

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2014

Bc. Martin Král

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Využití výpočtů ustáleného stavu při
projektování průmyslové sítě**

Usage of steady state calculations for industrial network engineering

2014

Bc. Martin Král

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Král**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Využití výpočtů ustáleného stavu při projektování průmyslové sítě**
Usage of steady state calculations for industrial network engineering

Zásady pro vypracování:

- o Problematika napájení průmyslových sítí.
- o Legislativní rámec - kvalita dodávek elektřiny.
- o Využití výpočtu ustáleného stavu při projektování průmyslových sítí.
- o Popis provozního zapojení průmyslové sítě.
- o Výpočet ustáleného stavu dané sítě.
- o Kontrola návrhu sítě a dodržení kritéria $N - 1$.
- o Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


- o Hradílek Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových sítí, skripta VŠB-TU Ostrava 2008
- o Krejčí P.: Cvičení z elektroenergetiky, skripta VŠB-TU Ostrava 2003
- o Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení, VŠB Ostrava 1993
- o Manuály programů - Daisy Projektant, MCA
- o PPDS, PPS, Vyhláška 41/2010 Sb.
- o Další podle pokynů vedoucího práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Radomír Goňo, Ph.D.**


Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Já, níže podepsaný tímto čestně prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal

V Ostravě dne: 7. 5. 2014


.....
Bc. Martin Král

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Radomíru Goňovi, Ph.D. za odborné vedení během vypracovávání této diplomové práce.

Dále děkuji Ing. Břetislavovi Stachovi, Ph.D. za získané teoretické a praktické znalosti v dané problematice analýzy ustálených stavů průmyslové sítě.

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je využití výpočtu ustáleného stavu při projektování průmyslové sítě australského hlubinného dolu na černé uhlí. Pro správnou funkci průmyslové sítě je potřebné znát kolísání napětí, zatížení v síti, účinník aj. hodnoty při různých stavech průmyslové sítě. Tyto hodnoty je nutné dodržovat v předepsaných mezích, v opačném případě je provozovatel průmyslové sítě pokutován. Pro správné pochopení problematiky ustálených stavů v průmyslových sítích jsou v práci uvedeny teoretické rozborů této problematiky. Pro výpočet ustálených stavů průmyslové sítě je využit program Bizon Projektant 4.42 build 398, výsledky výpočtů tohoto programu jsou srovnány v programem DIgSILENT PowerFactory. V závěru práce jsou vyhodnoceny výsledky výpočtu ustálených stavů.

Klíčová slova:

hlubinný důl na černé uhlí, ustálený stav, RET650, Bizon projektant 4.42 build 398, DIgSILENT PowerFactory

ABSTRACT

The objective of this thesis is the use of the calculation of steady-state design of industrial networks Australian underground mine for coal. For correct operation of industrial networks is necessary to know the voltage fluctuations, the network load, power factor and other values at different stages of industrial networks. These values must be complied within prescribed limits, otherwise the industrial network operator penalized. To understand the problems of steady states in industrial networks are presented in the thesis theoretical analysis of this issue. To calculate the steady state industrial network is used program Bizon Designer 4.42 build 398, the calculation results of the program are compared in the program DIgSILENT PowerFactor. In conclusion of the thesis are the results of the calculation of steady states.

Keywords:

underground coal mine, steady state, RET650, Bizon projektant 4.42 build 398, DIgSILENT PowerFactor

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

IEC International Electrotechnical Commission

U_n	Jmenovité napětí	[V]
U_{max}	Maximální napětí	[V]
U_{min}	Minimální napětí	[V]
$U_{stř}$	Střední napětí	[V]
I_{max}	Maximální proud	[A]
I_{min}	Minimální proud	[A]
P	Činný výkon	[W]
Q	Jalový výkon	[VA _r]
Z	Impedance	[Ω]
R	Rezistance	[Ω]
X	Reaktance	[Ω]
G	Elektrická vodivost	[S]
B	Magnetická indukce	[T]

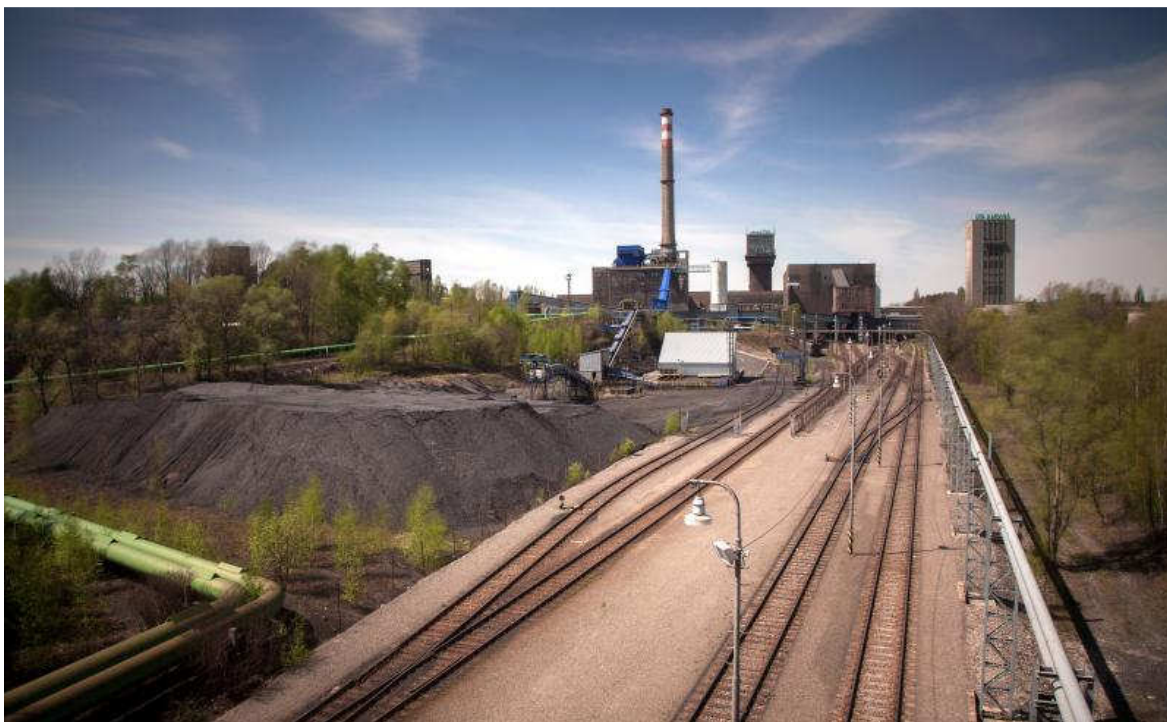
OBSAH

1	ÚVOD	1
1	PROBLEMATIKA NAPÁJENÍ DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ V ČR	2
1.1	Struktura elektrizační soustavy	2
1.2	Řešení elektrických sítí z hlediska uspořádání	4
1.3	Distribuční sítě velmi vysokého napětí	5
1.3.1	Elektrické stanice a rozvodny velmi vysokého napětí	5
1.4	Distribuční sítě vysokého napětí	7
1.4.1	Rozvodny vysokého napětí	7
1.5	Distribuční sítě nízkého napětí	9
1.5.1	Typy sítí nízkého napětí	9
1.6	Průmyslový rozvod elektrické energie	11
1.6.1	Umístění transformátorů a rozvaděčů	11
1.6.2	Volba druhu transformátorů a rozvaděčů	12
1.6.3	Způsoby uložení kabelového vedení	12
1.6.4	Technologie projektu průmyslového závodu	13
1.6.5	Rozvod elektrické energie v hutním závodě	13
1.7	Rozdílnosti napěťových hladin v zahraničí (Austrálii)	14
2	LEGISLATIVNÍ RÁMEC – KVALITA DODÁVEK	15
2.1	Parametry elektřiny	15
2.2	Zákon č. 458/2000 Sb.	17
2.3	Vyhláška 540/2005 Sb.	19
2.4	Vyhláška 306/2001 Sb.	23
2.5	Rozdílnosti parametrů elektřiny v zahraničí (Austrálii)	23
3	VYUŽITÍ VÝPOČTU USTÁLENÉHO STAVU PŘI PROJEKTOVÁNÍ PRŮMYSLOVÝCH SÍTÍ	25
3.1	Uzlová admitanční matice	26
3.2	Chod sítě jako nelineární problém	29
3.2.1	Gauss-Seidelova iterační metoda	29
3.2.2	Newton-Raphsonova metoda	32
4	POPIS PROVOZNÍHO ZAPOJENÍ PRŮMYSLOVÉ SÍTĚ	38
4.1	Popis průmyslové sítě	38
4.1.1	Popis vytvořené průmyslové sítě v Bizon projektant	40
4.2	Popis některých důležitých odběrových míst	42
5	VÝPOČET USTÁLENÉHO STAVU PRŮMYSLOVÉ SÍTĚ	46
5.1	Popis tvorby průmyslové sítě v programu Bizon projektant	46
5.1.1	Popis prvků sítě a vkládání vstupních dat	47

5.2	Výpočet ustáleného stavu průmyslové sítě v programu Bizon projektant	49
5.2.1	Normální provozní stav v průmyslové síti	49
5.2.2	Stav průmyslové sítě po odpojení všech kompenzátorů	50
5.2.3	Stav průmyslové sítě po odpojení jednoho z hlavních transformátorů	52
5.2.4	Stav průmyslové sítě po odpojení všech kompenzátorů a jednoho z hlavních transformátorů	53
5.2.5	Vyhodnocení simulovaných stavů	55
5.2.5.1	Zhodnocení funkce automatické regulace odboček	55
5.2.5.2	Zhodnocení výpočtu ustálených stavů průmyslové sítě	56
5.2.6	Automatická regulace napětí přepínáním odboček pomocí RET650.....	57
5.2.7	Vysvětlení velkých jalových ztrát při simulování.....	59
5.3	Porovnání vypočtených hodnot v programu Bizon projektant a DIgSILENT PowerFactory	60
5.3.1	Normální provozní stav v průmyslové síti	60
5.3.2	Stav průmyslové sítě po odpojení všech kompenzátorů	61
5.3.3	Stav průmyslové sítě po odpojení jednoho z hlavních transformátorů	63
5.3.4	Stav průmyslové sítě po odpojení všech kompenzátorů a jednoho z hlavních transformátorů	64
5.3.5	Zhodnocení porovnání výpočtů vytvořené programem Bizon projektant a DIgSILENT PowerFactory.....	65
	ZÁVĚR.....	66
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ	69
	SEZNAM TABULEK	70
	SEZNAM PŘÍLOH.....	72

1 ÚVOD

Černé uhlí je druh usazené horniny, která vznikla v prvohorách a druhohorách, využívá se především pro získání tepla a energie. Řadí se mezi neobnovitelné zdroje energie. Ložiska černého uhlí se nachází po celém zemském povrchu v nejsvrchnější vrstvě. Těžba černého uhlí se provádí v hlubinných dolech. V hlubinných dolech jsou šachty a štoly, díky nimž mohou být ložiska odhalena. Černé uhlí se těží za pomoci mechanizovaných strojů ve velice stísněných podmínkách. Veškeré tyto stroje jsou vyrobeny speciálně pro provoz v hlubinných dolech. Uhlí vytěžené pod povrchem putuje po dopravnících na povrch, kde dochází k dalšímu zpracování. Pro funkčnost hlubinného dolu jsou za potřeby nejen podpovrchové, ale i povrchové části hlubinného dolu. Pro celou těžbu je zapotřebí obrovského množství elektrické energie, která je v komplexu hlubinného dolu rozváděna průmyslovou sítí. Tato diplomová práce se zabývá řešením vznikajících ustálených stavů v průmyslové síti hlubinného dolu.



Obr. 1 – Povrchová část hlubinného dolu

Průmyslová síť dolu musí být tvrdého charakteru, v areálu dolu jsou využívány stroje s velkým odběrem elektrické energie, pokud by síť nebyla schopna odolávat velkým odběrům energie, kolísaly by parametry sítě. Tato síť by byla velice finančně náročná, vznikalo by zde kolísání napětí, které by mohlo v kritických stavech zapříčinit nefunkčnost některých důležitých elektrických okruhů průmyslové sítě. Proto je důležité provádět simulace a výpočty ustálených stavů sítě, kdy se zjistí přesné parametry sítě při různých stavech.

Pro výpočet ustálených stavů sítě jsem využil program Bizon projektant 4.42 build 398, výsledky při využití tohoto programu byly porovnány s výsledky v praxi více využívaného programu pro simulaci ustálených stavů DIGSILENT PowerFactory.

Pro zhodnocení ustálených stavů průmyslové sítě hlubinného dolu jsou nejdůležitější výsledky napětí na hlavních a podružných rozvodnách 11 kV, maximální zatížení hlavních výkonových transformátorů a vedení. Dále se musí sledovat ztráty vzniklé v průmyslové síti a účinník průmyslové sítě.

1 PROBLEMATIKA NAPÁJENÍ DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ V ČR

1.1 Struktura elektrizační soustavy

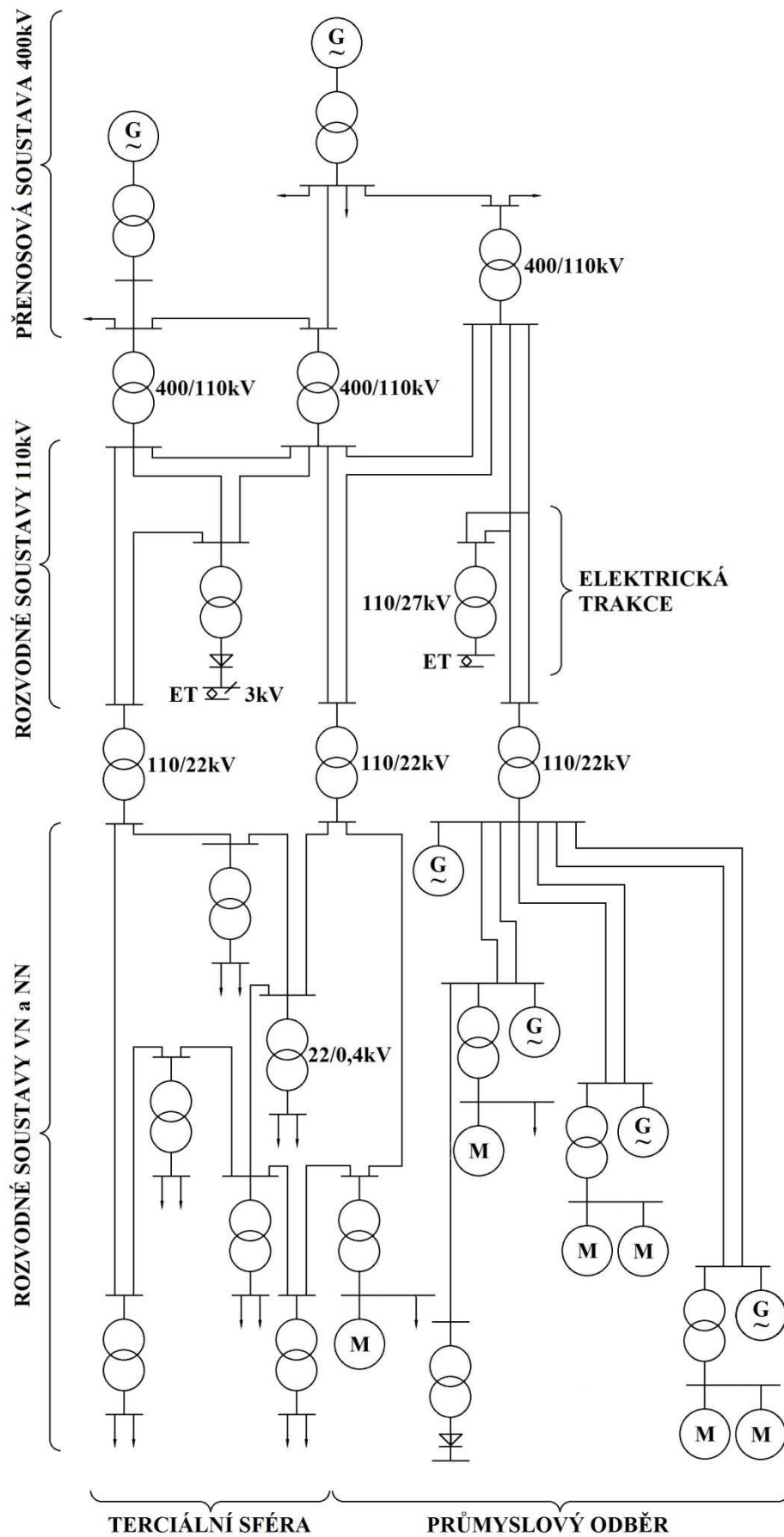
Elektrizační soustava slouží k přenosu a rozvodu elektrické energie z místa výroby až do místa spotřeby. Skládá se obvykle ze soustav přenosových a soustav distribučních. [1]

Přenosové soustavy slouží k přenosu velkých výkonů mezi hlavními uzly elektrizační soustavy. Distribuční soustavy mají za úkol rozdělit elektrickou energii z napájeného uzlu do jednotlivých skupin nebo oblastí spotřebičů, popř. k jednotlivým spotřebičům. Veřejné distribuční soustavy slouží k napájení oblastí terciální sféry (byty, občanská vybavenost) a jsou z nich napájeny i rozvodné sítě průmyslové, zemědělské a dopravní. [1]

Aby elektrizační soustava mohla plnit úkoly, které pro ni vyplývají z rozvoje hospodářství, musí tato soustava i každá její část nejvhodnějším způsobem plnit tyto požadavky:

- zajišťovat bezpečnost osob
- zajišťovat dostatečnou, spolehlivou a kvalitní dodávku elektrické energie spotřebitelům
- výrazně snižovat pracnost prací v provozu a v údržbě soustavy
- pracovat s vysokou účinností
- pracovat s vyššími parametry a s větším počtem zdrojů a elektrických stanic
- využívat odpadního tepla
- umožňovat řízení odběru elektrické energie
- být materiálově nenáročná (zejména pokud jde o deficitní materiály)
- zabraňovat nepříznivým vlivům soustavy na okolí (na životní prostředí). [1]

Elektrizační soustavy jsou tvořeny jednotlivými sítěmi, zdroji a elektrickými stanicemi (Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.). [1]



Obr. 2 - Struktura elektrizační soustavy [1]

Elektrickými sítěmi se rozumějí souhrny všech galvanicky spojených částí téhož napětí. V rámci elektrizační soustavy můžeme mluvit o sítích 400 kV, 220 kV, 110 kV o sítích 22 kV apod. Síť jednotlivých napěťových a proudových soustav jsou od sebe odděleny transformovnyami nebo měnírnami. [1]

Elektrická energie se u nás přenáší soustavami 3 ~ 50 Hz 400 kV a 3 ~ 50 Hz 220 kV, obě s účinně uzemněným uzlem. Části s napětím 220 kV se nebudou dále rozvíjet. Vyšší napětí se u nás dosud nepoužilo. V zahraničí jsou provozovány přenosové soustavy s napětími 220 kV, 330 kV, 500 kV, 750 kV a 1150 kV. [1]

Zdroje (elektrárny) jsou buď přímo zapojeny do soustav 400 kV, nebo 220 kV, popř. jsou zapojeny so sítí 110 kV, které pracují do přenosových soustav přes zvyšovací transformátory. Uzly přenosové soustavy jsou tvořeny elektrickými stanicemi, jejichž funkcí je spínat různé větve soustavy a obvykle v téže stanici transformovat elektrickou energii na jiné napětí, většinou na distribuční napětí 110 kV v transformovnách 400/110 kV, popř. 220/110 kV. Z těchto stanic jsou pak napájeny veřejné rozvodné soustavy. [1]

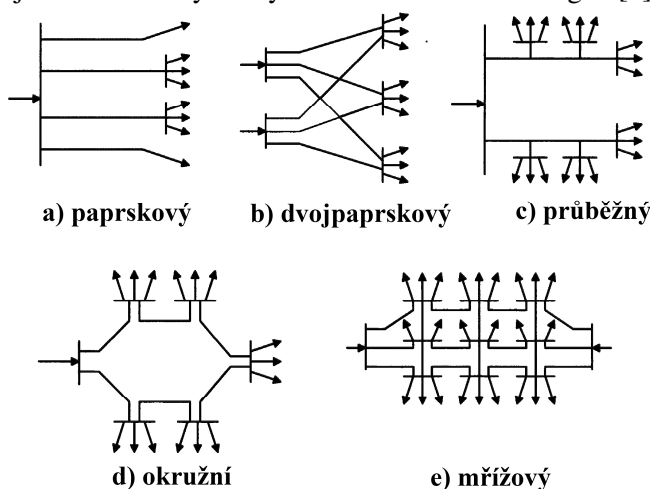
Elektrické stanice jsou nedílnými součástmi elektrizačních soustav. Jsou jimi propojeny sítě různých proudových a napěťových soustav a přes ně se také jednotlivé sítě navzájem ovlivňují. Musí proto být řešeny tak, aby umožňovaly všechny transfigurace soustavy, umožněné propojovanými sítěmi. Jejich umístění v soustavě musí být voleno optimálně. [1]

1.2 Řešení elektrických sítí z hlediska uspořádání

Sítě jsou řešeny z hlediska uspořádání dvěma základními způsoby:

- jako otevřený rozvod, kde je elektrická energie ke spotřebiči dodána jednou cestou,
- jako uzavřený rozvod, kde lze napájení zajistit vždy ze dvou nebo více stran. [2]

K prvnímu způsobu patří paprskový rozvod a průběžný rozvod, ke druhému způsobu patří okružní rozvod a mřížová síť. Výběr vhodného druhu rozvodu závisí na způsobu provozu řešené soustavy, jak z hlediska rozdělování výkonu, tak z hlediska bezpečnosti a hospodárnosti. Na Obr. 3 – **Druhy rozvodů** Obr. 3 jsou znázorněny druhy rozvodu elektrické energie. [2]



Obr. 3 – Druhy rozvodů [2]

Přenosová soustava 400 kV a 220 kV je řešena okružním rozvodem, do kterého pracují zdroje velkých výkonů. [2]

Distribuční soustava 110 kV tvoří základ distribuční soustavy. Sítě zajišťují přenos elektrické energie z uzlových transformoven zvn/vvn a vvn/vvn do transformoven 110/vn kV. [2]

Distribuční sítě vn jsou tvořeny venkovními a kabelovými vedeními provozovanými převážně s napětím 22 kV, resp. 35 kV. [2]

Distribuční sítě nn jsou provozovány převážně paprskovým a průběžným rozvodem, husté městské sítě jsou provozovány jako mřížové. [2]

1.3 Distribuční sítě velmi vysokého napětí

Distribuční sítě vvn jsou provozovány standardně v oddělených systémech s transformátory 400/110 kV nebo 220/110 kV. Rozpojovací místa jsou volena tak, že z hlediska ztrát se způsob provozu sítě 110 kV blíží paralelnímu chodu. [2]

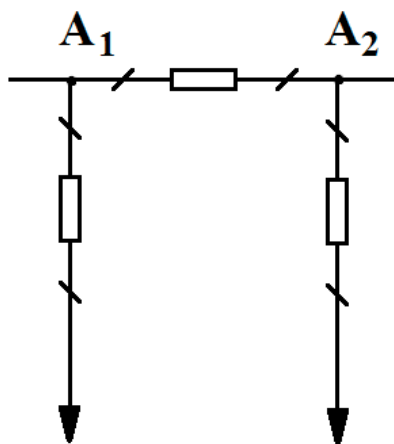
1.3.1 Elektrické stanice a rozvodny velmi vysokého napětí

Elektrické stanice 110 kV

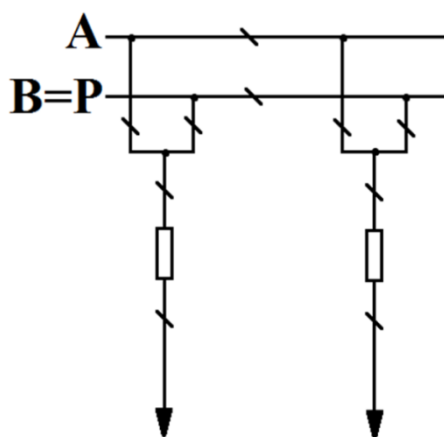
Vedení 110 kV plní především rozvodné úkoly. Rozvádějí energii od velkých uzlů stanic 400 kV a 220 kV do měst, případně napájejí průmyslové závody. [1]

Základní schémata rozveden 110 kV jsou závislá především na počtu odboček. [1]

Rozvodny střední velikosti



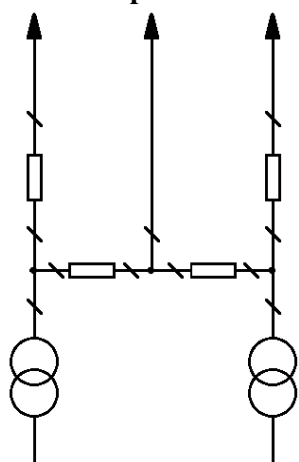
Obr. 4 – Vnitřní provedení s podélným dělením na dva úseky [1]



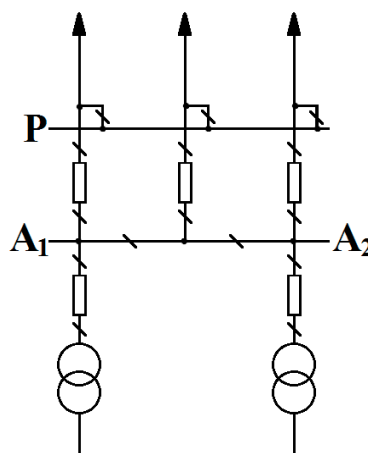
Obr. 5 – Venkovní provedení stanice s pomocnou přípojnící [1]

Na Obr. 5 je znázorněno venkovní provedení stanice s pomocnou přípojnící vzhledem k obtížnějším opravám vypínačů. [1]

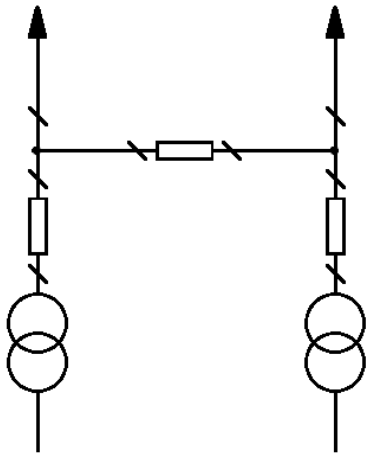
Úsporná schémata malých rozvodů



Obr. 6 – Úsporné schéma s pěti odbočkami [1]



Obr. 7 – Úsporné schéma s pěti odbočkami a pomocnou přípojnící [1]



Obr. 8 – Úsporné schéma „H“ spojení pro čtyři odbočky [1]

Na volbu schématu malých rozvodnů má velký vliv způsob jejich zapojení do elektrizační soustavy. Vedení 110 kV může pro danou stanici odbočovat nebo může být zasmyčkováno. Nejčastěji voleným schématem pro 110 kV je úsporné schéma „H“. [1]

1.4 Distribuční síť vysokého napětí

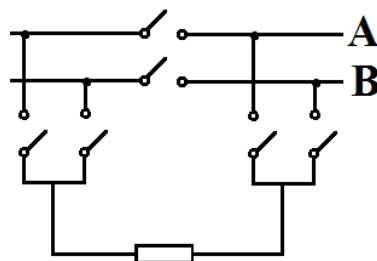
Vysokonapěťové soustavy v ČR je možno rozdělit na soustavy distribuční s napěťovými hladinami 10, 22 a 35 kV, dále potom na soustavy elektrárenských, průmyslových a důlních provozů s napěťovými hladinami převážně 6 a 10 kV. [2]

1.4.1 Rozvodny vysokého napětí

Rozvodny 35 kV resp. 22 kV mohou být ve venkovním nebo vnitřním provedení. Vypínače v rozvodnách mohou být pevné nebo výsuvné, nejčastěji ve skříňových rozvaděčích. [1]

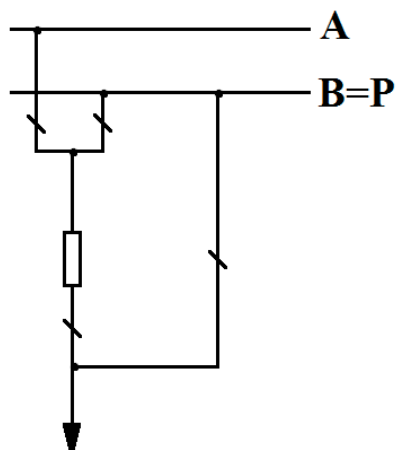
Rozvodny 35 kV

Tyto rozvodny jsou nejčastěji venkovního provedení, výjimečně kryté s kobkami. [1]



Obr. 9 – Schéma rozvodny 35 kV s malým počtem odboček [1]

Na Obr. 9 je znázorněno schéma rozvodny 35 kV s malým počtem odboček, u této rozvodny je přípojnice podélně dělená na dva úseky. [1]

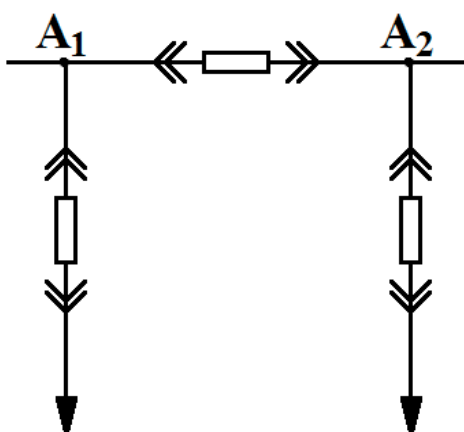


Obr. 10 – Schéma pro důležité rozvodny 35 kV [1]

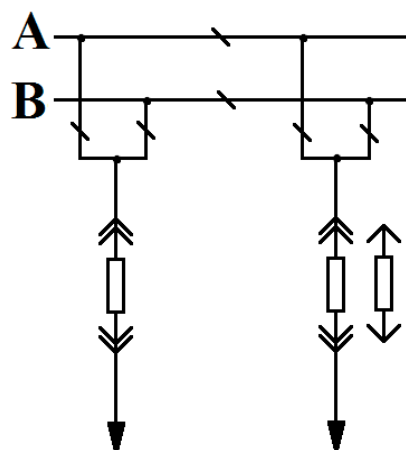
Na Obr. 10 je znázorněno schéma pro důležité rozvodny 35 kV s dvojitými přípojnícemi, z nichž jedna je zároveň pomocná přípojnice s přemost'ovacími odpojovači. [1]

Rozvodny 22 kV

Schémata s výsuvnými vypínači:



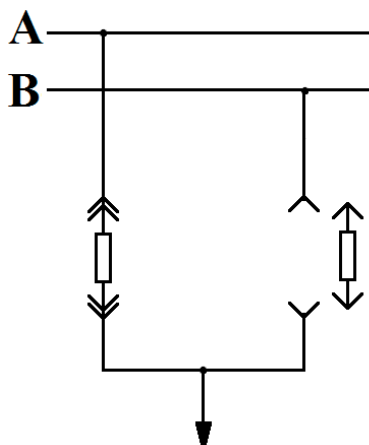
Obr. 11 – Schéma jednoduché přípojnice [1]



Obr. 12 – Schéma dvojité přípojnice [1]

Na Obr. 11 je schéma rozvodny s výsuvnými vypínači s jedním systémem přípojníc. Na Obr. 12 je schéma se dvěma systémy přípojníc. [1]

Velmi častý návrh vnútorného vedení pro rozvaděč v provedení se dvěma výsuvnými vypínači v odbočce:



Obr. 13 – Schéma se dvěma výsuvnými vypínači [1]

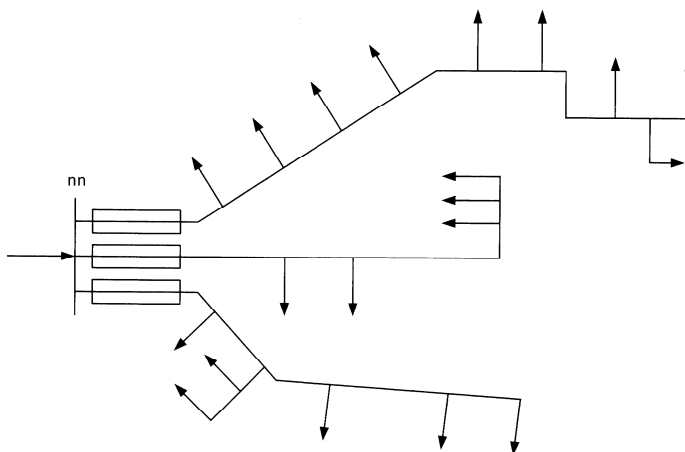
1.5 Distribuční síť nízkého napětí

Sítě nízkého napětí jsou navrhovány s ohledem na charakter napájeného objektu nebo oblasti, které se vyznačují odlišnou velikostí požadovaných výkonů a stupněm důležitosti zajištění dodávky elektrické energie. Uvedená kritéria pak rozhodují nejen o dimenzování jednotlivých částí sítě, ale také o jejich konfiguraci a způsobu připojení odběrů. [2]

1.5.1 Typy sítí nízkého napětí

Sítě paprskové

Každý paprsek je samostatný a nelze je vzájemně zálohovat. Paprskový způsob zásobování je sice nejméně finančně náročný, ale jistota dodávky elektrické energie je nejmenší. Při poruchách může být přerušeno dodávky dlouhé (několik hodin i déle). Používá se v malých městech a vesnicích. [3]

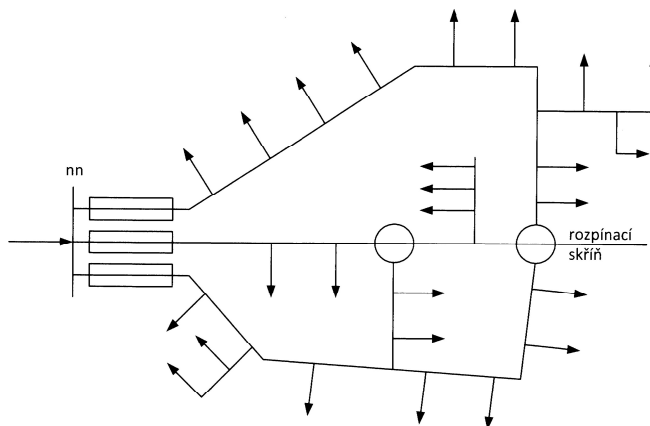


Obr. 14 – Paprsková síť nízkého napětí [3]

Sítě okružní

Postupným zahušťováním odběrů se sítě zahušťovaly a vznikaly sítě okružní. Jednotlivé paprsky sítí jsou vedeny tak, aby se daly navzájem propojit. Sítě jsou obvykle provozovány jako paprskové, ale při poruše v některém úseku lze velice rychle zajistit náhradní napájení. Další výhodou je možnost rovnoměrnějšího rozdělení zatížení na jednotlivé vývody. [3]

Sítě okružní jsou dražší jako sítě paprskové pro větší délku nezbytných vedení, jsou však provozně jistější. Provoz rozepnutých okružních sítí je přehledný a nenáročný. Používají se i pro hladiny napětí vn a vvn. [1]

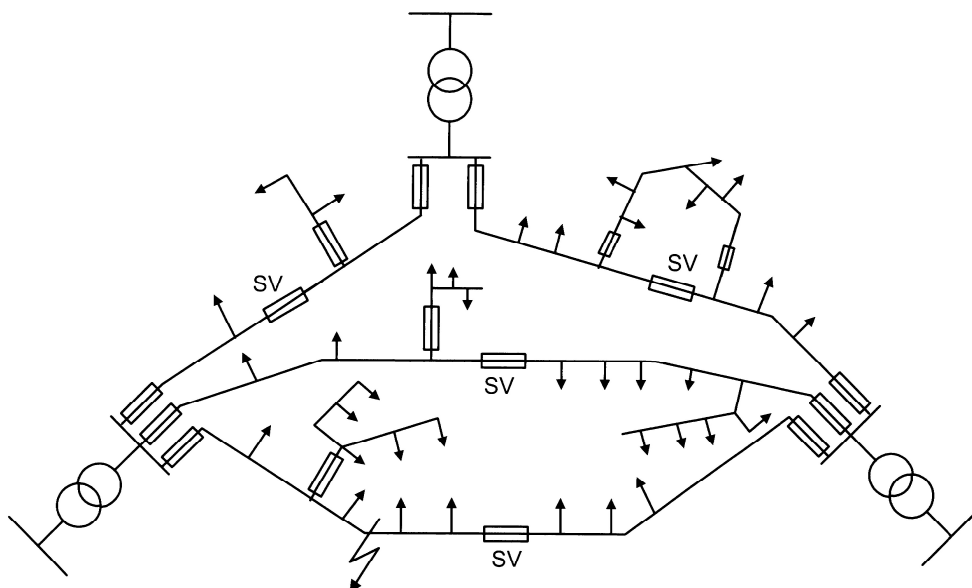


Obr. 15 – Okružní síť nízkého napětí [2]

Zjednodušená mřížová síť

Dalším zvyšování zatížení vedlo k budování zauzlených sítí, kdy síť je tvořena několika oky a vyskytuje se i více napáječů. Spojovací vedení mezi napáječi se často jistí tzv. pojistkami slabé vazby, nejlépe v místě kritického průřezu (největší úbytek napětí) s poloviční jmenovitou hodnotou hlavních pojistek. Při poruše reaguje nejdříve pojistka slabé vazby a následně pojistka hlavní, čímž se odpojí jen část porušeného vedení. [3]

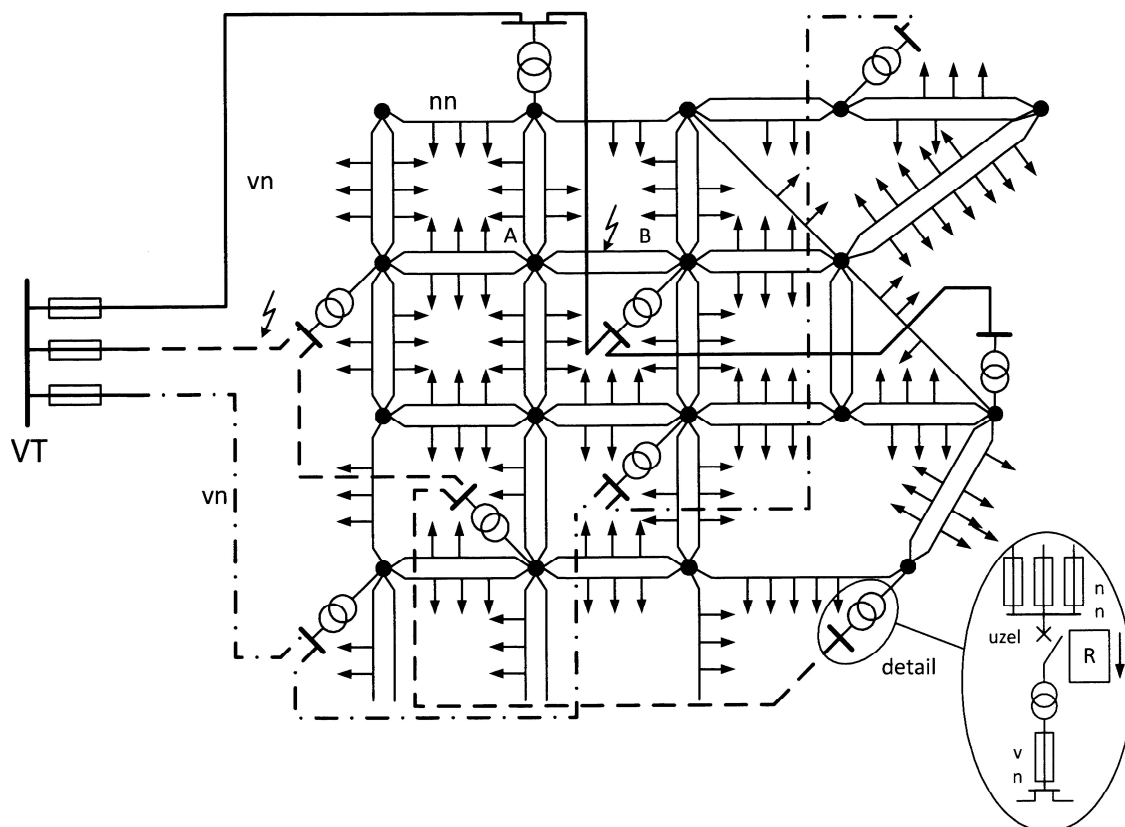
Zjednodušená mřížová síť se používá ve městech, kde se vedou kabely podél domů, v místech křižovatek se kabely propojí – proto mřížová síť. [2]



Obr. 16 – Zjednodušená mřížová síť [2]

Klasická mřížová síť

Ve větších městech lze provádět mřížové sítě, kde je několik transformoven napojeno více napáječi vn. Kabelové vedení nn stejného průřezu v celé síti je v uzlech jištěno pojistkami s pomalou charakteristikou o stejné hodnotě, což zajišťuje vysokou selektivitu jištění sítě. Mřížové sítě zajišťují lepší využití transformátoru a vedení, zlepšují kvalitu napětí, zmenšují ztráty v síti. Nevýhodou mřížových sítí je zvětšení zkratových výkonů v síti nn a vznik tzv. zpětných napětí při poruchách. [3]



Obr. 17 – Klasická mřížová síť nízkého napětí [2]

1.6 Průmyslový rozvod elektrické energie

1.6.1 Umístění transformátorů a rozvaděčů

Vstupní a hlavní transformovna průmyslového závodu

Malé průmyslové závody a podnikatelé napájeni transformátory 2×1 MVA, mají pouze jednu transformovnu 22 kV/nn (umístěna je většinou uprostřed průmyslového závodu). [1]

Středně velké průmyslové závody s příkonem 2×10 MVA mají obvykle hlavní a vstupní transformovnu sloučenou 22 kV/6 kV, 6 kV/nn. [1]

Velké průmyslové závody s příkonem nad 10 MVA mají vstupní transformovnu umístěnou v nejvhodnějším místě pro připojení. Podružné transformovny jsou umístěny co nejbližší spotřebičům. [1]

Společné zásady pro všechny transformovny v průmyslovém rozvodu

Transformovny budujeme co nejbliže k největší spotřebě elektrické energie. Napětí vn přivádíme až do nejbližší vzdálenosti k elektrickým spotřebičům, v takovém případě jsou ztráty a úbytky napětí nižší. [1]

Transformátorové komory se stavějí na severní (stinné) straně objektu z důvodů řádné klimatizace. [1]

Budování jediné trafostanice je omezeno přenosovou schopností kabelových rozvodů nn. Za limitní se považuje přenos 70 000 kW na jeden metr. Tj. 700 kW na vzdálenost 100 m. Pokud návrh nevyhoví, zvýší se napěťová hladina. [1]

1.6.2 Volba druhu transformátorů a rozvaděčů

Olejevé transformátory při převodech 35 kV a 22 kV/nn musejí být umístěny mimo provoz závodu v oddělených trafokobkách v pískových ložích. [1]

Suché nebo bezolejové transformátory (např. s chladivy Clophen, Sovtol) lze umístit přímo v provozovnách, ve vyšších poschodích nebo na střechách budov. Jedná se o trafostanici 6 kV/nn. Tím splníme ekonomickou zásadu přivést energii co nejbliže ke spotřebičům. [1]

Hlavní rozvaděče nn

Každý transformátor má svůj hlavní rozvaděč nn, který napájí příslušný úsek přípojníc. Nejrozšířenější jsou rozvaděče panelové a skříňové. [1]

Hlavní rozvaděč nn umístíme v transformovnách. Návrh hlavních rozvaděčů řešíme s minimální odlišností výbroje jednotlivých odboček, které mají být výkonově přibližně stejné. [1]

Podružné rozvaděče nn

Jsou napájeny z hlavních rozvaděčů a jsou umístěny přímo v provozovnách, kde napájejí jednotlivé větší stroje nebo motorové větve se skupinou strojů. [1]

V poschodových budovách bývají rozvaděče etážové, které jsou umístěny u vchodu do poschodí. Zásadně musí mít každý etážový a podružný rozvaděč hlavní výkonový vypínač, který umožní vypnutí výroby z provozu. [1]

1.6.3 Způsoby uložení kabelového vedení

Kabelové vedení se ukládají do výkopů a na kabelové mosty podle ČSN 33 2000-5-52.

Pokud jsou vedeny v kabelovém výkopu kabelová vedení vn a nn, vn se umísťuje vždy pod nn kabelové vedení. [1]

Křižování kabelů

Při křižování elektrických kabelů nn a vn, se kabely nn ukládají vždy nad kabely vn, tak jak je tomu u vedení kabelových vedení ve výkopu. [1]

Při souběhu nebo křižování elektrických kabelů se slaboproudými (ovládacími) kabely platí minimální vzdálenost v průmětu křižení 30 cm. [1]

Kabely je nutno chránit před mechanickým poškozením uložením do tvárnic nebo trub. [1]

Souběh elektrického kabelu s tepelným potrubím není dovolen (viz ČSN 33 2000-5-52) pokud nejde o průchozí energetický kanál. Toto není dovoleno, když se jedná o železná potrubí, kdy dochází k vystupování bludných proudů z kabelů. [1]

Kabelové kanály vyústíují obvykle do prostorů pod rozvodnami vn, nn a dozornami. [1]

Postup při návrhu kabelových kanálů a jejich výzbroje

- určení typu kabelového kanálu podle počtu kabelů, určení výšky a šířky
- podle průměru kabelů se určí rozteč uložení na roštu
- stanovení potřebného množství materiálu na 1 m délky kabelového kanálu podle výzbroje [1]

Pro jednotlivé způsoby ukládání průmyslového a vnitřního rozvodu platí normy ČSN 33 2000-5-52, 34 1610. [1]

1.6.4 Technologie projektu průmyslového závodu

V průmyslovém závodě můžeme rozdělit elektrická zařízení takto:

- transformovna vvn/vn, vn/vn (např. 110 kV/22 kV, 22 kV/22 kV)
- hlavní rozvodna vn
- podružné spínací stanice vn
- transformovna vn/nn
- průmyslová měnírna (zvláštní zdroje energie)
- napájecí rozvod vn a nn
- provozní rozvod vn a nn (na stěnách)
- rozvod pro měření, kontrolu, signalizaci a ovládání
- dozorna, velín (jen v hlavní rozvodně)
- výroba a rozvod stlačeného vzduchu (pro práci s pneumatickým nářadím)
- akumulátorovna (pro případy výpadku energie, kdy je nutné fungování nouzového osvětlení) [1]

1.6.5 Rozvod elektrické energie v hutním závodě

Základním rozvodem vn v hutním závodě je soustava 6 kV, izolovaná. V případě velkých kapacitních proudů je soustava kompenzovaná Petersonovou induktivní cívkou v uzlu transformátoru. Také se přechází na zemnění uzlu činným odporem. [1]

Napětím 6 kV se napájí motory o výkonu větším než 150 kW a další transformátory pro převod napětí 6 kV/nn. [1]

Hlavní provozy hutí, koksovna, ocelárna, vysoké pece atd. mají podle 1. stupně zajištěnosti, tedy ze dvou nezávislých zdrojů. [1]

Navzájem nezávislé zdroje jsou například elektrárna a síť veřejné energetiky vvn (110 kV). [1]

K napájení rozveden hlavních provozů bývá použito dvojitého paprskového napájení. [1]

V hutních závodech bývá tradičně napětí vn na třech hladinách (110 kV, 22 kV, 6 kV). [1]

Vzdálenější provozy je nutno napájet napětím 22 kV a zejména u elektrooceláren až 110 kV, teprve na místě spotřeby transformovat energii na hladinu nn. Při přímé transformaci 110/6 kV by byly zkratové proudy v soustavě 6 kV příliš vysoké. Obvyklá hranice zkratového výkonu pro rozvody 6 kV je 400 MVA, pro 22 kV je 600 MVA. Cena přístrojového vybavení při přímé transformaci 110/6 kV by byla příliš vysoká. [1]

Rozptylové reaktance dvou za sebou zapojených transformátorů 110/22 kV a 22/6 kV sníží zkratový výkon na hladině 6 kV. [1]

V období odlehčení zátěže provozů je možno dodávat přebytečnou energii vyrobenou synchronními generátory v závodní elektrárně zpátky do sítě energetiky přes rozvod 110 kV. [1]

V některých hutních provozech velmi záleží na spolehlivosti dodávky elektrické energie – např. čerpadla chladicí vody pro pece. Jako záložních zdrojů elektrické energie se používá synchronních generátorů, poháněných spalovacími motory, které se samočinně uvedou do chodu v případě přerušení dodávky napájecí sítě. [1]

Zásada pro umístění koncových transformátorů – vždy v místě centrální spotřeby. [1]

V hutních závodech je třeba často řešit problém poslední transformace vn/nn metodou předsunutého transformátoru, jelikož provozy jsou velmi prašné s nedostatkem místa. [1]

Nízkonapěťové sítě jsou v hutních provozech rozděleny zvláště do okruhů pro napájení světelných spotřebičů 230 V s uzemněným uzlem a zvláště pro okruhy napájení motorů 3 x 500 V – izolovaná soustava. Pro některé menší typy motorů se používá také soustava 3 x 400/230 V, 690 V. [1]

1.7 Rozdílnosti napěťových hladin v zahraničí (Austrálii)

Přenosová soustava - standardní napěťové hladiny v Austrálii jsou 66, 110, 132, 220, 275, 330 a 500 kV. [4]

Tzv. Subtransmission system (soustava přenášející elektrickou energii z přenosové soustavy nebo elektráren na primární distribuční soustavy) - standardní napěťové hladiny v Austrálii jsou 22, 33, 66, 110 a 132 kV. [4]

Primární distribuční soustava (soustava přenášející elektrickou energii získanou z přenosové soustavy, tzv. subtransmission system nebo elektráren do průmyslových závodů) - standardní napěťové hladiny v Austrálii jsou 6,6, 11 a 22 kV. [4]

Sekundární distribuční soustava (soustava přenášející elektrickou energii získanou z primární distribuční soustavy k jednotlivým spotřebitelům) - standardní napěťové hladiny v Austrálii jsou 415 sdružené a 240 fázové napětí [4]

2 LEGISLATIVNÍ RÁMEC – KVALITA DODÁVEK

2.1 Parametry elektřiny

Hodnocení parametrů elektřiny lze rozdělit do dvou základních kategorií:

Spolehlivost dodávky elektřiny zahrnuje dlouhodobá přerušení a výpadky. Spolehlivost můžeme hodnotit globálními ukazateli, např. i podle metodiky UNIPED. [5]

- počet výpadků za rok
- průměrná doba trvání jednoho výpadku
- souhrnná doba přerušení napájení za rok [5]

Charakteristiky napětí:

- elektromagnetické rušení šířené vedením
- harmonické
- kolísání napětí
- poklesy a krátkodobá přerušení
- nesymetrie napětí
- přenosy a šíření signálů po vedeních
- změny kmitočtu sítě
- přechodná přepětí – impulsní rušení [5]

ostatní jevy jsou spjaty se změnami zatížení, provozními spínacími nebo atmosférickými vlivy. [5]

Standardní parametry elektřiny

Podle platných právních předpisů je povinností dodavatele zajistit a dodržovat standardní parametry elektřiny. [5]

Základní požadavky vyplývají z právních předpisů, jsou dány v ustanovení §6 odstavec 2, vyhlášky č. 169/1995 Sb.: „Elektřina je dodávána v kvalitě odpovídající doporučeným technickým normám“. Pak musíme respektovat při posuzování parametrů elektřiny, že meze „intervalů tolerance“ hodnot standardních parametrů elektřiny udávají platné technické normy. [5]

Ucelený podklad pro vymezení standardních parametrů elektřiny v distribučních sítích nn a vn podává evropská norma EN 50 160, která je zavedena do soustavy českých norem jako:

ČSN EN 50 160 – Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě [5]

PNE 33 3430-7 – Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě [5]

Tyto normy udávají meze nebo hodnoty hlavních charakteristik napětí, jaké může za normálních provozních podmínek očekávat kterýkoliv odběratel. [5]

Základní charakteristiky kvality dodávané elektrické energie:

Kmitočet sítě

Jmenovitý kmitočet napájecích napětí je 50 Hz. Střední hodnota kmitočtu základní harmonické musí být v následných mezích:

50 Hz \pm 1% (tj. 49,5 ... 50,5 Hz) během 99,5% roku
50 Hz + 6%, -4% (tj. 47 ... 52 Hz) po 100% času [5]

Velikost napětí

Je udávána jmenovitým napětím sítě (U_n).

Normalizovaná jmenovitá napětí udává norma ČSN IEC 38 – Normalizovaná napětí IEC [5]

sítě nn – pro 3f. čtyřvodičové sítě [5]

$U_n = 230$ V mezi fázovým a středním vodičem
 $U_n = 400$ V mezi fázovými vodiči [5]

sítě vn – pro 3f. sítě (obecně trojvodičové) s kmitočtem 50 Hz [5]

$U_n = 3, 6, 10, 22$ a 35 kV [5]

sítě vvn [5]

$U_n = 110$ kV [5]

Odchytky napětí

S vyloučením přerušení napájení musí být během každého týdne 95 % průměrných efektivních hodnot napájecích napětí v měřicích intervalech 10 min. v rozsahu $U_n \pm 10\%$. [5]

Rychlé změny napětí (flikr)

Obecně nepřekračují 5% U_n v sítích nn a 4% U_n v sítích vn. [5]

Krátkodobé poklesy napětí

Očekávaný počet poklesů může být během roku od několika desítek až do jednoho tisíce. Většina poklesů má dobu trvání menší než 1 sekunda a výši poklesu menší než 60%. V některých oblastech se mohou velmi často vyskytovat poklesy s výškou mezi 10 % - 15 % U_n jako následek spínání zatížení u odběratelů. [5]

Krátkodobá přerušení napětí

Roční výskyt krátkodobých přerušení napájecích napětí je v rozsahu od několika desítek až do několika stovek. Přibližně 70% krátkodobých přerušení, může mít dobu trvání menší než 1 sekunda. [5]

Dlouhá přerušení napětí

Roční četnost poruchových přerušení napětí delších než 3 minuty může být menší než 10, v závislosti na oblasti může dosahovat až hodnot okolo 50. Pro předem dohodnutá a nahlášená přerušení napětí se směrné hodnoty neuvádějí. [5]

Další kvalitativní ukazatele jsou:

Dočasná přepětí o síťovém kmitočtu
Přechodná napětí
Nesymetrie napětí
Harmonická napětí
Meziharmonická napětí
Napětí signálů v napájecím napětí [5]

2.2 Zákon č. 458/2000 Sb.

Tento zákon zpracovává příslušné předpisy Evropské unie a upravuje v návaznosti na přímo použitelné předpisy Evropské unie, podmínky podnikání a výkon státní správy v energetických odvětvích, kterými jsou elektroenergetika, plynárenství a teplárenství, jakož i práva a povinnosti fyzických a právnických osob s tím spojené. (účinnost od 1. 1. 2001) [6]

Podle Dílu 1 §22 jsou účastníky trhu s elektřinou:

- výrobci elektřiny
- provozovatel přenosové soustavy
- provozovatelé distribučních soustav
- operátor trhu
- obchodníci s elektřinou
- zákazníci [6]

Výrobce elektřiny (§23):

- má právo připojit své zařízení k elektrizační soustavě, pokud splňuje podmínky připojení k přenosové soustavě nebo k distribučním soustavám a obchodní podmínky stanovené Pravidly provozování přenosové soustavy nebo Pravidly provozování distribuční soustavy aj. [6]
- je povinen na své náklady zajistit připojení svého zařízení k přenosové soustavě nebo distribuční soustavě aj. [6]

- Výrobce neodpovídá za odchylku vzniklou v souvislosti s dispečerským řízením výroby elektřiny podle § 25 odst. 5. [6]

Provozovatel přenosové soustavy (§24):

- zajišťuje bezpečný, spolehlivý a efektivní provoz, obnovu a rozvoj přenosové soustavy a propojení přenosové soustavy s jinými soustavami, a za tím účelem zabezpečuje podpůrné služby a dlouhodobou schopnost přenosové soustavy uspokojovat přiměřenou poptávku po přenosu elektřiny, spolupracuje s provozovateli propojených přenosových soustav a spolupracuje na integraci vnitřního evropského trhu s elektřinou aj. [6]
- má právo zřizovat a provozovat vlastní telekomunikační síť k řízení, měření, zabezpečení a automatizaci provozu přenosové soustavy a k přenosu informací pro činnost výpočetní techniky a informačních systémů aj. [6]
- je povinen zřídit věcné břemeno umožňující využití cizí nemovitosti nebo její části pro účely uvedené v odstavci 3 písm. e), a to smluvně s vlastníkem nemovitosti aj. [6]

Provozovatel distribuční soustavy (§25):

- zajišťuje spolehlivé provozování, obnovu a rozvoj distribuční soustavy na území vymezeném licenci aj. [6]
- má právo zřizovat a provozovat vlastní telekomunikační síť k řízení, měření, zabezpečování a automatizaci provozu distribuční soustavy a k přenosu informací pro činnost výpočetní techniky a informačních systémů aj. [6]
- je povinen je zřídit věcné břemeno umožňující využití cizí nemovitosti nebo její části pro účely uvedené v odstavci 3 písm. e), a to smluvně s vlastníkem nemovitosti aj. [6]

Obchodník s elektřinou (§30):

- má právo na poskytnutí přenosu nebo distribuce elektřiny aj. [6]
- je povinen řídit se Pravidly provozování přenosové soustavy nebo Pravidly provozování distribučních soustav aj. [6]

Technické dispečinky (§26):

- provádí dispečerské řízení přenosu elektřiny v přenosové soustavě a dispečerské řízení zdrojů poskytujících podpůrné služby k zajištění systémových služeb v přenosové soustavě a v distribučních soustavách v součinnosti s provozovatelem distribučních soustav aj. [6]

Zákazník (§28):

- má právo na uzavření smlouvy o připojení a na připojení svého odběrného elektrického zařízení k přenosové soustavě neb k distribuční soustavě, pokud splňuje podmínky připojení a obchodní podmínky stanovené Pravidly provozování přenosové soustavy nebo Pravidly provozování distribuční soustavy a má k připojení souhlas vlastníka dotčené nemovitosti aj. [6]
- je povinen řídit se pokyny technického dispečinku provozovatele přenosové soustavy nebo technického dispečinku provozovatele distribuční soustavy, ke které je jeho zařízení připojeno, a Pravidly provozování přenosové soustavy nebo Pravidly provozování distribuční soustavy aj. [6]

2.3 Vyhláška 540/2005 Sb.

Tato vyhláška stanoví požadovanou kvalitu dodávek a služeb souvisejících s regulovanými činnostmi v elektroenergetice, včetně výše náhrad za její nedodržení, postupy a lhůty pro uplatnění nároku na náhrady, a postupy pro vykazování dodržování kvality dodávek a služeb. [7]

Standard kvality napětí (§8):

Standardem kvality napětí je distribuce elektřiny s odpovídajícími parametry velikosti a odchylky napájecího napětí a frekvence, které jsou v souladu s Pravidly provozování přenosové soustavy nebo Pravidly provozování distribučních soustav nebo s parametry napětí a frekvence sjednanými ve smlouvě mezi zákazníkem a provozovatelem distribuční soustavy. [7]

Přerušení přenosu nebo distribuce elektřiny se dělí:

a) Podle doby trvání:

- 1) dlouhodobé – s dobou trvání delší než 3 minuty
- 2) krátkodobé – s dobou trvání alespoň 1 sekundu a ne delší než 3 minuty [7]

b) Podle příčiny:

- 1) neplánované – přerušení, které není plánované přerušení.

Neplánované přerušení přenosu nebo distribuce elektřiny se dělí na:

- 1.1) poruchové – vzniká při vzniku a odstraňování poruchy na zařízení provozovatele přenosové soustavy
- 1.2) vynucené – přerušení elektřiny z důvodu podle §24 odst. 3 písm. c) bodu 1 nebo §25 odst. 4 písm. c) bodu 1 energetického zákona
- 1.3) mimořádné – přerušení vznikající při stavech nouze nebo předcházení stavu nouze
- 1.4) v důsledku události mimo přenosovou nebo distribuční soustavu provozovatele soustavy a u výrobce

- 2) plánované – přerušení podle §2 písm. b) vyhlášky [7]

c) Číselné kódy kategorií přerušení pro účely vykazování:

Kategorie přerušení	Číselné označení pro vykazování
1. neplánované	
1.1. poruchové	
1.1.1. způsobené poruchou mající původ v zařízení přenosové nebo distribuční soustavy provozovatele soustavy nebo jejím provozu	
1.1.1.1. za obvyklých povětrnostních podmínek	11
1.1.1.2. za nepříznivých povětrnostních podmínek	16
1.1.2. způsobené v důsledku zásahu nebo jednání třetí osoby	12
1.2. vynucené	15
1.3. mimořádné	14
1.4. v důsledku události mimo soustavu a u výrobce	13
2. plánované	2

Obr. 18 – Číselné kódy pro účely vykazování přerušení dodávky přenosu [7]

Výpočet ukazatelů nepřetržitosti přenosu nebo distribuce elektřiny:

Ukazatele se vypočítávají pouze z dlouhodobých přerušení přenosu nebo distribuce elektřiny. Začátkem přerušení přenosu nebo distribuce elektřiny pro výpočet ukazatelů je okamžik, kdy se provozovatel přenosové soustavy nebo provozovatel distribuční soustavy dozvěděl o vzniku přerušení nebo kdy vznik přerušení mohl a měl zjistit. [7]

1) Vztahy pro výpočet ukazatelů nepřetržitosti distribuce elektřiny:

a) Hladinové ukazatele

Průměrný počet přerušení distribuce elektřiny u zákazníků na napěťové hladině h v hodnoceném období [7]

$$SAIFI_h = \frac{\sum_j n_{jh}}{N_{sh}} \quad (1)$$

kde: h je označení hodnocené napěťové hladiny (nn, vn nebo vvn),
 j je pořadové číslo události v hodnoceném období,
 n_{jh} je celkový počet zákazníků přímo napájených z napěťové hladiny h , jimž bylo způsobeno přerušení distribuce elektřiny dané kategorie v důsledku j -té události,
 N_{sh} je celkový počet zákazníků přímo napájených z napěťové hladiny h ke konci předchozího kalendářního roku [7]

Průměrné souhrnná doba uvádí přerušení distribuce elektřiny u zákazníků na napěťové hladině h v hodnoceném období [7]

$$SAIDI_h = \frac{\sum_j t_{sj}}{N_{sh}} \quad (2)$$

kde: t_{sj} je součet všech dob trvání přerušení distribuce elektřiny v důsledku j -té události u jednotlivých zákazníků přímo napájených z napěťových hladin h , jimž byla přerušena distribuce elektřiny, stanovený jako:

$$t_{sj} = \sum_i t_{ji} \cdot n_{jhi} \quad (3)$$

kde: i je pořadové číslo manipulačního kroku v rámci j -té události,
 t_{ji} je doba trvání i -tého manipulačního kroku v rámci j -té události,
 n_{jhi} je počet zákazníků přímo napájených z napěťové hladiny h , jimž bylo způsobeno přerušení distribuce elektřiny dané kategorie v i -tém manipulačním kroku j -té události [7]

Průměrné doba trvání jednoho přerušení distribuce elektřiny u zákazníků na napěťové hladině h v hodnoceném období [7]

$$CAIDI_h = \frac{SAIDI_h}{SAIFI_h} \quad (4)$$

b) Systémové ukazatele

Průměrný počet přerušení distribuce elektřiny u zákazníků v soustavě v hodnoceném období [7]

$$SAIFI_s = \frac{\sum_{h=(nn,vn,vvn)} \sum_j n_{jh}}{N_s} \quad (5)$$

kde: N_s je celkový počet zákazníků v soustavě (na hladinách nn, vn, vvn) ke konci předchozího kalendářního roku [7]

Průměrná souhrnná doba trvání přerušení distribuce elektřiny u zákazníků v soustavě v hodnoceném období [7]

$$SAIDI_s = \frac{\sum_{h=(nn,vn,vvn)} \sum_j t_{sj}}{N_s} \quad (6)$$

Průměrná doba trvání jednoho přerušení distribuce elektřiny u zákazníků v soustavě v hodnoceném období [7]

$$CAIDI_s = \frac{SAIDI_s}{SAIFI_s} \quad (7)$$

2) Vztahy pro výpočet ukazatelů nepřetržitosti přenosu elektřiny

Průměrná doba trvání jednoho přerušení přenosu elektřiny v roce [7]

$$t_{ph} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (8)$$

kde: i je pořadové číslo přerušení přenosu elektřiny v hodnoceném roce,
 n je roční počet přerušení přenosu elektřiny,
 t_i je doba trvání i -tého přerušení přenosu elektřiny [7]

Nedodaná elektrická energie [7]

$$W_{ned} = \sum_{i=1}^n t_i P_{ned,i} \quad (9)$$

kde: $P_{ned,i}$ je výkon dopravovaný účastníkovi trhu s elektřinou do předávacího místa z přenosové soustavy, ve kterém došlo k i -tému přerušení elektřiny, těsně před tímto přerušením [7]

2.4 Vyhláška 306/2001 Sb.

Tato vyhláška stanoví kvalitu dodávek elektřiny a souvisejících služeb, které je vyjádřena standardy kvality dodávek elektřiny a souvisejících služeb. Kvalitní dodávkou elektřiny se rozumí dodávka elektřiny zákazníkovi provozovatelem přenosové soustavy nebo provozovatelem distribuční soustavy splňující všechny standardy kvality uvedené v této vyhlášce a ve zvláštním právním předpisu. [8]

Garantované standardy kvality dodávek elektřiny a souvisejících služeb (§2):

1) Garantované standardy kvality

- a) standard kvality elektřiny, kterým je především kvalita frekvence a napětí, garantovaný provozovatelem přenosové soustavy a provozovateli distribučních soustav v souladu s doporučenou ČSN normou [8]
- b) standard odstranění poruchového přerušení pojistky v hlavní domovní skříní nízkého napětí, která je součástí elektrické pojistky, provozovatelem distribuční soustavy je doba kratší než 6 hodin, výjimkou je kumulace poruch, která uplyne do okamžiku, kdy byl provozovatel přenosové soustavy nebo provozovatel distribuční soustavy o výpadku pojistky informován [8]
- c) standard obnovy dodávky elektřiny je předávacího místa při přerušení dodávky elektřiny v případě, že provozovatel přenosové soustavy nebo provozovatel distribuční soustavy zahájí práce na obnově dodávky elektřiny [8]

2.5 Rozdílnosti parametrů elektřiny v zahraničí (Austrálii)

Základní charakteristiky kvality dodávané elektrické energie:

Kmitočet sítě

Jmenovitý kmitočet napájecích napětí je 50 Hz. Střední hodnota kmitočtu základní harmonické musí být v následných mezích:

$50 \text{ Hz} \pm 0,1 \text{ Hz}$ (tj. 49,9 ... 50,1 Hz) *normální provozní frekvence*

$50 \text{ Hz} \pm 0,25 \text{ Hz}$ (tj. 49,75 ... 50,25 Hz) *přijatelná mžiková odchylka* . [9]

Velikost napětí

Je udávána jmenovitým napětím sítě (U_n).

Normalizovaná jmenovitá napětí udává Australian Standard. [4]

sítě nn

$U_n = 240 \text{ V}$ mezi fázovým a středním vodičem

$U_n = 415 \text{ V}$ mezi fázovými vodiči [4]

sítě vn

$U_n = 6.6, 11, 22 \text{ a } 33 \text{ kV}$ [4]

sítě vvn

$U_n = 66, 110, 132, 220 \text{ a } 275 \text{ kV}$ [4]

sítě zvn

$U_n = 330 \text{ a } 500 \text{ kV}$. [4]

Odchytky napětí

Jmenovité napětí v místech připojovacích bodů nebo jiná jmenovitá napětí smí být $U_n \pm 10\%$ [9]

Rychlé změny napětí (flickr)

Přípustné rozpětí napětí je:

sítě nn – v rozsahu $U_n \pm 6\%$ [9]

sítě vn (do 22 kV) $U_n \pm 5\%$ [9]

sítě vn (nad 22 kV) - na této hodnotě se domluví dodavatel elektřiny a zákazník. [9]

3 VYUŽITÍ VÝPOČTU USTÁLENÉHO STAVU PŘI PROJEKTOVÁNÍ PRŮMYSLOVÝCH SÍTÍ

Součástí výpočtu chodu sítě je především výpočet napěťových a proudových poměrů v síti, dodávaných a spotřebovaných činných a jalových výkonů, výkonových toků a ztát. Tímto postupem je získán základní obraz soustavy v ustáleném stavu. [10]

Uvažované předpoklady pro řešení chodu sítě jsou:

- řešení ustáleného stavu
- sinusový průběh napětí a proudů, tj. použití symbolicko-komplexní metody pro aktivní (\underline{U} , \underline{I} , \underline{S}) a pasivní (\underline{Z} , \underline{Y}) veličiny ve formě fázorů.
- 3f. sítě jsou brány jako symetrické s identickými hodnotami pasivních prvků pro všechny fáze, tj. výpočet jen pro jednu fázi, výsledek zbylých dvou fází bude natočen o $\pm 120^\circ$
- síťové prvky jsou konstantní a provozované na jmenovité frekvenci [10]

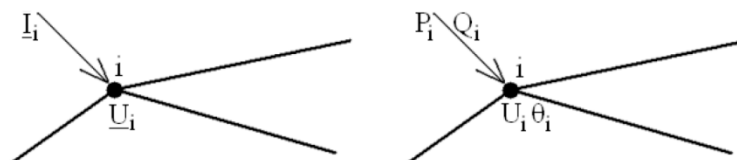
Matematický popis vychází z platnosti Ohmova zákona a Kirchhoffových zákonů pro proudy a napětí. Nejčastěji užívané metody v praxi jsou: metoda smyčkových proudů a metoda uzlových napětí, metoda uzlových napětí má pro použití podstatné výhody:

- jednoduchá příprava vstupních dat a uzlových rovnic (nižší počet uzlů, méně parametrů a rovnic)
- příčné parametry větví nečiní problémy
- snadné změny převodu u regulačních transformátorů
- vhodné použití výpočetní techniky
- uzlová napětí jsou dána řešením, větvové proudy se snadno dopočtou [10]

Každý uzel i sítě reprezentuje rozvodnu, odběrné místo, generátor, nadřazenou soustavu apod. Je jednoznačně určen aktivními veličinami – buď fázory injektovaného proudu a sdruženého uzlového napětí (\underline{I}_i , \underline{U}_i) nebo velikosti sdruženého napětí U_i , fázi θ_i , činným a jalovým injektovaným výkonem P_i , Q_i viz Obr. 19. Jejich vzájemné závislosti viz (10) a (11). [10]

$$\underline{U}_i = U_i e^{j\theta_i} \quad \underline{U}_i^* = U_i e^{-j\theta_i} \quad P_i = \sqrt{3} U_i I_i \cos \varphi_i \quad Q_i = \sqrt{3} U_i I_i \sin \varphi_i \quad (10)$$

$$\underline{S}_i = P_i + jQ_i = \sqrt{3} \underline{U}_i \underline{I}_i^* \rightarrow \underline{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\sqrt{3} \underline{U}_i^*} \quad (11)$$



Obr. 19 – Popis uzlu i soustavy [10]

Na základě těchto čtyř aktivních veličin se definují tři základní typy uzlů, u kterých jsou dvě aktivní veličiny dané a zbylé dvě je nutno dopočítat:

- PQ (odběrový) uzel – reprezentuje uzel s připojenou zátěží; P_i a Q_i dané, U_i a θ_i se počítá

- PU (elektrárenský, napětově řízený) uzel – reprezentuje uzel se zapojenou elektrárnou, kompenzačními prvky nebo regulačním transformátorem; P_i a U_i včetně mezí pro Q_i jsou dané, Q_i a θ_i se počítá
- referenční uzel - P_i a Q_i jsou neznámé (kvůli neznámým celkovým ztrátám sítě), U_i a θ_i jsou dané, θ_i je často voleno nulové [10]

Jako referenční uzel se často volí PU uzel s největším zdrojem činného výkonu v síti a proto s nejširšími mezemi jalového výkonu a plánovaným řízením frekvence v soustavě. Jako alternativu lze zvolit PQ uzel, který je připojen na nejvyšší napětové hladině nebo propojen se zahraničními přenosovými soustavami. Napětí je poté bráno jako nekonečně tvrdé a tedy konstantní. Z pohledu praxe je referenční uzel uzlem fiktivním, protože se žádný uzel sám nepodílí na krytí celkových výkonových ztrát sítě. [10]

3.1 Uzlová admitanční matice

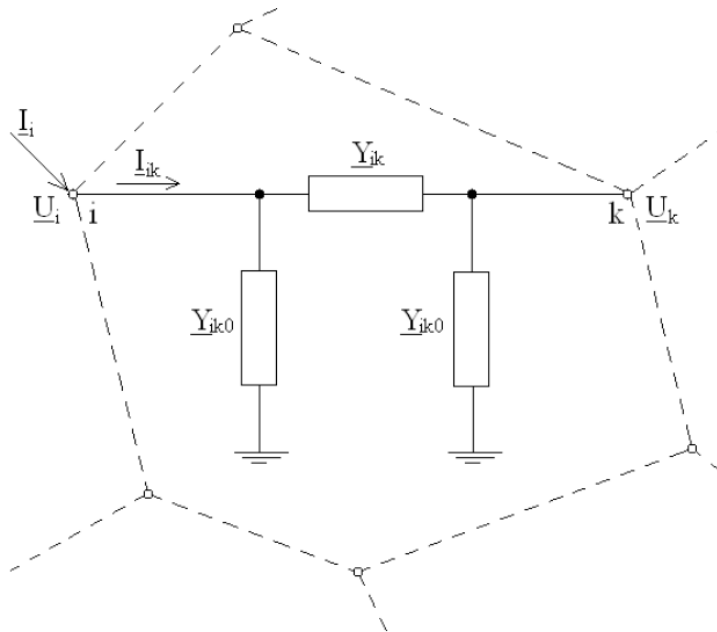
Pro popis napětových a proudových poměrů v každém uzlu sítě se používá následující maticový zápis. [10]

$$\sqrt{3}\underline{I} = \underline{A} \cdot \underline{U} \quad (12)$$

$$\underline{U} = \sqrt{3}\underline{Z} \cdot \underline{I} \quad (13)$$

kde: \underline{I} – sloupcový [m, 1] vektor komplexních injektovaných proudů
 \underline{U} – sloupcový [m, 1] vektor komplexních sdružených uzlových napětí
 \underline{A} – čtvercová [m, m] uzlová admitanční matice
 \underline{Z} – čtvercová [m, m] uzlová impedanční matice
m – celkový počet uzlů sítě [10]

Pro odvození admitanční matice se uvažuje jednoduchá síť tvořená pouze vedením, viz Obr. 20. [10]



Obr. 20 – Síť pro vyjádření uzlové admitanční matice [10]

Každé vedení je modelováno pomocí ekvivalentního Π – článku, jehož podélné a příčné admittance jsou:

$$\underline{Z}_{ik} = R_{ik} + jX_{ik} \quad (14)$$

$$\underline{Y}_{ik} = \frac{1}{\underline{Z}_{ik}} = \frac{1}{R_{ik} + jX_{ik}} = \frac{R_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} - j \frac{X_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} = G_{ik} + jB_{ik} \quad (15)$$

$$\underline{Y}_{ik0} = G_{ik0} + jB_{ik0} \quad (16)$$

Pro celkový injektovaný proud platí:

$$\underline{I}_i = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m \underline{I}_{ik} \quad (17)$$

Pro větвовý proud tekoucí z uzlu i do uzlu k platí:

$$\sqrt{3} \underline{I}_{ik} = \underline{U}_{ik} \underline{Y}_{ik0} + (\underline{U}_i - \underline{U}_k) \underline{Y}_{ik} = \underline{U}_i (\underline{Y}_{ik0} + \underline{Y}_{ik}) - \underline{U}_k \underline{Y}_{ik} \quad (18)$$

Celkový injektovaný proud:

$$\sqrt{3} \underline{I}_i = \underline{U}_i = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (\underline{Y}_{ik0} + \underline{Y}_{ik}) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m \underline{U}_k \underline{Y}_{ik} \quad (19)$$

Z (12) lze získat:

$$\sqrt{3}I_j = \underline{A}_{i1}U_1 + \underline{A}_{i2}U_2 + \dots + \underline{A}_{ij}U_j + \dots + \underline{A}_{ik}U_k + \dots + \underline{A}_{im}U_m \quad (20)$$

Porovnáním (19) s (20) je získán předpis pro prvky uzlové admitanční matice – na hlavní a mimo hlavní diagonálu. [10]

$$\underline{A}_{ii} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (\underline{Y}_{ik0} + \underline{Y}_{ik}) \quad \underline{A}_{ik} = -\underline{Y}_{ik} \quad (21)$$

Uzlovou impedanční matici lze získat inverzní admitanční matice. [10]

$$\underline{Z} = \underline{A}^{-1} \quad (22)$$

Admitanční matice má pro řešení chodu sítě řadu nesporných výhod:

- snadný přepočítání při změnách konfigurace sítě

Odpojení větve i-k:

Připojení větve i-k:

$$\begin{array}{ll} \underline{A}_{i,k-nové} = \underline{A}_{k,i-nové} = 0 & \underline{A}_{i,k-nové} = \underline{A}_{k,i-nové} = -\underline{Y}_{ik} \\ \underline{A}_{i,i-nové} = \underline{A}_{i,i-staré} - \underline{Y}_{ik0} - \underline{Y}_{ik} & \underline{A}_{i,i-nové} = \underline{A}_{i,i-staré} + \underline{Y}_{ik0} + \underline{Y}_{ik} \\ \underline{A}_{k,k-nové} = \underline{A}_{k,k-staré} - \underline{Y}_{ik0} - \underline{Y}_{ik} & \underline{A}_{k,k-nové} = \underline{A}_{k,k-staré} + \underline{Y}_{ik0} + \underline{Y}_{ik} \end{array} \quad (23)$$

- vysoká řídkost, tj. nulové mimodiagonální prvky pro nepropojené uzly
- je symetrická (pokud síť neobsahuje transformátory)
- obsahuje obecná komplexní čísla, je diagonálně dominantní [10]

U impedanční matice naopak převažují nevýhody použití, kvůli kterým se v zásadě upřednostňuje jen pro výpočty poruchových stavů sítě:

- neobsahuje nulové prvky, tj. nemůže být nikdy řídká
- vliv impedance jedné větve na ostatní členy matice
- výpočet pomocí inverzní matice \underline{A} nebo složitými “strojovými” vzorci
- potíže při změnách konfigurace – převod na admitanční matici, provedení změn a zpětný převod na impedanční matici
- není diagonálně dominantní [10]

3.2 Chod sítě jako nelineární problém

Pomocí (11) lze soustavu uzlových rovnic (12) přepsat do nového tvaru:

$$\begin{bmatrix} \frac{P_1 - jQ_1}{\underline{U}_1^*} \\ \vdots \\ \frac{P_i - jQ_i}{\underline{U}_i^*} \\ \vdots \\ \frac{P_m - jQ_m}{\underline{U}_m^*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{11} & \cdots & \underline{A}_{1i} & \cdots & \underline{A}_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{A}_{i1} & \cdots & \underline{A}_{ii} & \cdots & \underline{A}_{im} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{A}_{m1} & \cdots & \underline{A}_{mi} & \cdots & \underline{A}_{mm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \vdots \\ \underline{U}_i \\ \vdots \\ \underline{U}_m \end{bmatrix} \quad (24)$$

Uzlové rovnice v soustavě (24) jsou nelineární, protože jsou uzlová napětí obsažena jak ve vektoru neznámých, tak ve jmenovateli vlevo. Analyticky lze proto řešit jen velmi malé sítě. Pro reálné sítě je nutno zvolit vhodné numerické metody. [10]

Každá numerická metoda vychází z počátečního odhadu řešení, který vstupuje do výpočtu metody. V jednom běhu výpočtu – tzv. iteraci – dojde k nalezení nového odhadu, který by měl být blíže k hledanému řešení. Stará hodnota se nahradí nově vypočtenou hodnotou a iterace se opakuje, dokud nedojde k číselnému ustálení – nalezení hledaného řešení (tzv. konvergence). Pro vyhodnocení konvergence se srovnává rozdíl mezi starou a vypočtenou hodnotou s předem stanovenou, dostatečně malou povolenou odchylkou ε . Pro případy velkých meziiteračních odchylek (případ divergence) je určen také maximální počet iterací p_{max} , po dosažení tohoto maximálního počtu iterací je výpočet ukončen. [10]

3.2.1 Gauss-Seidelova iterační metoda

Tato metoda byla historicky první používaná pro řešení chodu soustavy. Obecně lze její princip v každé nové iteraci (p+1) popsat:

$$x_i^{(p+1)} = f(x_1^{(p+1)}, x_2^{(p+1)}, \dots, x_{i-1}^{(p+1)}, x_i^{(p)}, x_{i+1}^{(p)}, \dots, x_m^{(p)}) \quad (25)$$

Neznámou funkci f z (25) lze pro řešení chodu soustavy určit pomocí rozepsání (24). Pak pro každé uzlové napětí sítě (s výjimkou referenčního uzlu) v nové iteraci platí:

$$\underline{U}_i^{(p+1)} = \frac{1}{\underline{A}_{ii}} \left[\sqrt{3}I_j - \sum_{k=1}^{i-1} \underline{A}_{ik} \underline{U}_k^{(p+1)} - \sum_{k=i+1}^m \underline{A}_{ik} \underline{U}_k^{(p)} \right] \quad (26)$$

Neznámý injektovaný proud je nahrazen pomocí (11):

$$\underline{U}_i^{(p+1)} = \frac{1}{\underline{A}_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{\underline{U}_i^{(p)*}} - \sum_{k=1}^{i-1} \underline{A}_{ik} \underline{U}_k^{(p+1)} - \sum_{k=i+1}^m \underline{A}_{ik} \underline{U}_k^{(p)} \right] \quad (27)$$

Tento přepis je použit v každé iteraci pro všechny PQ uzly soustavy. Pro PU uzly není znám injektovaný jalový výkon, proto musí být spočten v předstihu. Odvodit jej lze tímto způsobem:

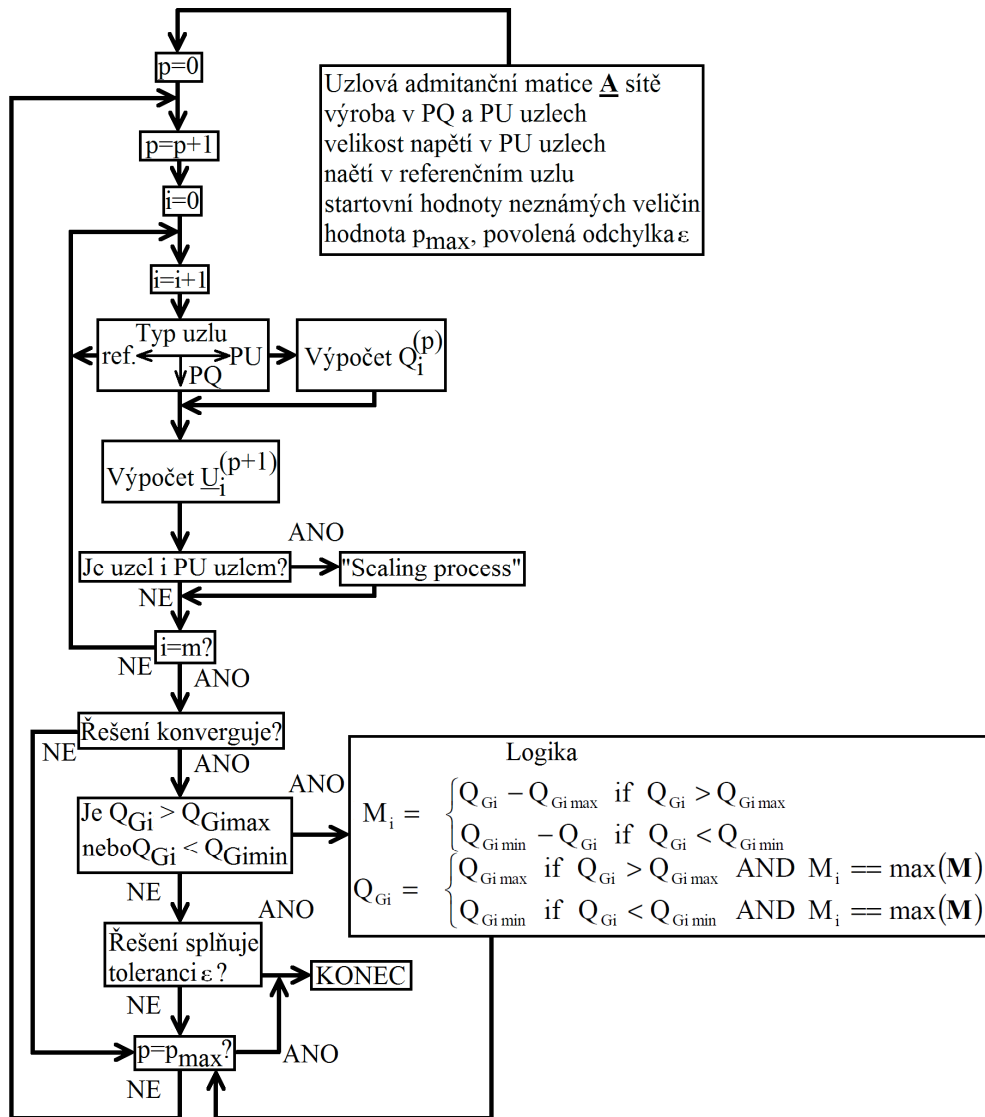
$$\sqrt{3}I_i^{(p)} = \frac{P_i - jQ_i^{(p)}}{\underline{U}_i^{(p)*}} = \sum_{k=1}^{i-1} \underline{A}_{ik} \underline{U}_k^{(p+1)} + \sum_{k=i+1}^m \underline{A}_{ik} \underline{U}_k^{(p)} \quad (28)$$

porovnáním imaginárních částí (28) získáme výsledný jalový výkon, bilanci celkové výroby a spotřeby jalové energie v konkrétním uzlu. [10]

$$Q_i^{(p)} = -Im \left\{ \underline{U}_i^{(p)*} \left(\sum_{k=1}^{i-1} \underline{A}_{ik} \underline{U}_k^{(p+1)} + \sum_{k=i+1}^m \underline{A}_{ik} \underline{U}_k^{(p)} \right) \right\} = Q_{Gi}^{(p)} + Q_{Li} \quad (29)$$

Vypočtené komplexní napětí v PU uzlu bude mít velikost jinou než tu předem zadanou, musí dojít jen k uložení nové hodnoty fázového posunu, tj. vynechání vypočtené velikosti napětí, viz (30). [10]

$$\left[\underline{U}_i^{(p+1)} \right]^{corr} = U_i^{sp} \frac{U_i^{(p+1)}}{U_i} \quad (30)$$



Obr. 21 – Diagram iteračního procesu Gauss-Seidelovy metody [10]

V první iteraci je rovnice (27) použita přímo pro PQ uzly nebo v kombinaci s rovnicemi (29) a (30) pro PU uzly. Celý postup se opakuje, dokud není dosaženo maximálního počtu iterací p_{max} nebo dané přesnosti ε pomocí konvergenčního kritéria, viz (31). [10]

$$\max_i \left\{ \left| \frac{U_i^{(p+1)} - U_i^{(p)}}{U_i^{(p)}} \right|, \left| \theta_i^{(p+1)} - \theta_i^{(p)} \right| \right\} \leq \varepsilon \quad (31)$$

Povolená odchylka ε by měla být volena menší než 10^{-5} p.j. pro zajištění dostatečně přesných výsledků. [10]

Maximální počet iterací p_{max} by měl být volen mezi pěti sty iteracemi pro středně velké nedistribuční sítě do 50 uzlů a 5000 iteracemi pro rozsáhlé soustavy a sítě s velkým poměrem R/X. [10]

Výhody použití Gauss-Seidelovy metody:

- snadný matematický model (bez matic, derivací), jednoduché naprogramování
- pomalé přibližování k hledanému řešení (malé změny v jednotlivých iteracích), tzn. vysoká spolehlivost nalezení výsledku
- nízké výpočtové a časové nároky vztahované na iteraci [10]

Nevýhody použití Gauss-Seidelovy metody:

- velká závislost počtu iterací na velikosti řešené sítě
- má pouze lineární konvergenci (velký počet iterací kvůli nevýrazné diagonální dominanci matice \underline{A})
- delší doba výpočtu (obzvláště pro rozsáhlé sítě)
- problémy u distribučních sítí (velký počet iterací kvůli nízkému poměru R/X)
- problémy u řídicí propojených sítí a špatně podmíněných soustav (divergence) [10]

Kvůli nevýhodám se Gauss-Seidelova metoda v dnešní době prakticky nepoužívá, ale je stále dodávána v komerčních výpočtových aplikacích a svou jednoduchostí je vhodná hlavně pro výukové účely. [10]

3.2.2 Newton-Raphsonova metoda

Se používá již od 70. let 20. století pro on-line řízení, stavovou estimaci, kontingenční analýzy, optimalizace chodu sítě, studie napěťové a přechodové stability, aj. Tato metoda je populární především díky jednoduchému převedení soustavy nelineárních rovnic na lineární, které se dále řeší zaběhnutými principy (maticová inverze, LU faktorizace, apod.). [10]

Pro odvození iteračního algoritmu Newton-Raphsonovy metody začneme u jednorozměrného případu. Cílem je najít kořen x_f nelineární rovnice (32). [10]

$$f(x) = b \quad (32)$$

Tato rovnice může být aproximována použitím Taylorova rozkladu pro linearizaci problému v okolí provozního bodu $x^{(0)}$. Tento bod je vybrán poblíž hledaného řešení, přitom se uvažuje pouze nekonečně malá změna Δx . Tato aproximace je přesná pouze pro $N \rightarrow \infty$. [10]

$$f(x^{(0)} + \Delta x) \approx f(x^{(0)}) + \Delta x \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x^{(0)}} + \frac{\Delta x^2}{2!} \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_{x=x^{(0)}} + \dots + \frac{\Delta x^N}{N!} \left. \frac{d^N f}{dx^N} \right|_{x=x^{(0)}} = b \quad (33)$$

Kvůli zanedbatelné hodnotě Δx se vyšší řady zanedbávají, čímž se získá jednodušší tvar. V některých případech toto zjednodušení může mít negativní vliv na samotnou konvergenci Newton-Raphsonovy metody. [10]

$$f(x^{(0)} + \Delta x) = f(x^{(0)}) + \Delta x \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x^{(0)}} = b \quad (34)$$

Ve vícerozměrném případě je (34) přepsána pomocí parciálních derivací funkce f následovně:

$$f(x_1, \dots, x_m) = f(x_1^{(0)}, \dots, x_m^{(0)}) + \Delta x_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_1^{(0)}} + \dots + \Delta x_m \frac{\partial f}{\partial x_m} \Big|_{x_m=x_m^{(0)}} = b \quad (35)$$

U soustavy m nelineárních rovnic platí pro k-tou rovnici:

$$f_k(x_1, \dots, x_m) + \Delta x_1 \frac{\partial f_k}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_1^{(0)}} + \dots + \Delta x_m \frac{\partial f_k}{\partial x_m} \Big|_{x_m=x_m^{(0)}} = b_k \quad (36)$$

V maticovém tvaru je celá soustava popsána viz (37). Vektor vlevo se jmenuje rozdílový a ukazuje přesnost nalezených výsledků (při konvergenci jeho hodnoty klesající k nule). Čtvercová matice je tzv. Jacobiho matice neboli Jacobián, jehož členy se vypočítají z aktuálních hodnot stavových proměnných. Vektor neznámých Δx se nazývá přírůstkový, protože obsahuje meziiterační přírůstky stavových proměnných x_1, x_2, \dots, x_m . [10]

$$\begin{bmatrix} b_1 - f_1(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_m^{(p)}) \\ b_2 - f_2(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_m^{(p)}) \\ \vdots \\ b_m - f_m(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_m^{(p)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_1^{(p)}} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_2^{(p)}} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_m} \Big|_{x_m=x_m^{(p)}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_1^{(p)}} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_2^{(p)}} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_m} \Big|_{x_m=x_m^{(p)}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_1^{(p)}} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_2^{(p)}} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_m} \Big|_{x_m=x_m^{(p)}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(p+1)} \\ \Delta x_2^{(p+1)} \\ \vdots \\ \Delta x_m^{(p+1)} \end{bmatrix} \quad (37)$$

Stavové proměnné v nové iteraci se naleznou maticovou inverzí soustavy (37) pro menší sítě nebo tzv. LU dekompozicí a přímou/zpětnou substitucí pro rozsáhlejší elektrizační soustavy. LU dekompozice rozkládá původní Jacobiho matice na dolní a horní trojúhelníkovou matici \mathbf{L} resp. \mathbf{U} , pro které platí:

$$\Delta b = J \cdot \Delta x = L \cdot U \cdot \Delta x \rightarrow L \cdot \Delta y = \Delta b \rightarrow U \cdot \Delta x = \Delta y \quad (38)$$

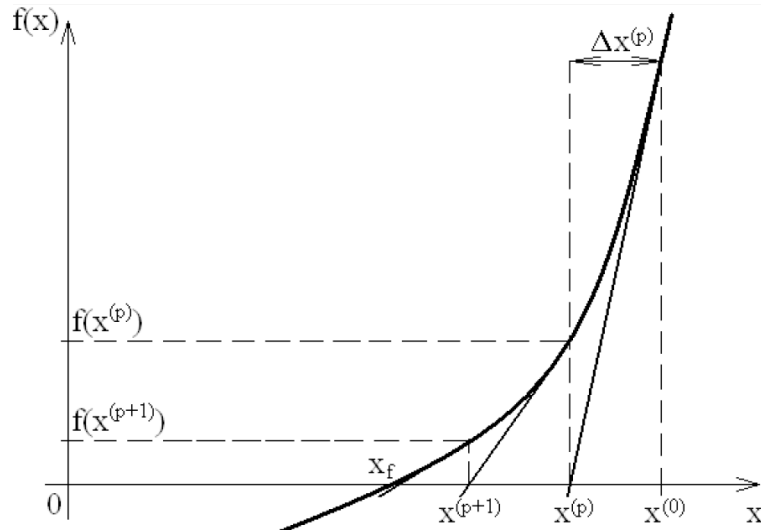
Vypočtenými přírůstků dojde k aktualizaci hodnot stavových proměnných:

$$\begin{bmatrix} x_1^{(p+1)} \\ x_2^{(p+1)} \\ \vdots \\ x_m^{(p+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^{(p)} \\ x_2^{(p)} \\ \vdots \\ x_m^{(p)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(p+1)} \\ \Delta x_2^{(p+1)} \\ \vdots \\ \Delta x_m^{(p+1)} \end{bmatrix} \quad (39)$$

Celý proces se opakuje, dokud není dosaženo konvergence a žádané přesnosti řešení, viz (40) nebo dokud není dosaženo maximálního počtu iterací p_{max} . [10]

$$\max_i \begin{bmatrix} b_1 - f_1(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_m^{(p)}) \\ b_2 - f_2(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_m^{(p)}) \\ \vdots \\ b_m - f_m(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_m^{(p)}) \end{bmatrix} \leq \varepsilon \quad (40)$$

Pro jednorozměrný problém je znázorněna na Obr. 22 grafická reprezentace Newton-Raphsonovy metody. Pro bod $x^{(p)}$ v p-té iteraci je jeho funkční hodnotou vedena tečna k funkci $f(x)$. Průsečík s osou x vyjadřuje nově nalezenou hodnotu $x^{(p+1)}$. Při opakování tohoto postupu dojde k nalezení konečného výsledku. [10]



Obr. 22 – Grafické chování N-R metody (metody tečen) [10]

Pro řešení chodu soustavy lze výkonové rozdíly odvodit v kartézských, nebo v polárních souřadnicích. Např. podle tohoto postupu:

$$\underline{S}_i^* = P_i - jQ_i = \sqrt{3}I_j U_i^* = \left(\sum_{k=1}^m \underline{A}_{ik} U_k \right) U_i^* \quad (41)$$

Potom platí:

$$\begin{aligned} P_i - jQ_i &= \sum_{k=1}^m [(G_{ik} + jB_{ik})U_k(\cos\theta_k + jsin\theta_k)U_i(\cos\theta_i - jsin\theta_i)] \\ &= \sum_{k=1}^m [U_i U_k (G_{ik} + jB_{ik})(\cos\theta_{ik} - jsin\theta_{ik})] \end{aligned} \quad (42)$$

$$\text{kde: } Re\{\underline{A}_{ii}\} = G_{ii} \quad Re\{\underline{A}_{ik}\} = G_{ik} \quad Im\{\underline{A}_{ii}\} = B_{ii} \quad Im\{\underline{A}_{ik}\} = B_{ik}$$

Porovnáním reálných a imaginárních částí získáme vztahy pro rozdílové výkony. Platí: $\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$. [10]

$$\begin{aligned} P_i &= U_i \sum_{k=1}^m U_k (G_{ik} \cos\theta_{ik} + B_{ik} \sin\theta_{ik}) & \Delta P_i &= P_i - U_i \sum_{k=1}^m U_k (G_{ik} \cos\theta_{ik} + B_{ik} \sin\theta_{ik}) \\ Q_i &= U_i \sum_{k=1}^m U_k (G_{ik} \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cos\theta_{ik}) & \Delta Q_i &= Q_i - U_i \sum_{k=1}^m U_k (G_{ik} \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cos\theta_{ik}) \end{aligned} \quad (43)$$

Pokud nabývají rozdílové rovnice (43) velmi malých hodnot (teoreticky nulových), hledané řešení již bylo dosaženo se zadanou přesností. Obě rovnice musí být použity pro PQ uzel, pro PU uzly se počítá jen první rovnice (Q_i je neznámé), pro referenční uzel žádná z výše popsaných rovnic. [10]

Analogicky z (37) plyne konečný maticový zápis pro řešení chodu soustavy, viz (44). Jacobián je potom složený ze čtyř submatic \mathbf{H} , \mathbf{N} , \mathbf{J} a \mathbf{L} , které jsou definovány příslušnou parciální derivací. [10]

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}^{(p)} \\ \Delta \mathbf{Q}^{(p)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}^{(p)} & \mathbf{N}^{(p)} \\ \mathbf{J}^{(p)} & \mathbf{L}^{(p)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}^{(p+1)} \\ \frac{\Delta \mathbf{U}^{(p+1)}}{\mathbf{U}^{(p)}} \end{bmatrix} \quad (44)$$

kde:

$$H_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} \quad N_{ik} = U_k = \frac{\partial P_i}{\partial U_k} \quad J_{ik} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} \quad L_{ik} = U_k \frac{\partial Q_i}{\partial U_k} \quad (45)$$

Nahrazení přírůstků ΔU_i významem $\Delta U_i/U_i$ zjednodušuje výpočet prvků Jacobiho matice a zároveň tento krok nemá vliv na samotný numerický výpočet. [10]

Vlastnosti Jacobiho matice:

- je symetrická ve struktuře, ale ne hodnotou, tj. prvek H_{ik} nemusí být výhradně na pozici ik Jacobiánu
- je velmi řídká (nulové prvky jsou obsaženy v každé ze submatic \mathbf{H} , \mathbf{N} , \mathbf{J} , \mathbf{L})
- je silně diagonálně dominantní, to vede k velmi rychlé numerické konvergenci [10]

Pro vyřešení soustavy (44) se přírůstky $\Delta \boldsymbol{\theta}$ a $\Delta \mathbf{U}/\mathbf{U}$ použijí na aktualizaci stanovených podmínek:

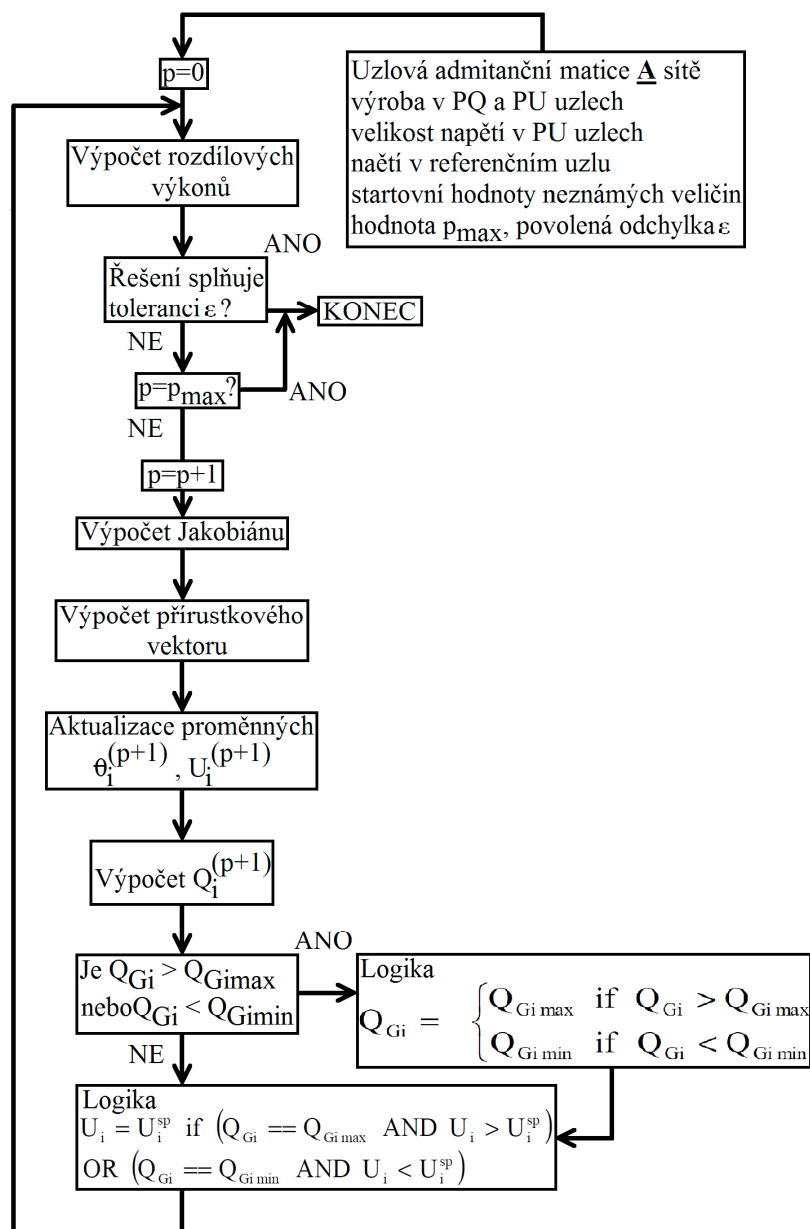
$$\theta_i^{(p+1)} = \theta_i^{(p)} + \Delta \theta_i^{(p+1)} \quad U_i^{(p+1)} = U_i^{(p)} + \frac{\Delta U_i^{(p+1)}}{U_i^{(p)}} U_i^{(p)} \quad (46)$$

Pro každý uzel PU jsou hodnoty Q_i a Q_{Gi} neznámé, proto je potřeba je v každé iteraci vypočítat. [10]

$$Q_i^{(p+1)} = U_i^{(p+1)} \sum_{k=1}^m U_k^{(p+1)} \left(G_{ik} \sin \theta_{ik}^{(p+1)} - B_{ik} \cos \theta_{ik}^{(p+1)} \right) = Q_{Gi}^{(p+1)} + Q_{Li} \quad (47)$$

Nově vypočítaný rozdílový vektor se použije v konvergenčním kritériu, viz (48) – pro kontrolu přesnosti nalezených výsledků (porovnáním s povolenou tolerancí ε). [10]

$$\max_i \left| \frac{\Delta \mathbf{P}}{\Delta \mathbf{Q}} \right| \leq \varepsilon \quad (48)$$



Obr. 23 – Diagram iteračního procesu Newton-Raphsonovy metody [10]

Pro toleranci ϵ postačí hodnota 10^{-4} . Jako maximální počet iterací p_{max} je volena hodnota 20. [10]

Výpočet Jacobiánu s jeho inverzí je časově nejnáročnější částí Newton-Raphsonovy metody. Proto se volí počítání inverzi nové Jacobiho matice jen v prvních dvou iteracích, kde dochází k nejvýznamnějším změnám proměnných. Alternativou je aktualizovat Jacobiho matici jen jednou za 2-3 iterace. K nalezení výsledku je potřeba více iterací, ale doba výpočtu je zdatelně kratší. [10]

Výhody Newton-Raphsonovy metody:

- kvadratická rychlost konvergence, tj. rychlý postup k hledanému výsledku
- počet iterací není závislý na velikosti sítě (z dosažení výsledku stačí obvykle 3-7 iterací)
- časové nároky jsou nízké (také pro velké sítě), zvyšují se pouze lineárně
- možnost využití parciálních derivací Jacobiánu (hlavně submatice \mathbf{L}) pro citlivostní analýzu soustavy [10]

Nevýhody Newton-Raphsonovy metody jsou:

- komplikovanější matematický model (matice, derivace, řídkostní algoritmy)
- počet iterací je ovlivněn zahrnutím jalových mezí pro PU uzly a regulačních transformátorů
- silná závislost na počátečním odhadu stanovených veličin (divergence, pomalá konvergence)
- vysoké požadavky na paměť (4-5 krát větší než u Gauss-Seidelovy metody), jde řešit řídkostními algoritmy
- problémy při řešení řídice propojených a špatně podmíněných sítí [10]

Newton-Raphsonova metoda se i přesto nevýhody v současné době intenzivně používá pro nadřazené výpočty, zejména velkých soustav. [10]

4 POPIS PROVOZNÍHO ZAPOJENÍ PRŮMYSLOVÉ SÍTĚ

4.1 Popis průmyslové sítě

Konkrétní průmyslová síť je projektována pro Australský hlubinný důl na těžbu černého uhlí. Průmyslová síť hlubinného dolu je napájena z nadřazené soustavy na hladině napětí 66 kV.

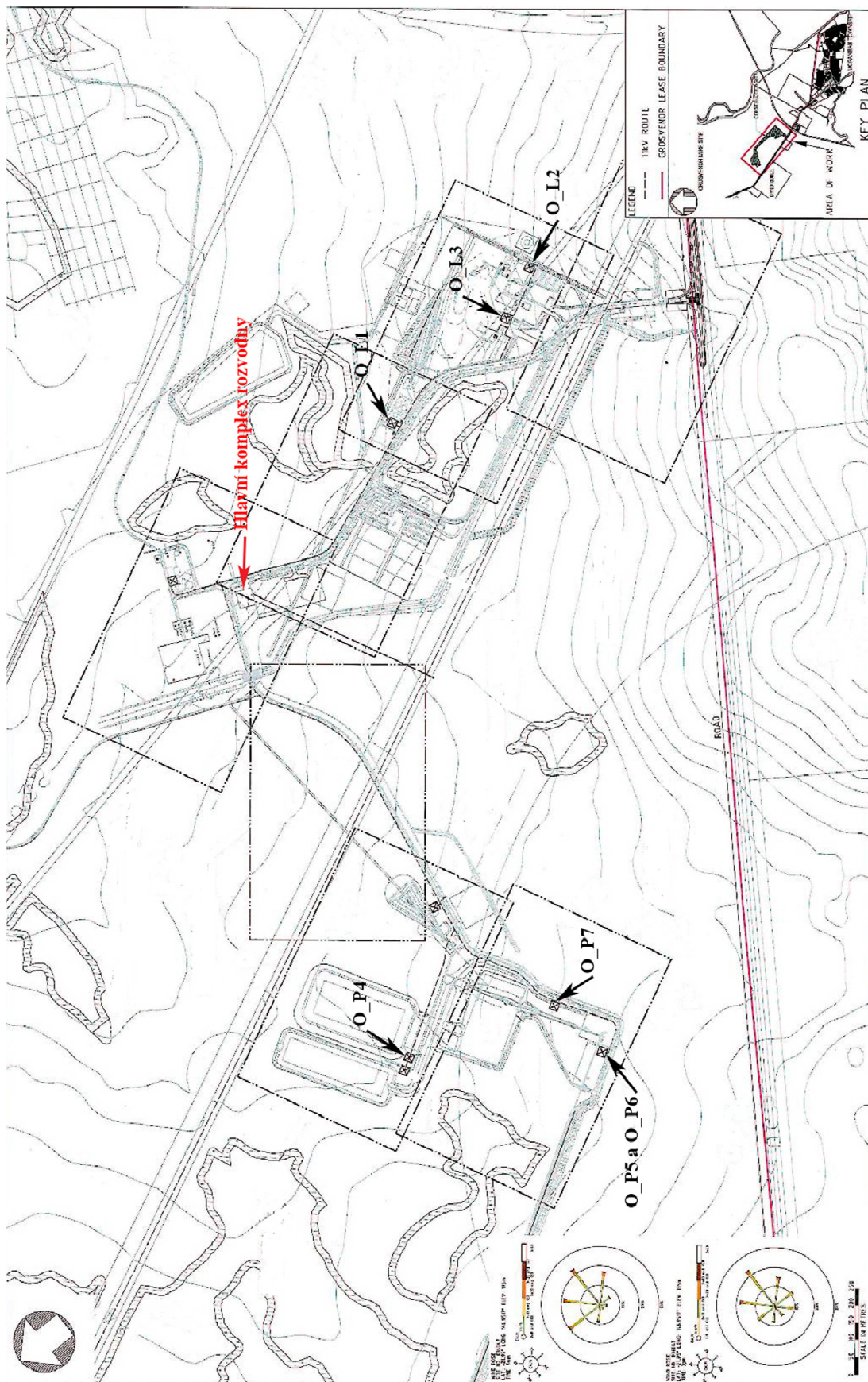
Celý areál dolu se skládá ze sedmi hlavních zón, toto rozložení je zobrazeno na Obr. 24, je zde zobrazen i hlavní komplex rozvodny a některá důležitá odběrová místa (O_L1, O_L2, O_L3, O_P4, O_P5, O_P6 a O_P7).

Hlavní komplex rozvodny

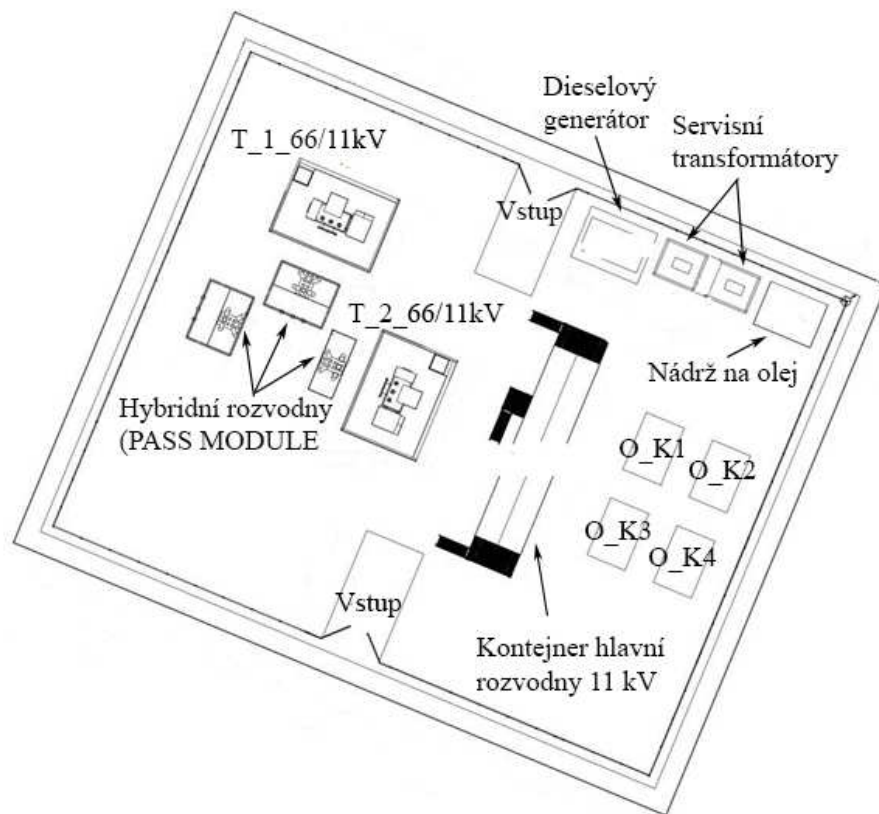
Hlavní komplex rozvodny viz Obr. 25 je rozdělen na část se jmenovitým napětím 66 kV a 11 kV.

Napětí z nadřazené soustavy o hladině napětí 66 kV je přivedeno do hybridních rozvodů (PASS MODULE) tyto hybridní moduly jsou tři, jeden je umístěn na přívodu z nadřazené soustavy, další dva jsou umístěny na vývodech hlavních výkonových transformátorů. V hybridních rozvodnách jsou umístěny měřicí transformátory proudu a napětí, výkonové vypínače, bleskojistky atd. hlavní komplex rozvodny obsahuje tři hybridní rozvodny. Dále pokračuje kabelové vedení z hybridních rozvodů do dvou hlavních výkonových transformátorů T_1_66/11kV a T_2_66/11kV. Tyto transformátory jsou identické o zdánlivém výkonu 30 MVA při režimu ONAN, jde o transformátor s olejovým chlazením v uzavřené nádobě, která je ochlazována pouze okolním vzduchem. Hlavní transformátory mohou pracovat také v režimu ONAF při zdánlivém výkonu 40 MVA, jde o transformátor s olejovým chlazením v uzavřené nádobě, která je ochlazována proudem vzduchu vytvořeným ventilátory. Oba hlavní transformátory využívají regulace napětí na sekundární straně za pomoci automatického přepínání odboček na primární straně vinutí transformátoru při zatížení, tato funkce je popsána v kapitole 5.2.6. Z transformátorů je vedena elektrická energie šestinásobným kabelovým vedením do hlavní rozvodny o napětí 11 kV, tato rozvodna je dělena na dvě přípojnice P1_11kV a P2_11kV oddělené podélným spínačem. Hlavní rozvodna 11 kV je zapouzdřená v kontejneru, provedení hlavní rozvodny 11 kV je (UNIGEAR ZS1). Na hlavní rozvodnu 11 kV jsou napojeny čtyři identické kompenzátory O_K1 (2, 3, 4) každý o jalovém výkonu 4000 kVAr. Dále pak dieselový generátor pro stav nouze při výpadku elektrické energie. Tento generátor je při řešení ustálených chodů sítě odpojen, protože nejsou známy nouzové odběry, podle kterých musí být tento generátor dimenzován.

Z hlavní rozvodny 11 kV je poté elektrická energie vedena kabelovým vedením na podružné rozvodny 11 kV. Tyto rozvodny jsou také jako hlavní rozvodna 11 kV v zapouzdřeném provedení (UNIGEAR ZS1). Podružné rozvodny se nacházejí v místech důležitých odběrů. Podružné rozvodny 11 kV jsou spojeny kabelovým vedením s transformátory jednotlivých odběrů, velké odběry jsou situovány v blízkosti podružných rozvodů 11 kV z důvodu snižování ztrát výkonů v dlouhých kabelových vedeních. Odběry jsou pro usnadnění koncentrovány maximálně do dvou prvků, pro netočivý a motorický odběr. Tyto prvky představují veškeré odběry na jednotlivých podružných rozvodnách.



Obr. 24 - Sedm ohraničených zón hlubinného dolu



Obr. 25 - Hlavní komplex rozvodny

4.1.1 Popis vytvořené průmyslové sítě v Bizon projektant

V Příloze 1 je zobrazena celá simulovaná topologie průmyslové sítě vytvořené v programu Bizon Projektant.

Popisky:

Transformátory: Dva hlavní výkonové jsou T_1_66/11kV a T_2_66/11kV.

Distribuční transformátory pro transformaci napětí u odběrných míst jsou např. T11/04kV_O_L1 a T11/04kV_O_L2.

Primární a sekundární napětí je značeno v popisu každého transformátoru: popis T_1_66/11kV značí, že primární napětí je 66 kV a sekundární je 11 kV, resp. u značení T11/04kV_O_L1 je primární napětí 11 kV a sekundární 0,4 kV po zaokrouhlení. Konec popisu O_L1 naznačuje, ke kterému odběru náleží příslušný transformátor, v tomto případě jde tedy o odběr O_L1.

Uzly (přípojnice): Hlavní přípojnice jsou popsány např. P1_66kV a P1_11kV. Přípojnice u odběrů jsou poté např. P_O_L1 a P_O_L2. Konec popisu přípojnic u odběrů tedy O_L1 značí, že jde o přípojnicu u odběrného místa O_L1.

Kabelové vedení: Kabelová vedení mezi přípojnicemi jsou např. V_1_1(P1_66kV_1) a V_1_1(P1_66kV_2). Kabelová vedení mezi přípojnicí a transformátorem jsou např. V1/1_O_S1 a V2/1_O_S1. Kabelová vedení mezi transformátorem a příslušným odběrem jsou

např. V1/2_O_S1 a V2/2_O_S1. Konec popisu kabelového vedení O_L1 značí, že jde o vedení k místu odběru O_L1.






Odběry (injekce): Například odběry O_L1 a O_L2 jsou netočivé odběry. Motorové odběry jsou např. poté O_L1M a O_S2M.

Popis O_K1 (2, 3, 4) značí kompenzátory.

Podélné spínače přípojnic: Popis S_1 pro podélný spínač mezi přípojnici P1_11kV a P2_11kV. Popis S_2 pro podélný spínač mezi přípojnici P3_11kV a P4_11kV.

Barevné značení

Značení napěťové hladiny:

- černé barvení  udává napěťovou hladinu 66 kV
- modré barvení  udává napěťovou hladinu 11 kV
- temně žluté značení  značí napěťovou hladinu 1 kV
- červené značení  udává napěťovou hladinu 0,7 kV
- zelené značení  označuje napěťovou hladinu 0,4 kV

Ostatní: K prvkům barveným do světle šedé barvy není přivedeno napětí.

Visačky:

Transformátory:

30.00 MVA
-1
69

30,00 MVA – instalovaný zdánlivý výkon transformátoru [MVA]
-1 – aktuální zvolená odbočka transformátoru
69 – aktuální proudové zatížení transformátoru [%]

Uzly (přípojnice):

11.00 kV
10.78 kV
98 %

11.00 kV – jmenovité napětí přípojnice (uzlu) [kV]
10.78 kV – aktuální napětí přípojnice (uzlu) [kV]
98 % - procentuální hodnota aktuálního napětí přípojnice (uzlu) [%]

Vedení:

46
-19039.361 kW
-7340.957 kVAr

46 – aktuální proudové zatížení vedení [%]
-19039.361 kW – přenášený činný výkon vedením [kW]
-7340.957 kVAr – přenášený jalový výkon vedením [kVAr]

Odběry (injekce):

Netočivý odběr

337.0 kW

337.0 kW – odebíraný činný výkon odběru [kW]

Motor

21.00 kW

26.00 kW – odebíraný činný výkon motoru [kW]

Kompenzátory

11.00	kV
10.78	kV
98	%

11.00 kV – jmenovité napětí kondenzátoru [kV]

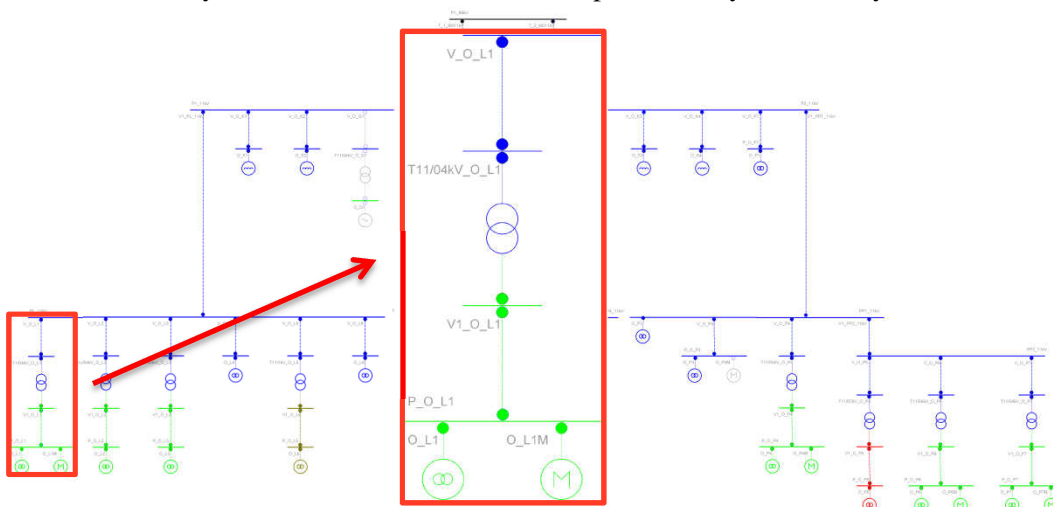
10.78 kV – aktuální napětí kondenzátoru [kV]

98 % - procentuální hodnota aktuálního napětí kondenzátoru [kV]

4.2 Popis některých důležitých odběrových míst

O_L1

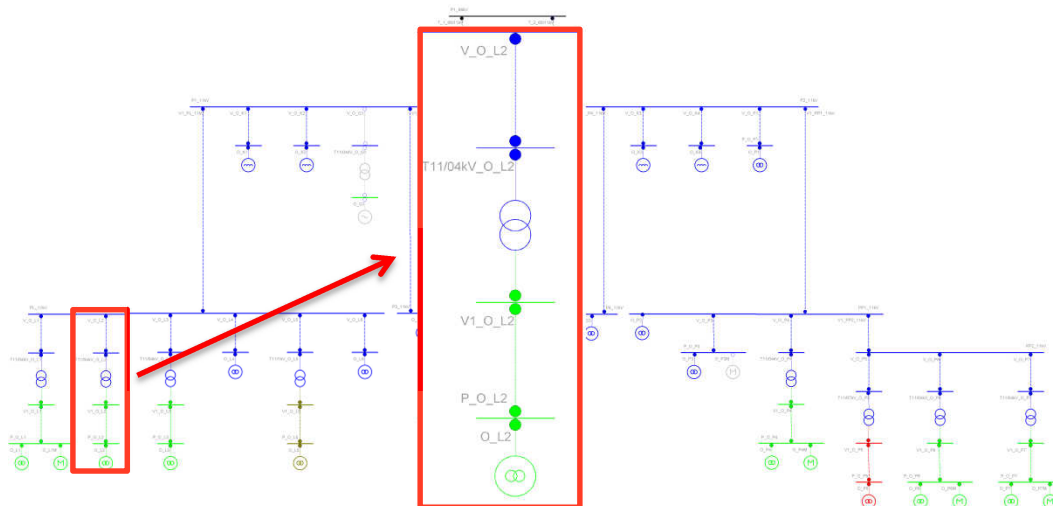
Na Obr. 26 je zobrazeno odběrové místo, které slouží v areálu hlubinného dolu jako napájení pro úpravnu vody. Areál úpravně vody nemá velký odběr výkonů, je vzdálený od podružné rozvodny 11 kV 590 metrů. Je zde zastoupen netočivý i motorický odběr.



Obr. 26 – Odběrové místo O_L1

O_L2

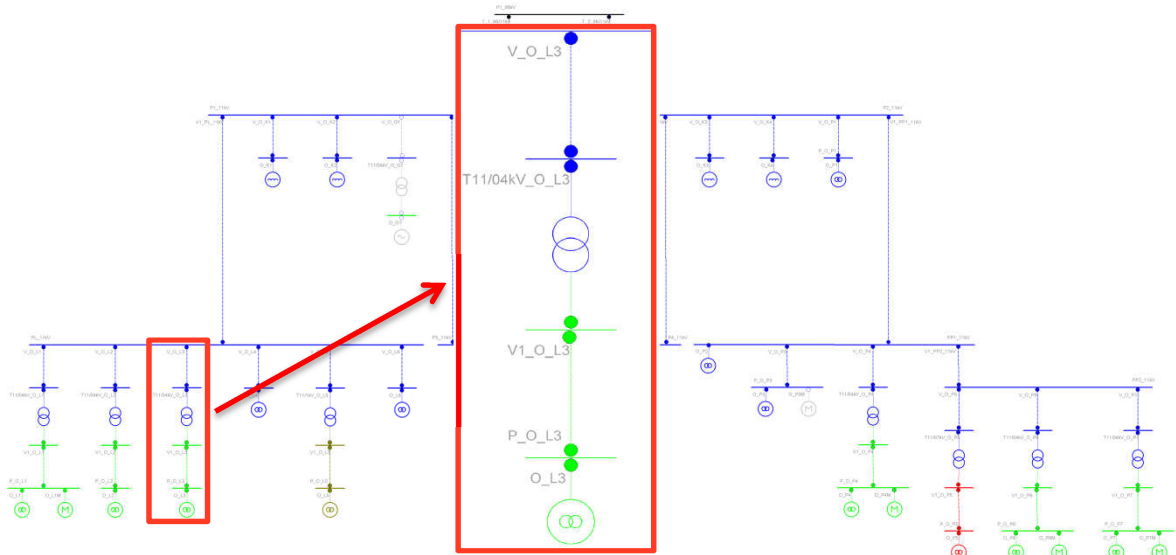
Na Obr. 27 je zobrazeno odběrové místo, které slouží v areálu hlubinného dolu jako napájení pro administrativní výstavbu. Stejně jako u předešlého odběru se nejedná o velký odběr, u administrativních budov jsou zastoupeny jen netočivé odběry.



Obr. 27 – Odběrové místo O_L2

O_L3

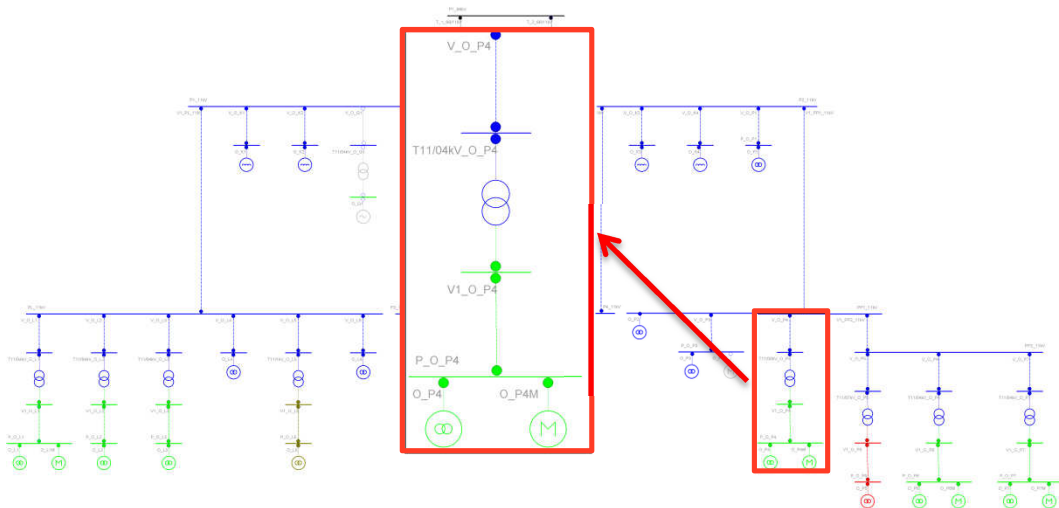
Na Obr. 28 je zobrazeno odběrové místo, které slouží v areálu hlubinného dolu jako napájení pro místní dílny. Areál dílen odebírá z průmyslové sítě velké výkony, jedná se přibližně 0,6 MW, proto je tento odběr situován do místa podružné rozvodny 11 kV. Areál dílen obsahuje simulaci jen netočivých odběrů, motorické odběry jsou v dílnách řízeny frekvenčními měniči, proto jsou zahrnuty motorické odběry do odběrů netočivých.



Obr. 28 – Odběrové místo O_L3

O_P4

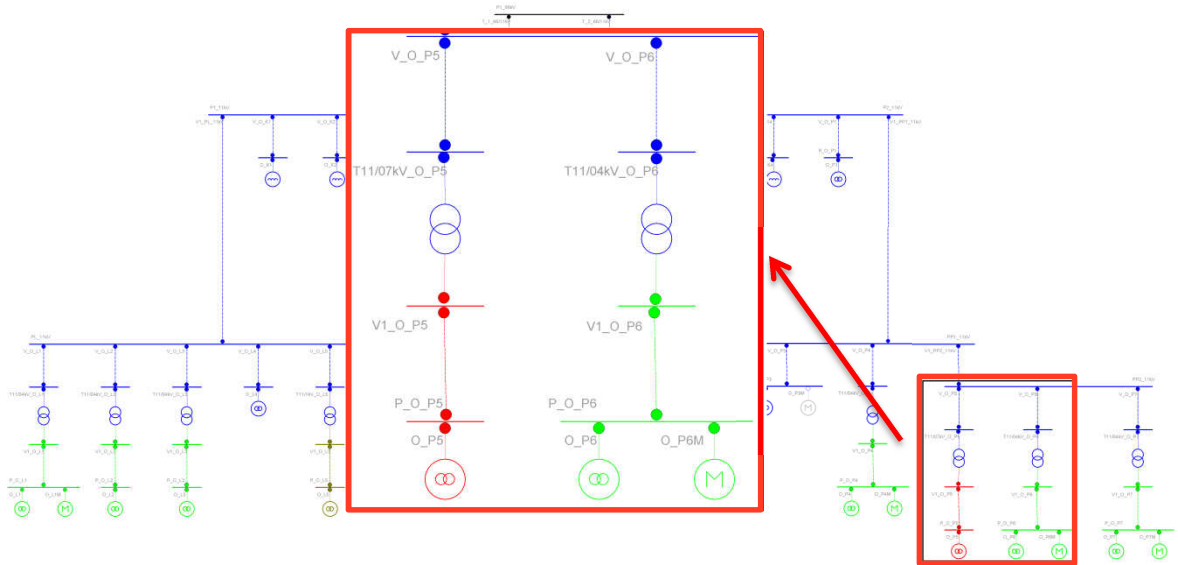
Na Obr. 29 je zobrazeno odběrové místo, které slouží v areálu hlubinného dolu jako napájení pro místní přehradu a obsluhu vodní přehrady.



Obr. 29 – Odběrné místo O_P4

O_P5 a O_P6

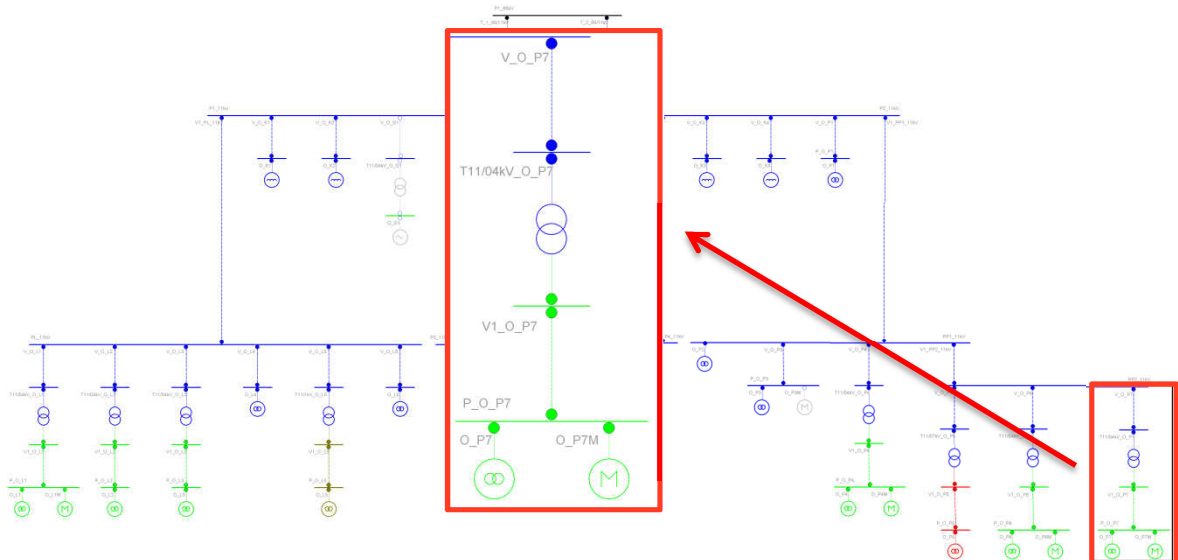
Na Obr. 30 jsou zobrazena napájecí místa O_P5 a O_P6. Odběrové místo O_P5 je využito pro napájení dopravního pásu, který dopravuje vytěžené černé uhlí z hlubinného dolu k místu drcení. Odběrové místo O_P6 napájí drtičku vytěženého uhlí. Obě odběrová místa jsou v těsné blízkosti u sebe.



Obr. 30 – Odběrné místo O_P5 a O_P6

O_P7

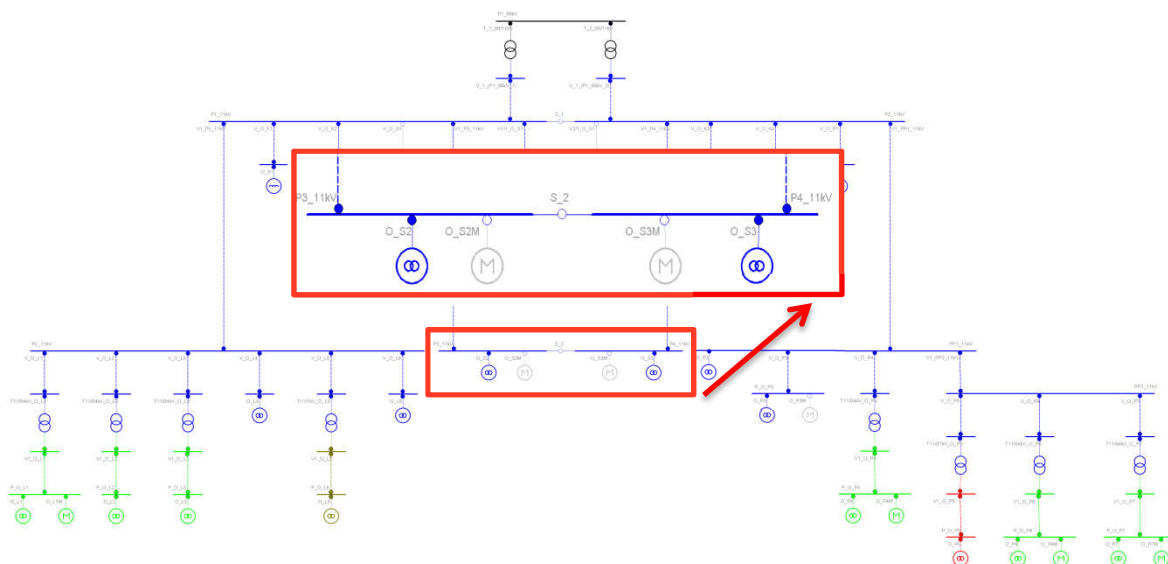
Na Obr. 31 je zobrazeno odběrové místo, které slouží v areálu hlubinného dolu jako napájení pro obsluhu dopravního pásu (O_P5) a drtičky černého uhlí (O_P6).



Obr. 31 – Odběrné místo O_P7

Odběry podružných rozvodů P3_11kV a P4_11kV

Na Obr. 32 jsou zobrazeny odběry, které představují veškeré odběry v podzemí. Jsou to například stroje na těžbu černého uhlí, hlavní ventilátory apod. Výkony jednotlivých odběrů nejsou známy, proto jsou nahrazeny zjednodušeným odběrem, který obsahuje netočivý a motorický odběr na každé rozvodně.



Obr. 32 – Odběry podružných rozvodů P3_11kV a P4_11kV

5 VÝPOČET USTÁLENÉHO STAVU PRŮMYSLOVÉ SÍTĚ

Pro výpočet ustáleného stavu zadané průmyslové sítě jsem použil výpočetní program Bizon projektant verze 4.42 build 398 společnosti Daisy s.r.o. Tento program s plnou licencí mi byl po dobu vytváření diplomové práce zapůjčen katedrou elektroenergetiky.

Při výpočtu ustálených stavů budou sledovány:

- činné a jalové ztráty hlavních výkonových transformátorů a vedení
- zatížení hlavních výkonových transformátorů a vedení
- kolísání napětí uzlů (přípojnic)
- účinník průmyslového rozvodu

Výpočty ustáleného stavu průmyslové sítě jsou provedeny pro čtyři různé poměry v průmyslové síti:

- Normální provozní stav v průmyslové síti
- Stav v průmyslové síti po odpojení všech kompenzátorů
- Stav v průmyslové síti po odpojení jednoho ze dvou hlavních transformátorů
- Stav v průmyslové síti po odpojení jednoho ze dvou hlavních transformátorů a všech kompenzátorů.

Výše uvedené poměry jsou blíže popsány v následujících kapitolách, při výpočtu ustálených stavů při těchto poměrech průmyslové sítě.

Pro všechny poruchové stavy jsou řešeny a vypočteny hodnoty, kdy nebylo použito automatické regulace napětí přepínáním odboček hlavních transformátorů při zatížením.

Výpočty ustálených stavů průmyslové sítě spočtené programem Bizon projektant budou porovnávány s výpočty prováděných v programu DIgSILENT PowerFactory. Výpočty v programu DIgSILENT PowerFactory prováděl projektový inženýr Ing. Břetislav Stacho Ph.D.

5.1 Popis tvorby průmyslové sítě v programu Bizon projektant

Základní model průmyslové sítě se skládá z uzlů (přípojnic) a větví (vedení, transformátorů, injekcí, spínačů apod.).

Při tvorbě průmyslové sítě v Bizon projektant je tedy nejprve nutné vytvořit příslušné uzly (přípojnice), poté může následovat tvorba prvků sítě mezi těmito přípojnicemi. Jedná se o transformátory, kabelová vedení, podélné spínače přípojnic a injekce. Podle druhu potřebné injekce v určitém místě můžeme za injekce zařadit odběry, generátory, motory a kompenzátory. Po vytvoření celé topologie průmyslové sítě je nutné zadat vstupní data ke každému prvku.

5.1.1 Popis prvků sítě a vkládání vstupních dat

Transformátory:

V průmyslové síti jsou využity jen dvouviňťové transformátory. Vinutí transformátorů je zapojeno trojúhelník/uzemněná hvězda. Jediný transformátor T11/07kV_O_P5 má vinutí zapojené trojúhelník/hvězda, jedná se o speciálně vyrobený transformátor pro frekvenční měnič.

Hlavní transformátory T_1_66/11kV a T_2_66/11kV mají automatickou regulaci napětí pomocí přepínání odboček při zatížení, tyto dva transformátory pracují při pasivním chlazení s instalovaným výkonem 30 MVA, při aktivním chlazení pomocí zabudovaných ventilátorů s instalovaným výkonem 40 MVA.

Zadávané parametry pro hlavní transformátory:

- *S-inst*: instalovaný výkon transformátoru [MVA]
- *Ujm-pri*: jmenovité napětí primárního vynutí [kV]
- *Ujm-sek*: jmenovité napětí sekundárního vinutí [kV]
- *I-max-pri*: maximální proud primárního vinutí [A]
- *I-max-sek*: maximální proud sekundárního vinutí [A]
- *Pcu*: ztráty ve vinutí [kW]
- *Pfe*: ztráty v transformátorových pleších [kW]
- *Ek*: napětí nakrátko [%]
- Regulace (P/S): výběr regulace odbočkami na primární, nebo sekundární straně
- Převod na odb.: převod napětí na jednu odbočku
- Odbočka: aktuální zvolená odbočka
- Odbočka min.: maximální snížení odboček
- Odbočka max.: maximální zvýšení odboček

Zadávané parametry pro ostatní transformátory:

- *S-inst*: instalovaný výkon transformátoru [MVA]
- *Ujm-pri*: jmenovité napětí primárního vynutí [kV]
- *Ujm-sek*: jmenovité napětí sekundárního vinutí [kV]
- *I-max-pri*: maximální proud primárního vinutí [A]
- *I-max-sek*: maximální proud sekundárního vinutí [A]
- *Pcu*: ztráty ve vinutí [kW]
- *Pfe*: ztráty v transformátorových pleších [kW]
- *Ek*: napětí nakrátko [%]

Uzly (přípojnice):

Při modelování sítě je nutné zadat nejméně jeden napájecí uzel, který definuje parametry nadřazené soustavy. Uzel P1_66kV je jediný napájecí, zbylé uzly sítě jsou uzly odběrovými.

Zadávané parametry pro napájecí uzel (přípojnicí):

- *Ujmen*: jmenovité napětí uzlu [kV]
- *Ezad*: poměr mezi skutečným napětím uzlu a napětím jmenovitým, v mém případě 1
- *Qmin*: minimální jalový výkon, který je napájecí uzel schopen dodat do sítě [kVAr]
- *Qmax*: maximální jalový výkon, který je napájecí uzel schopen dodat do sítě [kVAr]

Zadávané parametry pro odběrové uzly (přípojnice):

- *Ujmen*: jmenovité napětí uzlu [kV]

Vedení:

Vedení spojují jednotlivé uzly (přípojnice) a injekce v modelované síti. Pro celou síť jsou zvolena jen kabelová vedení, která jsou uložena v zemi. V průmyslové síti se vyskytují kabelová vedení s různou násobností.

Zadávané parametry pro vedení:

- *R*: rezistence úseku vedení [Ω]
- *X*: reaktance úseku vedení [Ω]
- *B*: kapacitance úseku vedení [Ω]
- *I_{max}*: celkový maximální proud úseku vedení [A]
- *délka*: délka úseku vedení [m]
- *průřez*: průřez vodiče vedení [mm^2]
- násobnost: násobnost vedení
- Typ zapojení prim.: způsob spojení primárního vinutí
- Typ zapojení sek.: způsob spojení sekundárního vinutí

Odběry (injekce):

Odběry (injekce) představují netočivé odběry, motory, generátory a kompenzační kondenzátorové baterie.

Kde není známá topologie a jednotlivé prvky sítě, je tento úsek sítě nahrazen odběrem připojeným přímo na hladinu 11 kV. Viz odběry O_S1, O_S2 a další na Obr. 32.

Zadávané parametry pro netočivé odběry:

- *P_{o-in}*: odebíraný činný výkon [kW]
- *Q_{o-in}*: odebíraný jalový výkon [kVAr]

Zadávané parametry pro kompenzátory:

- *Q_{komp}*: kompenzační výkon [kVAr]

Zadávané parametry pro motory:

- *P_p*: jmenovitý příkon motoru [kW]
- *P_{zat}*: aktuální zatížení motoru [kW]
- *Cos ϕ* : účinník motoru
- *I_{zab}*: záběrový proud motoru [A]

5.2 Výpočet ustáleného stavu průmyslové sítě v programu Bizon projektant

5.2.1 Normální provozní stav v průmyslové síti

Tento provozní stav je počítán při chodu obou hlavních transformátorů při instalovaném výkonu 30 MVA ONAN a nastavení odbočky 1 na transformátorech. Podélný spínač přípojnic je rozepnut. Kompensátory jsou připojeny. Jde o stav při normálním provozu.

Schéma sítě viz Příloha 2. Níže budou vypsána jen nejdůležitější data pro vyhodnocení, veškeré hodnoty jsou uvedeny v Příloze 3.

Tabulka 1 - Přehled celkových ztrát vedení

Ztráty	
Činné [kW]	Jalové [kVAr]
175,215	131,5

Tabulka 2 – Přehled ztrát hlavních výkonových transformátorů

Transformátor	Ztráty	
	Činné [kW]	Jalové [kVAr]
T_1_66/11kV	86,08	1420,41
T_2_66/11kV	72,54	1159,05

Tabulka 3 – Zatížení hlavních výkonových transformátorů

Transformátor	Zatížení [%]
T_1_66/11kV	66
T_2_66/11kV	60

Tabulka 4 – Kabelová vedení s největším zatížením

Jméno	Průřez [mm ²]	Délka [m]	Zatížení [%]	Činné ztráty [kW]
V_O_P3	240	350	90	5,5401
V1_PL_11kV	95	1350	89	57,0918
V1_P3_11kV	300	470	84	29,1815
V_O_K3	240	30	80	0,2645
V_O_K4	240	30	80	0,2645

Tabulka 5 – Změna napětí přípojnic

Jméno	Jmenovité napětí [kV]	Měřené napětí [kV]	Změna napětí [%]
P_O_P5	0,69	0,7174	104
P1_66kV	66	66	100
P2_11kV	11	10,9994	100
-	-	-	-
P_O_P4	0,415	0,3966	96
P_O_L5	1	0,9521	95
P_O_S1	0,415	0,3933	95

Tabulka 6 – Účinnost hlavních výkonových transformátorů

Transformátor	Účinnost [-]
T_1_66/11kV	0,969
T_2_66/11kV	0,985

5.2.2 Stav průmyslové sítě po odpojení všech kompenzátorů

Tento provozní stav je počítán při chodu obou hlavních výkonových transformátorů při instalovaném výkonu 30 MVA ONAN a nastavení odbočky 3 na transformátorech. Podélný spínač přípojníc je rozepnut. Kompenzátory jsou odpojeny. Na tomto stavu ověřujeme vliv kompenzátorů na účinnost průmyslové sítě.

Schéma sítě viz Příloha 4. Níže budou vypsána jen nejdůležitější data pro vyhodnocení, veškeré hodnoty jsou uvedeny v Příloze 5.

Tabulka 7 – Přehled celkových ztrát vedení

Ztráty	
Činné [kW]	Jalové [kVAr]
175,648	129,5

Tabulka 8 – Přehled ztrát hlavních výkonových transformátorů

Transformátor	Ztráty	
	Činné [kW]	Jalové [kVAr]
T_1_66/11kV	108,37	1845,32
T_2_66/11kV	90,48	1500,42

Tabulka 9 – Zatížení hlavních výkonových transformátorů

Transformátor	Zatížení [%]
T_1_66/11kV	76
T_2_66/11kV	68

Tabulka 10 – Kabelová vedení s největším zatížením

Jméno	Průřez [mm ²]	Délka [m]	Zatížení [%]	Činné ztráty [kW]
V_O_P3	240	350	90	5,5401
V1_PL_11kV	95	1350	89	57,0918
V1_P3_11kV	300	470	84	29,1815
V_O_K3	240	30	80	0,2645
V_O_K4	240	30	80	0,2645

Tabulka 11 – Změna napětí přípojníc

Jméno	Jmenovité napětí [kV]	Měřené napětí [kV]	Změna napětí [%]
P_O_P5	0,69	0,7158	104
P1_66kV	66	66	100
P_O_L1	0,415	0,4107	100
-	-	-	-
P_O_P4	0,415	0,3957	96
P_O_L5	1	0,9501	95
P_O_S1	0,415	0,3925	95

Tabulka 12 – Účinnost hlavních výkonových transformátorů

Transformátor	Účinnost [-]
T_1_66/11kV	0,827
T_2_66/11kV	0,842

Vypočtené hodnoty, kdy nebylo použito automatické regulace napětí přepínáním odboček hlavních transformátorů při zatížení, odbočka je nastavena na 1

Tabulka 13 – Přehled celkových ztrát vedení

Ztráty	
Činné [kW]	Jalové [kVAr]
171,954	122,9

Tabulka 14 – Přehled ztrát hlavních výkonových transformátorů

Transformátor	Ztráty	
	Činné [kW]	Jalové [kVAr]
T_1_66/11kV	105,23	1797,38
T_2_66/11kV	88,09	1466,69

Tabulka 15 – Zatížení hlavních výkonových transformátorů

Transformátor	Zatížení [%]
T_1_66/11kV	75
T_2_66/11kV	68

Tabulka 16 – Kabelová vedení s největším zatížením

Jméno	Průřez [mm ²]	Délka [m]	Zatížení [%]	Činné ztráty [kW]
V_O_P3	240	350	89	5,3851
V1_PL_11kV	95	1350	88	55,4898
V1_P3_11kV	300	470	83	28,3639
V_O_L6	300	440	72	5,7454
V1_PP1_11kV	240	1050	71	20,1971

Tabulka 17 – Změna napětí přípojnic

Jméno	Jmenovité napětí [kV]	Měřené napětí [kV]	Změna napětí [%]
P_O_P5	0,69	0,6972	101
P1_66kV	66	66	100
P_O_P7	0,415	0,4023	98
-	-	-	-
P_O_P4	0,415	0,3853	94
P_O_S1	0,415	0,3821	93
P_O_L5	1	0,9249	92

Tabulka 18 – Účinnost hlavních výkonových transformátorů

Transformátor	Účinnost [-]
T_1_66/11kV	0,827
T_2_66/11kV	0,842

5.2.3 Stav průmyslové sítě po odpojení jednoho z hlavních transformátorů

Tento provozní stav je počítán při chodu jednoho hlavního výkonového transformátoru při instalovaném výkonu 40 MVA ONAF a nastavení odbočky 3 na transformátoru. Podélný spínač přípojníc je sepnut. Kompenzátory jsou připojeny. Jde o krátkodobý stav, v řádu dní. Tímto stavem se simuluje údržba, nebo porucha na jednom z transformátorů.

Schéma sítě viz Příloha 6. Níže budou vypsána jen nejdůležitější data pro vyhodnocení, veškeré hodnoty jsou uvedeny v Příloze 7.

Tabulka 19 – Přehled celkových ztrát vedení

Ztráty	
Činné [kW]	Jalové [kVAr]
184,046	131,1

Tabulka 20 – Přehled ztrát hlavních výkonových transformátorů

Transformátor	Ztráty	
	Činné [kW]	Jalové [kVAr]
T_1_66/11kV	165,56	3929,79

Tabulka 21 – Zatížení hlavních výkonových transformátorů

Transformátor	Zatížení [%]
T_1_66/11kV	96

Tabulka 22 – Kabelová vedení s největším zatížením

Jméno	Průřez [mm ²]	Délka [m]	Zatížení [%]	Činné ztráty [kW]
V_O_P3	240	350	91	5,6233
V1_PL_11kV	95	1350	90	58,3126
V1_P3_11kV	300	470	85	29,8044
V_1_(P1_66kV_1)	500	30	84	12,0563
V_O_K1	240	30	81	0,2725

Tabulka 23 – Změna napětí přípojníc

Jméno	Jmenovité napětí [kV]	Měřené napětí [kV]	Změna napětí [%]
P_O_P5	0,69	0,7282	106
P_O_L1	0,415	0,4205	102
P_O_L2	0,415	0,4191	102
-	-	-	-
P_O_P4	0,415	0,4026	98
P_O_S1	0,415	0,4019	98
P_O_L5	1	0,9728	97

Tabulka 24 – Účinník hlavního výkonového transformátoru

Transformátor	Účinník [-]
T_1_66/11kV	0,971

Vypočtené hodnoty, kdy nebylo použito automatické regulace napětí přepínáním odboček hlavních transformátorů při zatížení, odbočka je nastavena na 1

Tabulka 25 – Přehled celkových ztrát vedení

Ztráty	
Činné [kW]	Jalové [kVAr]
180,057	124,3

Tabulka 26 – Přehled ztrát hlavních výkonových transformátorů

Transformátor	Ztráty	
	Činné [kW]	Jalové [kVAr]
T_1_66/11kV	161,46	3841,46

Tabulka 27 – Zatížení hlavních výkonových transformátorů

Transformátor	Zatížení [%]
T_1_66/11kV	94

Tabulka 28 – Kabelová vedení s největším zatížením

Jméno	Průřez [mm ²]	Délka [m]	Zatížení [%]	Činné ztráty [kW]
V1_PL_11kV	95	1350	89	56,7786
V_O_P3	240	350	89	5,4753
V1_P3_11kV	300	470	84	29,0216
V_1_(P1_66kV_1)	500	30	83	11,7853
V_O_K1	240	30	79	0,2584

Tabulka 29 – Změna napětí přípojnic

Jméno	Jmenovité napětí [kV]	Měřené napětí [kV]	Změna napětí [%]
P_O_P5	0,69	0,7089	103
P1_66kV	66	66	100
P_O_L1	0,415	0,4092	99
-	-	-	-
P_O_L5	1	0,9468	95
P_O_P4	0,415	0,3919	95
P_O_S1	0,415	0,3912	95

Tabulka 30 – Účinnost hlavního výkonového transformátoru

Transformátor	Účinnost [-]
T_1_66/11kV	0,969

5.2.4 Stav průmyslové sítě po odpojení všech kompenzátorů a jednoho z hlavních transformátorů

Tento provozní stav je počítán při chodu jednoho hlavního transformátoru při instalovaném výkonu 40 MVA ONAF a nastavení odbočky 6 na transformátoru. Podélný spínač přípojnic je sepnut. Kompenzátory nejsou připojeny.

Schéma sítě viz Příloha 8. Níže budou vypsána jen nejdůležitější data pro vyhodnocení, veškeré hodnoty jsou uvedeny v Příloze 9.

Tabulka 31 – Přehled celkových ztrát vedení

Ztráty	
Činné [kW]	Jalové [kVAr]
186,404	129,3

Tabulka 32 – Přehled ztrát hlavních výkonových transformátorů

Transformátor	Ztráty	
	Činné [kW]	Jalové [kVAr]
T_1_66/11kV	211,99	5113,7

Tabulka 33 – Zatížení hlavních výkonových transformátorů

Transformátor	Zatížení [%]
T_1_66/11kV	109

Tabulka 34 – Kabelová vedení s největším zatížením

Jméno	Průřez [mm ²]	Délka [m]	Zatížení [%]	Činné ztráty [kW]
V_1_(P1_66kV_1)	500	30	96	15,69
V_O_P3	240	350	91	5,6159
V1_PL_11kV	95	1350	90	58,2353
V1_P3_11kV	300	470	85	29,765
V_O_L6	300	440	74	6,0303

Tabulka 35 – Změna napětí přípojníc

Jméno	Jmenovité napětí [kV]	Měřené napětí [kV]	Změna napětí [%]
P_O_P5	0,69	0,7272	106
P_O_L1	0,415	0,4199	102
P_O_L2	0,415	0,4186	102
-	-	-	-
P_O_P4	0,415	0,4021	98
P_O_L5	1	0,9715	97
P_O_S1	0,415	0,4013	97

Tabulka 36 – Účinník hlavního výkonového transformátoru

Transformátor	Účinník [-]
T_1_66/11kV	0,817

Vypočtené hodnoty, kdy nebylo použito automatické regulace napětí přepínáním odboček hlavních transformátorů při zatížení, odbočka je nastavena na 1

Tabulka 37 – Přehled celkových ztrát vedení

Ztráty	
Činné [kW]	Jalové [kVAr]
176,43	112,9

Tabulka 38 – Přehled ztrát hlavních výkonových transformátorů

Transformátor	Ztráty	
	Činné [kW]	Jalové [kVAr]
T_1_66/11kV	198,07	4798,95

Tabulka 39 – Zatížení hlavních výkonových transformátorů

Transformátor	Zatížení [%]
T_1_66/11kV	106

Tabulka 40 – Kabelová vedení s největším zatížením

Jméno	Průřez [mm ²]	Délka [m]	Zatížení [%]	Činné ztráty [kW]
V_1_(P1_66kV_1)	500	30	93	14,7243
V1_PL_11kV	95	1350	87	54,4124
V_O_P3	240	350	87	5,2471
V1_P3_11kV	300	470	82	27,814
V_O_L6	300	440	72	5,6335

Tabulka 41 – Změna napětí přípojnic

Jméno	Jmenovité napětí [kV]	Měřené napětí [kV]	Změna napětí [%]
P1_66kV	66	66	100
P_O_P5	0,69	0,6792	99
P_O_L1	0,415	0,3919	95
-	-	-	-
P_O_L5	1	0,9066	91
P_O_P4	0,415	0,3753	91
P_O_S1	0,415	0,3746	91

Tabulka 42 – Účinník hlavního výkonového transformátoru

Transformátor	Účinník [-]
T_1_66/11kV	0,817

5.2.5 Vyhodnocení simulovaných stavů

5.2.5.1 Zhodnocení funkce automatické regulace odboček

Z nasimulovaných hodnot lze pozorovat znatelný rozdíl napětí na přípojnicích např. u přípojnice P_O_S1 došlo o pokles napětí o 6% při nevyužití automatické regulace odboček. Tento stav byl simulován po odpojení všech kompenzátorů a chodu průmyslové sítě jen na jeden hlavní výkonový transformátor. Všechny hodnoty se vešly do tolerance pro elektrické rozvody v Austrálii, která je $U_n \pm 10\%$. U přípojnice P_O_S1 je hodnota měřeného napětí $U_n - 9\%$, což je limitní hodnota. Ze simulace je zřejmá úspěšnost využití automatické regulace odboček na výkonových transformátorech.

5.2.5.2 Zhodnocení výpočtu ustálených stavů průmyslové sítě

Vysvětlivky pro následující tabulky:

1. Normální provozní stav v průmyslové síti
2. Stav v průmyslové síti po odpojení všech kompenzátorů
3. Stav v průmyslové síti po odpojení jednoho ze dvou hlavních transformátorů
4. Stav v průmyslové síti po odpojení jednoho ze dvou hlavních transformátorů a všech kompenzátorů.

Tabulka 43 – Zhodnocení zatížení transformátorů

Transformátor	Zatížení [%]			
	1.	2.	3.	4.
T_1_66/11kV	66	76	96	109
T_2_66/11kV	60	68	-	-

Tabulka 44 – Zhodnocení zatížení kabelů vedených z hlavních transformátorů na hlavní přípojnice

Kabelové vedení	Zatížení [%]			
	1.	2.	3.	4.
V_1_(P1_66kV_1)	44	50	84	96
V_1_(P1_66kV_2)	40	45	-	-

Tabulka 45 – Zhodnocení změny účinníku hlavních výkonových transformátorů

Transformátor	Účinník [-]			
	1.	2.	3.	4.
T_1_66/11kV	0,969	0,827	0,971	0,817
T_2_66/11kV	0,985	0,842	-	-

Při této simulaci byly definovány maximální hodnoty všech odběrů, které lze očekávat v průběhu provozu.

Zhodnocení napětí

Napětí na všech napěťových hladinách 66 kV; 11 kV; 1 kV; 0,69 kV a 0,415 kV se vešlo do tolerance stanovené pro elektrické sítě v Austrálii, tato tolerance je $U_n \pm 10\%$. Při normálním provozu a provozu kdy jsou odpojeny všechny kompenzátory, bylo veškeré napětí v toleranci +4, -5 %. Při zbývajících dvou stavech bylo napětí v toleranci +6, -3 % U_n . Vyhodnocovaná napětí se sledovala jen na přípojnicích.

Zhodnocení zatížení

Při normálním provozu se zatížení obou hlavních výkonových transformátorů pohybuje do 70%, což je ideální zatížení transformátorů, kdy dochází k nejlepším nákladům. Vyšší zatěžování transformátorů už není ideální, protože dochází rychle ke zvyšování jalových ztrát transformátoru, viz kapitola 5.2.7. Při stavu kdy jsou odpojeny kompenzátory a jeden hlavní výkonový transformátor, se zvýší zatížení transformátoru T_1_66/11kV na 109 %, což je neúnosné. Při takovém zatížení by mohlo dojít ke zkrácení životnosti tohoto transformátoru. Tento „kritický“ stav průmyslové sítě je velice málo pravděpodobný.

Při normálním stavu dosáhlo zatížení kabelových vedení nejvýše 90 %, toto zatížení vzniká na kabelovém vedení které vede k odběrům O_P3 a O_P3M, tyto odběry nyní neodpovídají přesně skutečným odběrům, při finální konfiguraci sítě mohou být jiné. Maximální zatížení kabelového vedení vzniklo při simulování nejhoršího možného stavu průmyslové sítě (odpojené kompenzátory,

chod jednoho hlavního transformátoru). Tento případ je nejhorší simulovaný, ale i tak hodnota zatížení nepřekročila 94 %. Kabelové vedení, které bylo takto zatíženo, je vedení od transformátoru T_1_66/11kV k hlavní rozvodně 11 kV.

Účinník

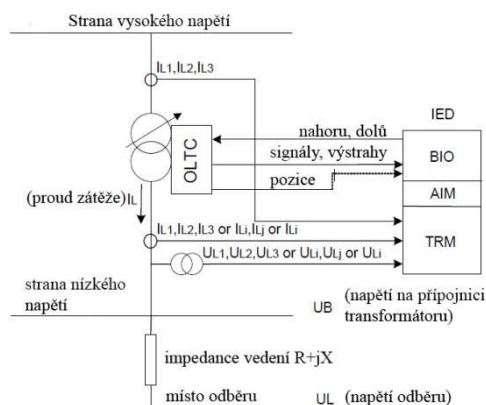
Sledování hodnoty účinníku je při projektování průmyslových sítí důležitým prvkem výpočtů a simulací. Pokud by účinník nevyhovoval již při projektování, nebylo by svoleno k připojení průmyslové sítě k distribuční soustavě. Účinník nesmí být menší jako 0,95.

Za stavu pokud jsou připojeny kompenzátory účinník vyhovuje, je větší jako 0,95. Na simulování stavech, kdy nejsou kompenzátory připojeny je vidět, jak je kompenzace účinníku pro průmyslovou síť důležitá. Po odpojení kompenzátorů spadne účinník pod 0,85. Při provozu průmyslové sítě je tento stav nemyslitelný, průmyslový podnik by dostal velké pokuty za nedodržení stanovené hodnoty.

5.2.6 Automatická regulace napětí přepínáním odboček pomocí RET650

Pokud je potřeba zvýšit napětí v síti, které se snižuje vlivem zvyšujícího se zatížení, můžeme zachovat požadované napětí přepínáním odboček transformátorů. Přepínání odboček transformátoru zmenší počet závitů na primárním vinutí, to má za následek zvýšení napětí na sekundárním vinutí transformátoru. Každý krok obvykle představuje změnu napětí 1,25 %. Automatická regulace napětí RET650 pomocí přepínání odboček pod zatížením je určena pro řízení výkonových transformátorů. Tato funkce reguluje napětí na sekundární straně transformátoru. Způsob řízení je založen na „step-by-step“ principu, což znamená, že řídicí impuls je přiveden do akčního členu jeden po druhém, to vyvolá změnu o jednu pozici nahoru nebo dolů. Délka řídicího pulzu lze nastavit v širokém rozsahu, který lze přizpůsobit různým typům měnicích mechanismů. Řídicí puls pro změnu odbočky je vytvořen vždy, když se naměřená hodnota napětí na primární straně transformátoru odlišuje od nastavené referenční hodnoty o více než přednastavené pásmo necitlivosti. [11]

Automatická regulace napětí může být provedena jak pro jeden transformátor, tak pro paralelní řazení transformátorů. [11]



Obr. 33 – Funkční schéma regulace napětí transformátoru [11]

Řídicí jednotku RET650 je nutné před použitím nastavit na požadované hodnoty, podle těchto hodnot se poté regulace RET650 bude chovat při řízení. Na Obr. 34 jsou hodnoty, které je potřeba nastavit pro správnou funkci regulace.

Automatic Voltage regulation			
RET650	Unit	Setting	Description
Group settings			
Operation	-	On	Operation Off / On
MeasMode	-	L1	Selection of measured voltage and current
Uset	%UB2	100	Voltage control set voltage
Udeadband	%UB2	1.25	Outer Voltage Deadband
UdeadbandInner	%UB2	0.9	Inner Voltage Deadband
FSDMode	-	On	Fast step down function activation mode
tFSD	s	10	Time delay for lower command when fast step down mode is activ
Umax	%UB2	105	Upper limit of busbar voltage
Umin	%UB2	80	Lower limit of busbar voltage
Ublock	%UB2	80	Undervoltage block level
t1Use	-	Constant	Activation of long inverse time delay
t1	s	60	Time delay (long) for automatic control comands
t2Use	-	Constant	Activation of short inverse time delay
t2	s	30	Time delay (short) for automatic control comands

Obr. 34 – Nastavované hodnoty regulace RET650 [11]

Popis nastavovaných hodnot:

- Operation: řízení (zapnuto/vypnuto)
- MeasMode: výběr bodu měření napětí a proudu (L1, L2, L3, L1L2, L2L3, L3L1)
- USet: nastavení ovládacího napětí v % jm. napětí (85-120; krok 0,1)
- Udeadband: nastavení vnějšího pásma necitlivosti v % jm. napětí (0,2-9; krok 0,1)
- UdeadbandInner: nastavení vnitřního pásma necitlivosti v % jm. napětí (0,1-9; krok 0,1)
- FSDMode: nastavení funkce rychlého snížení odbočky (Off, Auto, AutoMan)
- tFSD: čas prodloužení funkce FSDMode v s (1-100; krom 0,1)
- Umax: horní mez napětí pro přípojnicí v % jm. napětí (80-180; krok 1)
- Umin: dolní mez napětí pro přípojnicí v % jm. napětí (70-120; krok 1)
- Ublock: měřené podpětí oproti nastavené hodnotě v % jm. napětí (50-120; krok 1)
- t1Use: aktivace dlouhodobého časového zpoždění (konstantní/časově závislá)
- t1: časové zpoždění pro první krok změny odbočky v s (3-1000; krok 1)
- t2Use: aktivace krátkodobého časového zpoždění (konstantní/časově závislá)
- t2: časové zpoždění pro následující kroky změny odbočky v s (1-1000; krok 1) [12]

V Příloze 10 je zobrazena vnitřní logika automatické regulace RET650. V prvku TR8ATCC probíhá nastavení parametrů regulace, tento prvek je spojen s prvkem TCMYLTC. Prvek TCMYLTC dává signál akčním členům, pokud se má odbočka přepnout vzhůru nebo dolů.

5.2.7 Vysvětlení velkých jalových ztrát při simulování

Celkový odebíraný jalový výkon transformátoru je tvořen z jalového výkonu při chodu naprázdno Q_0 , který je asi 1-3,5% jmenovitého zdánlivého výkonu transformátoru a z proměnného jalového výkonu pro pokrytí rozptylového magnetického toku. Proměnný jalový výkon pro pokrytí rozptylového magnetického toku se zvyšuje se čtvercem zatížení transformátoru.

$$Q = Q_0 + u_K \cdot \left(\frac{I}{I_N}\right)^2 \cdot S_N \quad [\text{VAr}] \quad (49)$$

kde: Q_0 – jalový výkon při chodu naprázdno [VAr]
 u_K – napětí nakrátko transformátoru [-]
 S_N – jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru [VA]
 I – proud tekoucí vinutím transformátoru [A]
 I_N – jmenovitý proud transformátoru [A]

$\frac{I}{I_N}$ - je účinnost transformátoru

Hodnota účinníku při chodu transformátoru naprázdno je velmi malá 0,1 – 0,2 tj. čistě jalové zatížení. Proto se vyžaduje kompenzace jalového proudu naprázdno transformátorů středo- a velkoodběratelů s měřením jalové energie na sekundární straně transformátoru. Při průměrném zatížení 70% se celkový jalový výkon transformátoru pohybuje 4-6% jmenovitého výkonu transformátoru. [13]

Příklad výpočtu

Ověření přesnosti výpočtu programu Bizon projektant. Příklad bude ověřovat stav, kdy jsou odpojeny všechny kompenzátory a jeden hlavní transformátor. Při výpočtu Bizon projektantem vyšly jalové ztráty $Q = 5113,7 \text{ kVAr}$.

$S_N = 40 \text{ MVA}$, $Q_0 = 1\% \text{ z } S_N$, $u_K = 10\%$, $\text{zatížení} = 109\%$

$$Q = Q_0 + u_K \cdot \left(\frac{I}{I_N}\right)^2 \cdot S_N = 0,01 \cdot 40 \cdot 10^6 + \frac{10}{100} \cdot \left(\frac{109}{100}\right)^2 \cdot 40 \cdot 10^6 =$$
$$Q = 5152 \text{ kVAr}$$

Je zde určitá nepřesnost, která může být způsobena nepřesně zvoleným Q_0 , zaokrouhlením.

5.3 Porovnání vypočtených hodnot v programu Bizon projektant a DIgSILENT PowerFactory

Cílem porovnání budou hodnoty získaných při výpočtu ustálených stavů:

- přenášený výkon primárním vinutím transformátorů T_1_66/11kV a T_2_66/11kV
- činné a jalové ztráty vzniklé v transformátorech T_1_66/11kV a T_2_66/11kV
- zatížení transformátorů T_1_66/11kV a T_2_66/11kV
- kolísání napětí uzlů (přípojnic)
- změna účinnku odebíraného výkonu z nadřazené soustavy

Pro porovnání celkových ztrát a zatížení jsou vybrána jen data pro transformátory T_1_66/11kV a T_2_66/11kV, právě u těchto hlavních transformátorů lze pozorovat nejvyšší změna vypočtených hodnot.

Výpočty ustáleného stavu průmyslové sítě jsou provedeny pro čtyři různé poměry v průmyslové síti:

- Normální provozní stav v průmyslové síti
- Stav v průmyslové síti po odpojení všech kompenzátorů
- Stav v průmyslové síti po odpojení jednoho ze dvou hlavních transformátorů
- Stav v průmyslové síti po odpojení jednoho ze dvou hlavních transformátorů a všech kompenzátorů.

Pro všechny poruchové stavy jsou zobrazeny pouze hodnoty, kdy bylo použito automatické regulace napětí přepínáním odboček hlavních transformátorů při zatížením.

Výše uvedené poměry byly popsány v předchozích kapitolách.

Výpočty v programu DIgSILENT PowerFactory prováděl projektový inženýr Ing. Břetislav Stacho Ph.D.

5.3.1 Normální provozní stav v průmyslové síti

Tento provozní stav je počítán při chodu obou hlavních výkonových transformátorů při instalovaném výkonu 30 MVA a nastavení odbočky 1 na transformátorech. Podélný spínač přípojnic je rozepnut. Kompenzátory jsou připojeny.

Schéma sítě viz Příloha 2.

Tabulka 46 – Porovnávání přenášených výkonů primárním vinutím

Jméno	Bizon projektant		DIgSILENT PowerFactory		Změna oproti Bizon projektant [%]	
	Činný [kW]	Jalový [kVAr]	Činný [kW]	Jalový [kVAr]	Činný	Jalový
T_1_66/11kV	19538,25	4940,67	19530	5696,25	-0,42	15,29
T_2_66/11kV	17983,48	3193,91	18840	5495	4,76	72,05

Tabulka 47 – Porovnání ztrát v transformátorech

Jméno	Bizon projektant		DIgSILENT PowerFactory		Změna oproti Bizon projektant [%]	
	Činné [kW]	Jalové [kVAr]	Činné [kW]	Jalové [kVAr]	Činný	Jalový
T_1_66/11kV	86,08	1420,41	50	1740,67	-41,91	22,55
T_2_66/11kV	72,54	1159,05	60	1681,56	-17,29	45,08

Tabulka 48 – Změna zatížení transformátorů

Jméno	Bizon projektant	DlgSILENT PowerFactory	Změna oproti Bizon projektant [%]
	Zatížení transformátoru [%]		
T_1_66/11kV	66	68	2
T_2_66/11kV	60	65	5

Tabulka 49 – Porovnávání napětí uzlů (přípojnic)

Jméno	Jmenovité napětí [kV]	Bizon projektant		DlgSILENT PowerFactory		Změna	
		E uzlu [kV]	U relativní [%]	E uzlu [kV]	U relativní [%]	E uzlu [kV]	U relativní [%]
P1_11kV	11	10,931	99	10,97	100	0,039	1
P1_66kV	66	66	100	66	100	0	0
P2_11kV	11	10,9994	100	10,98	100	0,0194	0
P3_11kV	11	10,8934	99	10,94	99	0,0466	0
P4_11kV	11	10,9789	99	10,95	100	0,0289	1
PL_11kV	11	10,8306	98	10,85	99	0,0194	1
PP1_11kV	11	10,9502	99	10,92	99	0,0302	0
PP2_11kV	11	10,9237	99	10,88	99	0,0437	0
P_O_L1	0,415	0,4115	100	0,42	100	0,0085	0
P_O_L2	0,415	0,4102	100	0,41	100	0,0002	0
P_O_L3	0,415	0,4105	100	0,42	100	0,0095	0
P_O_L5	1	0,9521	95	0,95	95	0,0021	0
P_O_P1	11	10,9994	100	10,97	100	0,0294	0
P_O_P3	11	10,93	99	10,89	99	0,04	0
P_O_P4	0,415	0,3966	96	0,4	96	0,0034	0
P_O_P5	0,69	0,7174	104	0,71	103	0,0074	1
P_O_P6	0,415	0,4031	98	0,41	98	0,0069	0
P_O_P7	0,415	0,4141	100	0,42	100	0,0059	0
P_O_S1	0,415	0,3933	95	0,4	96	0,0067	1

5.3.2 Stav průmyslové sítě po odpojení všech kompenzátorů

Tento provozní stav je počítán při chodu obou hlavních transformátorů při instalovaném výkonu 30 MVA a nastavení odbočky 3 na transformátorech. Podélný spínač přípojnic je rozepnut. Kompenzátory jsou odpojeny.

Schéma sítě viz Příloha 4.

Tabulka 50 – Porovnávání přenášených výkonů primárním vinutím

Jméno	Bizon projektant		DlgSILENT PowerFactory		Změna oproti Bizon projektant [%]	
	Přenášený výkon na prim.				Činný	Jalový
Činný [kW]	Jalový [kVAr]	Činný [kW]	Jalový [kVAr]			
T_1_66/11kV	19499,83	13232,48	19710	13757,66	1,08	3,97
T_2_66/11kV	17948,82	11504,77	19000	13755,76	5,86	19,57

Tabulka 51 – Porovnání ztrát v transformátorech

Jméno	Bizon projektant		DlG SILENT PowerFactory		Změna oproti Bizon projektant [%]	
	Činné [kW]	Jalové [kVAr]	Činné [kW]	Jalové [kVAr]	Činný	Jalový
T_1_66/11kV	108,37	1845,32	70	1528,89	-35,41	-14,06
T_2_66/11kV	90,48	1500,42	70	1528,19	-22,63	1,85

Tabulka 52 – Změna zatížení transformátorů

Jméno	Bizon projektant		DlG SILENT PowerFactory		Změna oproti Bizon projektant [%]
	Zatížení transformátoru [%]				
T_1_66/11kV	76		80		4
T_2_66/11kV	68		78		10

Tabulka 53 – Porovnávání napětí uzlů (přípojnic)

Jméno	Jmenovité napětí [kV]	Bizon projektant		DlG SILENT PowerFactory		Změna	
		E uzlu [kV]	U relativní [%]	E uzlu [kV]	U relativní [%]	E uzlu [kV]	U relativní [%]
P1_11kV	11	10,9081	99	11,01	100	0,1019	1
P1_66kV	66	66	100	66	100	0	0
P2_11kV	11	10,9763	99	11,02	100	0,0437	1
P3_11kV	11	10,8705	98	10,99	100	0,1195	2
P4_11kV	11	10,9558	99	11	100	0,0442	1
PL_11kV	11	10,8078	98	10,9	99	0,0922	1
PP1_11kV	11	10,9271	99	10,96	100	0,0329	1
PP2_11kV	11	10,9007	99	10,93	99	0,0293	0
P_O_L1	0,415	0,4107	100	0,42	101	0,0093	1
P_O_L2	0,415	0,4093	99	0,42	100	0,0107	1
P_O_L3	0,415	0,4096	99	0,42	101	0,0104	2
P_O_L5	1	0,9501	95	0,96	96	0,0099	1
P_O_P1	11	10,9763	99	11,02	100	0,0437	1
P_O_P3	11	10,907	99	10,94	99	0,033	0
P_O_P4	0,415	0,3957	96	0,4	96	0,0043	0
P_O_P5	0,69	0,7158	104	0,71	103	0,0058	1
P_O_P6	0,415	0,4022	98	0,41	98	0,0078	0
P_O_P7	0,415	0,4132	100	0,42	101	0,0068	1
P_O_S1	0,415	0,3925	95	0,4	97	0,0075	2

5.3.3 Stav průmyslové sítě po odpojení jednoho z hlavních transformátorů

Tento provozní stav je počítán při chodu jednoho hlavního transformátoru při instalovaném výkonu 40 MVA a nastavení odbočky 3 na transformátoru. Podélný spínač přípojnic je sepnut. Kompenzátory jsou připojeny.

Schéma sítě viz Příloha 6.

Tabulka 54 – Porovnávání přenášených výkonů primárním vinutím

Jméno	Bizon projektant		DlgSILENT PowerFactory		Změna oproti Bizon projektant [%]	
	Činný [kW]	Jalový [kVAr]	Činný [kW]	Jalový [kVAr]	Činný	Jalový
T_1_66/11kV	38538,94	9511,62	39030	12828,54	1,27	34,87

Tabulka 55 – Porovnání ztrát v transformátorech

Jméno	Bizon projektant		DlgSILENT PowerFactory		Změna oproti Bizon projektant [%]	
	Činné [kW]	Jalové [kVAr]	Činné [kW]	Jalové [kVAr]	Činný	Jalový
T_1_66/11kV	165,56	3929,79	170	4937,68	2,68	25,65

Tabulka 56 – Změna zatížení transformátorů

Jméno	Bizon projektant	DlgSILENT PowerFactory	Změna oproti Bizon projektant [%]
	Zatížení transformátoru [%]		
T_1_66/11kV	96	103	7

Tabulka 57 – Porovnávání napětí uzlů (přípojnic)

Jméno	Jmenovité napětí [kV]	Bizon projektant		DlgSILENT PowerFactory		Změna	
		E uzlu [kV]	U relativní [%]	E uzlu [kV]	U relativní [%]	E uzlu [kV]	U relativní [%]
P1_11kV	11	11,164	101	11,06	101	0,104	0
P1_66kV	66	66	100	66	100	0	0
P2_11kV	11	11,164	101	11,06	101	0,104	0
P3_11kV	11	11,126	101	11,03	100	0,096	1
P4_11kV	11	11,1433	101	11,03	100	0,1133	1
PL_11kV	11	11,0625	100	10,94	99	0,1225	1
PP1_11kV	11	11,1145	101	11	100	0,1145	1
PP2_11kV	11	11,088	100	10,97	100	0,118	0
P_O_L1	0,415	0,4205	102	0,42	101	0,0005	1
P_O_L2	0,415	0,4191	102	0,42	101	0,0009	1
P_O_L3	0,415	0,4194	102	0,42	101	0,0006	1
P_O_L5	1	0,9728	97	0,96	96	0,0128	1
P_O_P1	11	11,164	101	11,06	101	0,104	0
P_O_P3	11	11,0941	100	10,97	100	0,1241	0
P_O_P4	0,415	0,4026	98	0,4	97	0,0026	1
P_O_P5	0,69	0,7282	106	0,72	104	0,0082	2
P_O_P6	0,415	0,4093	99	0,41	99	0,0007	0
P_O_P7	0,415	0,4204	102	0,42	101	0,0004	1
P_O_S1	0,415	0,4019	98	0,4	97	0,0019	1

5.3.4 Stav průmyslové sítě po odpojení všech kompenzátorů a jednoho z hlavních transformátorů

Tento provozní stav je počítán při chodu jednoho hlavního transformátoru při instalovaném výkonu 40 MVA a nastavení odbočky 6 na transformátoru. Podélný spínač přípojnic je sepnut. Kompensátory nejsou připojeny.

Schéma sítě viz Příloha 8.

Tabulka 58 – Porovnávání přenášených výkonů primárním vinutím

Jméno	Bizon projektant		DlgSILENT PowerFactory		Změna oproti Bizon projektant [%]	
	Činný [kW]	Jalový [kVA]	Činný [kW]	Jalový [kVA]	Činný	Jalový
T_1_66/11kV	38514,1	27139,38	38920	30205,21	1,05	11,29

Tabulka 59 – Porovnání ztrát v transformátorech

Jméno	Bizon projektant		DlgSILENT PowerFactory		Změna oproti Bizon projektant [%]	
	Činné [kW]	Jalové [kVA]	Činné [kW]	Jalové [kVA]	Činný	Jalový
T_1_66/11kV	211,99	5113,7	230	5213,94	8,49	1,96

Tabulka 60 – Změna zatížení transformátorů

Jméno	Bizon projektant	DlgSILENT PowerFactory	Změna oproti Bizon projektant [%]
	Zatížení transformátoru [%]		
T_1_66/11kV	109	124	25

Tabulka 61 – Porovnávání napětí uzlů (přípojnic)

Jméno	Jmenovité napětí [kV]	Bizon projektant		DlgSILENT PowerFactory		Změna	
		E uzlu [kV]	U relativní [%]	E uzlu [kV]	U relativní [%]	E uzlu [kV]	U relativní [%]
P1_11kV	11	11,1493	101	11,03	100	0,1193	1
P1_66kV	66	66	100	66	100	0	0
P2_11kV	11	11,1493	101	11,03	100	0,1193	1
P3_11kV	11	11,1112	101	11,01	100	0,1012	1
P4_11kV	11	11,1286	101	11,01	100	0,1186	1
PL_11kV	11	11,0478	100	10,92	99	0,1278	1
PP1_11kV	11	11,0997	100	10,97	100	0,1297	0
PP2_11kV	11	11,0733	100	10,94	99	0,1333	1
P_O_L1	0,415	0,4199	102	0,42	101	1E-04	1
P_O_L2	0,415	0,4186	102	0,42	101	0,0014	1
P_O_L3	0,415	0,4189	102	0,42	101	0,0011	1
P_O_L5	1	0,9715	97	0,96	96	0,0115	1
P_O_P1	11	11,1493	101	11,03	100	0,1193	1
P_O_P3	11	11,0794	100	10,95	100	0,1294	0
P_O_P4	0,415	0,4021	98	0,4	97	0,0021	1
P_O_P5	0,69	0,7272	106	0,71	103	0,0172	3
P_O_P6	0,415	0,4088	99	0,41	98	0,0012	1
P_O_P7	0,415	0,4198	102	0,42	101	0,0002	1
P_O_S1	0,415	0,4013	97	0,4	97	0,0013	0

5.3.5 Zhodnocení porovnání výpočtů vytvořené programem Bizon projektant a DIgSILENT PowerFactory

Hodnoty vypočtené programem Bizon projektant a DIgSILENT se liší, tato změna je způsobena odebíráním menšího jalového výkonu při použití Bizon projektant. Zatížení transformátoru průmyslové sítě se snižuje, teče-li přes tento transformátor menší jalový výkon. V místech odběrů s menším jalovým výkonem dojde ke snížení napětí na přípojnicích. Zmenšený tok jalového výkonu je znatelný a tudíž i zatížení transformátorů.

Snížený odběr jalového výkonu je v programu Bizon projektant způsoben nestandardním počítáním aktuálních zatížení motorových odběrů. Odebíraná jalová složka výkonů je v Bizon projektant počítána pouze z aktuálního činného zatížení a účinníku, nezohledňuje zde jiné důležité parametry. Výsledné odebírané jalové výkony motorů jsou nižší v celé síti, než je tak ve skutečnosti.

Bizon projektant je snadno ovladatelný program, který lze s úspěchem využít pro modelaci a výpočty především přenosových sítí, kde jsou méně zastoupeny odběry. Pro modelování motorů není dostatečná možnost zadání parametrů.

ZÁVĚR

Úkolem zadané diplomové práce bylo zpracování a vyhodnocení ustálených stavů průmyslové sítě hlubinného dolu na černé uhlí v Austrálii. Veškeré výpočty ustálených stavů jsou zpracovány v programu Bizon projektant 4.42 build 398. Plná licence tohoto programu mi byla zapůjčena po dobu vypracovávání diplomové práce katedrou elektroenergetiky.

Výsledky vypočítané programem Bizon projektant byly srovnány s výpočty provedenými v programu DIgSILENT PowerFactory. Výpočty v programu DIgSILENT vytvořil projektový inženýr Ing. Břetislav Stacho, Ph.D. Výsledky obou výpočtů jsou porovnány v kapitole 5.3, na závěr této kapitoly je uvedeno zhodnocení rozdílnosti vypočtených hodnot ustálených stavů a popis důvodů, proč tyto nesrovnalosti vznikly, viz kapitola 5.3.5.

Pro vyhodnocení ustálených stavů zadané průmyslové sítě byly vybrány jako nejdůležitější ukazatelé činné a jalové ztráty na hlavních výkonových transformátorech a kabelových vedeních, proudové zatížení hlavních výkonových transformátorů a kabelových vedení, kolísání napěťové hladiny přípojnic, v neposlední řadě je důležité sledovat účinník průmyslového rozvodu.

Z výsledků výše popsaných vyhodnocovaných hodnot je zřejmé, že při normálním provozním stavu průmyslové sítě je tato síť bez problému provozu schopná, hlavní výkonové transformátory dosahují účinnosti 60 % a 66 %, což je ideální hodnota zatížení transformátorů, při tomto zatížení je provoz transformátorů nejméně finančně nákladný. Zatížení kabelových vedení nepřesáhl 90 %, výsledky jsou proto vyhovující. Hodnoty 90 %, dosáhlo kabelové vedení, které spojuje podružnou přípojnicí 11 kV, která je označena PP1_11kV a odběry O_P3, O_P3M. Tyto odběry jsou pro simulaci ustálených stavů nepřesně modelovány, nyní nejsou známy přesné parametry celé větve k odběru, proto se nemusí na tuto hodnotu klást velký důraz. Napětí v celé síti se pohybuje v mezích $U_n \pm 10 \%$, tato hranice je stanovena normami v Austrálii. Účinník se při tomto normálním provozním stavu pohyboval nad hranicí 0,969. Hodnota účinníku je požadovaná na hodnotě nejméně 0,95. Z tohoto pohledu proto návrh průmyslové sítě také obstál.

Ustálené stavy průmyslové sítě jsou vyhodnoceny také pro další tři stavy, jde o stavy při údržbě, nebo stavy ke kterým může dojít jen velmi zřídka. První z výše uvedených stavů je stav, kdy dojde k odpojení všech kompenzátorů. Tento stav je simulován, aby se ověřila nutnost využití kompenzace průmyslové sítě. Z výsledků je zřejmé pozitivní působení kompenzátorů na průmyslovou síť. Při odpojení kompenzátorů se navýší zatížení hlavních výkonových transformátorů na hodnoty pohybující se kolem 72 %. Zvýšené zatížení je důsledkem vyššího toku jalového výkonu hlavními transformátory, tento jalový výkon je dodáván z nadřazené soustavy místo z kompenzátorů, tím pádem se snížil účinník na hodnoty 0,827 hlavního transformátoru T_1_66/11kV a hodnotu 0,842 hlavního transformátoru T_2_66/11kV. Zatížení kabelového vedení zůstalo téměř stejné. Druhý nestandardní stav průmyslové sítě je stav, při kterém je odpojen hlavní výkonový transformátor T_2_66/11kV a sepnut podélný spínač hlavních přípojnic P1_11kV a P2_11kV. Tento stav simuluje provádění údržby na transformátoru, nebo poruchu tohoto transformátoru. Zatížení hlavního transformátoru T_1_66/11kV se zvýšilo na hodnotu 96 %, toto zatížení je způsobené tokem výkonů do sítě jen přes jeden hlavní transformátor T_1_66/11kV. Ztráty na kabelovém vedení se zvýšily jen neznatelně. Účinník průmyslové sítě splňuje požadavek, je na hodnotě 0,971. Poslední nestandardní stav je stav, kdy je odpojen jeden z hlavních transformátorů T_2_66/11kV, je sepnut podélný spínač hlavních přípojnic P1_11kV a P2_11kV a jsou odpojeny kompenzátoři. Tento stav je jeden z nejkritičtějších stavů, který může v průmyslové síti nastat, simulujeme tak schopnost odolat tomuto stavu. Při tomto stavu stouplо zatížení transformátoru T_1_66/11kV na hodnotu 109 %, toto zatížení je kritické a provoz na tomto zatížení musí být co nejkratší. Po dlouhodobějším provozu na tomto zatížení dochází ke snižování

životnost hlavního transformátoru. Zatížení na kabelových vedeních se zvýšilo, dosahuje hodnoty 96 % na přívodu k odběrům O_P3 a O_P3M. Jak bylo výše již popsáno, tato hodnota není v tuto chvíli podstatná. Hodnoty odběrů jsou v tuto chvíli vytvořeny s určitou odchylkou oproti reálné situaci. Účinník průmyslové sítě je při tomto stavu velice nízký, dosahuje hodnoty 0,817. To je způsobeno odpojenými kompenzátory a dodáváním potřebného jalového výkonu z nadřazené soustavy přes hlavní výkonový transformátor. Veškeré hodnoty napěťových hladin při nestandardních stavech odpovídají požadovaných hodnot $U_n \pm 10 \%$, této skutečnosti je docíleno použitím automatické regulace napětí hlavních výkonových transformátorů přepínáním odboček při zatížení za použití RET650, tato funkce je popsána v kapitole 5.2.6. Bez použití této funkce se hladiny napětí v průmyslové síti sníží v některých případech až na hraniční hodnoty. Hodnoty při nestandardních stavech bez použití automatického přepínání odboček hlavních transformátorů jsou zobrazeny vždy pod příslušnou kapitolou.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] **Hradílek, Z.** *Elektroenergetika distribučních a průmyslových sítí*.
Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008, 210 s. ISBN 978-80-248-1696-8.
- [2] **Toman, P., Drápela, J., Mišák, S., Orságová, J., Paar, M., Topolánek, D. a kol.**
Provoz distribučních soustav. Praha: ČVUT v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [3] **Santarius, P.** *Elektrické stanice a vedení*.
Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 1990, 215 s. ISBN 80-7078-032-0.
- [4] **Australian Standard.** *Disribuces in mains supply networks*.
Queensland: Central Queensland University, 1991, 8 s. ISBN 0-7262-6845-3.
- [5] **Parametry elektřiny.** Sluneční elektrická zařízení. [online]. 2008.
Dostupné z: <http://www.sez-zlin.cz/data/parametry-elekriny.pdf>
- [6] **Zákon č. 458/2000 Sb.,** o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon).
In. *Sbírka zákonů České Republiky*. 28. 11. 2000, 252 s. ISSN 1801-4399.
- [7] **Vyhláška č. 540/2005 Sb.,** o kvalitě dodávek elektřiny a souvisejících služeb v elektroenergetice, In. *Sbírka zákonů České Republiky*. 15. 12. 2005, 30 s. ISSN 1801-4399.
- [8] **Vyhláška č. 306/2001 Sb.,** o kvalitě dodávek elektřiny a souvisejících služeb v elektroenergetice, In. *Sbírka zákonů České Republiky*. 20. 8. 2001, 7 s. ISSN 1801-4399.
- [9] **National Electricity Rules.** Version 59.
South Australia: Australian Energy Market Commission, 2013, 1502 s. ISBN.
- [10] **Máslo, K.** *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*.
Praha: Asociace energetických manažerů, 2013, 272 s. ISBN 978-80-260-4461-1.
- [11] **ABB.** *Manuál použití transformátorové ochrany RET650* .
- [12] **ABB.** *Manuál technických údajů transformátorové ochrany RET650* .
- [13] **Molnair, T.** *Zlepšení účinníku v energetice a návrh vhodných kompenzačních prostředků*.
[online]. [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: mujweb.cz/molnarm/pdf/kompenzace.pdf

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1** – Povrchová část hlubinného dolu
- Obr. 2** - Struktura elektrizační soustavy [1]
- Obr. 3** – Druhy rozvodů [2]
- Obr. 4** – Vnitřní provedení s podélným dělením na dva úseky [1]
- Obr. 5** – Venkovní provedení stanice s pomocnou přípojnici [1]
- Obr. 6** – Úsporné schéma s pěti odbočkami [1]
- Obr. 7** – Úsporné schéma s pěti odbočkami a pomocnou přípojnici [1]
- Obr. 8** – Úsporné schéma „H“ spojení pro čtyři odbočky [1]
- Obr. 9** – Schéma rozvodny 35 kV s malým počtem odboček [1]
- Obr. 10** – Schéma pro důležité rozvodny 35 kV [1]
- Obr. 11** – Schéma jednoduché přípojnice [1]
- Obr. 12** – Schéma dvojité přípojnice [1]
- Obr. 13** – Schéma se dvěma výsuvnými vypínači [1]
- Obr. 14** – Paprsková síť nízkého napětí [3]
- Obr. 15** – Okružní síť nízkého napětí [2]
- Obr. 16** – Zjednodušená mřížová síť [2]
- Obr. 17** – Klasická mřížová síť nízkého napětí [2]
- Obr. 18** – Číselné kódy pro účely vykazování přerušení dodávky přenosu [7]
- Obr. 19** – Popis uzlu i soustavy [10]
- Obr. 20** – Síť pro vyjádření uzlové admitanční matice [10]
- Obr. 21** – Diagram iteračního procesu Gauss-Seidelovy metody [10]
- Obr. 22** – Grafické chování N-R metody (metody tečen) [10]
- Obr. 23** – Diagram iteračního procesu Newton-Raphsonovy metody [10]
- Obr. 24** - Sedm ohraničených zón hlubinného dolu
- Obr. 25** - Hlavní komplex rozvodny
- Obr. 26** – Odběrové místo O_L1
- Obr. 27** – Odběrové místo O_L2
- Obr. 28** – Odběrové místo O_L3
- Obr. 29** – Odběrné místo O_P4
- Obr. 30** – Odběrné místo O_P5 a O_P6
- Obr. 31** – Odběrné místo O_P7
- Obr. 32** – Odběry podružných rozvodů P3_11kV a P4_11kV
- Obr. 33** – Funkční schéma regulace napětí transformátoru [11]
- Obr. 34** – Nastavované hodnoty regulace RET650 [11]Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.

SEZNAM TABULEK

- Tabulka 1** - Přehled celkových ztrát vedení
- Tabulka 2** – Přehled ztrát hlavních výkonových transformátorů
- Tabulka 3** – Zatížení hlavních výkonových transformátorů
- Tabulka 4** – Kabelová vedení s největším zatížením
- Tabulka 5** – Změna napětí přípojníc
- Tabulka 6** – Účinnost hlavních výkonových transformátorů
- Tabulka 7** – Přehled celkových ztrát vedení
- Tabulka 8** – Přehled ztrát hlavních výkonových transformátorů
- Tabulka 9** – Zatížení hlavních výkonových transformátorů
- Tabulka 10** – Kabelová vedení s největším zatížením
- Tabulka 11** – Změna napětí přípojníc
- Tabulka 12** – Účinnost hlavních výkonových transformátorů
- Tabulka 13** – Přehled celkových ztrát vedení
- Tabulka 14** – Přehled ztrát hlavních výkonových transformátorů
- Tabulka 15** – Zatížení hlavních výkonových transformátorů
- Tabulka 16** – Kabelová vedení s největším zatížením
- Tabulka 17** – Změna napětí přípojníc
- Tabulka 18** – Účinnost hlavních výkonových transformátorů
- Tabulka 19** – Přehled celkových ztrát vedení
- Tabulka 20** – Přehled ztrát hlavních výkonových transformátorů
- Tabulka 21** – Zatížení hlavních výkonových transformátorů
- Tabulka 22** – Kabelová vedení s největším zatížením
- Tabulka 23** – Změna napětí přípojníc
- Tabulka 24** – Účinnost hlavního výkonového transformátoru
- Tabulka 25** – Přehled celkových ztrát vedení
- Tabulka 26** – Přehled ztrát hlavních výkonových transformátorů
- Tabulka 27** – Zatížení hlavních výkonových transformátorů
- Tabulka 28** – Kabelová vedení s největším zatížením
- Tabulka 29** – Změna napětí přípojníc
- Tabulka 30** – Účinnost hlavního výkonového transformátoru
- Tabulka 31** – Přehled celkových ztrát vedení
- Tabulka 32** – Přehled ztrát hlavních výkonových transformátorů
- Tabulka 33** – Zatížení hlavních výkonových transformátorů
- Tabulka 34** – Kabelová vedení s největším zatížením
- Tabulka 35** – Změna napětí přípojníc
- Tabulka 36** – Účinnost hlavního výkonového transformátoru
- Tabulka 37** – Přehled celkových ztrát vedení
- Tabulka 38** – Přehled ztrát hlavních výkonových transformátorů
- Tabulka 39** – Zatížení hlavních výkonových transformátorů
- Tabulka 40** – Kabelová vedení s největším zatížením
- Tabulka 41** – Změna napětí přípojníc
- Tabulka 42** – Účinnost hlavního výkonového transformátoru
- Tabulka 43** – Zhodnocení zatížení transformátorů
- Tabulka 44** – Zhodnocení zatížení kabelů vedených z hlavních transformátorů na hlavní přípojnice
- Tabulka 45** – Zhodnocení změny účinnosti hlavních výkonových transformátorů

- Tabulka 46** – Porovnávání přenášených výkonů primárním vinutím
- Tabulka 47** – Porovnání ztrát v transformátorech
- Tabulka 48** – Změna zatížení transformátorů
- Tabulka 49** – Porovnávání napětí uzlů (přípojnic)
- Tabulka 50** – Porovnávání přenášených výkonů primárním vinutím
- Tabulka 51** – Porovnání ztrát v transformátorech
- Tabulka 52** – Změna zatížení transformátorů
- Tabulka 53** – Porovnávání napětí uzlů (přípojnic)
- Tabulka 54** – Porovnávání přenášených výkonů primárním vinutím
- Tabulka 55** – Porovnání ztrát v transformátorech
- Tabulka 56** – Změna zatížení transformátorů
- Tabulka 57** – Porovnávání napětí uzlů (přípojnic)
- Tabulka 58** – Porovnávání přenášených výkonů primárním vinutím
- Tabulka 59** – Porovnání ztrát v transformátorech
- Tabulka 60** – Změna zatížení transformátorů
- Tabulka 61** – Porovnávání napětí uzlů (přípojnic)

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Simulovaná topologie průmyslové sítě

Příloha 2 Schéma normálního provozního stavu v průmyslové síti

Příloha 3 Hodnoty normálního provozního stavu v průmyslové síti

Příloha 4 Schéma stavu v průmyslové síti - kompenzátory vypnuty

Příloha 5 Hodnoty stavu v průmyslové síti - kompenzátory vypnuty

Příloha 6 Schéma stavu v průmyslové síti - jeden hlavní transformátor odpojen

Příloha 7 Hodnoty stavu v průmyslové síti - jeden hlavní transformátor odpojen

Příloha 8 Schéma stavu v průmyslové síti - jeden hlavní transformátor a kompenzátory odpojeny

Příloha 9 Hodnoty stavu v průmyslové síti - jeden hlavní transformátor a kompenzátory odpojeny

Příloha 10 Vnitřní logika automatické regulace RET650