



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

PROVOZOVÁNÍ VLOŽENÝCH KABELOVÝCH VEDENÍ DO DS VVN

OPERATION OF EMBEDDED CABLE LINES INTO HV DISTRIBUTION GRID

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Černý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Tomáš Černý

ID: 186043

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Provozování vložených kabelových vedení do DS vvn

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popis technického provedení vedení vn a vvn distribučních sítí
2. Představení technického řešení úseku kabelového vedení vloženého mezi venkovní vedení distribuční soustavy vvn
3. Zhodnocení přínosů, rizik a dopadů provozování těchto úseků z pohledu chránění, kapacitních proudů, přechodových dějů apod.
4. Provedení základní ekonomické analýzy

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Je vhodné využít technických norem, odborných článků databází IEEE, Web of Science, SCOPUS a jiné. Další literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 29.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

ČERNÝ, T. Provozování vložených kabelových vedení do DS vvn. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Provozování vložených kabelových vedení do distribuční soustavy VVN jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 23.5.2018

.....

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Petru Křesálkovi ze společnosti ČEZ Distribuce a.s. za odbornou pomoc a poskytnuté materiály použité při tvorbě a zpracování této bakalářské práce. Také chci poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Michalu Ptáčkovi, Ph.D. za pedagogickou pomoc, konzultace a připomínky během tvorby této práce.

V Brně dne: 23.5.2018

.....

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem části kabelového vedení, která je vložena mezi venkovní vedení distribuční soustavy VVN. Podstatou je popis přínosů, rizik a dopadu provozování těchto úseků z pohledu chránění a přechodových dějů. Práce také zahrnuje ekonomické porovnání provozních a pořizovacích nákladů části vedení s vloženým kabelem nebo venkovní linkou. Téma práce zadala společnost ČEZ Distribuce a.s.

KLÍČOVÁ SLOVA: vložené kabelové vedení; velmi vysoké napětí; venkovní vedení; kabelové vedení; ukládání kabelů; ochrany

ABSTRACT

The thesis focuses on a section of cable line inserted into overhead high voltage power line. The essence is a description of the benefits, risks and impacts of the operation of such sections in terms of protection, transition processes. etc. The thesis also includes economical comparison of an acquisition and operating costs of both overhead and cable line. The topic of this thesis was given by ČEZ Distribuce a.s.

KEY WORDS: combined overhead line; mixed overhead line; high voltage; overhead power line; cable line; laying of cables; power-system protection

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD.....	13
2 ELEKTRICKÉ VEDENÍ V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ.....	14
2.1 VENKOVNÍ VEDENÍ.....	14
2.2 KABELOVÉ VEDENÍ	14
2.3 ZÁSADY UKLÁDÁNÍ KABELŮ.....	16
2.3.1 ULOŽENÍ DO PÍSKOVÉHO LOŽE S CEMENTOVOU STABILIZACÍ	17
2.3.2 ULOŽENÍ V KABELOVÝCH CHRÁNIČKÁCH	17
2.3.3 ULOŽENÍ V KABELOVÝCH ŽLABECH	17
2.3.4 PROVOZNÍ VLIVY	17
3 OCHRANY	19
3.1 DISTANČNÍ OCHRANA	19
3.1.1 DOBA VYBAVENÍ DISTANČNÍ OCHRANY	20
3.1.2 CHARAKTERISTIKA DISTANČNÍ OCHRANY	21
3.1.3 CHARAKTERISTIKA ANALOGOVÝCH OCHRAN	22
3.2 ROZDÍLOVÁ OCHRANA.....	22
4 KOMBINOVANÉ VEDENÍ VVN	24
4.1 VRCHNÍ VEDENÍ.....	24
4.2 PODZEMNÍ VEDENÍ.....	25
4.3 VLOŽENÉ KABELOVÉ VEDENÍ DO VENKOVNÍHO VEDENÍ.....	25
4.4 CHRÁNĚNÍ KOMBINOVANÉHO VEDENÍ	27
4.4.1 PROBLEMATIKA OZ	27
4.4.2 URČENÍ MÍSTA PORUCHY	27
4.5 UKÁZKA TECHNOLOGIE NA TRASE ČESKÁ LÍPA – VARNSDORF	29
4.5.1 ZDŮVODNĚNÍ STAVBY	29
4.5.2 POPIS STAVBY	29
5 STANOVENÍ PROVOZNÍCH A POŘIZOVACÍCH NÁKLADŮ.....	31
5.1 ZÁSADY DIMENZOVÁNÍ VODIČŮ.....	31
5.2 DIMENZOVÁNÍ KABELŮ 110 KV	32
5.3 NÁVRH PRŮŘEZU KABELOVÉHO VEDENÍ.....	32
5.4 ZTRÁTY VÝKONU	33
5.5 KAPACITNÍ PROUDY	35
5.6 ÚDRŽBA PROVOZOVANÝCH ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ	36
5.6.1 VENKOVNÍ VEDENÍ	36
5.6.2 KABELOVÉ VEDENÍ	37
5.7 POROVNÁNÍ PROVOZNÍCH NÁKLADŮ.....	37
5.8 POŘIZOVACÍ NÁKLADY	38

6 ZÁVĚR.....	40
POUŽITÁ LITERATURA	41
PŘÍLOHA A – SCHÉMA ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY ČR	42
PŘÍLOHA B – UKÁZKA ZE STAVBY KOMBINOVANÉHO VEDENÍ	43
PŘÍLOHA C – TRASA VEDENÍ ČESKÁ LÍPA – VARNSDORF	44
PŘÍLOHA D – KATALOGY VÝROBCŮ KABELU	46

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 – Lano AlFe [3]</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2-2 – Průřez kabelovým vedením 110 kV [8].....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2-3 – Uložení v pískovém loži v plochém a trojúhelníkovém uspořádání [3].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 3-1 – Princip a zapojení distanční ochrany s označením místa poruchy [7]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3-2 – Nastavení impedančně časové charakteristiky [4].....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3-3 – Ideální charakteristika distanční ochrany [4].....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3-4 – Vysunutá a základní charakteristika analogové ochrany [4].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-5 – Principiální schéma rozdílové ochrany [7].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-6 – Charakteristika rozdílové ochrany [7]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4-1 – Příklady konfigurací u standardních stožárů [6]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 4-2 – Znázornění provedení vloženého vedení [6]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 4-3 – Jednopolové schéma kombinovaného vedení [6]</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 4-4 – Nelineární zkratová impedance cross-bondovaného kabelu [6]</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 4-5 – Průběh skutečné a naměřené hodnoty impedance (vzdálenosti) [9]</i>	<i>28</i>
<i>Obr. A-1 – Elektrizační soustava ČR [6]</i>	<i>42</i>
<i>Obr. B-1 – Pokládka kabelu VVN [6]</i>	<i>43</i>
<i>Obr. B-2 – Praktický příklad provedení přeložky VVN [6].....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. C-1 – Celková trasa vedení [6].....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. C-2 – Schéma zapojení nového vedení do stávající sítě 110kV [6]</i>	<i>45</i>
<i>Obr. D-1 – Katalog výrobce Brugg cables [12]</i>	<i>46</i>
<i>Obr. D-2 – Katalog výrobce NKT cables [6]</i>	<i>47</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. č. 4-1 – Porovnání kabelového a venkovního vedení modifikovaná [5]</i>	26
<i>Tab. č. 5-1 – Porovnání ztrát výkonu</i>	34
<i>Tab. č. 5-2 – Porovnání provozních nákladů</i>	34
<i>Tab. č. 5-3 – Porovnání kapacitních proudů</i>	35
<i>Tab. č. 5-4 – Pochůzková prohlídka venkovního vedení</i>	36
<i>Tab. č. 5-5 – Lezecká prohlídka venkovního vedení</i>	36
<i>Tab. č. 5-6 – Pochůzková prohlídka kabelového vedení</i>	37
<i>Tab. č. 5-7 – Pořizovací náklady venkovního vedení</i>	38
<i>Tab. č. 5-8 – Pořizovací náklady kabelového vedení</i>	39

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

NN	nízké napětí	
VN	vysoké napětí	
VVN	velmi vysoké napětí	
ZVN	zvlášť vysoké napětí	
ENTSO-E	Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny	
PVC	polyvinylchlorid	
XLPE	zesítný polyetylen	
PTP	přístrojový transformátor proudu	
PTN	přístrojový transformátor napětí	
OP	ochranné pásmo	
TR	transformovna	
OZ	opětovné zapnutí	
ERÚ	Energetický regulační úřad	
ω	úhlová frekvence	[s ⁻¹]
L	indukčnost	[H]
C	kapacita	[F]
R	činný odpor	[Ω]
Z_k	zkratová impedance	[Ω]
U_k	napětí nakrátko	[V]
I_k	proud nakrátko	[A]
R_k	reálná složka zkratové impedance	[Ω]
R_{ved}	měrná rezistence	[Ω /km]
X_k	imaginární složka zkratové impedance	[Ω]
X_{ved}	měrná reaktance	[Ω /km]
d	délka vedení	[m]
φ_k	fázový úhel linky vedení	[°]
$\cos\varphi$	účinník	[°]
ΔU	úbytek napětí	[V]
S	průřez	[mm ²]
ΔP_{zt}	ztráty činného výkonu	[W]
Δp_{zt}	měrné ztráty činného výkonu	[W/km]
ΔW_z	ztrátová energie	[MWh/rok]

N_p	provozní náklady	[Kč/rok]
i_c	poměrný kapacitní proud	[A/km]
I_c	kapacitní proud	[A]

1 ÚVOD

Distribuční soustava společně s přenosovou soustavou tvoří tzv. elektrizační soustavu. Je to vzájemně propojený soubor přístrojů a zařízení sloužící k výrobě, distribuci a spotřebě elektrické energie. Slouží k rozvodu elektrické energie předepsané kvality po celé republice až ke koncovým spotřebitelům. Kvalitu energie určuje frekvence, velikost a symetrie napětí v 3f soustavě. Propojení elektrizační soustavy je uvedeno v příloze A.

Přenosová soustava je tvořena okružním vedením 400 kV (někde i 220 kV) a tvoří tak páteřní síť elektrizační soustavy. Slouží k přenosu velkých výkonů na velké vzdálenosti. Provozovatelem této soustavy je společnost ČEPS, a.s., která zároveň provádí údržbu, řízení a regulaci (např. frekvence, jalového výkonu). Přenosové soustavy většiny evropských zemí jsou vzájemně propojeny a tvoří tak nadnárodní soustavu ENTSO-E, která slouží k výměně energie v rámci regulace a obchodování s elektrickou energií.

Distribuční soustava zajišťuje dodání elektrické energie ke spotřebitelům. Také slouží pro připojení elektráren malých výkonů (např. větrné, fotovoltaické elektrárny). Tato soustava je tvořena napětími 110 kV hladině VVN, napětími 35, 22, 10 a 6 kV na hladině VN a na hladině NN napětím 0,4 kV. V České republice je spravována třemi společnostmi, na Moravě E.ON Distribuce, a.s., v Čechách ČEZ Distribuce, a.s. a v Praze PREdistribuce, a.s.

Pokud se zaměříme na vedení, tak z technologického a ekonomického hlediska je v současné době stále výhodnější výstavba nového venkovní vedení a tvoří tedy základ distribuční sítě VVN. Náhrada venkovního vedení kabelem VVN je spojena s vysokými pořizovacími náklady a technickými problémy, ale širokou veřejností je tato náhrada vnímána kladně, jelikož kabel položený v zemi nemá takový dopad na vzhled krajiny jako vedení venkovní.

Téma dodala společnost ČEZ Distribuce, a.s. za účelem zpracování technických informací týkající se vloženého kabelového vedení 110 kV do distribuční soustavy.

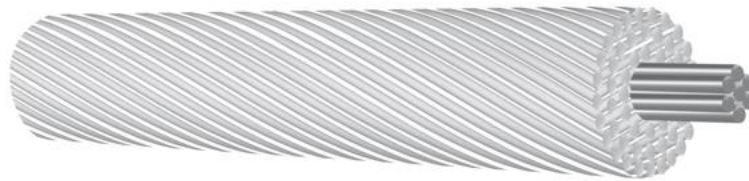
2 ELEKTRICKÉ VEDENÍ V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ

Nejrozšířenější způsob přenosu je pomocí venkovního vedení. Vodiče jsou připevněny na podpěrné body stožáru pomocí izolátorů. Tento druh vedení je nejpoužívanější a také nejlevnější na výstavbu, avšak kvůli některým svým vlastnostem (např. izolační vzdálenosti nebo estetika) nelze použít vždy.

Kabelové vedení se běžně používá na hladině NN a VN, na napětí 110 kV však výjimečně. Ukládají se do země, kabelových kanálů nebo kolektorů. Dalším způsobem provedení je závěsný kabel, který kromě vodičů obsahuje ocelové lano a používá se tak pro odbočky z vedení k jednotlivým spotřebitelům. Obecně je kabelové vedení nejčastějším provedením ve městech, kde jsou kladeny velké nároky na prostor. [1]

2.1 Venkovní vedení

Vedení je tvořeno holými vodiči nejčastěji z hliníku nebo mědi. Ocelohliníkové AlFe lana, jak je naznačeno na obr. 2-1[3], mají ocelové jádro opletené dráty z hliníku a mají tak vyšší mechanickou pevnost. Izolace vedení je provedena pomocí závěsných nebo podpěrných izolátorů, které bývají porcelánové nebo skleněné. Na stožáru jsou vodiče umístěny v jedné rovině nad zemí, u zdvojeného vedení jsou trojfázová vedení umístěná na boku např. ve tvaru soudku. [1]



Obr. 2-1 – Lano AlFe [3]

Vedení 110 kV je na pomezí mezi distribuční a přenosovou soustavou. Je tvořeno tzv. příhradovými stožáry z oceli. Častokrát je vedení provozováno jako zdvojené, to znamená, že na každé straně stožáru vede jedna linka. Síť je provozována jako izolovaná, tudíž nemá uzemněný uzel transformátoru. Na vrcholu stožáru je umístěno zemní lano kombinované s optickým kabelem. Toto lano plní ochrannou funkci – chrání před úderem blesku, optický kabel je využíván pro komunikaci a přenos informací mezi rozvodnami a dispečinkem. [2]

2.2 Kabelové vedení

Nejčastěji je provedeno s hliníkovým nebo měděným jádrem a izolací z PVC. Lze použít i v problematických oblastech (silná námraza, chemicky agresivní ovzduší apod.). Parametry vedení závisí na materiálu vodiče a izolace, počtu žil a provedení ochranného pláště proti poškození. Oproti venkovnímu vedení mají menší indukčnost L díky menším vzdálenostem mezi kabely, vyšší kapacitu C (její velikost závisí na relativní permitivitě izolačního materiálu, stárnutím se jeho vlastnosti mění), jsou méně poruchové, ale lokalizace poruchy je obtížnější. Vysoké pořizovací náklady jsou dané zejména pořizovací cenou kabelu a výkopovými pracemi. [1]

Nyní se zaměříme na kabelové vedení VVN. Tato technologie se používá ojediněle na několika místech v ČR, momentálně je v provozu jen pár km těchto vedení. Používá se prakticky jen na propojení rozvodn 110 kV ve velkých městech (Praha, Brno), výjimečně lze uplatnit i v jiných oblastech. [2]

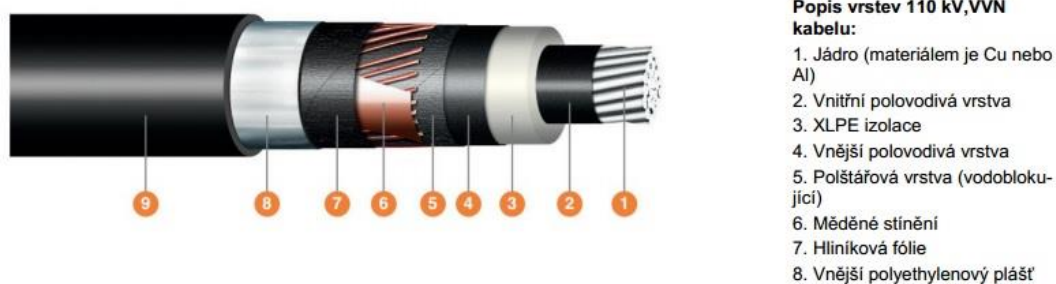
Následující část podkapitoly je čerpána z literatury [3]. Charakteristickou vlastností toho vedení je možnost přenášet velké výkony a větší průchodnost terénem, což je vhodné zejména v hustě zastavených oblastech, jelikož je vedení uloženo do země. Na druhou stranu je tato technologie několikanásobně nákladnější oproti venkovnímu vedení a omezuje použití ve volném terénu.

Kabely se nesmí používat na napětí vyšší, než je jejich jmenovité napětí. Používají se výhradně jednožilové kabely. Jádra vodičů jsou zhotovena z mědi nebo hliníku, jejichž průřez musí být dimenzován tak, aby vyhovoval požadovanému zatížení a zkratové zatížitelnosti tak, aby odpovídal požadovaným zkratovým proudům.

Používají se především kabely s izolací z XLPE (zesíťený polyetylen), jak je naznačeno na obr. 2-2 [8]. Tloušťka izolace musí odpovídat trvalému elektrickému namáhání po dobu životnosti kabelu. Kovové stínění slouží pro odvod svodových kapacitních proudů a vytváří ochranu před nebezpečným dotykem. Základním zapojením toho stínění je jeho uzemnění na obou koncích kabelového vedení, kdy na koncích kabelu není napětí proti zemi, na druhou stranu stínění protéká vyšší indukovaný proud, čímž je snížena zatížitelnost kabelů. Pro omezení ztrát ve stínění, omezení indukovaného napětí a tím pádem i zvýšení zatížitelnosti kabelů lze použít speciální způsoby uzemnění stínění. Jedním takový je použití jednostranného stínění, kdy v kovovém stínění neprotéká indukovaný proud, ale napětí na neuzemněném konci vedení může při zkratu dosáhnout nebezpečných hodnot.

Pro uložení kabelu např. do vody je nutné použít vodotěsný kabel. Podélná vodotěsnost se zajišťuje vodoblokující vrstvou v konstrukci kabelu (např. páska). Příčná ochrana je zajištěna laminovanou Al páskou na stínění z Cu drátů nebo kovovým pláštěm. Pro prostředí bez přítomnosti vody lze použít kabely bez podélné vodotěsnosti.

Podle uložení kabelu se používají dva základní typy pláště. Ten je vybírán podle toho, jestli je kabel uložen v zemi, nebo se nachází v prostorech s přístupem vzduchu (např. kabelové tunely). V takových prostorech se použije kabel s pláštěm nešířící plamen. V případě uložení kabelu přímo v zemi není třeba použít takový plášť.



Obr. 2-2 – Průřez kabelovým vedením 110 kV [8]

Ochrana těchto kabelových vedení se provádí:

- Ochrana zemněním proti nebezpečnému dotyku
- Proti atmosférickému přepětí svodiči přepětí
- Proti přetížení a zkratu distanční a srovnávací ochranou

2.3 Zásady ukládání kabelů

Při ukládání kabelů se vychází se z projektové dokumentace, kde jsou vyřešeny souběhy a křížení s již existujícími sítěmi. Uložení kabelů musí odpovídat normě ČSN 33 2000-5-52 a jejich prostorové uspořádání ČSN 73 6005, které jsou zahrnuty v literatuře [3].

Jednožilové kabely se ukládají v těsném trojúhelníkovém svazku nebo vedle sebe s mezerami. Trojúhelníkové uložení má menší prostorové nároky než ploché uložení, ale vyšší oteplování sousedních žil a menší zatížitelnost. U plochého uspořádání je při poruše menší šance přechodu zemního spojení ve dvou nebo třífázový zkrat. Při větším množství kabelů v trase je třeba snížit zatížení nebo zvětšit jejich vzdálenosti, aby průchodem proudu nedocházelo k vysušování půdy. [3]

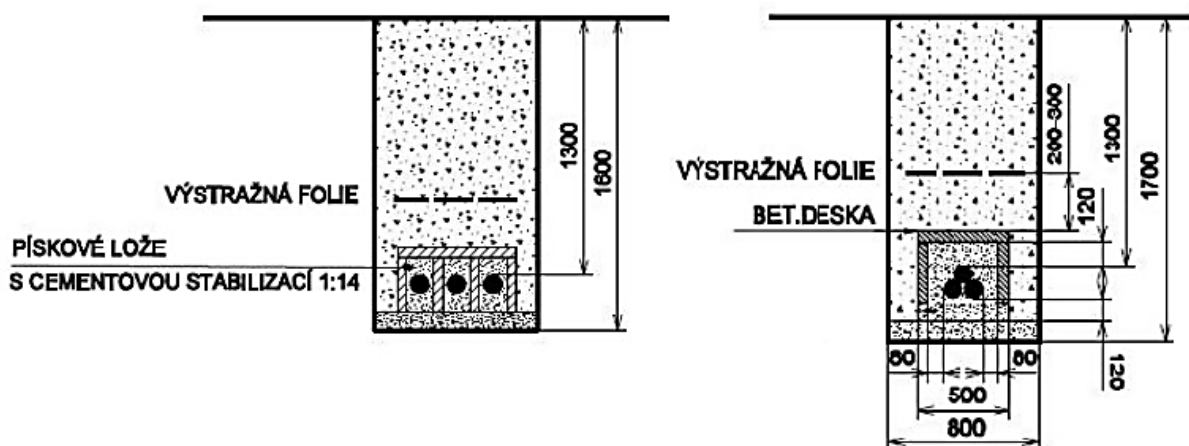
V důležitých bodech trasy se umisťují markery. Tyto body jsou například kabelové spojky, křížení s jinou trasou, místa odbočení nebo vstupy od objektů. Markery jsou pasivní elektronické antény s laděným obvodem o kmitočtu 169,8 kHz a dosahem minimálně 1,5 m. Marker musí být pevný a odolný proti účinkům chemikálií, vody a teplotním změnám. Markery se instalují mezi kabelovou trasu a výstražnou folii v hloubce 1 m. Jelikož se markery používají i pro další druhy podzemních vedení (vody, plyn), je třeba použít kompatibilní lokátor. [4]

Nyní budou detailněji popsány způsoby uložení kabelového vedení do země. Při ukládání kabelů do země se musí dbát na strukturu půdy. Nesmí se pokládat v půdách, které obsahují soli, kyseliny, hnojící látky apod. Pokud půda nevyhovuje, ukládají se kabely do tunelů, kanálů, trubek nebo se jinak chrání před mechanickým a chemickým poškozením. Při pokládání do půdy je proveden výkop kabelové rýhy. Před uložení kabelů je třeba vyčistit dno výkopu od kamenů a pevných částic, aby nedošlo k porušení izolace kabelů. Pokud dojde k souběhu kabelů ve společné rýze, je třeba oddělit kabely od sebe betonovými deskami, případně cihlami. Většinou se však kabely 110 kV neukládají v souběžných trasách, a to zejména kvůli tepelnému namáhání. Pokud však k souběhu dojde, je další trasa kvůli bezpečnosti umístěna ve vzdálenosti 3 m. Kabely se před zасыпáním označí štítky. Konce kabelů musí být chráněny koncovkou proti vniknutí vlhkosti. [3]

Vzhledem k velkému zatížení kabelu je třeba provádět kontrolu oteplení. Měří se pomocí optického vlákna po celé délce kabelu, toto vlákno již může být součástí stínění kabelu nebo může být dodatečně upevněno na plášť kabelu. Měření lze provést také ve vybraných bodech pomocí čidla teploty, kdy je sledována změna elektrického odporu vodiče v závislosti na teplotě. [3]

2.3.1 Uložení do pískového lože s cementovou stabilizací

Kabely se musí ukládat do země v hloubce nejméně 1300 mm. V této hloubce se uvažuje maximální teplota okolí v zimě a v létě $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z prostorových důvodů se upřednostňuje uspořádání do trojúhelníku. Aby nedocházelo k porušení formace kabelů, jsou po trase svazovány páskou po vzdálenostech 3 m. Ve výkopu se kabely uloží do pískového lože, které má minimální tloušťku 12 cm nad a pod povrchem kabelu, jeho celková tloušťka přitom nesmí být menší než 30 cm. Kabelové lože je provedeno z jemného písku a cementu, který stabilizuje tepelný odpor kabelového lože. Z boku jsou kabely zakryty betonovou deskou o výšce min. 25 cm a tloušťce min. 5 cm. Zakrytí betonovými deskami se provede i nad kabelovým ložem a ve výšce 20–30 cm nad nimi je následně umístěna červená výstražná folie. [3]



Obr. 2-3 – Uložení v pískovém loži v plochém a trojúhelníkovém uspořádání [3]

2.3.2 Uložení v kabelových chráničkách

Kabely se ukládají do chrániček v případě přechodů komunikací, vjezdů apod. Jednotlivé žíly se ukládají do samostatných plastových chrániček. Minimální vnitřní průměr chráničky musí být alespoň 1,5násobek průměru kabelu pro přímé vedení. Tažení kabelu chráničkou v ohybu se nedoporučuje. Výstup z chrániček musí být proveden tak, aby nedošlo k poškození kabelu. [3]

2.3.3 Uložení v kabelových žlabech

Tento typ uložení se provede v případě, že nelze použít uložení do kabelového lože, trasa není rovná, vedení musí být mechanicky ochráněno nebo dochází ke křížení s jinými sítěmi. Jednotlivé fáze se ukládají do samostatných žlabů, do jednoho žlabu je uložení možné, pokud bude z boků mezera minimálně 10 mm mezi kabelem a kabelovým žlabem a minimálně 40 mm shora. [4]

2.3.4 Provozní vlivy

Při provozu se kabely oteplují a kvůli tepelné roztažnosti materiálů dochází k jejich prodloužení. Naopak při vypnutém stavu a při velmi nízkých teplotách dochází ke zkracování. Tyto procesy mohou způsobit namáhání a deformaci kabelů. Tomuto se předchází použitím jednožilových kabelů s mírným zvlněním, přičemž se předpokládá sinusové zvlnění kabelů. Tlak zeminy nedovolí, aby došlo k nadměrnému zvlnění při oteplování. Tento jev je zmírněn také velkou teplotní kapacitou okolního prostředí. [3]

Dojde-li k poruše na vedení, může dojít ke vzniku zkratového proudu. Na kabely působí značné elektrodynamické síly, které mohou způsobit deformaci, poškození kabelů, ale i ohrožení bezpečnosti osob. Při uložení v zemi jsou síly značně zmírněny tlakem okolní zeminy. [3]

Pokud jsou kabely uloženy na vzduchu, stožárech apod., musí být svazovány a připevněny tak, aby zachovaly svoji pozici a nedošlo k jejich poškození teplotní roztažností při oteplení, ani elektrodynamickými silami při zkratech. [3]

3 OCHRANY

Kapitola o ochranách je čerpána z literatury [4]. Ochrany zajišťují bezpečný provoz elektrického vedení. Hlavním úkolem je sledování stavových veličin chráněného úseku (např. napětí, proud, teplota), vyhodnocení, zda se jedná o stav provozní nebo poruchový a případě odpojit postiženou část od zdroje. Ochrany minimalizují škody způsobené poruchami v elektrické síti, které se skládá z jednotlivých prvků jako jsou kabely, vedení a vodiče, transformátory, generátory, měřící zařízení apod. Naopak nezajišťují ochranu před impulsivními účinky poruch. Porucha musí být rychle a spolehlivě detekována a vypnuta v takovém čase, aby:

- nedošlo ke vzniku škod na elektrických zařízeních
- byla zajištěna ochrana osob
- nedošlo k požáru důsledkem tepelných účinků zkratového proudu
- nedošlo k rozšíření na další prvky elektrizační soustavy

Základní požadavky na ochrany jsou následující:

- Spolehlivost – schopnost bezpečně eliminovat poruchové stavy správným působením ochrany
- Selektivita – schopnost vypnout pouze postiženou část vedení
- Rychlost působení
- Jednoduchost obsluhy

Ochrana kabelových vedení 110 kV proti přetížení a zkratu se provádí distanční a srovnávací ochranou.

3.1 Distanční ochrana

Tento typ ochrany je využíván k základnímu a záložnímu chránění venkovních a kabelových elektrických vedení na všech napěťových hladinách. Převážně se používají k chránění el. Vedení ZVN, VVN a zřídka i na VN. Dají se využít i k chránění transformátorů (distribuční, blokové, síťové) nebo generátorů. V těchto případech však plní pouze funkci doplňkové ochrany. [4]

Princip této ochrany spočívá v měření impedance zkratové smyčky pomocí měření proudu I a napětí U . Podle Ohmova zákona tedy:

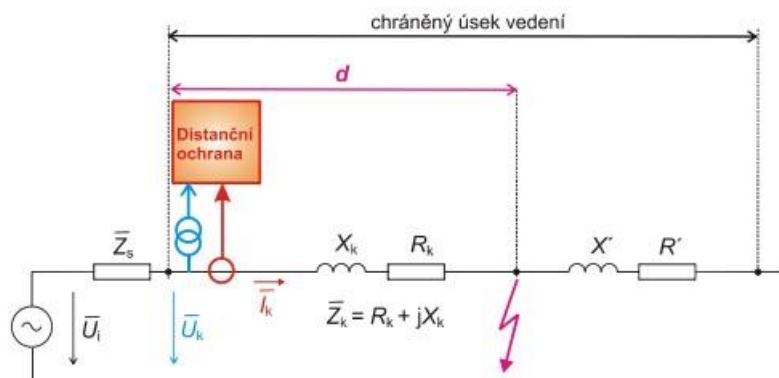
$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} \quad (4.1)$$

$$\widehat{Z}_k = R_k + jX_k \quad (4.2)$$

Tyto veličiny určují impedanci zkratové smyčky, a tím i vzdálenost poruchy od ochrany.

Měření se provádí pomocí přístrojových transformátorů proudu a napětí (dále jen PTP a PTN), které převádí vysokou hodnotu veličiny na nižší hodnotu vhodnou pro měřící přístroje. Ochrana se tedy řadí mezi sekundární ochrany. Změřená impedance se ještě musí pomocí převodů přístrojových transformátorů na skutečnou impedanci vedení. Vysoká hodnota impedance značí, že v chráněném úseku porucha není. Naopak nízká hodnota impedance značí poruchový stav. [4]

$$Z = \frac{U_{prim}}{\frac{U_{sek}}{I_{prim}}} \cdot Z_{zmerena} \quad (4.3)$$



Obr. 3-1 – Princip a zapojení distanční ochrany s označením místa poruchy [7]

3.1.1 Doba vybavení distanční ochrany

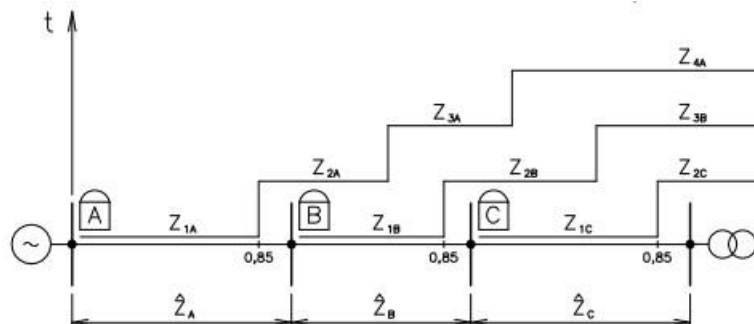
Doba vybavení ochrany při vzniku zkratu závisí na vzdálenosti poruchy. Díky tomu jsou distanční ochrany schopné selektivního vypínání. Ochrana je nastavena tak, že pro nejbližší úsek vedení je vypínací čas při vzniku zkratu omezen pouze rychlostí mžikového zapůsobení ochrany a rychlostí akce vypínače. U nejvzdálenějších úseků se k vypínacímu času přidává časové zpoždění, aby zareagovala ochrana nacházející se nejbližší u místa poruchy s nejkratší vypínací dobou. [4]

Pro správnou funkci selektivity se musí ochrany nastavit tak, aby nedocházelo ke zbytečnému vypínání bezporuchových míst. Při zapůsobení vzdálenější distanční ochrany mohou být na vině odchylky převodu PTP a PTN při měření impedance, omezené informace o chráněných vedeních a nepřesné výpočty. [4]

V základním stupni ochrany (bez časového zpoždění) se chrání 80 % až 90 % vedení. Další stupně ochrany jsou zpožděny o čas, který se pohybuje v rozmezí od 0,3 s do 0,5 s. Při volbě toho času musí být zohledněno:

- Rychlost mžikového zapůsobení ochrany – 0,15 ms až 0,25 ms (typicky 30 ms)
- Rychlost vypínače – 40 ms až 80 ms
- Velikost bezpečnostní mezery – pro správnou funkci selektivity

Druhý stupeň ochrany se nastavuje s ohledem na protější ochrany ve směru chránění. [4]



Obr. 3-2 – Nastavení impedančně časové charakteristiky [4]

3.1.2 Charakteristika distanční ochrany

Je používána impedanční charakteristika tvořená impedanční Gaussovou rovinou, díky které lze velmi dobře posuzovat chování ochrany. Tato rovina udává množinu bodů (impedancí), ve kterých ochrana působí.

Běžná provozní impedance je mnohem vyšší než při zkratu. Při poruše dojde k jejímu prudkému poklesu, což lze vidět na obr. 3-1 [4]. Pokud dojde k tzv. kovovému zkratu, nepočítá se s odporem, který by vznikl při hoření oblouku.

$$X_k = d \cdot X_{ved} \quad (4.4)$$

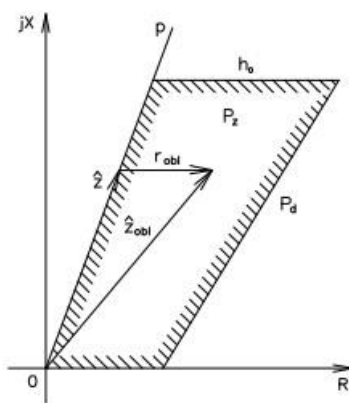
$$R_k = d \cdot R_{ved} \quad (4.5)$$

V případě posuvného zkratu na homogenní vedení se poměr X_k/R_k nemění.

$$\frac{X_k}{R_k} = \frac{d \cdot X_{ved}}{d \cdot R_{ved}} = \frac{X_{ved}}{R_{ved}} = \tan \varphi_k \quad (4.6)$$

Úhel φ_k se nazývá úhel linky (vedení) a $\tan \varphi_k$ je směrnice, po které se pohybuje impedance při posuvném zkratu (viz přímka p na obrázku 4-3). Počítáme-li s hořením elektrického oblouku, musíme do zkratové impedance zařadit odpor oblouku, který se chová jako činný odpor. [4]

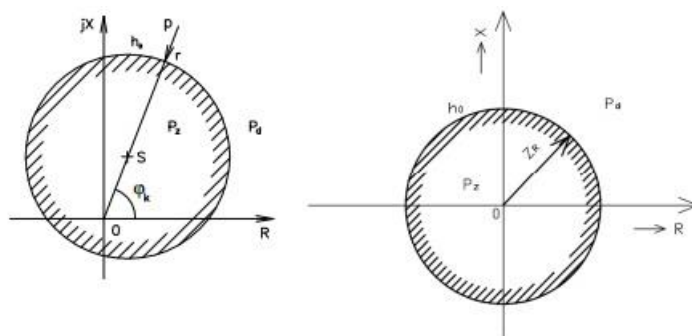
$$\widehat{Z}_{obl} = R_k + R_{obl} + jX_k \quad (4.7)$$



Obr. 3-3 – Ideální charakteristika distanční ochrany [4]

3.1.3 Charakteristika analogových ochran

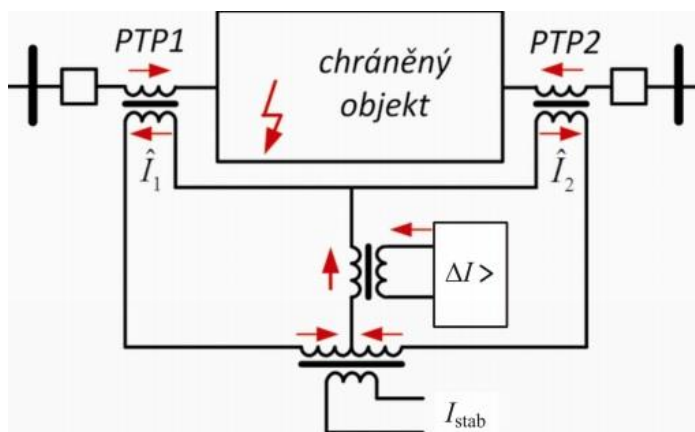
Ideální impedanční charakteristika je složena z přímek, například podle obr. 3-3 [4]. To ale dříve u běžných elektromechanických ochran nebylo možné a vycházelo se z kruhové charakteristiky se středem v počátku a poloměrem Z_R (modul nastavené impedance). Jelikož tato charakteristika není směrová, byla změněna struktura analogových ochran, což vedlo k vysunutí ve směru úhlu vedení (podél přímky p). Je možné vytvořit i eliptickou charakteristiku. [4]



Obr. 3-4 – Vysunutá a základní charakteristika analogové ochrany [4]

3.2 Rozdílová ochrana

Rozdílová ochrana pracuje s předpokladem, že chráněným objektem prochází provozní proudy, jejichž algebraický součet ve všech vývodech a přívodech je za normálního provozního stavu nulový. Pokud je jejich součet nenulový, znamená to, že v chráněném objektu došlo ke vzniku nového svodu, kterým uniká poruchový – rozdílový proud. Ochrana detekuje, že se v chráněném objektu nachází porucha, a vybaví. Hodnota rozdílového proudu je rozhodující pro mžikové vybavení ochrany. Princip ochrany je naznačen na obrázku 4-5 níže. [7]



Obr. 3-5 – Principiální schéma rozdílové ochrany [7]

Rozdílový proud pro n vývodů trojfázového systému lze vyjádřit vztahem:

$$\Delta I = \left| \sum_{i=1}^n \bar{I}_i \right| \quad (4.8)$$

kde \bar{I}_i je fázor i -tého vývodu.

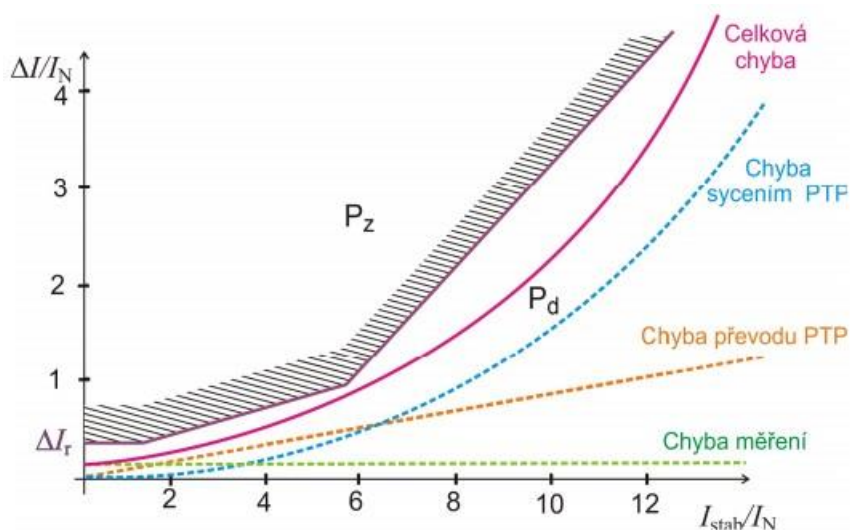
V praxi je i v bezporuchovém stavu v ochraně vždy přítomna určitá hodnota rozdílového proudu, která závisí na chybě měření. Z tohoto důvodu je potřeba nastavit necitlivost ochrany, která bude záviset na:

- chybě měření přístrojového transformátoru (výrobce garantovaná chyba měření)
- nestejnosti poměru převodů přístrojových transformátorů na primární a sekundární straně

Z tohoto vyplývá, že část chyb bude závislá na provozním proudu a část bude nezávislá na provozním stavu chráněného objektu. Provozní proud se v ochraně nahrazuje s ohledem na způsob měření součtovým (stabilizačním) proudem:

$$I_{stab} = \sum_{i=1}^n |\bar{I}_i| \quad (4.9)$$

Charakteristika rozdílové ochrany je funkcí ΔI a I_{stab} a je naznačena na obrázku 4-6 níže. Udává se v poměrných hodnotách, přičemž proudy jsou vztaženy k jmenovité hodnotě I_N chráněného zařízení. Tvar charakteristiky musí respektovat vliv chyb a nejprve se nastavuje základní necitlivost ΔI_r . Tato hodnota se u transformátorů pohybuje okolo 0,2násobku I_N , u kabelů 2,5násobek nabíjecího proudu kabelu. [7]



Obr. 3-6 – Charakteristika rozdílové ochrany [7]

4 KOMBINOVANÉ VEDENÍ VVN

Práce se zabývá obecným provozováním vložených kabelových vedení do DS, nicméně v práci je odkazováno na praktické použití při výstavbě nového vedení 110 kV Česká Lípa – Varnsdorf, které plánuje společnost ČEZ Distribuce a.s.

V následujících částech bude popsáno provedení a způsob chránění toho typu distribučního vedení.

4.1 Vrchní vedení

Popis vrchního vedení vychází z literatury [5]. Jedná se o klasické provedení venkovního vedení 110 Kv. Vodiče jsou upevněny na podpěrných bodech (příhradových stožárech) z konstrukční oceli, jejichž vzdálenost činí cca 200–300 m. Výška takových stožárů se pohybuje okolo 27–35 m. Vzdálenosti stožárů, ale i jejich výšky, ovlivňuje krajina a počet lomových bodů v trase.

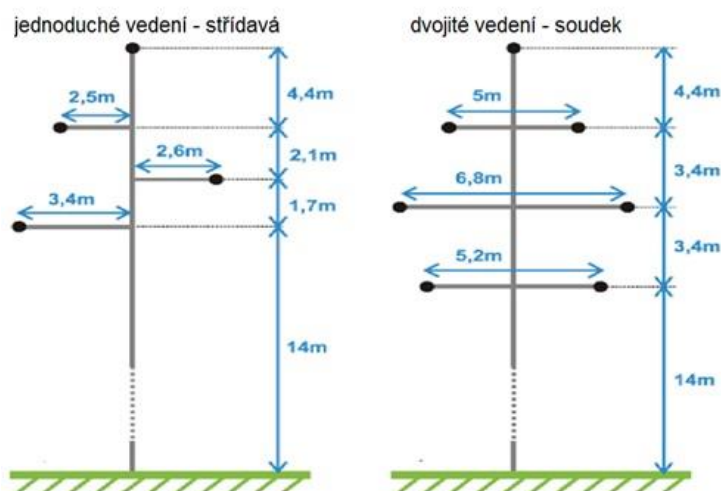
Vzhledem k výskytu velmi vysoké napětí je třeba z bezpečnostních důvodů dbát na ochranné pásmo, které je až do vzdálenosti 12 m od krajního vodiče. V tomto ochranné pásmu mohou růst porosty do výšky 3 m a smí zde projíždět těžká technika.

Umístění tohoto vedení do členité krajiny je jednodušší oproti kabelovému vedení z hlediska křížení s komunikacemi, inženýrskými sítěmi, přechodem vodních toků apod. Má delší životnost, jednodušší údržbu, snadnou a rychlou lokalizaci a odstranění poruch.

Nevýhodou vedení je nepřetržitě vystavení atmosférickým vlivům (vítr, námraza), což má vliv na namáhání stožárů.

Každé venkovní vedení je tvořeno dvěma druhy stožárů, nosnými a kotevními. Nosné stožáry jsou dimenzovány na tah vodičů z obou stran, výsledná síla na stožár tedy působí kolmo dolů. V případě namáhání tahem z jedné strany může dojít ke zhroucení těchto stožárů. Aby nedošlo ke stržení stožárů, je nutné zařadit do vedení stožáry kotevní, které jsou dimenzované na rozsáhlejší namáhání a tvoří tak pevné body v trase. Používají se zejména tam, kde se mění směr vedení, převýšení apod.

Nejčastějším používaným typem stožáru je „Soudek“, který je konfigurovaný pro dvojité vedení a na každé straně stožáru vede jedna linka. Příklady nejčastějšího uspořádání jsou uvedeny na obr. 4-1 [6].



Obr. 4-1 – Příklady konfigurací u standardních stožárů [6]

4.2 Podzemní vedení

Podkapitola podzemní vedení vychází z literatury [5]. Tento typ vedení je proveden jednožilovými kabely umístěnými pod zem do pískového lože v hloubce 1,3–1,5 m. Šířka výkopu je závislá na uspořádání a počtu žil vedení. V příloze B je znázorněno, jak probíhá pokládka takového kabelového vedení na obrázku B-1.

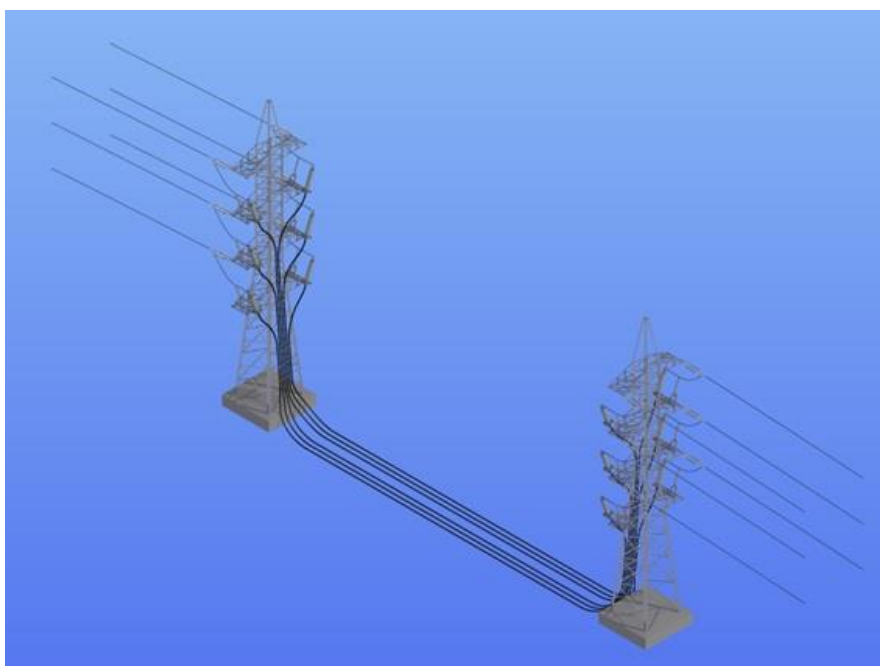
Maximální výrobní délka těchto kabelů se pohybuje v rozmezí 600–800 m, je tedy potřeba zřídit spojovací místa (dále jen spojovací místa). V těchto místech je vybudováno betonové lože dlouhé až 8 m, široké cca 1,5 a hluboké cca 1,8 m. Spojky jsou při provozu nejvíce namáhanou částí tohoto úseku a jsou náchylné na poruchy. Z těchto důvodů je třeba zajistit vhodný přístup ke spojovací místům pro případné opravy.

Stejně jako u venkovního vedení má i kabelové vedení ochranné pásmo, a to 1 m na každou stranu od pláště krajního vodiče. V tomto pásmu nesmí růst vůbec žádné porosty a není možné trasu přejíždět technikou o hmotnosti nad 6 tun. Vychází se z energetického zákona č. 458/2000 Sb. § 46.

Z hlediska ochrany životního prostředí je vhodnější venkovní vedení, které je na rozdíl od kabelového vedení v přímé linii a není třeba provádět rozsáhlé výkopové práce. Dalším nepříznivým jevem je vysušování a eroze půdy při provozu, jelikož teplota kabelu dosahuje až 90 °C. Při vedení kabelů terénem s převýšením je třeba je kotvit a nést v přímé trase tak, aby nedocházelo k jejich deformaci a sesouvání vlivem tíhové síly.

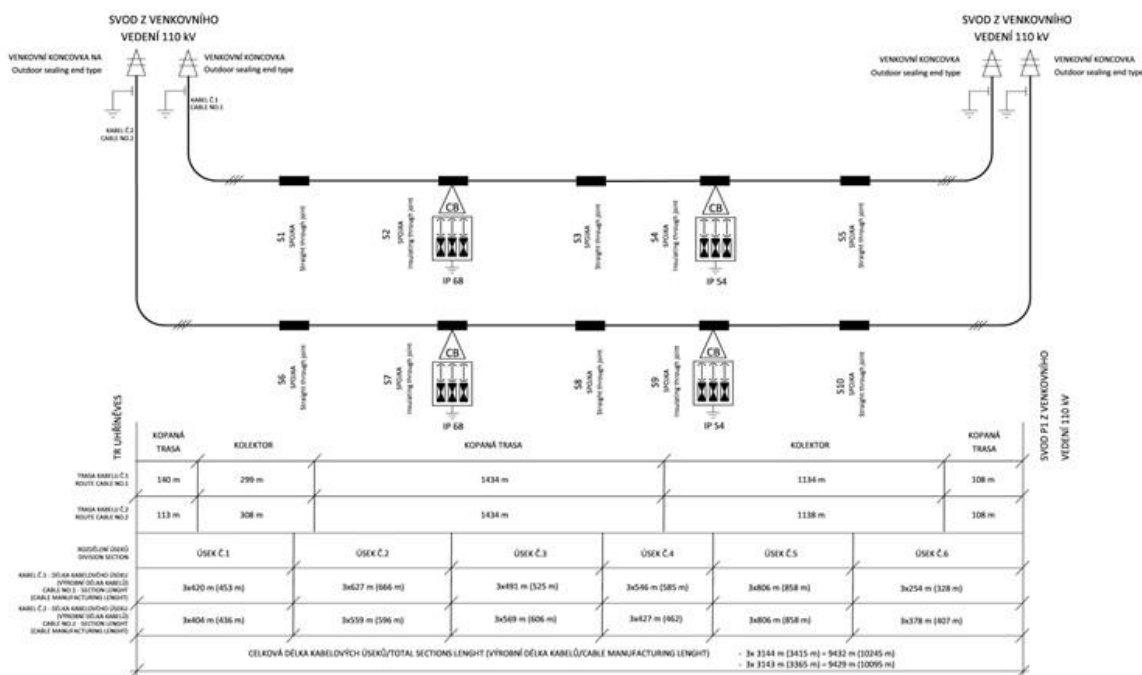
4.3 Vložené kabelové vedení do venkovního vedení

Začátek vedení tvoří klasicky nadzemní vedení 110 kV ukotvené na stožárech. Na kotevním stožáru je poté provedena přeložka kabelu do země. Příklad provedení přeložky VVN je znázorněn v příloze B na obrázku B-2. Pokud se jedná o jednoduché vedení, jsou na to využity 3 kabely, u dvojitého vedení 6. V zemi jsou jednotlivé úseky kabelů uspořádány do ploché nebo trojúhelníkové formace a napojeny ve spojovací místech. Poslední úsek kabelu je opět vyveden na stožár, kde je provedena přeložka zpět na venkovní vedení.



Obr. 4-2 – Znárodnění provedení vloženého vedení [6]

Tento typ kombinovaného vedení je technologicky náročný, obecně panují nízké zkušenosti s provozováním takové sítě. Problémy přináší zejména složitá detekce a lokalizace poruch, nelze použít standardní chránění a výstavba takového vedení je náročná i po finanční stránce. [7]



Obr. 4-3 – Jednopolové schéma kombinovaného vedení [6]

V následující tab. 4-1 [5] jsou uvedeny provozní vlivy na jednotlivé úseky pro porovnání výhod a nevýhod obou technologií.

Tab. č. 4-1 – Porovnání kabelového a venkovního vedení modifikovaná [5]

Vliv	Kabelové vedení	Venkovní vedení
Šíře koridoru včetně OP	3,5 m	30 m
Životnost	25 let	40 let
Investice	Velmi vysoké, cca 10x vyšší	Standardní
Provozní náklady	Vyšší	Nízké
Riziko porušení kořenových systémů	Velmi vysoké	Nízké
Riziko narušení hydrogeologických poměrů	Vysoké	Nízké
Narušení krajiny	Nízké	Znatelné
Riziko eroze půdy	Vysoké	Nízké
Provoz techniky v OP	Velmi omezené	Bez omezení
Odstraňování poruch	Komplikované, zdlouhavé	Jednoduché, rychlé
Délka odstraňování poruch	Dlouhé – týdny	Krátké – dny
Dostupnost materiál	Hůře dostupné	Běžně k dostání
Vliv klimatu na provoz	Zanedbatelné	Vysoké
Křížení s cestami, sítěmi	Komplikované	Jednoduché
Koridor	Nepřímá linie	Přímá linie
Zkušenost s provozováním	Nízké	Vysoké

4.4 Chránění kombinovaného vedení

Tato část se zabývá problematikou chránění, opětovného zapnutí takových vedení a určení místa poruchy. Většina poruch má krátkodobé trvání, jsou způsobeny např. úderem blesku, přeskokem atd. Po úspěšném vypnutí a odeznění přechodových dějů dojde k obnovení izolačních vlastností vedení. Opětovné zapnutí slouží k vyhodnocení druhu zkratu a zkracuje dobu přerušení dodávky elektrické energie.

4.4.1 Problematika OZ

Při poruše sítí 110 kV je obnovení dodávky elektrické energie provedeno jednopólovým opětovným zapnutím (dále jen OZ). Jelikož většina zkratů na vedení je jednopólových (přes 90 %), je většina z nich likvidována pomocí OZ. Jsou prakticky 2 možnosti, jak provést OZ u kombinovaného vedení: [10]

1. Je provedeno klasické OZ

Pokud dojde k poruše na kabelu, je po odeznění přechodových dějů průraz kabelu trvalý a druhým zapnutím je postižené místo ještě více poškozeno. Na druhou stranu rozšíření postižené oblasti může vést ke snazší lokalizaci poruchy (porucha je na kabelu). Pokud je porucha na venkovním vedení, dojde k obnovení dodávky energie.

2. Je povoleno OZ při poruše vrchního vedení a blokováno při poruše kabelu

Toto je patrně nejvhodnější způsob chránění kombinovaného vedení. Podstatou je stanovení, zda se porucha vyskytla na vrchním vedení či na kabelu. Při poruše venkovního vedení je provedeno OZ, při poruše kabelu je vyslán výkonovému vypínači signál blokující OZ. Nejpoužívanější způsob detekce poruchy kabelu je pomocí rozdílové ochrany, které zároveň vysílá blokující signál.

4.4.2 Určení místa poruchy

Chránění vloženého kabelového vedení distančními ochranami je problematické z těchto důvodů:

1. Sousedná impedance kabelu je menší než sousledná impedance linky:

$$z_{1k} \cong 0,25 \cdot z_{1l} \quad (5.1)$$

2. Poměr nulové a sousledné impedance, které ochrana používá ke kompenzaci se u linky a u kabelu liší:

$$\frac{z_{0k}}{z_{1k}} = 1 \div 2 \quad (5.2)$$

$$\frac{z_{0l}}{z_{1l}} = 2,5 \div 3,5 \quad (5.3)$$

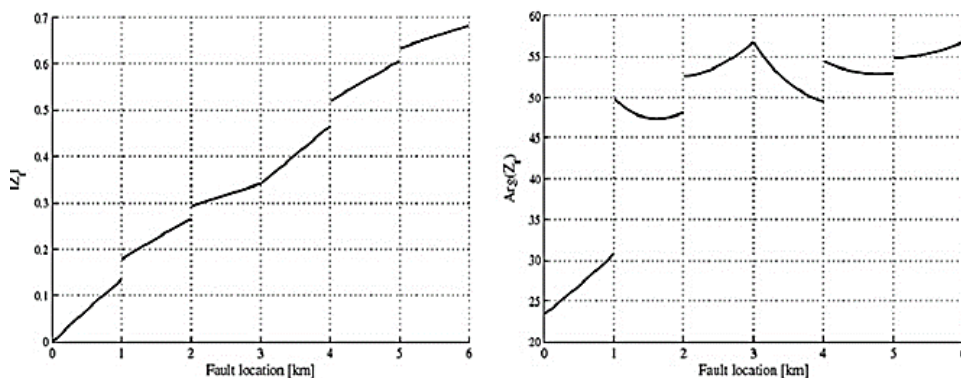
3. Fázové úhly linky a kabelu se liší, a to jak sousledné, tak nulové

$$\varphi_k \neq \varphi_l \quad (5.4)$$

kde z_1 je sousledná impedance na km, z_0 je nulová impedance na km; indexy: k = kabel, l = linka

Stanovení sousledné impedance je u kabelu složitější z důvodu magnetických vazeb, které vznikají průchodem proudu jednotlivými žilami a proudy ve stínění. Nulová impedance závisí na způsobu uzemnění stínění kabelu a na přítomnosti paralelních kabelových okruhů. [10]

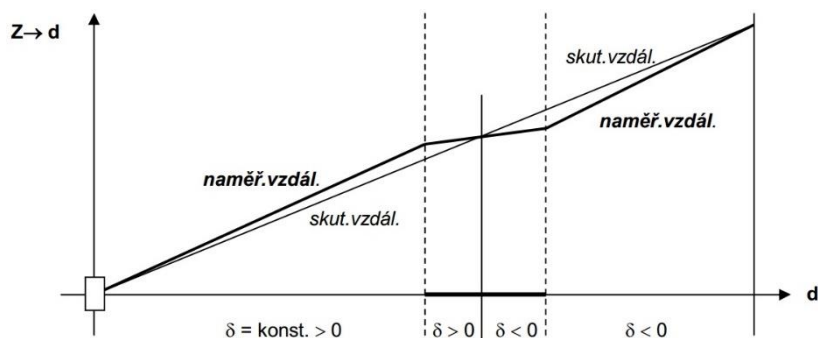
Z tohoto vyplývá, že vložení kabelu do linky přináší komplikace z pohledu chránění. Vlivem cross-bondingu (transpozice – křížové propojení stínění kabelů, případně i žil) dochází ke skokovým změnám zkratové impedance v místech přizemnění, což je vidět na obr. 4-4 [6], a kabelové vedení se tedy z hlediska impedance chová nelineárně. Toto však má pouze vliv na špatnou lokalizaci místa poruchy, ochrana při poruše zareaguje. [9]



Obr. 4-4 – Nelineární zkratová impedance cross-bondovaného kabelu [6]

Vložení kabelu do linky tak dojde k takovému zmenšení zkratové impedance linky, že není docílena dostatečná selektivita ochran. Můžeme ji ale zajistit prodloužením vypínacích časů.

Velikost chyby zkratové impedance (a tedy i vzdálenosti zkratu) obecně závisí na poměrné délce kabelu k lince. Pokud budeme mít například vložený kabel dlouhý 5 km vložený do linky o celkové délce 20 km včetně kabelu, bude $5 \text{ km} / 20 \text{ km} = 0,25 = 25 \%$ z celkové trasy způsobovat chyby měření. Čím bude kabel vůči lince kratší, tím bude menší chyba měřené vzdálenosti, ale současně musí být místo poruchy přesněji určeno, aby bylo zjištěno, jestli je zkrat na kabelu nebo na venkovním vedení. Na obr. 4-5 [9] je naznačen průběh skutečné a změřené impedance, přičemž v ohraničeném úseku je vložený kabel (je patrný pokles růstu impedance). [9]



Obr. 4-5 – Průběh skutečné a naměřené hodnoty impedance (vzdálenosti) [9]

Pokud dojde k případné poruše kabelu, je žádoucí, aby bylo minimalizováno jeho poškození a aby nedošlo k poškození ostatních kabelů. Musí se tedy zkrátit doba vypínání zkratů na základní časy distančních ochran vedení. Největší chyba měřené impedance nastává při umístění kabelu na začátku vedení, kde se nachází distanční ochrana. Jelikož je vedení chráněno oboustranně je potřeba, aby byly konce kabelu vzdáleny alespoň 20 % od konců celého vedení. Aby bylo možné vhodně chránit vložený kabel a blokovat OZ při poruše kabelu, je třeba použít i stejně rychlé místní záložní chránění. To je tvořeno rozdílovou nebo srovnávací ochranou, která je osazena na vedení u obou přechodů mezi venkovním a kabelovým vedením. [9]

4.5 Ukázka technologie na trase Česká Lípa – Varnsdorf

Společnost ČEZ Distribuce a.s. plánuje výstavbu nového vedení 110 kV Česká Lípa – Varnsdorf. Důvodem pro výstavbu je zvýšení spolehlivosti zásobování elektrickou energií Šluknovského výběžku.

4.5.1 Zdůvodnění stavby

Momentálně je energie do oblasti dodávána stávajícím dvojitým vedením 110 kV V1504/1505, které jde v souběhu s vedením 35 kV. Vedení je již přes 40 let staré a prochází těžkou námrazovou oblastí. Dříve bylo možné při poruchových stavech energii přenášet dvojitým vedením 35 kV ze sousední transformovny 110/35 kV Česká Kamenice. Vzhledem k tomu, že zatížení Šluknovského výběžku již přesáhlo přenosové možnosti dvojitého vedení 35 kV ze sousední transformovny Česká Kamenice, nelze tímto vedením zajistit trvalou dodávku elektrické energie. V případě vážnějšího poškození vedení 110 kV V1504/1505 (např. pád stožáru nebo přerušení obou linek) hrozí několikahodinové, ale i několikadenní přerušení dodávky do větší části této oblasti. Výstavbou nového dvojvedení 110 kV Česká Lípa – Varnsdorf dojde k propojení stávajících linek, tudíž k podstatnému zvýšení spolehlivosti napájení Šluknovského výběžku, včetně Nového Boru a České Lípy. Zvýšením zásobování Šluknovského výběžku el. energií se zlepši nejen technické možnosti, ale je zde i významný dopad na plánovaný rozvoj daného regionu. [6]

4.5.2 Popis stavby

Trasa nového vedení je rozdělena do 4 částí, které jsou naznačeny na obrázku C-1 v příloze C. V trase bude postaveno nové jednoduché vedení 110 kV z České Lípy do Varnsdorfu o délce cca 35 km, zároveň budou provedeny úpravy v transformovnách příslušných měst. Odhadovaný počet použitých podpěrných bodů venkovního vedení je 136, přičemž je celkový počet složen z 90 nosných a 46 kotevních stožárů.

Trasa první části začíná v TR 110 kV Česká Lípa – Dubice a pokračuje dvojitým vedením 110 kV V1501/1509 6x185 AlFe až k podpěrnému bodu č. 13 u odbočení na TR 110 kV Česká Lípa – Sever. Toto vedení bude kompletně demontováno včetně podpěrných bodů a bude nahrazeno novým jednoduchým vedením 110 kV v konfiguraci AlFe 243-AL1/39-ST1A o délce cca 2,3 km.

Trasa druhé části pokračuje k podpěrnému bodu č. 39, kde dojde k dalšímu odbočení směrem na Nový Bor. Vedení bude demontováno včetně podpěrných bodů a nahrazeno trojitým vedením 110/35/35 kV, délka trasy činí cca 3 km. Zároveň bude tento bod propojen s TR Česká Kamenice vedením 35 kV.

Třetí část vede od podpěrného bodu č. 39 ve směru Volfartice – Nový Bor, kde u stožáru č. 37 (samostatné značení) pak dojde k dalšímu odbočení na obec Svor. Původní vedení 110 kV provozované na hladině 35 kV bude kompletně demontováno včetně podpěrných bodů a bude nahrazeno novým dvojitým vedením, kde jeden potah bude provozován na napětí 110 kV a druhý potah na napětí 35 kV. Délka této trasy je cca 8 km.

Poslední část trasy bude realizována jako jednoduché vedení 110 kV. Začíná odbočením ze stožáru č. 37 u areálu Crystalexu v Novém Boru a dále pokračuje k obci Svor. Za touto obcí přechází venkovní vedení do kabelového vedení, které je umístěno zhruba v polovině trasy a pokračuje v délce cca 5 km k lokalitě Nová Hut', resp. Stožecké sedlo. Zde přechází zpět na

jednoduché vrchní vedení, které končí v TR Varnsdorf. Celková délka posledního úseku činí 22 km.

Vložené kabelové vedení je zde použito z toho důvodu, že trasa téměř celá vede chráněnou krajinnou oblastí Lužické hory a prochází tedy lesními komplexy. Použitím kabelu na nejcitlivějším místě trasy dojde k výraznému snížení negativních vlivů na krajinný ráz.

Tato navrhovaná trasa je v souladu se studii zpracovanými na základě zadání Ministerstva pro místní rozvoj a Dobrovolného sdružení obcí. Znázornění trasy je uvedeno na obrázku C-1 v příloze C. [6]

5 STANOVENÍ PROVOZNÍCH A POŘIZOVACÍCH NÁKLADŮ

Tato praktická část se zabývá návrhem průřezu vloženého kabelového vedení 110 kV na trase Česká Lípa – Varnsdorf, stanovením a porovnáním provozních nákladů na kabelové a venkovní vedení. Porovnáváný je úsek 5 km mezi městem Svor a lokalitou Stožecké sedlo, jedna varianta uvažuje v tomto úseku venkovní vedení a druhá varianta vložený kabel.

Pro návrh kabelového vedení uvažujeme, že vedení je připojeno k jednoduchému venkovnímu vedení 3xAlFe 243-AL1/39-ST1A, které má schopnost přenést výkon cca 100 MW. Pokud známe výkon, můžeme určit protékající proud. Tato hodnota proudu umožňuje stanovit průřez z katalogu od výrobce kabelu. V katalogu jsou uvedeny také elektrické parametry pro daný průřez, které se poté využijí pro stanovení ztrát, které odpovídají provozním nákladům.

K venkovnímu vedení je třeba stanovit vhodně dimenzovaný průřez kabelu tak, aby kabel nepředstavoval slabé místo v lince a zároveň, aby jeho průřez byl v hospodárných mezích.

5.1 Zásady dimenzování vodičů

Tato kapitola vychází z literatury [7]. Pro stanovení vhodného průřezu vodiče je třeba dodržovat určitých zásad, jelikož chybně dimenzovaný průřez může mít za následek nežádoucí chování obvodu (např. nepřijatelné oteplení vodičů) nebo velké zvýšení pořizovacích nákladů, pokud velmi naddimenzujeme. Mezi nejpodstatnější vlivy při dimenzování patří:

- Provozní teplota nesmí být vyšší než dovolená
 - Příliš vysoké provozní teploty vedou ke změně mechanických vlastností, spoje vodičů zvětšují svůj přechodový odpor, dochází k degradaci izolace
 - Dovolená provozní teplota závisí na typu vodiče (jádro a izolace), prostředí, charakteristice uložení a na připojené zátěži
 - Výpočet dovoleného proudového zatížení:

$$I_z = k_1 \cdot k_2 \dots k_i \cdot I_n \quad (6.1)$$

I_n – jmenovité proudové zatížení vodiče, k_i – přepočítávací součinitele

- Hospodárný průřez vodiče
 - Vodiče dimenzujeme tak, aby náklady na jejich pořízení, provoz a údržbu byly optimální
- Dostatečná mechanická pevnost
 - Vodiče musí odolat mechanickému namáhání při provozu
- Úbytek napětí ve vodičích v přijatelných mezích
 - Úbytek napětí je ukazatelem kvality dodávané energie
 - Vodiče musí být dimenzovány tak, aby nezpůsobily nedovolený úbytek napětí, který pro většinu spotřebičů je $\pm 5 \% U_n$
- Odolnost vůči tepelným dynamickým účinkům zkratových proudů
 - Při dimenzování na tepelné účinky se určuje minimální průřez jader vodičů S_{min} , u kterého nedojde ke krátkodobému oteplení nad dovolenou teplotu ϑ_k při zkratu

- Výpočet minimálního průřezu vodiče:

$$S_{min} = \frac{I_{th} \cdot \sqrt{t_k}}{\sqrt{\frac{c_0 \cdot (\vartheta_f + 20)}{\rho_{20}} \cdot \ln \frac{\vartheta_f + \vartheta_k}{\vartheta_f + \vartheta_z}}} \quad (6.2)$$

I_{th} – ekvivalentní oteplovací proud vodiče, t_k – doba vypnutí zkratu, c_0 – objemová hustota tepelné kapacity, ϑ_f – fiktivní teplota, ϑ_k – maximální dovolená teplota při zkratu, ϑ_z – maximální teplota při provozu, ρ_{20} – rezistivita vodiče při 20 °C

- Při dimenzování na dynamické účinky je potřeba, aby byl vodič odolný vůči působení sil, které vznikají průchodem zkratového proudu
- Porovnává se ohybové namáhání vodičů s namáháním, které způsobí trvalou deformaci materiálu vodiče

5.2 Dimenzování kabelů 110 kV

Při řešení problematiky dimenzování kabelů 110 kV bylo vycházeno z podnikové normy PNE 34 1050 ed. 2. Podle této normy se tyto kabely dimenzují dle IEC 287-1 a ČSN IEC 287-2-1. Nicméně při zkoumání těchto norem vyšlo najevo, že byly v průběhu roku 2016 zrušeny bez náhrady. V současnosti se dimenzování provádí tak, že zákazník sdělí výrobcí kabelů, jaký výkon chce přes dané vedení přenést a podle něj výrobce sám navrhne adekvátní průřez kabelu. [3]

5.3 Návrh průřezu kabelového vedení

Podmínky pro výpočet uvažujeme ty, které již byly zmíněny na začátku praktické části. Kabelové vedení je připojeno k lince venkovního vedení 110 kV s vodiči AlFe 240, výkonová přenosová schopnost činí 100 MW. Dále jsem pro výpočet zvolil účinník $\cos \varphi = 0,9$ z důvodu velké kapacity kabelového vedení a předpokladu, že na lince nebude vykompenzován na hodnotu 0,95 induktivního charakteru.

Výpočtový proud vedení je tedy:

$$I_z = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 0,9} = 583,18 \text{ A} \quad (6.3)$$

Při výpočtu minimálního průřezu, který odolá nežádoucím tepelným účinkům zkratového proudu, byl uvažován ekvivalentní oteplovací proud rozvodny ve Varnsdorfu, do které ústí tato linka a má hodnotu $I_{th} = 31,5$ kA. Za dobu vypnutí zkratu byl zvolen základní vypínací čas distanční ochrany 0,5 s, pokud by došlo k selhání místní zálohy tvořené rozdílovou ochranou a musela by reagovat tato ochrana. Materiál vodiče kabelu byl zvolen hliník zejména kvůli jeho dobrým elektrickým vlastnostem a nízké ceně. Podle materiálu zjistíme pro výpočet objemovou hustotu tepelné kapacity, rezistivitu a fiktivní teplotu. Druh izolace vodiče určuje nejvyšší dovolenou provozní teplotu a teplotu při zkratu. Bylo počítáno se standardním druhem izolace z XLPE, která má dovolenou provozní teplotu 90 °C a nejvyšší dovolenou teplotu při zkratu 250 °C. [7]

Minimální průřez vedení:

$$S_{min} = \frac{I_{th} \cdot \sqrt{t_k}}{\sqrt{\frac{c_0 \cdot (\vartheta_f + 20)}{\rho_{20}} \cdot \ln \frac{\vartheta_f + \vartheta_k}{\vartheta_f + \vartheta_z}}} = \frac{31,5 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{0,5}}{\sqrt{\frac{2,417 \cdot (228 + 20)}{0,02941} \cdot \ln \frac{228 + 250}{228 + 90}}} = 244,39 \text{ mm}^2 \quad (6.4)$$

Nyní nahlédneme do katalogu výrobce a podle vypočteného proudu vedením můžeme stanovit průřez kabelu. Budou zde porovnány dvě varianty kabelů od různých výrobců (viz příloha D), přičemž uvažovaná konfigurace kabelů bude v obou případech plochá. Ta byla zvolena zejména z toho důvodu, že při poruše jednoho kabelu nedojde při rychlé reakci ochrany k poškození ostatních kabelů, což by vedlo k nákladným opravám.

První varianta uvažuje jednožilový hliníkový XLPE kabel 132/76 (145) kV od výrobce Brugg cables. Vypočtenému proudu cca 583 A odolá podle katalogu již kabel s průřezem 400 mm² (odolá proudu až 598 A), avšak z důvodu větší proudové rezervy byl zvolen průřez 500 mm².

Druhá varianta uvažuje jednožilový hliníkový XLPE kabel 132/76 (145) kV od výrobce NKT cables. Podle katalogu zvládá vypočtený proud kabel s průřezem 800 mm² v trojúhelníkové konfiguraci, tudíž proud bez problému zvládne v horizontálně ploché konfiguraci.

Z porovnání obou kabelů jsou patrné velké rozdíly v jejich průřezu, což bude dáno rozdílným dimenzováním obou výrobců. Standardně používaný průřez kabelů na 110 kV bývá 800 mm², proto je na místě porovnání s kabelem, který má téměř poloviční průřez, z hlediska ztrát výkonu a kapacitních proudů.

Katalog a tabulkové hodnoty obou výrobců kabelu jsou uvedeny v příloze D.

5.4 Ztráty výkonu

V této části budou porovnány ztráty činného výkonu ve vodičích venkovního a kabelového vedení. Teoretický předpoklad je, že kabel bude mít menší ztráty z důvodu většího průřezu vodiče.

Ztráty činného výkonu (Jouleovy ztráty) se vypočítají jako:

$$\Delta P_{zt} = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad (6.5)$$

Proud ve vedení byl již vypočten v kapitole 6.3. Zbývá tedy stanovit odpor vodičů, který zjistíme z katalogu výrobce v příloze D. Velikost odporu vodiče AlFe lana byla převzata z katalogu standardně používaných vodičů 100 kV ČEZ Distribuce. Hodnoty odporů vodičů pro výpočet:

- Vodič AlFe 243-AL1/39-ST1A → $R = 118,8 \text{ m}\Omega/\text{km}$
- Kabel Brugg cables 500 mm² → $R = 78,7 \text{ m}\Omega/\text{km}$
- Kabel NKT cables 800 mm² → $R = 36,7 \text{ m}\Omega/\text{km}$

Jelikož je odpor vodičů vztažen na kilometr vedení, spočítají se nejprve podle výše uvedeného vzorce měrné ztráty. Pro stanovení celkových ztrát potřebujeme znát délku vedení, která, jak již bylo uvedeno, činí 5 km.

Tab. č. 5-1 – Porovnání ztrát výkonu

Druh vodiče	Měrné ztráty Δp_{zt} [W/km]	Celkové ztráty ΔP_{zt} [kW]
AlFe 243-AL1/39-ST1A	121 211	606,06
Brugg cables 500 mm ²	80 297	401,49
NKT cables 800 mm ²	37 445	187,23

Příklad výpočtu pro první řádek tabulky 6-1:

$$\Delta p_{zt} = 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot 0,1188 \cdot 583,18^2 = 121\,211 \text{ W/km} \quad (6.6)$$

$$\Delta P_{zt} = \Delta p_{zt} \cdot d = 121\,211 \cdot 5 = 606,06 \text{ kW} \quad (6.7)$$

Pro výpočet ztrátového výkonu se standardně uvažují maximální hodnoty proudového zatížení ze zimního měření. Jelikož nejsou tyto hodnoty k dispozici, jsou použity hodnoty pro výpočet maximálního ztrátového výkonu, který se může na vedení objevit. Pokud vynásobíme vypočtený ztrátový výkon dobou působení plných ztrát (zjistí se z diagramu zatížení), získáme tím ztracenou energii za rok. Na vedení VVN uvažuje ČEZ Distribuce dobu plných ztrát 3828 hod/rok. Pro stanovení provozních ztrát je potřeba stanovit cenu ztracené energie. V tomto příkladu je uvažováno ocenění ztrát stejné jako u ČEZ Distribuce, a to konkrétně částkou 1206 Kč/MWh.

Tab. č. 5-2 – Porovnání provozních nákladů

Druh vodiče	Celkové ztráty ΔP_{zt} [MW]	Ztracená energie ΔW_z [MWh/rok]	Provozní náklady N_p [Kč/rok]
AlFe 243-AL1/39-ST1A	0,606	2 320	2 797 871
Brugg cables 500 mm ²	0,401	1 535	1 851 213
NKT cables 800 mm ²	0,187	716	863 284

5.5 Kapacitní proudy

V této podkapitole budou porovnávány kapacitní proudy jednotlivých druhů vedení. Proud, který nabíjí kapacity vedení, je odebírán i v případě, že na vedení není připojena žádná zátěž. Z tohoto důvodu představuje ztráty elektrické energie. Sítě VVN jsou provozovány jako účinně uzemněné a kapacitní proudy se nijak nekompensují, jejich hodnota je tedy jen informativní.

Velikost provozní kapacity, a tedy i kapacitního proudu do země, se odvíjí od typu izolace vodičů a jejich geometrie. Výrobce kabelu již uvádí v katalogu velikost provozní kapacity, pro venkovní vedení je nutno spočítat kapacitu třífázového transponovaného vedení se zemním lanem, přičemž se vychází z literatury [11]. Je uvažováno jednoduché vedení z obrázku 5-1.

Hodnoty provozních kapacit pro výpočet:

- Vodič AlFe 243-AL1/39-ST1A → $C = 5,129$ nF/km
- Kabel Brugg cables 500 mm² → $C = 189$ nF/km
- Kabel NKT cables 800 mm² → $C = 212$ nF/km

Výpočet kapacitního proudu:

$$I_c = \omega \cdot C \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (6.8)$$

Tab. č. 5-3 – Porovnání kapacitních proudů

Druh vodiče	Poměrný kapacitní proud i_c [A/km]	Kapacitní proud I_c [A]
AlFe 243-AL1/39-ST1A	0,102	0,510
Brugg cables 500 mm ²	3,771	18,855
NKT cables 800 mm ²	4,230	21,150

Příklad výpočtu pro první řádek tabulky 6-2:

$$i_c = \omega \cdot C \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5,129 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{110000}{\sqrt{3}} = 0,102 \text{ A/km} \quad (6.9)$$

$$I_c = i_c \cdot d = 0,102 \cdot 5 = 0,510 \text{ A} \quad (6.10)$$

5.6 Údržba provozovaných elektrických zařízení

Pro správnou funkci elektrických zařízení v distribuční soustavě je třeba provádět pravidelné kontroly a revize těchto zařízení, které musí splňovat požadavky z hlediska jejich bezpečnosti a provozuschopnosti.

Přehled činností preventivní údržby a lhůty prováděných pracovních úkonů jsou stanoveny v řádu preventivní údržby. Lhůty prováděných druhů kontroly se stanovují podle PNE 33 0000-3 ed. 4 [13]. V této kapitole jsou porovnány činnosti údržby jednotlivých druhů vedení. Časová náročnost uvedených úkonů byla odhadnuta.

5.6.1 Venkovní vedení

Obecně lze rozdělit kontroly venkovních vedení na prohlídky pochůzkové a lezecké. Pochůzková prohlídka je podrobná prohlídka vedení pohledem bez výstupu na stožár a provádí ji jeden pracovník. Prohlídka lezecká se provádí výstupem na kontrolovaný stožár. Lezeckou prohlídku provádí dva pracovníci a jen na vybraných stožárech. Samostatně je prováděna kontrola proudových spojů pomocí termovizního měření vedení za provozu, která se provádí každé 4 roky. Podle zjištěných závad se případně za vypnutého stavu vedení provede prohlédnutí, rozebrání a očištění problémové oblasti, a nakonec dotažení šroubových spojů.

Tab. č. 5-4 – Pochůzková prohlídka venkovního vedení

Druh kontroly	Četnost	Kontrolovaná jednotka	Odhadovaná časová náročnost [h]
mechanický stav podpěrných bodů	1 rok	km	1,25
stav betonových základů			
deformace či vychýlení PB z trasy			
kontrola svarů, šroubových a nýtových spojů			
mechanické poškození izolátorů, vodičů, svorek, svodičů přepětí, uzemnění, kabelové svody a koncovky, úsekové odpínače, bezpečnostní tabulky			
zda vedení odpovídá normám			
dodržování předpisů ochranného pásma vedení			

Tab. č. 5-5 – Lezecká prohlídka venkovního vedení

Druh kontroly	Četnost	Kontrolovaná jednotka	Odhadovaná časová náročnost [h]
stav izolátorů, vodičů a svorek			
stav armatur a šroubových spojů			
stav svodičů přepětí			
příhradové stožáry	8 roků	ks	1,8
ostatní stožáry			1,3

5.6.2 Kabelové vedení

Údržba kabelového vedení je zajišťována pomocí pochůzkových prohlídek po kabelové trase, které provádí jeden pracovník. Neprovádí se podrobná prohlídka celého kabelového vedení, problém zejména u kabelů uložených v zemi. Podrobněji se na trase prohlídají pouze boxy na cross-bonding pláštů kabelů, pokud jsou přítomné.

Tab. č. 5-6 – Pochůzková prohlídka kabelového vedení

Druh kontroly	Četnost	Kontrolovaná jednotka	Odhadovaná časová náročnost [h]
stav a označení trasy	1 rok	km	0,7
stav uložení a upevnění kabelů			
zda uložení vedení odpovídá normám			
stav terénu, kontrola pohybů půdy poblíž trasy kabelů, zemních prací			
dodržování předpisů ochranného pásma vedení			
stav přístupných kabelových koncovek ve stanicích a na kabelových svodech			
stav uzemnění pláště kabelu			

5.7 Porovnání provozních nákladů

Vzhledem k charakteru nového vedení, kdy velikost venkovní vedení značně přesahuje velikost venkovního vedení, bude i provoz venkovního vedení nákladnější.

Ztráty elektrické energie jsou zahrnuty ve státem regulované složce ceny elektřiny jako poplatek za distribuci. Tuto složku stanovuje ERÚ a distributor a na ni tedy nemá vliv. Nižší ztráty elektrické energie však distributorovi generují větší zisk. Z tohoto pohledu se jako příznivější varianta jeví kabelové vedení. To je dáno rozdílným odporem AlFe lana a vodiče žíly kabelu, největší vliv na jeho velikost má velikost průřezu vodiče, který má kabel několikrát větší. V našem případě má kabel od výrobce Brugg Cables měrné ztráty vztahované na km vedení o 34 % nižší než vodič AlFe 243-AL1/39-ST1A venkovního vedení. Kabel výrobce NKT cables má tyto ztráty oproti venkovnímu vedení nižší dokonce o 69 %. U kabelů s kovovým stíněním se ještě vyskytují ztráty vlivem naindukovaných proudů ve stínění, se kterými v této práci nebylo počítáno. Při praktickém návrhu je však třeba tento jev zohlednit. Velikost proudů ve stínění záleží na způsobu uzemnění pláště kabelu a může dosahovat až 10 % z velikosti proudu v žíle.

Co se údržby jednotlivých vedení týče, opět z porovnání vychází lépe kabelové vedení. Jelikož je kabelové vedení uložené v zemi, provádí se pouze pochůzková prohlídka, kdy se kontroluje jeho poloha uložení, případně boxy cross-bondingu. Zvláštní pozornost by měla být věnována přeložce venkovního vedení na kabelové. Délka kabelové trasy činí 5 km, tudíž odhadovaná časová náročnost údržby kabelového vedení podle tab. č. 6-5 činí 3,5 hodiny.

Pro údržbu venkovního vedení je třeba počítat s pochůzkovou i lezeckou prohlídkou vedení. Délka trasy venkovního vedení činí také 5 km a podle tab. č. 6-3 činí odhadovaná časová náročnost pochůzkové prohlídky 6,25 hodin. To je téměř dvojnásobek oproti kabelovému vedení. K tomu je potřeba připočítat lezeckou prohlídku prováděnou každých 8 let. Odhadovaný celkový počet použitých podpěrných bodů v trase je 24. Uvažujeme-li, že budou použity pouze příhradové stožáry, je odhadovaná časová náročnost této prohlídky cca 43 hodin.

5.8 Pořizovací náklady

V této části jsou uvedeny pořizovací náklady na výstavbu nového venkovního a kabelového vedení VVN, přičemž ceny byly převzaty z ceníku materiálů a montážních prací ČEZ Distribuce a.s.

Na trase uvažujeme délku obou typů vedení 5 km, přičemž se trasa venkovního vedení skládá z 16 nosných a 8 kotevních stožárů. V tabulce 6-6 jsou uvedeny základní položky pro výstavbu stožáru včetně vodičů, zemního lana a montážních prací. Nejsou zde započítány položky jako výkopové práce, dovoz materiálu apod.

Tab. č. 5-7 – Pořizovací náklady venkovního vedení

Venkovní vedení				
Název	Jednotka	Cena/jednotku [Kč/jednotka]	Množství	Cena celkem
vodiče	km	197 400 Kč	5	987 000 Kč
zemní lano	km	198 000 Kč	5	990 000 Kč
Nosné stožáry				
betonové základy	PB	13 500 Kč	16	216 000 Kč
konstrukce stožáru	PB	138 600 Kč	16	2 217 600 Kč
montáž stožáru	PB	14 500 Kč	16	232 000 Kč
montáž vodičů	PB	39 400 Kč	16	630 400 Kč
montáž zemního lana	PB	17 940 Kč	16	287 040 Kč
Kotevní stožáry				
betonové základy	PB	33 750 Kč	8	270 000 Kč
konstrukce stožáru	PB	594 000 Kč	8	4 752 000 Kč
montáž stožáru	PB	27 400 Kč	8	219 200 Kč
montáž vodičů	PB	129 000 Kč	8	1 032 000 Kč
montáž zemního lana	PB	33 640 Kč	8	269 120 Kč
Celkem				12 102 360 Kč

Pokud náklady vztáhneme na jeden kilometr vedení, budou se náklady pohybovat okolo 2,5 mil. Kč/km.

V tabulce 6-7 jsou uvedeny položky pro pořízení kabelového vedení, přičemž je uvažován kabel, optický kabel a spojky. Variabilní je cena kabelu, která bude záležet na výběru kabelu a výrobci. Nejsou zde uvedeny položky související s výkopovými pracemi a dovozem materiálu. Jelikož prakticky celá trasa kabelového vedení prochází CHKO a lesními komplexy, bude potřeba vynaložit značné náklady na kácení porostů a úpravu terénu, které v tabulce nejsou uvedeny.

Tab. č. 5-8 – Pořizovací náklady kabelového vedení

Kabelové vedení				
Název	Jednotka	Cena/jednotku [Kč/jednotka]	Množství	Cena celkem
kabel VVN	km	17 000 000 Kč	5	85 000 000 Kč
spojky	ks	1 200 000 Kč	5	6 000 000 Kč
optická trasa	km	170 000 Kč	5	850 000 Kč
Celkem				91 850 000 Kč

V tomto příkladu není uvažována kompenzace kapacity kabelového vedení, která lze provést například pomocí reaktoru. Pořizovací náklady kabelového vedení vztažené na jeden kilometr vedení se pohybují okolo 18,4 mil. Kč/km. Pro porovnání s náklady na výstavbu jednoho kilometru venkovního vedení jsou tyto investice více než 7x nákladnější, což odpovídá teoretickému předpokladu.

6 ZÁVĚR

V bakalářské práci byly obecně popsány elektrická vedení používané v distribuční síti. I když venkovní vedení je nejvíce používaný i nově budovaný typ vedení, najdou se případy, kdy se bez kabelového vedení neobejdeme. Zejména v těch případech, kde je k dispozici omezený prostor na výstavbu, což bývá nejčastěji ve velkých městech jako například Praha či Brno. V minulosti byl trend budovat čistě venkovní a čistě kabelové linky 110 kV, aby nedocházelo k problémům s provozováním a chráněním kombinovaného vedení, které byly popsány v kapitole 5-4.

Kombinované vedení je technologicky náročné a panují nízké zkušenosti s provozováním takového vedení. Problémy přináší zejména složitá detekce a lokalizace poruch, nelze použít standardní chránění a výstavba takového vedení je náročná i po finanční stránce. Vedení však chránitelné je a také se provozuje. Je však třeba posoudit každý případ vloženého kabelu samostatně. Obecně lze říci, že ke správnému chránění vloženého kabelového vedení je třeba mít kabel co nejkratší, aby nedocházelo k chybnému určení vzdálenosti poruchy. Ideálně umístit kabel uprostřed vedení, asi 20 % od konců vedení k zajištění selektivity ochrany. Zároveň přiřadit k distančním ochranám i ochrany rozdílové nebo srovnávací jako místní zálohu vzdálených ochrany. Přiřazením těchto ochrany ke kombinovanému vedení se eliminuje chybná lokalizace poruchy, kterou distanční ochrana naměří.

Praktická část bakalářské práce porovnává provozní a pořizovací náklady na venkovní a kabelové vedení. Porovnávaný úsek vedení byl popsán v kapitole 5-5, je to část trasy mezi městem Svor a lokalitou Stožecké sedlo. Porovnávané varianty uvažují uprostřed této linky vložené kabelové vedení v délce 5 km, respektive venkovní vedení stejné délky. Jako venkovní vedení bylo uvažováno standardní lano 3xAlFe 243-AL1/39-ST1A, kabelové vedení bylo navrženo a vybráno v kapitole 6-3. Pro porovnání byly vybrány dvě varianty kabelů, první varianta uvažuje tři jednožilové kabely od firmy Brugg cables s průřezem 500 mm² a druhá varianta kabely od firmy NKT cables s průřezem 800 mm².

Provozní náklady odpovídají ocenění ztrát elektrické energie na vedení a nákladů na údržbu vedení. Výpočet ztrát energie byl proveden pro jednotlivá vedení a výsledky byly zapsány do tabulky 6-2. Jelikož má kabelové vedení větší průřez než vedení venkovní, má nižší elektrický odpor, a proto i ztráty elektrické energie budou nižší. Pokud se na vedení díváme z hlediska náročnosti na údržbu, vychází lépe vedení kabelové. Jelikož je kabelové vedení zakopané v zemi, kontroluje se pouze poloha jeho uložení a kabelové spojky. U venkovního vedení se provádí kromě pochůzkové prohlídky (podobně jako u kabelového vedení), kdy se sleduje zejména stav stožárů, také prohlídka lezecká, kdy jsou podpěrné body podrobněji kontrolovány. Obecně lze tedy konstatovat, že kabelové vedení má nižší provozní náklady.

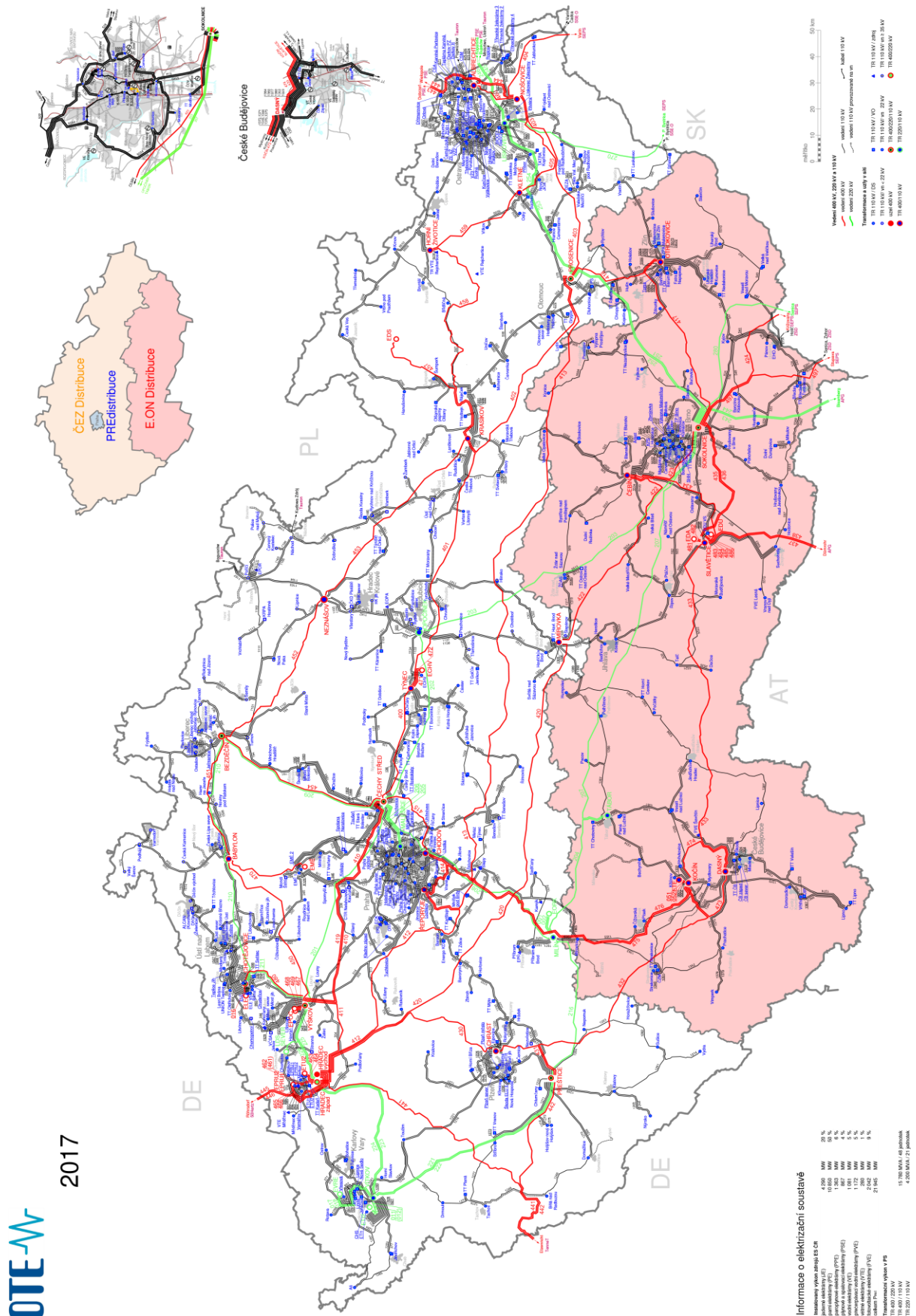
Pro stanovení pořizovacích nákladů byly uvažovány základní položky pro výstavbu venkovního a kabelového vedení, tyto položky a jejich ocenění je uvedeno v tabulkách 6-7 a 6-8. Z těchto hodnot nakonec byly spočítány náklady na výstavbu jednoho kilometru venkovního, respektive kabelového vedení. Podle výsledků v kapitole 6-8 vychází náklady kabelového vedení 18,4 mil. Kč/km vedení, což je více než 7x nákladnější oproti nákladům na výstavbu jednoho kilometru venkovního vedení.

Výstavba tohoto vedení se odvíjí podle požadavků projektu. Preferované řešení je výstavba nového venkovního vedení (zejména kvůli své jednoduchosti) se všemi přínosy i problémy vyjmenovanými výše. Pokud je však jedním z hlavních požadavků projektu minimální zásah do krajiny a životního prostředí, pak se dá kombinované vedení dobře uplatnit.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BLAŽEK, Vladimír a Petr SKALA. Distribuce elektrické energie, elektronické skriptum, VUT v Brně, 2017
- [2] *Přenosová a distribuční soustava 1. část – vedení velmi vysokého napětí (VVN)* [online]. 2017 [cit. 2017-12-15]. Dostupné z: Přenosová a distribuční soustava 1. část – vedení velmi vysokého napětí (VVN)
- [3] PNE 34 1050 ed.2 – Kladení kabelů nn, vn a 110kV v distribučních sítích energetiky. 2. dopl. vyd. 2016.
- [4] TLUSTÝ, Josef. a kol. Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav. České vysoké učení technické v Praze. Praha 2011.
- [5] *Porovnání nadzemního a kabelového vedení* [online]. [cit. 2017-12-15]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/cs/pro-media/vedeni-110-kv-novy-bor-varnsdorf/porovnani-reseni-nadzemniho-a-kabeloveho-vedeni.html>
- [6] Interní materiály ČEZ Distribuce, a.s., Praha, 2017
- [7] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. Rozvodná zařízení, elektronické skriptum, VUT v Brně, 2015
- [8] Velikost indukovaného napětí na stínění kabelu 110 kV: Sekce č. 1 / referát č. 6. In: *Konference ČK CIRED 2017* [online]. Praha, 2017, s. 21 [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: <https://www.ckcired.cz/konference-cired.html>
- [9] BERMANN, Jiří. Kabel vložený do linky VVN – chránění a lokalizace zkratu: Sekce č.3 / referát č.3. In: *Konference ČK CIRED 2016*[online]. Praha, 2016, s. 8 [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: <https://www.ckcired.cz/konference-cired.html>
- [10] *Fault location on mixed overhead line and cable network* [online]. Manchester, 2015 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://www.escholar.manchester.ac.uk/api/datastream?publicationPid=uk-ac-man-scw:282694&datastreamId=FULL-TEXT.PDF>. Thesis (Ph.D.). University of Manchester.
- [11] DOHNAL, Martin. *Parametry vedení vn* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/26795>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Petr Toman.
- [12] *XDRCU-ALT Single-core Cable for 132/76 (145) kV* [online]. Brugg: Brugg Cables [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: https://bruggcables.nuboserv.com/documents/BKAG_n3-01-01_XDRCU-ALT_132176_11451_kV_1All_en.pdf
- [13] PNE 33 0000-3 ed.4 – Revize a kontroly elektrických zařízení přenosové a distribuční soustavy. čtvrté vydání. 2017.

PŘÍLOHA A – SCHÉMA ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY ČR



PŘÍLOHA B – UKÁZKA ZE STAVBY KOMBINOVANÉHO VEDENÍ

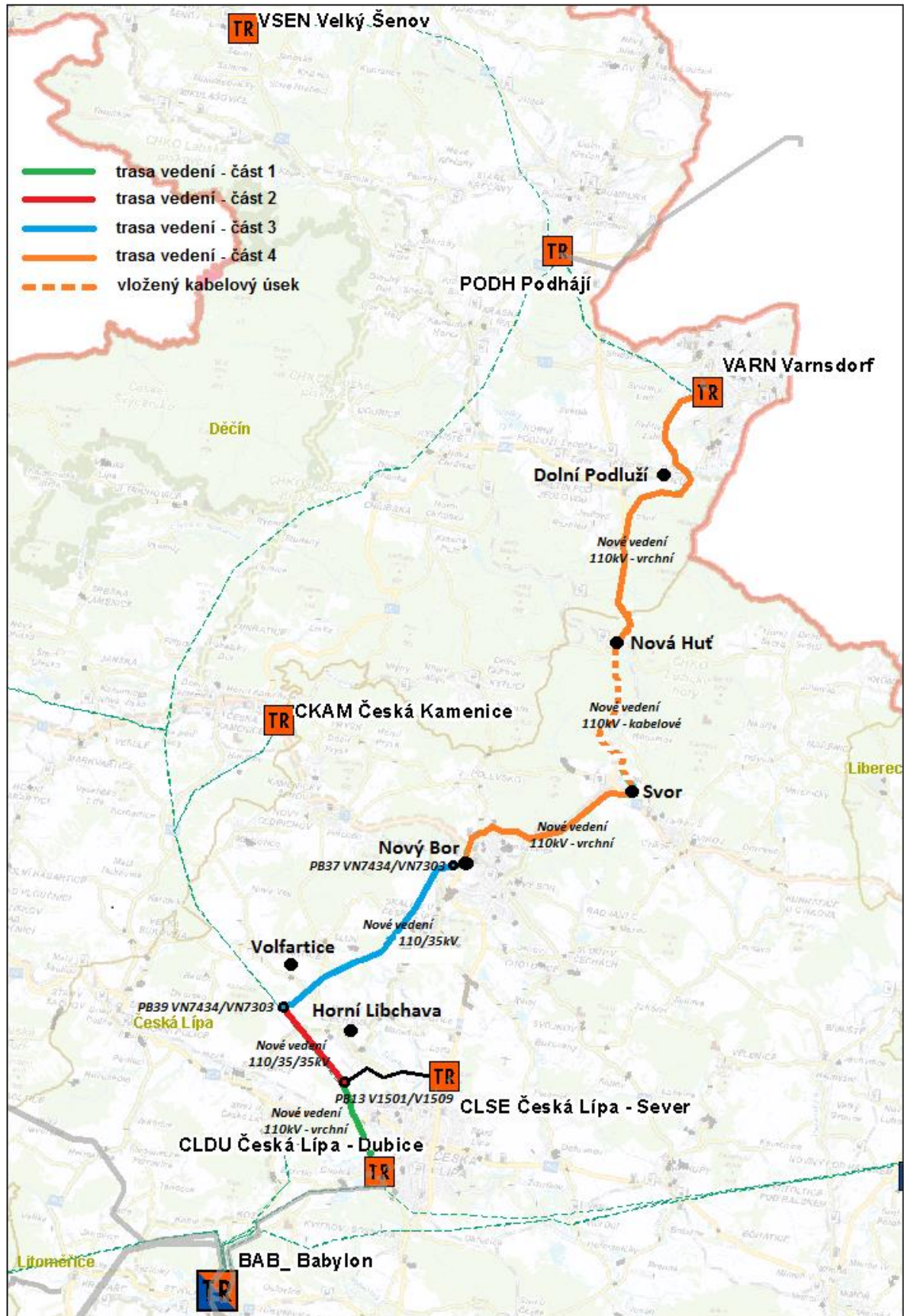


Obr. B-1 – Pokládka kabelu VVN [6]

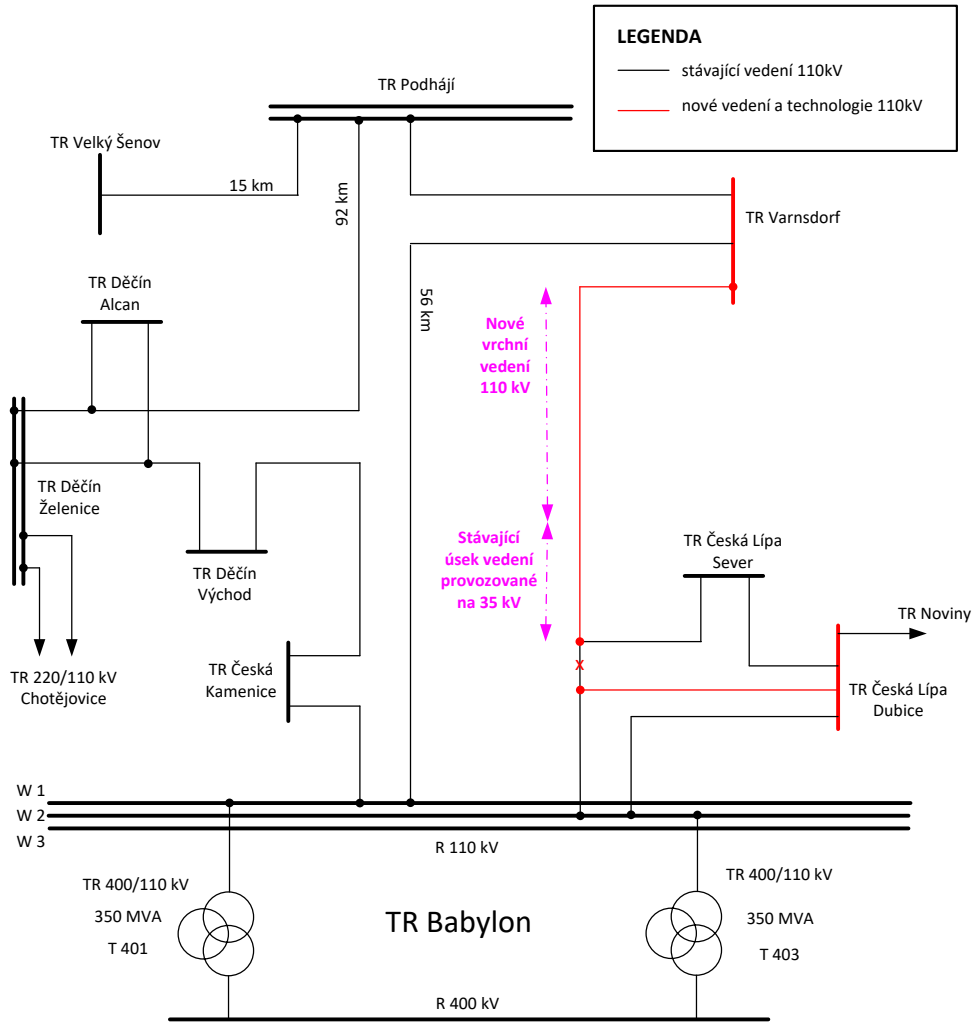


Obr. B-2 – Praktický příklad provedení přeložky VVN [6]

PŘÍLOHA C – TRASA VEDENÍ ČESKÁ LÍPA – VARNSDORF



Obr. C-1 – Celková trasa vedení [6]



Obr. C-2 – Schéma zapojení nového vedení do stávající sítě 110kV [6]

PŘÍLOHA D – KATALOGY VÝROBCŮ KABELU

Technical data

Conductor cross-section	Outer diameter (approx.)	Cable weight (approx.)	AC resistance	AC resistance	Reactance	Reactance	Capacitance	Min. bending radius	Max. pulling force
mm ²	mm	kg/m	$\frac{\text{m}\Omega}{\text{km}}$	$\frac{\text{m}\Omega}{\text{km}}$	$\frac{\text{m}\Omega}{\text{km}}$	$\frac{\text{m}\Omega}{\text{km}}$	$\frac{\mu\text{F}}{\text{km}}$	mm	kN
240	74	6.3	161.0	161.0	146	249	0.136	1500	7.2
300	74	6.4	129.0	129.0	140	242	0.150	1500	9.0
400	77	6.8	101.0	101.0	132	232	0.169	1600	12.0
500	77	6.9	79.1	78.7	126	227	0.189	1600	15.0
630	79	7.4	62.3	61.5	119	217	0.219	1600	19.0
800	83	8.3	49.9	48.8	114	209	0.240	1700	24.0
1000	86	8.8	41.0	39.5	109	203	0.271	1800	30.0
1200	90	9.7	36.0	34.3	106	197	0.289	1800	36.0
1400	97	11.0	27.7	27.5	103	188	0.325	2000	42.0
1600	101	12.0	24.5	24.2	101	185	0.338	2100	48.0
2000	106	14.0	19.9	19.5	100	180	0.349	2200	60.0
2500	112	15.0	17.3	16.8	96	173	0.381	2300	75.0

Capacity

Installation Amb. temp. Soil resist. Load factor	$\frac{\text{m}\Omega}{\text{km}}$	$\frac{\text{m}\Omega}{\text{km}}$	$\frac{\text{m}\Omega}{\text{km}}$	$\frac{\text{m}\Omega}{\text{km}}$	$\frac{\text{m}\Omega}{\text{km}}$	$\frac{\text{m}\Omega}{\text{km}}$
	20 °C 1.0 Km/W			35 °C in air		
Cross-section mm ²	1.0	1.0	0.7	0.7	-	-
	A	A	A	A	A	A
240	414	458	490	529	491	544
300	467	519	556	602	560	624
400	537	598	642	699	656	735
500	612	685	736	805	757	855
630	700	788	848	934	887	1011
800	791	897	963	1068	1022	1174
1000	883	1009	1079	1208	1159	1350
1200	950	1093	1165	1313	1265	1487
1400	1093	1237	1346	1496	1490	1727
1600	1167	1325	1440	1605	1606	1867
2000	1298	1485	1607	1805	1812	2124
2500	1404	1619	1746	1979	2004	2375

Obr. D-1 – Katalog výrobce Brugg cables [12]

Dimensions/Cross Sections		mm ²	185	240	300	400	500	630	800
Conductor, Cu or Al, round, stranded, Ø	approx.	mm	16,1	18,3	20,7	23,4	26,5	30,0	34,2
XLPE insulation	nom.	mm	22,0	20,0	19,0	18,0	18,0	18,0	16,0
Screen, copper wire, cross section	nom.	mm ²	50	50	50	50	50	50	50
Outer diameter	approx.	mm	74	72	72	74	77	81	82
Cable weight (Cu/Al)	approx.	kg/m	6,0/4,4	6,2/4,3	6,8/4,5	7,7/5,2	8,8/5,7	10,3/6,4	11,7/6,8
Permissible pulling force (Cu/Al)	max.	kN	9,3/5,6	12/7,2	15/9,0	20/12	25/15	32/19	40/24
Bending radius during laying at terminations	min.	m	1,85	1,80	1,80	1,85	1,90	2,00	2,05
	min.	m	1,10	1,10	1,10	1,10	1,15	1,20	1,20
Electrical Data									
Cu conductor DC resistance at 20°C	max.	Ω/km	0,0991	0,0754	0,0601	0,0470	0,0366	0,0283	0,0221
Al conductor	max.	Ω/km	0,164	0,125	0,100	0,0778	0,0605	0,0469	0,0367
Cu conductor AC resistance at 90°C	approx.	Ω/km	0,127	0,0973	0,0781	0,0618	0,0492	0,0393	0,0326
Al conductor	approx.	Ω/km	0,211	0,161	0,129	0,101	0,0791	0,0622	0,0500
Field strength at U ₀ at conductor screen at core screen	approx.	kV/mm	6,9	6,9	6,9	6,8	6,5	6,3	6,6
	approx.	kV/mm	2,0	2,3	2,5	2,8	2,9	3,0	3,5
Capacitance per core	approx.	µF/km	0,107	0,121	0,134	0,151	0,163	0,177	0,212
Inductance	approx.	mH/km	0,49	0,46	0,44	0,42	0,40	0,39	0,36
Current Ratings/Power Ratings (continuous load)					trefoil installation				
Cu conductor cables	1 circuit	A/MVA	368/84	420/96	469/107	525/120	586/134	649/148	706/161
	2 circuits	A/MVA	314/72	358/82	398/91	444/102	493/113	545/125	591/135
Al conductor cables	1 circuit	A/MVA	289/66	332/76	371/85	420/96	474/108	533/122	591/135
	2 circuits	A/MVA	246/56	282/64	315/72	356/81	400/91	448/102	495/113
Type (A)2XS(FL)2Y 1 x RMS/50 76/132 kV with segmental conductor (RMS)									
Dimensions/Cross Sections		mm ²	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2500
Conductor, round, stranded, segmental, Ø	approx.	mm	39,0	42,0	45,3	48,5	51,3	54,3	60,9
XLPE insulation	nom.	mm	16,0	15,0	15,0	15,0	14,0	14,0	14,0
Screen, copper wire, cross section	nom.	mm ²	110	110	110	110	110	110	110
Outer diameter	approx.	mm	93	94	98	101	102	106	113
Cable weight (Cu/Al)	approx.	kg/m	15/9,1	17/9,7	19/10	21/11	23/12	25/13	30/15
Permissible pulling force (Cu/Al)	max.	kN	50/30	60/36	70/42	80/48	90/54	100/60	125/75
Bending radius during laying at terminations	min.	m	2,30	2,35	2,45	2,50	2,55	2,65	2,80
	min.	m	1,40	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,70
Electrical Data									
Cu conductor DC resistance at 20°C	max.	Ω/km	0,0176	0,0151	0,0129	0,0113	0,0101	0,0090	0,0072
Al conductor	max.	Ω/km	0,0291	0,0247	0,0212	0,0186	0,0165	0,0149	0,0119
Cu conductor AC resistance at 90°C	approx.	Ω/km	0,0232	0,0201	0,0175	0,0156	0,0142	0,0129	0,0109
Al conductor	approx.	Ω/km	0,0375	0,0319	0,0275	0,0240	0,0213	0,0193	0,0156
Field strength at U ₀ at conductor screen at core screen	approx.	kV/mm	6,3	6,5	6,5	6,4	6,7	6,6	6,5
	approx.	kV/mm	3,7	4,0	4,1	4,1	4,5	4,5	4,6
Capacitance per core	approx.	µF/km	0,245	0,271	0,286	0,301	0,332	0,346	0,378
Inductance	approx.	mH/km	0,56	0,55	0,53	0,52	0,51	0,50	0,47
Current Ratings/Power Ratings (continuous load)					flat installation				
Cu conductor cables	1 circuit	A/MVA	999/228	1074/246	1155/264	1226/280	1285/294	1346/308	1465/335
	2 circuits	A/MVA	852/195	915/209	984/225	1043/238	1091/249	1144/262	1244/284
Al conductor cables	1 circuit	A/MVA	791/181	859/196	929/212	997/228	1058/242	1114/255	1244/284
	2 circuits	A/MVA	675/154	732/167	791/181	849/194	900/206	947/217	1057/242

Obr. D-2 – Katalog výrobce NKT cables [6]