

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Napět'ové profily v distribuční soustavě s decentrálními  
zdroji**

**vedoucí práce:** doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.  
**autor:** Josef Hlad

**2015**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Josef HLAD**  
Osobní číslo: **E12B0024P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Napěťové profily v distribuční soustavě s decentrálními zdroji**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište používané koncepce regulace napětí v distribuční soustavě a uveďte vliv decentrálních zdrojů na odchylky a stálost napětí.
2. Zhodnoťte provozní vlastnosti (regulační rozsah, necitlivost regulace, vliv na napěťový profil) prostředků pro regulaci napětí v distribuční soustavě.
3. Na modelovém příkladu části distribuční soustavy (sít' VN a NN) stanovte napěťové profily pro různé varianty nastavení regulačních prvků, různé umístění lokálních zdrojů a různé časové souběhy zatížení sítě a výkonu dodávaného zdroji.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

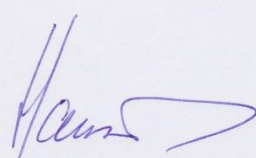
Vedoucí bakalářské práce:

**Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.**

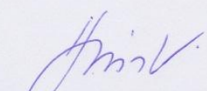
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

**Anotace**

Předkládaná bakalářská práce analyzuje dopad rozptýlené výroby elektrické energie na napětí v distribuční soustavě. Snahou je zejména podat ucelenou analýzu problému, popsat způsoby řešení a v neposlední řadě podložit teoretické předpoklady nasimulovanými situacemi na části distribuční soustavy.

**Klíčová slova**

distribuční síť, regulace napětí, transformátor, obnovitelné zdroje energie

**Abstract**

This bachelor thesis analyses the impact of distributed generation of electricity on the distribution system. The main effort is to analyse this problem clearly, to describe the options of solutions and to support the theoretical assumption by the simulated situations on a part of distribution system.

**Keywords**

Distribution system, voltage regulation, transformer, renewable sources of energy

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Rokycanech dne 2.6.2015

---

Josef Hlad

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí mé bakalářské práce doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 VLIV DECENTRÁLNÍCH ZDROJŮ NA DS</b> .....	<b>11</b>
1.1 DECENTRÁLNÍ ZDROJE .....	11
1.2 VÝVOJ POČTU PŘIPOJENÝCH VÝROBEN K DS .....	11
1.3 DŮSLEDKY BOOMU FVE .....	12
1.4 TECHNICKÉ PROBLÉMY S OZE .....	13
1.4.1 Rozevírání napěťových nůžek .....	15
1.5 ZÁLOHOVÁNÍ OZE .....	16
<b>2 REGULACE NAPĚTÍ V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ</b> .....	<b>17</b>
2.1 PARAMETRY NAPĚTÍ V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ .....	17
2.2 DŮVODY REGULACE .....	18
2.3 PROSTŘEDKY PRO REGULACI NAPĚTÍ .....	18
2.3.1 Transformátor 110 kV/vn .....	19
2.3.2 Distribuční transformátor vn/nn .....	19
2.4 PRINCIPY REGULACE NAPĚTÍ V DS .....	20
<b>3 STANOVENÍ NAPĚŤOVÝCH PROFILŮ</b> .....	<b>24</b>
3.1 POPIS MODELOVÉ DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY .....	24
3.1.1 Vztahy pro výpočty .....	25
3.2 DS BEZ DISTRIBUOVANÝCH ZDROJŮ .....	28
3.2.1 Varianta 1 ( $U_{R22kV} = 22 \text{ kV}$ , DT vn/0,4 kV bez nastavených odboček) .....	28
3.2.2 Varianta 2 ( $U_{R22kV} = 22 \text{ kV}$ , DT vn/0,4 kV s nastavenými odbočkami) .....	29
3.2.3 Varianta 3 ( $U_{R22kV} = 23,1 \text{ kV}$ , DT vn/0,4 kV bez nastavených odboček) .....	30
3.2.4 Varianta 4 ( $U_{R22kV} = 23,1 \text{ kV}$ , DT vn/0,4 kV s nastavenými odbočkami) .....	32
3.2.5 Varianta 5 ( $U_{R22kV} = 23,1 \text{ kV}$ , DT vn/0,42 kV bez nastavených odboček) .....	32
3.2.6 Varianta 6 ( $U_{R22kV} = 23,1 \text{ kV}$ , DT vn/0,42 kV s nastavenými odbočkami) .....	33
3.2.7 Shrnutí .....	34
3.3 DS S DECENTRALIZOVANÝMI ZDROJI .....	35
3.3.1 Varianta 1 ( $U_{R22kV} = 23,1 \text{ kV}$ , DT vn/0,42 kV, FVE na 3. km) .....	36
3.3.2 Varianta 2 ( $U_{R22kV} = 23,1 \text{ kV}$ , DT vn/0,42 kV, FVE na 15. km) .....	37
3.3.3 Varianta 3 ( $U_{R22kV} = 23,1 \text{ kV}$ , DT vn/0,42 kV, FVE na 30. km) .....	39
3.3.4 Shrnutí .....	41
3.3.5 Varianta 4 ( $U_{R22kV} = 23,1 \text{ kV}$ , DT vn/0,42 kV, FVE v síti vn na 30. km, v síti nn na konci vývodu) ..	42
<b>4 ZÁVĚR</b> .....	<b>44</b>
<b>5 POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>45</b>



## **Seznam symbolů**

NN	nízké napětí
VN	vysoké napětí
OZE	obnovitelné zdroje energie
DS	distribuční soustava
FVE	fotovoltaická elektrárna
VTE	větrná elektrárna
$U_n$	jmenovité napětí
DT	distribuční transformátor

## Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem decentrálních zdrojů elektrické energie na distribuční soustavu, zejména na napěťový profil. Tato problematika je v poslední době velmi aktuální, neboť se decentrální zdroje v České republice a ve světě velmi rozšířily. Příkladem toho jsou solární panely na střechách rodinných domů, velkoplošné fotovoltaické elektrárny nebo větrné elektrárny. Bohužel to s sebou nese i jistá technická úskalí, kterými je potřeba se zabývat a řešit je. Právě proto je téma této práce velice aktuální.

Ovlivnění napěťového profilu rozptýleným zdrojem je závažná věc a v současné době lze tento problém řešit z pohledu distributora dvěma hlavními způsoby. Předně je to regulací napětí pomocí transformátoru 110 kV/vn, což je vlastně to první a nejjednodušší řešení, které se využívá. Dále je to regulace pomocí transformátorů vn/nn, která už je v jistých ohledech trochu komplikovanější. Vedle těchto dvou možností regulace a věcí s tím spojených se teoretická část zabývá také vlivem rozptýlené výroby na síť. V praktické části jsou nasimulovány a rozebrány různé situace, které mohou v distribuční síti nastat.

# 1 Vliv decentralních zdrojů na DS

## 1.1 Decentrální zdroje

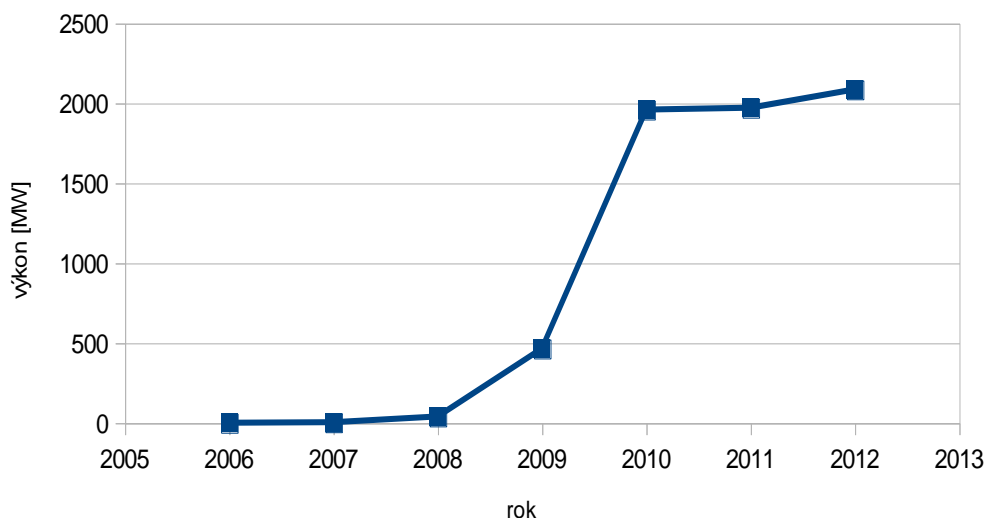
Zdroje energie elektrizační soustavy lze rozdělit na hlavní a záložní. Hlavní zdroje pokrývají většinou poptávku po elektrické energii a běží nepřetržitě, neboť jejich vypnutí a opětovné zapnutí je naprosto nevhodné a děje se tak pouze výjimečně. Záložní se uvádí do provozu pouze v momentech, kdy hlavní zdroje už nestačí, tedy v době spotřebitelské špičky. Jejich zapnutí a vypnutí je mnohem snazší. Jako decentralní zdroje lze chápat převážně obnovitelné zdroje energie (v České republice větrné, ale hlavně fotovoltaické elektrárny), které mohou být napojeny i na distribuční soustavu, tedy tak říkajíc uprostřed „cesty“. Na druhou stranu tzv. centrální zdroje jsou elektrárny napojené na přenosovou soustavu, tedy na počátku. Za decentralní zdroje lze považovat také fotovoltaické panely na střeších rodinných domů.

## 1.2 Vývoj počtu připojených výroben k DS

Obrovský boom fotovoltaických elektráren způsobil problémy, které si neseme na svých bedrech dodnes. Vše však začalo už v roce 2005, kdy prošel zákon, který zavedl státní podporu výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, ve kterém byly také stanoveny dotační podmínky a garantované výkupní ceny energie ze solárních elektráren.

Největší problém však způsobil pozměňovací návrh, který stanovil to, že výkupní cena nesmí klesnout pod 95 % ceny za rok předchozí. Ten takzvaný boom přišel až v letech 2008-2010, kdy se razantně snížily náklady na solární technologie vlivem levnějších produktů z Číny a na tuto skutečnost stát nezareagoval snížením podpory. Tato souhra skutečností nahrála do karet novým výrobcům energie, protože měli de facto zajištěnou návratnost své investice. [1]

## Vývoj počtu FVE v ČR



Dnes se tedy řadí fotovoltaika na třetí místo v podílu vyráběné elektřiny hned za parní a jaderné elektrárny.

### 1.3 Důsledky boomu FVE

Náklady na podporu OZE, tedy hlavně FVE, se razantně zvýšily z důvodů výše popsaných. Státní kasa, tedy občané, museli sáhnout mnohem hlouběji do svých kapes, protože tento příspěvek, resp. podpora, se samozřejmě promítla do cen elektřiny.

Tab. 1: Vývoj cen elektřiny pro domácnosti v Kč[1]

rok	výše příspěvku na obnovitelné zdroje v Kč (bez DPH)	roční platba domácnosti elektřinou svítí	roční platba domácnosti elektřinou svítí a ohřívá vodu	roční platba domácnosti elektřinou svítí, ohřívá vodu a topí
2006	28	84	224	476
2007	34	102	272	578
2008	40	120	320	680
2009	52	156	416	884
2010	166	498	1328	2822
2011	370	1110	2960	6290
2012	419	1257	3352	7123
2013	583	1749	4664	9911

V tabulce výše lze vidět rozdíly v platbách v jednotlivých letech s ohledem na spotřebu domácností. Domácnost, která užívá elektřinu pouze ke svícení a napájení běžných

spotřebičů (roční spotřeba 3 MWh), ta, která elektřinou ohřívá i vodu (ročně 8 MWh) a domácnost, která k tomu všemu elektřinou i topí (ročně 17MWh).

Až v roce 2010 se podařilo vládě značně omezit podporu nově vzniklým solárním elektrárnám. Tím solární boom v podstatě skončil. Je to vidět například na tom, že po roce 2010 vznikaly zejména střešní instalace s menším výkonem a ne ty velkoplošné. To však nemění nic na tom, že stát musí svým závazkům vůči instalacím do roku 2010 dostát a vykupovat elektřinu za zvýhodněné ceny a to až po dobu 20 let. Až v roce 2014 ukončila vláda definitivně podporu solárním elektrárnám. [1]

## 1.4 Technické problémy s OZE

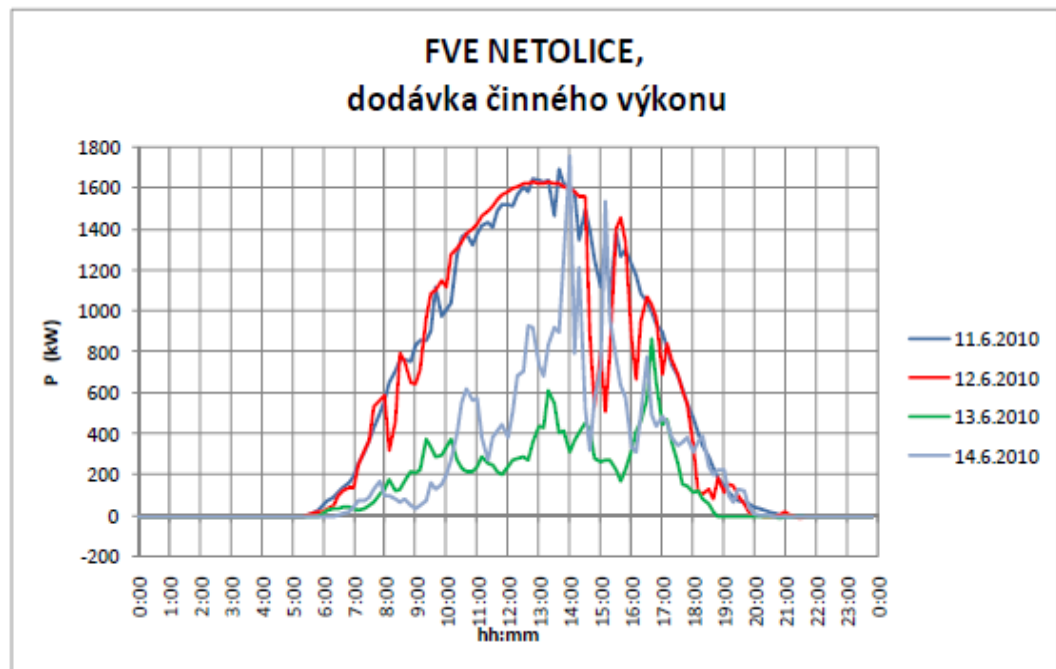
Obnovitelné zdroje energie se tváří jako dobrá alternativa k běžným typům výroben, jako například tepelné nebo jaderné. Vyzdvihuje se zejména šetrnost k životnímu prostředí, což ve srovnání s tepelnou elektrárnou rozhodně pravda je. Na druhou stranu by se však neměla opomíjet také prostorová náročnost FVE, protože má-li mít FVE solidní výkon, musí bohužel zabrat relativně velkou plochu pole nebo louky, což s sebou nese další nevýhody. V neposlední řadě je tu otázka vhodnosti provozování FVE v našich klimatických podmínkách. Je potřeba si přiznat, že Česká republika nemá zrovna ideální podmínky z hlediska slunečního záření. Mnohem lépe jsou na tom samozřejmě státy jižní Evropy. Fotovoltaika má však jednu hlavní a nespornou nevýhodu. Největší výkon do sítě totiž dodává v časech, kdy je nejmenší spotřeba. Typickým příkladem je třeba léto, kdy je největší podíl slunečního záření za celý rok, zároveň však nejmenší spotřeba elektrické energie. Z toho vyplývá, že lze fotovoltaickou elektrárnu jen těžko s výhodou využívat na pokrytí spotřebitelských požadavků.

O moc lépe na tom nejsou ani větrné elektrárny (VTE), které se staly dominantními zejména v sousedním Německu. Podíváme-li se na ně z estetického hlediska, jednoznačně hyzdí krajinu. Nejenže je potřeba opět velké množství těch samotných jednotek, což při pohledu do krajiny, kde na obzoru vidíte desítky VTE, vypadá přinejmenším tragicky, ale navíc nejsou zcela bezhlučné. Je sice pravdou, že dnešní moderní VTE snížily svoji hlučnost, ale stále to není zcela ideální.

Přejdeme-li na technickou stránku věci, zjistíme, že jsou na tom podobně jako FVE. Mají tedy stochastický charakter. Jinými slovy nemůže zajistit ani s jistotou určit, kdy, jak a

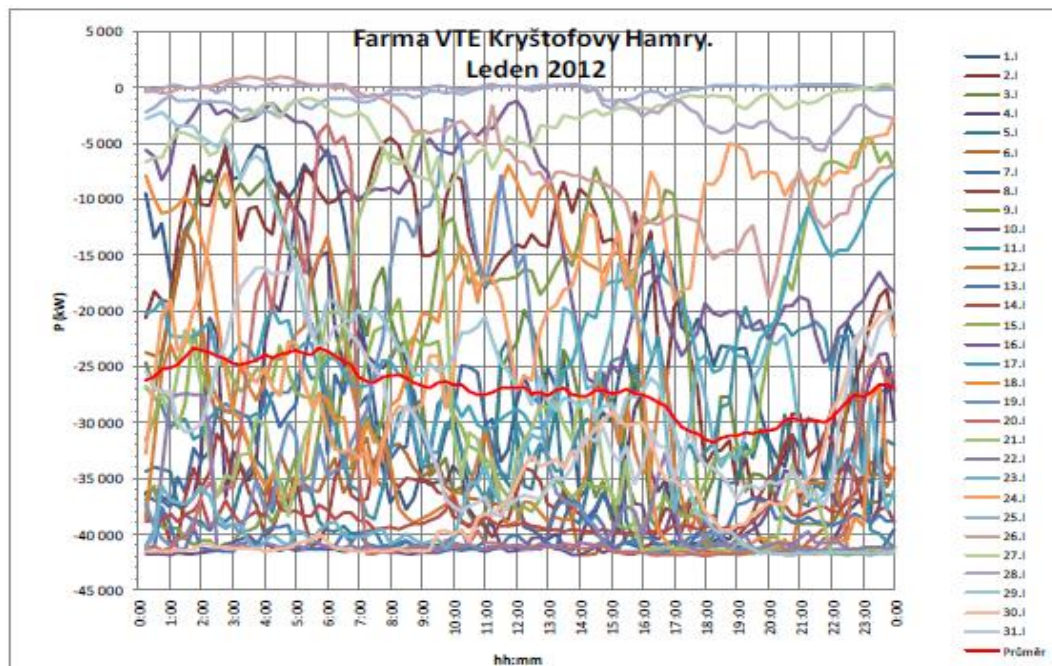
kde bude nebo nebude foukat, aby se dle toho mohla naplánovat výroba elektřiny. Způsobují tedy nestálou a časově proměnnou dodávku energie.

Kolísání napětí, které OZE svým charakterem provozu rozhodně způsobují, lze nazvat také jako flickr. Tento jev lze pozorovat například při blikání světla žárovky, které může rušit člověka při jeho činnosti. Rychlé změny napětí způsobují také rychlé změny světelného toku, což v důsledku pocítíme změnou zrakového vnímání při flickru.



Obr. 2: Časový průběh dodávky činného výkonu FVE Netolice [3]

Na obr. 2 vidíme zřetelně průběhy dodávky činného výkonu do sítě fotovoltaickou elektrárnou Netolice v průběhu několika červnových dnů, kdy by se daly předpokládat neoptimálnější podmínky pro provoz tohoto typu výroby. Je patrné, že dodávky jsou velmi chaotické a stochastické. Průběh oblačnosti během dne se promítl do extrémů funkcí.

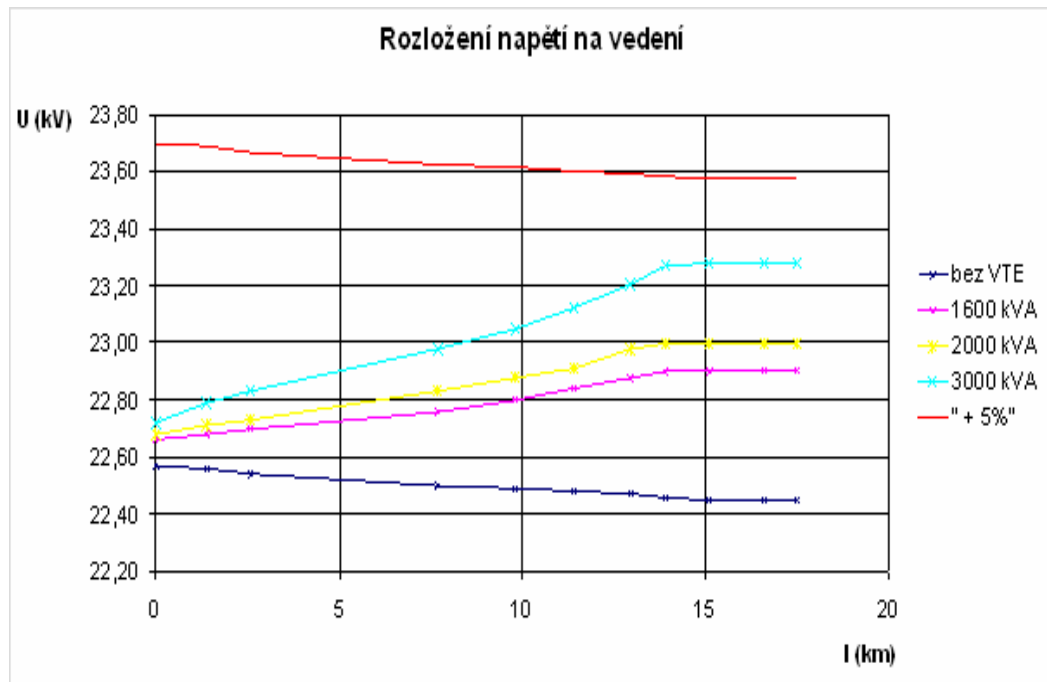


Obr. 3: Časový průběh výroby VTE Kryštofovy Hamry v lednu 2012 [4]

Na obr. 3 je vidět změť čar, která dokládá stochastický charakter výroby farmy. Měření proběhlo v lednu 2012. Ani toto měření nás nemůže přesvědčit o tom, že by větrná elektrárna byla spolehlivou výrobnou.

#### 1.4.1 Rozevírání napětových nůžek

Tento jev se de facto objevil až s masivnějším rozšířením decentralizovaných zdrojů. Původní myšlenka je taková, že od elektrárny směrem ke spotřebiteli se přenášený výkon postupně snižuje. Tomu jsou uzpůsobeny taktéž například průřezy vodičů, které se směrem od elektrárny snižují. Zapojíme-li další zdroj do ES v místě distribuční části, tedy tam, kde by už žádný zdroj být neměl a napětí by mělo být také menší, alespoň dle původních plánů, může se stát to, že zdroj náhle dodá příliš velký výkon do sítě, který je tak velký, že ho tato část sítě už není schopna spotřebovat, a tak může vzniknout tzv. přetok energie z nižší do vyšší napětové soustavy, což je samozřejmě nežádoucí.



Obr. 4: Napětový profil distribuční sítě [5]

Na obr. 4 je zřetelně vidět rozevírání napětových nůžek se zvětšujícím se výkonem elektrárny. Průběh „bez VTE“ nám znázorňuje ideální stav, kdy napětí postupně klesá. V našem obrázku už od výkonu 1600 kVA vznikají přetoky do vyšší napětové hladiny.

## 1.5 Zálohování OZE

O tom, že je potřeba nějakým způsobem zálohovat obnovitelné zdroje, není pochyb. Intenzita slunečního záření a větru se mění nejen s ročním obdobím, ale i s denní dobou. Elektrizace soustavy tedy potřebuje zdroje, které lze snadno odstavit či „přibrzdit“, když OZE najíždějí, a které lze naopak okamžitě nahodit v případě nižšího výkonu OZE. V případě úplného výpadku OZE, což se samozřejmě v extrémních případech může stát, je potřeba zálohovat celý výkon OZE, aby nedošlo k nepokrytí zatížení. Vhodnou zálohou VTE jsou například vodní elektrárny, tedy rychle startující, dobře regulovatelné a rychle odstavitelné zdroje.



## 2 Regulace napětí v distribuční soustavě

### 2.1 Parametry napětí v distribuční soustavě

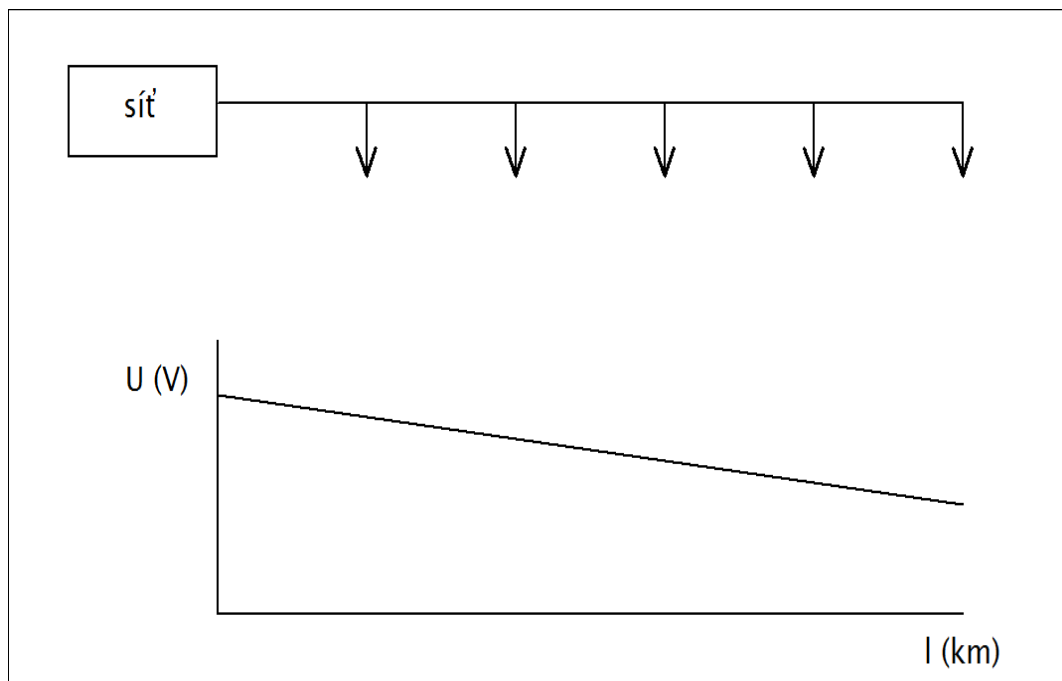
Na distribuční soustavu jsou kladeny relativně vysoké nároky z hlediska spolehlivosti a kvality dodávané energie koncovým uživatelům. Problémy v této části elektrizační soustavy pociťují odběratelé samozřejmě nejvíce, proto je snaha různými způsoby těmto potížím předejít.

Napájecí napětí je charakterizováno zejména kmitočtem, velikostí, tvarem vlny a symetrií 3f napětí. Na základě těchto ukazatelů lze rozhodnout, zda dodané napětí odpovídá standardům ČSN EN 50160. Za běžného provozu kolísají tyto charakteristiky vlivem například změn zatížení, poruch či rušení. Některé provozní odchylky lze očekávat, jiné nikoliv, což právě ztěžuje určení přesných hodnot, kterých by měly charakteristiky „ideálního“ napětí dosahovat. Jmenovité napětí sítě samozřejmě nelze z různých důvodů, například z výše zmíněných, udržovat přesně na předepsaných hodnotách. Norma ČSN EN 50160 proto zmiňuje taktéž povolené odchylky napětí, které sice mohou mít negativní dopady například na výkon či spotřebu, ale jsou tak říkajíc tolerovatelné. Povolená odchylka v distribuční soustavě je  $\pm 10\% U_n$ . Za normálních provozních podmínek jsou definovány odchylky napětí v síti vn tak, že 99 % naměřených hodnot během týdne v intervalu 10 minut musí být v rozmezí  $\pm 10\%$  dohodnutého napětí a během týdne všechny hodnoty v rozmezí  $\pm 15\%$ . Na hladině nn musí být 95 % naměřených hodnot během týdne v rozmezí  $\pm 10\% U_n$  a během celého týdne všechny hodnoty v rozmezí  $+10/-15\% U_n$ . [6]

Problémům s udržením napětí v povolených mezích lze předcházet mnohými opatřeními, jako například už řádně vypracovaným projektem, kde zohledníme charakter a velikost sítě, její napájení, výzbroj, popřípadě možnost pozdějšího rozšíření. Dalším prostředkem k udržení povolených hodnot je dodržování provozního režimu, kde by se mělo dbát na správnou manipulaci a řízení sítě. Neméně důležité jsou taktéž pravidelné revize a údržba sítě. [7]

## 2.2 Důvody regulace

Hlavními důvody k regulaci je udržení napětí v povolených mezích. Před několika lety byla naše DS pod žádným nebo velmi malým vlivem OZE, resp. decentrálních zdrojů. To mělo za následek do té doby klasický průběh napětí podél sítě. Napětí směrem od zdroje, tedy elektrárny, ke koncovému uživateli klesalo důsledkem úbytků napětí a odběry ze sítě, viz. obr. 5.



Obr. 5: Napěťový profil bez OZE

S masivním nástupem OZE se změnila topologie sítě a taktéž napěťový profil. Zdroj energie už není pouze na hladině vyššího napětí, ale může se objevit také na nižší napěťové hladině. To může při dostatečném výkonu zdroje a menšímu zatížení sítě způsobit tzv. rozevření napěťových nůžek popsané v kapitole 1.4.1., tedy pravděpodobné přepětí v síti.

## 2.3 Prostředky pro regulaci napětí

V této kapitole bych chtěl zmínit parametry transformátorů, kterými se reguluje napětí v DS.

### 2.3.1 Transformátor 110 kV/vn

Transformátory 110 kV/vn jsou vybaveny automatickými regulátory napětí a většinou mají regulační rozsah  $110 \pm 8 \times 2\% / vn$ , jsou schopny regulace pod zatížením. Princip automatického regulátoru napětí je ten, že měříme napětí na výstupu transformátoru a liší-li se tato hodnota od požadované, zareaguje regulátor přepnutím příslušné odbočky. Tímto tedy udržujeme na transformátoru konstantní napětí. Kvůli přítomnosti automatické regulace jsou nezbytné kvalitní přepínače odboček. Pro dosažení předepsané životnosti transformátoru by se mělo dbát na to, aby počet přepnutí přepínače odboček nebyl vyšší než 25 za den. Tohoto kritéria lze dosáhnout správným nastavením časového zpoždění regulátoru, což je zpravidla asi 5 minut. Při překročení dané hranice počtu přepnutí je zapotřebí revize.[7][8] Necitlivost regulátoru je cca 2,5 %  $U_n$ , která bývá vyšší než regulační krok. Snahou je to, aby regulátor nereagoval, tedy nepřepínal odbočky, při krátkodobých změnách napětí, například při nějakém napěťovém pulsu, který rychle odezní. Napětí nakrátko transformátoru 110 kV/vn bývá kolem 10 %.

Asi největší výhodou automatických regulátorů je jejich nepřetržitá činnost a vyloučení lidského faktoru.

### 2.3.2 Distribuční transformátor vn/nn

Odbočky lze u těchto typů přepínat pouze bez zatížení. Na primární straně jsou tedy odbočky, které byly kdysi 3 – stupňové a to: +5%; 0%; -5%. K docílení jemnější regulace se setkáme u novějších transformátorů s dělením +5%; +2,5%; 0%; -2,5%; -5%. [7] Napětí nakrátko se pohybuje mezi 4 a 6 %.

V praxi se lze setkat se dvěma jmenovitými převody těchto transformátorů, a to vn/0,4 kV a vn/0,42 kV, výjimečně i vn/0,41 kV. Použití toho či onoho převodu může mít taktéž vliv na napětí, protože při aplikaci převodu vn/0,42 kV se už rovnou zvedá hodnota napětí na výstupu transformátoru o 5 % oproti vn/0,4 kV. Tím se ale budu více zabývat v praktické části.

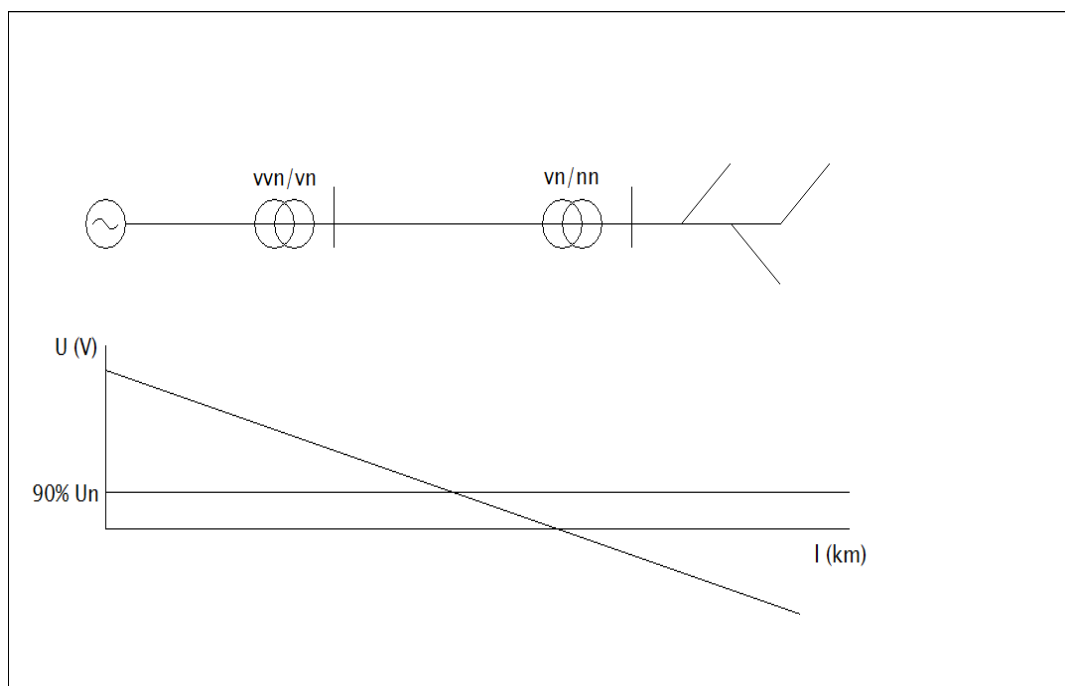
I přesto, že automatický regulátor napětí by zlepšil napěťové poměry, se u těchto typů transformátorů nepoužívá a to zejména kvůli jeho vysoké ceně. Existují však už první pilotní projekty nasazení transformátorů vn/nn s regulací pod zatížením.

## 2.4 Principy regulace napětí v DS

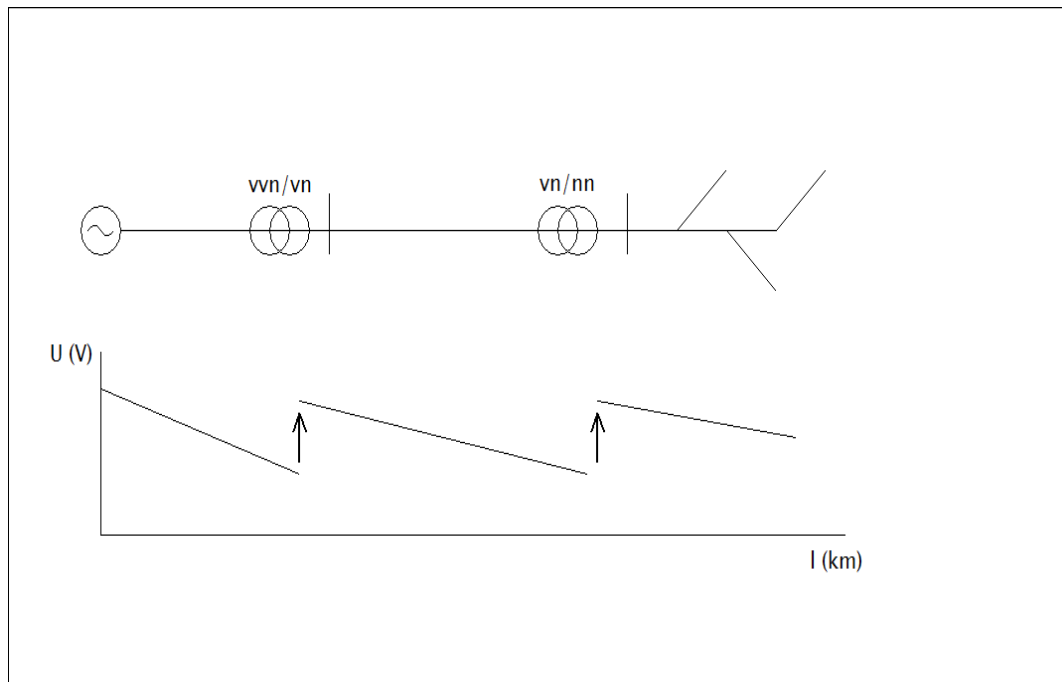
V případě potřeby lze udržovat napětí v povolených mezích mnohými způsoby, jako třeba přenastavit automatické regulátory napětí u transformátorů vvn/vn, změnit nastavení odboček distribučních transformátorů vn/nn nebo důslednou kompenzací jalového výkonu. Poslední zmíněná možnost regulace je ovšem plně v režii odběratele, nikoliv distributora. Sám odběratel totiž musí ve svém vlastním zájmu kompenzovat jalový výkon, v opačném případě platí peněžitou přírážku.

Jednotlivá opatření se dají samozřejmě podle potřeby i kombinovat. O něco složitější způsoby, zejména finančně a časově, jsou potom zvýšení počtu napájecích stanic nebo zkrátka rekonstrukce elektrické sítě, čímž je myšleno hlavně její zesílení.[7]

Na obr. 6. je zřetelně vidět, co se stane, když by se napětí vůbec neregulovalo. Snadno by nám vzniklo podpětí v síti, tj. hodnota napětí by klesla pod 90 %  $U_n$ , což je dle normy nepřijatelné.



Obr. 6: Průběh napětí bez regulace

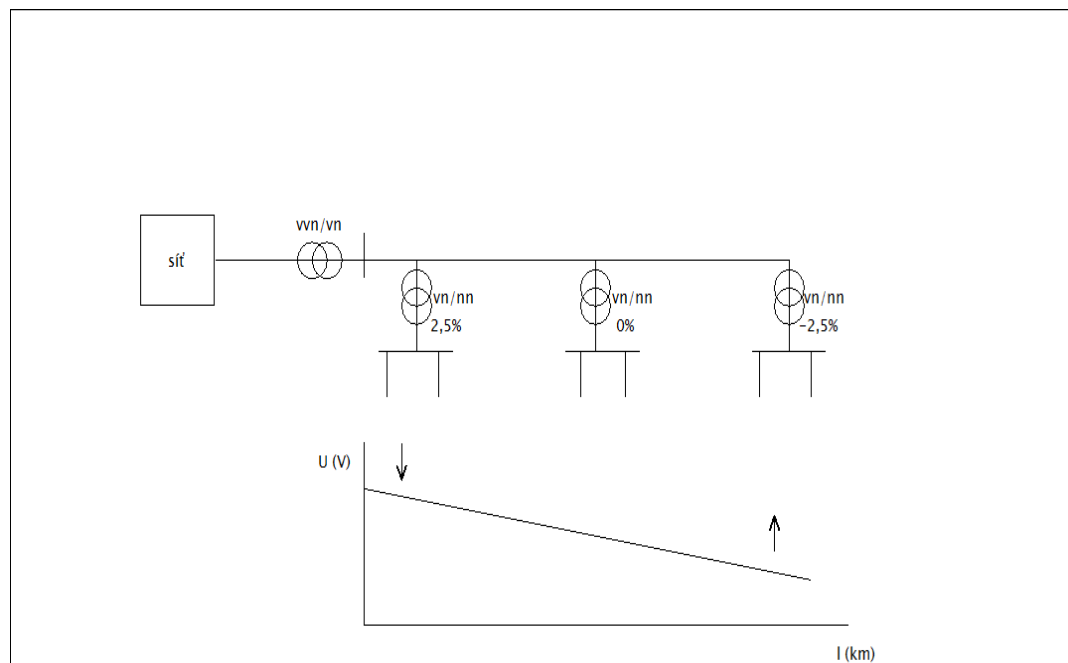


Obr. 7: Zamezení podpětí v síti

Obr. 7 nám krásně ilustruje, jak se takovému podpětí v síti bránit. Prvním a nejjednodušším krokem je regulovat napětí na transformátoru  $vn/vn$ , kde se průběh napětí tak říkajíc „přestříhne“ a posune se výš. Nestačí-li tento krok, je potřeba, aby zareagoval i transformátor  $vn/nn$  dalším „přestřížením“ a zvýšením napětí. Analogický postup lze očekávat při eliminaci přepětí.

V případě na obr. 7 jsem zhruba nastínil, jak taková regulace probíhá. Distribuční transformátory  $vn/nn$  jsem nahradil ve schématu pouze jedním. Na dalším obrázku bych rád ukázal konkrétnější nastavení odboček těchto transformátorů s ohledem na jejich rozmístění v síti.

Představme si část distribuční soustavy, kde máme tři transformátory  $vn/nn$ , a její napěťový profil, který reprezentuje úbytky na vedení a odběry. Chceme-li zamezit případnému podpětí, musíme regulovat, viz. obr. 8.



Obr. 8: Nastavení odboček distribučních transformátorů

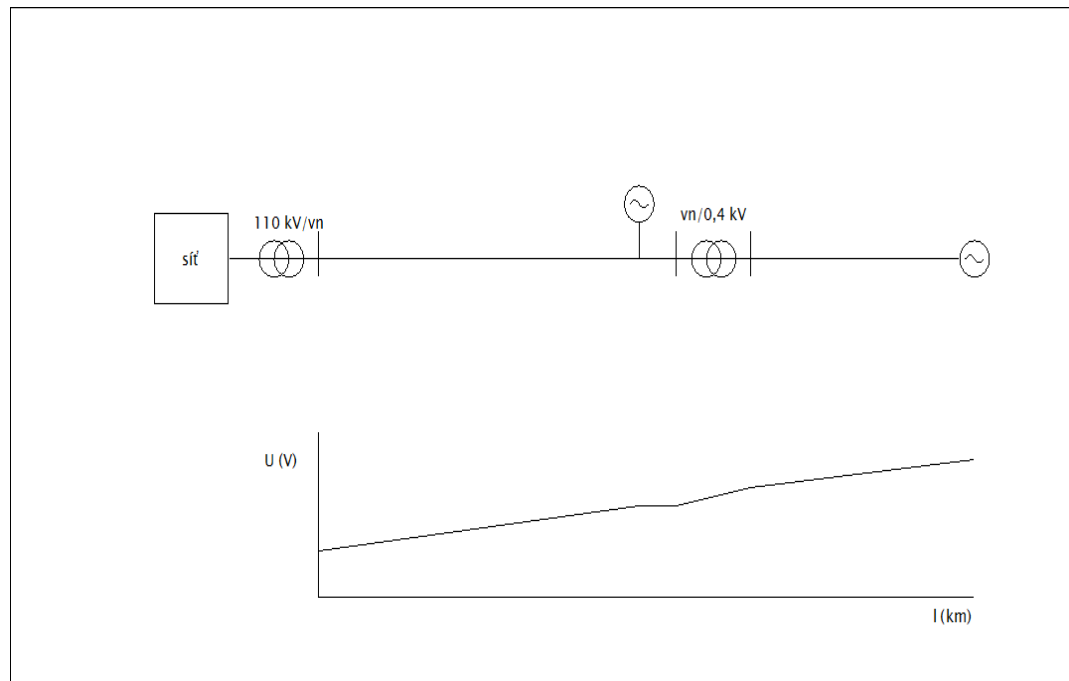
V první řadě se tedy využije transformátor  $v_n/n_n$ , jehož součástí je automatický regulátor napětí a regulace lze provádět pod zatížením. Tím se snažíme vyrovnávat napětový profil. Transformátory  $v_n/n_n$  mají odbočky nastavené napevno, viz. obr. 8. Transformátor na začátku sítě má odbočku +2,5%, se kterou lze napětí snížit. Uprostřed je nastavena odbočka 0%, tedy neutrální a na konci máme odbočku -2,5%, která nám napětí naopak zvyšuje. Cílem je tedy průběh napětí vyrovnat, jak naznačují šipky v obrázku.

Výše uvedenou situaci je potřeba brát opravdu jen jako jednu z možností nastavení, protože ve skutečnosti záleží také například na jmenovitém převodu transformátoru  $v_n/n_n$ , čímž se budu zabývat více v praktické části, ale také na rozdílech zatížení sítě, nastavení odboček musí totiž vyhovovat i při odlehčení sítě, aby poté nedošlo k přepětí.

Dále je výhodné držet napětí kolem 106 %  $U_n$ , abychom měli při úbytcích napětí dostatečnou rezervu v povoleném pásmu napětí  $\pm 10\% U_n$  a zároveň respektovali například odlehčení sítě, čímž se napětí zvedne.

Až doposud jsem se v této kapitole zabýval sítí bez distribuovaných zdrojů. Pojďme se nyní podívat na to, jak to bude vypadat, když se nám v síti pár těchto zdrojů objeví, respektive co to udělá s napětovým profilem. Na obr. 9 je jeden zdroj v síti  $v_n$  a jeden v síti  $n_n$ . Zdroj v síti  $v_n$  zvedne napětí maximálně o 2 %, protože jinak by nemohl dle normy být připojen. Zdroj v síti  $n_n$  smí zvednout napětí o 3 %, důvod je stejný jako v předchozím případě. V obou

situacích tedy vidíme rozevření napěťových nůžek a přetok energie do vyšší napěťové hladiny, což je samozřejmě extrémní případ.



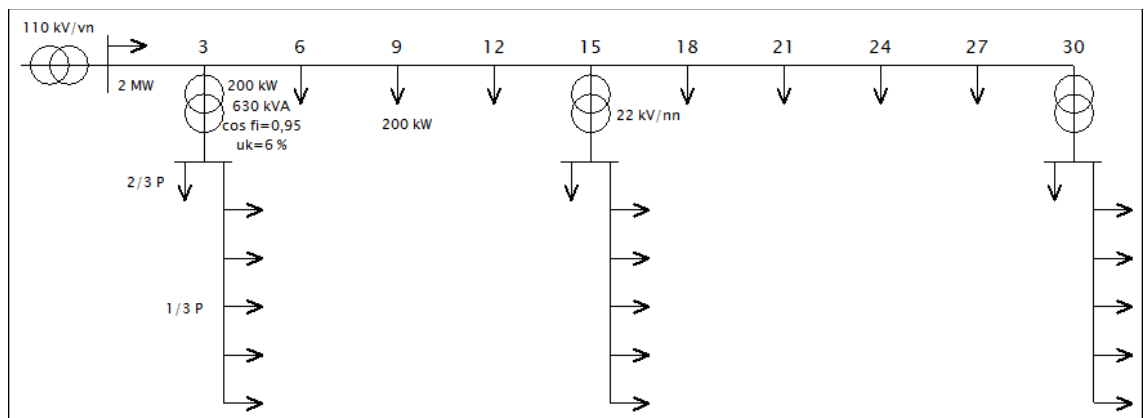
Obr. 9: Sít s distribuovanými zdroji a transformátorem  $v_n/0,4 \text{ kV}$

V dalším případě bychom mohli uvažovat převod transformátoru  $v_n/0,42 \text{ kV}$ . Tento převod nám způsobí navýšení napětí na výstupu o 5 %. Jestliže k tomu přičteme zvýšení napětí způsobené decentrálním zdrojem, dostaneme se v součtu na odchylku až 8 %. To už může mít za následek velké problémy, k jejichž řešení se samozřejmě mohou využít výše zmíněné a popsané nástroje.

### 3 Stanovení napětových profilů

V praktické části této bakalářské práce bych rád uvedl několik variant provozu DS a popsal, jak se která varianta promítne do napětového profilu soustavy. Všechny příklady uvedu na části DS dle schématu na obr. 10. Všechny výpočty a profily pocházejí z mnou vytvořeného Excel souboru.

#### 3.1 Popis modelové distribuční soustavy



Obr. 10: Uvažovaná část DS

Na obr. 10 je znázorněná část DS bez decentralizovaných zdrojů, ke které se vztahují veškeré výpočty a úvahy. Síť vn je dlouhá 30 km a má celkem 10 rovnoměrně rozložených stejných odběrů, které jsou mezi sebou vzdáleny 3 km. Celkové zatížení sítě je 2 MW, což odpovídá běžnému zatížení vývodů vn, a každý odběr odebírá tedy 200 kW, počítá se s účinností 0,95. Měrný odpor sítě uvažuji 0,32  $\Omega$ /km, měrnou reaktanci 0,43  $\Omega$ /km, použito lano AlFe6 s průřezem  $S=95 \text{ mm}^2$ . Na 3., 15. a 30. km máme distribuční transformátory 22 kV/nn, které jsou také naprosto totožné. Jedná se o transformátory se zdánlivým výkonem 630 kVA,  $\cos \varphi = 0,95$ ,  $u_k=6\%$ ,  $\Delta P_k = 6900 \text{ W}$ .

Síť nn je dlouhá 1 km a má 5 rovnoměrných odběrů vzdálených mezi sebou 0,2 km. Do uvažované odbočky vstupuje 1/3 činného výkonu, který prošel přes transformátor, tedy 66,67 kW.  $\cos \varphi$  je opět 0,95, měrný odpor 0,4  $\Omega$ /km, měrná reaktance 0,28  $\Omega$ /km, typ použitého vodiče je lano AlFe6 s průřezem  $S=70 \text{ mm}^2$ .

S touto konfigurací a s těmito hodnotami provádím veškeré výpočty a úvahy. V Excel souboru, který jsem v rámci praktické části vytvořil, lze samozřejmě vstupní hodnoty libovolně měnit.



### 3.1.1 Vztahy pro výpočty

V této kapitole bych rád přiblížil způsob výpočtu napětového profilu a výkonu potřebného pro navýšení napětí v síti vn. Celý postup předvedu na variantě v kapitole 3.3.1, kde je na začátku sítě vn instalován zdroj, který zvedá napětí v tomto bodě o 2 %. Směrem od rozvodny k tomuto bodu se napětí zvedá lineárně a od tohoto bodu směrem na konec sítě se drží hodnoty napětí zvýšené taktéž o 2 % oproti stavu bez decentralizovaného zdroje.

Ze všeho nejdříve si musíme spočítat proud, který odebírá námi uvažovaný vývod, tedy vývod na 3. km. Ten spočteme z následujícího vztahu:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * U * \cos \varphi} * \text{úsek} \quad (1)$$

Úsekem je myšleno následující: Celá síť vn je rozložena na 10 stejně dlouhých úseků po 3 kilometrech. V prvním úseku však teče 10 krát větší proud než v posledním úseku, proto se i tato skutečnost musí brát v potaz. Výkon P je zatížení jednoho odběru, tedy 200 kW, výsledný proud  $I = 52,62$  A. Tento proud je potřeba rozložit na činnou a jalovou složku dle následujících vztahů:

$$I_{\zeta} = I * \cos \varphi \quad (2)$$

$$I_j = I * \sin \varphi \quad (3)$$

Po dosazení proudu 52,62 A vyjde  $I_{\zeta} = 49,99$  A a  $I_j = 16,43$  A. Pro výpočet úbytku napětí na vedení využijeme následujícího vztahu:

$$\Delta U = \sqrt{3}(R_k * l * I_{\zeta} + X_k * l * I_j) \quad (4)$$

$R_k$  je měrný odpor vedení vn 0,32  $\Omega/\text{km}$ ,  $X_k$  měrná reaktance 0,43  $\Omega/\text{km}$  a l délka vedení daného úseku. Potom úbytek napětí na 3. km sítě vn vyjde 119,83 V. Finální hodnotu napětí v tomto mnou zvoleném bodě dostaneme dle vztahu:

$$U_3 = (U_r - \Delta U) + 0,02 * U_n \quad (5)$$

, kde  $U_r$  je napětí udržované v rozvodně, v tomto případě 23,1 kV a  $U_n$  je jmenovité napětí sítě, tedy 22 kV. Tímto vztahem jsme dostali hodnotu napětí zvýšenou navíc o 2 % v důsledku působení FVE. Hodnota U pro tento případ je 23420,17 V. Tímto máme vyřešenou síť vn, zbývá spočítat ještě síť nn.

Ze všeho nejdříve musím spočítat hodnotu napětí na sekundární straně distribučního transformátoru, tedy spočítat úbytek napětí na transformátoru. K tomu potřebuji znát proud, který mi odebírá celá síť nn při daném zatížení. Tento proud spočtu dle rovnice (1), kde za napětí dosadím výslednou hodnotu napětí v tomto bodě sítě vn a výkon je roven výkonu přenášenému přes transformátor, tedy 200 kW. Hodnota proudu vyjde 5,2 A. Musím ho však

opět rozložit na činnou a jalovou složku, dle rovnic (2) a (3).  $I_{\xi}$  vyšel 4,93 A a  $I_j$  4,62 A.

Nyní spočteme činný odpor transformátoru:

$$R_t = \Delta P_k * \left(\frac{U_n}{S_n}\right)^2 \quad (6)$$

a reaktanci transformátoru:

$$X_t = \frac{u_k}{100} * \frac{U_n^2}{S_n} \quad (7)$$

$U_n$  je jmenovitá hodnota napětí sítě vn,  $\Delta P_k$  ztráty transformátoru nakrátko,  $u_k$  napětí nakrátko a  $S_n$  jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru. V našem případě je  $R_t = 8,41 \Omega$  a  $X_t = 46,1 \Omega$ . Úbytek napětí na transformátoru je k nalezení dle vztahu:

$$\Delta U_t = \sqrt{3}(R_t * I_{\xi} + X_t * I_j) \quad (8)$$

Hodnoty  $I_{\xi}$  a  $I_j$  jsou samozřejmě hodnoty proudů odebíraných sítí nn.  $\Delta U_t$  je v našem případě 201,24 V. Výsledná hodnota napětí přepočtená přes transformátor, tedy napětí na výstupu transformátoru je:

$$U = (U_3 - \Delta U_t) * \frac{U_{n2t}}{U_{n1t}} - \frac{\delta * U_{n2s}}{100} \quad (9)$$

, kde  $\delta$  je hodnota odbočky.  $U_{n1t}$  je jmenovité napětí primáru,  $U_{n2t}$  jmenovité napětí sekundáru transformátoru a  $U_{n2s}$  je jmenovité napětí sítě nn. Posledním členem vztahu se spočítá odbočka transformátoru, tedy o kolik se zvedne napětí vzhledem k zadané procentní odbočce vztaženo na jmenovité napětí sítě.  $U$  vyšlo 443,27 V. Procentuální hodnotu dostaneme samozřejmě primitivním vztahem, kdy výslednou hodnotu napětí  $U$  vydělíme jmenovitou hodnotou napětí sítě a vynásobíme 100.

Nyní by ještě zbývalo spočítat úbytky napětí na vedení nn, ale postup je obdobný jako u propočtů sítě vn, viz. vztahy výše.

Dále se budu zabývat výpočtem výkonu FVE, který je potřeba k navýšení napětí v síti vn o 2 %. FVE budu uvažovat připojenou na 3. km sítě vn. Napětí v rozvodně uvažuji 23,1 kV, spočtu-li si úbytek napětí na prvním úseku dle vztahu (4), dostanu hodnotu napětí v bodě na 3. km 22 980,17 V, úbytek napětí tedy činí 119,83 V. Přičtu-li k hodnotě napětí ve zmíněném bodě navýšení o 2 % jmenovitého napětí sítě, dostanu se na hodnotu 23 420,17 V,  $\Delta U$ , tedy rozdíl mezi napětím v rozvodně a napětím v daném bodě, je v tomto případě 320,17 V. Jelikož je napětí v uvažovaném bodě, tedy v místě připojení FVE větší, než uvažované napětí v rozvodně, teče činná složka proudu od tohoto bodu do rozvodny. Jalová složka proudu poteče na druhou stranu, protože FVE pracuje s účínkem 1, nedodává tedy žádný jalový výkon, proto bude jalový proud brán ve výpočtu jako záporný, neboť se musí odebírat

z rozvodny. Nyní je potřeba zjistit, jak velký činný proud vyvolá úbytek napětí 320,17 V, který byl způsoben navýšením napětí v místě připojení FVE o 2 %.

$$\Delta U = \sqrt{3}(R_k * l_k * I_{\check{c}} - X_k * l_k * I_j) \quad (10)$$

$$\rightarrow I_{\check{c}} = \frac{\frac{\Delta U}{\sqrt{3}} + X_k * l_k * I_j}{R_k * l_k} = \frac{\frac{320,17}{\sqrt{3}} + 0,43 * 3 * 16,43}{0,32 * 3} = 214,9 \text{ A} \quad (11)$$

Dosažený jalový proud je ten, který teče prvním úsekem z rozvodny do uzlu na 3. km. Jeho hodnota je stejná jak v situaci s FVE nebo bez FVE.

Následuje výpočet celkového činného proudu FVE, který je součtem činného proudu v situaci bez připojené FVE, tj. zátěže, a toho, který je způsoben zvýšením napětí v bodě připojení FVE o 2 %.

$$I_{\check{c} \text{ FVE}} = 49,99 + 214,9 = 264,9 \text{ A} \quad (12)$$

Posledním krokem je samotný výpočet výkonu FVE dle následujícího vztahu:

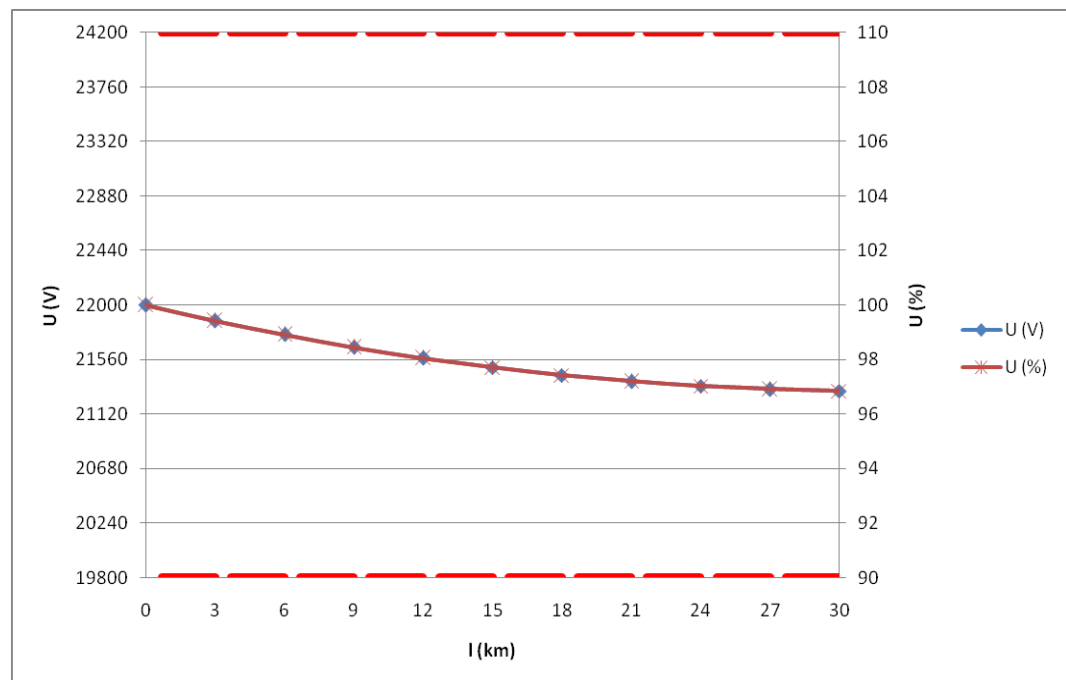
$$P_{\text{FVE}} = \sqrt{3} * U_{3\text{FVE}} * I_{\check{c}\text{FVE}} * \cos \varphi = \sqrt{3} * 23420,17 * 264,9 * 1 = 10,75 \text{ MW} \quad (13)$$

Hodnota  $U_{3\text{FVE}}$  je napětí v místě připojení FVE, tedy na 3. km síť, zvýšené o 2 % působením FVE.

## 3.2 DS bez distribuovaných zdrojů

### 3.2.1 Varianta 1 ( $U_{R22kV} = 22 \text{ kV}$ , DT vn/0,4 kV bez nastavených odboček)

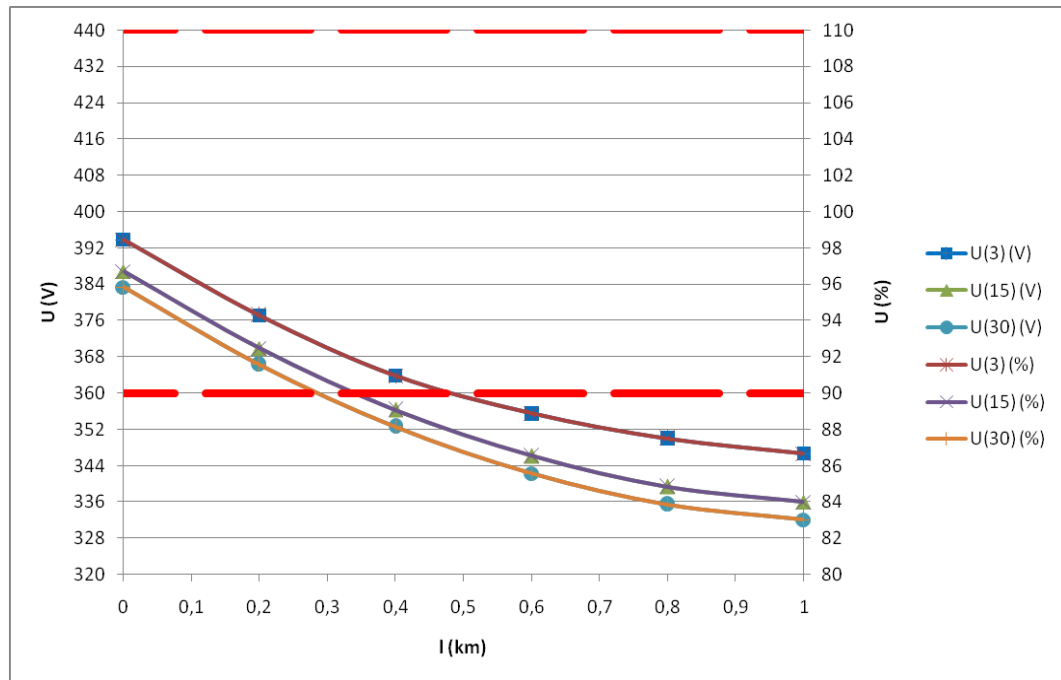
V první variantě uvažují na rozvodně napětí 22 kV, distribuční transformátory s převody vn/0,4 kV a všechny odbočky distribučních transformátorů nastavené na 0 %, tedy bez regulace.



Obr. 11: Napětový profil sítě vn ve variantě 1

Na obr. 11 vidíme napětový profil sítě vn. Po celé délce vedení se pohybujeme v pásmu dovoleného napětí ( $\pm 10\% U_n$ ), tedy nikde se nevyskytuje ani přepětí, ani podpětí.

Zcela jiná situace je k vidění na obr. 12., který nám ukazuje rozložení napětí v síti nn. Už za prvním distribučním transformátorem asi v půlce sítě nn, který se nachází nejbližší k rozvodně, je podpětí. U vzdálenějších distribučních transformátorů se vyskytuje podpětí logicky mnohem dříve. Je tedy jasné, že toto nastavení distribuční sítě je zcela nevyhovující. Zkusme tedy v další variantě nastavit odbočky na distribučních transformátorech.



Obr. 12: Napětový profil sítě nn ve variantě 1

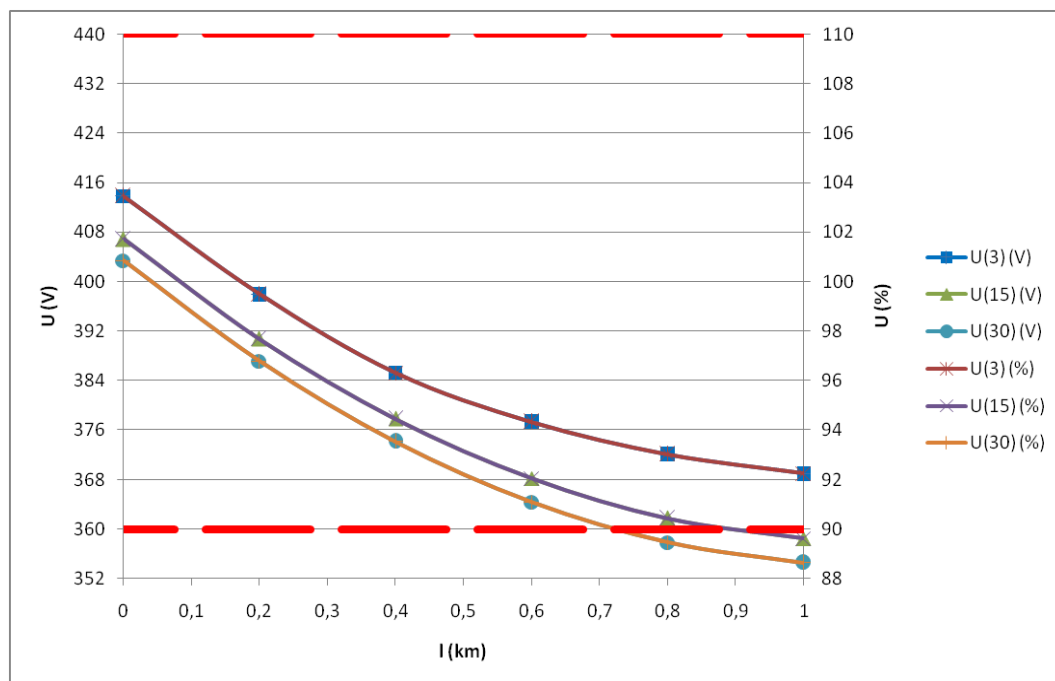
### 3.2.2 Varianta 2 ( $U_{R22kV} = 22 \text{ kV}$ , DT vn/0,4 kV s nastavenými odbočkami)

V této variantě máme napětí sekundární strany transformátoru 110 kV/vn nastaveno na 22 kV, převod distribučních transformátorů je vn/0,4 kV s nastavenými odbočkami.

Napětový profil sítě vn se v porovnání s variantou 1 nijak nezměnil, co se však změnilo je profil sítě nn, viz. obr. 13.

Zde už se povedlo dostat napětí na celém vývodu na 3. km do povolených hranic, napětí na vývodu na 15. km se tomu blíží. Zhruba poslední třetina posledního vývodu je stále v podpětí. V tomto případě jsem dokonce nastavil odbočky na všech distribučních transformátorech na -5 %, tedy nejvyšší možnou hodnotu, která se u těchto transformátorů běžně vyrábí. I tak je velice těžké vyhovět požadavkům na velikost napětí.

Je zřejmé, že ani nastavení odboček nám nijak zvlášť nepomohlo. Další možností, jak situaci vylepšit, je nastavit v rozvodně napětí 23,1 kV. Toto nastavení tedy otestujeme v další variantě.



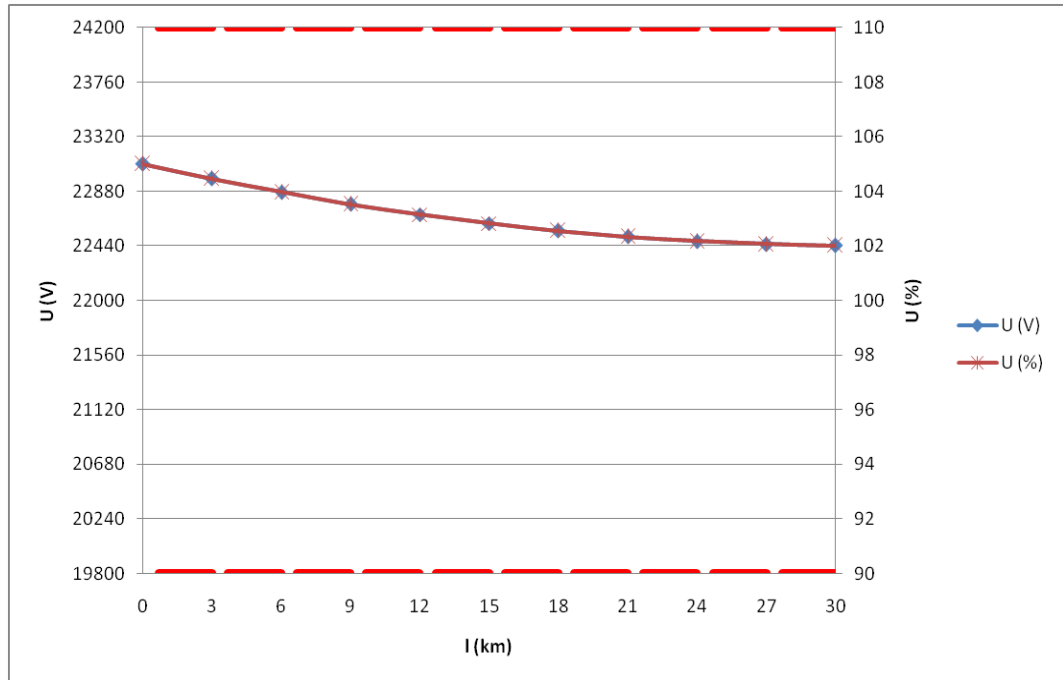
Obr. 13: Napětový profil sítě nn ve variantě 2

### 3.2.3 Varianta 3 ( $U_{R22kV} = 23,1$ kV, DT vn/0,4 kV bez nastavených odboček)

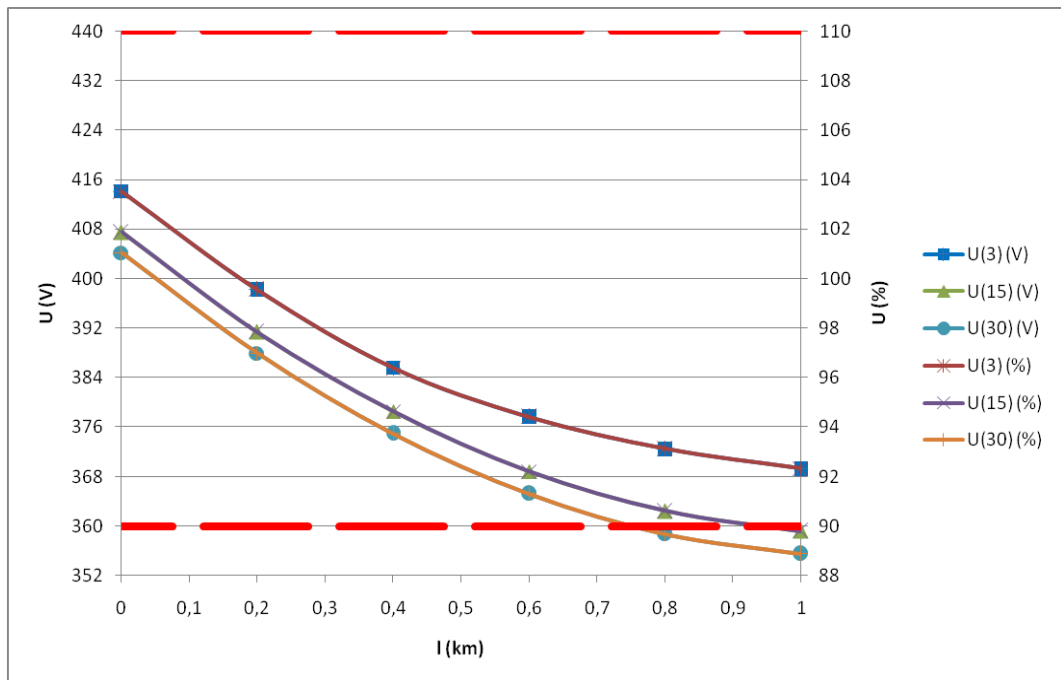
Nyní budu uvažovat napětí v rozvodně sítě vn 23,1 kV, tedy pevné napětí, které používá například společnost E.ON a odbočky distribučních transformátorů nechám nenastavené.

Obr. 14 nám demonstruje napětovou situaci v síti vn, kde se bez problémů držíme v povolených hranicích.

V síti nn je však situace jiná. Zde stále ještě nelze hovořit o uspokojivém výsledku, průběhy napětí jsou srovnatelné s předchozí variantou, je potřeba si však uvědomit, že jsme tohoto výsledku dosáhli pouhým zvýšením napětí v rozvodně a bez jakéhokoliv nastavování odboček distribučních transformátorů. Udržování napětí 23,1 kV na sekundární straně transformátoru 110 kV/ vn je tedy cesta správným směrem. Teoreticky by nyní správné nastavení odboček mělo vést na uspokojivý výsledek. Otestujme tento předpoklad v následující variantě.



Obr. 14: Napětový profil sítě vn ve variantě 3

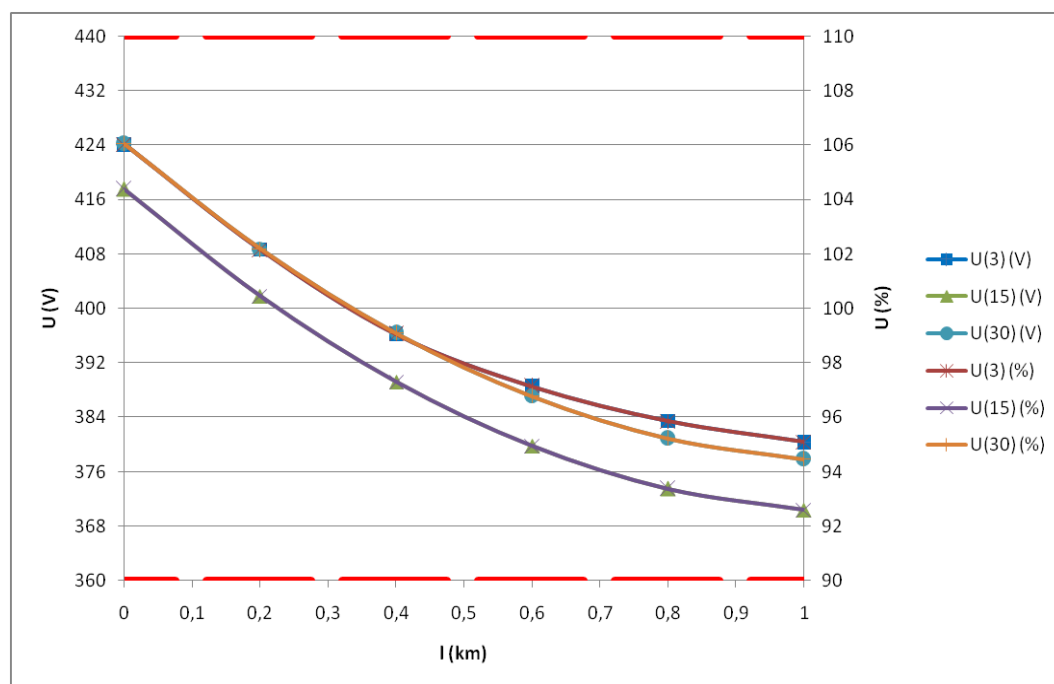


Obr. 15: Napětový profil sítě nn ve variantě 3

### 3.2.4 Varianta 4 ( $U_{R22kV} = 23,1 \text{ kV}$ , DT vn/0,4 kV s nastavenými odbočkami)

Nyní se dostáváme k variantě, kde nastavení je totožné s variantou 3 jen s tím rozdílem, že jsou nastavené odbočky na transformátorech.

Napětový profil sítě vn bude samozřejmě totožný s tím ve variantě 3, síť nn se však bude lišit, jak je vidět z obr. 16. Zde jsem tedy nastavením odboček transformátorů vn/nn docílil toho, že všechny odběry v celé síti jsou v dovoleném pásmu napětí. Počátky sítě na 3. a 30. km se pohybují kolem 106 %  $U_n$ , prostřední úsek je těsně nad 104 %. Nastavení odboček je takovéto: -2,5 %, -2,5 % a -5 %.



Obr. 16: Napětový profil sítě nn ve variantě 4

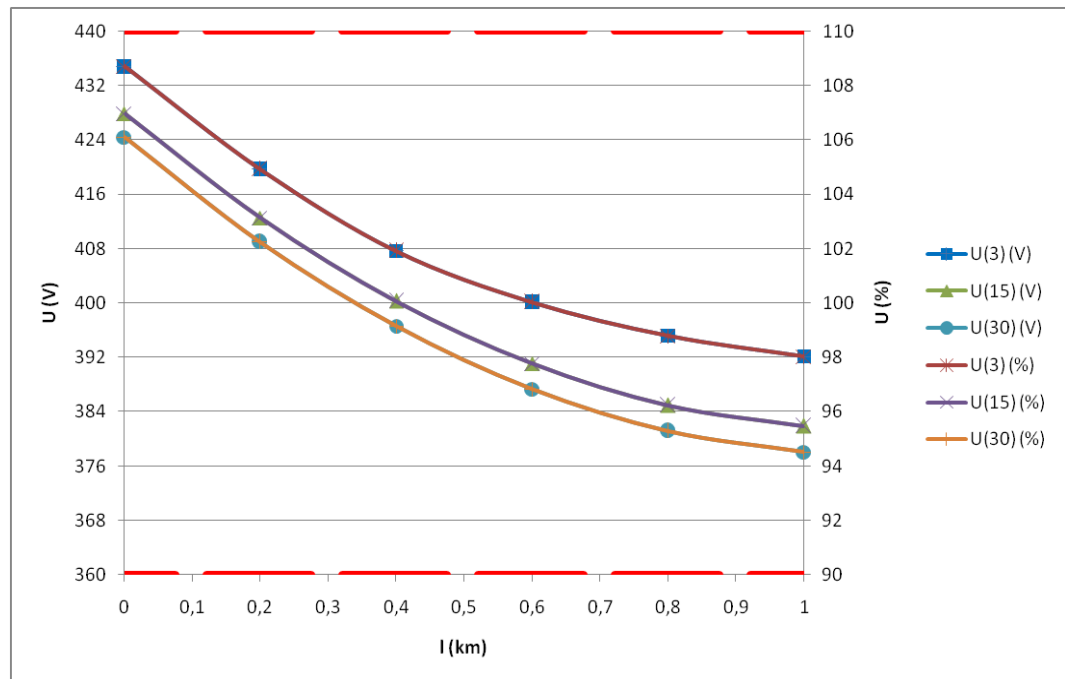
### 3.2.5 Varianta 5 ( $U_{R22kV} = 23,1 \text{ kV}$ , DT vn/0,42 kV bez nastavených odboček)

Zde bych rád nastínil, jaký vliv na síť má převod transformátoru. V této variantě je totiž použit převod distribučního transformátoru 22/0,42 kV na rozdíl od předchozích případů, kde byl převod 22/0,4 kV. Na sekundární straně transformátoru 110 kV/vn je napětí 23,1 kV a bez nastavených odboček. Profil sítě vn je opět neměnný.

Na obr. 17 je vidět, že pouhým použitím jiného převodu transformátoru jsme dostali všechny průběhy relativně blízko hranice přepětí, především průběh na 3. km.

Je evidentní, že převod transformátoru hraje významnou roli a dokáže síť ovlivnit. V další variantě bych nastavil odbočky transformátorů, protože všechny průběhy, a zejména ten vývodu na 3. km, se až nebezpečně blíží hranici 110 %  $U_n$ , tedy přepětí.

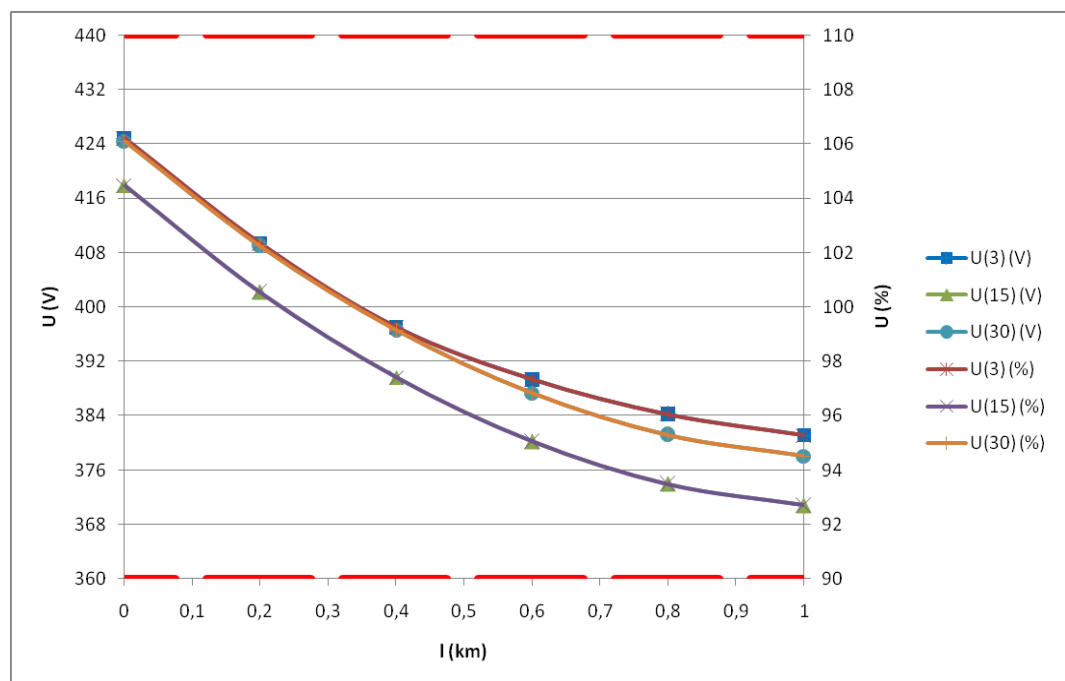




Obr. 17: Napětový profil sítě nn ve variantě 5

### 3.2.6 Varianta 6 ( $U_{R22kV} = 23,1$ kV, DT vn/0,42 kV s nastavenými odbočkami)

Varianta 6 je totožná s předchozí jen s tím rozdílem, že nastavím odbočky na distribučních transformátorech.



Obr. 18: Napětový profil sítě nn ve variantě 6

V síti vn se opět nic nemění, proto nemá cenu se jím teď zabývat. Síť nn, jak ukazuje obr. 18, je kompletně v dovoleném pásmu napětí a počátky sítí se pohybují kolem 106%  $U_n$ , což je ideální s ohledem na úbytky napětí, abychom se i na konci sítě drželi s dostatečnou rezervou nad hranicí podpětí a zároveň respektovali necitlivost regulátoru. Odbočky jsem nastavil takto: na transformátoru na 3. km jsem nastavil snižovací odbočku 2,5 %, na 15. km jsem nastavil taktéž 2,5 % a na 30. km jsem nechal 0%. Nastavení odboček lze samozřejmě zvolit i jinak, mě se tato varianta zdála nejvhodnější. V každém případě jsem dokázal to, že převod 22/0,42 kV může už sám o sobě sloužit jako jakási regulace a vhodným nastavením odboček lze docílit uspokojivých průběhů.

### 3.2.7 Shrnutí

V následujících tabulkách shrnu nejlepší možná nastavení odboček pro napětí 22 a 23,1 kV v síti bez distribuovaného zdroje s minimálním (1 MW) a maximálním (2 MW) zatížením a následně také nastavení odboček vyhovující pro obě zatížení.

Tab. 2: Nastavení odboček na distribučních transformátorech v síti bez distribuovaného zdroje s min. zatížením

U (kV)	vn/0,4 kV			vn/0,42 kV		
	3. km	15. km	30. km	3. km	15. km	30. km
22	-5%	-5%	-5%	0%	-2,5%	-2,5%
23,1	0%	-2,5%	-2,5%	5%	2,5%	2,5%

Tab. 3: Nastavení odboček na distribučních transformátorech v síti bez distribuovaného zdroje s max. zatížením

U (kV)	vn/0,4 kV			vn/0,42 kV		
	3. km	15. km	30. km	3. km	15. km	30. km
22	-5%	-5%	-5%	-2,5%	-5%	-5%
23,1	-2,5%	-5%	-5%	2,5%	2,5%	0%

Tab. 4: Nastavení odboček na distribučních transformátorech v síti bez distribuovaného zdroje pro obě zatížení

U (kV)	vn/0,4 kV			vn/0,42 kV		
	3. km	15. km	30. km	3. km	15. km	30. km
22	-5%	-5%	-5%	-2,5%	-2,5%	-5%
23,1	-2,5%	-2,5%	-5%	2,5%	2,5%	2,5%

V tabulce jsou červeně vyznačena místa s podpětím, kde jsem nepochodil ani s nejvyšší možnou zvyšovací odbočkou. Je zřejmé, že musím buď zvýšit napětí nebo změnit převod transformátoru.

Na distribučních transformátorech se nastavuje odbočka napevno a musí tedy vyhovovat jak maximálnímu, tak minimálnímu zatížení sítě, tzn. de facto jakémukoliv běžnému stavu sítě. Tomuto odpovídá tabulka č. 4. Jak je vidět, při napětí 22 kV není převod transformátoru vn/0,4 kV zcela ideální, neboť při nejvyšší možné zvyšovací odbočce nedocílím požadovaných hodnot napětí ve všech odběrných místech.

Změním-li převod transformátoru na vn/0,42 kV, zvedne se hodnota výstupního napětí o 5 % oproti předchozímu převodu, což se promítne do použití odboček, neboť v tomto případě stačí k docílení požadovaných průběhů zvyšovací odbočka -2,5 %, na konci vývodu -5 %.

Uvažujeme-li napětí v rozvodně 23,1 kV, vystačíme si bez problému i s transformátory s převodem vn/0,4 kV, stále je však zapotřebí použít zvyšovacích odboček -2,5 %, na posledním vývodu tu nejvyšší, tedy -5 %.

Při kombinaci napětí 23,1 kV a převodů vn/0,42 kV musíme použít dokonce snižovací odbočky 2,5 %, abychom zamezili přepětí.

### 3.3 DS s decentralizovanými zdroji

Decentralizované zdroje, jak bylo již výše popsáno, zvedají napětí v síti a v kritických případech může dojít až k přetoku výkonu do vyšší napěťové hladiny. V této části bude opět nasimulováno několik variant. Uvažujeme stále stejnou část distribuční soustavy jen s tím rozdílem, že na některá místa budou připojeny distribuované zdroje, v mém případě konkrétně fotovoltaická elektrárna, u které bude uvažován  $\cos\varphi = 1$  a její výkon se bude lišit v závislosti na umístění v síti a to tak, aby došlo k navýšení napětí o 2 %, což je hranice připojitelnosti zdroje v síti vn. Napětí v daném uzlu se spočte dle vztahu (5) a maximální výkon výroby dle

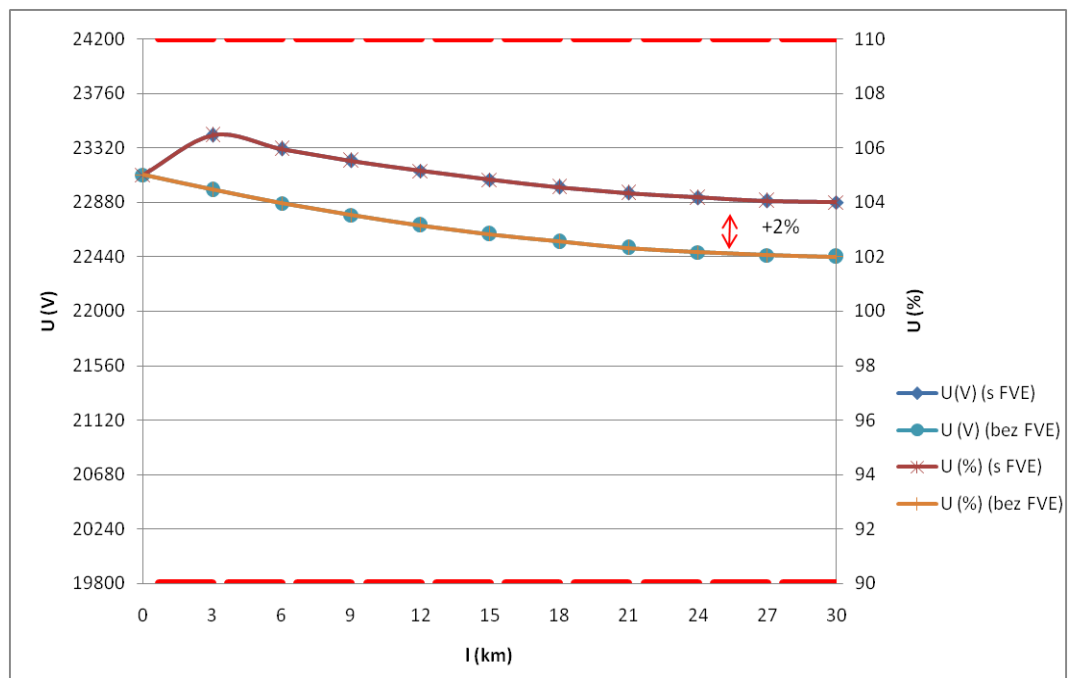
vztahu (13).

### 3.3.1 Varianta 1 ( $U_{R22kV} = 23,1$ kV, DT vn/0,42 kV, FVE na 3. km)

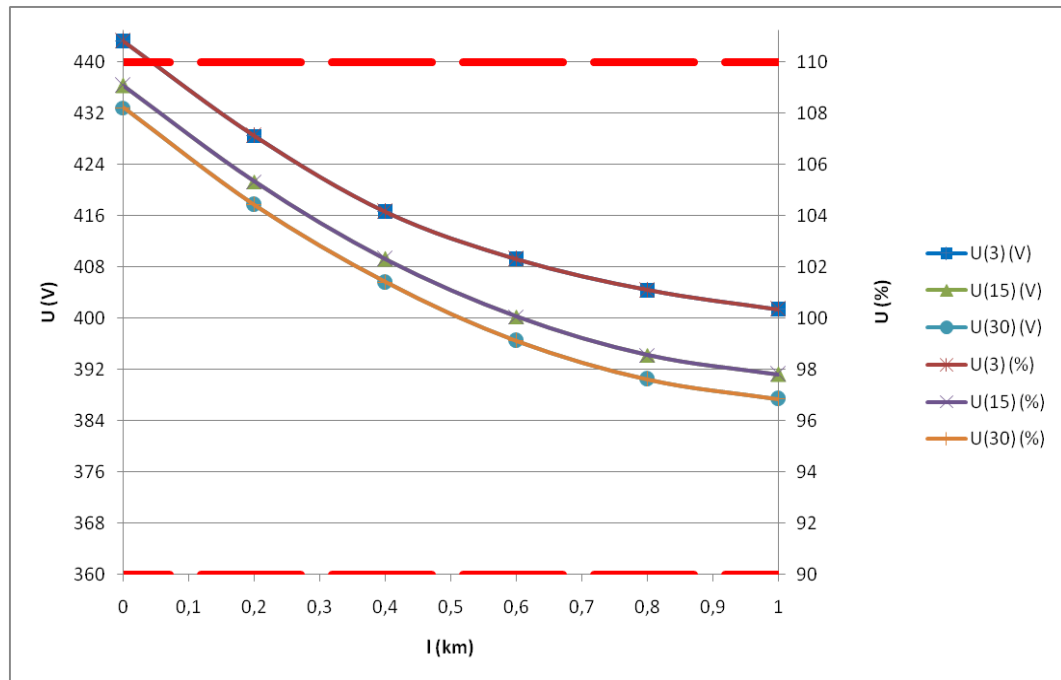
Nejprve umístíme FVE na 3. km v síti vn, tedy co nejbližší k rozvodně. Aby došlo ke zvýšení napětí v síti o 2 %, musí mít FVE výkon 10,75 MW. V rozvodně držíme napětí 23,1 kV, převod distribučních transformátorů je 22/0,42 kV a odbočky jsou nastavené na 0 %.

Obr. 19 jasně ilustruje, co se děje s napětím po připojení FVE. Na sekundární straně transformátoru 110 kV/vn je samozřejmě udržováno pevné napětí 23,1 kV, ovšem na 3. km, kde máme připojený zdroj, je napětí o 2% vyšší oproti normálu. Zbytek sítě už má klasický průběh úbytků napětí jen s tím rozdílem, že je všude o 2 % vyšší napětí v důsledku připojení FVE. Celá síť vn je v povolených hranicích napětí. V tomto případě dochází k rozevírání napětových nůžek.

Obr. 20 znázorňuje situaci v síti nn. Stojí za to si povšimnout zejména průběhu napětí na odbočce na 3. km, tedy v místě připojení FVE, kde je na začátku zcela jasné přepětí. Zbylé dva vývody rovněž atakují hranici přepětí.



Obr. 19: Napětový profil sítě vn ve variantě 1

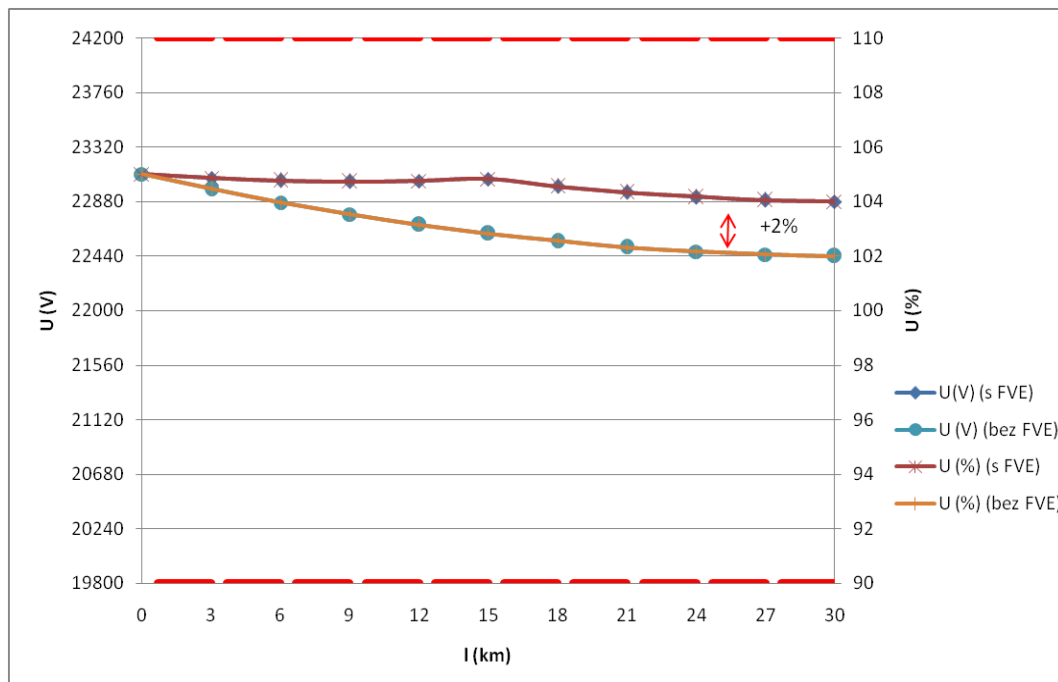


Obr. 20: Napětový profil sítě nn ve variantě 1

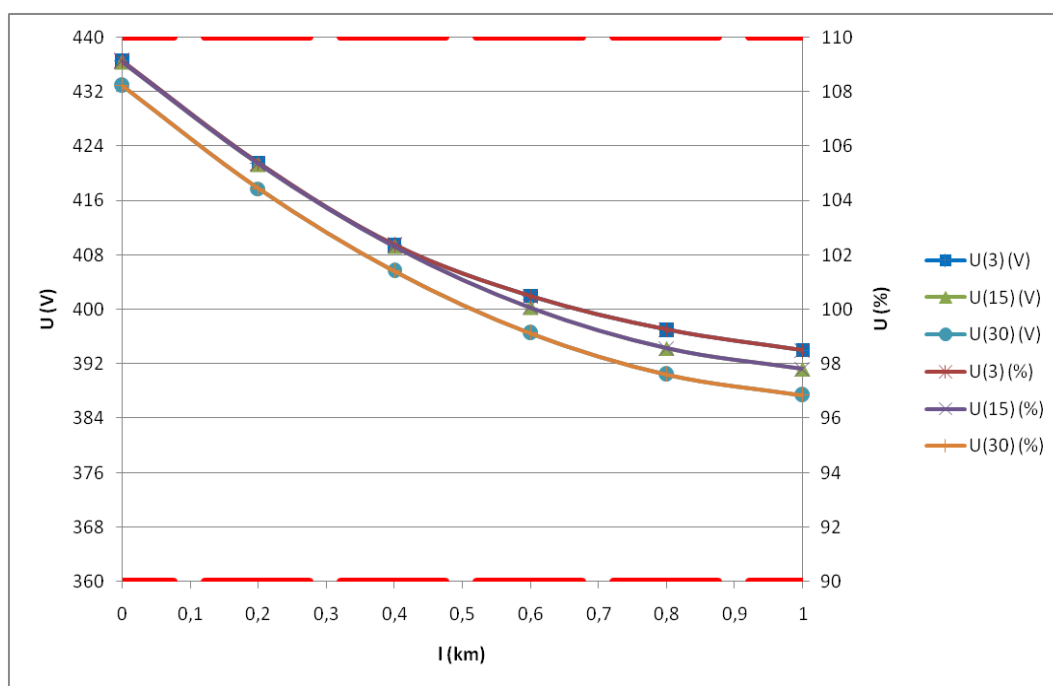
### 3.3.2 Varianta 2 ( $U_{R22kV} = 23,1$ kV, DT vn/0,42 kV, FVE na 15. km)

Zde je naprosto stejná situace s předchozí variantou pouze s tím rozdílem, že se FVE nachází na 15. km sítě vn. Výkon FVE bude v tomto případě 2 MW, což zajistí nárůst napětí o požadovaná 2 %.

Podíváme-li se na průběh napětí v síti vn do 15. km, zjistíme, že je profil napětí v podstatě vyrovnaný. Tedy oproti běžné situaci, kdy profil klesá v důsledku odběru a úbytků napětí. Od 15. km dále již tento klasický průběh k vidění je, ale opět s hodnotami napětí o 2 % vyššími oproti běžnému stavu.



Obr. 21: Napětový profil sítě vn ve variantě 2

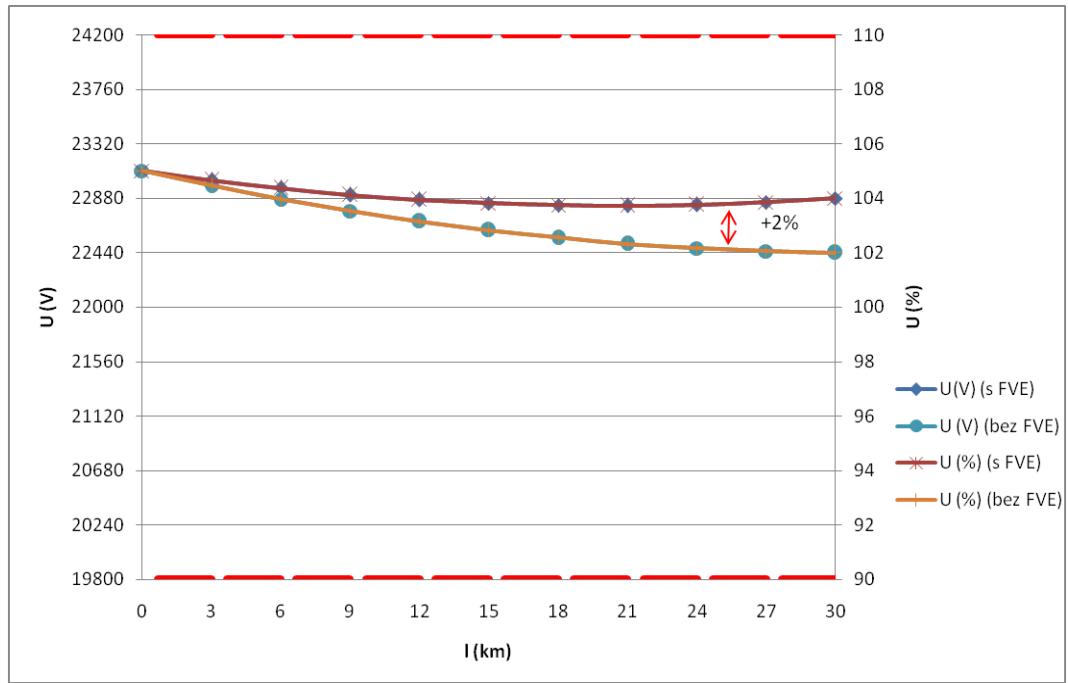


Obr. 22: Napětový profil sítě nn ve variantě 2

V síti nn je patrná změna oproti předchozí variantě v tom, že zmizelo přepětí na vývodu na 3. km. Jelikož byla FVE připojena až v polovině vedení vn, narůstalo napětí směrem od rozvodny k místu připojení postupně, 2 % přírůstek se objevil až v místě připojení a dále. Profily na 15. a 30. km se nezměnily, protože už v první variantě bylo v těchto místech v síti vn 2 % přírůstek napětí.

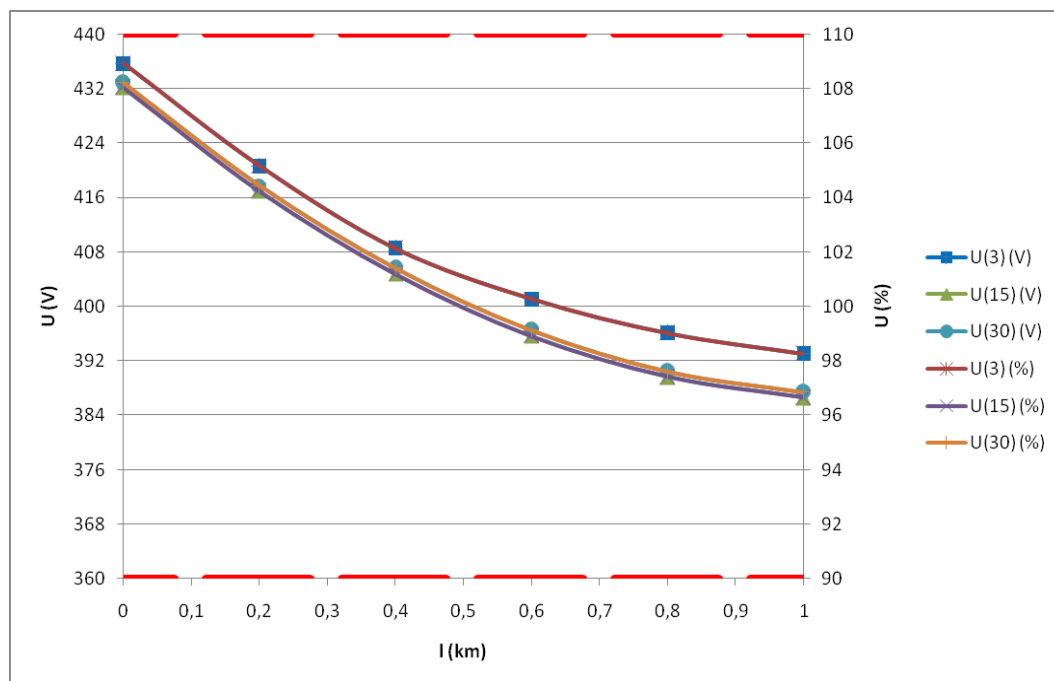
### 3.3.3 Varianta 3 ( $U_{R22kV} = 23,1$ kV, DT vn/0,42 kV, FVE na 30. km)

Nyní už zbývá pouze varianta připojení FVE na poslední vývod sítě vn, tedy na 30. km. Výkon této elektrárny je 850 kW.



Obr. 23: Napěťový profil sítě vn ve variantě 3

Zde je opět patrné narovnávání profilu sítě vn. Na 30. km je hodnota napětí zvýšena o 2 % v porovnání s případem bez připojené FVE. Zbytek sítě má postupný lineární nárůst napětí.



Obr. 24: Napětový profil sítě nn ve variantě 3

V síti nn se udála změna opět pouze na vývodech na 3. a 15. km, kde hodnoty napětí trochu klesly a to opět v důsledku postupného nárůstu napětí, kde odchylky 2 % bylo dosaženo až v místě připojení FVE.

Ze všech výše zmíněných variant, kde se uvažovala připojená FVE, vyplývá, že nejhorší variantou je připojení decentrálního zdroje v blízkosti rozvodny, neboť to způsobilo nejen nejvyšší hodnoty napětí v síti vn, ale také přepětí na nejbližším vývodu v síti nn. Ve všech ostatních variantách se hodnoty pohybovaly sice blízko hranice přepětí v síti nn, ale stále byly všechny průběhy v povolených mezích.

Z uvedeného dále vyplývá, že zdroj s nejvyšším výkonem je rozumné připojit co nejbližší k rozvodně, neboť k dosažení maximálního možného zvýšení napětí o 2 % docílíme se zhruba deseti násobně vyšším výkonem na začátku vedení než na konci.

Ve svých simulacích jsem nenastavoval odbočky na transformátorech z důvodu lepšího porovnávání výsledků. Příznivějších průběhů by se samozřejmě dosáhlo vhodným nastavením odboček.



### 3.3.4 Shrnutí

Stejně jako v kapitole 3.2.7 se pokusím i zde nastínit nejlepší možná nastavení odboček a to pro varianty v kapitolách 3.3.1, 3.3.2 a 3.3.3 pro maximální (2 MW) a minimální (1 MW) zatížení a odbočky vyhovující oběma zatížením.

Tab. 5: Nastavení odboček na distribučních transformátorech v síti s distribuovaným zdrojem s min. zatížením

varianta	vn/0,4 kV			vn/0,42 kV		
	3. km	15. km	30. km	3. km	15. km	30. km
1	0%	0%	0%	5%	5%	5%
2	0%	0%	0%	5%	5%	5%
3	0%	0%	0%	5%	5%	5%

Tab. 6: Nastavení odboček na distribučních transformátorech v síti s distribuovaným zdrojem s max. zatížením

varianta	vn/0,4 kV			vn/0,42 kV		
	3. km	15. km	30. km	3. km	15. km	30. km
1	0%	-2,5%	-2,5%	5%	2,5%	2,5%
2	-2,5%	-2,5%	-2,5%	2,5%	2,5%	2,5%
3	-2,5%	-2,5%	-2,5%	2,5%	2,5%	2,5%

Tab. 7: Nastavení odboček na distribučních transformátorech v síti s distribuovaným zdrojem pro obě zatížení

varianta	vn/0,4 kV			vn/0,42 kV		
	3. km	15. km	30. km	3. km	15. km	30. km
1	0%	0%	-2,5%	5%	5%	2,5%
2	-2,5%	-2,5%	-2,5%	2,5%	2,5%	2,5%
3	-2,5%	-2,5%	-2,5%	5%	2,5%	2,5%

Z tabulky č. 7 je možné vyčíst možná nastavení odboček, které by vyhovovalo jak pro maximální, tak pro minimální zatížení sítě.

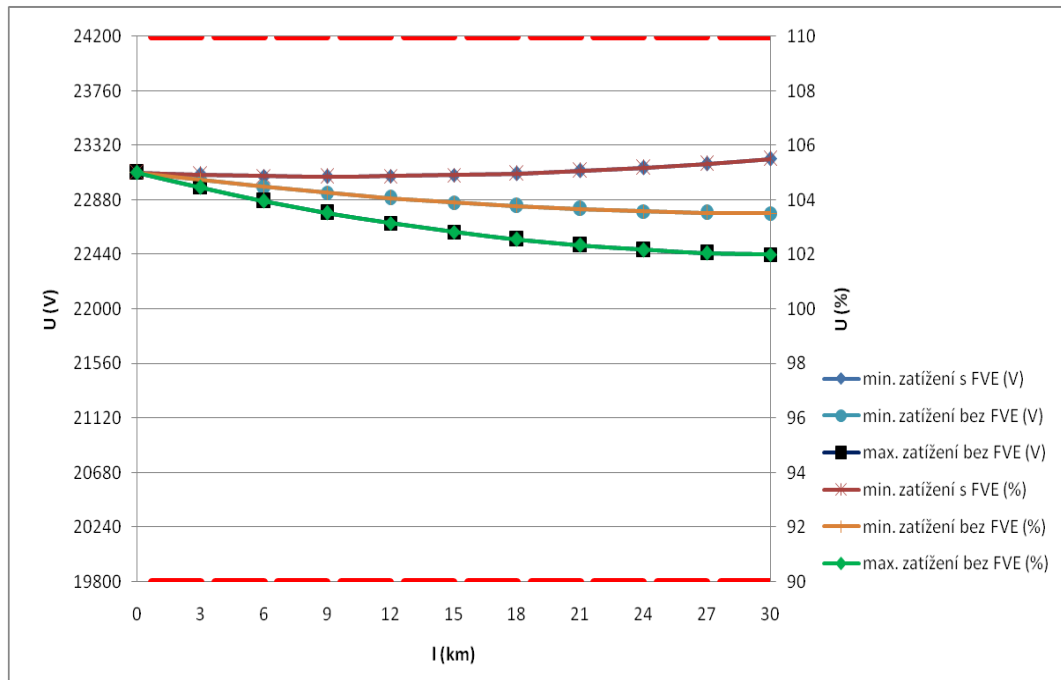
Ve variantě č. 1 je umístěna FVE na 3. km. Porovnáme-li oba převody, zjistíme, že s převodem vn/0,4 kV musíme na posledním vývodu použít dokonce zvyšovací odbočku -2,5 %, i přesto, že máme v síti vn zdroj, naproti tomu s převodem vn/0,42 kV jsou zapotřebí snižovací odbočky. Z celé tabulky je patrný vliv převodu vn/0,42 kV, neboť ve všech třech variantách jsou zapotřebí snižovací odbočky, na rozdíl od převodu vn/0,4 kV, kde jsou použity převážně zvyšovací odbočky.

### 3.3.5 Varianta 4 ( $U_{R22kV} = 23,1$ kV, DT vn/0,42 kV, FVE v síti vn na 30. km, v síti nn na konci vývodu)

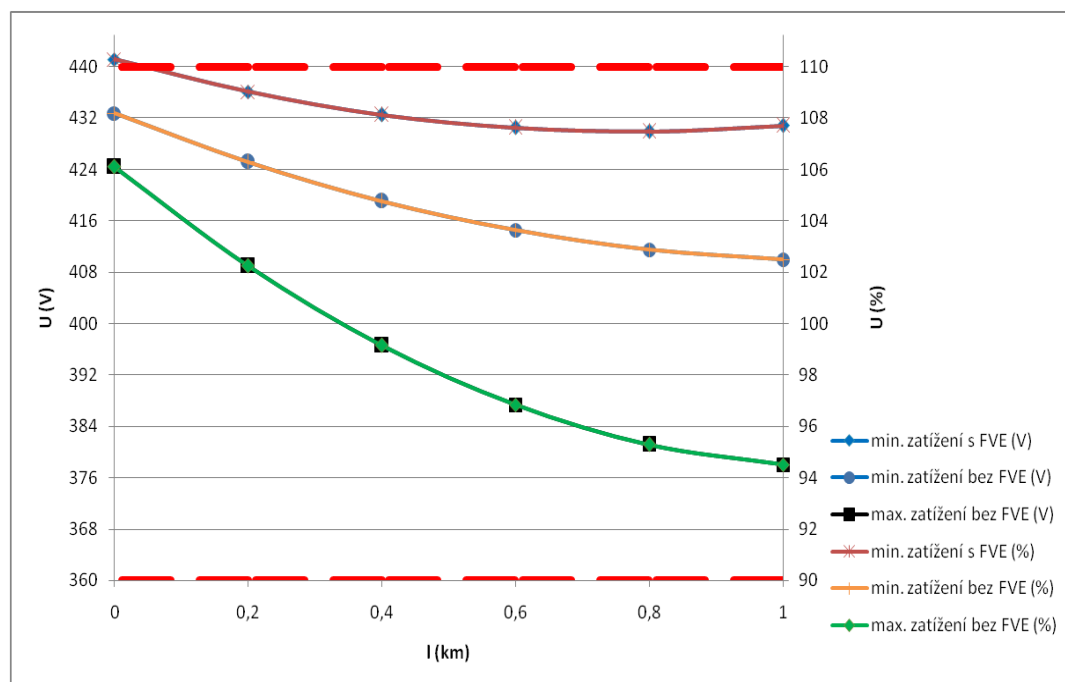
V této variantě se nachází FVE v síti vn na 30. km a zároveň v síti nn na konci vývodu. Obě dodávají do sítě maximální výkon, zvyšují tedy napětí o 2 % v síti vn a o 3 % v síti nn oproti stavu bez připojeného zdroje, nastavena je odbočka 0 %.

Na obr. 25 jsou k vidění 3 průběhy napětí. Rozdíl mezi průběhy s minimálním zatížením sítě s FVE a bez FVE jsou právě výše zmíněná 2 %, rozdíl mezi průběhy s maximálním zatížením sítě bez FVE a s minimálním zatížením sítě s FVE jsou téměř 4 %. Toto je extrémní případ a krásně ilustrované rozevření napěťových nůžek.

Na obr. 26 je znázorněna situace v síti nn, kde průběh s minimálním zatížením sítě a s připojenou FVE začíná v přepětí. Použitím snižovací odbočky 2,5 % by se dostal průběh mezi hranice povoleného napětí. Na konci vývodu je rozdíl mezi tímto profilem a profilem s minimálním zatížením bez FVE téměř 6 %. Avšak rozdíl mezi napětím na konci vývodu s připojenou FVE a profilem s maximálním zatížením bez připojené FVE je bezmála 14 %. Zde už je rozevření napěťových nůžek značné, do průběhů jednotlivých napětí se samozřejmě promítá také to, že v síti vn máme také jeden distribuovaný zdroj. Výkon potřebný k navýšení napětí o 3 % na konci vývodu vychází 67,2 kW.



Obr. 25: Napětový profil sítě vn s a bez distribuovaného zdroje



Obr. 26: Napětový profil sítě nn s a bez distribuovaného zdroje

## 4 Závěr

Problematika decentrálních zdrojů napojených do distribuční soustavy a jejich vliv na její chod je aktuální téma. Tyto zdroje se staly, a nejspíše už navždy zůstanou, nedílnou součástí systému, neboť tlak na ekologičnost a s tím spojené využívání obnovitelných zdrojů energie je stále větší. V budoucnu se téměř určitě staneme svědky toho, že instalované výkony OZE budou dalekosáhle převyšovat klasické zástupce výroben a jednou se stanou možná jedinou možnou alternativou výroby elektrické energie. Právě proto je potřeba se s nimi naučit pracovat.

V teoretické části této práce bylo snahou stručně nastínit okolnosti rozmachu zejména fotovoltaiky v České republice a její vliv nejen na síť, ale také na peněženky daňových poplatníků. Následně byly zevrubně popsány prostředky k regulaci napětí, čímž jsou zejména transformátory 110 kV/vn a distribuční transformátory vn/nn, a principy regulace, jako například přenastavení automatických regulátorů napětí u transformátorů vvn/vn nebo přenastavení odboček transformátorů vn/nn.

V praktické části byly nasimulovány na části DS její různé stavy, kdy se používaly distribuční transformátory s převody jak vn/0,4 kV, tak vn/0,42 kV, měnily se uvažované hodnoty napětí udržované v rozvodné síti vn, tedy 22 kV a 23,1 kV, uvažovala se síť bez distribuovaných zdrojů, ale i s distribuovanými zdroji, měnilo se místo jejich připojení, apod. Každá tato varianta byla něčím specifická a měla vliv na průběh napětí v síti. Tyto průběhy jsem se snažil regulovat vhodným nastavením odboček na distribučních transformátorech, což ne vždy vedlo k uspokojivým výsledkům a ke zlepšení bylo zapotřebí použít jiný způsob, např. změnit převod transformátoru. Porovnával jsem taktéž situace s nastavenými a nenastavenými odbočkami, což vedlo k lepší názornosti vlivu regulačních opatření. V praktické části jsem se zabýval v podstatě pouze regulací přenastavením odboček na DT, tedy regulací sítě nn. V síti vn jsem předpokládal bezvadnou funkci transformátoru 110 kV/vn s automatickým regulátorem napětí.

Jsem si vědom toho, že pro své výpočty a úvahy jsem v mnohém předpokládal ideální stav sítě, rovnoměrné rozložení odběrů, vykompenzovaný účinník, apod., s čímž se v praxi lze bohužel jen těžko setkat. Cílem bylo však zejména ilustrovat vlivy jednotlivých nastavení regulačních prvků, vlivy různého rozmístění lokálních zdrojů a v neposlední řadě vliv zatížení sítě na napěťový profil.

## 5 Použitá literatura

- [1] Peníze.cz. Jak to bylo a je s fotovoltaikou v Česku [online]. 2013 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.penize.cz/nakupy/275131-jak-to-bylo-a-je-s-fotovoltaikou-v-cesku>
- [2] KAŠPÍREK, M.; JIŘIČKA, J.; KOUBA, D. Hodnocení provozu OZE v distribuční síti E.ON Distribuce a.s.Sborník konference ČK CIRED Tábor 2013.
- [3] VELEK, V. Zdroje se stochastickým charakterem výroby a jejich vliv na podpůrné a systémové služby. Sborník konference ČK CIRED Tábor 2010.
- [4] VELEK, V. Zkušenosti z provozu větrného parku 21x2 MW Kryštofovy Hamry – VI. Sborník konference ČK CIRED Tábor 2013.
- [5] Tzbinfo. Tzbinfo [online]. 2007 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.tzbinfo.cz/4279-problematika-pripojovani-vetrnych-elektren-do-distribucni-site>
- [6] ČSN EN 50160. Česká technická norma: Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí. edice 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [7] TESAŘOVÁ, M. Průmyslová elektroenergetika. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 8070827033.
- [8] KOLEKTIV AUTORŮ. Regulace napětí v distribučních sítích. Brno: ČVTS Dům techniky Brno, 1974.