



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta Elektrotechnická
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**

Zvýšení přenosové kapacity rozvodny pomocí vysokoteplotních vodičů bez výměny stávajícího zařízení

Increasing the transmission capacity of substations using high-temperature conductors without replacing existing equipment

Diplomová práce

Studijní program: Ekonomika a řízení energetiky
Studijní obor: Elektrotechnika, energetika a management

Vedoucí práce: Prof. Ing. Oldřich Starý, CSc.

Štěpán Feist

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Feist Štěpán

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Ekonomika a řízení energetiky

Název tématu: Zvýšení přenosové kapacity rozvodny pomocí vysokoteplotních vodičů bez výměny stávajícího zařízení

Pokyny pro vypracování:

- technologie vysokoteplotních vodičů
- technické a ekonomické parametry
- praktické využití
- vyhodnocení dopadu na modelu

Seznam odborné literatury:

D. A. Douglass. Practical application of High-Temperature Low-Sag (HTLS) Transmission Conductors. New Haven, Connecticut: 2004. p. 53.
EPRI. 2002. High Temperature Low Sag Transmission Conductors, EPRI, Palo Alto, CA: 2002. 1001811.

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Oldřich Starý, CSc. – ČVUT FEL, K 13116

Platnost zadání: do konce letního semestru akademického roku 2016/2017

L.S.

Prof. Ing. Jaroslav Knápek, CSc.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 11.2.2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma Zvýšení přenosové kapacity rozvodny pomocí vysokoteplotních vodičů bez výměny stávajícího zařízení samostatně a v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů pro vypracování závěrečných prací a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje. Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 9. srpna 2016

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Oldřichu Starému, CSc. za pedagogickou a odbornou pomoc a za veškerý čas, který mi ochotně věnoval při konzultacích. S prací mi velmi pomohl Ing. Cristian Bovo, PhD z Politecnico di Milano a patří mu velký dík. Dále bych rád poděkoval Ing. Čestmíru Váškovi za poskytnutí podkladů a nezbytných informací pro vypracování diplomové práce.

V Praze dne 9. srpna 2016

.....
podpis autora

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá možnostmi využití technologie vysokoteplotních vodičů v rozvodnách. Začátek práce je věnován příčinám přetěžování rozvodné sítě České republiky v rámci evropské propojené soustavy, kterou tvoří struktura a lokalizace výroby elektrické energie, charakter sítě a strategie provozování soustav. Z důvodu nárůstu přenášených elektrických proudů venkovních vedení je třeba zajistit dostatečnou přenosovou kapacitu elektrických stanic. V práci je navrženo technické řešení, které umožní navýšení zatížení vodičů v elektrických stanicích s důrazem na systém přípojníc a to při minimálním zásahu do zařízení rozvodny. Analyzuje možnosti použití vysokoteplotních vodičů, které mají při stejném průřezu vyšší přenosovou kapacitu, a popisuje další technické parametry. Výsledkem práce je technické a ekonomické posouzení použitelnosti vysokoteplotních vodičů různých typů pro navýšení přenosové kapacity s přihlédnutím na omezující technické a ekonomické faktory a následné porovnání s alternativním řešením. V práci jsou zohledněny elektrické a mechanické vlastnosti těchto vodičů a jejich vliv na navazující technologie.

Klíčová slova

Přenosová soustava, rozvodna, vodiče, vysokoteplotní, přenosová kapacita, ekonomické zhodnocení, reálná opce

Abstract

The thesis deals with the possibilities of using the technology of high-temperature conductors in substations. The beginning is devoted to the causes of overloading of the grid of the Czech Republic in the European interconnected system consisting of structure and localization of production of electrical energy, character of the network and strategy. Due to the increase of transmitted electric currents overhead lines need to ensure sufficient transmission capacity of electric stations. The thesis proposed a technical solution which will allow an increase in the load conductors in electrical stations with emphasis on the busbars and with minimal impact to the substation equipment. Analyzes the possibilities of the use of high temperature conductors that have with the same cross section higher transmission capacity, and describes other technical parameters. The result is a technical and economic assessment of the applicability of high temperature conductors of various kinds to increase transmission capacity with regard to technical and economic constraints and the subsequent comparison with an alternative solution. The work takes into account the electrical and mechanical properties of these wires and their impact on related technologies.

Keywords

Transmission system, substation, conductors, high-temperature, transmission capacity, economic evaluation, real option

Obsah

1.	Úvod	6
2.	Analýza vnějších vlivů na českou přenosovou soustavu.....	7
2.1.	Příčiny přetěžování přenosové soustavy.....	7
2.2.	Důsledky neplánovaných přeshraničních přetoků.....	13
2.3.	Řešení situace způsobené neplánovanými přeshraničními toky.....	15
2.3.1.	Omezení přetoků na přeshraničních linkách	15
2.3.1.1.	Transformátor s řízeným posuvem fáze	15
2.3.1.2.	Vypínací automatika.....	16
2.3.1.3.	Re-dispatch výrobních výkonů.....	17
2.3.2.	Zvyšování přenosových schopností linek a rozveden	17
3.	Přenosová soustava ČR	18
3.1.	Charakteristika přenosové soustavy České republiky	18
3.2.	Rozvoj přenosové soustavy	21
4.	Elektrické stanice přenosové soustavy 400 kV	24
4.1.	Silová zařízení rozvodny 400 kV	27
4.1.1.	Vypínače (QM).....	29
4.1.2.	Odpojovače a uzemňovače (QX, QEX)	29
4.1.3.	Přístrojové (měřicí) transformátory proudu a napětí PTP, PTN (TA, TV).....	30
4.2.	Hlavní ocelová konstrukce	30
4.3.	Výpočtové metody dle ČSN 38 1754 a ČSN 33 3015	31
4.4.	Výpočtové metody dle ČSN EN 60865-1	34
4.5.	Vodiče pro přípojnice rozvodny 400 kV	35
4.5.1.	Přenosová kapacita vodiče.....	36
4.5.2.	Výpočet přenosové kapacity vodiče.....	37
4.5.3.	ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced).....	39

4.5.4.	Vysokoteplotní vodiče	40
4.5.4.1.	ACSS (Aluminium Conductor Steel Supported).....	41
4.5.4.2.	TACIR (Thermal Aluminium Conductor Invar Reinforced)	42
4.5.4.3.	ACCC (Aluminium Conductor Composite Core)	42
4.5.4.4.	ACCR (Aluminium Conductor Composit Reinforced).....	43
4.5.5.	Zkratová odolnost vysokoteplotních vodičů.....	45
5.	Model rozvodny.....	46
5.1.	Toky v rozvodně	48
5.1.1.	Základní schéma stávajícího stavu	48
5.1.2.	Situace po navýšení jmenovitého proudu přípojnice.....	50
5.1.3.	Hypotetický scénář	51
5.2.	Účinky zkratových proudů na HOK.....	52
5.3.	Náklady na navýšení přenosové kapacity.....	54
6.	Ekonomické vyhodnocení	58
6.1.	Reálná opce rozšíření.....	59
7.	Závěr.....	65
8.	Seznam použité literatury a zdrojů	67
9.	Seznam obrázků.....	69
10.	Seznam tabulek.....	70
11.	Seznam zkratk.....	71
12.	Obsah příloženého CD	72

1. Úvod

Evropská energetika od synchronního propojení soustav střeoevropských zemí v roce 1995 prošla několika výraznými změnami. Za 20 let provozu propojených soustav se výrazně projevil vliv politických zásahů, nejvíce zahájením liberalizací trhu (v České republice začala v roce 2000), která oddělila výrobu a přenos elektrické energie. Jedním z cílů Evropské unie v oblasti energetiky je pokračovat v liberalizaci. Došlo k masivní podpoře výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů a postupné omezování fosilních paliv, převážně uhlí, následované i ústupem od jaderné energie. To má za následek změnu geografického rozdělení zdrojů, které má značný vliv na přenosovou soustavu (PS). Je třeba zmínit, že soustava se musí nyní vyrovnávat s novými technologiemi, se kterými se v době největšího rozvoje přenosové soustavy, v České republice v 70. a 80. letech, nepočítalo. V průběhu let se hlavní pozornost věnovala technologiím pro optimální využití zdrojů energie a vlivu na životní prostředí, aniž by se řešil širší kontext celkových externalit a ekonomických dopadů. Tato práce je zaměřena na PS, která je ovlivněna každou změnou ve „výrobě“ elektrické energie. Zatímco media pravidelně informovala o úspěšném snižování emisí CO₂ a rozmachu obnovitelných zdrojů a poctivě sledovala tendr Temelín, články zabývající se přenosovou a distribuční soustavou se objevovaly jen sporadicky a spíše na odborných webových stránkách. A právě nedostatečná adaptace síťové infrastruktury, především v přenosové soustavě, je dnes důsledkem snižování spolehlivosti provozu a zvyšování rizika velkých systémových poruch. Přestože se investice v posledních letech značně zvýšily a první opatření pro zajištění spolehlivosti se již dokončují, je přenos stále pod vlivem neplánovaných a velkých přetoků elektřiny mezi národními soustavami, které je potřeba urychleně řešit, aby se vykompenzovala léta nedostatečného zájmu o síť. To dává prostor pro využití nových technologií, jejichž aplikace pomůže přizpůsobit PS na nové podmínky a podpořit tak bezpečnost a spolehlivost provozu elektrických sítí.

2. Analýza vnějších vlivů na českou přenosovou soustavu

Jedním z aktuálních témat energetického trhu je připravenost přenosových sítí na změny charakteru (tzv. Energetický mix) a lokalizace výroby elektrické energie. To je způsobeno instalací nových zdrojů využívajících nové technologie, především obnovitelné zdroje, jejichž rostoucí podíl v energetickém mixu ovlivňuje chování sítě. Potřebná liberalizace trhu s elektřinou v rámci Evropské unie sice proběhla, ale vyvolala zásadní změny na trhu včetně změny toku proudů a řízení provozu, které nebyly chtěné a se kterými se musí vyrovnat především provozovatelé národních přenosových soustav. Právě za tímto účelem byla vytvořena sdružení ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity), což je evropská síť provozovatelů přenosových soustav, která má za úkol vytvořit a zajistit fungování vnitřního trhu a přeshraničního obchodu mezi 41 operátory z 34 zemí. Liberalizace trhů neproběhla zcela podle původního plánu vytvořit jednotný trh v rámci EU a jednotlivé státy přistoupily k otevírání trhu po svém a řídily se více geopolitickou situací a svými možnostmi v regionech, než aby vytvořili sjednocený trh spravedlivý pro všechny účastníky.

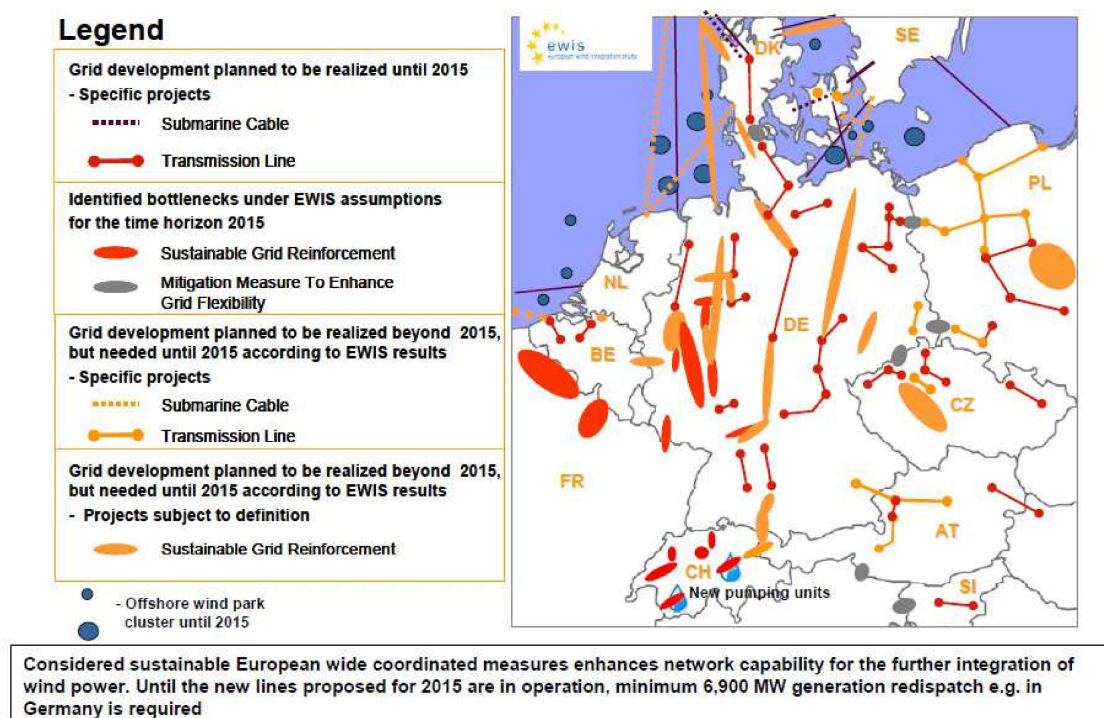
2.1. Příčiny přetěžování přenosové soustavy

Jedním z důsledků ve středoevropském regionu jsou velké přeshraniční toky elektrické energie způsobené změnou struktury a lokalizace výroby v SRN. Velký vliv na podmínky v elektrických sítích má dlouhodobá a mohutná podpora obnovitelných zdrojů, jejichž výroba se obtížně předpovídá, a vzhledem k zákonu o přednostním výkupu elektrické energie z obnovitelných zdrojů i obtížně reguluje. Energie vyrobená obnovitelnými zdroji v SRN vzrostla od roku 2000 z 6 % na 32,5 % v polovině roku 2015 a země plánuje zvýšit podíl na 55 – 60 % do roku 2035. Jedná se především o on-shore a off-shore¹ větrné elektrárny na severu Německa, jejichž instalovaná kapacita na konci roku 2014 přesáhla 30 GW (v roce 2015 nově připojeno 2,3 GW a 4 GW jsou ve výstavbě) a fotovoltaických elektrárnách, které se podílí na celkové výrobě 6 %. Navíc

¹ Elektrárny umístěné na pevnině (on-shore) nebo v moři (off-shore)

byl zahájen projekt největšího dánského off-shore větrného parku, který počítá s 400 MW instalovaného výkonu do konce roku 2018.

Studie EWIS (European Wind Integration Study) z roku 2010 na modelových výpočtech ukázala vliv nárůstu větrných zdrojů do roku 2015 v oblasti Severního a Baltského moře a vliv jejich přerušované výroby na PS v středoevropském regionu. Studie popisuje kritický vliv těchto zdrojů a poukazuje na neudržitelnost situace bez řádných investic do sítě. Z navrhovaných řešení autoři studie doporučují trvalá opatření se společnou koordinací sousedních zemí.



Obrázek 1 Doporučené posílení sítě studii EWIS do roku 2015²

Další snahou je značné omezování využívání fosilních paliv (hnědé a černé uhlí) pro výrobu elektřiny a postupné uzavírání jaderných elektráren SRN, které by měly být nahrazeny právě větrnými parky na severu země. Objemem výroby je možné takto nahradit konvenční zdroje obnovitelnými, ale je třeba počítat s vlivem na celý systém. Významnějšímu snížení spotřeby uhlí brání stabilita sítě, kterou obnovitelné zdroje zatím nejsou schopny zabezpečit. Jelikož cena plynu je vysoká, oproti dlouhodobě se snižující ceně uhlí až k historickému minimu. Právě kvůli vysokým variabilním

² European wind integration study – final report, str. 62

nákladům nelze očekávat, že by v nejbližší době plynové elektrárny fungovaly jako stálý zdroj, místo uhelných, ale budou nadále plnit roli špičkových zdrojů. Při vysoké výrobě z obnovitelných zdrojů lze očekávat velké přebytky výroby na severu Německa a z důvodu nedostatečnosti přenosových kapacit v Německu pak elektřina bude proudit automaticky přes synchronně propojené přenosové sítě sousedních zemí, především ČR a Polska, což zvyšuje nároky na tyto soustavy s dopadem na jejich spolehlivost. Na tento charakter provozu, velkých neplánovaných toků elektřiny ze severu na jih nebyly přenosové soustavy v CEE (Central East Europe) vybudovány. Jednou příčinou směru toků jsou státy na jihu, např. Itálie, Rakousko nebo Slovinsko, které jsou závislé na importu elektrické energie ze severu. Dalšími důvody jsou velcí spotřebitelé v průmyslovém jihu Německa a obchodní aktivity na propojení mezi Německem a Rakouskem (mezi provozovateli sítí Tennet a APG), které využívá obchodní přebytky výkonů pro akumulaci ve svých přečerpávacích vodních elektrárnách. Tento obchod v průměru přesahuje 2200 MW, ale ve špičce dosáhl až téměř 8000 MW. Více než polovina tohoto výkonu teče právě přes sousední sítě. Tranzitní toky v ČR dosahovaly až 3400 MW, je to způsobeno geografickou polohou ČR a konfigurací sítí (proud teče cestou nejmenšího odporu), díky které se podílí na přenosech výkonových toků v rámci obchodů s elektřinou. Neplánované přeshraniční přetoky jsou způsobené nedostatečnou infrastrukturou sítí v SRN, které nejsou schopny přenést výkon v rámci zobchodovaných objemů mezi účastníky trhu.



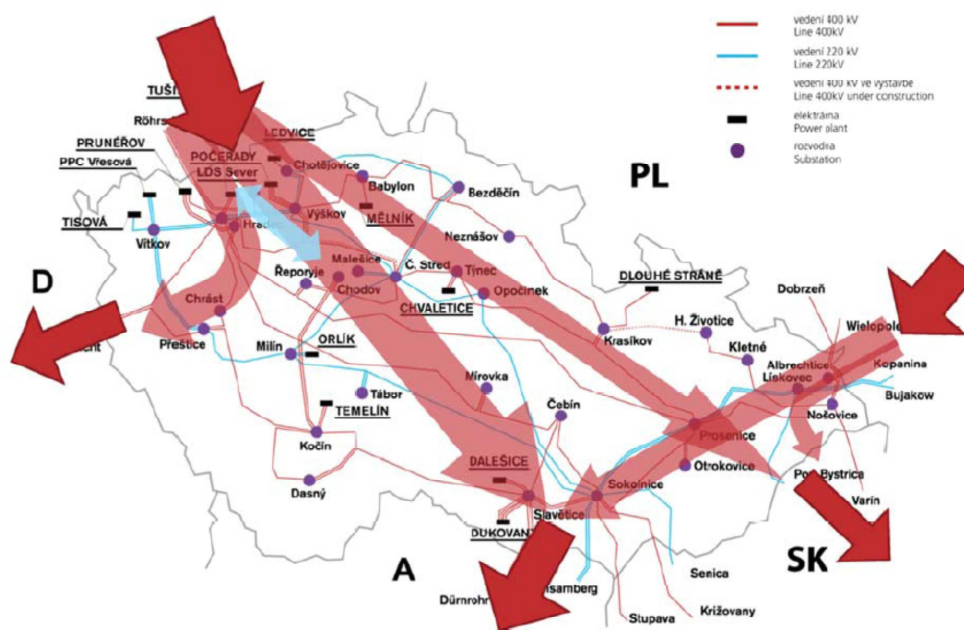
Obrázek 2 Plánované a skutečné přeshraniční toky ČR za rok 2015³

V Německu je ve směru provozu ze severu na jih pouze pět 400 kV vedení. Oproti plánům posílit přenosovou soustavu do roku 2015 o více než 1800 km vedení, se postavila ani ne třetina. Plánovaná páteř Německé přenosové soustavy Suedlink o délce 800 km a výkonu 4 GW (2 x 2 GW) převážně kabelové HVDC (High Voltage Direct Current), tedy stejnosměrné kabelové vedení, při napětí 500 kV je zatím ve fázi přípravy a především z důvodu nevyřízených majetkových vztahů k pozemkům se jeho stavba neustále odkládá. V tomto případě se projevuje tzv. postoj „NIMBY“ (Not In My Backyard), tedy nikdo není ochoten mít liniové stavby, zvláště tak velkých parametrů, vedoucích přes jejich pozemek. V neposlední řadě je třeba brát v potaz, že tento projekt je ekonomicky náročný, a jeho investice významně převyšují podobné projekty. Problémem jsou také schvalovací procesy pro povolení stavby, které jsou pro vedení, ať už kabelové nebo venkovní, delší než u nových zdrojů. Vzhledem k tomu je pravděpodobné, že se situace bude zhoršovat dokud se nezmění plánování nebo schvalovací procesy. Situaci kolem neplánovaných přetoků se již zabývala i agentura ACER (Agency for the Cooperation of Energy Regulators) v „opinion 09/2015“. V tomto stanovisku analyzují situaci v CEE (Central East Europe) regionu a spolu

³ <http://www.ceps.cz/CZE/Data/Vsechna-data/Stranky/Preshranicni-toky.aspx>

s nařízením No 714/2009 Evropského parlamentu a rady schvalují pravidla pro spolupráci v provozování propojených sítí a správu mezinárodních obchodů s elektřinou včetně kompenzací za využívané přeshraniční toky. Neplánované přetoky na česko-německých a česko-polských hranicích jsou v korelaci s rostoucím přetokem na vedení na rakousko-německých hranicích, kde nedochází ke standardní alokaci obchodovatelné přenosové kapacity. Toto potvrzuje také fakt, že ze vzorku 809 dnů zažádal Tennet o redispatch výkonu v 612 dnech v celkové výši 4 375,8 GWh a společně s 50Hertz o dalších 3 696,2 GWh, v rámci celého Německa jde o celkovou energii 10 638,2 GWh.⁴ Podle stejného nařízení je provozovatel české přenosové soustavy povinen zvládnout na svém území veškeré nároky evropské i vlastní sítě, stejně jako němečtí provozovatelé, ale je možné za neplánované přetoky požadovat finanční kompenzace. Neplánované přetoky mají kromě technických následků, kterými je přetěžování linek a rozveden a s tím spojené snížení spolehlivosti a bezpečnosti, také ekonomické dopady, které se projeví jednak ve vyvolaných investičních nákladech na posilování kapacit a jednak i v provozních, které představují především zvýšené ztráty v sítích. V mimořádných a v extrémních situacích pak v omezení obchodu a přenosu elektřiny, kdy je využitelná kapacita využita místo obchodu k pokrytí neplánovaných přetoků.

⁴ Průzkum ACER v „opinion 09/2015“ kapitola 6.1 odstavec 51.



Obrázek 3 Směr toků přes Českou přenosovou soustavu⁵

Pro vyřešení stávajícího stavu je třeba začít účinnou spoluprací pro postupné řešení situace, v první řadě plnění plánů rozvoje přenosové infrastruktury a společné plánování provozu, které musí předcházet změně ve struktuře a lokalizaci výroby. Nové zdroje by měly být připojeny do již připravené sítě, která je dimenzována pro vyšší zatížení. Pokud nebude možné se domluvit s Německem a Rakouskem na harmonizaci obchodních aktivit a fyzickými možnostmi sítě, měla by Česká republika podniknout kroky s pomocí ACER, ENTSO-E a Evropské komise pro získání kompenzace za služby, které nedobrovolně musí zprostředkovávat. ČEPS a.s. a MPO České republiky by měly využít suverenity na našem území a nadále netolerovat zneužívání naší sítě bez řádné kompenzace, která by mohla být použita na investice do odpovídající infrastruktury. Jelikož má ČR pouze omezený vliv na ostatní státy, je potřeba začít s investicemi do vlastní sítě a nespolehat na ostatní PPS. Kromě fyzické stability sítě by mělo dojít i k ekonomické stálosti střeoevropské energetiky a nemusely by se prostředky vynakládat na „redispatch výkonů“ a další provizorní opatření. V rámci této strategie by měly být zkráceny administrativní povoloovací řízení a dát stavbám přenosové soustavy vyšší prioritu.

⁵ Plán rozvoje PS ČR 2015-2024, str. 17

Kromě přetěžování linek, které se průběžně posilují, je nutné navyšovat i kapacitu rozvodn, kde jsou veškeré stavební zásahy komplikovanější kvůli omezenému prostoru. V rozvodnách se na přípojnicích může vyskytovat mnohem větší proud, protože je na ně připojeno hned několik linek, zvláště pokud většina energie teče v jednom směru. Tyto tranzitní toky a malé odběry z distribuční soustavy mohou vést k velmi vysokým proudům a přesáhnout kritické hodnoty. To znamená, že jsou mnohem více tepelně namáhány a zvyšuje se tak riziko poruchy. Právě z tohoto důvodu lze označit přípojnice za nejchoulostivější část soustavy.

2.2. Důsledky neplánovaných přeshraničních přetoků

Nepříznivý vliv neplánovaných mezinárodních přetoků se projeví především v nedodržení kritéria „N – 1“. Toto kritérium udává schopnost přenosové soustavy udržet síť v chodu s běžnými parametry při výpadku libovolného prvku soustavy (např. linky, transformátoru, výrobního bloku apod.), při kterém může dojít ke krátkodobému lokálnímu omezení spotřeby. Přetoky způsobené obchodním tranzitem DE-AT způsobují časté neplnění tohoto kritéria, přičemž se prodlužuje i jeho doba trvání. Při přetrvání tohoto stavu by mohlo dojít k výpadku, který by mohl být následován dalším kaskádovitým přetížením prvků sítě a odpojováním dalších vedení. Tím se snižuje spolehlivost a bezpečnost v dodávce elektřiny v požadované kvalitě.

Velké neplánované přeshraniční toky tak způsobují velké zatížení, které limituje dostupnou přenosovou kapacitu, tedy kapacitu, která by měla sloužit pro obchodování na společném liberalizovaném trhu nebo sloužit jako bezpečnostní rezerva.

Z metodiky výpočtu volné obchodovatelné kapacity je vidět, že s růstem hodnoty bezpečnostní rezervy FRM_i při velké variabilitě provozu musí být celková přenosová kapacita TBC_i využita na rezervy a nezbývá tak na volnou obchodovatelnou kapacitu VOK_i . Každý tok se nerovnoměrně rozdělí na všechny přeshraniční profily. Kapacita celé soustavy z hlediska výměn elektrického výkonu je pak maximální hodnota, při níž se dosáhne limitu na prvním hraničním profilu:

$$ABC_i = TBC_i - FRM_i - NF_i - (PF + LF)_i = NBC_i - \left(\sum_j PDTE_j * AAC_j \right) - (PF + LF)_i \quad [1]$$

Volnou přenosovou kapacitu lze čerpat až do úplného vyčerpání prvního profilu, pro který platí:

$$ABC_k - \sum_k (PTDF_{jk} * VOK_j) = 0 \quad [2]$$

ABC_i volná přenosová kapacita na i-tém profilu použitelná jako volná obchodovatelná kapacita (Available Border Capacity)

TBC_i celková přenosová kapacita i-tého profilu určená technickým limitem nejslabšího prvku profilu (Available Border Capacity)

FRM_i bezpečnostní rezerva i-tého profilu, která zahrnuje variabilitu provozních stavů (Flow Reliability Margin)

NF_i již dříve přidělené obchodní kapacity na i-tém prvku (Net Flow)

$(PF + LF)_i$ zbytkový tok po odečtení již alokovaných kapacit, kruhové toky (Loop-flows) a paralelní toky (Parallel-flows) na i-tém profilu

k index profilu, u něhož byla vyčerpána volná přenosová kapacita

$PTDF_{jk}$ koeficient podílu obchodu v j-tém směru na k-tém profilu. (Power Transfer Distribution Factor)

AAC_j kapacita přidělená na j-tém profilu pro vyšetřované období v předchozích etapách alokace (roční resp. měsíční aukci). (Already Allocated Capacity)

VOK_j volná obchodovatelná kapacita j-tého profilu

Volná obchodovatelná kapacita je garantovaná kapacita za určité časové období pro všechny plánované režimy a předpokládané stavy elektrizační soustavy včetně kruhových a fyzikálních toků výkonu. V zájmu PPS je mít co nejvyšší volnou obchodovatelnou kapacitu, aby mohla být spravedlivě pomocí aukcí přidělena práva na její využívání.

Omezování přenosové kapacity není jen záležitostí přeshraničních linek, ale má významný dopad i na vnitřní přenosová vedení včetně elektrických stanic národních soustav. Proto je toto téma velmi aktuální a zajištění dostatečných přenosových kapacit a udržování bezpečnostních a spolehlivostních parametrů je jednou z hlavních priorit.

Provozovatelé přenosových sítí v CEE regionu proto hledají a realizují jak organizační tak i provozně-investiční opatření pro řešení nastalé situace.

2.3. Řešení situace způsobené neplánovanými přeshraničními toky

K řešení situace je možné v podstatě použít dále uvedená opatření rozdělená do 3 základních oblastí – opatření regulující přetoky proudů, změna struktury a lokalizace výroby a posilování jednotlivých prvků sítě. Ještě je možné zvažovat organizační opatření – např. provozní dohody mezi provozovateli upravující vzájemnou spolupráci, ta ale nejsou v práci řešena. Každé řešení má své výhody a nevýhody. Liší se udržitelností, náklady a vlivem na propojenou soustavu.

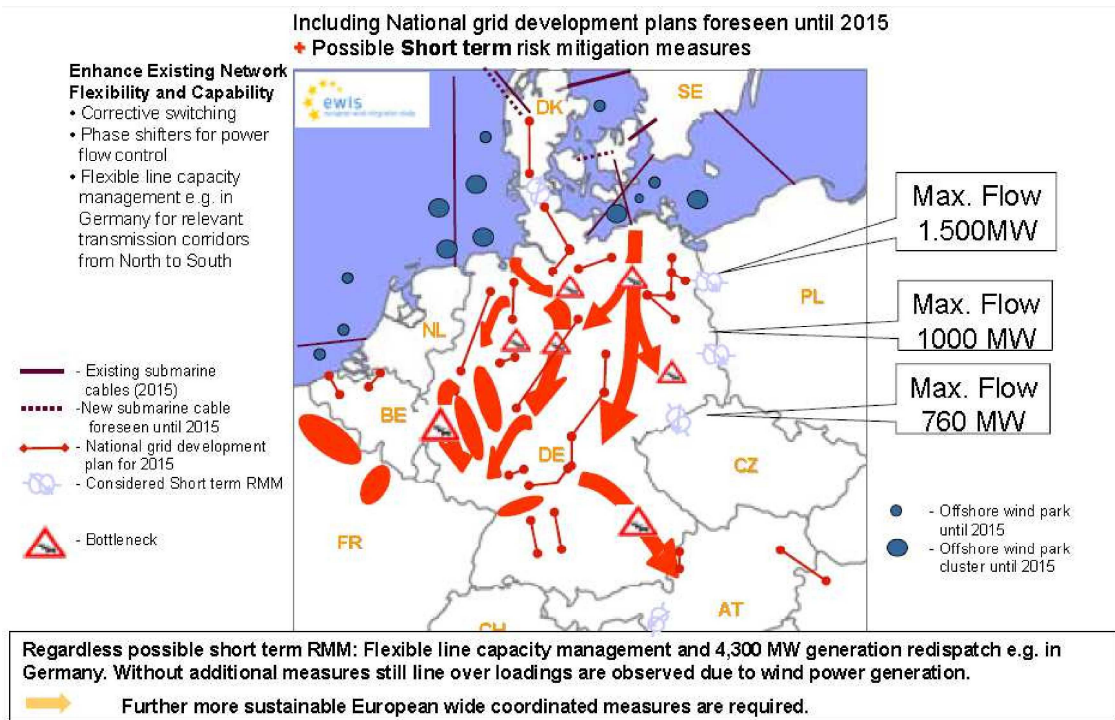
2.3.1. Omezení přetoků na přeshraničních linkách

Cílem je snížení zatížení na existujících linkách a rozvodnách. Lze investovat do technologií na hranicích přenosových soustav jako je transformátor s řízeným posuvem fáze nebo vypínací automatika. Kromě počáteční investice je jejich provoz celkem nenáročný. Oproti tomu redispatch je operativní opatření, cenově velmi variabilní, ovšem vždy velmi nákladné a dlouhodobě nevýhodné.

2.3.1.1. Transformátor s řízeným posuvem fáze

PST (Phase Shifting Transformer) omezuje výši proudu umělým navýšením odporu sítě změnou fázového úhlu na vstupu a výstupu z transformátoru. Až do určité výše proudu pracuje soustava bez omezení, ale ve chvíli kdy proud přesáhne určitou hodnotu, nastavením správných poměrů se zamezí vstupu proudů nad požadovanou hladinou. Dochází tak k omezení toku proudu a předchází se ohrožení systému. Instalace těchto transformátorů se v posledních letech poměrně rozšířila a jsou ve výstavbě v Polsku i ČR (rozvodna Hradec). Omezování toků na určitých linkách tímto způsobem může však znamenat přetížení dalších prvků, protože v podstatě dochází jen k přesměrování toku jiným směrem. Pro optimální využití této technologie je třeba mezinárodně koordinovat jejich instalace a provozní nastavení, jinak by v síti mohla působit kontraproduktivně. Před realizací je třeba podrobně analyzovat situaci, jelikož se jedná o vysokou a

dlouhodobou investici. Je potřeba zmínit, že na investice řešící tuto situaci je v roce 2015 již pozdě, měly být provedeny dříve.



Obrázek 4 Následky instalace PST na hranicích Německa s Polskem a ČR⁶

Obrázek 4 ukazuje, že instalace PST sice zlepší situaci v Polsku a ČR, ale zvýší přetížení v Německu, což by mělo za následek enormní využívání re-dispatche (viz. 4.1.3.). Tento způsob chodu není dlouhodobě udržitelný a v některých místech ani uskutečnitelný. Většina těchto návrhů nebyla do roku 2015 splněna.

2.3.1.2. Vypínací automatika

Vypínací automatika je nejčastěji založená na principu nadproudové ochrany s nastaveným vypínacím časem. Pracuje s dobou T1 pro varování pro snížení toků (např. 10 – 15 minut), tak aby ten, kdo způsobil dosažení limitní hodnoty, měl možnost přijmout opatření pro snížení toku proudů ve své soustavě a dobou T2 pro samotné vypnutí (např. 1 – 3 minuty). Tato technologie je instalována na hranicích ČR s Polskem a Rakouskem. Je sice levnější než transformátor, ale nenabízí takové operativní možnosti.

⁶ Zdroj Studie Ewis – Final report, str. 63

2.3.1.3. Re-dispatch výrobních výkonů

Pro odlehčení zatížení přenosové soustavy je možné přesunout část výroby elektrické energie na méně výhodné zdroje, které jsou však lépe lokalizovány v rámci přenosové soustavy. Tento způsob není moc efektivní a navíc je velmi nákladný, proto se k němu přistupuje až jako poslední možnosti. Vzhledem k situaci, která je ve střední Evropě, je redispatch používán poměrně často se značnými náklady, které musí hradit každý uživatel sítě a s malým efektem na přerozdělení výkonových toků.

2.3.2. Zvyšování přenosových schopností linek a rozvodů

Tento proces by měl ideálně předcházet instalaci nových zdrojů, protože jejich schvalovací řízení je leckdy delší než u zdrojů. Pokud se situace podcení, může docházet k akutním provozním problémům, které se budou muset řešit operativně nebo provizorně, což obnáší mimořádné náklady a ekonomicky zatěžuje provozovatele přenosové soustavy. Správným postupem by mělo být posílení nejslabšího elementu v síti, případně nejvíce přetíženého. Nicméně posilování je komplexnější a složitější proces, který bere jednotlivé elementy jako jednotný celek a praktikuje se globální přístup. Spolu s navyšováním přenosové kapacity přeshraničních a vnitrostátních linek je třeba úměrně zvyšovat i kapacitu rozvodných zařízení, jejíž jmenovitý proud by měl být vyšší než u venkovních vedení. Jednou z rizikových částí rozvodny je přípojnicový systém, kterým se tato práce zabývá.

3. Přenosová soustava ČR

Přenosová soustava je součástí elektrizační soustavy pracující na napěťových hladinách 400, 220 a částečně 110 kV. V České republice je výhradním provozovatelem na základě licence, kterou podle zákona 458/2000 Sb. uděluje Energetický regulační úřad (ERU), společnost ČEPS, a.s., u které 100 % akcií vlastní stát a akcionářská práva spravuje Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR.

Její základní činností spočívají v zajištění přenosu elektrické energie v ČR a ze zahraničí. Většinou napájí distribuční soustavu, jen v ojedinělých případech může distribuční soustava napájet PS. PS je zodpovědná za kvalitu a spolehlivost dodávky, což spadá spolu s udržováním výkonové rovnováhy a dispečerským řízením mezi systémové služby. K dodržení těchto povinností slouží podpůrné služby, které regulováním výroby nebo spotřeby vyrovnávají rozdíly mezi nimi. Zajištění spolehlivého a bezpečného provozu spadá pod dispečink ČEPS (dispečerské řízení), který zodpovídá za přípravu, operativní řízení a hodnocení provozu. Jeho činnost je řízena směrnicemi EU, závazky v rámci uskupení ENTSO-E (které převzalo operační úkoly od UCTE) a legislativou ČR. Přímou k přenosové soustavě je připojena přibližně polovina instalovaného výkonu ČR, který je 21 931,1 MW (únor 2015). Společnost ČEPS bilaterálně spolupracuje se sousedními provozovateli PS: 50Hertz a TenneT v Německu, PSE v Polsku, SEPS ve Slovensku a rakouský APG a v rámci regionu CEE (Central East Europe) je členem uskupení CEE TSO a celoevropského ENTSO-E.

3.1. Charakteristika přenosové soustavy České republiky

Síť v ČR je charakterizována jako tzv. „tvrdá“, což je dáno hodnotou zkratového výkonu zajišťující napěťovou stabilitu, jehož minimální hodnota se počítá ze symetrických a nesymetrických zkratových proudů. Česká PS je vysoce zauzlená s krátkými přenosy velkých výkonů.⁷ Délky linek na jednotlivých napěťových hladinách, počet přeshraničních propojení a počty rozveden a transformátorů v ČR je v následující tabulce a schéma sítě včetně významných zdrojů na obrázku níže:

⁷ Na 5503 km vedení přenesse ročně více jak 60 000 GWh

Popis zařízení	jednotka	Počet v ČR
Vedení 400 kV	km	3510
Z toho dvojitě a vícenásobné	km	1146
Vedení 220 kV	km	1909
Z toho dvojitě a vícenásobné	km	1038
Vedení 110 kV	km	84
Z toho dvojitě a vícenásobné	km	78
Zahraniční vedení 400 kV	ks	11
Zahraniční vedení 220 kV	ks	6
Rozvodna 400 kV	ks	26
Rozvodna 220 kV	ks	14
Rozvodna 110 kV	ks	1
Transformátory 400/220 kV	ks	4
Transformátory 400/110 kV	ks	46
Transformátory 220/110 kV	ks	21
Transformační výkon	MVA	20380

Tabulka 1 Prvky přenosové soustavy České republiky⁸

⁸ <https://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/Rozvoj-PS.aspx>, str. 6

Schéma rozvodné sítě v ČR



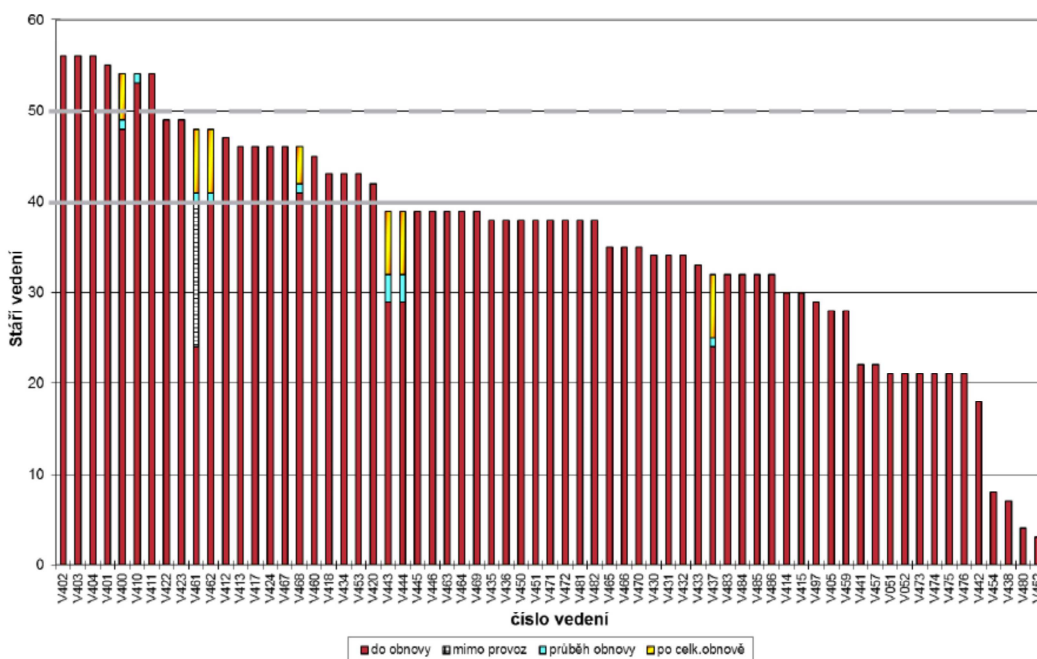
Obrázek 5 Schéma rozvodné sítě České republiky⁹

V obrázku č. 5 je vidět větší koncentrace rozveden v severozápadních Čechách, což je kromě významných přetoků z Německa způsobeno významným instalovaným výkonem na severu, většinou uhelných elektráren, které byly vystavěny blízko uhelných dolů převážně v mostecké pánvi. Tyto zdroje přispívají k objemu energie přenášené z Německa ve směru na jih a jihovýchod k dalším spotřebitelům v jiných částech ČR nebo do zahraničí.

Soustava ČR patří mezi dobře vybudované s dostatečnou kapacitou pro zajištění vlastního provozu s ohledem na lokalizaci zdrojů v ČR a standardních mezinárodních tranzitů. Přesto že páteřní část byla vybudována v 70. a 80. letech, nemá výrazné problémy s řízením provozu a toků výkonů.

⁹ <https://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/Rozvoj-PS.aspx>, str. 5

Stáří vedení PS - 400 kV - k 31.12.2014



Obrázek 6 Stáří vedení 400 kV v ČR¹⁰

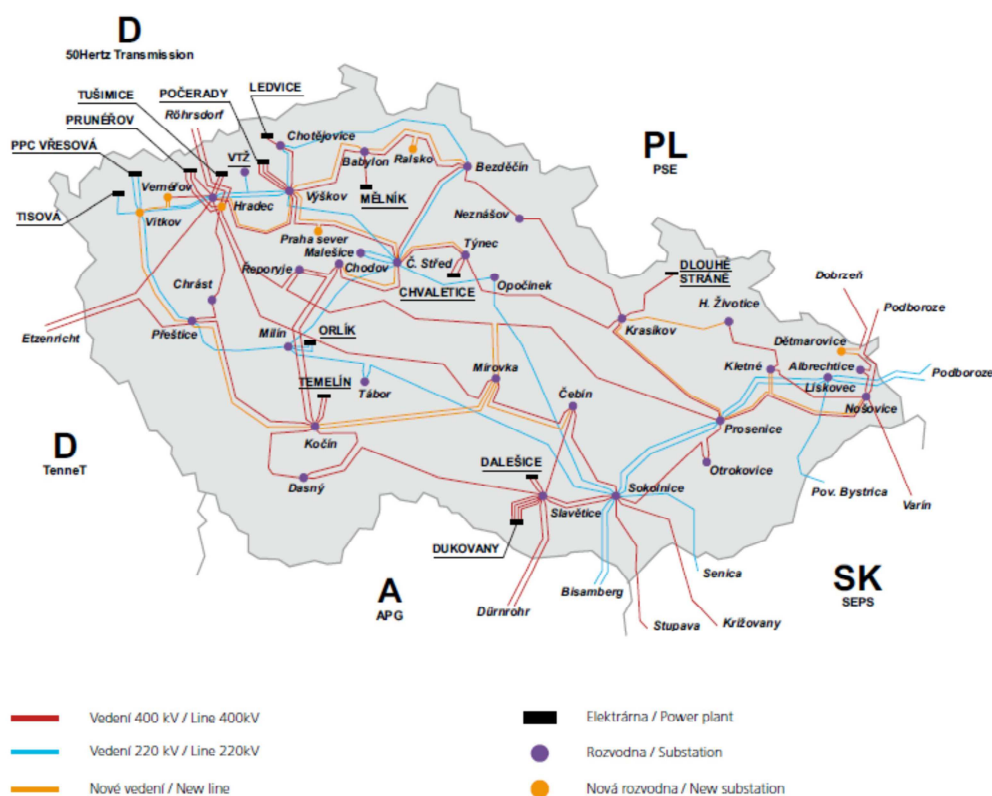
Umístění sítě uprostřed CEE regionu nabízí možnosti mezinárodního obchodu a výpomoci. Tím, že je soustava hodně zauzlená, má nízkou impedanci a to je fyzikální důvod proč přes ni teče proud z okolních států. Naopak nevýhodou je fakt, že se stává tranzitní zemí pro neplánované toky, a proto se musí vyrovnat s velkými přetoky elektřiny. Slabinou je i výrazné stárnutí zařízení, na což ČEPS reaguje rozvojovým plánem s potřebnými investicemi. V roce 2010 byl zahájen rozsáhlý proces investic, který počítá s více jak 60 miliardami korun do roku 2025. Spolu s obnovou je třeba přizpůsobit síť včetně změny konfigurace a využitím nových technologií, které jsou více přizpůsobivé ke změnám v charakteru výroby.

3.2. Rozvoj přenosové soustavy

Rozvoj se týká především vnitrostátních a přeshraničních propojení v kontextu připojování nových zdrojů elektrické energie, zejména obnovitelných zdrojů s kolísavou výrobou. Významný podíl na přenášenou energii v rámci obchodů s elektrickou energií v Evropě má geografická poloha ČR, zejména v tocích sever – jih.

¹⁰ Plán rozvoje přenosové soustavy ČR 2016, str. 23

Dosud panuje v ČR spíše konzervativní přístup, který ale nebylo třeba nijak měnit. V porovnání v evropském měřítku je česká PS malá a experimenty nejsou ekonomicky opodstatněné, zvláště pokud je síť schopná fungovat se stávajícími technologiemi. Toto pravděpodobně nebude platit v budoucnu, kdy změny si vyžádají jiný přístup a bude potřeba reagovat rychleji a efektivněji.



Obrázek 7 Mapa rozvoje české PS do roku 2023¹¹

Plánování rozvoje vychází z dispečerského řízení a monitoringu PS jako celku, který zjišťuje slabá místa a nedostatky. U případné úpravy nebo stavby je potřeba nejprve analyzovat jejich dopad na celou síť, klady a zápory, protože není vyloučeno, že změna k lepšímu v jedné části může způsobit komplikace v jiné části sítě nebo nemusí stačit a je potřeba provést změny na více částech. Až poté začíná samotné plánování, což je velmi dlouhý proces závislý na mnoha faktorech.

Z tabulky 2 je vidět jak zdoluhavý proces může být výstavba vedení od studií až k samotné realizaci. Linky jsou z časového hlediska zřejmě nejkomplikovanější, zvláště

¹¹ Profil společnosti ČEPS, str. 12

problematické je uzavírání smluv s vlastníky pozemků, které často brzdí celý proces. Nejlepším příkladem je již zmíněný německý plán Sudlink, kde se tyto smlouvy zdají zatím nedostižným cílem. V případě rozvoden a nových zdrojů je tato situace jednodušší, protože se to týká buď nesrovnatelně menších, nebo žádných pozemků a preferuje se odkup pozemku. Celkem se takový projekt může prodloužit na 7,5 až 12 let, což je v porovnání s podobným procesem u většiny zdrojů podstatně delší.

Činnost	Doba trvání (měsíce)
Studie proveditelnosti, umístění trasy a územní otázky	6 - 12
Studie EIA „Environmental Impact Assessment“ a veřejná projednání	18 - 24
Zanesení trasy do katastrálních map (územní plán), předběžné dohody s vlastníky pozemků	12
Předběžný návrh stavby, požadavky do ÚPD 12 – 24 měsíců	12 - 24
Veřejná projednání a zapracování připomínek	
Smlouvy s vlastníky pozemků	6 - 12
Projekt na provedení stavby	6
Projekční a stavební postupy	12 - 18
Výběrová řízení, volba dodavatele vč. dořešení výhrad navrhovatelů	6 - 12
Skutečná výstavba	12 - 24
Celková doba	90 - 144

Tabulka 2 Doba trvání výstavby vedení 400 kV¹²

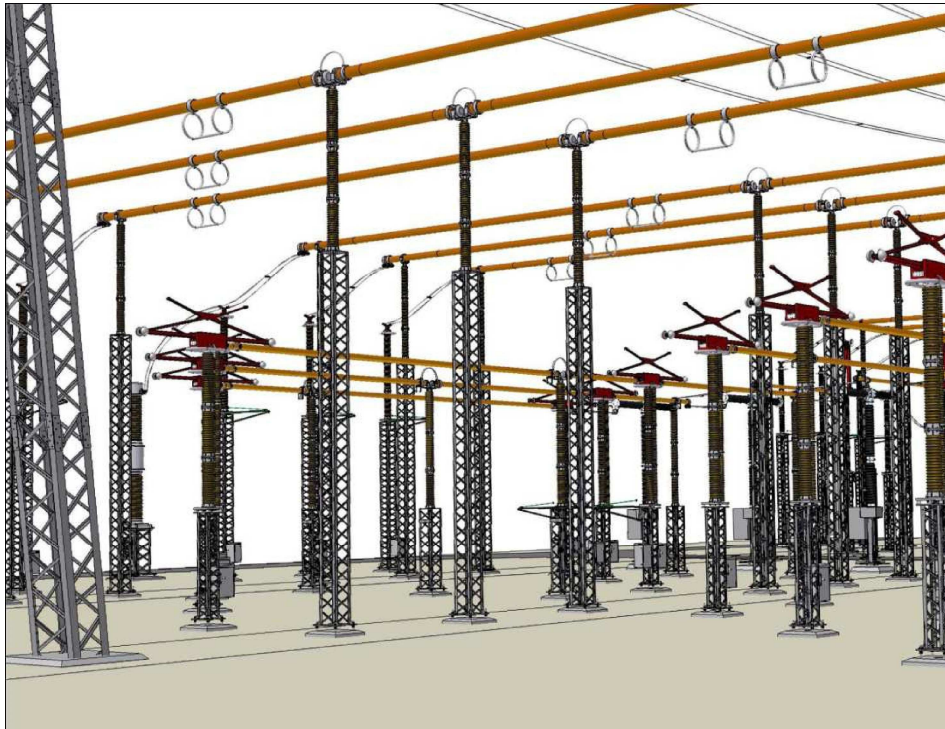
¹² <https://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/Rozvoj-PS.aspx>,

4. Elektrické stanice přenosové soustavy 400 kV

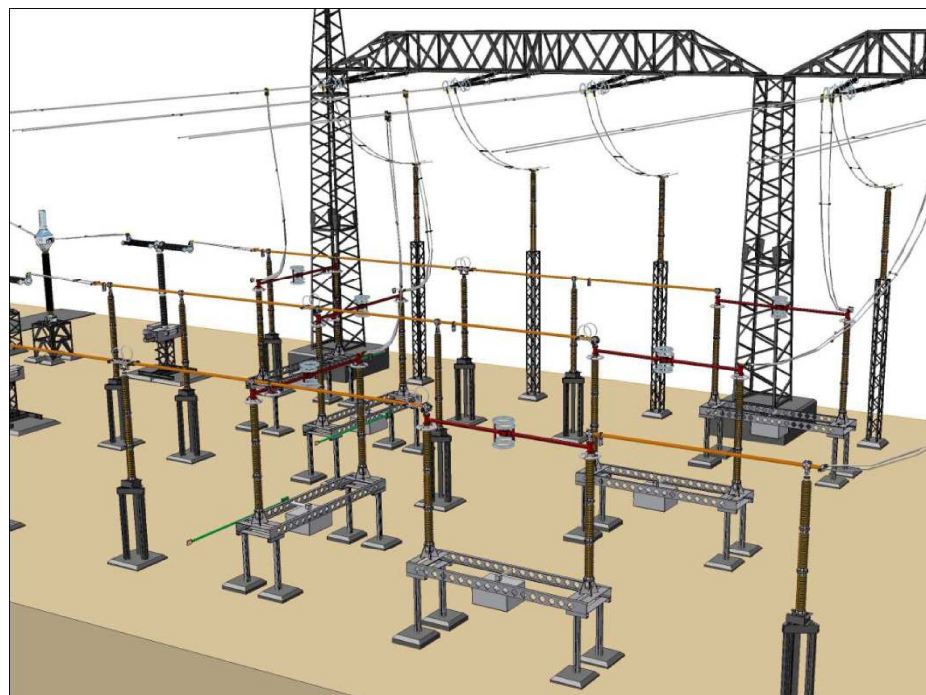
Elektrická stanice je soubor částí tvořící uzel elektrizační sítě. Jednotlivé části se člení podle účelu na transformovny, sloužící ke změně napěťové hladiny a v případě transformátorů s řízeným posuvem fáze slouží také jako ochrana sítě. Tato práce je zaměřená na rozvodny (spínací stanice), tedy část elektrické stanice určené pro rozvod elektrické energie stejného napětí. Kromě výše uvedených využití se v elektrických stanicích kontroluje kvalita elektrické energie, řídí toky energie a je zde možnost odpojovat části sítě v případě poruchy, nebo pokud je nutná oprava a údržba.

V ČR jsou většinou rozvodny venkovního provedení s lanovými nebo trubkovými přípojnými, jen v případě prostorových omezení se používají zapouzdřené např. rozvodny Chodov a Chotějovice, ve kterých se používá jako chlazení nejčastěji plyn SF6 (fluorid sírový). U zapouzdřených rozvodů jsou nevýhodou vysoké investiční výdaje a v případě poruchy také omezený přístup k technologiím. Mohou se použít také u některých vývodových rozvodů elektráren.¹³

¹³ <https://www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex/Stranky/default.aspx>



Obrázek 8 Příklad uspořádání rozvodny 420 kV v trubkovém provedení¹⁴



Obrázek 9 Příklad uspořádání rozvodny 420 kV v lenovém provedení¹⁵

¹⁴ Projektová dokumentace společnosti EGEM, s.r.o.

¹⁵ Projektová dokumentace společnosti EGEM, s.r.o.



Obrázek 10 Zapouzdřená rozvodna Chotějovice¹⁶

Rozvodny se dají rozdělit podle systému přípojnic, který určuje mimo jiné spolehlivost rozvodny:

- Jednoduchý systém přípojnic – lze použít, pouze pokud není využíván trvalý provoz.
- Dvojitý systém přípojnic – umožňuje odstavit jednu přípojnicí za účelem opravy nebo údržby a v případě poruchy. Také umožňuje provozovat dvě paralelně pracující zapojení.
- Trojitý systém přípojnic – používá se v případě potřeby rozdělení provozu do třech paralelních zapojení, nebo pokud je třeba provozovat dvě přípojnice samostatně.
- Rozvodny s pomocnou přípojnicí – pomocná přípojnice je vždy v kombinaci s dvojitým nebo trojitým systémem přípojnic, díky této přípojnici lze odstavit pole za účelem revize vypínače, odpojovačů a přístrojových transformátorů, aniž by se muselo odstavit celé vedení nebo vývod

¹⁶ <http://elektrika.cz/data/clanky/obsah-casopisu-all-for-power-2-2011>

transformátoru. K této přípojnici je třeba zvláštní spínací pole, které nahrazuje nefungující (revidované) pole.

- Okružní (prstencové) přípojnice – minimalizuje následky zkratů na minimální počet odboček

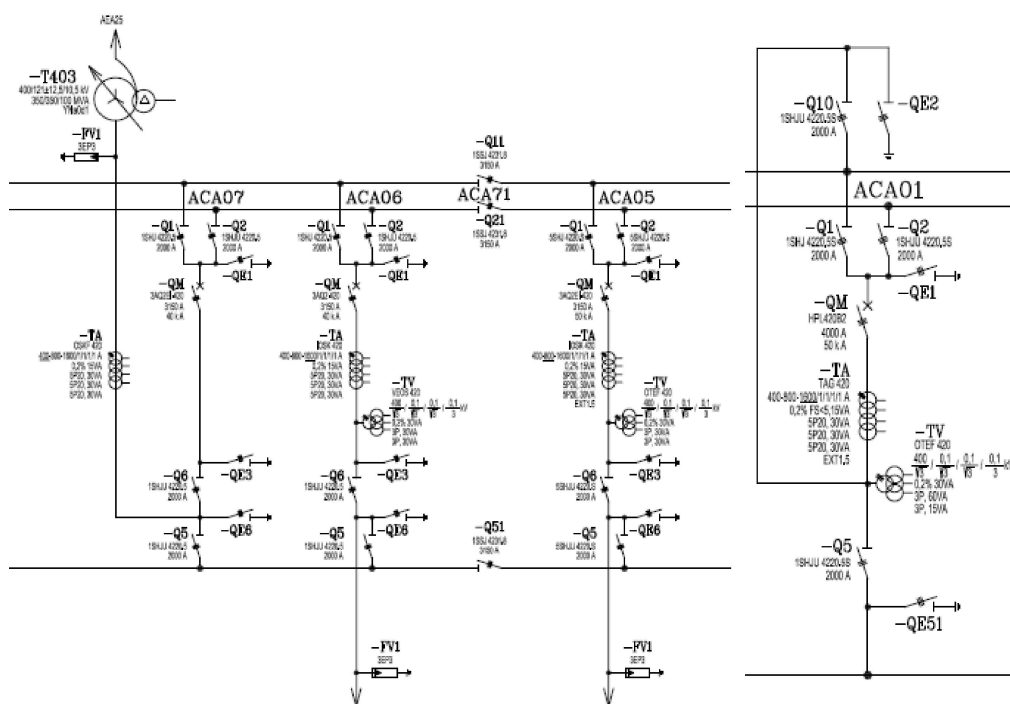
Rozvodny s větším počtem vývodů mají navíc podélné dělení, které umožňují různé propojení přípojnic pro optimalizaci provozu. Při návrhu rozvodny je třeba najít ideální alternativu z ekonomického hlediska, aby návrh zároveň splňovala technické požadavky a normy, zejména spolehlivost danou „kritériem N - 1“ a jmenovitý proud. Měl by se také řídit plánovaným vývojem přenosové soustavy a vývojem instalace nových zdrojů, protože během životnosti elementů rozvodny se mění zatížení a může tak docházet k přetížení, zvláště pak v situaci, jaká je nyní v regionu CEE. Hlavní částí rozvodny jsou přípojnice, které přívodními a vývodovými odbočkami zajišťují rozvod elektrické energie.

4.1. Silová zařízení rozvodny 400 kV

Silová zařízení mají za úkol provádět spínací operace, umožnit sledování provozních veličin, jako je napětí, proud a v neposlední řadě zajistit provozní bezpečnost zařízení a spolehlivost provozu. Správné složení a parametry jsou součástí návrhu elektrické stanice a musí odpovídat parametrům technologického celku, místu instalace a splňovat provozní požadavky elektrické sítě. Uvedené předpoklady vyplývají a navazují na parametry venkovních vedení, transformátory a další elektroenergetická zařízení. Správnou činnost silových zařízení je třeba ověřovat pravidelnými revizemi, při kterých je nutné sledovat jejich jmenovité parametry, případně zhodnotit celkový technický stav zařízení, zda odpovídá zatížení a nehrozí jejich selhání, případně poruchy. Mezi nejdůležitější parametry patří:

- Jmenovité napětí
- Frekvence
- Jmenovitý proud
- Koordinace izolace – pevnost izolační soustavy určuje maximální povolené napětí. Musí mít dostatečnou izolační pevnost v dané aplikaci a musí brát v potaz přeskokové vzdálenosti živých částí, napětí při průměrné kmitočtu, atmosférickém impulzu atd.

- Zkratová odolnost – jsou definovány hodnoty ekvivalentního oteplovacího proudu v sítích PS v závislosti na napětí. Mají zamezit nekontrolovanému nárůstu zkratových proudů a tím zabránit ovlivnění dalších zařízení. Tyto hodnoty vycházejí přímo z parametrů vodičů v rozvodně, zejména jejich mechanických vlastností.
- Radiové rušení – fyzikální jevy při vedení elektrického proudu (koróna, klouzavé výboje atd.) mají za následek radiové rušení, které musí být eliminováno. Zvláště pak v sítích vvn a zvn.
- Vnější prostředí – je třeba brát v potaz okolí, které by mohlo mít za následek znečištění ovzduší v místě instalace a způsobit tak častější vypínání z důvodu údržby. Vliv na provoz má i nadmořská výška.



Obrázek 11 Jednopolové schéma rozvodny, vývodové pole (ACA05, ACA06), přívodní pole (ACA07), podélné dělení (ACA71) a kombinované spínací pole (ACA01)

Tato práce se zabývá pouze rozvodnami 400 kV, a tak popis následujících zařízení je jen pro tuto napěťovou hladinu.

4.1.1. Vypínače (QM)

Vypínač je elektromotorický přístroj slouží k vypínání a zapínání prvků, kde je pohonem pružinový střádač pro každý pól, nebo hydraulický pohon, který využívá rozvod oleje a funkci pružinového střádače plní stlačený plyn. Používá se zhasací plyn SF₆. Vypínač je třeba dimenzovat podle typu rozvodny tak, aby byl schopný za jakékoliv situace (za běžných i poruchových stavů) přerušit obvod. Každý vypínač má dvě zhasací komory, tedy k přerušení obvodu dochází ve dvou místech. Paralelně ke zhasacím komorám je připojen kondenzátor, který napomáhá zhasení. Požadované hodnoty pro rozvodnu 400 kV jsou:

– Nejvyšší napětí	420 kV
– Jmenovitý proud	3150 A
– Jmenovitý vypínací proud	40, 50, 63 kA
– Jmenovitý zapínací proud	100, 125, 157 kA

4.1.2. Odpojovače a uzemňovače (QX, QEX)

Odpojovače i uzemňovače fungují na stejném principu. Jejich úkolem je odpojit/spojit respektive uzemnit pomocí elektromotoru vypnutý obvod, tedy fungují bez zatížení. Odpojovače slouží k propojení zařízení k přípojnici, pomocné přípojnici, vývodu nebo k propojení v poli. Oproti tomu zemniče propojí zařízení s potenciálem země pomocí zemnicí soustavy, pokud je potřeba provést práci na zařízení. Zemniče bývají v rozvodnách již součástí odpojovačů. Požadované hodnoty pro rozvodnu 400 kV jsou stejné jako u vypínačů:

– Nejvyšší napětí	420 kV
– Jmenovitý proud	3150 A
– Jmenovitý vypínací proud	40, 50, 63 kA
– Jmenovitý zapínací proud	100, 125, 160 kA

4.1.3. Přístrojové (měřicí) transformátory proudu a napětí PTP, PTN (TA, TV)

Slouží k transformaci napětí a proudu na nižší hodnoty pro měřicí přístroje a elektrické ochrany, někdy mohou být součástí jednoho kombinovaného zařízení. Používá se izolační plyn SF₆ nebo izolační olej. Parametry přístrojových transformátorů napětí PTN:

- Nejvyšší napětí 420 kV
- Jmenovité primární napětí 400/√3 kV
- Jmenovité sekundární napětí 100/√3 V

Parametry přístrojových transformátorů proudu PTP:

- Nejvyšší napětí soustavy 420 kV nebo 245 kV
- Jmenovitý primární proud 1200, 1600, 2000, 3000 a více A
- Jmenovitý sekundární proud 1 A
- Počet jader 2, 3, 4, 5, 6
- Přetížitelnost 150% IN, 200% IN
- Krátkodobý zkratový proud 40, 50, 63 kA (podle typu rozvodny)
- Dynamický zkratový proud 100, 125, 160 kA
- Třída přesnosti 0,2%; 0,5%

4.2. Hlavní ocelová konstrukce

Jedná se o konstrukci vývodového portálu, přípojnicového portálu, konstrukce přípojnice a konstrukce nesoucí podpěrné izolátory přípojnic. Je svařena z válcových profilů a musí být bezvýhradně příhradová. Skládá se z břevna, stožárů, nástavce pro zemnicí lano a hromosvodu. Ocelová konstrukce musí odolat mechanickému namáhání, které vycházejí z posouzení kombinací různých zatížení. Tyto kombinace musí zahrnovat i situace závislé na klimatických podmínkách a výjimečných událostech. Nejnepříznivější zatížení musí být použito ke stanovení mechanické pevnosti ocelových konstrukcí. Jsou zvažována následující zatížení v případě provozního zatížení:

- Zatížení vlastní vahou

- Zatížení tahem vodičů
- Montážní zatížení
- Zatížení námrazou
- Zatížení větrem

A v případě mimořádných zatížení:

- Zatížení vlastní vahou
- Zatížení tahem působícím současně s největšími příležitostními zatíženími: zkratové síly, ztráta tahu vodiče.

Při výstavbě nové HOK je nutné se řídit platnými normami, ale při změně parametrů stávajících rozvodů, zejména při zvýšení zkratové odolnosti nebo zvýšení počtu lan na fázi se účinky zkratových proudů počítají podle tehdy platných norem. Pokud HOK vyhoví výpočtu, jedná se o využití projektové rezervy a není třeba HOK upravovat. Pokud ovšem vypočtené silové účinky převyšují limit stávající HOK, musí být realizována nová podle platných norem.

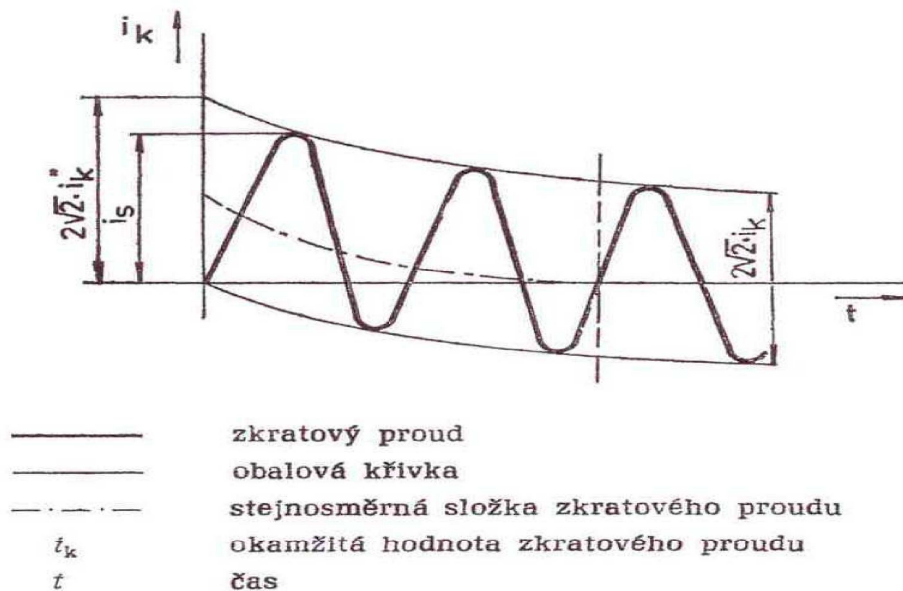
Norma ČSN 38 1754 (Dimenzování elektrického zatížení podle účinků zkratových proudů – 1974) následně doplněná normou ČSN 33 3015 (Zásady dimenzování podle elektrodynamické a tepelné odolnosti při zkratech – 1984) jsou platné. Norma ČSN 33 30 40 (výpočet účinků zkratových proudů – 1981) je nahrazena normou ČSN EN 60 856-1 (Zkratové proudy – výpočet účinků – 1997)

4.3. Výpočtové metody dle ČSN 38 1754 a ČSN 33 3015

Norma ČSN 38 1754 (Dimenzování elektrického zařízení podle účinků zkratových proudů) byla schválena v roce 1974. Norma stanovuje postupy pro dimenzování elektrických zařízení při působení zkratových proudů a to s ohledem na dynamické a tepelné účinky. Klade důraz na to, aby elektrické zařízení a jeho nosné konstrukce byly navrženy tak, aby při působení zkratových proudů nedošlo k takovým poškozením, které by bránily jeho další spolehlivé funkci. V roce 1984 byla změněna s odkazem na normu ČSN 33 3015 (Zásady dimenzování podle elektrodynamické a tepelné odolnosti při zkratech), schválenou 1983.

Parametry určující dynamické vlivy:

- počátečním zkratový proud I_k'' [A] - periodická složka zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu. Uvádí se v efektivní hodnotě.
- ustálený zkratový proud I_k [A] – proud, který protéká po skončení přechodového jevu vznikajícího v souvislosti se zkratem. Uvádí se v efektivní hodnotě.
- doba zkratu – součet úplné vypínací doby a doby působení ochrany t_k [s]
- nárazový zkratový proud I_s [A] – nejvyšší okamžitá hodnota zkratového proudu.



Obrázek 12 Charakteristický tvar křivky časového průběhu zkratového proudu v jedné fázi třífázové soustavy

Parametry elektrického zařízení charakterizující jeho dynamickou a tepelnou odolnost proti působení zkratového proudu:

- jmenovitý dynamický zkratový proud – nárazový zkratový proud, jehož dynamické působení musí elektrické zařízení snést bez poškození narušujícího jeho provozu schopnost.
- ohebné vodiče – vodiče, jež nejsou schopny přenášet na podpěry ohybové momenty.

- statická zatížení vyvolaná tahem ohebného vodiče – tahová síla ohebného vodiče v místě upevnění.
- dynamické zatížení vyvolané tahem ohebného vodiče – síla, kterou ohebný vodič působí na upevnění při zkratu.

Pro určení doby trvání zkratu se vychází ze stavu (konfigurace sítě), provozních podmínek a doby působení ochrany, která při poruše první naběhne a vyšle vypínací impuls. Tato doba se v elektrických stanicích pohybuje v rozmezí 0,2 až 0,5 s.

Podmínky pro volbu elektrického zařízení podle dynamické a tepelné odolnosti proti působení zkratového proudu. Dynamická odolnost při zkratech:

- Ohebné vodiče jsou dynamicky odolné proti působení zkratového proudu, jestliže elektromagnetické síly vyvolané tímto proudem nevedou ani k překročení dovolených hodnot mechanického namáhání vodičů a míst jejich upevnění, ani ke snížení dovolených minimálních vzdáleností mezi vodiči, jakož mezi vodičem a zemí.
- Při stanovení dynamických sil vznikajících vzájemným působením vodičů různých fází při zkratu je třeba brát v úvahu:
 - třífázový zkrat a maximální statický tah vodiče při nejnižších výpočtových teplotách vodiče a okolního prostředí, což určuje maximální dynamický tah vodiče v okamžiku první amplitudy kmitu;
 - třífázový zkrat a statický tah vodiče při maximálně přípustných teplotách vodiče a okolního prostředí, což určuje maximální výchylku při zkratu, maximální přiblížení vodiče k sousedním částem pod napětím nebo k uzemněným částem elektrického zařízení v okamžiku amplitudy prvního kmitu, a maximální dynamický tah vodičů;
 - dvoufázový zkrat a statický tah vodiče při maximálně přípustných teplotách vodiče a okolního prostředí, což určuje maximální vzájemné sblížení vodičů v okamžiku amplitudy prvního zpětného kmitu po odepnutí zkratového proudu

Kontrola svazkových vodičů:

Protéká-li svazkovým vodičem zkratový proud, vznikne ve vodiči, závěsných izolátorech a na pomocné konstrukci rázové přetížení.

Jeho velikost závisí na:

- Hodnotě zkratového proudu
- Tíži, průřezu a materiálu vodičů
- Tíži a rozměrech izolátorů
- Tíži, rozměrech a pružnosti nosné konstrukce
- Uspořádání vodičů a svazkovém kroku
- Vodorovném tahu před zkratem

Největší přetížení vzniká:

- Na konstrukci při třípólovém zkratu
- Na vodičích a izolátorech při jednopólovém zkratu

Matematické řešení vede na výpočet soustavy diferenciálních rovnic. Určují se poměry v jedné fázi protékané třífázovým zkratovým proudem. Pro dimenzování nosné konstrukce se uvažuje současné působení všech vodičů, zakotvených na této konstrukci. Předpokládá se, že jeden upevňovací bod lanového rozpětí včetně izolátorů je pevný, protože síly na obou stranách konstrukce jsou v rovnováze. U druhého upevňovacího bodu nutno respektovat posuvy v důsledku pružnosti nosné konstrukce. Pro zhruba dimenzování možno uvažovat konstrukce s jedním stupněm volnosti.¹⁷

4.4. Výpočtové metody dle ČSN EN 60865-1

Tato norma je určena pro výpočty mechanických a tepelných účinků zkratových proudů. Při používání této normy je nutné vycházet z toho, že:

- výpočty zkratových proudů se provádí podle mezinárodní normy IEC 909 (Short-circuit currents in three-phase a.c. systems)
- trvání zkratu užití v této normě závisí na koncepci ochran a mělo by být uvažováno v tomto smyslu (podle použitého zařízení)
- tyto normalizované postupy jsou přizpůsobeny praktickým požadavkům a obsahují zjednodušení s výsledky na straně bezpečnosti

Maximální tahové síly způsobené účinky zkratových proudů v hlavních vodičích se určují po výpočtu charakteristických parametrů pro uspořádání a typ zkratu. U rozpětí je

¹⁷ Porovnání výpočtových metod a jejich výsledků pro lanové propoje. Str. 15

třeba rozlišit mezi tahovou silou F_t při zkratu, tahovou silou F_f po zkratu, když vodič klesá z vychýlené polohy zpět. Dále se počítá tahová síla F_{pi} způsobená kontrakčními účinky ve svazkovém vodiči. Tahové síly F_t , F_f a F_{pi} zahrnují síly způsobené stálým zatížením a výpočet musí být prováděn se základním statickým tahem F_{st} při horší z dvou alternativ extrémních teplot (např. -20 a 60 °C). Zároveň je potřeba stanovit výchylku rozpětí a minimální vzdušnou vzdálenost mezi vodiči.

V uspořádání s ohebnými vodiči jsou namáhání vyskytující se při dvoufázovém a trojfázovém zkratu přibližně stejná. Nicméně při dvoufázovém zkratu je výsledkem typické vychýlení vodiče snižující minimální vzdálenost (když prochází sousedními vodiči zkratový proud pohybují se po zkratu směrem k sobě). V případě trojfázového zkratu se střední vodič pohybuje málo v důsledku sil působících ze dvou směrů. V důsledku toho počítáme proto síly F_t , F_f a b_h pro dvojfázový zkrat.

Navrhované zatížení pro konstrukce, izolátory a připojovací místa s tahovými silami přenášenými izolátorovými řetězci musí vyhovovat při maximální hodnotě z F_t , F_f nebo F_{pi} jako statické zatížení.¹⁸

4.5. Vodiče pro přípojnice rozvodny 400 kV

Přípojnice propojuje pole napříč celou rozvodnou a soustředí se na ně veškerý výkon v rozvodně, i díky tomu jsou jedním z nejrizikovějších částí rozvodny. Jak již bylo uvedeno výše, jejich spolehlivost, a tím spolehlivost celé rozvodny, se dá navýšit správně zvoleným zapojením/uspořádáním v kombinaci se správně navrženým systémem přípojnic a vodiči pro přípojnice. V rozvodnách 400 kV se používají většinou dvojsvazky AlFe lan (obal z hliníku a nosné jádro z oceli) nejčastěji 2 x 758-AL1/43-ST1A:

- 758 je průřez celého vodiče v mm²
- AL1 je materiál vodivého obalu. V tomto případě se jedná o tvrdě tažený hliník
- 43 je průřez duše (jádra) vodiče v mm²

¹⁸ Porovnání výpočtových metod a jejich výsledků pro lanové propoje. Str. 18

- ST1A je označení pozinkovaného ocelového drátu

AlFe lano je zavěšené kotevními nebo nosnými izolátory na stožárech, nejčastěji typu portál. Jsou požadovány následující hodnoty:

- Krátkodobý zkratový proud po dobu 1s (I_K'') 40, 50 kA (u blokových vedení 63 kA)
- Dynamický zkratový proud (I_{km}) 100, 125 kA (výjimečně 160 kA)
- Jmenovitý proud přípojnic minimálně 2250 A
- Nejvyšší provozní napětí 420 kV

S ohledem na jmenovité proudy jsou přípojnice nejvíc namáhanou částí elektrické stanice. Zároveň na stejnou hodnotu jmenovitého proudu přípojnic je nezbytné dimenzovat i pole KSP (kombinovaný spínač přípojnic) a pole PD (podélné dělení přípojnic). Pole KSP slouží k propojování systémů přípojnic, případně je využíváno k náhradním provozům vývodů přes pomocnou přípojnicí. Obecně je možné přípojnice řešit pomocí lanových, anebo trubkových propojů. Práce se zabývá jen lanovými přípojnicemi, aby byl splněn předpoklad minimálního zásahu do zbytku rozvodny.

Přípojnice je omezená průhybem, který se mění s teplotou a je závislý na tepelné roztažnosti vodiče, mimo to je také vodič omezen tahovou silou. Mají na něj vliv klimatické podmínky, jak námraza a extrémně vysoké teploty tak způsob zatížení. Postupem času se průhyb zvětšuje, což je dáno vlastnostmi kovů trvale zatížených mechanickým namáháním. V nových rozvodnách se přechází na trubkové přípojnice, které mají lepší elektrické vlastnosti a delší životnost, ale jsou v konečném důsledku výrazně dražší.

U vodiče se sledují mechanické a elektrické parametry jako jsou pevnost v tahu, průřez a hmotnost ve vztahu na okolní zařízení. Dále důležité účinky zkratových proudů na nosné konstrukce, průhyb a minimální vzdušné/přeskokové vzdálenosti.

4.5.1. Přenosová kapacita vodiče

Přenosová kapacita je parametr vodiče udávající maximální hodnotu přenášeného proudu v určitých podmínkách okolního prostředí. Používá se termín ampacita (Ampere capacity). Ampacita je propojena se ztrátami, které jsou z velké části tepelné tzv.

Jouleovy ztráty způsobené průchodem proudu vodičem. Při jmenovitém proudu by nemělo docházet při běžném provozu k nevratným deformacím vodiče či k jeho poškození. Tepelné namáhání urychluje stárí vodiče a zvyšuje pravděpodobnost poruchy. Zahřátý vodič se úměrně teplotě prodlužuje a zvětšuje se tak průhyb vodiče. Veškeré parametry spojené se jmenovitým proudem a s tím spojenou maximální provozní teplotou musí být zohledněny při vybírání typu a druhu vodiče. Na linkách se přenosová kapacita uvádí nižší než u stejného vodiče v rozvodně. Důvodem je rozteč stožárů, která je u linek větší, a tím jsou na lano i na ocelovou konstrukci vytvářeny větší mechanické nároky.

Při požadavku na navýšení přenosové kapacity je kromě samotných vodičů třeba brát v úvahu i další ovlivněné části. Konkrétně ocelovou konstrukci, jejíž pevnost by nemusela odpovídat zvětšené zátěži a povolené vzdálenosti, které se mohou porušit s rostoucím proudem. Je třeba brát v potaz i magnetické pole, které roste s proudem.

4.5.2. Výpočet přenosové kapacity vodiče

Přenosová kapacita se vypočítává z tepelné bilance vodiče a je závislá zejména na procházejícím proudu, odporu vodiče a prostředí okolo vodiče. Přenosová kapacita je stanovena dle IEC TR 61597 Overhead electrical conductors - Calculation methods for strained bare conductors. Z parametrů stanovujících okolní prostředí jsou důležité zejména teplota okolí, sluneční záření, rychlost a směr větru. Hodnoty jednotlivých meteorologických veličin jsou měřeny on-line ve všech rozvodnách PS. Rozdíly teplot budou v rámci elektrické stanice téměř stejné, ale rychlost a směr větru se může lišit. Pro výpočet jsou uvažovány hodnoty normované PPS. Pro ČR to jsou minimální rychlost větru 0,6m/s pod konstantním úhlem 45° ve směru k hlavní ose vodiče a maximální naměřená teplota 40 °C.

Vstupní parametry pro výpočet přenosové kapacity vodiče 1xAlFe 750/43:

Intenzita slunečního záření	$S_i=1120 \text{ W/m}^2$
Teplota okolí	$T_1=40 \text{ °C}$
Max. dovolená teplota vodiče	$T_2=95 \text{ °C}$
Rychlost větru	$v=0,6 \text{ m/s}$
Úhel směru větru	$\varphi=45^\circ$ (směrem k hlavní ose vodiče)
Průměr vodiče (AlFe 750/43)	$d=0,0365 \text{ m}$

Součinitel absorpce povrchu vodiče	$\gamma=0,5$
Součinitel emisivity vodiče	$K_e=0,5$
Stefan-Bolzmannova konstanta	$s=5,16 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
Tepelná konduktivita	$\lambda=0,02585 \text{ W/m.K}$
Koeficient tepelného odporu	$\alpha=4,03 \cdot 10^3 \text{ 1/K}$
Měrný odpor	$R_{20}=0,03884 \text{ } \Omega/\text{km}$

Výpočet přenosové kapacity vodiče 1xAlFe 750/43:

Rovnice tepelné bilance:

$$P_J + P_{sol} = P_{rad} + P_{conv} \quad [3]$$

kde	P_J	teplo -generované Jouleovými ztrátami
	P_{sol}	teplo získané povrchem vodiče od slunečního záření
	P_{rad}	tepelné ztráty vysálané vodičem
	P_{conv}	tepelné ztráty konvekci

Výpočet odporu vodiče při teplotě T_2 :

$$R_T = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (T_2 - 20)) = 0,03884 \cdot (1 + 4,03 \cdot 10^{-3} \cdot (95 - 20)) = 0,051 \text{ } \Omega \quad [4]$$

Reynoldosovo číslo:

$$\begin{aligned} Re &= 1,644 \cdot 10^9 \cdot v \cdot \cos \phi \cdot d \cdot ((T_1 + 273) + 0,5 \cdot ((T_2 + 273) - (T_1 + 273)))^{-1,78} = \\ &= 1,644 \cdot 10^9 \cdot 0,6 \cdot \cos 45^\circ \cdot 0,0365 \cdot ((20 + 273) + 0,5 \cdot ((95 + 273) - (20 + 273)))^{-1,78} \\ &= 791,89 \end{aligned} \quad [5]$$

Nusselovo číslo:

$$Nu = 0,65 \cdot Re^{0,2} + 0,23 \cdot Re^{0,62} = 0,65 \cdot 791,86^{0,2} + 0,23 \cdot 791,86^{0,62} = 15,96 \quad [6]$$

Tepelné ztráty sáláním:

$$\begin{aligned} P_{rad} &= s \cdot \pi \cdot d \cdot K_e \cdot ((T_2 + 273)^4 - (T_1 + 273)^4) = \\ &= 5,16 \cdot 10^{-8} \cdot \pi \cdot 0,0365 \cdot 0,5 \cdot ((95 + 273)^4 - (20 + 273)^4) = 28,42 \text{ W} \end{aligned} \quad [7]$$

Příspěvek slunečního záření:

$$P_{sol} = \gamma \cdot d \cdot S_i = 0,5 \cdot 0,0365 \cdot 1120 = 20,44 \text{ W} \quad [8]$$

Tepelné ztráty:

$$\begin{aligned} P_{conv} &= \lambda \cdot Nu \cdot \pi \cdot ((T_2 + 273) - (T_1 + 273)) = \\ &= 0,02585 \cdot 12,96 \cdot ((95 + 273) - (20 + 273)) = 71,27 \text{ W} \end{aligned} \quad [9]$$

Maximální proud vodičem:

$$P_j = R_T \cdot I_{\max}^2 \Rightarrow$$

$$I_{\max} = \left(n \cdot \frac{P_{\text{rad}} + P_{\text{conv}} - P_{\text{sol}}}{R_T} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(n \cdot \frac{28,42 + 71,27 - 20,44}{0,051} \right)^{\frac{1}{2}} = 1251,73 \text{ A} \quad [10]$$

kde $n=1$ a vyjadřuje počet paralelních vodičů,

pro $n=2$ je $I_{\max}=2503,46 \text{ A}$,

pro $n=3$ je $I_{\max}=3755,19 \text{ A}$,

pro $n=4$ je $I_{\max}=5006,92 \text{ A}$

4.5.3. ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced)

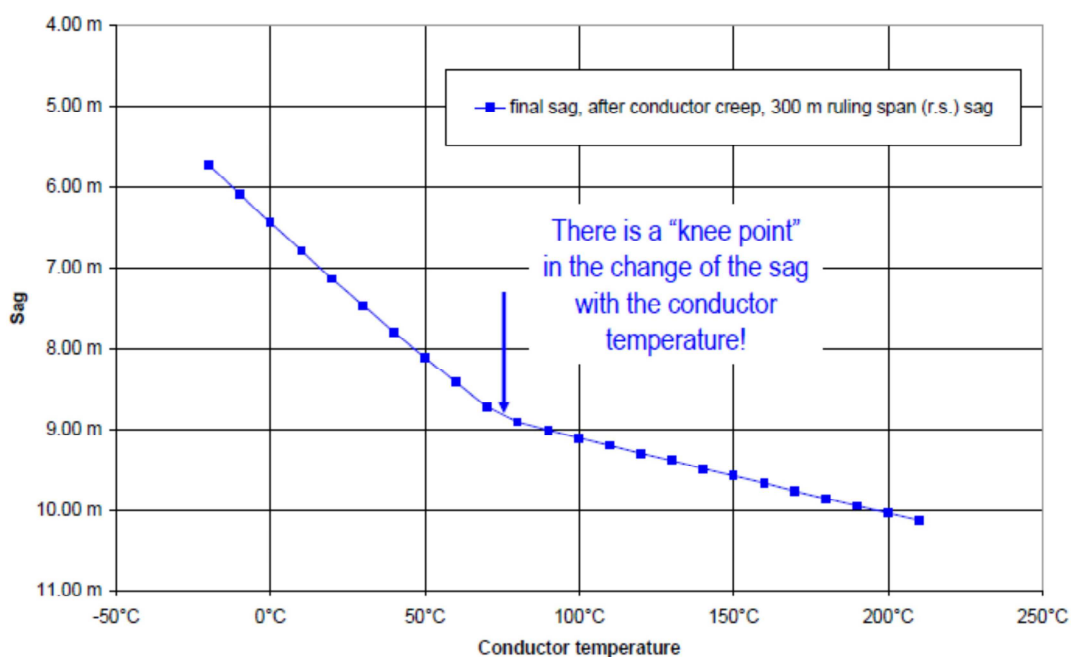
Běžně se používá vodič ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced), známý jako AlFe lano. Obal ACSR se skládá z hliníkových drátů 1350-H19 (téměř čistý hliník) spirálovitě obtočených kolem ocelového jádra, které má větší pevnost. Pokud je vystaveno teplotám větším než $100 \text{ }^\circ\text{C}$, ztrácí s časem svou pevnost v tahu a při delším vystavení vyšším teplotám se stává „plně žíhaným“, označovaný jako 1350-H0, který má sice stejné chemické složení, ale s méně než poloviční pevností.



Obrázek 13 Běžně používaný ACSR vodič

4.5.4. Vysokoteplotní vodiče

Materiál obalu vysokoteplotního vodiče je speciální slitina hliníku, díky čemuž vodič odolává vyšším teplotám až do 250° C, aniž by docházelo k trvalým deformacím nebo zničení vodiče. Na obal vysokoteplotního vodiče nejsou kladeny takové nároky na pevnost, a proto může být vystavován mnohem vyšším teplotám. Okolo nosného jádra je několik vrstev kruhových nebo lichoběžníkových vláken obalu, díky čemuž mají při stejném průměru větší průřez.



Obrázek 14 Příklad průběhu součinitele teplotní roztažnosti pro ACCR vodič s vyznačeným bodem zlomu (knee-point)

Kompozitní jádro se může lišit podle výrobce, ale jeho vlastnosti jsou velmi podobné. Slitina jádra je silnější a u vysokoteplotních vodičů s nízkým průhybem má menší tepelnou roztažnost, takže při teplotách za bodem zlomu neroste průhyb tak rychle. Další výhodou je jejich odolnost vůči okolním vlivům a tím se nabízí jejich instalace v extrémních podmínkách, jako jsou velké mrazy nebo silný vítr. Díky tomu jsou silnější a zároveň lehčí, což umožňuje plánovat větší rozteče mezi stožáry a tím překlenout místa, kde není možné je postavit (např. řeky, kaňony a jezera)

Mohlo by se zdát, že jsou ve všem lepší než dosud používané ACSR vodiče, které fungují v energetických soustavách desítky let a ne náhodou. Kombinace nosného ocelového jádra a vodivého obalu je na velké většině aplikací více než dostatečná a v nejbližší době tomu nebude jinak. Zvláště v mírném pásu, kde jsou klimatické podmínky bez extrémů a není třeba vymýšlet za každou cenu alternativy. Jejich spolehlivost zaručená dlouholetou praxí a zkušenost personálu s jejich instalací z nich dělá téměř vždy první volbu. Avšak občas se dostáváme do situací, kdy si jejich instalace vyžádá další náklady, nejčastěji na stavební práce. V tu chvíli je možné zvážit alternativy, protože jiná technologie by mohla předejít těmto stavebním pracím a snížit tak investiční výdaje.

Většinou najdou vysokoteplotní vodiče s nízkým průhybem využití v aplikacích, kde běžné ACSR vodiče nevyhovují z technického hlediska. V extrémních mrazech, kdy námraza mechanicky namáhá vodič, v místech se silným větrem nebo ve velmi vysokých teplotách je právě mechanická odolnost velmi důležitá při výběru technologie. V mírných podmínkách svojí vysokou cenou nedokážou konkurovat a tak se uplatní jen ve výjimečných situacích. Ty můžou nastat, pokud se objeví problém v prostorovém rozložení rozvodny, nebo když lépe zapadnou do stávající infrastruktury. V prvním případě by zřejmě byly upřednostněny trubkové vodiče, díky kterým se dá ušetřit až jedna třetina prostoru a tak zbude více místa pro zdvojování linek nebo výstavbu nových. V druhém případě se můžou vysokoteplotní vodiče ukázat jako nejlevnější a nejrychlejší alternativa.

4.5.4.1. ACSS (Aluminium Conductor Steel Supported)

Toto lano je velmi podobné lanu ACSR. Obal je z žíhaného měkkého hliníku a nese mechanické zatížení. To je soustředěné na jádro lana z HS nebo EHS oceli (vysokopevnostní ocel). S rostoucí teplotou se chová jako ACSR až do zlomového bodu, za kterým má nižší průhyb. Jeho nevýhodou je složitější montáž, nižší pevnost a nižší youngův modul.

4.5.4.2. TACIR (Thermal Aluminium Conductor Invar Reinforced)

U tohoto lana chybí zkušenost s instalacemi v Evropě i USA. Zatím se komerčně vyskytuje jen v Japonsku. Obal lana je z teplotně odolného hliníku (až 200 ° C) a duše z invarové oceli, která je pokryta tenkou vrstvou hliníku pro větší odolnost vůči korozi. Při teplotě za bodem zlomu se chová jako ocelové lano.

4.5.4.3. ACCC (Aluminium Conductor Composite Core)

Hlavním rozdílem od ostatních vysokoteplotních vodičů je kompozitní jádro z hliníkových vláken tvořící kompaktní duši trubkového tvaru, které je o 25 % pevnější a o 60 % lehčí než ocelové jádro. Po uvolnění tahu hliníkových drátů obalu přebírá většinu mechanického zatížení a má menší průhyb než ACSR. Obal je z teplotně odolného nebo z žíhaného měkkého hliníku. Výhodou je poměr síly a hmotnosti, který značně rozšiřuje možnosti využití a v neposlední řadě velmi dobrá energetická účinnost.

Označení	průřez	hmotnost	youngův modul		průměr	I _{max}	
			vodič	jádro		1 vodič	2 vodiče
	mm ²	kg/km	N/mm ²		mm	A	
ACCC_1	1071,12	2,922	71400	117000	38,2	2546	5092
ACCC_2	997,11	2,574	71400	117000	36,85	2515	5030
ACCC_3	857,05	2,324	71400	117000	34,17	2289	4578
ACCC_4	820,09	2,21	72500	117000	33,4	2200	4400
ACCC_5	793,21	2,135	72400	117000	32,85	2154	4308
ACCC_6	741,46	2,004	72000	117000	31,77	2069	4138
ACCC_7	729,75	1,959	72000	117000	31,5	2030	4060
ACCC_8	679,69	1,832	72000	117000	30,41	1946	3892
ACCC_9	655,38	1,621	71500	117000	29,84	1879	3758

Tabulka 3 Parametry vodičů ACCC¹⁹

¹⁹ ACCC technical data sheet, Midal cables Ltd., <https://www.midalcable.com/accc®>



Obrázek 15 Příklad vodiče ACCC²⁰

4.5.4.4. ACCR (Aluminium Conductor Composite Reinforced)

Drát vodivé složky je ze slitiny hliníku a zirkonu kulatého nebo lichoběžníkového průřezu. Místo měkkého žíhaného hliníku se používá slitina s přidáním malého množství zirkonu, díky kterému získává tepelný odpor a může tak pracovat při vyšších teplotách aniž by měkla a ztrácela pevnost. Díky příměsím je také odolnější vůči korozi. Struktura vodiče je velmi podobná běžným vodičům a používá stejně dimenzované parametry, čímž umožňují snadnou adaptaci do již používaných systémů. Jsou spirálovitě spletené, ale mají delší skutečnou délku jednotlivých vláken než u vodičů s ocelovým jádrem.

Jádro obsahuje vlákna z oxidu hlinitého usazených ve velmi čistém hliníku. Každý drát je vyztužen desítkami tisíc těchto ultra pevných vláken a díky tomu má tento vodič nižší hmotnost srovnatelnou s hliníkem, zatímco má pevnost podobnou oceli. Zároveň má menší tepelnou roztažnost zvláště při vyšších teplotách. Díky hliníkové složce má vysokou vodivost, odolnost proti korozi a nižší tečení kovu.

²⁰ Technická specifikace vodičů ACCC Midal Cables Ltd. Str. 4

Označení	průřez	hmotnost	youngův modul		průměr	I _{max}	I _{max}
			vodič	jádro		1 vodič	2 vodiče
	[mm ²]	[kg/km]	[N/mm ²]		[mm]	[A]	
ACCR_1	910	2,596	73000	216000	39,3	2795	5590
ACCR_2	761	2,172	73000	216000	35,9	2479	4958
ACCR_3	723	2,063	73000	216000	35,0	2395	4790
ACCR_4	638	1,820	73000	216000	32,9	2191	4382
ACCR_5	591	1,687	73000	216000	31,7	2092	4184
ACCR_6	552	1,576	73000	216000	30,6	1999	3998

Tabulka 4 Parametry vodičů ACCR²¹



Obrázek 16 Příklady vodičů ACCR společnosti 3M²²

²¹ Aluminum Conductor Composite Reinforced (ACCR), Technical Summary for Common Constructions and Sizes, www.3M.com/ACCR

²² Aluminum Conductor Composite Reinforced (ACCR), Technical Summary for Common Constructions and Sizes, www.3M.com/ACCR

4.5.5. Zkratová odolnost vysokoteplotních vodičů

V elektrických stanicích se běžně setkáváme se zkratovými proudy 40, 50 (63) kA a nárazový zkratový proud 100, 125 (160) kA. Při dimenzování vodičů přípojníc je nezbytné zohlednit i účinky zkratových proudů. Kromě velikosti zkratového proudu je důležitá i doba trvání, tj. než dojde k jeho úspěšnému vypnutí. Běžně se doba vypnutí zkratového proudu pohybuje v rozmezí 0,2 až 0,5 s v závislosti na rychlosti ochran a vypnutí vypínače. U lanových přípojníc jsou nosné konstrukce namáhány statickými a dynamickými silami. Statické síly jsou způsobeny hmotností vodiče, případně svazku vodiče a hmotností izolátorových závěsů. Mimo to statické zatížení zvyšuje námraza a případně i síla a směr větru. Dynamické síly jsou vyvolány účinky zkratových proudů. Pro stanovení těchto sil existují výpočty dané normami, případně empirickými zkušenostmi. Vstupními parametry pro výpočet je hodnota zkratového proudu, doba trvání zkratu, základní rozměry uspořádání a mechanické parametry vodiče. Průchod zkratového proudu má za následek enormní ohřívání vodiče, které může dosáhnout krátkodobě až 350 °C. Vysokoteplotní vodiče snášejí tyto teploty podstatně lépe.

Druhým efektem zkratového proudu jsou dynamické účinky. Pro jejich výpočet je důležitý parametr modul pružnosti v tahu, také youngův modul, který je dán poměrem mechanického napětí a jím vyvolané deformace. Pro vodiče ACSR je tato hodnota konstantní v celém teplotním rozsahu. U vysokoteplotních vodičů s nízkým průhybem se však tato hodnota mění v závislosti na teplotě vodiče. Před bodem zlomu je tato hodnota podobná jako u ACSR ale za ním se projeví především modul pružnosti jádra a proto lze předpokládat, že modul celého vodiče se bude rovnat modulu jádra.

5. Model rozvodny

Pro potřeby této práce je vytvořen model rozvodny odpovídající situaci, technickému provedení i provozu v ČR. Rozvodna má dva systémy hlavních přípojníc (W1 a W2) a jeden systém pomocné přípojnice (W5), všechny jsou podélně dělené. Přípojnice jsou lanového provedení s 2 x AlFe750/43 s jmenovitým proudem 2250 A²³. Celkový počet polí je devět, čtyři pole vývodu (VV1 – VV4), tři vývody na transformátor 400/110 kV (T401 – T403), jedno rezervní a jedno pole KSP.

Základní parametry rozvodny:

Provedení:	-venkovní -uspořádání jednořadé
Meteorologické poměry:	-námrazová oblast lehká -oblast znečištění II.
Přípojnice:	lanové 2 x AlFe750/43
Jmen. napětí sítě, nap. soustava:	400 kV
Nejvyšší provozní napětí sítě:	420 kV
Jmenovitý kmitočet:	50 Hz
Krátkodobý zkratový proud:	40 kA/1s
Dynamický zkratový proud:	100 kA
Jmenovitý proud přípojníc:	2250 A
Jmenovitý proud odbočky:	2000 A
Rozměry:	
Šířka polí:	25 m; 30 m
Výška kotvení přípojníc:	15 m
Výška kotvení vedení:	18 m
Fázová rozteč přípojníc:	6,3 m
Fázová rozteč přetahů:	8 m

²³ Viz kapitola 4.3.2.

Proudové zatížitelnosti

Vývodové pole:

- jmenovitý proud vypínače	3150 A
- jmenovitý proud odpojovačů	2000 A
- jmenovitý převod PTP	500-1000-2000//1/1/1/1, 200 %
- lanové propoje v poli 2xAlFe750/43	2000 A
- trubkové propoje v poli Al 100x5	2000 A

Pole KSP:

- jmenovitý proud vypínače	4000 A
- jmenovitý proud odpojovačů	2000 A
- jmenovitý převod PTP	400-800-1600//1/1/1/1, 150 %
- lanové propoje v poli 2xAlFe750/43	2000 A
- trubkové propoje v poli Al 100x5	2000 A

PD a přípojnice:

- jmenovitý proud odpojovačů	3150 A
- trubkové propojení Al 100x5	2000 A
- lanové přípojnice 2xAlFe750/43	2250 A

Předpoklady:

- Rozvodna byla uvedena do provozu v 60. letech, HOK je z let 90. a spadá pod tehdy platné normy ČSN 38 1754 a ČSN 33 3015 pro výpočet účinků zkratových proudů. Maximální zatížení HOK pro přípojnice je 23 kN a pro přetah 52 kN.
- Vzhledem k umístění rozvodny lze předpokládat, že bude pod vlivem přeshraničních toků z obrázku 3.
- Z předchozího bodu je patrné, že většina přeneseného výkonu bude přenesena venkovním vedením a menší část bude transformována do sítě nižší napěťové hladiny.
- Veškeré majetkové vztahy v areálu rozvodny jsou vyřešené a není třeba počítat s vyššími náklady. Nepředpokládá se potřeba většího prostoru, než je vyhrazen pro rozvodnu.

- Stávající zařízení polí vývodu a transformátoru je v dostačujícím stavu a není nutná jejich výměna nebo oprava.
- Zapojení přípojnic je většinu roku stejné. Běžné zapojení je s dvěma přípojnicemi sepnutým KSP a PD.

5.1. Toky v rozvodně

V rozvodně jsou uvažovány tři různé scénáře toků výkonů pro účely zhodnocení využitelnosti vysokoteplotních vodičů. V prvním uvažujeme reálné toky, které se mohou v rozvodně a v jednotlivých částech systému přípojnic vyskytnout. Druhý počítá s kapacitou venkovního vedení. Poslední scénář je hypotetický uvažující maximální výkon přenášený přípojnicí při neomezené kapacitě venkovních vedení. Ve všech alternativách je použito stejné zapojení a stejný poměr zatížení jednotlivých polí. Výpočet je vytvořen softwarem Microsoft Office Excel. Počítá proud a přenášený výkon na jednotlivých částech přípojnic, z nichž nejvyšší hodnota by měla být základ dimenzování vodičů. Je proveden jen pro dvě přípojnice, jelikož je předpokládán běžný provoz se dvěma přípojnicemi a pomocná přípojnice má úlohu zálohy, pokud by nebylo možné provozovat jednu z hlavních přípojnic, tím je splněno „kritérium N - 1“. Odpojovače jsou označeny 0 odpojeno a 1 zapojeno. Pro jednotlivá pole byl určen vstupní a výstupní proud, tak aby byl splněn první Kirchhoffův zákon, kladné znaménko znamená vstupní, záporné výstupní proud, znaménka u proudů a výkonů na jednotlivých částech přípojnice značí směr toku, který je pro účely dimenzování vodičů nepodstatný, důležitá je jen hodnota. Pro všechny scénáře je fixně určený proud odboček do transformátorů a veškeré změny v tocích se projeví jen jako tranzitní toky přes venkovní vedení, což odpovídá reálné situaci. Dalším předpokladem je chování distribuční soustavy, která je napájena přenosovou soustavou.

5.1.1. Základní schéma stávajícího stavu

V tomto scénáři se vstupní proudy řídí jmenovitými hodnotami přípojnicového systému, které jsou závislé na technologii a zapojení. Vstupní proud (I_{in}) je rozdělen mezi linky V401 a V403, výstupní proud (I_{out}) je rozdělen mezi transformátory a venkovní vedení

V401				T401				V402				V403				T402				V404				T403			
I_{in}	1555,5	I_{out}	-200	I_{out}	-1250,5	I_{in}	994,5	I_{out}	-150	I_{out}	-799,5	I_{out}	-150	I_{in}	994,5	I_{out}	-150	I_{out}	-799,5	I_{out}	-150						
P_p	1438,0	P_p	443,9	P_p	443,9	P_p	443,9	P_p	-191,7	P_p	-95,9	P_p	-95,9	P_p	443,9	P_p	-191,7	P_p	-95,9	P_p	-95,9						
I_p	2250	I_p	694,5	I_p	694,5	I_p	694,5	I_p	-300	I_p	-150	I_p	-150	I_p	694,5	I_p	-300	I_p	-150	I_p	-150						
	1		0		0		1		1		1		0		1		1		0		1						
P_p	-1438	P_p	-1438	P_p	-1310,2	P_p	-511,0	P_p	-511,0	P_p	-511,0	P_p	0	P_p	-1438	P_p	-1438	P_p	-1310,2	P_p	0						
I_p	-2250	I_p	-2250	I_p	-2050	I_p	-799,5	I_p	-799,5	I_p	-799,5	I_p	0	I_p	-2250	I_p	-2250	I_p	-2050	I_p	0						
	0		1		1		1		0		0		1		0		1		1		0						

Obrázek 18 Toky v rozvodně při zapojení 2

5.1.2. Situace po navýšení jmenovitého proudu přípojnice

Jsou uvažovány čtyři varianty navýšení přenosové kapacity rozvodny lišící se použitím různých technologií. Podle reálného scénáře je možné přetížít přípojnicí a v případě využití plné přenosové kapacity venkovních vedení se dostaneme na hodnotu proudu na přípojnicí až na 3850 a 3700 A. Během životnosti vodičů v rozvodně, která se uvažuje 50 let, je téměř jisté z plánu rozvoje PS, že dojde k posílení linek a s tím spojeného nárůstu zatížení v rozvodně. Pro tuto aplikaci budeme požadovat minimální jmenovitý proud přípojnice 3750 A. Z toho důvodu byl vypočten maximální proud vstupující do rozvodny, při kterém se dostaneme na hodnotu jmenovitého proudu na přípojnicí. Poměr zatížení linek neovlivní výsledný proud, proto jsou vypočtené hodnoty jen pro různá zapojení.²⁴

Typ vodiče	Počet vodičů	I_n (A)	ΔI_{in} (A)	I_{in} (A)
ACSR	3	3750	1500	3900
ACSR	4	5000	2750	5150
ACCR	2	4184	1934	4334
ACCC	2	4138	1888	4288

Tabulka 5 Jmenovité proudy ACSR

²⁴ Viz kapitola 5.1.3.

Typ vodiče	Počet vodičů	I_n (A)	ΔI_{in} (A)	I_{in} (A)
ACSR	3	3750	1500	4050
ACSR	4	5000	2750	5300
ACCR	2	4184	1934	4484
ACCC	2	4138	1888	4438

Tabulka 6 Jmenovité proudy ACCR a ACCC

Hodnoty ΔI_{in} (A) znázorňují rozdíl mezi stávajícím stavem a alternativami za předpokladu, že bude úměrně přizpůsobené i zařízení v rozvodně.

5.1.3. Hypotetický scénář

Cílem tohoto scénáře je zjistit maximální přenášený výkon pro jednotlivé technologie a různé průřezy vodiče. Poměr vstupního proudu je stejný jako u prvního scénáře, tedy 61 % na V401 a 39 % na V403. Pro hodnoty vodičů ACCC a ACCR je tato hodnota vypočtena pro největší možný průřez. Hodnoty ukazují, na jakou přenosovou kapacitu se můžou posílit linky, tak aby byla odpovídající kapacita přípojnic. Vzhledem k vývoji PS a mezinárodních spoluprací a tendencím v energetice, je navyšování přenosové kapacity venkovního vedení vysoce pravděpodobné, zvláště pak když se bavíme v horizontu 50 let, což je normou určená životnost vodiče, potažmo přípojnice.

vodič	Počet (ks)	Max I (A)	I_{v401} (A)
type			
ACSR	2	2500	1700
ACSR	3	3750	2400
ACSR	4	5000	3200
ACCR	2	4184	2700
ACCC	2	4138	2650

Tabulka 7 Proudů v modelu rozvodny pro různé technologie

5.2. Účinky zkratových proudů na HOK

V následujících tabulkách jsou vypočtené hodnoty silových účinků na HOK přípojníc. V tabulce 8 jsou běžně používaná AlFe lana. Stávající stav se dvěma vodiči samozřejmě vyhovuje, ale pro tři vodiče již hodnota statických sil převyšuje povolenou hranici 25 kN. Tyto síly jsou počítány podle normy ČSN 38 1754²⁵, platné v době výstavby HOK a instalace vodičů.

Počáteční rázový zkratový proud	50,00
Součinitel pro výpočet počátečního rázového zkratového proudu	1,81
Nárazový zkratový proud	125,00
Doba trvání zkratového proudu	0,50
Rozpětí	56,00
Délka izolátorového řetězce	6,50
Hmotnost izolátorového řetězce	350,00
Délka rozpětí ohebného vodiče	43,00
Osová vzdálenost hlavních vodičů na začátku rozpětí	6,50
Osová vzdálenost hlavních vodičů na konci rozpětí	6,50
Výška ukotvení - začátek rozpětí	15,00
Výška ukotvení - konec rozpětí	15,00
Výsledná pérová konstanta koncových bodů vodiče	600,00

Tabulka 8 Vstupní data pro výpočet silových účinků na HOK

průřez	hmotnost	Youngův modul	průměr	Imax
mm ²	kg/km	N/mm ²	mm	A
801,2	2,43	62300	36,5	1250

Tabulka 9 Parametry ACSR

Označení	Počet vodičů	F max (kN)
		ČSN 38 1754
ACSR_2	2	20,17
ACCR_3	3	26,47
ACCR_4	4	32,76

Tabulka 10 Silové účinky ACSR na HOK

²⁵ viz kapitola 4.3.

Varianta	průřez	hmotnost	Young. modul		průměr	I max	I max	F max (kN)
			vodič	jádro		vodič	dvojsvazek	ČSN 38 1754
	mm ²	kg/km	N/mm ²		mm	A		
ACCR_1	910	2,596	73000	216000	39,3	2795	5590	20,78
ACCR_2	761	2,172	73000	216000	35,9	2479	4958	19,28
ACCR_3	723	2,063	73000	216000	35	2395	4790	18,9
ACCR_4	638	1,82	73000	216000	32,9	2191	4382	18,03
ACCR_5	591	1,687	73000	216000	31,7	2092	4184	17,56
ACCR_6	552	1,576	73000	216000	30,6	1999	3998	17,16

Tabulka 11 Silové účinky ACCR na HOK

Varianta	průřez	hmotnost	Young. modul		průměr	I max	I max	F max (kN)
			vodič	jádro		1 vodič	2 vodiče	ČSN 38 1754
	mm ²	kg/km	N/mm ²		mm	A		
ACCC_1	1071,12	2,922	71400	117000	38,2	2546	5092	21,88
ACCC_2	997,11	2,574	71400	117000	36,85	2515	5030	20,67
ACCC_3	857,05	2,324	71400	117000	34,17	2289	4578	19,77
ACCC_4	820,09	2,21	72500	117000	33,4	2200	4400	19,37
ACCC_5	793,21	2,135	72400	117000	32,85	2154	4308	19,11
ACCC_6	741,46	2,004	72000	117000	31,77	2069	4138	18,64
ACCC_7	729,75	1,959	72000	117000	31,5	2030	4060	18,48
ACCC_8	679,69	1,832	72000	117000	30,41	1946	3892	18,03
ACCC_9	655,38	1,621	71500	117000	29,84	1879	3758	17,29

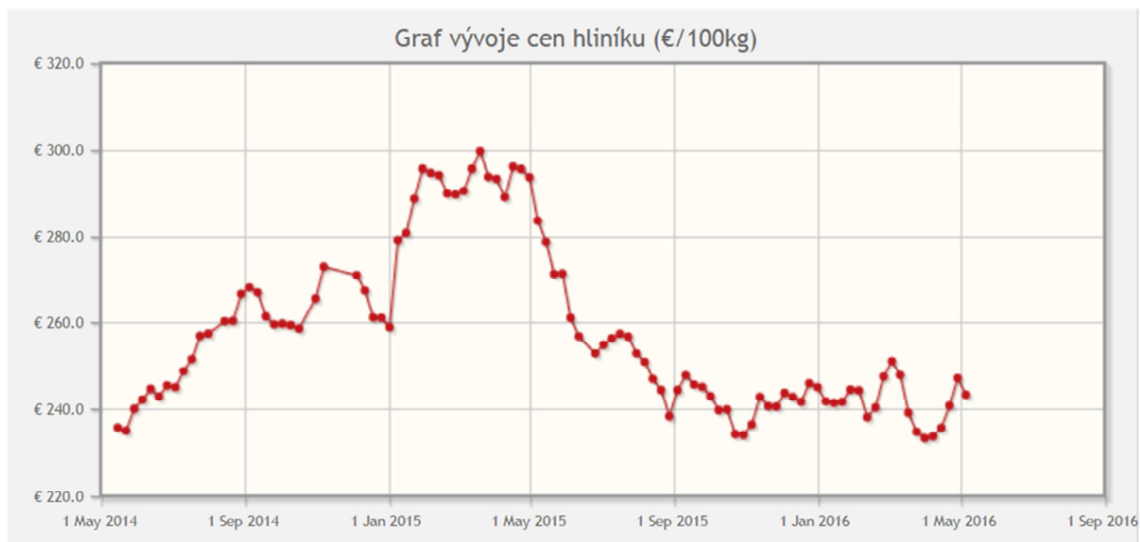
Tabulka 12 Silové účinky ACCC na HOK²⁶

Z tabulek 10, 11 a 12 je vidět, že zapojení tři a čtyř ACSR lan nevyhovují stávající HOK, oproti tomu zapojení se dvěma vysokoteplotními vodiči bezpečně splňuje limit 25 kN. Pokud by bylo třeba postavit nové ocelové konstrukce, bylo by třeba vypočítat silové účinky podle nové normy ČSN EN 60865-1, podle které by stávající ocelové konstrukce nevyhovovaly.

²⁶ Hodnoty obdrženy ze softwaru společnosti EGEM, s.r.o určený pro výpočet silových účinků

5.3. Náklady na navýšení přenosové kapacity

V tabulkách 13, 14 a 15 jsou rozepsané ceny pro jednotlivé technologie a jednotlivé části rozvodny. Ceny vodičů jsou značně variabilní v čase a jejich cena je ovlivněna hlavně cenou materiálu, nejvíce cenou hliníku.



Obrázek 19 Graf vývoje cen hliníku²⁷

Běžné ACSR vodiče se liší počtem vodičů ve svazku a cenou vodiče, která je určena na 200 Kč/m. Cena vysokoteplotních vodičů je určena násobkem ceny ACSR, a to pro ACCR 5 krát a ACCC 8 krát dražší. Vypočtené hodnoty cen, metrů a hodin práce jsou násobené koeficientem opatrnosti k, který je 1,3. Největším rozdílem v celkových výdajích je cena HOK, jehož cena převyšuje celkové výdaje na použití nových technologií.

²⁷ <http://www.allkabel.eu/vyvoj-cen-komodit/>

		KSP	PD	Přípojnice	HOK	Celkem (mil Kč)
Vodiče	m	2100	810	9196	0	3,15
	260 Kč/m	546000	210600	2391012	0	
Závěsy	ks	12	90	0	0	1,19
	11700 Kč/ks	140400	1053000	0	0	
Odpojovače	ks	18	9	0	0	15,8
	585000 Kč/ks	10530000	5265000	0	0	
Vypínače	ks	1	0	0	0	4,88
	4875000 Kč/ks	4875000	0	0	0	
Hodiny	hod	340	160	600	1500	2,2
	845 Kč/h	287300	135200	507000	1267500	
HOK	ks	0	0	0	20	104
	5200000 Kč/ks	0	0	0	104000000	
svorky	ks	40	18	63	0	0,79
	6500 Kč/ks	260000	117000	409500	0	
celkem	-	16638700	6780800	3307512	105267500	132

Tabulka 13 Investiční výdaje ACSR – 3 vodiče

		KSP	PD	Přípojnice	HOK	Celkem (mil Kč)
Vodiče	m	2800	1080	12262		4,2
	260 Kč/m	728000	280800	3188016	0	
Závěsy	ks	12	90	0		1,19
	11700 Kč/ks	140400	1053000	0	0	
Odpojovače	ks	18	9	0	0	15,8
	585000 Kč/ks	10530000	5265000	0	0	
Vypínače	ks	1	0	0	0	4,88
	4875000 Kč/ks	4875000	0	0	0	
Hodiny	hod	340	160	600	1500	2,2
	845 Kč/h	287300	135200	507000	1267500	
HOK	ks	0	0	0	20	104
	5200000 Kč/ks	0	0	0	104000000	
Svorky	ks	40	18	63	0	0,79
	6500 Kč/ks	260000	117000	409500	0	
celkem	-	16820700	6851000	4104516	105267500	133

Tabulka 14 Investiční výdaje ACSR – 4 vodiče

		KSP	PD	Přípojnice	HOK	Celkem (mil Kč)
Vodiče	m	1400	540	6131	0	10,49
	1300 Kč/m	1820000	702000	7970040	0	
Závěsy	ks	12	90	0	0	1,99
	19500 Kč/ks	234000	1755000	0	0	
Odpojovače	ks	18	9	0	0	15,8
	585000 Kč/ks	10530000	5265000	0	0	
Vypínače	ks	1	0	0	0	4,88
	4875000 Kč/ks	4875000	0	0	0	
Hodiny	hod	340	160	600	0	0,93
	845 Kč/h	287300	135200	507000	0	
HOK	ks	0	0	0	0	0
	5200000 Kč/ks	0	0	0	0	
svorky	ks	40	18	63	0	0,79
	6500 Kč/ks	260000	117000	409500	0	
celkem	-	18006300	7974200	8886540	0	34,87

Tabulka 15 Investiční výdaje ACCR – 2 vodiče

		KSP	PD	Přípojnice	HOK	Celkem (mil Kč)
Vodiče	m	1400	540	6131	0	16,79
	2080 Kč/m	2912000	1123200	12752064	0	
Závěsy	ks	12	90	0	0	1,99
	19500 Kč/ks	234000	1755000	0	0	
Odpojovače	ks	18	9	0	0	15,8
	585000 Kč/ks	10530000	5265000	0	0	
Vypínače	ks	1	0	0	0	4,88
	4875000 Kč/ks	4875000	0	0	0	
Hodiny	hod	340	160	600	0	0,93
	845 Kč/h	287300	135200	507000	0	
HOK	ks	0	0	0	0	0
	5200000 Kč/ks	0	0	0	0	
Svorky	ks	40	18	63	0	0,79
	6500 Kč/ks	260000	117000	409500	0	
celkem	-	19098300	8395400	13668564	0	41,16

Tabulka 16 Investiční výdaje ACCC – 2 vodiče

V porovnání nákladů nejlépe vychází technologie ACCR. Vzhledem k malému snižování cen v závislosti se snižujícím se průřezem, jsou pro další výpočty uvažovány vodiče s maximálním možným průřezem. Tyto tabulky hodnotí cenu navýšení

přenosové kapacity na požadovanou mez. Pro vyhodnocení investic je potřeba pro jednotlivá zapojení vypočítat poměrné výdaje na navýšení přenosové kapacity o jeden MW. Z tabulek 17 a 18 je vidět že nejméně výhodnější v tomto srovnání jsou vodiče ACCR, z běžných ACSR vodičů nejlépe vynívá alternativa se čtyřmi vodiči. Na základě tohoto vyhodnocení vybereme dvě alternativy, které jsou podrobněji ekonomicky analyzovány v následující kapitole.

Typ vodiče	počet	I_{in} (A)	P_{in} (MW)	ΔP (MW)	Cena (Kč/MW)
ACSR_2	2	2650	1693,69	-	-
ACSR_3	3	3900	2492,59	798,91	165218,57
ACSR_4	4	5150	3291,50	1597,82	83265,94
ACCR_6	2	4334	2769,98	1076,29	64427,87
ACCC_9	2	4288	2740,58	1046,89	67682,63

Tabulka 17 Vyhodnocení investic- zapojení 1

Typ vodiče	počet	I_{in} (A)	P_{in} (MW)	ΔP (MW)	Cena (Kč/MW)
ACSR_2	2	2800	1789,55	-	-
ACSR_3	3	4050	2588,46	894,78	147516,58
ACSR_4	4	5300	3387,37	1693,69	78552,77
ACCR_6	2	4484	2865,84	1172,16	59158,42
ACCC_9	2	4438	2836,44	1142,76	62004,55

Tabulka 18 Vyhodnocení investic- zapojení 2

6. Ekonomické vyhodnocení

Provozní výdaje přípojnicového systému jsou zanedbatelné oproti investici a je obtížné je vyčíslit přímo na lana. Pro různé technologie se liší jen minimálně, a proto jsou v práci zanedbány. Likvidace starých vodičů je částečně nebo úplně vykompenzována prodejem materiálu a výdaje se ještě sníží, pokud je spojena s instalací nových, kdy se ušetří práce. Proto jsou v práci zanedbány. Příjmy jsou ve všech variantách stejné. Odvíjí se od přeneseného výkonu, který se nemění pro jednotlivé technologie. Příjmy, přímo úměrné přenesenému výkonu, je prakticky nemožné rozpočítat na jednotlivé elementy soustavy. Z toho důvodu lze předpokládat, že hotovostní tok CF (cash flow), který je dán rozdílem příjmů a výdajů, je pro všechny technologie stejný.

$$NPV = \sum_0^{T_{30}} (CF_t \cdot (1 + r)^{-t}) - I \quad [12]$$

kde	T_{30}	je ekonomická životnost
	CF_t	hotovostní tok za rok t
	r	diskont
	I	investice

Čistou současnou hodnotu MPV (net present value) lze vypočítat při shodném výrobním účinku jen pomocí výdajů. I když jsou provozní výdaje zanedbatelné, je třeba počítat s daňovým štítem. Ten je úměrný investicím a tedy bude se lišit pro jednotlivé technologie.

$$NPV = I - \sum_1^{T_x} (\vartheta_t \cdot (1 - \tau)(1 + r)^{-t}) \quad [13]$$

kde	T_x	doba daňových odpisů
	CF_t	hotovostní tok za rok t
	ϑ_t	daňový odpis
	τ	daňová sazba

Pro rovnoměrné odepisování je daňový odpis roven investici vydělené počtem let daňových odpisů. Poslední člen v rovnici [14] je zásobitel.

$$NPV = I - \frac{I}{T_x} \cdot (1 - \tau) \cdot \sum_1^{T_x} (1 + r)^{-t} \quad [14]$$

Všechny hodnoty jsou známy, a proto je možné vyjádřit čistou současnou hodnotu jako investici vynásobenou konstantou.

$$NPV = I \cdot (1 - K) \quad [15]$$

Kritériem je minimalizace současné hodnoty výdajů, proto lze člen (1-K) zanedbat a počítat jen s investicí.

6.1. Reálná opce rozšíření

Použití metody čisté současné hodnoty je v tomto případě jen srovnání investičních výdajů a nezahrnuje vývoj toků výkonu. Pro rozvodny je velmi důležité sledovat vývoj maximálního proudu a je základním faktorem pro výběr technologií. Pro hodnocení investice je třeba vytvořit ekonomický model zohledňující časový vývoj proudu, respektive výkonu. V práci je investice ohodnocena pomocí reálné opce rozšíření projektu.

Reálná opce je metoda oceňování investic založená na hodnocení finančních opcí, kde jsou finanční podkladová aktiva. Reálná opce pracuje s reálnými aktivy, kterými mohou být projekty nebo firmy. Oproti čisté současné hodnotě NPV nebo vnitřnímu výnosovému procentu IRR nevyžadují přesný odhad budoucích očekávaných hotovostních toků, které jsou mnohdy nejisté. Právě tato nejistota je důvodem použití dynamických modelů, jako jsou rozhodovací stromy a simulační metody namísto statických modelů NPV a IRR.

Pro vyhodnocení ekonomické výhodnosti vysokoteplotních vodičů je podkladovým aktivem úspora daná rozdílem investic do běžných a vysokoteplotních vodičů. V tomto případě se jedná o kupní opci, jejíž hodnota je vypočítána binomickou metodou.

V předchozí kapitole je popsán model rozvodny a spočítány investice do navýšení přenosové kapacity v absolutních hodnotách i v hodnotách poměrných navýšení výkonu. Pro přesnější ekonomické vyhodnocení je třeba analyzovat vývoj změn v toku výkonu. V tabulce 20 se vychází z výchozí hodnoty 1214 MW a je předpokládán nárůst výkonu o 10 % za tři roky. Aby bylo možné použít binomický model, ve kterém

by se hodnoty výkonu rekombinovaly, je potřeba dopočítat procentuální pokles ze vzorce:

$$(1+x) \cdot (1+y) = 1 \quad [12]$$

Při použití tohoto vzorce s hodnotou $x = 10\%$ vychází pokles $y = 9,1\%$.

V tabulce 19. je strom předpokládaného vývoje toku proudů pro 30 let, tedy normovanou životnost vodičů. Je vidět že po devíti letech může proud překonat jmenovitý proud přípojnice se dvěma ACSR vodiči. V tento moment je třeba instalovat přípojnice s vyšší přenosovou kapacitou, což je označeno v tabulce 21., která označuje úsporu při použití vodičů ACCR oproti ACSR, která se vypočítá z rozdílu investic do různých technologií. Vodiče ACCR byly vybrány z vysokoteplotních vodičů z tabulek 17. a 18. jako výhodnější v porovnání nákladů na navýšení přenosové kapacity o jeden MW.

0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
										4928
									4480	
								4073		4073
							3703		3703	
						3366		3366		3366
					3060		3060		3060	
				2782		2782		2782		2782
			2529		2529		2529		2529	
		2299		2299		2299		2299		2299
	2090		2090		2090		2090		2090	
1900		1900		1900		1900		1900		1900
	1727		1727		1727		1727		1727	
		1570		1570		1570		1570		1570
			1427		1427		1427		1427	
				1298		1298		1298		1298
					1180		1180		1180	
						1073		1073		1073
							975		975	
								886		886
									806	
										733

Tabulka 19 Binomický strom předpokládaného vývoje proudu

0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
										3150
									2863	
								2603		2603
							2366		2366	
						2151		2151		2151
					1956		1956		1956	
				1778		1778		1778		1778
			1616		1616		1616		1616	
		1469		1469		1469		1469		1469
	1336		1336		1336		1336		1336	
1214		1214		1214		1214		1214		1214
	1104		1104		1104		1104		1104	
		1004		1004		1004		1004		1004
			912		912		912		912	
				829		829		829		829
					754		754		754	
						685		685		685
							623		623	
								566		566
									515	
										468

Tabulka 20 Binomický strom předpokládaného vývoje výkonu

0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
										98,17
									98,17	
								98,17		98,17
							98,17		98,17	
						98,17		98,17		98,17
					98,17		98,17		98,17	
				98,17		98,17		98,17	0	98,17
		98,17		98,17		98,17		98,17		
		0		0		0		0		0
	0		0		0		0		0	
0		0		0		0		0		0
	0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0
			0		0		0		0	
				0		0		0		0
					0		0		0	
						0		0		0
							0		0	
								0		0
									0	
										0

Tabulka 21 Binomický strom předpokládaných úspor při použití ACCR vodičů

Podle uvedeného scénáře je vidět z tabulky 19, že první investice je nutná až po devíti letech. V našem případě je cena podkladového aktiva rozdíl mezi alternativami. Pro zohlednění růstu nebo poklesu výkonu v ceně opce je třeba vypočítat virtuální pravděpodobnosti p_1 a p_2 z časového vývoje výkonu. Kdy platí:

$$p_1 + p_2 = 1 \quad [13]$$

$$p_1 = \frac{S_0 \cdot (1+i) - H_{a2}}{H_{a1} - H_{a2}} = \frac{1214 \cdot (1+0,0217) - 1104}{1336 - 1104} = 0,59 \quad [14]$$

Poté lze vypočítat p_2 z rovnice 12 nebo vypočítat podobně jako p_1 ze vzorce:

$$p_2 = \frac{H_{a1} - S_0 \cdot (1+i)}{H_{a1} - H_{a2}} = \frac{1336 - 1214 \cdot (1+0,0217)}{1336 - 1104} = 0,41 \quad [15]$$

kde	S_0	je hodnota výkonu v roce nula
	H_{a1}	očekávaná hodnota zvýšeného výkonu
	H_{a2}	očekávaná hodnota sníženého výkonu
	i	bezrizikový výnos

Bezrizikový výnos se nejčastěji určuje ze státních dluhopisů. V této práci jsem určil bezrizikový výnos jako průměr výnosů z posledních pěti let desetiletých státních dluhopisů a má hodnotu 2,17 %.²⁸ Postupným výpočtem od konce životnosti lze spočítat cenu opce. Ta je maximem z ceny úspory, která je tabulce 21 na příslušném místě, tj. 0, a hodnoty ze vzorce. Hodnoty pro příklad výpočtu jsou vyznačeny v tabulce 22 tučně:

²⁸ www.kurzy.cz/cnb, vývoj Výnos desetiletého státního dluhopisu (maastrichtské kritérium) - ekonomika ČNB

$$C_p = \frac{H_{a1} \cdot p_1 + (1 - p_1)H_{a2}}{(1+i)^3} = \frac{98,17 \cdot 0,51 + (1 - 0,51) \cdot 0}{(1+0,0217)^3} = 54,29 \quad [16]$$

0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
										98,17
									98,17	
								98,17		98,17
							98,17		98,17	
						98,17		98,17		98,17
					98,17		98,17		98,17	
			98,17		98,17		98,17		98,17	
		73,37		70,75		65,84		54,29		0,00
	53,64		49,59		42,80		30,03		0,00	
38,44		33,97		27,20		16,61		0,00		0,00
	22,82		17,00		9,19		0,00		0,00	
		10,48		5,08		0,00		0,00		0,00
			2,81		0,00		0,00		0,00	
				0,00		0,00		0,00		0,00
					0,00		0,00		0,00	
						0,00		0,00		0,00
							0,00		0,00	
								0,00		0,00
									0,00	
										0,00

Tabulka 22 Výpočet ceny opce z binomického stromu- vzorec [15]

Hodnota opce je dnes 38,44 mil. Kč. Jelikož je hodnota úspor v roce nula 0, ukazuje tato hodnota výhodnost technologie ACCR oproti ACSR. Podrobíme cenu opce rozšíření citlivostní analýze v závislosti na procentuálním nárůstu výkonu. Citlivostní analýza je provedena v intervalu od 2,5 % až do 15 %. Nižší nárůst nelze uvažovat, protože by byl nižší než bezrizikový výnos a investice by tedy neměla smysl, protože by investor raději investoval do bezrizikového aktiva navíc s větší mírou výnosnosti. Dalším důvodem je, že virtuální pravděpodobnosti by nevycházely v intervalu (0;1), i když jejich součet by byl stále roven jedné.



Obrázek 20 Graf závislosti hodnoty opce na změně zatížení

Hodnota opce se s rostoucí velikostí změny výkonu zvyšuje, ale není monotónní. Poklesy jsou způsobeny diskrétním výpočtem s krokem tři roky.

7. Závěr

V oboru přenosu elektrické energie je na prvním místě spolehlivost a provozovatel přenosové soustavy má v ČR monopol, a proto může volit jiné strategie, než jsou běžné na otevřeném trhu. To je důvod zastávat konzervativní postupy a dávat přednost osvědčeným a vyzkoušeným technologiím. Zvláště v malé síti, jako je ta česká, není příliš prostoru ani finančních prostředků pro experimentální zkoušení nových technologií. Proto se většina inovací se řeší na jen papíře ve studiích proveditelnosti, ale málokdy dojde k realizaci. Vysokoteplotní vodiče mají v tomto výhodu, protože mají parametry a vlastnosti podobné jako běžné ACSR vodiče a je tedy snadné adaptovat je do fungující sítě. I když je spolehlivost na prvním místě a je bezpodmínečně nutné aby síť byla schopná přenést požadované množství energie, stále je potřeba ekonomicky optimalizovat veškeré zásahy do přenosové soustavy. Cena bývá nevýhodou všech nových technologií a vysokoteplotní vodiče nejsou výjimkou. V této práci je analyzována situace, pro kterou vycházejí vysokoteplotní vodiče výhodněji než běžné. Model byl vytvořen na základě reálné situace, při které přichází použití vysokoteplotních vodičů v úvahu. Při projektování rozvodu je potřeba počítat s mnoha faktory, přičemž některé jsou těžko měřitelné a je velmi těžké ohodnotit jejich důležitost. Při stavbě nové rozvodny se dává přednost trubkovým přípojnicím z důvodu vysoké přenosové kapacity, zkratové odolnosti a v neposlední řadě k značným úsporám místa, které je čím dál tím víc problematictější. Výhody trubkových přípojníc převyšují vysoké náklady na výstavbu. Při rozšiřování nebo navyšování přenosové kapacity u rozvodu je dlouhá a nákladná přestavba nežádoucí. Proto dostává přednost úprava lanových přípojníc, kterých je v ČR většina. Minimalizace stavebních prací šetří čas a zároveň výrazně snižuje náklady, a právě použití co největšího množství stávajícího zařízení díky vysokoteplotním vodičům je dělá výhodnějšími, ale jen v některých aplikacích.

Na optimalizaci provozu přenosové soustavy je možné nahlížet z několika úhlů. V práci jsou zmíněny alternativy k navyšování přenosové kapacity, například technologie „izolující“ soustavu z propojené evropské sítě omezováním nebo vypínáním linek na hranicích nebo nákladný re-dispatch výkonu. Pokud by bylo možné regulovat veškeré tranzitní toky, nebylo by nutné navyšovat přenosovou kapacitu v takovém rozsahu.

Nicméně příjmy přenosové soustavy jsou úměrné přenesenému výkonu, tedy přenosová kapacita vytváří ekonomický potenciál.

Při ekonomickém hodnocení by měl být uvažován vývoj zatížení rozvodny, aby bylo možné ohodnotit všechny možné scénáře. V práci je pomocí reálné opce rozšíření vyhodnocena úspora při použití dvou vodičů ACCR oproti čtyřem vodičům ACSR. Zvolený vývoj zatížení počítá s nutností investice při konstantním nárůstu po devíti letech. Poté je hodnota opce při vzrůstu konstantní, tedy 98,17 mil. Kč, což se rovná úspoře investičních výdajů. V rámci ekonomického hodnocení je v práci uveden očekávaný vývoj proudu a výkonu v průběhu životnosti vodičů. Z jeho hodnot a cen opce je možné vyčíslit pravděpodobnou budoucí výhodnost investice, která se snižuje se snižujícím se výkonem. Při konstantním poklesu očekávaného výkonu se ve dvanáctém roce cena opce dostane na nulu. Od tohoto bodu až do konce životnosti se navýšení přenosové kapacity pomocí vysokoteplotních vodičů nevyplatí. V tomto případě se vyplatí alternativa se dvěma vysokoteplotními vodiči typu ACSR. Tato technologie vychází nejlépe v ceně navýšení přenosové kapacity o jeden MW a v porovnání se čtyřmi vodiči ACSR pomocí reálných opcí vychází také lépe. Je to způsobeno velkým rozdílem v investičních výdajích, které jsou především způsobeny cenou hlavní ocelové konstrukce. Proto lze předpokládat, že pokud by ocelová konstrukce vyhovovala alespoň třem vodičům ACSR, nevyšly by vysokoteplotní vodiče tak výhodně.

8. Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] ACER. *ACER Opinion 09-2015 on the compliance of NRAs' decisions approving methods of cross-border capacity allocation in the CEE region*. ACER [online]. 2016. Dostupné z: http://www.acer.europa.eu/Official_documents/Acts_of_the_Agency/Opinions/Opinions/ACER%20Opinion%2009-2015.pdf
- [2] EWIS. *European Wind Integration Study – Final report*. ČEPS [online]. Červen 2007. Dostupné z: https://www.energinet.dk/SiteCollectionDocuments/Danske%20dokumenter/Forskning/EWIS_Final%20Report.pdf
- [3] ČEPS, a.s. - *Údaje o PS*. ČEPS [online]. 2016. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/Udaje-o-PS.aspx>
- [4] ČEPS, a.s. - *Kodex PS*. ČEPS [online]. 2015. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex/Stranky/default.aspx>
- [5] ČEPS, a.s. - *Mimořádná situace v PS ČR vlivem enormní výroby ve větrných parcích v Německu na přelomu roku 2014/2015*. ČEPS [pdf]. 2015. Dostupné z: http://www.ceps.cz/CZE/Media/Studie_analyzy/Documents/Analiza_mimoradna_situace_PSCR_2015.pdf
- [6] ČEPS, a.s. – *Mimořádná Roční příprava provozu 2016*. ČEPS [online]. 2015. Dostupné z: http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Dispecerske_rizeni/Priprava_provozu/Documents/RP2015.pdf
- [7] Schéma distribučních a přenosových sítí ČR 110-400 kV, ČEPS, 2015
- [8] Podnikové materiály ČEPS, a.s., Praha
- [9] Česká přenosová a distribuční soustava. Oenergetice.cz: Rozvodny přenosové soustavy [online]. 2015 [cit. 2016-03-17]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/ceska-prenosova-a-distribucni-soustava-2-dil-rozvodny-prenosove-soustavy/>
- [10] ČEPS, a.s. - *Souhrnná zpráva ČEPS, a.s., za rok 2015*. Praha: ČEPS, a.s., 2015. Dostupné z: http://www.ceps.cz/CZE/Media/Tiskovezpravy/Documents/Souhrnná_zpráva_celorok_2015_final.pdf

- [11] ČEPS, a.s. - *Plán rozvoje přenosové soustavy České republiky 2016 - 2025*. Praha: ČEPS, a.s., 2015. [pdf] Dostupné také z: https://www.eru.cz/documents/10540/1765622/Plan_CEPS_2016-2025.pdf/be688a1a-71ca-4014-961a-e2c75d092491
- [12] VÁŠEK, Čestmír. *Studie možnosti využití vysokoteplotních vodičů v TR Hradec a TR Řeporyje*. Studie. Praha: EGEM, s.r.o., říjen 2010.
- [13] VÁŠEK, Čestmír. *Návrh úprav v rozvodnách HRA a REP s ohledem na možnost vyššího zatěžování vedení V412*. Studie. Praha: EGEM, s.r.o., říjen 2010.
- [14] VÁŠEK, Čestmír. *Porovnání výpočtových metod a jejich výsledků pro lanové propoje*. Praha: EGEM, s.r.o., duben 2009.
- [15] DOUGLASS, Dale A. *Practical Application of High-Temperature Low-Sag (HTLS) Transmission Conductors*. New Haven, Connecticut, červen 2004. [pdf]
- [16] DOUGLASS, Dale A. *Sag-Tension Calculation Methods for Overhead Lines*. Cigre, 2007. N° ISBN : 978-2-85873-010-0
- [17] K. Kopsidas, S. M. Rowland, M. N. R. Baharom, and I. Cotton. *Power transfer capacity improvements of existing overhead line systems*. Proc. of Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2010 IEEE, International Symposium on San Diego, 2010.
- [18] ALAWAR, Ahmad A. *High Temperature Strength and Creep of an Al Conductor with a Hybrid Composite Core*. 16TH International Conference On Composite Materials, 2007.
- [19] 3M, *3M™ Aluminum Conductor Composite Reinforced (ACCR)*, Technical Summary for Common Constructions and Sizes, [technická specifikace] 2010 (pdf), Dostupné z: www.3M.com/ACCR
- [20] Midal Cables Ltd, *Energy High Efficient Current Conductor (ACCC Conductors)*, [technická specifikace] (pdf), Dostupné z: [https://www.midalcable.com/sites/default/files/ACCC%20%20Midal%20Data\(Europea%20n%20Sizes\).pdf](https://www.midalcable.com/sites/default/files/ACCC%20%20Midal%20Data(Europea%20n%20Sizes).pdf)
- [21] Prof. Ing. Oldřich Starý, CSc. *Reálné opce*. A plus, Praha, 2003. ISBN 80-902514-6-3
- [22] Ing. Jaroslava Orságová, *Rozvodná zařízení* [online]. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 2007, Dostupné z: http://home.zcu.cz/~tesarova/PEC/Soubory/RZ_2007.pdf
- [23] Richard A. Brealey, Stewart C. Myers, Franklin Allen. *Teorie a praxe firemních financí*. BizBooks, Brno, 2014. ISBN 978-80-265-0028-5

9. Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 Doporučené posílení sítě studií EWIS do roku 2015.....</i>	<i>8</i>
<i>Obrázek 2 Plánované a skutečné přeshraniční toky ČR za rok 2015.....</i>	<i>10</i>
<i>Obrázek 3 Směr toků přes Českou přenosovou soustavu</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 4 Následky instalace PST na hranicích Německa s Polskem a ČR.....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 5 Schéma rozvodné sítě České republiky.....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 6 Stáří vedení 400 kV v ČR.....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 7 Mapa rozvoje české PS do roku 2023</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 8 Příklad uspořádání rozvodny 420 kV v trubkovém provedení</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 9 Příklad uspořádání rozvodny 420 kV v lenovém provedení</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 10 Zapouzdřená rozvodna Chotějovice.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 11 Jednopolové schéma rozvodny, vývodové pole (ACA05, ACA06), přívodní pole (ACA07), podélné dělení (ACA71) a kombinované spínací pole (ACA01).....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 12 Charakteristický tvar křivky časového průběhu zkratového proudu v jedné fázi třífázové soustavy.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 13 Běžně používaný ACSR vodič.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 14 Příklad průběhu součinitele teplotní roztažnosti pro ACCR vodič s vyznačeným bodem zlomu (knee-point).....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 15 Příklad vodiče ACCC.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 16 Příklady vodičů ACCR společnosti 3M</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 17 Toky v rozvodně při zapojení 1</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 18 Toky v rozvodně při zapojení 2</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 19 Graf vývoje cen hliníku</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 20 Graf závislosti hodnoty opce na změně zatížení.....</i>	<i>64</i>

10. Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 Prvky přenosové soustavy České republiky</i>	19
<i>Tabulka 2 Doba trvání výstavby vedení 400 kV</i>	23
<i>Tabulka 3 Parametry vodičů ACCC</i>	42
<i>Tabulka 4 Parametry vodičů ACCR</i>	44
<i>Tabulka 5 Jmenovité proudy ACSR</i>	50
<i>Tabulka 6 Jmenovité proudy ACCR a ACCC</i>	51
<i>Tabulka 7 Proudů v modelu rozvodny pro různé technologie</i>	51
<i>Tabulka 8 Vstupní data pro výpočet silových účinků na HOK</i>	52
<i>Tabulka 9 Parametry ACSR</i>	52
<i>Tabulka 10 Silové účinky ACSR na HOK</i>	52
<i>Tabulka 11 Silové účinky ACCR na HOK</i>	53
<i>Tabulka 12 Silové účinky ACCC na HOK</i>	53
<i>Tabulka 13 Investiční výdaje ACSR – 3 vodiče</i>	55
<i>Tabulka 14 Investiční výdaje ACSR – 4 vodiče</i>	55
<i>Tabulka 15 Investiční výdaje ACCR – 2 vodiče</i>	56
<i>Tabulka 16 Investiční výdaje ACCC – 2 vodiče</i>	56
<i>Tabulka 17 Vyhodnocení investic- zapojení 1</i>	57
<i>Tabulka 18 Vyhodnocení investic- zapojení 2</i>	57
<i>Tabulka 19 Binomický strom předpokládaného vývoje proudu</i>	60
<i>Tabulka 20 Binomický strom předpokládaného vývoje výkonu</i>	61
<i>Tabulka 21 Binomický strom předpokládaných úspor při použití ACCR vodičů</i>	61
<i>Tabulka 22 Výpočet ceny opce z binomického stromu- vzorec [15]</i>	63

11. Seznam zkratek

PS	přenosová soustava
ČR	Česká republika
ENTSO-E Electricity	European Network of Transmission System Operators for Electricity
ČEPS	Česká energetická přenosová soustava
SEPS	Slovenská elektrizačná prenosová sústava
APG	Austrian Power Grid
PSE	Polskie Sieci Elektroenergetyczne
EU	Evropská unie
SRN	Spolková republika Německo
EWIS	European Wind Integration Study
CEE	Central East Europe
HVDC	High Voltage Direct Current
NIMBY	Not In My Backyard
ACER	Agency for the Cooperation of Energy Regulators
PPS	Provozovatel Přenosové Soustavy
HOK	Hlavní ocelová konstrukce
PTN	Přístrojový transformátor napětí
PTP	Přístrojový transformátor proudu
ČSN	Česká technická norma
KSP	Kombinovaný spínač přípojnic
PD	Podélné dělení
ACSS	Aluminium Conductor Steel Supported
TACIR	Thermal Aluminium Conductor Invar Reinforced
ACCC	Aluminium Conductor Composite Core
ACCR	Aluminium Conductor Composite Reinforced
CF	cash flow
NPV	net present value
IRR	internal rate of return
ČNB	Česká národní banka