

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Dynamická zatížitelnost vedení distribučních sítí

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Viktor BRADA**
Osobní číslo: **E13N0003P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Dynamická zatížitelnost vedení distribučních sítí**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Zpracujte literární rešerši aktuálního stavu problematiky dynamického zatěžování.
2. Proveďte analýzu potenciálních kritických linek distribuční soustavy.
3. Analyzujte výkonovou rezervu vybraných linek pomocí teoretických modelů.
4. Zhodnoťte přínos aplikace dynamického zatěžování na linky v distribuční soustavě.

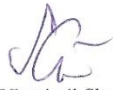
Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. Vostracký, Z., Píclová, P., Polívka, J., Šnajdr, J., Krutina, A. Increasing of transmission ability at high voltage overhead lines ampacity model. In: Proceedings of the 12th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011. Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2393-5.
2. Vostracký, Z.Šnajdr, J.:Working Group B2/C1.19. Increasing capacity of overhead transmission lines. CIGRE, 2013
3. Tlustý J. et al. Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04939-6.
4. ČSN EN 50341-3-19. Elektrická venkovní vedení s napětím nad 45 kV AC. ČNI, 2003.
5. Vostracký Z., Šnajdr J., Sedláček J. Studie možnosti proudového zatěžování přípojnic VVN. Plzeň, 2012. Výzkumná zpráva.

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Zdeněk Vostracký, DrSc., dr. h. c.
Katedra elektroenergetiky a ekologie
Konzultant diplomové práce: Ing. Jaroslav Šnajdr
Katedra elektroenergetiky a ekologie
Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

V diplomové práci jsou popsány jednotlivé způsoby zvýšení přenosové schopnosti elektrických vedení. Jde o metody strategické a operativní. V rámci operativních metod je zde uvedena problematika dynamického zatěžování. Součástí práce je analýza kritických linek distribuční soustavy na území města Plzně při přechodu do ostrovního provozu. V rámci praktické části je zde vypočítána hodnota možné proudové zatížitelnosti vybraných vedení v několika modelových situacích, ve který je uvažován vliv proměnlivých provozních podmínek. V poslední části je provedeno zhodnocení vlivu dynamického zatěžování a možného přínosu na linky distribuční soustavy.

Klíčová slova

Dynamická zatížitelnost, ampacita, strategické metody, operativní metody, ostrovní provoz, distribuční soustava, kritické linky, zvýšení přenosové schopnosti

Abstract

The master theses describes strategic and operational methods how to increase capacity of transmission or distribution power system. Thesis solves issue of dynamic line rating of distribution power system. In this master thesis model situation of island operation in the Pilsen is used and it contains analysis of potential critical lines. Practical part of this thesis solves influence of variable operational conditions on potential increase of ampacity of distribution power lines.

Key words

Dynamic line rating, ampacity, distribution power system, island operation, critical lines, strategic methods, operational methods, capacity increase

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 10.5.2015

Viktor Brada

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Prof. Ing. Zdeňkovi Vostrackém, DrSc, dr. h. c. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce, panu Ing. Jaroslavu Šnajdrovi za poskytnutí studijní literatury a panu Ing. Václavovi Mužíkovi za jeho pomoc a čas věnovaný konzultacím.

Také děkuji celé své rodině za podporu po celou dobu mého studia.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
SOUČASNÝ STAV.....	12
CÍLE PRÁCE.....	12
1 NÁSTROJE UMOŽŇUJÍCÍ NAVÝŠENÍ PŘENOSOVÉ KAPACITY	13
1.1 NAVÝŠENÍ PROUDU.....	14
1.1.1 <i>Varianta se zachováním vodiče</i>	14
1.1.2 <i>Varianta s výměnou vodiče</i>	16
1.2 VÝSTAVBA NOVÉ LINKY	17
1.3 ZVÝŠENÍ NAPĚŤOVÉ HLADINY	18
1.4 OPERATIVNÍ METODY	19
2 DYNAMICKÉ ZATĚŽOVÁNÍ	20
2.1 SBĚR DAT V REÁLNÉM ČASE	21
2.2 SYSTÉMY MĚŘENÍ TEPLoty VODIČŮ	22
2.3 SYSTÉMY MĚŘENÍ MECHANICKÉHO NAPĚTÍ	23
2.4 SYSTÉMY MĚŘENÍ OKOLNÍCH PODMÍNEK	23
2.5 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA	25
2.6 TEORETICKÝ MODEL.....	26
2.6.1 <i>Bilanční rovnice</i>	27
2.6.2 <i>Tepelná kapacita holého vodiče</i>	28
2.6.3 <i>Tepelná kapacita izolovaného vodiče</i>	28
2.6.4 <i>Ohřev vlivem Jouleových ztrát</i>	29
2.6.5 <i>Ohřev vlivem slunečního záření</i>	30
2.6.6 <i>Ochlazování vlivem proudění vzduchu</i>	30
2.6.7 <i>Ochlazování vlivem sálání</i>	33
2.6.8 <i>Výpočet ampacity</i>	34
3 POTENCIÁLNÍ KRITICKÉ LINKY	35
3.1 DEFINICE OSTROVNÍHO PROVOZU	35
3.2 ENERGETICKÉ ZDROJE NA ÚZEMÍ PLZNĚ	36
3.2.1 <i>Plzeňská energetika</i>	37
3.2.2 <i>Plzeňská teplárenská</i>	38
3.3 PŘÍPRAVA SOUSTAVY NA PŘECHOD DO OSTROVNÍHO PROVOZU.....	39
3.4 VYBRANÉ LINKY NA ÚROVNI 110 KV	41
3.4.1 <i>Varianta 1</i>	42
3.4.2 <i>Varianta 2</i>	43
3.4.3 <i>Varianta 3</i>	44
3.5 PARAMETRY VENKOVNÍCH VEDENÍ.....	45
3.5.1 <i>Vybraný vodič</i>	45
3.6 PRŮMĚRNÁ MĚSÍČNÍ TEPLota	46
3.7 AMPACITA LINKY	47
3.7.1 <i>Vliv okolní teploty</i>	47
3.7.2 <i>Stav 1</i>	48
3.7.3 <i>Stav 2</i>	50
3.8 MOŽNÉ EXTRÉMNI SITUACE.....	52
3.9 PŘÍNOS DYNAMICKÉHO ZATĚŽOVÁNÍ.....	53
ZÁVĚR	56
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	58

Seznam symbolů a zkratek

\overline{P}_p [W]	.....	přirozený výkon
\overline{Z}_c [Ω]	.....	charakteristická impedance
AAAC	.....	all aluminium alloy conductor
AAC	.....	all-aluminium conductor
ACSR	.....	aluminium conductor steel reinforced
ACSS	.....	aluminium conductor steel supported
a_v [$m^2 \cdot s^{-1}$]	.....	teplotní vodivost vzduchu
c_p [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	.....	měrná tepelná kapacita vodiče
ČEPS	.....	Česká energetická přenosová soustava
D [m]	.....	průměr vodiče
FVE	.....	fotovoltaické elektrárny
g [$m \cdot s^{-2}$]	.....	normální tíhové zrychlení
Gr	.....	Grashoffovo číslo
I_{ef} [A]	.....	efektivní hodnota proudu
I_N [A]	.....	jmenovitý proud
I_s [$W \cdot m^{-2}$]	.....	intenzita slunečního záření
K	.....	kotel
KOG	.....	kogenerační jednotky
k_s [-]	.....	koeficient zohledňující vliv skin efektu
k_w [-]	.....	koeficient zohledňující směr větru
M [$kg \cdot m^{-1}$]	.....	poměrná hmotnost vodiče
MVE	.....	malé vodní elektrárny
Nu	.....	Nusseltovo číslo
P [W]	.....	činný výkon
P_c [$W \cdot m^{-1}$]	.....	ochlazování prouděním
PE	.....	Plzeňská energetika
P_J [$W \cdot m^{-1}$]	.....	Jouleovo teplo (tepelné ztráty procházejícím proudem)
P_k [$W \cdot m^{-1}$]	.....	ohřev vlivem korony
P_m [$W \cdot m^{-1}$]	.....	ohřev vlivem změny magnetického pole střídavého proudu
P_r [$W \cdot m^{-1}$]	.....	ochlazování sáláním
Pr	.....	Prandtlovo číslo
P_s [$W \cdot m^{-1}$]	.....	ohřev vlivem solárního záření

PT.....	Plzeňská teplárenská
$P_w [W.m^{-1}]$	ochlazování odpařováním vody
$P_{zisk} [W.m^{-1}]$	tepelný zisk
$P_{ztrát} [W.m^{-1}]$	tepelná ztráta
$R_{20} [\Omega]$	odpor vodiče při 20 °C
$R_{ac} [\Omega]$...	střídavý odpor vodiče
Re.....	Reynoldsovo číslo
$R_{T0} [\Omega]$...	měrný odpor vodiče o teplotě T_0
$S [mm^2]$..	povrch vodiče
$S [VA]$	zdánlivý výkon
$S_{Al} [mm^2]$	průřez hliníku ve vodiči
$S_{Fe} [mm^2]$	průřez oceli ve vodiči
TG.....	turbogenerátor
$U_N [V]$	jmenovité napětí
$v [m.s^{-1}]$..	rychlost větru
$\nu_k [m^2.s^{-1}]$	kinematická viskozita vzduchu
$\alpha [K^{-1}]$	teplotní součinitel odporu materiálu vodiče
$\alpha_c [W.m^2.K^{-1}]$	koeficient přestupu tepla prouděním
$\beta [K^{-1}]$	teplotní součinitel rozpínavosti vzduchu
$\varepsilon_a [-]$	koeficient absorpce záření
$\varepsilon_s [-]$	koeficient emisivity tepelného záření
$\vartheta_o [°C]$	teplota okolí
$\vartheta_{ref} [°C]$..	referenční teplota, obvykle 20 °C
$\vartheta_v [°C]$	teplota vodiče
$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	tepelná vodivost vzduchu
$\rho [W.m^2.K^4]$	Stefan-Boltzmannova konstanta
$\rho_{Al} [kg.m^3]$	hustota hliníku
$\rho_{Fe} [kg.m^3]$	hustota hliníku a oceli
$\psi [°]$	úhel který svírá směr větru s normálou vodiče
$\omega [°]$	úhel mezi slunečními paprsky a osou vodiče

Úvod

Z důvodu velkého rozšíření obnovitelných zdrojů elektrické energie, především větrných a fotovoltaických elektráren velkých výkonů, jsou kladeny větší nároky na přenosovou schopnost vedení přenosové či distribuční soustavy. Především distribuční soustava je více zatížena, protože není dimenzována na nárazový výkon těchto zdrojů elektrické energie. Dle současných norem je maximální proudové zatížení elektrického vedení dimenzováno podle nejnepříznivějších provozních podmínek. To znamená, že při návrhu vedení se uvažuje maximální okolní teplota, průměrná rychlost větru a maximální intenzita slunečního záření. Návrh vytvořený na základě těchto neměnných podmínek sice vytváří jistou výkonovou rezervu, ale zároveň limituje potenciál dané linky elektrického vedení. Je to dáno skutečností, že provozní podmínky se neustále mění a uvažovaný nejnepříznivější stav se vyskytuje pouze ojediněle v průběhu celého roku.

Tématem této práce je velice aktuální problematika dynamického zatěžování elektrického vedení. V rámci dynamického zatěžování se uvažují reálné provozní podmínky a díky tomu je možné stávající linky po dobu příznivějších podmínek zatěžovat více než doposud. Pro zavedení modelu dynamického zatěžování je tedy nutné monitorovat provozní podmínky v reálném čase a také je určitým způsobem interpretovat operátorům v řídicím centru.

V této práci jsou popsány jednotlivé způsoby zvyšování přenosové schopnosti elektrických vedení. Jedná se jak o metody strategické, tak o metody operativní, jejichž součástí je dynamické zatěžování. Je zde uveden teoretický model pro výpočet ampacity venkovních vedení. Pro analýzu kritických linek je uvažována modelová situace přechodu města Plzně do ostrovního provozu. Součástí této modelové situace je výpočet výkonové rezervy za určitých okolních podmínek. V závěru je provedeno zhodnocení přínosu dynamického zatěžování linek distribuční soustavy a vliv ampacity na maximální přenášený výkon v ostrovním provozu.

Současný stav

V současné době jsou elektrická vedení dimenzována na souhrn nejhorších možných provozních podmínek v dané oblasti. Konkrétní podmínky podléhají normám v jednotlivých zemích. Avšak normované nejhorší možné provozní podmínky nastávají v průběhu celého roku pouze během několika desítek hodin. To znamená, že během zbývajících času není plně využit potenciál vedení přenášet maximální možný výkon. A právě proto, že potřeba přenášet stále větší výkon roste, jeví se toto řešení jako nevhodné. Výstavba nových vedení sice zvýší přenosovou kapacitu, ale je velice nákladná a neřeší problém nevyužívání plného potenciálu vedení. Z tohoto důvodu se řeší problematika dynamického zatěžování linek. Toto je velice aktuální problematika, která přináší kýžené výsledky a zároveň nezpůsobuje velkou ekonomickou zátěž.

Cíle práce

Cílem teoretické části práce je vytvořit ucelenou řešení nejen problematiky dynamického zatěžování, ale také uvést obecné způsoby jakými lze zvýšit přenosovou kapacitu elektrických vedení za použití různých metod. Dále pak popsat způsoby sběru dat potřebných k úspěšnému zavedení teoretického modelu pro výpočet ampacity vedení. Cílem této práce je také provést analýzu potenciálních kritických linek distribuční soustavy.

Cílem praktické části práce je vypočítat výkonovou rezervu vedení distribuční soustavy na základě předchozí analýzy potenciálních kritických linek a zhodnotit přínos aplikace dynamického zatěžování na linky distribuční soustavy.

1 Nástroje umožňující navýšení přenosové kapacity

Na základě vztahů pro výpočet přirozeného výkonu (1.1) popřípadě proudu (1.3) a charakteristické impedance (1.2) lze určit základní způsoby zvýšení přenosové kapacity.

$$\overline{P}_P = \frac{U_N^2}{Z_c} \quad (1.1)$$

$$\overline{Z}_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1.2)$$

$$I = \frac{U_N}{Z_c} \quad (1.3)$$

Z prvního vztahu vyplývá, že lze zvýšit přenášený výkon změnou napěťové hladiny. Další způsoby souvisí se vztahem charakteristické impedance. Uvážíme-li, že dovolený proud závisí na oteplení vodiče a oteplení přímo souvisí s odporem vodiče, pak navýšení přenášeného výkonu pomocí změny proudu závisí na konstrukčních vlastnostech vodiče.

Základní způsoby zvýšení přenosové kapacity jsou tedy založeny na zvýšení napětí, proudu nebo obou veličin. Aby bylo možné zvýšit zároveň napětí a proud již existující linky, je nutné zvýšit izolační hladinu, dále pak vyměnit vodiče a nosné konstrukce vedení. Tento zásah je velice finančně náročný, v podstatě se jedná o výstavbu zcela nové linky. Z toho vyplývá, že pro zvýšení kapacity stávajících vedení se využívá zvýšení pouze jedné z veličin, tedy napětí nebo proudu. Metody nevyžadující zásah do strukturních komponent vedení se nazývají operativní metody. Výsledné možnosti navýšení přenosové kapacity jsou: [1]

- Zvýšení napěťové hladiny
- Navýšení proudu
- Navýšení napětí i proudu
- Přidání dalšího obvodu do stávající linky
- Výstavba nové linky
- Operativní metody

Každá z těchto metod přináší určitý rozsah navýšení přenosové kapacity a ekonomické náklady. Účinnost jednotlivých metod záleží na konkrétních podmínkách daných vedení.

1.1 Navýšení proudu

Cílem následujících metod je zvýšit přenosovou kapacitu vedení tak, že bude možné vedením přenášet větší proud. Zvýšení přenášeného proudu lze dosáhnout zvýšením dovolené provozní teploty vodiče, ale také například změnou vodičů linky. Změna může být minimální nebo může jít o kompletní výměnu vodičů a konstrukční změny. Konkrétně se jedná o varianty: [1]

- zachování vodiče,
- výměny vodiče,
- výměny vodiče a konstrukčních změn.

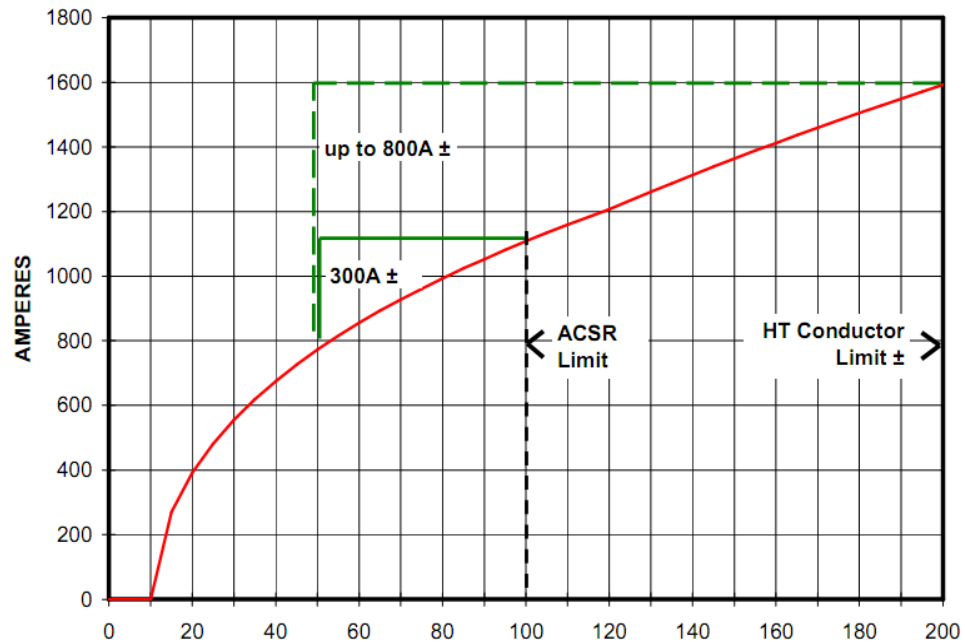
U metod týkajících se změn přenášeného proudu je třeba zavést pojem ampacita. Pojem ampacita totiž představuje maximální dovolený proud, který může protékat vodičem, aniž by došlo k okamžitému či postupnému poškození vodiče. Ampacita je závislá na provozní teplotě vodiče. Aby nedošlo k poškození, nesmí teplota překročit maximální dovolenou teplotu vodiče. [10]

1.1.1 Varianta se zachováním vodiče

Metoda zachování vodiče vychází z předpokladu, že výměna vodiče je drahá. Výměna vodiče představuje až 25 % celkové ceny nové linky. Zachování vodičů má tedy význam z ekonomických důvodů, ovšem tuto metodu lze využít pouze v případě, že zatížení linky se nebude v dlouhodobém hledisku zvyšovat. Tato metoda přináší pouze skromné navýšení proudu tekoucího vodičem linky. [1]

Větší proudové zatížitelnosti je dosaženo zvýšením provozní teploty vodiče. Na obrázku 1.1 je znázorněna závislost proudu protékajícího vodičem ACSR 400 mm² na jeho provozní teplotě. Pro aplikaci této metody je tedy nutné, aby nebyla využita maximální dovolená provozní teplota vodiče. Dalším omezením je, že přenášený výkon musí být závislý na provozní teplotě vodiče, nikoliv na jeho impedanci. Proto se metoda

zachování vodičů využívá především na nižších napěťových hladinách (obvykle do 300 kV), z důvodu kratší délky vodiče. [1]



Obrázek 1.1: Závislost dovoleného proudu na teplotě vodiče (osa x – teplota vodiče T [°C]) [1]

Avšak zvýšení provozní teploty vodiče způsobuje větší průvès vodiče. Odstranění tohoto jevu přináší dodatečné náklady, protože je nutné zvýšit nosnou konstrukci, aby byla zachována bezpečná vzdálenost vodiče od země. Týká-li se výměna dřevěných nebo betonových stožárů, tak nárůst ceny není markantní. Je to dáno skutečností, že tyto stožáry lze snadno a poměrně levně vyměnit za vyšší. Příhradové stožáry je možné zvýšit přidáním dalšího dílu těla, ale tato změna je náročnější po technické i finanční stránce. Toto je dalším důvodem proč se zachování vodičů a zvýšení jejich dovolené provozní teploty využívá na linkách, které je možné lehce a levně vyměnit. [1]

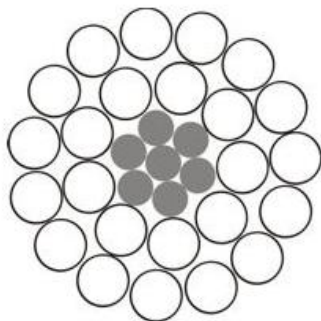
Pokud není zapotřebí zvětšit výšku vodiče razantním způsobem, je možné vyměnit stávající instalované izolátory, na kterých je vodič zavěšen, za nové. Výměnou izolátoru za kratší, ale se stejnými izolačními vlastnostmi, lze získat určitou výškovou rezervu pro případný průvès vodiče. Ovšem takto získaná výšková rezerva je minimální. [1, 11]

Některá starší vedení jsou navržena tak, že dovolená provozní teplota vodiče je pouze 50 °C. Novější linky už jsou navrženy pro vyšší provozní teploty vodičů. Vzhledem ke skutečnosti, že standardní hliníkový vodič ACSR má maximální provozní

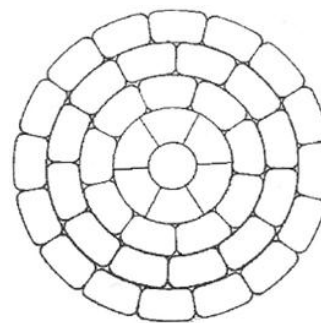
teplotu zhruba 100 °C, lze za optimálních podmínek v rámci této metody získat o 100 % větší ampacitu jen tím, že zvýšíme limit provozní teploty vodiče. [1]

1.1.2 Varianta s výměnou vodiče

Výměna vodičů je vhodná zvláště u linek, které jsou dostatečně konstrukčně naddimenzovány, aby mohly bez konstrukčních zásahů unést nové, větší a těžší vodiče. Tato metoda je finančně velice nákladná, a proto je cílem provést změnu vodiče takovým způsobem, aby se co nejvíce omezily konstrukční změny. Ale i přes finanční náročnost tato metoda přináší i dodatečné výhody, co se týče životnosti linky. [1]



Obrázek 1.1: Klasické uspořádání vláken



Obrázek 1.2: Lichoběžníkový tvar vláken

Nejméně nákladnou variantou je výměna vodiče za standardní vodič pouze s větším průřezem v případě, že to konstrukční omezení dovolí. Pro zachování stávajícího průřezu vodiče a zvýšení přenosové kapacity je třeba změnit rozložení vláken ve vodiči. Namísto klasického uspořádání kulatých vláken ve vodiči (obr. 1.2) se používá lichoběžníkového tvaru vláken (obr. 1.3). Toto umožňuje vyplnit vzduchové mezery vznikající mezi kulatými vlákny hliníkem a zvýšit tak zatížitelnost při stejném průřezu vodiče. Při kompaktním uspořádání vláken dochází k mírnému navýšení hmotnosti vodiče. [3]

Průměr vodiče určuje zatížitelnost konstrukcí vlivem větru a hmotnost vodiče určuje maximální pnutí. Vzhledem k tomu je obvykle výhodnější zvolit zvýšení hmotnosti vodiče než zvětšení jeho průměru, protože náklady spojené se zesílením nosných stožárů jsou mnohem větší než náklady spojené s výměnou závěsů vodičů. Jestliže se chceme vyhnout zvýšení hmotnosti vodiče, tak se jako další varianta nabízí použití celohliníkových vodičů AAC, AAAC. Tyto vodiče mají rozdílný poměr

pevnosti a váhy než klasické vodiče ACSR. Pokud je však nutné zesílit nosné stožáry, největší problém představují betonové stožáry. Je to z důvodu, že je velmi obtížné určit jejich pevnost, pokud není vedená patřičná dokumentace a i samotné zpevnění bývá komplikované. Naopak nejmenším problémem je zesílení dřevěných a příhradových stožárů. Z toho vyplývá, že při výměně vodičů se klade důraz na zvýšení přenosové schopnosti, zachování průměru a nízký nárůst hmotnosti vodiče. [1]

Nákladnější variantu představuje použití vysokoteplotních vodičů, ovšem zvýšená cena vodičů je přijatelná v případě, že dojde k snížení celkových nákladů spojených s konstrukčními změnami. Jednou z možností je použití vodiče typu ACSS. Tyto vodiče mají stejnou konstrukci, váhu i průměr jako klasické vodiče ACSR. Hlavní rozdíl mezi nimi je však maximální dovolená provozní teplota. Zatímco vodiče ACSR jsou limitovány 100 °C, vodiče typu ACSS mohou být dlouhodobě provozovány až při teplotě 250 °C. Rozdíl je také v jejich pevnosti. Hliník ve vodičích ACSS není tak pevný, proto je zapotřebí kompenzovat pevnost použitím pevnější oceli v jádru vodiče. Další možností je použít slitiny hliníku TAL, ZTAL, XTAL. Vodiče tvořené těmito slitinami mají také stejnou hmotnost a průměr jako ACSR, ale také mají stejnou závislost průřezu na teplotě vodiče. Jejich výhodou je, že mohou být provozovány za vyšší teploty než ACSR, aniž by došlo k poškození vodičů. Ovšem je třeba zajistit dostatečnou výšku vodičů nad zemí. [1]

1.2 Výstavba nové linky

Výstavbou nové linky lze dosáhnout velkého navýšení přenosové kapacity. Tento přístup je však velice nákladný. Dalším problémem je zajištění prostoru k výstavbě nové linky. Proto lze pod pojmem výstavba nové linky chápat přidání druhého obvodu (potahu) na stávající stožár. Zde však vyvstává komplikace, že málokdy je dostatek místa na stožárech, aby bylo možné přidat další obvod. Na některých stožárech je možné přeuspořádat ukotvení vodičů tak, aby vznikl dostatečný prostor a bylo možné další obvod přidat, ale toto s sebou přináší zvýšené riziko zkratu. Kombinací vícepotahových stožárů, instalací vodičů s vyšší dovolenou provozní teplotou a výměnou izolátorů je možné dosáhnout velmi vysokého nárůstu přenosové kapacity linky, avšak cena je velice vysoká a celkové provedení je velice technicky náročné. [1]

1.3 Zvýšení napěťové hladiny

Předchozí metody založené na zvyšování proudu přináší pouze průměrné navýšení přenosové kapacity, pokud neuvažujeme výstavbu zcela nové linky. Na rozdíl od nich zvýšení napěťové hladiny linky zvýší přenosovou kapacitu úměrně zvýšenému napětí. Výhodou je, že dojde ke snížení ztrát úměrně s kvadrátem napětí. Pokud napětí zdvojnásobíme, dojde k velkému nárůstu přenosové kapacity a snížení provozních ztrát. Vyšší napěťová hladina však může způsobit nutnost výměny stávajících vodičů z důvodu vzniku koróny. [1]

Aplikací této metody rušíme linku nižší napěťové hladiny a získáváme novou linku o vyšší napěťové hladině s vyšší přenosovou kapacitou, avšak tím může vzniknout problém s nadbytečností dané linky v síti. V některých případech je zvýšení napěťové hladiny nákladnější než výstavba nové linky a přesto je toto řešení výhodnější. Protože toto řešení může být realizováno v kratším čase, není nutné řešit tolik legislativních problémů. Proti rekonstrukci linky bývá obvykle méně námitek, než proti výstavbě zcela nové linky. [1]

Pokud se chystáme zvýšit napěťovou hladinu, je zcela nezbytné zajistit dostatečnou výšku vodičů nad zemí (tabulka 1.1), aby nebyla porušena bezpečnostní pravidla. Totéž platí i pro zajištění dostatečné mezery mezi vodiči. Proto je někdy nutné rozšířit ramena nosných konstrukcí nebo z dvojvodové linky vytvořit linku s jedním obvodem a vodiče náležitě uspořádat. S rozšířením ramen nosných konstrukcí souvisí šířka koridoru, pokud by koridor nebyl dostatečně široký, je zapotřebí ho rozšířit, tak aby byly splněny bezpečnostní podmínky. Mimo jiné vyšší napěťová hladina vyžaduje použití izolátorů s vyšší izolační schopností. V některých případech je nutné vyměnit stávající vodič za vodič s větším průřezem nebo vytvořit svazek vodičů, aby se zamezilo vzniku koróny. Všemi těmito požadavky stoupá ekonomická náročnost změny. [1]

Situace	110 kV
Běžný profil země	6 m
Skalnatý nebo strmý svah	3 m
Stromy pod vedením, na které nelze vylézt	1 m
Stromy pod vedením, na které lze vylézt	2,5 m
Stromy vedle vedení, na které nelze vylézt	1 m
Stromy vedle vedení, na které lze vylézt	2,5 m
Vedení nad budovami – odolná střecha proti požáru sklon $>15^\circ$	3 m
Vedení nad budovami – odolná střecha proti požáru sklon $\leq 15^\circ$	5 m
Vedení nad budovami – střecha není odolná proti požáru	11 m
Vedení v blízkosti budov	3 m
Antény, pouliční osvětlení	3 m
Křížení s komunikací	7 m
Křížení s trakčním vedením	3 m

Tabulka 1.1: Minimální výška vodiče od země, převzato z [20]

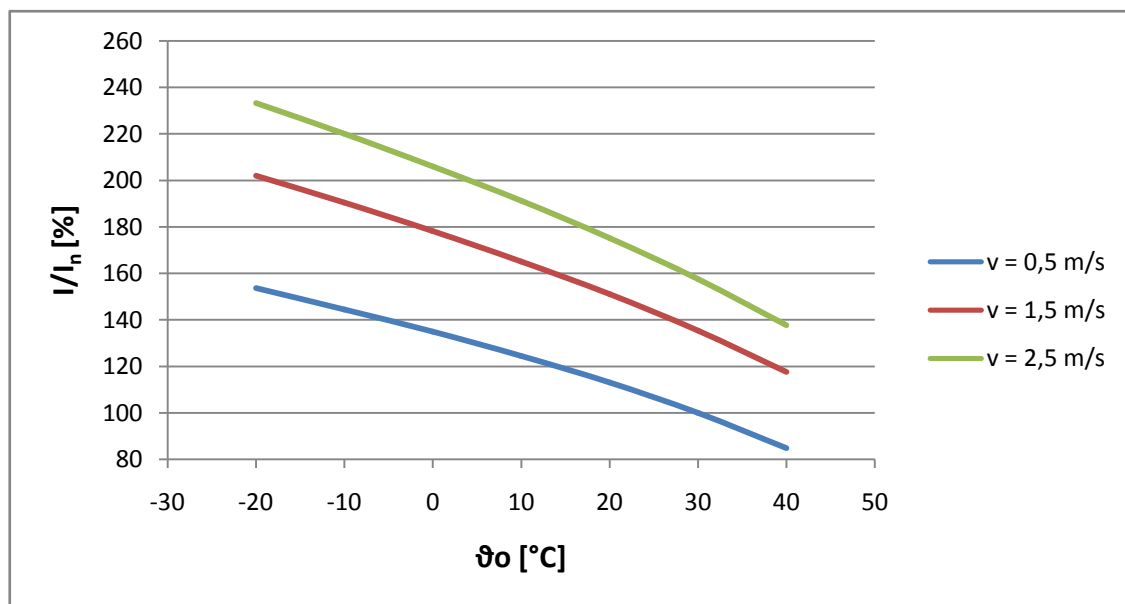
1.4 Operativní metody

Operativní metody se od předcházejících metod odlišují tím, že se snaží zvýšit přenosovou kapacitu linky, aniž by došlo ke konstrukčním změnám linky. Tyto metody reprezentují dynamické zvýšení zatížitelnosti vedení tím, že zahrnují měnící se atmosférické podmínky, ale také aktuální teploty vodiče či jeho průvės. [2] Jednotlivé metody a způsob jakým se data sbírají, je popsán v kapitole 2.

2 Dynamické zatěžování

Statický model počítá s nejhorsími možnými provozními podmínkami, kterými je dáno maximální proudové zatížení. Stav, který popisují nejhorsí možné provozní podmínky, však během roku nastane pouze v řádech několik desítek hodin. Z toho vyplývá, že během většiny roku není potenciál vedení plně využit. [1, 2]

Dynamický model na rozdíl od statického modelu využívá sběru dat provozních podmínek v reálném čase. Na základě těchto naměřených údajů je vypočtena aktuální hodnota maximálního proudového zatížení linky. Jednotlivé metody založené právě na sběru dat aktuálních provozních podmínek dosahují zvýšení zatížitelnosti linky až o 15%. [2] Tento nárůst je závislý na klimatických podmínkách, ve kterých se vedení nachází. Velký vliv na možnou zatížitelnost vedení má právě okolní teplota. Nárůst dovoleného proudu vzhledem k okolní teplotě a rychlosti větru je znázorněn na obrázku 2.1.



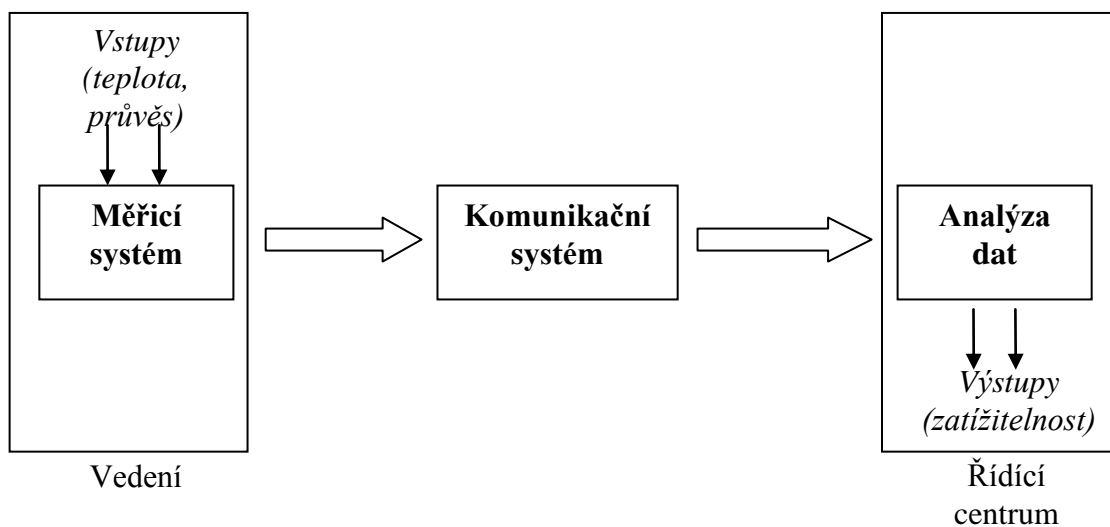
Obrázek 2.1: Závislost nárůstu dovoleného proudu na okolní teplotě a rychlosti větru [1]

2.1 Sběr dat v reálném čase

Pro zjištění aktuálního stavu vodiče je nutné měřit celou řadu veličin, mezi hlavní však patří:

- teplota vodiče,
- průvěš vodiče,
- okolní podmínky.

Realizace samotných měřících systému může být provedena v krátkém čase v řádu několika měsíců. Avšak pro efektivní využití těchto dat je zapotřebí vybudovat patřičný komunikační systém, aby bylo možné je ihned po změření poslat do řídicího centra, kde dochází k jejich analýze. Následně jsou naměřená data interpretována operátorům ve smysluplné podobě, například jako okamžitá výkonová rezerva v daném čase. Zavedením těchto měřících systémů lze dosáhnout nárůstu ampacity o 10 až 15 %. Náklady spojené s těmito systémy jsou odpovídající k nárůstu ampacity vedení. Velká část nákladů je tvořena především budováním komunikačního systému mezi měřicími přístroji a řídicím systémem. [1]



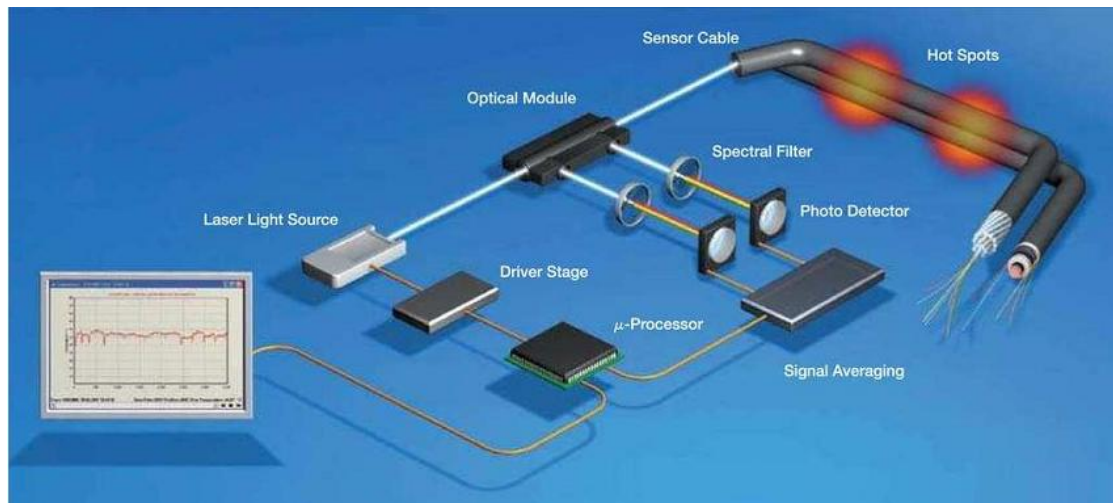
Obrázek 2.2: Blokové schéma sběru dat v reálném čase

2.2 Systémy měření teploty vodičů

Teplotu vodičů lze měřit pomocí měřicích zařízení umístěných přímo na vodičích nebo pomocí optických vláken vpletených do vodiče. Měřicí zařízení umístěné přímo na vodiči představují lokální měření teploty a jsou používána u holých vodičů např. systém RIBE-Ritherm (obr. 2.3). Tato zařízení se umisťují především na kritická místa linky, kde lze očekávat nejvyšší teploty vodiče. Optická vlákna jsou používána především u kabelových vedení a poskytují data a teplotní profil celého vodiče. Tento systém je nazýván DTS – Distributed temperature sensing, může být realizován např. pomocí monitorovacího systému Valcap (obr. 2.4). Výhoda tohoto systému spočívá v monitorování rozložení teploty ve vodiči na každý jeden metr s přesností $\pm 1^\circ\text{C}$ a dosahem 30 km. [1, 10]



Obrázek 2.3: Sensor RIBE-Ritherm [10]



Obrázek 2.4: Princip měřicího systému Valcap [28]

2.3 Systémy měření mechanického napětí

Měřením mechanického napětí vodičů se sleduje jejich průvěs, který je závislý na teplotě vodiče. Jedním ze základních způsobů je vložení tenzometrů mezi izolátory v místech ukotvení vodiče ke stožáru. Jiné systémy pracují se snímáním polohy konkrétního bodu na vedení. Ke snímání se využívají lasery, kamery, radary či GPS systém. Problémem těchto měřicích zařízení je nutnost kalibrace. Kalibrace se provádí za pomoci měřicích systémů okolní teploty a solárního záření. Pokud se při kalibraci použije Net radiometr, lze dosáhnout přesnosti ± 1 %. Pokud jsou použita dvě různé měřicí zařízení, jedno k měření okolní teploty a druhé k měření slunečního záření, pak se dosahuje přesnosti ± 2 %. Jednodušší způsob představuje snímání vibrací vodiče pomocí externího zařízení umístěného přímo na vodiči. Na obrázku 2.5 je zobrazen měřicí systém Ampacimon. V rámci tohoto systému se využívá změny vibrací vodiče na základě změny délky vodiče. Hlavní výhodou tohoto systému je zohlednění všech vlivů působících na vodič bez ovlivnění přesnosti. Výsledná hodnota průvěsu se odvozuje z frekvence vibrací uvnitř vodiče. [2, 10]



Obrázek 2.5: Měřicí zařízení vibrací – Ampacimon [27]

2.4 Systémy měření okolních podmínek

Pro měření okolní teploty linky se využívá malých meteorologických stanic, které jsou umístěny do těsné blízkosti vedení po celé jeho délce. Stanice je vhodné umístit především do kritických míst linky, kde je možné očekávat větší změny

teploty. Vzhledem k velké proměnlivosti okolních podmínek se v rámci zjednodušení uvažují povětrnostní podmínky či intenzita slunečního záření jako nejhorší možné. [2]

Ovšem pro dosažení přesnějších výsledků v rámci použitého modelu je možné měřit rychlost a směr větru anemometry. Tato zařízení je možné namontovat na stožáry vedení, ale je nutné zajistit takové umístění, aby nedocházelo ke stínění měřicího zařízení nosnou konstrukcí. Výška umístění anemometru by měla odpovídat maximálnímu povolenému průřezu vodiče. Pokud není možné umístit anemometr do takové výšky, jsou pak výsledná změřená data přepočítávána pomocí teoretických vztahů upravujících závislost rychlosti větru na výšce. Měření rychlosti větru anemometry by mělo probíhat maximálně v desetiminutových intervalech. Přesnost měřicího zařízení je vhodné zvolit do rychlosti 0,5 m/s. Tento parametr je zvolen čistě z ekonomického hlediska. Přesnější měřicí zařízení sice umožňují získat výstižnější data, ale jejich pořizovací cena a náklady na častější údržbu velmi vzrostou. [2]

Přesnější měření intenzity slunečního záření je velice nákladná záležitost. Pro získání přesných dat je třeba měřit celkové záření. Celkovým zářením je myšlena kombinace přímého, rozptýleného a odraženého záření. Toto záření je možné měřit Net radiometry (obr. 2.7), ale jejich pořizovací cena a nutnost neustálé údržby je ekonomicky nevýhodná. Z tohoto důvodu se při výpočtech počítá s hodnotami globální radiace získanými pomocí pyranometrů (obr. 2.6), které jsou umístěny v meteorologických stanicích. [2]



Obrázek 2.6: Pyranometr [25]



Obrázek 2.7: Net radiometr [26]

2.5 Distribuční soustava

Distribuční soustava slouží k rozvodu elektrické energie z přenosové soustavy koncovým zákazníkům a je provozována na napěťových hladinách:

- 0,23 / 0,4 kV,
- 3 kV,
- 6 kV,
- 10 kV,
- 22 kV,
- 110 kV.

V České republice jsou tři provozovatelé distribučních sítí:

- ČEZ Distribuce a.s. – působící na území celé České republiky mimo Jihočeského a Jihomoravského kraje
- E.ON Distribuce a.s. – působící v Jihočeském a Jihomoravském kraji
- PREDistribuce a.s. – působící na území hlavního města Prahy

Distribuční soustava byla budována za účelem jednostranného toku elektrické energie z předávacích míst přenosové soustavy k jednotlivým odběratelům. Tomuto účelu odpovídaly rozvodny i systém chránění. Současný trend rozvoje elektráren využívající obnovitelné zdroje energie však mění původní roli soustavy. Nyní soustava musí zvládat tok výkonu nejen směrem k odběrateli, ale i od odběratele směrem zpět do sítě. [9]

Hlavní vlivy elektráren využívající obnovitelné zdroje energie na distribuční soustavu jsou: [9]

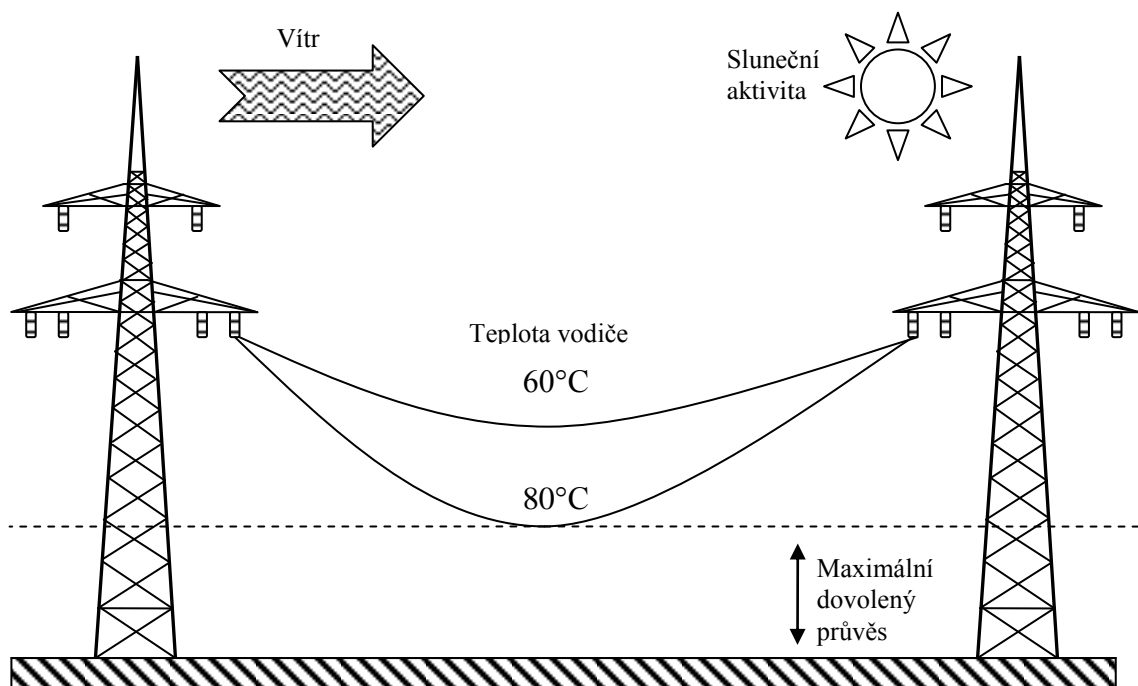
- přetěžování sítě,
- kolísání napětí – vliv větrných elektráren,
- zvýšení zkratových poměrů,
- kvalita dodávky.

Vzhledem ke kolísavému výkonu těchto decentralizovaných zdrojů je distribuční soustava více namáhána a je vyvíjen větší tlak na zvýšení její přenosové schopnosti. Právě zde by se dalo využít metod dynamického zatěžování vedení.

V distribuční soustavě se k rozvodům elektrické energie využívají nejen venkovní holé vodiče, ale také kabely uložené v zemi či ve vzduchu. Toto je zásadní rozdíl oproti přenosové soustavě, která využívá k přenosu pouze holé vodiče. Proto je nutné v rámci problematiky dynamického zatěžování distribuční soustavy vytvořit dva teoretické modely – pro holé vodiče a pro kabely. Rozdíl v teoretickém modelu kabelu je ten, že se musí uvažovat tepelná kapacita izolace a uložení kabelu.

2.6 Teoretický model

Teplota vodiče je závislá na proudovém zatížení, charakteristice vodiče a okolních podmínkách především okolní teplotě, rychlosti a směru proudění větru a intenzitě slunečního záření. Na obrázku 2.8 je zobrazen vliv okolních podmínek na teplotu vodiče a tím i jeho průvěs.



Obrázek 2.8: Závislost průvěsu vodiče na teplotě vodiče

Základním prvkem modelu je tepelná rovnice. Máme-li ustálený stav, pak tepelnou rovnici představuje tepelný zisk, který je roven tepelným ztrátám (2.1). [10]

$$P_{zisk} = P_{ztrát} \quad (2.1)$$

P_{zisk} tepelný zisk
 $P_{ztrát}$ tepelná ztráta

Tento stav však neodpovídá skutečnosti, protože dochází k neustálým změnám atmosférických podmínek a proudovému zatěžování, proto ho lze použít jako orientační při určování omezujících charakteristik, ale lze ho využít při počítání výkonových rezerv. Uvažujeme-li však přechod mezi ustálenými stavy, je třeba rozšířit předcházející rovnici o tepelnou kapacitu vodiče. Tato rovnice (2.2) pak popisuje reálný fyzikální děj. [10]

$$M \cdot c_p \frac{d\vartheta}{dt} = P_{zisk} - P_{ztrát} \quad (2.2)$$

2.6.1 Bilanční rovnice

$$P_J + P_S + P_k + P_m = M \cdot c_p \frac{d\vartheta}{dt} + P_c + P_r + P_w \quad (2.3)$$

P_J Jouleovo teplo (tepelné ztráty procházejícím proudem)
 P_S solární záření
 P_k ohřev vlivem korony
 P_m ohřev vlivem změny magnetického pole střídavého proudu
 c_p měrná tepelná kapacita vodiče
 M poměrná hmotnost vodiče
 P_c ochlazování prouděním
 P_r ochlazování sáláním
 P_w ochlazování odpařováním vody

Obvykle je možné zanedbat ohřev vlivem korony - P_k , ohřev vlivem změny magnetického pole - P_m a ochlazování odpařováním vody - P_w . Zanedbáme-li tyto jevy, pak tvar zjednodušené rovnice (2.4) je: [3, 11]

$$P_J + P_S = M \cdot c_p \frac{d\vartheta}{dt} + P_c + P_r \quad (2.4)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{P_J + P_S - P_c - P_r}{M \cdot c_p} \quad (2.5)$$

P_J Jouleovo teplo (tepelné ztráty procházejícím proudem)
 P_S solární záření

c_p měrná tepelná kapacita vodiče
 M poměrná hmotnost vodiče
 P_c ochlazování prouděním
 P_r ochlazování sáláním

2.6.2 Tepelná kapacita holého vodiče

Tepelnou kapacitu pro venkovní holý vodič (AlFe lano) je možné vyjádřit jako vážený aritmetický průměr jednotlivých složek (2.6) a hmotnost jako prostý součet složek (2.7). [3, 10]

$$c_p = \frac{c_{Al}\rho_{Al}S_{Al} \cdot c_{Fe}\rho_{Fe}S_{Fe}}{\rho_{Al}S_{Al} + \rho_{Fe}S_{Fe}} \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right] \quad (2.6)$$

$$M = \rho_{Al}S_{Al} + \rho_{Fe}S_{Fe} \left[\frac{kg}{m} \right] \quad (2.7)$$

c_p měrná tepelná kapacita
 M poměrná hmotnost vodiče
 S_{Al}, S_{Fe} ... průřez lan vodiče (hliníku a oceli)
 ρ_{Al}, ρ_{Fe} ... hustota hliníku a oceli

Jednotlivé konstanty jsou:

$$\rho_{Al} = 2703 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\rho_{Fe} = 7780 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$c_{Al} = 897 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

$$c_{Fe} = 477 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

2.6.3 Tepelná kapacita izolovaného vodiče

Tepelnou kapacitu pro izolovaný samonosný venkovní vodič (kabel) je možné vyjádřit obdobně jako pro vodič holý, s tím rozdílem že je zapotřebí dodat složku zohledňující izolaci vodiče (2.8), totéž platí i pro hmotnost vodiče (2.9):

$$c_p = \frac{c_{Al}\rho_{Al}S_{Al} \cdot c_{Fe}\rho_{Fe}S_{Fe} \cdot c_{iz}\rho_{iz}S_{iz}}{\rho_{Al}S_{Al} + \rho_{Fe}S_{Fe} + \rho_{iz}S_{iz}} \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right] \quad (2.8)$$

$$M = \rho_{Al} S_{Al} + \rho_{Fe} S_{Fe} + \rho_{iz} S_{iz} \left[\frac{kg}{m} \right] \quad (2.9)$$

c_p měrná tepelná kapacita

M poměrná hmotnost vodiče

S_{Al}, S_{Fe} ... průřez hliníkového vodiče a nosného lana

ρ_{Al}, ρ_{Fe} ... hustota hliníku a nosného lana

S_{iz} průřez izolace

ρ_{iz} hustota izolace

Jednotlivé konstanty v případě použití PVC izolace jsou:

$$\rho_{Al} = 2703 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\rho_{Fe} = 7780 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$c_{Al} = 897 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

$$c_{Fe} = 477 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

$$\rho_{iz} = 1350 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$c_{iz} = 900 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

2.6.4 Ohřev vlivem Jouleových ztrát

V rovnici 2.10 je řešen vztah výpočtu Jouleova tepla pro AlFe lano. Střídavý proud způsobuje ve vodiči tzv. skin efekt, proto je nutné jeho vliv zohlednit v rovnici. Celkový příspěvek skin efektu na výsledném odporu činí 2-5 %. [12] Vzhledem k tomu, že se hodnota činného odporu mění v závislosti na teplotě vodiče, je nutné při výpočtu zohlednit vztah 2.11, ve kterém z hodnoty odporu vodiče při 20 °C, rozdíl teplot a teplotního součinitele odporu materiálu vodiče můžeme tuto změnu vyjádřit. [3, 11]

$$P_j = k_s \cdot I_{ef}^2 \cdot R_{ac} \left[\frac{W}{m} \right] \quad (2.10)$$

$$R_{ac} = R_{T0} \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta_v - \vartheta_{ref})] \quad [\Omega] \quad (2.11)$$

$$k_s = \frac{R_{ac}}{R_{T0}} \quad [-] \quad (2.12)$$

P_J	<i>Jouleovo teplo</i>
k_s	<i>koeficient zohledňující vliv skin efektu</i>
I_{ef}	<i>efektivní hodnota proudu</i>
R_{ac}	<i>střídavý odpor vodiče</i>
R_{T0}	<i>měrný odpor vodiče o teplotě T_0</i>
α	<i>teplotní součinitel odporu materiálu vodiče</i>
ϑ_v	<i>teplota vodiče</i>
ϑ_{ref}	<i>referenční teplota, obvykle 20 °C</i>

Teplotní součinitel odporu pro hliníkový vodič je:

$$\alpha = 0,0049 \left[\frac{1}{K} \right]$$

2.6.5 Ohřev vlivem slunečního záření

Míra ohřevu vlivem slunečního záření je způsobena nejen technickým stavem vodiče, ale také závisí na celkové ploše vodiče. Jako technický stav uvažujeme korozi a znečištění vodiče. Tyto nepříznivé vlivy zvyšují míru absorpce tepla. Nový vodič absorbuje přibližně 20-30 % tepla, zatímco zkorodovaný a znečištěný vodič až 90%. Doporučená hodnota koeficientu absorpce záření je 0,8 až 0,9 pro nízkoteplotní vodiče. Skutečné sluneční záření I_s je tvořeno třemi složkami. Jedná se o záření přímé, záření difúzní a záření odražené. Z již zmíněných ekonomických důvodů se měření sluneční intenzity neprovádí po jednotlivých složkách, ale pouze jako globální hodnota. Celková plocha vodiče se určí jako obdélník o stranách délky vodiče a jeho průměru. [3, 6] Rovnice 2.13 vyjadřuje tepelný zisk vlivem slunečního záření.

$$P_S = \varepsilon_a \cdot D \cdot I_s \cdot \sin \omega \left[\frac{W}{m} \right] \quad (2.13)$$

P_S	<i>ohřev vlivem slunečního záření</i>
ε_a	<i>koeficient absorpce záření</i>
I_s	<i>intenzita slunečního záření</i>
D	<i>průměr vodiče</i>
ω	<i>úhel mezi slunečními paprsky a osou vodiče</i>

2.6.6 Ochlazování vlivem proudění vzduchu

Proudění vzduchu a jeho následné ochlazování tělesa představuje velice složitý fyzikální děj, proto se v technické praxi používá zjednodušené matematické vyjádření děje v podobě Newtonova vztahu (2.14). [10]

$$P_c = \alpha_c \cdot S \cdot (\vartheta_v - \vartheta_o) \left[\frac{W}{m} \right] \quad (2.14)$$

$$\alpha_c = k_w \cdot \frac{Nu \cdot \lambda}{D} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (2.15)$$

$$k_w = 1,194 - \sin \psi - 0,194 \cos 2\psi + 0,364 \sin 2\psi \quad (2.16)$$

- P_c ochlazování prouděním
 α_c koeficient přestupu tepla prouděním
 S povrch vodiče
 D průměr vodiče
 ϑ_v teplota vodiče
 ϑ_o teplota okolí
 k_w koeficient zohledňující směr větru
 λ tepelná vodivost vzduchu
 ψ úhel který svírá směr větru s normálou vodiče

Pro výpočet koeficientu přestupu tepla prouděním je potřeba znát Nusseltovo číslo, které vychází z dalších podobnostních čísel (Grashoffova, Prandtlova a Reynoldsova). [10] Způsob výpočtu jednotlivých podobnostních čísel je zobrazen v následujících rovnicích.

Výpočet jednotlivých podobnostních čísel: [3]

- Nusseltovo číslo

Ve výpočtu Nusseltova čísla je zapotřebí rozlišovat, zda se jedná o nucené či volné proudění.

Nusseltovo číslo pro volné proudění:

$$Nu_v = c_v \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad (2.17)$$

Konstanta c_v nabývá hodnot 0,436 až 0,54, průměrně se uvažuje $c_v = 0,5$. [3]

Nusseltovo číslo pro nucené proudění:

$$Nu_n = c_n \cdot Re^n \quad (2.18)$$

Konstanty c_n a n jsou závislé na velikosti Reynoldsova čísla podle následující tabulky.

Re	c_n	n
$1 \leq Re < 4$	0,891	0,33
$4 \leq Re < 40$	0,821	0,385
$40 \leq Re < 4000$	0,615	0,466
$40000 \leq Re < 40\ 000$	0,174	0,681
$40\ 000 \leq Re < 400\ 000$	0,0239	0,805

Tabulka 2.1: Konstanty pro výpočet Nusseltova čísla

Výsledné Nusseltovo číslo je vyjádřeno následujícím vztahem.

$$Nu = \sqrt[4]{Nu_v^4 + Nu_n^4} \quad (2.19)$$

- Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu_k} \quad (2.20)$$

v rychlost větru

D průměr vodiče

ν_k kinematická viskozita vzduchu

ϑ_v teplota vodiče

- Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\nu_k}{a_v} \quad (2.21)$$

ν_k kinematická viskozita vzduchu

a_v teplotní vodivost vzduchu

- Grashoffovo číslo

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot D^3 \cdot (\vartheta_v - \vartheta_o)}{\nu_k} \quad (2.22)$$

$$\beta = \frac{1}{\vartheta + 273,15} \left[\frac{1}{K} \right]$$

$$g = 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

- β teplotní součinitel rozpínavosti vzduchu
 D průměr vodiče
 ν_k kinematická viskozita vzduchu
 g normální tíhové zrychlení
 ϑ_v teplota vodiče
 ϑ_o teplota okolí

Uvážíme-li fakt, že povětrnostní podmínky se mohou velmi měnit na trase celého vedení, pak je nutné při výpočtu uvažovat nejhorší naměřené hodnoty. Díky tomuto omezení je vhodné zvážit přínos zpřesnění výpočtu ochlazování vlivem proudění vzduchu. [2]

2.6.7 Ochlazování vlivem sálání

Za předpokladu, že plocha vodiče je výrazně menší než okolní plocha, je možné popsat tepelný přenos rovnicí 2.23, která se běžně používá v technické praxi. Z uvedeného vztahu je patrné, že odváděné teplo je závislé na změně teplot vodiče a okolí, které jsou navíc ve čtvrté mocnině. Z toho vyplývá, že vliv tohoto jevu se projevuje zvláště u velmi rozdílných teplot. Od rozdílů teplot přibližně o 150 °C začíná ochlazování sáláním převažovat nad prouděním. [5]

$$P_r = \varepsilon_s \cdot \pi \cdot D \cdot \sigma \cdot [(\vartheta_v + 273,15)^4 - (\vartheta_o + 273,15)^4] \left[\frac{W}{m} \right] \quad (2.23)$$

- P_r ochlazování vlivem sálání
 ε_s koeficient emisivity tepelného záření
 D průměr vodiče
 ρ Stefan-Boltzmannova konstanta
 ϑ_v teplota vodiče
 ϑ_o teplota okolí

Stefan-Boltzmannova konstanta:

$$\rho = 5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$$

2.6.8 Výpočet ampacity

Pro výpočet ampacity v ustáleném stavu je nutné upravit bilanční rovnici tak, aby vyjadřovala tepelné poměry v ustáleném stavu (2.24). Tato rovnice sice nezohledňuje skutečný provozní stav, ale je vhodná pro výpočet výkonové rezervy vedení. [10] Vyjádřením Jouleova tepla a jednoduchou úpravou rovnice lze vyjádřit proud (2.25). Tímto je možné vypočítat proudové zatížení na základě proměnlivých vstupních údajů, které představují klimatické podmínky, ve kterých je vedení provozováno. [3]

$$P_j + P_s = P_c + P_r \quad (2.24)$$

$$I = \sqrt{\frac{P_c + P_r - P_s}{R_{ac}}} [A] \quad (2.25)$$

3 Potenciální kritické linky

V této kapitole je řešena problematika potenciálních kritických linek distribuční soustavy na území města Plzně. Jako modelovou situaci uvažují přechod Plzně na režim ostrovního provozu. Tato situace je zvolena z důvodu možného výpadku dodávky elektrické energie tzv. blackoutu při rozpadu přenosové soustavy. V rámci ostrovního provozu budou využívány dva energetické zdroje nacházející se na území města. Jmenovitě se jedná o elektrárnu označovanou jako PE, která je součástí Plzeňské energetiky a.s. a teplárnu společnosti Plzeňská teplárenská a.s. V následujících podkapitolách je definován pojem ostrovního provozu, instalované výkony jednotlivých zdrojů, způsob přechodu do ostrovního provozu a propojení těchto energetických výroben pomocí distribuční sítě.

3.1 Definice ostrovního provozu

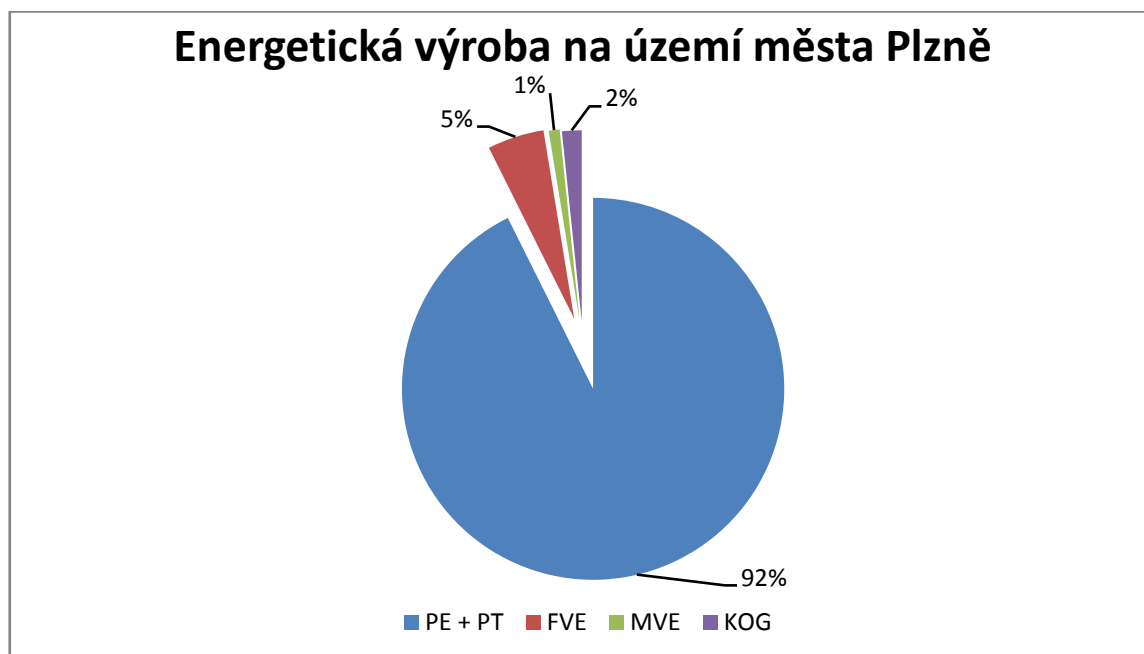
Schopnost elektrárenského bloku pokrývat spotřebu v určité geograficky ohraničené oblasti (ostrovu), je označována jako ostrovní provoz. Dodávaná elektrická energie je nezávislá na okolní elektrizační soustavě. Velikost ostrova je relativní, v případě rozpadu evropské přenosové soustavy může ostrov představovat celé území České republiky. Naopak pokud by došlo k rozpadu české přenosové soustavy, pak jednotlivé kraje mohou představovat samostatné ostrovy. Přechod do ostrovního provozu je velice náročný na regulační schopnosti elektrárenského bloku z důvodu předcházení a řešení stavů nouze. Dále s tímto přechodem souvisí velké změny frekvence a napětí protože blok pracuje do izolované části soustavy. [4, 13, 14]

Dle ČEPS jsou požadavky na schopnost elektrárenského bloku následující: [4, 14]

- Přechod do ostrovního provozu – změnit režim regulace bloku na proporcionální regulaci otáček a odepnout blok od vnější sítě do provozu vlastní spotřeby při změně frekvence mimo frekvenční plán.
- Ostrovní provoz – regulace musí být schopna zajistit vhodnou odezvu dodávaného výkonu bloku dle změny frekvence a napětí v ostrovu.
- Opětovné připojení ostrova k soustavě – regulace frekvence musí být dostatečně plynulá a jemná, aby bylo možné připojit ostrov do nadřazené soustavy.
- Dostupnost služby – blok musí mít splněné certifikační testy dle kodexu PS.

3.2 Energetické zdroje na území Plzně

Město Plzeň má k dispozici dva konvenční energetické zdroje. Jde o klasické tepelné zdroje elektrické energie využívající zejména hnědé uhlí. Jedná se o elektrárnu Plzeňské energetiky a.s., která je označována jako PE, dále jde o teplárnu Plzeňské teplárenské a.s. (označovanou jako PT). Na území města Plzně se nachází i další energetické zdroje. Především jde o fotovoltaické elektrárny (FVE), jejichž počet čítá více než 730 s celkovým instalovaným výkonem 13,3 MW. Dále jsou zde malé vodní elektrárny (MVE), kterých je 16 a jejich celkový instalovaný výkon činí 2,6 MW. V poslední řadě se zde nachází 7 kogeneračních jednotek (KOG) o celkovém výkonu 4,5 MW. Celkem se tedy v Plzni nachází energetické zdroje o výkonu 282,5 MW. Jednotlivé rozložení energetické výroby na území města Plzně je znázorněno na obrázku 3.1. Z obrázku vyplývá, že výše zmíněné energetické zdroje představují 8 % celkového instalovaného výkonu v Plzni. To znamená, že celkový výkon těchto zdrojů není zanedbatelný a v krizových situacích může být velice potřebný. Avšak tyto zdroje jsou obtížně regulovatelné a jejich provoz je nepředvídatelný, proto v modelové situaci přechodu města Plzně na ostrovní režim počítám pouze s uvedenými konvenčními zdroji elektrické energie. [8]



Obrázek 3.1: Rozložení energetické výroby na území města Plzně

3.2.1 Plzeňská energetika

Plzeňská energetika a.s. provozuje energetický zdroj označovaný jako PE. Energetický zdroj je provozován v kogeneračním režimu výroby elektrické energie a tepla, dále poskytuje i podpůrné služby. Jedná se o výkonovou regulaci, start ze tmy a možnost ostrovního provozu. Elektrická energie vyrobená v tomto zdroji slouží jak k pokrytí vlastní spotřeby, tak k pokrytí spotřeby okolních podniků, ale především je výkon přenášen do distribuční soustavy. [13, 15]

Teplo potřebné pro provoz elektrárny je vyráběno ve třech kotlích spalujících hnědé uhlí. Jedná se o kotle označené jako K1, K3, K4. Čtvrtý kotel K5 spaluje těžký topný olej. Vyrobená pára pohání tři parní kondenzační turbíny, na které jsou připojeny turbogenerátory TG8, TG9 a TG10. Zmíněné turbogenerátory dosahují celkového výkonu 90 MWe. Provozní parametry jednotlivých generátorů jsou uvedeny v tabulkách 3.1, 3.2 a 3.3 [17]. V případě nutnosti je možné spustit záložní diesellové generátory o kombinovaném výkonu 20,1 MWe. [15] Vzhledem ke skutečnosti, že jsou tyto generátory schopné docílit svého maximálního výkonu do dvou minut, řadí se mezi rychlé zdroje.

Celkový instalovaný výkon elektrárny PE je tedy 111,6 MWe. Odečtením výkonu potřebného pro vlastní spotřebu, který činí 13,3 MW, dostaneme hodnotu 98,3 MW. Uvažujeme-li účinník $\cos \varphi = 0,95$, pak celkový zdánlivý výkon dodávaný do distribuční sítě je 103,5 MVA (dle rovnice 3.1). [13, 15]

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{98,3}{0,95} = 103,5 \text{ [MVA]} \quad (3.1)$$

Turbogenerátor TG 8	
Výkon [MW]	30,5
Zapojení	Hvězda
Napětí [kV]	$6,3 \pm 5 \%$
Účinník [-]	0,8

Tabulka 3.1: Parametry generátoru TG 8, data převzata z [13]

Turbogenerátor TG 9	
Výkon [MW]	28
Zapojení	Hvězda
Napětí [kV]	6,3 ± 5 %
Účinnost [-]	0,7

Tabulka 3.2: Parametry generátoru TG 9, data převzata z [13]

Turbogenerátor TG 10	
Výkon [MW]	33
Zapojení	Hvězda
Napětí [kV]	6,3 ± 5 %
Účinnost [-]	0,75

Tabulka 3.3: Parametry generátoru TG 10, data převzata z [13]

3.2.2 Plzeňská teplárenská

PT využívá kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla. Teplo potřebné pro výrobu páry vzniká v šesti kotlích K2 až K7. Kotle K2 a K3 jsou v provozu pouze v zimě za účelem vytápění v rámci centrálního zásobování teplem. Kotle K4 až K7 slouží k výrobě páry pro pohon turbín, ke kterým jsou připojeny turbosoustrojí TG1, TG2 a TG3. V kotlích K2 až K5 je spalováno hnědé uhlí, v kotli K6 se spaluje jak hnědé uhlí, tak biomasa a kotel K7 využívá jako palivo pouze biomasu. Turbogenerátory TG1 a TG2 jsou připojeny k turbínám využívajících páru, která vzniká v kotlích K4, K5, K6. Tyto dva turbogenerátory představují blok 1. Blok 2 je tvořen turbosoustrojem TG3 a využívá páru vznikající v kotli K7. Kombinovaný výkon turbogenerátorů TG1 a TG2 činí 136 MWe. Turbosoustrojí TG3 disponuje výkonem 13,5 MWe. Celkem je tedy k dispozici výkon 150,5 MWe. [13, 16] Od tohoto výkonu je však zapotřebí odečíst výkon potřebný k zajištění vlastní spotřeby. Přesná data vlastní

spotřeby bohužel nejsou k dispozici. Pro provoz teplárny jsou nejdůležitější následující zařízení: [18]

- horkovodní čerpadla – spotřeba 5,8 MW,
- napáječky kotlů – spotřeba 8,8 MW,
- kouřové ventilátory – spotřeba 4,5 MW,
- uhelné mlýny – spotřeba 2,1 MW.

Vlastní spotřebu teplárny lze odhadnout jako součet dílčích výkonů spotřebovávaných těmito zařízeními. Vlastní spotřebu tedy odhaduji na 26 MW. Z toho vyplývá, že tento zdroj může dodávat do distribuční sítě výkon 124,5 MW. Uvažujeme-li účinník $\cos \varphi = 0,95$. Pak celkový dodávaný zdánlivý výkon je 131,05 MVA.

Výkon jednotlivých turbogenerátorů a svorkové napětí je zobrazeno v tabulce 3.4. [13, 16]

Název	Činný výkon [MW]	Svorkové napětí [kV]
TG1	70	10,5
TG2	67	10,5
TG3	13,5	10,5

Tabulka 3.4: Parametry generátorů instalovaných v PT, data převzata z [13]

3.3 Příprava soustavy na přechod do ostrovního provozu

S přechodem do ostrovního provozu souvisí mnoho dílčích činností. Jednou z hlavních činností je změna konfigurace sítě a to tak, že síť je uvedena do vhodných podmínek pro provoz v ostrovním režimu. Uvedení sítě do vhodných podmínek pro provoz v ostrovním režimu znamená odepnout daný úsek od napájení všemi vnějšími zdroji elektrické energie. Jedná se o galvanické odpojení všech spojení s okolní distribuční soustavou či přenosovou soustavou na všech napěťových hladinách. [13] V uvažovaném modelu by se jednalo o rozvodny Chrást a Přeštice. Rozvodna Chrást využívá linky 430 a 431 (napěťová hladina 400 kV) k napájení severní části města Plzně a okolí. Zatímco jižní část města Plzně a jeho okolí je napájena z rozvodny Přeštice jak

možné odpojit spotřebu na úrovni 22 kV a tím se vyhnout problémům při zapínání do spotřeby. [13]

Výhodou linek na napěťové úrovni 22 kV je především jejich hustější síť a v případě poruchových stavů je možné nalézt větší množství náhradních propojení dvou míst. Ovšem zde je potřeba uvažovat větší časovou prodlevu z důvodu absence dálkového ovládání u většiny uzlů. Pro změnu konfigurace sítě je nutné vyslat pracovníka energetických závodů do daných míst. Vzhledem ke skutečnosti, že časová prodleva musí být co nejkratší, nejsou tyto linky vhodné k využití při rozběhu PT a také nejsou dostačující z hlediska výkonu nutného pro rozběh PT. [13]

3.4 Vybrané linky na úrovni 110 kV

Propojení PE a PT na napěťové hladině 110 kV je možné mnoha způsoby (obrázek 3.3). Lze najít celou řadu kombinací linek 1202, 1206, 1209, 1210, 1213, 1225 a 1226 ovšem pouhé matematické kombinace těchto linek nemusí být vždy vhodné z hlediska praktického provozu. Z hlediska praktičnosti je vhodné zvolit taková spojení, která jsou nejkratší možná s nejmenším počtem uzlů, ale zároveň umožňují určitou redundanci. Volit menší vzdálenost a jednoduchost vedení je vhodné z důvodu menší pravděpodobnosti vzniku poruchy. [13]



Obrázek 3.3: Potenciální kritické linky na napěťové úrovni 110 kV, převzato z [19]

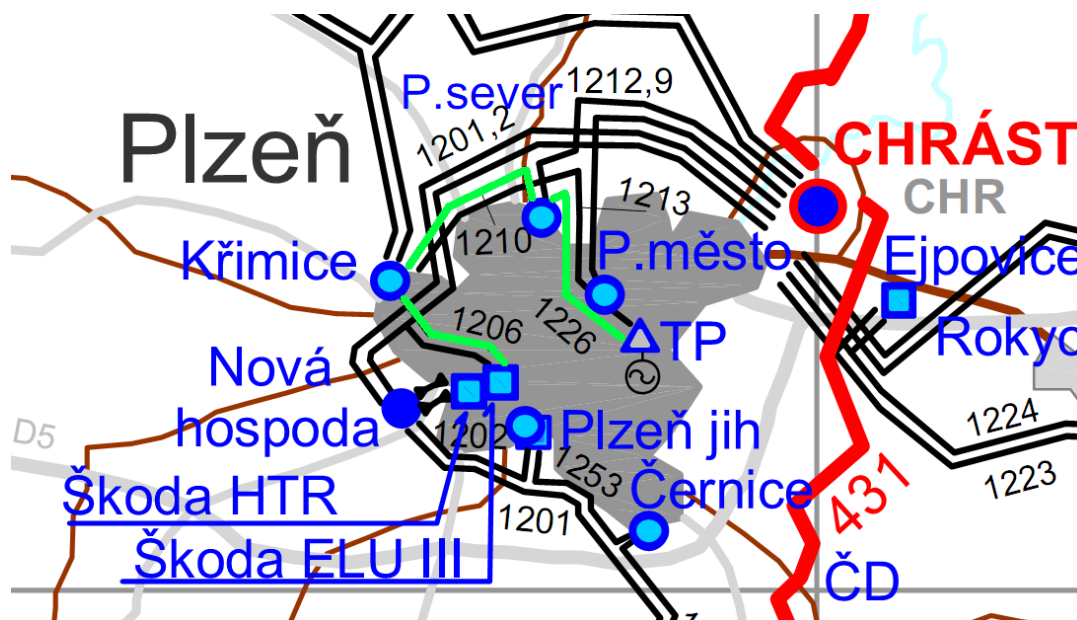
Zvolíme-li parametry jako právě jednoduchost a malá vzdálenost vedení, pak můžeme vybrat celkem tři vhodné varianty vzájemného propojení. Rozbor jednotlivých variant je vypracován v následujících podkapitolách.

3.4.1 Varianta 1

Varianta 1 spočívá v propojení rozvodny Škoda ELÚ III s rozvodnou Křimice linkou 1206, rozvodna Křimice je spojena linkou 1210 s rozvodnou Plzeň-sever a ta je spojena s Teplárnou linkou 1226. Délka jednotlivých vedení a jejich provedení je znázorněno v tabulce 3.5.

Číslo	1206	1210	1226
Délka [km]	3,35	4,2	6,36
Provedení	Dvojité	Dvojité	Dvojité
Stožár	Soudek	Soudek	Soudek

Tabulka 3.5: Parametry vybraných vedení – varianta 1, data převzata z [13]



Obrázek 3.4: Vybrané linky dle varianty 1, převzata z [19]

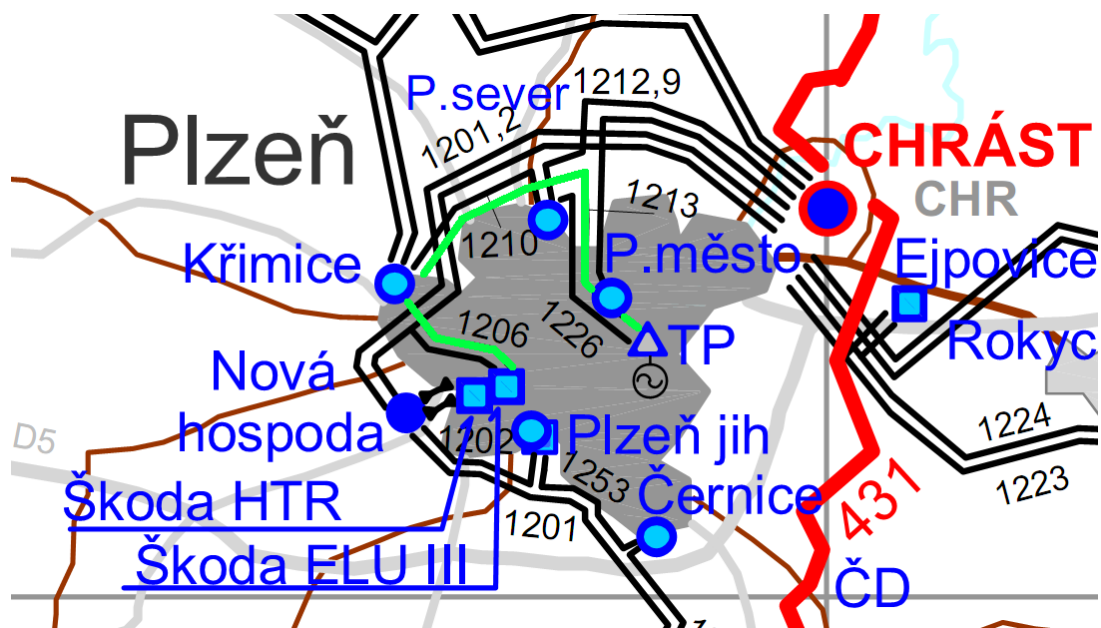
Celková délka vedení je 13,91 km. Co se týče vzdálenosti, je tato varianta téměř stejná jako varianta 2.

3.4.2 Varianta 2

V této variantě je také využita linka 1206 sloužící k propojení rozvodny Škoda ELÚ III a rozvodny Křimice. Z rozvodné stanice Křimice je využita linka 1213, která propojuje rozvodnu Plzeň-město. K propojení rozvodny Plzeň-město a teplárna slouží linka 1225. Délka jednotlivých vedení a jejich provedení je znázorněno v tabulce 3.6.

Číslo	1206	1213	1225
Délka [km]	3,35	9,29	1,11
Provedení	Dvojité	Dvojité	Dvojité
Stožár	Soudek	Soudek	Soudek

Tabulka 3.6: Parametry vybraných vedení - varianta 2, data převzata z [13]



Obrázek 3.5: Vybrané linky dle varianty 2 převzata z [19]

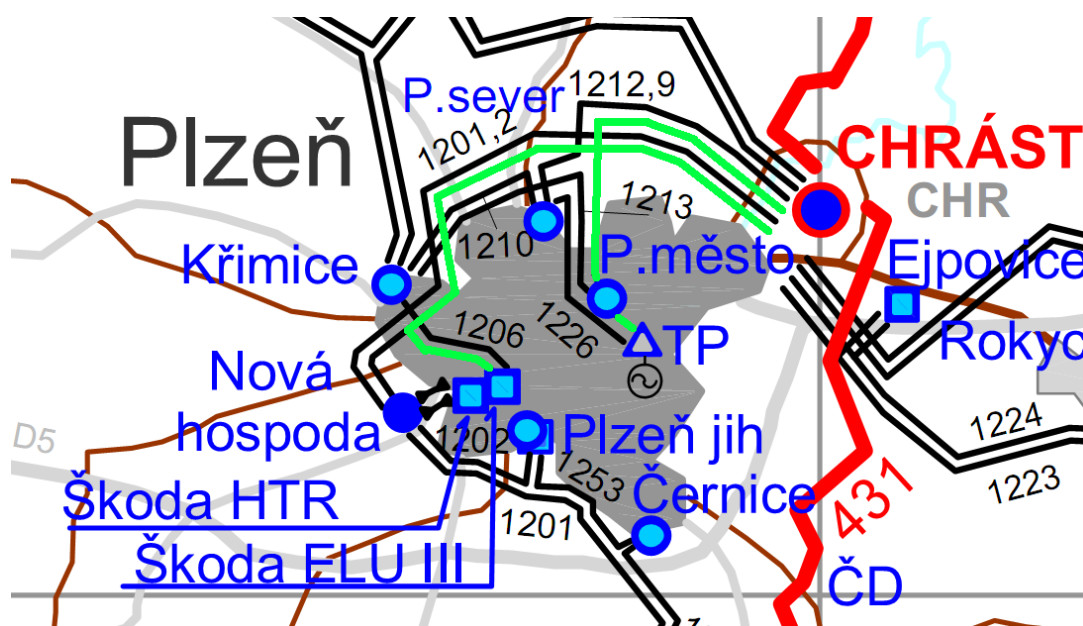
S celkovou délkou vedení 13,75 km je tato varianta nejkratší z uvedených tří.

3.4.3 Varianta 3

Na rozdíl od předcházejících variant se zde v propojení nevyužívá rozvodné stanice Křimice, ale za pomoci linky 1202 je využita rozvodna Chrást. K této rozvodně je připojena rozvodná stanice Plzeň-město linkou 1209. Následně se opět využívá linka 1225, která spojuje rozvodnu Plzeň-město s teplárnou. Detaily o provedení jednotlivých vedení jsou v tabulce 3.7.

Číslo	1202	1209	1225
Délka [km]	17,52	10,11	1,11
Provedení	Dvojité	Dvojité	Dvojité
Stožár	Donau	Donau	Soudek

Tabulka 3.7: Parametry vybraných vedení - varianta 3, data převzata z [13]



Obrázek 3.6: Vybrané linky dle varianty 3 převzata z [19]

Celková délka této varianty je 28,74 km. Z toho vyplývá, že tato varianta je nejdelší a proto by neměla představovat primární způsob spojení. Ovšem na rozdíl od varianty 1 a 2 se liší tím, že zde není využito vedení 1206. V případě, že by došlo k poruše na vedení 1206 je tato varianta jediná možná. Proto je možné počítat s touto variantou jako se záložní. [13]

3.5 Parametry venkovních vedení

Pro výpočet ampacity jsou použity provozní parametry zobrazené v tabulce 3.8. Tyto parametry odpovídají běžně dostupným provozním parametrům venkovního vedení používaného na napěťové úrovni 110 kV. Konkrétní parametry použitých vodičů na zmíněných linkách nebyly dostupné.

Parametry venkovních vedení 110 kV						
Provedení	Vodiče AlFe (mm ²)	Stožáry	R ₂₀	X	B	I _N
			[Ω.km ⁻¹]	[Ω.km ⁻¹]	[μS.km ⁻¹]	[A]
Dvojitě	150/6	Soudek	0,2	0,422	2,713	356
	185/6	Soudek	0,156	0,4143	2,766	421
	210/3	Soudek	0,13	0,4023	2,852	451
	240/6	Soudek	0,125	0,407	2,817	490
	450/8	Soudek	0,065	0,3854	2,982	950
	670/8	Donau	0,042	0,3661	3,142	1023

Tabulka 3.8: Parametry venkovních vedení 110 kV, data převzaty z [21, 22]

3.5.1 Vybraný vodič

Zvýrazněný vodič v tabulce 3.8 jsem zvolil jako výchozí pro výpočet ampacity. Pro tento vodič je potřeba znát další technické parametry. V tabulce 3.9 jsou uvedeny jednotlivé parametry vybraného vodiče včetně konstant použitých při výpočtu ampacity.

Odpor vodiče	R ₂₀ [Ω.km ⁻¹]	0,125
Průměr vodiče	D [m]	0,0213
Průřez oceli	S [m ²]	229,1.10 ⁻⁶
Průřez hliníku	S [m ²]	38,6.10 ⁻⁶
Měrná tepelná kap. oceli	c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	477
Měrná tepelná kap. hliníku	c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	897
Hustota oceli	ρ [kg.m ⁻³]	7780
Hustota hliníku	ρ [kg.m ⁻³]	2703
Emisivita	ε _c [-]	0,5
Absorbce	ε _a [-]	0,9

Tabulka 3.9: Parametry vybraného vodiče AlFe260/6 hodnoty převzaty z [23]

Maximální přenášený výkon tímto vodičem je 93,36 MVA na napěťové hladině 110 kV. Výpočet maximálního přenášeného výkonu vychází z rovnice 3.2. Jako jmenovitý proud dosazují 490 A na základě dat uvedených v tabulce 3.8.

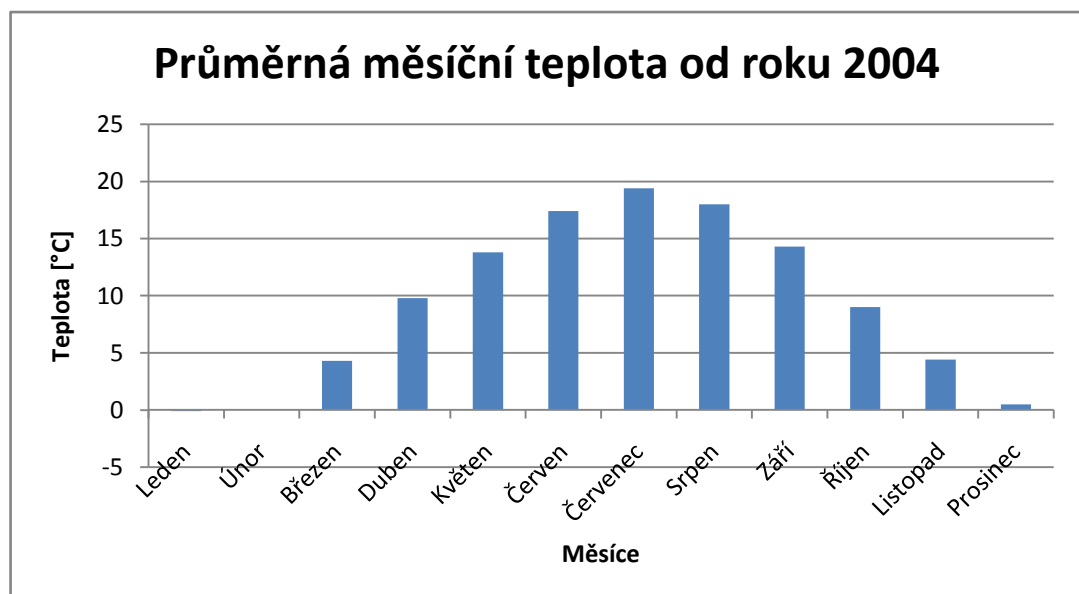
$$S = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 490 = 93,36 \text{ MVA} \quad (3.2)$$

3.6 Průměrná měsíční teplota

Pro výpočet ampacity je zapotřebí znát aktuální okolní teplotu. V této modelové situaci vycházím z průměrných hodnot teploty naměřených meteorologickou stanicí Plzeň Mikulka. Hodnoty zobrazené v tabulce 3.10 zohledňují průměrnou teplotu na území města Plzně od roku 2004, kdy byla meteorologická stanice vybudována.

Měsíc	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen
Průměrná teplota [°C]	-0,1	0	4,3	9,8	13,8	17,4
Měsíc	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
Průměrná teplota [°C]	19,4	18	14,3	9	4,4	0,5

Tabulka 3.10: Průměrná měsíční teplota v Plzni od roku 2004 data převzata z [24]



Obrázek 3.7: Průměrná měsíční teplota na území města Plzně

3.7 Ampacita linky

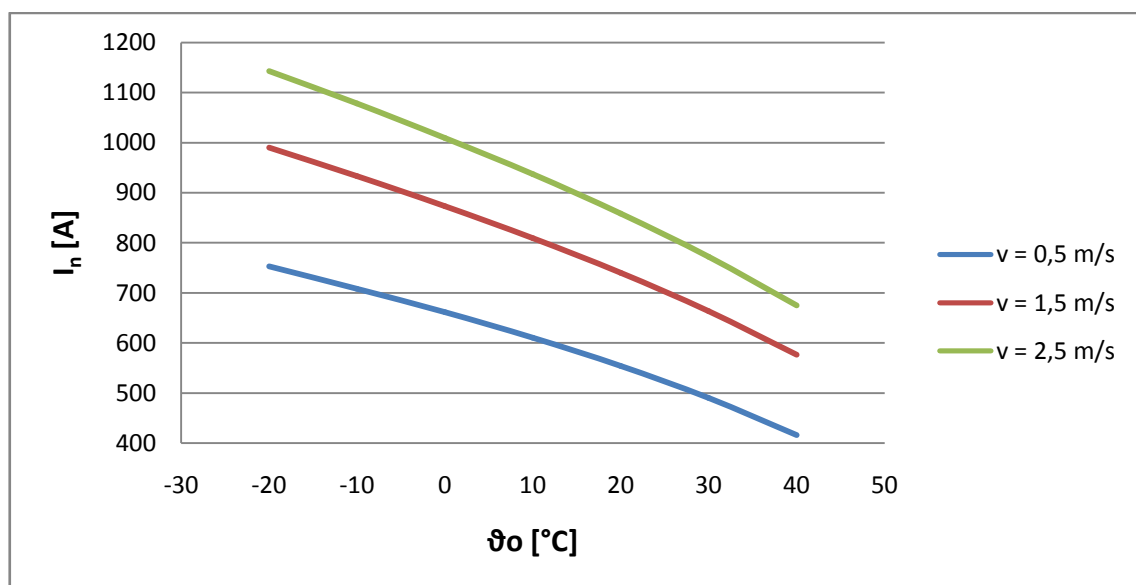
Pro výpočet ampacity vycházím ze vztahu 2.25. Vyjádřením a dosazením dílčích výkonů vznikne vztah 3.3.

$$I = \sqrt{\frac{\alpha\pi D(\vartheta_v - \vartheta_0) + \varepsilon_e\pi\rho D(\vartheta_v^4 - \vartheta_0^4) - \varepsilon_a DI_s}{R_{ac}}} [A] \quad (3.3)$$

Ampacita je vypočtena pro již zmíněný vodiče AlFe 240/6 s parametry uvedenými v tab. 3.9 a výše uvedenou průměrnou měsíční teplotou v Plzni. V prvním případě je ampacita vyjádřena pro rychlost větru 0,5 m/s a proměnlivou intenzitu slunečního záření 0 až 900 W.m⁻². V druhém případě pak pro konstantní intenzitu slunečního záření 1000 W.m⁻² a proměnlivou rychlost větru 0,5 až 2,5 m/s. V obou případech je počítáno s maximální dovolenou provozní teplotou vodiče 80°C.

3.7.1 Vliv okolní teploty

Na obrázku 3.8 je zobrazen vliv okolní teploty na maximální dovolený proud protékající vybraným vodičem při proměnlivé rychlosti větru a zachování maximální provozní teploty vodiče 80 °C. Jmenovitá hodnota proudu pro tento vodič je 490 A při dodržení maximální dovolené provozní teploty. Z obrázku vyplývá, že tato hodnota byla stanovena pro okolní teplotu 30 °C a rychlost větru 0,5 m/s. Pokud je vodič provozován v jiných podmínkách je možné proudovou zatížitelnost zvýšit či snížit dle obrázku 3.7.



Obrázek 3.8: Vliv okolní teploty na maximální dovolený proud vodičem

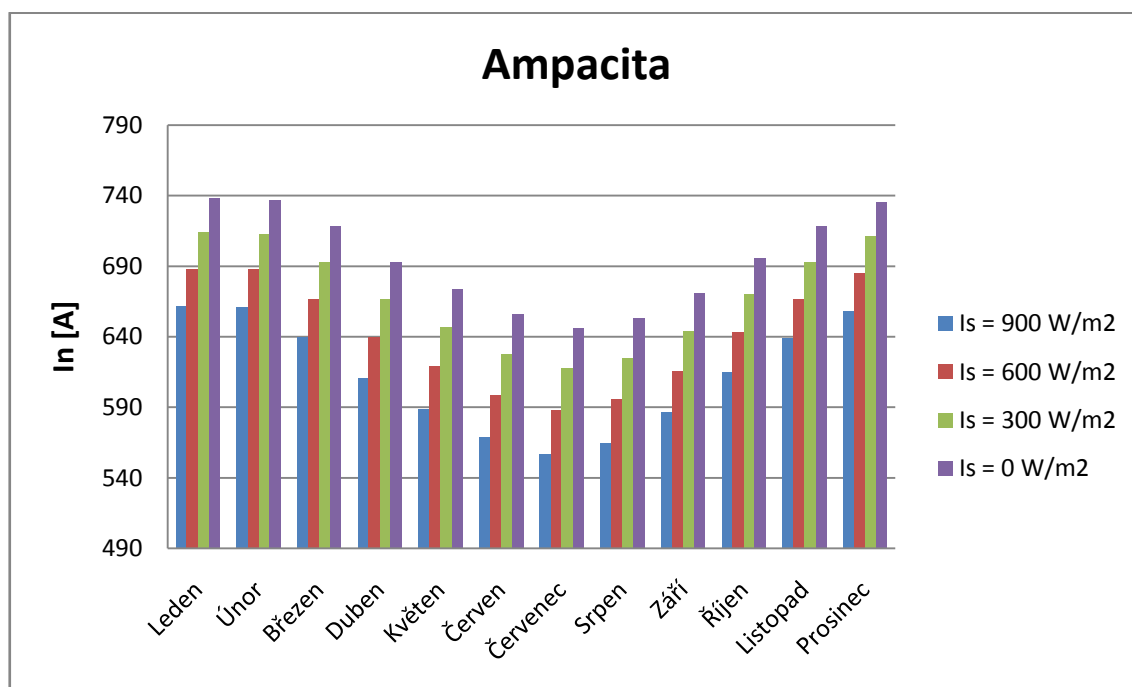
3.7.2 Stav 1

Použité okolní podmínky:

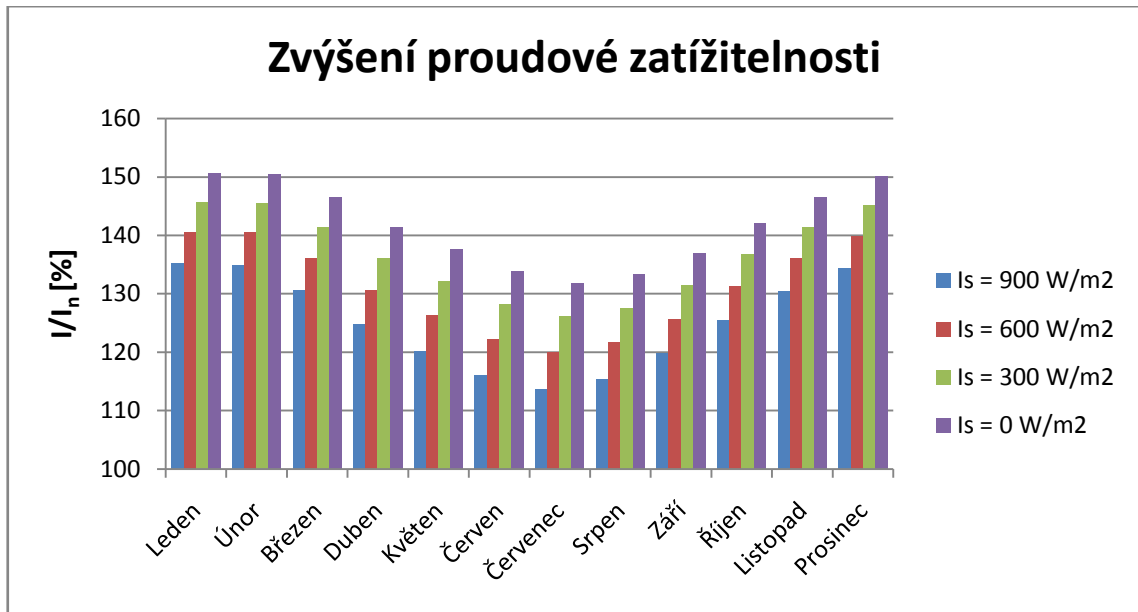
Rychlost větru	v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	0,5
Intenzita slunečního záření	I_s [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	0; 300; 600; 900

Tabulka 3.11: Podmínky použité pro výpočet ampacity - stav 1

V tomto uvažovaném stavu počítám s podmínkami uvedenými v tab. 3.11. Proměnlivá sluneční intenzita znázorňuje vliv oblačnosti na výslednou ampacitu za dané teploty. Zvolená rychlost větru spadá dle Beaufortovy stupnice do kategorie vánku a nejvíce odpovídá povětrnostním podmínkám v Plzni v průběhu celého roku. Na obrázku 3.9 jsou absolutní hodnoty ampacity, kterých je možné dosáhnout v jednotlivých měsících. Obrázek 3.10 znázorňuje procentuální zvýšení proudové zatížitelnosti v průběhu roku. Z obrázku je patrné, že v tomto namodelovaném stavu lze dosáhnout zvýšení proudové zatížitelnosti až o 50 % oproti jmenovité hodnotě proudu 490A. Dle mého názoru tento provozní stav více zobrazuje možnost dlouhodobějšího zvýšení proudové zatížitelnosti než stav 2.

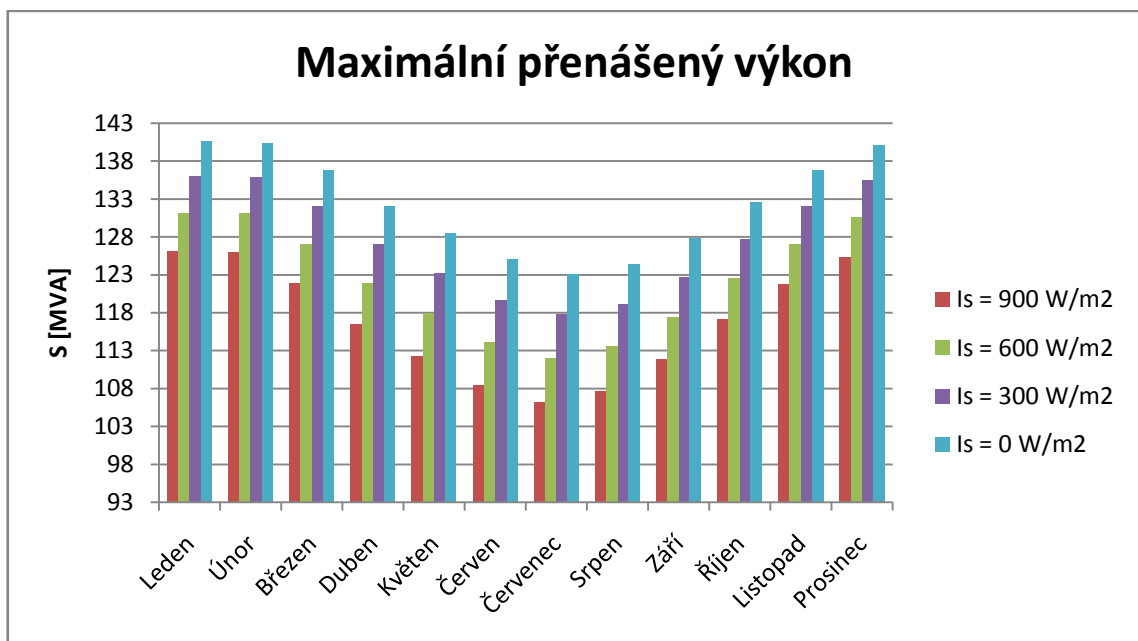


Obrázek 3.9: Dosažitelná ampacita vedení dle uvažovaných podmínek, referenční hodnota 490 A

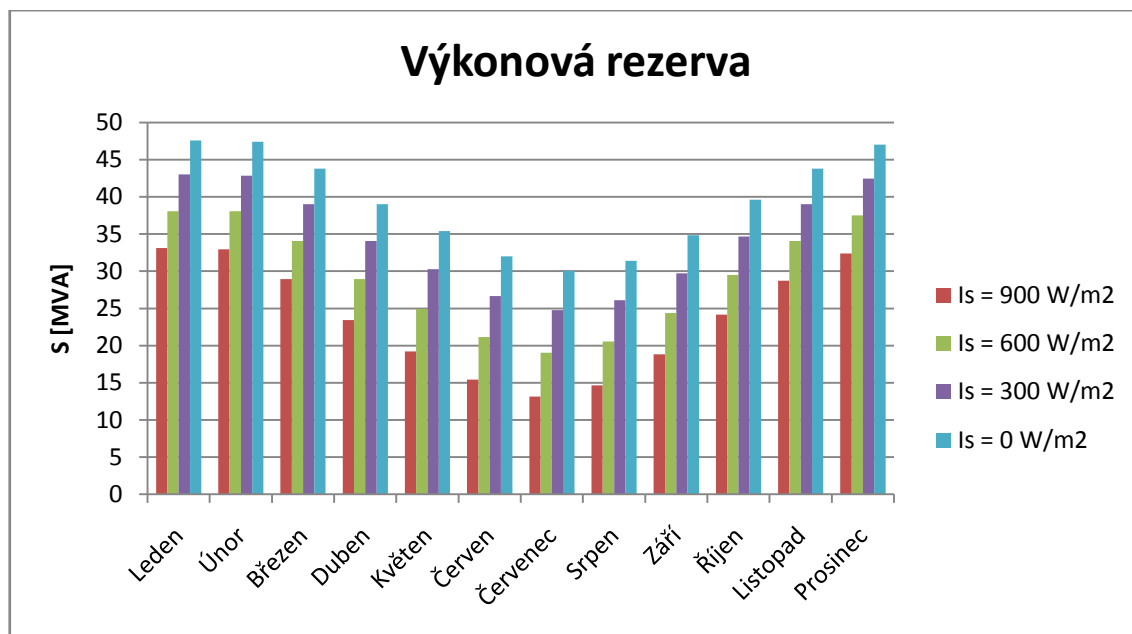


Obrázek 3.10: Procentuální možné zvýšení proudové zatížitelnosti, referenční hodnota 490 A

Pro výpočet výkonové rezervy vycházím ze získaných hodnot ampacity v jednotlivých měsících. Maximální zdánlivý výkon přenášený vodičem počítám podle rovnice 3.2 a výsledné hodnoty jsou zobrazeny v obrázku 3.11. Výkonová rezerva (obrázek 3.12) je spočítána jako rozdíl mezi maximálním přenášeným výkonem v daný měsíc a výkonem 93 MVA odpovídající jmenovitému proudu 490 A.



Obrázek 3.11: Maximální možný přenášený výkon dle ampacity vedení



Obrázek 3.12: Výkonová rezerva za daných podmínek, referenční hodnota 93 MVA

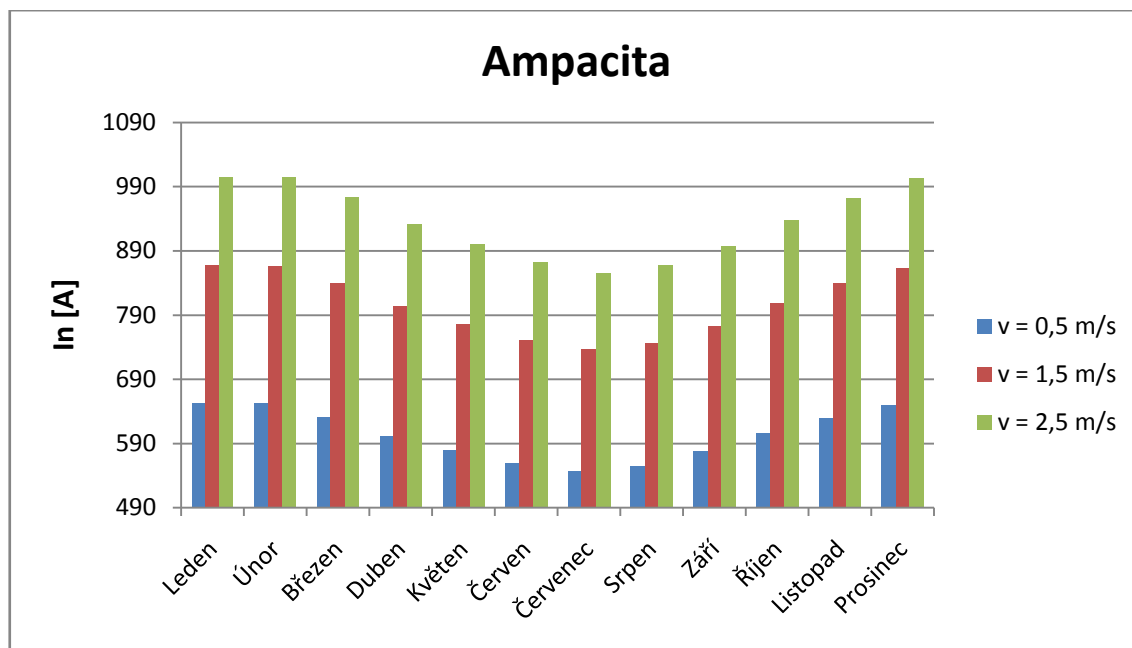
3.7.3 Stav 2

Použité okolní podmínky:

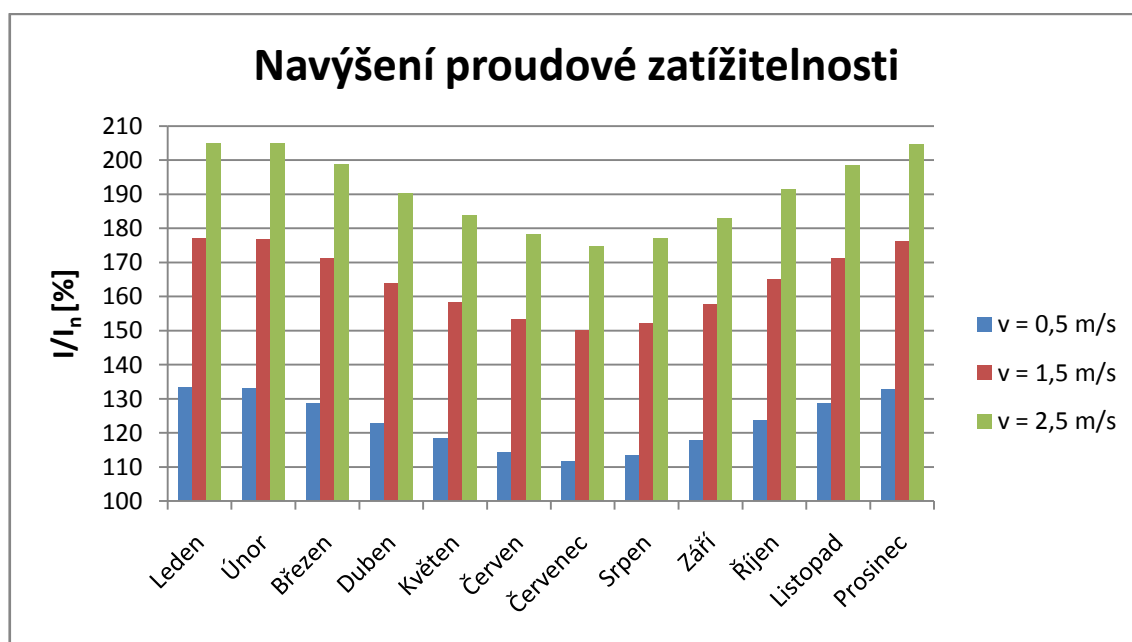
Rychlost větru	v [m.s ⁻¹]	0,5; 1,5; 2,5
Intenzita slunečního záření	I_s [W.m ⁻²]	1000

Tabulka 3.12: Podmínky použité pro výpočet ampacity - stav 2

Na rozdíl od předchozího uvažovaného stavu, zde počítám s konstantní intenzitou slunečního záření a proměnlivou rychlostí větru. Intenzita 1000 W.m⁻² odpovídá velice jasnému dni bez oblačnosti. Výsledné hodnoty ampacity v průběhu roku jsou zobrazeny na obrázku 3.13. V tomto případě je možné zvýšit proudovou zatížitelnost až o 100 % dle obrázku 3.14. Tento uvažovaný provozní stav však neodpovídá možnému dlouhodobému zatížení. Vzhledem k problematice měření rychlosti větru po celé délce vedení a velké proměnlivosti větru lze tento nárůst proudové zatížitelnosti považovat v nejlepším případě za velice krátkodobý.

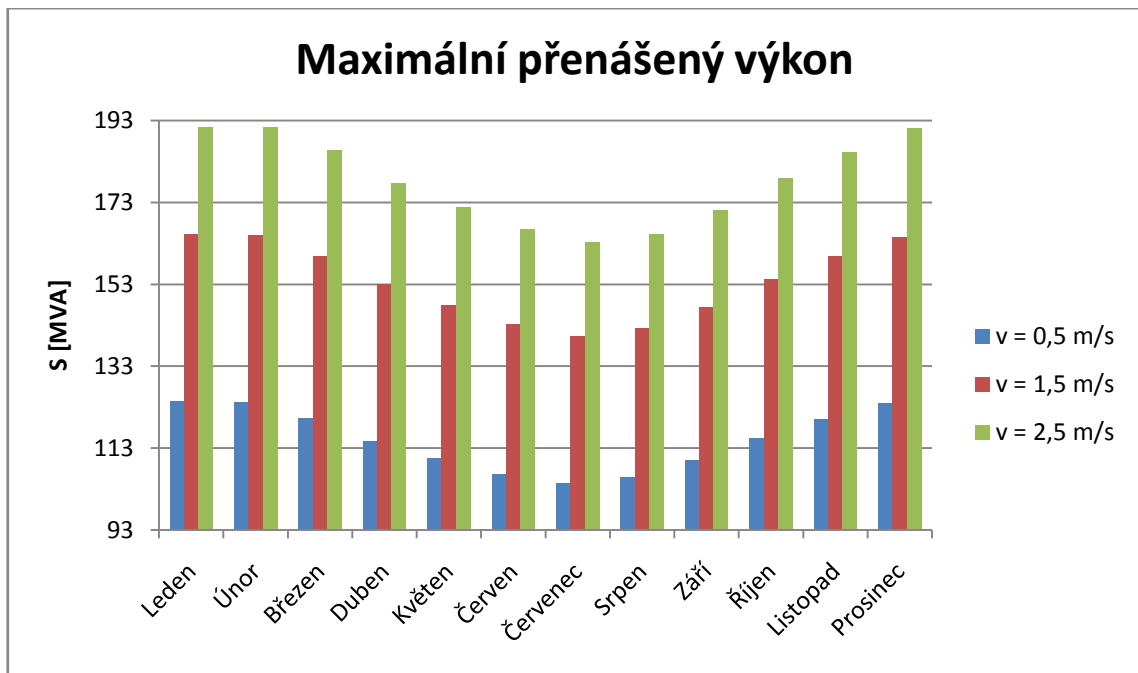


Obrázek 3.13: Dosažitelná ampacita vedení dle uvažovaných podmínek, referenční hodnota 490 A

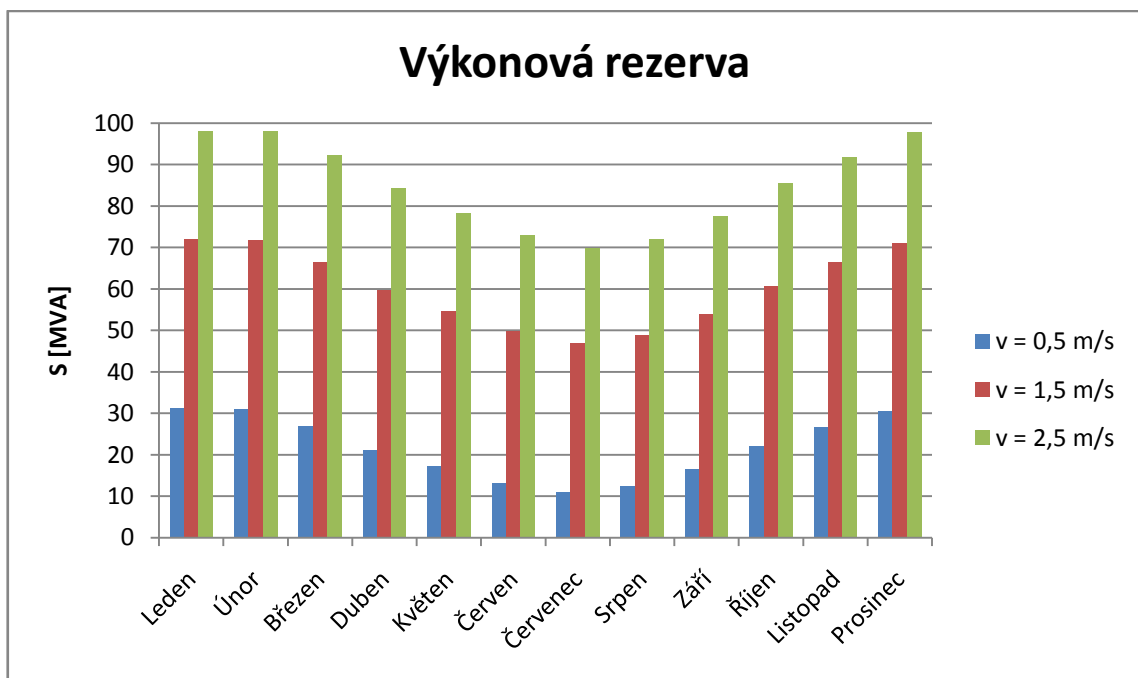


Obrázek 3.14: Procentuální možné zvýšení proudové zatížitelnosti při proměnlivé rychlosti větru, referenční hodnota 490 A

Stejně jako v předchozím případě počítám maximální přenášený výkon vedením (obrázek 3.15) a tím i výkonovou rezervu (obrázek 3.16) na základě hodnot ampacity v průběhu roku. Maximální přenášený výkon je spočítaný podle rovnice 3.2 a výkonová rezerva je vyjádřena od referenční hodnoty 93 MVA, která odpovídá jmenovitému proudu 490 A.



Obrázek 3.15: Maximální možný přenášený výkon dle ampacity vedení



Obrázek 3.16: Výkonová rezerva za daných podmínek, referenční hodnota 93 MVA

3.8 Možné extrémní situace

Výše uvedené hodnoty ampacity jsou vypočteny na základě průměrné měsíční teploty. Takto vypočtené hodnoty podávají sice ucelenější představu o možném nárůstu ampacity, ale rád bych uvedl i hodnoty ampacity v extrémních podmínkách, které byly naměřeny meteorologickou stanicí Plzeň Mikulka.

V roce 2012 bylo naměřeno historické minimum teploty okolí, které činilo $-20,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato hodnota byla naměřena v nočních hodinách, proto ve výpočtu zohledňují intenzitu slunečního záření 0 W/m^2 . Průměrná rychlost větru byla $2,6\text{ m/s}$. Za těchto podmínek hodnota ampacity výše uvedeného vodiče AlFe 240/6 činí 1094 A . Toto odpovídá zvýšení proudové zatížitelnosti o více než 123% . Takový nárůst ampacity je velice líbivý, ovšem pravděpodobnost takových okolních podmínek je velice malá, vzhledem k faktu že v následujících letech byla naměřena nejnižší teplota okolo $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ a rychlost větru se může velice rychle měnit a nemusí být stejná po celé délce vedení.

Naopak v roce 2005 meteorologická stanice Plzeň Mikulka naměřila teplotu $38,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, která představuje historické maximum. Již na první pohled je zcela zřejmé, že tato hodnota je vyšší než hodnota použitá při návrhu zatížitelnosti vodiče dle normy. Předpokládám, že tato teplota byla naměřena při maximální intenzitě slunečního záření 1000 W/m^2 a rychlosti větru $0,5\text{ m/s}$, které odpovídá mírnému vánku. Pokud vyjádříme hodnotu ampacity na základě předpokládaných podmínek výsledná hodnota činí 416 A . Tato hodnota je nižší, než dovolený proud vodičem uvedený v tabulce 3.8. Při takovýchto podmínkách je proudová zatížitelnost vodiče nižší téměř o 15% , tak aby bylo zachováno kritérium dovolené provozní teploty vodiče $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato hodnota okolní teploty byla dosažena pouze jednou, ale v průběhu dalších let byly v letních měsících naměřeny teploty okolo $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $37\text{ }^{\circ}\text{C}$. Proto je zde větší pravděpodobnost výskytu takovýchto okolních podmínek a je třeba počítat se sníženou přenosovou schopností vedení, jinak by mohlo dojít k porušení limitu dovolené provozní teploty vodiče.

3.9 Přínos dynamického zatěžování

V případě uvažování vlivu okolních podmínek na možnou proudovou zatížitelnost vodiče lze získat o více než 100% proudové zatížitelnosti oproti jmenovité hodnotě proudu vybraného vodiče AlFe 240/6. Předchozí modelové stavy detailněji popisují možnou výkonovou rezervu, kterou lze získat.

Vycházíme-li z rovnice 3.2 je maximální možný přenášený výkon vodičem na napěťové hladině 110 kV $93,36\text{ MVA}$. V případě přechodu do ostrovního provozu by bylo nutné přes vedení přenášet alespoň $27,4\text{ MVA}$. Tento výkon představuje spotřebu nezbytných zařízení pro rozběh PT. Na první pohled je jasné, že pro přenos tohoto

výkonu je vedení dostatečně naddimenzováno a není potřeba zohledňovat vliv ampacity. Po nastartování a najezení PT tak, že dokáže zásobovat vlastní spotřebu, mohou oba dva energetické zdroje začít dodávat vyrobený výkon do distribuční sítě.

Celkový možný dodávaný výkon do sítě ze zdroje PE při účinnosti $\cos \varphi = 0,95$ je 103,5 MVA. Tato vypočítaná hodnota však neodpovídá skutečnosti. Zdroj PE může reálně do distribuční sítě dodávat výkon maximálně 100 MVA z důvodu výkonu instalovaného transformátoru, který činí právě 100 MVA. Vzhledem k potřebě případné regulační rezervy však energetický zdroj nebude dodávat 100 % svého výkonu do distribuční sítě. Při ostrovním provozu lze předpokládat, že zdroj bude dodávat kolem 90 % svého jmenovitého výkonu tedy 90 MVA.

Zdroj PT může do distribuční sítě dodávat výkon 131 MVA i tento výkon je počítán s účinností $\cos \varphi = 0,95$. Stejně jako v předchozím případě i zde nelze počítat se situací, že PT bude do sítě dodávat 100 % svého instalovaného výkonu. I zde je nutné udržovat určitou rezervu z důvodu případné regulace. Lze říci, že i zde bude v tomto výjimečném stavu postačovat 10% rezerva. Proto možný dodávaný výkon do distribuční sítě bude 117,9 MVA. Celkem by tedy tyto dva energetické zdroje mohli dodávat 207,9 MVA a zároveň mít deset procent výkonu k dispozici pro případnou regulaci.

V případě, že oba zdroje budou do distribuční sítě dodávat 90 % svého jmenovitého výkonu, pak již má smysl uvažovat vliv ampacity. Pokud by došlo k rozpadu přenosové soustavy a veškerý výkon, nutný k jejímu obnovení, který mohou tyto dva lokální zdroje dodat, by byl přenášen výše zmíněnými vedeními na napěťové úrovni 110 kV do rozvodny Chrást nebo Přeštice. Ačkoliv jsou linky dvojité, tak ve výchozí situaci by nebylo možné veškerý vyrobený výkon dodat do těchto rozvodů, protože dle návrhu na nejhorší provozní podmínky vodiče nemohou tento výkon přenášet, aniž by byla porušena podmínka, že teplota vodiče nesmí překročit 80 °C. Pokud při výpočtech výkonové rezervy vedení budeme vycházet z měření okolních podmínek v reálném čase, pak modelové situace ukazují, že lze v průběhu roku získat dostatečnou výkonovou rezervu, aby bylo možné přenášet takový výkon a zároveň nepřekročit maximální dovolenou provozní teplotu vodiče 80 °C.

Přínos dynamického zatěžování může být i v situaci, kdy není potřeba přenášet velký výkon a hledat možnou výkonovou rezervu. Pokud budeme uvažovat vliv reálných provozních podmínek a budeme mít k dispozici online monitoring, pak budeme znát reálné zatížení vodiče a jeho teplotu. Na základě skutečné provozní teploty vodiče je možné lépe zhodnotit životnost vodiče a optimalizovat případnou výměnu.

Závěr

V diplomové práci byla řešena aktuální problematika dynamického zatěžování elektrických vedení. Práce je rozčleněna do tří kapitol.

V první kapitole jsou detailně popsány možnosti navýšení přenosové kapacity elektrického vedení. Jde o metody založené na zvýšení dovoleného proudu, změnu napěťové hladiny linky nebo kombinaci obou možností. V rámci metody zvýšení dovoleného proudu jsou zde popsány způsoby zvýšení přenosové kapacity pomocí zachování vodiče, výměny vodiče a výstavby nové linky. Přínos jednotlivých způsobů a jejich ekonomická náročnost je popsána v jednotlivých podkapitolách.

V druhé kapitole je popsán princip dynamické zatížitelnosti vedení. Cílem dynamického zatěžování je využívat plný potenciál linky na základě proměnlivých provozních podmínek, které ovlivňují provozní teplotu vodiče. Tím se zcela odlišuje od stávajících norem, které zatížitelnost linky určují na základě nejhorších možných provozních podmínek, které ovšem nastávají během roku maximálně v rámci desítek hodin a tím potenciál vedení zůstává nevyužit. Protože v rámci dynamického zatěžování je zapotřebí znát teplotu vodiče, je součástí této kapitoly i výčet způsobů měření teploty vodičů přímo pomocí teplotních sensorů či nepřímo za pomoci měření průřezu vodičů nebo měření okolních podmínek. Dále je v této kapitole uveden teoretický model výpočtu oteplení vodiče na základě bilanční rovnice v ustáleném či dynamickém stavu. A také je zde uveden vztah pro výpočet ampacity v ustáleném stavu na základě proměnlivých okolních podmínek.

V třetí kapitole je řešena modelová situace přechodu Plzně na ostrovní režim. Je zde popis energetických zdrojů nacházejících se na území města Plzně. Rozbor potenciálních kritických linek distribuční soustavy. Jedná se o linky na napěťové úrovni 110 kV spojují dva konvenční energetické zdroje Plzeňskou energetiku a Plzeňskou teplárenskou. Součástí této kapitoly je výpočet ampacity v průběhu celého roku na základě průměrné měsíční teploty v Plzni. Ampacita je vypočtena pro dva modelové stavy. První stav zohledňuje proměnlivou intenzitu slunečního záření a konstantní rychlost větru 0,5 m/s. V druhém stavu je počítáno s konstantní intenzitou slunečního záření $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^2$ a proměnlivou rychlostí větru. Výsledky výpočtů jsou zanesené

v grafech. Na základě vypočtené ampacity je vyjádřena výkonová rezerva v jednotlivých měsících. Zobrazené výsledky odpovídají teoretickým předpokladům, že největší výkonovou rezervu lze získat v zimních měsících, kdy dochází k velkému ochlazení vodičů, zatímco v letních měsících je nárůst výkonové rezervy skromnější, protože okolní teplota se více blíží normovaným hodnotám.

Na základě teoretických poznatků i praktických výpočtů jsem došel k závěru, že je žádoucí uvažovat vliv okolních podmínek na možnou proudovou zatížitelnost i na úrovni distribuční soustavy. Pokud bychom zohledňovali proměnlivé provozní podmínky, bylo by možné získat určitou výkonovou rezervu pro řešení krizových situací nebo pro případný rozvoj energetických zdrojů na území města Plzně. Dále by bylo možné lépe zhodnotit životnost vodičů a optimalizovat jejich případné výměny.

V rámci závěru bych rád upozornil na možný budoucí vývoj v problematice dynamického zatěžování. Pokud počítáme s vlivem proměnlivých provozních podmínek, můžeme dosáhnout zvýšení ampacity. Ovšem toto zvýšení s sebou může přinášet určité problémy s ohledem na další prvky v síti. Například zvýšený proud bude velice nepříznivě ovlivňovat ochrany v síti, které nejsou nastavené na proměnlivý maximální dovolený proud. Právě oblast vlivu dynamického zatěžování na chod a nastavení ochran bych viděl jako další možnou etapu řešení této problematiky.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Working Group B2/C1.19. *Increasing capacity of overhead transmission lines*. CIGRE, 2010.
- [2] *GUIDE FOR SELECTION OF WEATHER PARAMETERS FOR BARE OVERHEAD CONDUCTOR RATINGS* [online]. 2006[cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://www.cigre.org/Menu-links/Publications>
- [3] TLUSTÝ, Josef, Jan KYNCL, Ladislav MUSIL, Jan ŠPETLÍK, Jan ŠVEC, Petr HAMOUZ, Zdeněk MÜLLER a Miroslav MÜLLER. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [4] Podpůrné služby. In: *Kodex přenosové soustavy* [online]. 2014 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: https://www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex/Documents/%C4%8C%C3%A1stII_14_fin.pdf
- [5] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika* [online]. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 264 s. [cit. 2015-02-11]. ISBN 978-80-01-04938-9. Dostupné z: http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-3-Elektrotepelná.pdf.
- [6] Working Group 22.12. *Thermal behaviour of overhead conductors*. CIGRE, 2002.
- [7] IEEE. *Standard for calculating the current-temperature of bare overhead conductors: IEEE Std 738-2006*. New York: IEEE, 2007. ISBN 0-7381-5271-4.
- [8] Elektrická energie. *Magistrát města Plzně Odbor správy infrastruktury, Energetika* [online]. 2015 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://energetika.plzen.eu/energetika-ve-meste/elektricka-energie/elektricka-energie.aspx>
- [9] Vliv fotovoltaických elektráren na provoz distribuční soustavy. *Elektrorevue* [online]. 2011, č. 3 [cit. 2015-01-04]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/download/vliv-fotovoltaickych-elektren-na-provoz-distribucni-soustavy/>
- [10] ŠNAJDR, Jaroslav. *Ohřev vodičů přenosových linek v dynamickém režimu*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta. Vedoucí práce prof. ing. Zdeněk Vostracký, DrSc., dr. h. c.
- [11] BÖHM, Václav, Antonín POPELKA a Zdeněk VOSTRACKÝ. *Konference ČK CIRED. Ampacita elektrických vedení*. 2010, č. 3.
- [12] TLUSTÝ, Josef, Jan KYNCL a Jan ŠVEC. *Rozvoj, spolehlivost a bezpečnost elektroenergetických systémů (2005-2011). Proudová zatížitelnost lan AlFe*. 2005, č. 1.
- [13] MUŽÍK, Václav. *Propojení elektroenergetických zdrojů v plzni - ostrovní provoz* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2015-03-13]. Dostupné z: z databáze ZČU. Diplomová práce. Západočeská univerzita. Vedoucí práce Prof. Ing. Zdeněk Vostracký, Dr.Sc., dr.h.c.
- [14] Schopnost ostrovního provozu. *ČEPS* [online]. 2015 [cit. 2015-03-13]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Podpurne-sluzby/KategoriePpS/Stranky/OP.aspx>
- [15] *Plzeňská energetika* [online]. 2011 [cit. 2015-03-13]. Dostupné z: <http://www.pe.cz/>
- [16] *Plzeňská teplárenská* [online]. 2006 [cit. 2015-03-13]. Dostupné z: <http://www.pltep.cz/>
- [17] OUHRABKA, Jan. *Optimalizace vlastní spotřeby tepelné elektrárny*. Plzeň, 2013. Dostupné z:

- <https://portal.zcu.cz/StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=53555>. Diplomová práce. ZČU.
- [18] KAPLAN, A. Analýza energetické bilance v teplárně a návrh na inovaci. *Electroscope* [online]. 2012, III [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/5898/r6c4c5.pdf?sequence=1>
- [19] *Schéma sítí ES ČR*. 2011. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/24263591/8113120510m.pdf/9d2f90cf-f789-4252-86bb-7b07117fb9dd?version=1.0>
- [20] ČSN 50341-1. *Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45 kV*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [21] Projektování energetických celků. *Portál ZČU* [online]. 2014 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: https://courseware.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=107100
- [22] *Vysoká škola báňská* [online]. 2014 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: http://fe1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/katalogy/parametry.doc
- [23] AlFe lana. *M&M kabely* [online]. 2012 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.mamkabely.cz/alfelana.php>
- [24] Plzeň Mikulka. *IN-počasi* [online]. 2015 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: http://www.in-pocasi.cz/archiv/stanice.php?stanice=plzen_mikulka
- [25] Pyranometr SG002. 2014. *Fiedler elektronika pro ekologii* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.fiedler-magr.cz/cs/produkty/snimace-meteorolog-velicin/globalni-radiace/pyranometr-sg002>
- [26] NCERA-101. 2015. *Utah State University* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://cpl.usu.edu/htm/ncera-101-package>
- [27] Ampacimon. 2015. *LinkedIn* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/company/ampacimon>
- [28] Valcap. 2015. *NKTcables* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.andeswireless.com/descargas/esp/VALCAP.pdf>

