných prvků DS (transformátory, vedení), což bylo splněno.

S ohledem na předpokládanou výstavbu nových odběrů v oblasti Trnitá bylo navrženo zbudování nové transformační stanice 110/22 kV Opuštěná, která by byla osazena třemi stejnými transformátory, každý se jmenovitým výkonem $S_N = 40 \text{ MW}$. Jejich procentuální zatížení lehce přesahuje 60%, což odpovídá vnitřním směrnícím firmy E.ON Distribuce, a.s., která uvádí, že při zatížení nad 75% je již třeba zvažovat instalaci nebo výměnu transformátoru a pro zatížení přesahující 80% je výměna (instalace) transformační jednotky nutná. Dále byly popsány změny ve stávající konfiguraci sítě 22 kV, které je s ohledem na plánovaný rozvoj nutné provést. Výpočtem bylo zjištěno, že zatížení jednotlivých vedení v nové konfiguraci opět odpovídá vnitřním směrnícím firmy E.ON Distribuce, a.s. Ty uvádí, že při zatížení elektrických vedení do 70 % jmenovitého proudu a možném výpadku sousedního vedení, jsou schopna zbylá vedení

bez poruchy převzít zatížení porušeného vedení. Tato hranice nebyla překročena u žárního úseku vedení. Dodržení stanovených podmínek maximálního zatížení jednotlivých prvků lze považovat za stav, při kterém dispečeri elektrických sítí mohou poměrně bezpečně a spolehlivě řídit chod DS

Na závěr byla určena ekonomická náročnost celého návrh. Při stanovení ceny projektu bylo uvažováno ocenění jak návrhu změn, tak i jejich stavební a technické provedení. Celkové investiční náklady činí *301 114 109 Kč* bez DPH.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BLAŽEK, V., SKALA, P.: *Distribuce elektrické energie*. VUT v Brně, Brno, 2003, 140 stran.
- [2] ČSN 33 2000-5-51: 2000. *Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení. Část 5: Výběr a stavba elektrických zařízení. Kapitola 51: Všeobecné předpisy*.
- [3] ČSN 33 2000-5-52: 1998. *Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení. Část 5: Výběr a stavba elektrických zařízení. Kapitola 52: Výběr soustav a stavba vedení*.
- [4] E.ON Distribuce, a.s. [on-line]. 2009. Dostupné z: <http://www.eon.cz>
- [5] HALUZÍK, E.: *Řízení provozu elektrizačních soustav*. VUT v Brně, Brno, 1983, 125 stran.
- [6] HODINKA, M., HALUZÍK, E., KUČERA, D.: *Příklady z elektrických sítí I*. VUT v Brně, 1. vydání, Brno, 1976, 226 stran, 412-33697.
- [7] HODINKA, M.: *Elektrické sítě I*. VUT v Brně, 3. vydání, Brno, 1980, 286 stran.
- [8] KOLEKTIV AUTORŮ: *Uživatelská příručka programu PAS DAISY*. DAISY, s.r.o, Praha, 2006.
- [9] KOZÁK M.: *Koncepce rozvoje distribuční soustavy VVN*. E.ON Distribuce, a.s., 2009.
- [10] KUČERA, D.: *Přenos a rozvod elektrické energie*. VUT v Brně, 2. vydání, Brno, 1986, 198 stran, 4-0902.347.
- [11] ORSÁGOVÁ, J.: *Rozvodná zařízení*. VUT v Brně, Brno, 2004, 148 stran.
- [12] PAVLOVSKÝ, B.: *Elektrické sítě v městech a sídlištích*. SNTL, 1.vydání, Praha, 1975, 428 stran, 2-0744.793.
- [13] SANTARIUS, P.: *Elektrické sítě a vedení*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2.vydání, Ostrava, 2002, 114 stran, ISBN 80-248-0175-2.
- [14] ŠTROBLOVÁ, M.: *Elektrické sítě městské a průmyslové*. Západočeská univerzita, 1.vydání, Plzeň, 1994, 149 stran, ISBN 80-7082-154-X.
- [15] VERNER, J.: *Elektrické stanice a vedení*. VUT v Brně, 1.vydání, Brno, 1985, 157 stran, 4-0898.549.
- [16] Vyhláška č. 540/2005 Sb. o kvalitě dodávek elektřiny a souvisejících služeb v elektroenergetice. Praha, 2005