

Fakulta elektrotechnická  
KEE – Katedra elektroenergetiky

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti využití regulačních a kompenzačních zařízení v sítích vn

Autor práce: **Bc. Lukáš Košuta**  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2023/2024

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš KOŠUTA**  
Osobní číslo: **E21N0005K**  
Studijní program: **N0714A060017 Aplikovaná elektrotechnika**  
Téma práce: **Možnosti využití regulačních a kompenzačních zařízení v sítích vn**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky**

### Zásady pro vypracování

- Zpracujte přehled technologií a principů pro řízení toků činného a jalového výkonu v distribučních sítích vn.
- Popište standardní metody řízení napětí a proudového zatížení v distribučních sítích vn.
- Proveďte citlivostní výpočty vlivu změn výkonových toků regulačních prostředků na napěťové a proudové poměry v distribučních sítích vn.
- Vypracujte stručný návrh několika specifických technických řešení pro řízení toků činného a jalového výkonu, napětí a proudového zatížení v distribuční soustavě, zhodnoťte přínosy.

Rozsah diplomové práce: **40-60**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

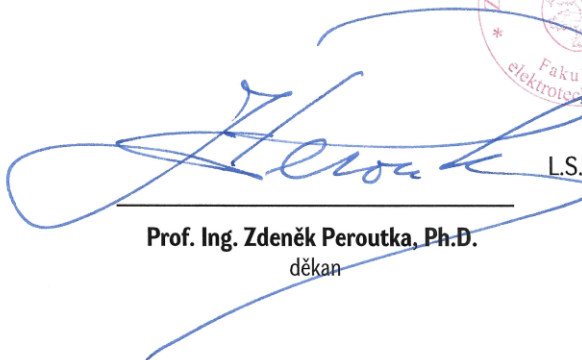
Seznam doporučené literatury:

1. Pravidla provozování distribuční soustavy (PPDS) včetně příloh, v aktuálním znění.
2. Sborníky konference ČK CIRED, z let 2015-2021.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **6. října 2023**  
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**



  
L.S.  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan

  
**Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 6. října 2023

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá využitím regulačních a kompenzačních zařízení v sítích vn pro udržení napěťové a proudové stability, efektivity a spolehlivosti. V první části se práce zabývá teoretickým rozбором problematiky týkající se kvality elektrické energie, technologických principů řízení výkonových toků a regulací činného a jalového výkonu. V další části jsou rozebrány regulační a kompenzační prostředky a popsána pravidla jejich provozování. Hlavním cílem je prověřit regulační potenciál a využití zařízení, jež využívají regulaci činného a jalového výkonu pro zlepšení napěťových a proudových poměrů v sítích vn. Dále pak prověřit potenciál různých technických řešení kompenzací, provést návrh technických řešení a určit omezení.

## **Klíčová slova**

Distribuční soustava, kvalita napětí, regulace napětí, jalový výkon, akumulace elektrické energie

## **Abstract**

The thesis deals with regulation and compensation devices in MV networks for voltage and current stability, efficiency, and reliability. Firstly, the work deals with theoretical analysis of the power quality, technological principles of power flow control, and regulation of active and reactive power. The next section analyzes the regulation and compensation devices and describes the rules of their operation. The main goal is to examine the regulation potential and the use of equipment using active power and reactive power control to improve voltage and current conditions in MW networks. The potential of different technical compensation solutions is examined, technical solutions are designed and constraints are identified.

## **Key Words**

Distribution system, voltage quality, voltage regulation, reactive power, accumulation of electrical energy

## **Prohlášení**

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

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

.....  
podpis

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady, které mi při vypracování této práce poskytovala. Dále bych rád poděkoval Ing. Janovi Švecovi, Ph.D. za konzultace. Nakonec svým blízkým za podporu během celého studia.

# Obsah

Úvod .....	- 1 -
1 Přehled technologií a principů řízení výkonových toků v sítích vn .....	- 2 -
1.1 Vliv výkonových toků P a Q na chod a provoz distribučních sítí .....	- 2 -
1.2 Technologie a prostředky pro řízení toku výkonů .....	- 6 -
1.2.1 Synchronní generátor .....	- 8 -
1.2.2 Asynchronní generátor .....	- 9 -
1.2.3 Výrobní využívající střídače .....	- 10 -
1.2.4 Kompenzační prostředky .....	- 10 -
1.2.5 Akumulační zařízení – bateriové úložiště .....	- 13 -
1.2.6 Regulační transformátory .....	- 15 -
2 Metody řízení napětí a proudového zatížení v sítích vn .....	- 16 -
2.1 Koncepce regulace U a Q v ES .....	- 16 -
2.2 Regulace U/Q a proudové zatížení v DS vn .....	- 18 -
2.3 Regulace jalového výkonu výroben .....	- 20 -
2.3.1 Regulace na konstantní hodnotu U (U/Q) na výrobnách .....	- 20 -
2.3.2 Regulace na konstantní účinník ( $\cos\varphi = \text{konst.}$ ) .....	- 21 -
2.3.3 Autonomní regulace – Q(U) .....	- 21 -
2.4 Omezení činného výkonu v závislosti na napětí P(U) .....	- 22 -
2.5 Regulace pomocí akumulčních zařízení – bateriové úložiště .....	- 23 -
3 Citlivostní analýza vlivu výkonových toků regulačních prostředků na napěťové a proudové poměry .....	- 24 -
3.1 Základní model sítě .....	- 25 -
3.2 Varianta 1 - vliv zatížení na napětí (proudové poměry) .....	- 28 -
3.3 Varianta 2 – vývod s vnořenou výrobnou (vývod A; Z <sub>1,4</sub> ; M + VM) .....	- 29 -
3.4 Regulace pomocí jalového výkonu .....	- 31 -
3.4.1 Varianta 3 - Změna připojitelnosti pomocí změny účinníku .....	- 31 -
3.4.2 Varianta 4 – Regulace napětí pomocí výrobní .....	- 34 -
3.4.3 Regulace Q na kabelovém vývodu (vývod B; Z-3,5; M + výroba U7) ..	- 43 -
4 Specifická technická řešení .....	- 48 -



4.1	Příklad 1 - varianta venkovního vývodu Kasejovice a kabelového vývodu průmyslové zóny .....	- 51 -
4.2	Příklad 2 – varianta dlouhé kabelové a krátké venkovní vedení .....	- 56 -
4.2.1	Příklad s přidáním výroben k vývodu Kasejovice 2.....	- 59 -
4.3	Návrh nasazení a nastavení regulačních prostředků.....	- 64 -
5	Závěr.....	- 69 -
	Literatura .....	- 71 -
	Seznam obrázků.....	- 73 -
	Seznam tabulek.....	- 76 -
	Příloha 1 – Venkovní vývod A .....	I
	Příloha 2 – Kabelový vývod B .....	II
	Příloha 3 – Mapa distribučního vývodu Kasejovice.....	III
	Příloha 4 – Vývod průmyslová zóna .....	IV
	Příloha 5 – Složený vývod Kasejovice a průmyslová zóna.....	V
	Příloha 6 – Složený vývod Kasejovice 2 a průmyslová zóna 2.....	VII
	Příloha 7 – Analýza na celkově regulovaném vývodu příklad 2.....	IX

## Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
<i>PS</i>	Přenosová soustava	-
<i>DS</i>	Distribuční soustava	-
<i>PPDS</i>	Pravidla provozu distribuční soustavy	-
<i>PDS</i>	Provozovatel distribuční soustavy	-
<i>vvn</i>	Velmi vysoké napětí	-
<i>vn</i>	Vysoké napětí	-
<i>nn</i>	Nízké napětí	-
<i>DECE</i>	Decentralizované výroby	-
<i>VM</i>	Výrobní modul	-
<i>ZNS</i>	Základní napájecí stav	-
<i>NNS</i>	Náhradní napájecí stav	-
<i>PWM</i>	Pulzně šířková modulace	-
<i>SVC</i>	Statický Var kompenzátor	-
<i>TSC</i>	Tyristorově spínaný kondenzátor	-
<i>TSR</i>	Tyristorově spínaná tlumivka	-
<i>TCR</i>	Tyristorově řízená tlumivka	-
<i>BESS</i>	Bateriové úložiště (Battery Energy Storage System)	-
<i>OZE</i>	Obnovitelné zdroje energie	-
<i>HRT</i>	Hladinová regulace transformátoru	-
<i>TRN</i>	Terciální regulace napětí	-
<i>ASRU</i>	Automatická sekundární regulace napětí	-
<i>HDO</i>	Hromadné dálkové ovládání	-
<i>P</i>	Činný výkon	(W)
<i>Q</i>	Jalový výkon	(VAr)
<i>S</i>	Zdánlivý výkon	(VA)
<i>R</i>	Odpor	( $\Omega$ )
<i>X</i>	Reaktance	( $\Omega$ )
<i>I</i>	Proud	(A)
<i>Z</i>	Impedance	( $\Omega$ )
<i>B</i>	Susceptance	(S)
$\cos \varphi$	Účinit	(-)
<i>Un</i>	Jmenovitá hodnota napětí	(V)
<i>PG</i>	Dodávaný činný výkon generátoru	(W)
<i>QG</i>	Dodávaný jalový výkon generátoru	(VAr)
<i>uk</i>	Napětí nakrátko	(%)
<i>io</i>	Proud naprázdno	(%)

## Úvod

Elektrická energie v distribuční soustavě musí splňovat požadavky vyplývající z definice cíle elektrizační soustavy (dále jen „ES“) na dodávku elektrické energie v požadovaném množství s ohledem na dodržení kvality, spolehlivosti, hospodárnosti a vlivu na životní prostředí. Pro dodržení podmínek je nutné síť regulovat tak, aby byly parametry sítě v předepsaných mezích a provoz byl hospodárný. Z hlediska hospodárnosti se snažíme snížit náklady na provoz, a tím pádem snížit ztráty, které vznikají v ES.

Vzhledem ke stálému vývoji elektrizační soustavy, kdy je čím dál větší tlak na ekologický provoz, dochází k útlumu výroben schopných dodávat vysoký výkon s vysokým využitím a s významným regulačním rozsahem jalového výkonu  $Q$ . Tyto výroby jsou instalovány především na hladině vvn. Naopak v posledních dvou desetiletích dochází k nárůstu instalace výroben na hladině vn a nn, mezi které patří výroby FVE, VTE a KGJ, čímž přibývají především zdroje s nízkým časovým využitím. Útlumem klasických zdrojů se synchronními generátory se výrazně sníží regulační potenciál jalového výkonu stávajících zdrojů. Potenciál regulování jalového výkonu zdrojů se střídači se zvýší, ale bohužel u zdrojů s nízkým časovým využitím. Další změnou v distribuční síti je nárůst kabelového vedení namísto venkovního vedení, čímž se mění charakter sítě.

Připojováním výroben do soustavy dochází k zvýšení napětí v místě připojení výroby. Napětí je dále ovlivněno růstem rozsahu kabelových sítí, které vede k dodávce jalového výkonu  $Q$  (kapacitního charakteru), a to může vést k přetokům jalového výkonu do přenosové soustavy. Napětí v síti ale musí zůstat v tolerančních mezích, a proto je nutné ho regulovat. Pro spolehlivý, ekonomický a bezpečný provoz je zapotřebí v soustavě zavádět nové metody řízení a strategie řízení jak u koncových výroben, tak v pilotních uzlech soustavy. Další možností je implementace nových technologických zařízení do soustavy pro zachování spolehlivosti dodávky elektrické energie.

Hlavním cílem této diplomové práce je prověřit regulační potenciál a využití zařízení využívajících regulaci  $P$  a  $Q$  pro zlepšení napěťových a proudových poměrů v sítích vn. Dále prověřit potenciál různých technických řešení kompenzací, provést návrh technických řešení a určit omezení. V práci bude vypracováno několik technických příkladů pro řízení toků výkonů, napětí a proudového zatížení pro různé typy sítí.

# 1 Přehled technologií a principů řízení výkonových toků v sítích vn

## 1.1 Vliv výkonových toků P a Q na chod a provoz distribučních sítí

Hlavním důvodem regulace v ES je udržení napětí v předepsaných mezích a frekvenční stabilita. Chod elektrizační soustavy je charakterizován základními výkonovými toky, tedy činným výkonem P a jalovým výkonem Q. Tyto toky mají klíčový vliv na chod sítě a ovlivňují následující aspekty:

- **Zatížení sítě** – Zatížení je dáno jak činným výkonem, tak i jalovým výkonem, který svou velikostí přispívá k celkovému proudu procházejícímu sítí. Změnou výkonových toků se v síti mění i velikost průchozího proudu. Prvky sítě, jako jsou vedení a transformátory, jsou dimenzovány na maximální průchozí proud, a tedy i výkon. Tím vzniká omezení výkonových toků v síti, jehož maximální hodnotu je potřeba regulovat. Výkony v síti jsou dány spotřebou/výrobou energie, kdy jejich řízením můžeme docílit požadovaného zatížení.
- **Ztráty v síti** – Ztráty v síti jsou dány výkonovými toky i parametry sítě charakterizovanými především velikostí činného odporu R a reaktance X. Jalový výkon přenášený sítí zvyšuje ztráty, a tím pádem snižuje účinnost přenosu. Činné ztráty jsou způsobeny průchodem proudu přes odpor a jsou vyjádřeny dle rovnice (1.1), tyto ztráty se také nazývají Joulovy tepelné ztráty. Jalové ztráty jsou způsobené průchodem proudu přes reaktanci a jsou vyjádřené dle rovnice (1.2).

$$\Delta P = R \cdot I^2 \quad (1.1)$$

$$\Delta Q = X \cdot I^2 \quad (1.2)$$

kde I (A) – průchozí proud

- **Napět'ové poměry** – Růstem velikosti výkonových toků roste velikost změn napětí, což se projeví na velikosti napětí, které by nemělo překročit dovolené odchylky. Tyto odchylky jsou dané normou ČSN EN 50 160. Pro síť vn musí být při týdenním měření minimálně 99 % 10minutových efektivních hodnot napájecího napětí v mezích  $\pm 10$  %. Všechny hodnoty během týdne musí být v rozmezí  $\pm 15$  %. [2]

Úbytek velikosti napětí je definován jako rozdíl velikosti napětí mezi začátkem a koncem sledovaného úseku. Na rovnici (1.3) je definován úbytek napětí v poměrné hodnotě vztažené ke jmenovitému napětí.

$$\Delta U_{\%} = \frac{|U_1| - |U_2|}{U_N} \cdot 100 = \frac{\Delta U}{U_N} \cdot 100 (\%) \quad (1.3)$$

kde  $|U_1|$  (V) - napětí na začátku větve,  $|U_2|$  (V) - napětí na konci větve

Parametry sítě se na vývodech jednotlivých napěťových hladin liší a mění se s nimi i vliv výkonových toků v daném místě. Zaleží především na parametrech odporu R a reaktance X, jejichž poměrem R/X lze stanovit citlivost výkonů P a Q v daném vývodu. Poměr R/X je ovlivněn použitým typem vedení, jeho průřezem, délkou a dále parametry transformátorů. Poměr R/X má rozhodující vliv na citlivost změny velikosti napětí při daných výkonových tocích P a Q. Hodnoty R/X se na vývodech vvn pohybují mezi 0,03 ÷ 0,2, na vývodech vn mezi 0,2 ÷ 1 a na hladině nn mezi 1 ÷ 3. Na hladině vvn, kde je poměr R/X velmi nízký, je silná vazba mezi napětím a jalovým výkonem. Na nižších napěťových hladinách roste poměr R/X a začíná zde převládat vliv činného výkonu. Citlivost na napěťové změny je na různých vývodech rozdílná a je nutné tomu přizpůsobit odpovídající způsob regulace výkonových toků.

Blíže je vliv úbytku napětí popsán na rovnici (1.4). Omezením proudu snížíme úbytek napětí a také činné ztráty v síti. Pro induktivní charakter zátěže platí kladné znaménko a pro kapacitní charakter záporné.

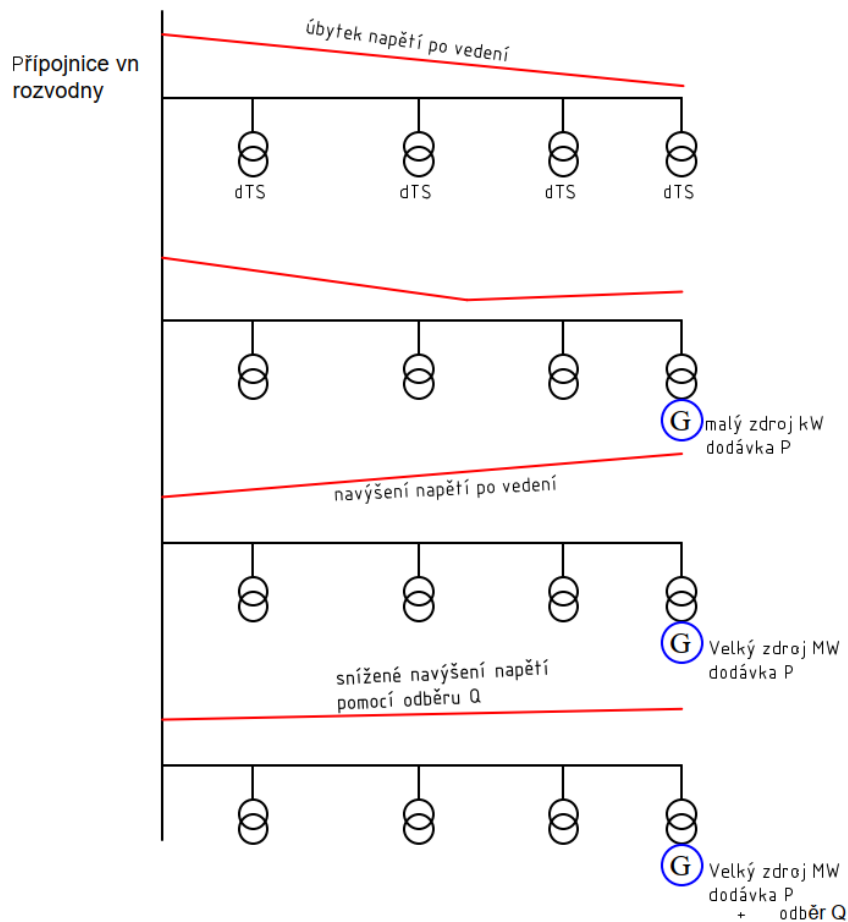
$$\Delta U_f = R \cdot I \cdot \cos\varphi \pm X \cdot I \cdot \sin\varphi = R \cdot \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U} + X \cdot \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (1.4)$$

kde P (W) – činný výkon, Q (VAr) – jalový výkon, I (A) – proud

Čím vyšší podle rovnice (1.4) bude jalový proud induktivního charakteru, tím vyšší bude úbytek napětí v síti. Z rovnice (1.4) je zřejmá závislost úbytků napětí na parametrech R, X a na výkonových tocích.

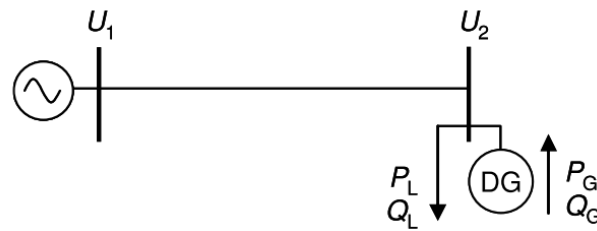
Jak se bude zvyšovat odebíraný činný výkon, bude růst úbytek napětí v místě připojení. Naopak při dodávce činného výkonu do sítě napětí v místě připojení roste. Tento vliv je ukázán na Obr. 1.1, kde je zobrazeno působení výroby umístěné na konci vedení. To má za následek změnu napětí podél vedení. Je-li na vývodu pouze odběr elektrické energie, dochází k poklesu napětí podél vývodu. S výrobou elektrické energie na konci tohoto vývodu napětí roste od místa výroby. Čím je velikost vyráběné energie výroby

větší, tím více napětí podél vývodu roste. Jak je ukázáno v poslední části Obr. 1.1, při současné dodávce P a odběru Q není nárůst napětí v místě výroby tak veliký.



Obr. 1.1: Vliv zdroje vn na napětí podél vedení [6]

Pro jalový výkon platí obdobná pravidla, ale je zde nutné navíc rozlišovat kapacitní nebo induktivní charakter výkonu. Při dodávce jalového výkonu napětí roste a při odběru jalového výkonu napětí klesá. Takto řízený jalový výkon pomocí výroby na vývodu v distribuční soustavě může přispívat k udržení velikosti napětí, jak je vidět v poslední části Obr. 1.1, na Obr. 1.2 a rovnici (1.5).



Obr. 1.2: Podpora napětí regulací výroben [1]

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \frac{R(P_L - P_G) + X(Q_L \mp Q_G)}{U_2} \quad (1.5)$$

kde  $P_L$  (W) – odebíraný činný výkon,  $Q_L$  (VAr) – odebíraný jalový výkon,  $P_G$  (W) – dodávaný činný výkon a  $Q_G$  (VAr) – dodávaný jalový výkon, znaménko + před  $Q_G$  značí odebíraný jalový výkon, znaménko – značí dodávaný jalový výkon

Za normálního stavu (stavu v základním zapojení – ZNS) i náhradního napájecího stavu (NNS) platí pro připojení výrobní podmínky maximálního zvýšení napětí, které je porovnáno s napětím bez připojené výrobní. V ZNS pro výrobní v síti vn nesmí být překročen limit navýšení napětí o 2 %, tedy:

$$\Delta U_{vn} \leq 2\% \quad (1.6)$$

V NNS pro všechny výrobní platí, že nesmí být překročen limit navýšení napětí o 5 %.

$$\Delta U_{NNS} \leq 5\% \quad (1.7)$$

Při posuzování připojitelnosti výroben se vychází z podmínky dodržení účinníku v předávacím místě  $\cos \varphi = 1$ . Provozovatel distribuční soustavy s ohledem na místní podmínky může stanovit jinou hodnotu účinníku. [3]

Vzhledem k čímu dále většímu nárůstu připojování DECE na hladinách vn a nn bude docházet k omezení připojitelného výkonu, který je dán především napěťovými podmínkami. Způsob, jak omezit navýšení napětí při připojování výroben, je vhodná regulace jalového výkonu.

Podle rovnice (1.8) je porovnávána změna napětí  $\Delta U_{PQ}$  způsobená dodáním činným a příslušným jalovým výkonem výrobní oproti změně napětí  $\Delta U_P$  při dodávce pouze činného výkonu. Jelikož je snaha napětí v místě připojení snížit, analyzujeme pouze induktivní jalový výkon. [5, 6]

$$\frac{\Delta U_{PQ}}{\Delta U_P} \approx \frac{R \cdot P - X \cdot Q}{R \cdot P} = 1 - \frac{X \cdot Q}{R \cdot P} \quad (1.8)$$

$\Delta U_{PQ}$  – změna napětí při daném účinníku ( $\cos \varphi \neq 1$ ),  $\Delta U_P$  – změna napětí při  $\cos \varphi = 1$

Převrácenou hodnotou poměru  $\Delta U_{PQ}/\Delta U_P$  lze zjistit, kolikrát lze změnou účinníku zvýšit připojitelnost výroben při limitu napěťové změny  $\Delta U$ , viz rovnice (1.9).

$$K_{přip} = \left( \frac{\Delta U_P}{\Delta U_{PQ}} \right) \quad (1.9)$$

Navýšení připojitelného výkonu nastane pro výrobnu, je-li poměr  $\Delta U_{PQ}/\Delta U_P$  v rozsahu od +1 do -1. Záporná hodnota pouze značí snížení napětí v místě připojení a při hodnotě 0 dokáže výrobnu plně kompenzovat navýšení napětí pomocí jalového výkonu. Čím bude poměr  $R/X$  nižší, tím je nárůst připojitelného výkonu při řízené dodávce jalového výkonu větší oproti dodávce pouze činného výkonu, ale i to má však své omezení. Je-li hodnota poměru  $\Delta U_{PQ}/\Delta U_P$  menší než -1 (nastává pro velmi nízký poměr  $R/X$ ), dochází při nevhodně vysokém jalovém výkonu ke snížení připojitelného činného výkonu. [5]

Vzhledem k faktu, že v DS jsou převážně výrobní z obnovitelných zdrojů a ve vlastnictví soukromých subjektů, je nežádoucí za normálního provozu omezovat činný výkon výroben z důvodu řízení velikosti napětí. Provozovatel distribuční soustavy má právo omezit výstupní výkon výroben v případě, kdy bude hrozit přetížení distribuční soustavy. Pro nově připojované výrobní vzniká možnost připojení v režimu tzv. negarantovaného výkonu výrobní. To provozovateli DS umožní omezit výkon výrobní bez kompenzace a náhrady za omezení. Díky tomu bude možné k distribuční soustavě připojit více výroben. [19]

U spotřeby nastává podobná situace, kdy není legislativně jednoduché omezit odebíraný výkon. Částečné řešení této problematiky je rozvoj technologie akumulace elektrické energie. Za normálního stavu je při vyšší výrobě v síti možné akumulovat elektrickou energii, a naopak při vyšší spotřebě podpořit spotřebu odběrem energie z akumulačního zařízení.

## 1.2 Technologie a prostředky pro řízení toku výkonů

Jak již bylo teoreticky popsáno, výkonovými toky je měněna velikost napětí na daném vývodu, které musí zůstat ve stanovených mezích. Pro tyto účely distribuční soustava disponuje řadou prostředků ovlivňujících napěťové poměry. Lze je rozdělit na prostředky na



straně výroby, na straně spotřeby a zařízení přímo s regulačním charakterem, jako jsou regulační transformátory, kompenzační a akumulační zařízení.

### **Výrobní zařízení**

Výrobnou elektřiny se rozumí zařízení, které převádí primární zdroj energie na energii elektrickou a sestává se z jednoho nebo více výrobních modulů (VM). Výroba dle PPDS je rozdělena na výrobní moduly (VM) synchronní a nesynchronní. Synchronní VM označuje nedělitelný soubor zařízení, který je schopen vyrábět elektrickou energii tak, že frekvence vyrobeného napětí, rychlost generátoru a frekvence sítě jsou ve stálém poměru, tedy v synchronismu. To splňují pouze synchronní generátory. Nesynchronní VM označuje výrobní jednotku nebo soubor výrobních jednotek, který je k soustavě připojen nesynchronně nebo prostřednictvím výkonové elektroniky a který je DS připojen v jediném místě. To splňují asynchronní generátory nebo střídače. [7]

U decentralizovaných výroben (DECE) za normálního stavu nelze omezovat výrobu elektrické energie, a proto je pro řízení velikosti napětí využívána především regulace pomocí jalového výkonu. To je dáno i tím, že na hladině vn je většina výroben z obnovitelných zdrojů, kde je přirozeně provozovatel motivován k maximalizaci výroby silové elektřiny. [1]

### **Strana spotřeby**

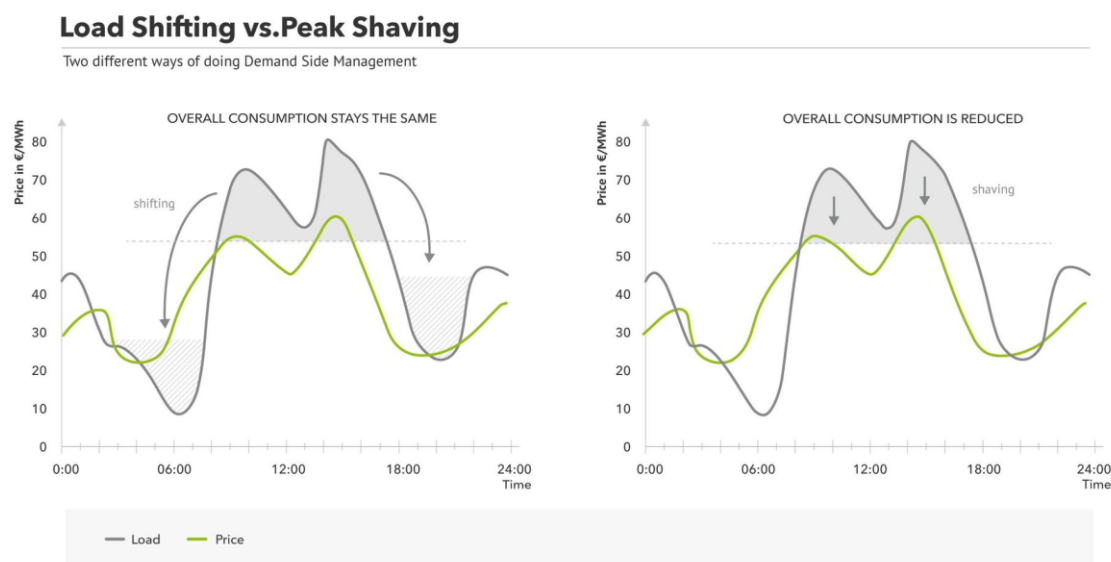
Pro provozovatele distribuční soustavy jsou velké špičky zatížení přítěží, protože působí na stabilitu soustavy a ta na ně musí být připravena (proudová a napěťová omezení). Toto špičkové zatížení je zapříčiněno například zapínáním a zvyšováním výrobních procesů. Z těchto důvodů je snaha spotřebu elektrické energie regulovat, k čemuž slouží tyto prostředky:

- Chytré spotřebiče – jejich spotřeba je řízena podle aktuálního přebytku energie
- Akumulační zařízení – rozebráno níže
- Odběr většího množství elektrické energie ve vyhrazených časech

**Hromadné dálkové ovládání (HDO)** – signálem HDO je umožněno přizpůsobení odběru energie spotřebičů (bojlery, akumulační kamna, tepelná čerpadla, vytápění...) možnostem ES. Signál funguje pro přepnutí na měření v jiném tarifu, kdy spínání nízkého tarifu připíná spotřebiče v době nízkého zatížení. Funguje také jako signál pro informační, svolávací a varovné účely. Jedná se o jednosměrný přenos, ve kterém není signalizace, zda

je povel opravdu proveden. Postupně bude nahrazován systémem AMM (Advanced Meter Management). [1]

**DSR (Demand Side Response)** – změna spotřeby v aktuálním čase. V současné době je možnost ovlivňovat velikost spotřeby podle požadavku provozovatele soustavy spíše teoretická. Pro její použití je nutné znát aktuální spotřebu a možnosti snížení elektrické energie. Rozdílem oproti HDO je odměňování zákazníků za změnu spotřeby, kdy má primárně řízení na starosti sám zákazník. Pro snížení výkonu v době vysokého odběru spotřebitel rychle a na krátkou dobu sníží svou spotřebu energie ze sítě tzv. peak shaving nebo svou spotřebu odloží na dobu, kdy síť nebude tolik zatížená tzv. load shifting, viz Obr. 1.3. [15]



Obr. 1.3: DRS – Load shifting vs. Peak shaving [15]

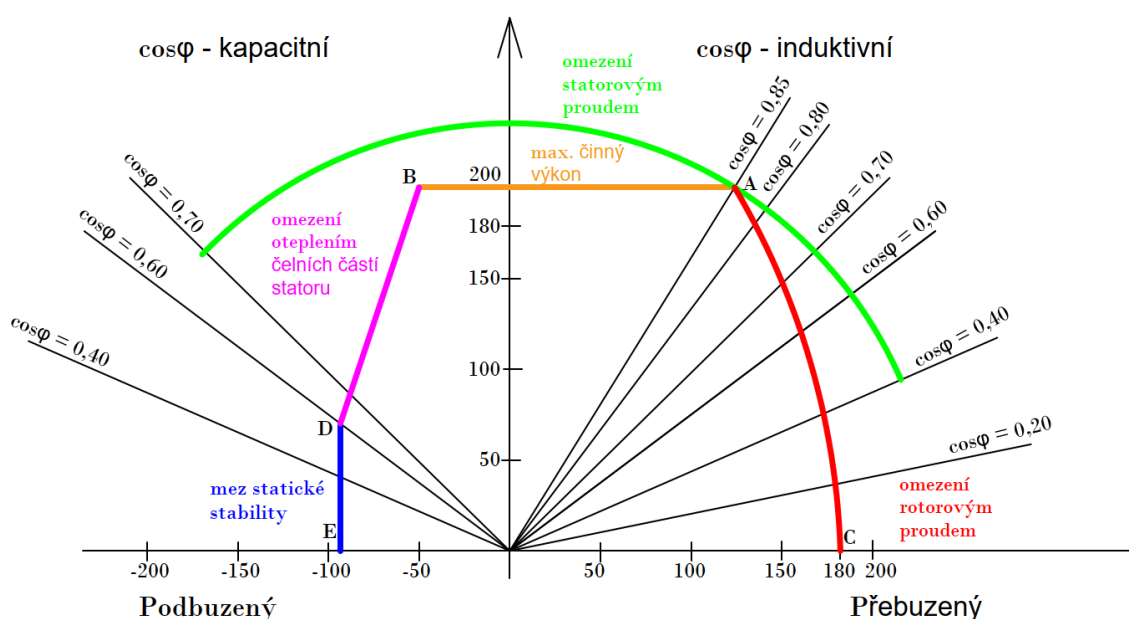
### 1.2.1 Synchronní generátor

Mezi výrobní se synchronním generátorem se řadí výrobní parní, vodní, plynové, kogenerační, bioplynové a větrné elektrárny se synchronními generátory bez výkonové elektroniky na výstupu. Na výrobních elektrické energie se synchronními generátory řídíme jalový výkon v kapacitní i induktivní oblasti. Řízení je realizováno pomocí buzení generátoru, kdy v podbuzeném stavu je do sítě dodáván induktivní výkon a v přebuzeném stavu naopak kapacitní výkon. Dodávku jalového výkonu generátorem lze dnes řídit velmi přesně a u moderních strojů nejsou zaznamenány vyšší opotřebení způsobené častou změnou velikosti dodávaného jalového výkonu. Synchronní generátor při regulaci jalového výkonu

má činné ztráty, ale tyto ztráty jsou jen málo odlišné od běžných ztrát bez regulace, tudíž regulací nevznikají téměř žádné dodatečné provozní náklady.[8]

Regulací se pohybujeme v pracovní oblasti generátoru podle PQ diagramu. Generátor má svá omezení. V přebuzeném stavu je stroj limitován teplotou statorového vinutí (maximálním statorový proud) a limitem teploty rotorového vinutí (maximální budící proud). V podbuzeném stavu je omezen taktéž maximální statorový proud, dalším omezením je teplota čel statorových vinutí a zejména pak mez statické stability stroje. [8]

Z provozního diagramu generátoru na Obr. 1.4 lze pozorovat, že disponibilní rezerva jalového výkonu klesá s růstem výkonu činného.



Obr. 1.4: Provozní diagram synchronního generátoru [8]

V legislativních materiálech soustavy ENTSO-E je dán nutný rozsah účinníku pro generátory v rozmezí  $\cos\varphi_{\text{ind}} = 0,85$  (přebuzený stav) a  $\cos\varphi_{\text{kap}} = 0,95$  (podbuzený stav). [8]

### 1.2.2 Asynchronní generátor

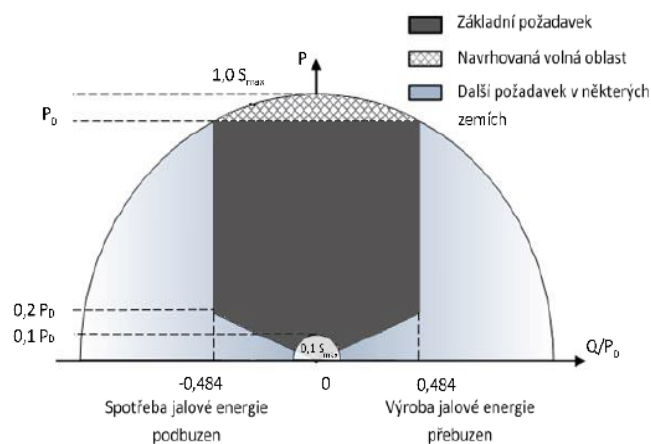
Asynchronní stroje mohou být zapojeny pro větrné nebo malé vodní elektrárny a dále pro kogenerační a bioplynové stanice. Pro možnost měnit regulací velikost jalového výkonu je nutné uspořádání asynchronního generátoru s vinutou kotvou, jehož rotorové vinutí je napájeno z frekvenčního měniče, nazývaného dvojité napájený asynchronní generátor, anglicky pak „Double-Fed Induction Generator“. Tento generátor je bez kondenzátorových baterií, protože frekvenční měnič je schopen dodat potřebný jalový výkon nejen pro činnost

vlastního generátoru, ale částečně i pro potřeby sítě. Výhodou je schopnost pracovat v širokém rozsahu otáček. [9]

### 1.2.3 Výrobní využívající střídače

Střídače jsou využívány především pro fotovoltaické elektrárny, popřípadě pro akumulační zařízení. Střídač mění stejnosměrné napětí pomocí PWM modulace na střídavé sinusové napětí s frekvencí stejnou, jako je v síti. Regulace na nesynchronních VM je závislá na schopnostech střídače měnit charakter dodávaného výkonu.

Střídače pro solární panely byly dříve používány pouze pro dodávku činného výkonu. Nyní jsou již nasazovány střídače s řízením jalového výkonu podporujícího velikost napětí v místě připojení. Teoreticky lze střídače provozovat s účinnkem  $\cos \varphi$  od 0 do 1. Jejich omezení účinníku je tak spíše dáno legislativně, kdy je dán rozsah, ve kterém musí být schopný pracovat. Dle diagramu na Obr. 1.5 je patrné, že se zvyšujícím se jalovým výkonem klesá velikost maximálního dodávaného činného výkonu. Střídače mohou být navrženy tak, že maximálního činného výkonu je dosaženo i při určitém dodávaném jalovém výkonu. Střídačem lze pomocí regulace jalového výkonu měnit velikost napětí v připojovacím bodě. Pro zvýšení napětí je účinník v kapacitní části a pro snížení v induktivní části. [14]



Obr. 1.5: Dodávka/odběr Q při jmenovitém napětí a nižší než maximální dodávce P pro nesynchronní VM [3]

### 1.2.4 Kompenzační prostředky

Paralelní připojení kompenzačních zařízení k distribuční síti umožní dodávat jalový výkon do sítě pomocí kondenzátorů nebo naopak pomocí tlumivek jalový výkon odebírat. Změnou výkonových toků Q je ovlivněna velikost napětí v místě připojení. Tato zařízení jsou do sítě připojena pomocí spínacích prvků bez regulace, anebo jako kompenzátory, u kterých je možná regulace velikosti jalového výkonu.

Kompenzací lze dosáhnout:

- Lepšího využití rozvodných zařízení, snížení přenosových ztrát na vedení a transformátorech z důvodu nižšího průchozího proudu
- Zvýšení kvality dodávky pro citlivé odběry, zlepšení napěťových poměrů
- Zvýšení spolehlivosti a dostupnosti přenosové soustavy
- Zvýšení dynamické stability soustavy a omezení kruhových toků
- Ekologických přínosů

Řízení kompenzace lze provést od jednoduchého spínání pasivních prvků až po řízení moderní výkonovou elektronikou.

### **Kompenzátory se stupňovitou regulací**

BSC (breaker switched capacitor), BSR (breaker switched reactor) jsou řízeny pomocí regulátoru, který spíná jednotlivé kompenzační stupně podle jejich velikosti tak, aby byl výsledný jalový výkon na požadované hodnotě. Spínání může být kontaktní pomocí stykačů, nebo bezkontaktní pomocí polovodivých spínačů. Vzhledem k jejich stupňovité regulaci je jejich regulační možnost omezená. [11]

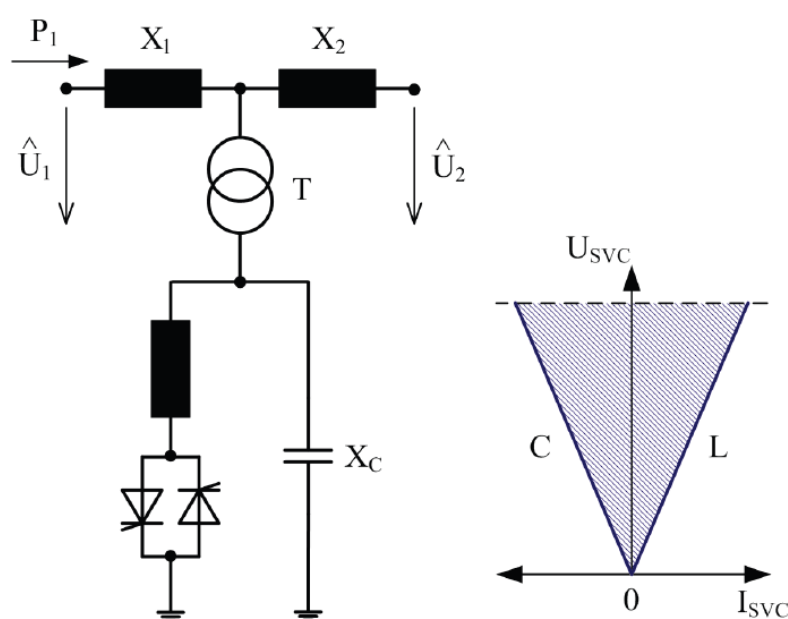
### **Kompenzace s plynulou regulací**

Plynulé řízení jalového procházejícího proudu lze uskutečnit řízením proudu procházejícího dekompenzační tlumivkou. Pomocí fázově řízených antiparalelně zapojených tyristorových spínačů získáme plynulou regulaci jalového výkonu. Chceme-li řídit kapacitní proud, je nutné k řízenému dekompenzačnímu členu paralelně připojit kondenzátorovou baterii. Mezi představitele patří níže popsany SVC a STATCOM. [10]

### **SVC – Statický Var kompenzátor**

SVC je kombinace pevných kondenzátorů – BSC, tyristorově spínaných kondenzátorů – TSC, tyristorově spínaných tlumivek – TSR a tyristorově řízených tlumivek – TCR, které jsou připojeny paralelně k síti většinou přes zvyšovací transformátor. Tyristorově řízená tlumivka je zapojena do série s fázově řízenými antiparalelně zapojenými tyristorovými spínači, jejichž řízením měníme proud procházející tlumivkou. Rozdílem mezi TSR a TCR je, že TSR není regulována plynule, ale je spínána po celých násobcích půlperiod. Pozitivem pro spínané tlumivky TSR je, že neprodukují na rozdíl od řízených tlumivek vyšší harmonické. U TSC je v sérii s tyristory a kondenzátorem ještě přidána tlumivka pro omezení proudu. SVC v dnešní době nahrazují synchronní kompenzátory. [11]

Jalový výkon dodávaný nebo odebraný SVC je absorbován nebo vyráběn pasívními reaktančními prvky. Řídícím parametrem je kapacitní reaktance, kterou lze plynule měnit. Pracovní rozsah SVC je určen impedancemi tlumivek a kondenzátorů. Vzhledem k oběma charakterům impedance obsahuje SVC obě polarity kompenzačního jalového proudu. Rozsah V-A charakteristiky je dán pracovní oblastí SVC, kdy je zřejmé, že pro nízká napětí je pracovní bod charakteristiky čistě kapacitní, a naopak pro vysoká napětí induktivní. Maximální kompenzační proud je tedy přímo úměrný napětí sítě a dodávaný, resp. absorbovaný jalový výkon je úměrný kvadrátu napětí. V-A pracovní oblast a schéma je na Obr. 1.6. [11]



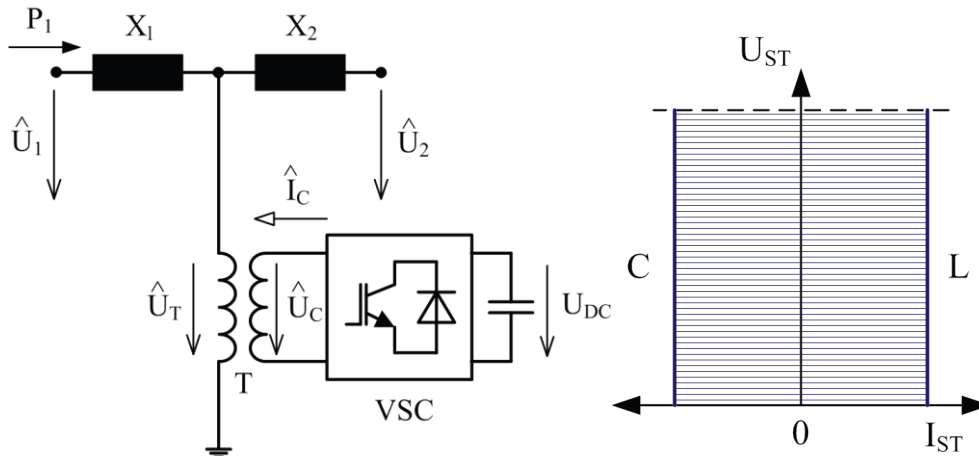
Obr. 1.6 SVC a jeho V-A pracovní oblast [11]

Zařízení SVC bývá instalováno ve významných centrech spotřeby, kde tlumí rušivé vlivy sítě na citlivé odběry, kompenzuje výkyvy napětí způsobené vlivem poruchy v síti nebo proměnlivého zatížení. Dále se používá v místech velké napěťové citlivosti nebo v místech připojení velkých průmyslových závodů, ve kterých slouží k omezení rušivých vlivů provozem výroby na okolní spotřebu.

## STATCOM

Statický synchronní kompenzátor (Static Synchronous Compensator = STATCOM) pro svoji funkci využívá trojfázový měnič, vazební transformátor a stejnosměrnou část obvodu. Regulace jalového výkonu je zde uskutečněna pomocí vlastního měniče, jenž svým spínacím režimem řídí velikost dodávaného výkonu  $Q$ . Reaktanční prvek ve stejnosměrném

obvodu slouží pouze k akumulaci energie při spínání. STATCOM dokáže dodávat jalový výkon v celém regulačním rozsahu a je pouze omezen maximálním dovoleným proudem a napětím. Základní zapojení je na Obr. 1.7, kde je znázorněna i V-A pracovní oblast. STATCOM oproti SVC nevyžaduje velké indukční nebo kapacitní prvky pro dodávku jalového výkonu, z čehož vyplývají menší nároky na prostor umístění zařízení. [11]



Obr. 1.7: STATCOM a jeho V-A pracovní oblast [11]

### 1.2.5 Akumulační zařízení – bateriové úložiště

Skladování elektrické energie je proces ukládání jedné formy energie (většinou elektrické) do formy energie vhodné pro uskladnění a uchování až do doby potřeby elektrické energie. V té době probíhá zpětná konverze energie na energii elektrickou. Využití akumulačních zařízení jsou: [12]

- Regulace frekvence
- Vyrovnání elektrických peaků (špiček), to platí jak pro spotřebu, tak výrobu, kde díky akumulaci není překročen maximální dodávaný výkon
- Zajištění časově proměnného zatížení (Load shifting, Peak Shaving)
- Zmírnění přerušované výroby obnovitelných zdrojů
- Zlepšení elektrické kvality/spolehlivosti
- Pomoc s distribuováním záložní energie
- Snižování dovozu elektrické energie v době odběrových špiček
- Start ze tmy
- Záložní systémy

Bateriová úložiště BESS (Battery Energy Storage System) pro distribuční soustavu dosahují velikosti jednotek MVA a v blízké budoucnosti se plánují úložiště s velikostí nízkých desítek MVA. Regulace pomocí akumulačního zařízení je omezená výkonově, kdy

záleží na maximálním výkonu střídače, baterií atd. Dalším omezením je maximální možná velikost bateriového úložiště, a tudíž i maximální využitelná doba. Bateriové úložiště používají pro přeměnu elektrické energie střídač, čímž je jejich činný i jalový výkon velmi dobře regulovatelný. Pro podporu DS mají uplatnění především k vykrývání výkonových špiček nebo pro maximalizaci využití OZE.

Vzhledem k faktu, že v bateriových úložištích dochází k samovybíjení, nejsou vhodné pro dlouhodobé uchování energie. Umístění BESS je flexibilní, může být uvnitř budovy nebo venku blízko místa využití. Při návrhu je potřeba zohlednit hloubku vybití a stárnutí akumulátoru. Na Obr. 1.8 je kontejnerové provedení BESS od českého výrobce AMVOLT.

Největší nevýhodou BESS spočívá relativně nízký počet cyklů a vysoké náklady na údržbu. Další nevýhodou je postupné ubývání velikosti možné akumulace energie. Baterie mohou obsahovat nebezpečné látky, a je proto důležité dbát na správnou recyklaci či likvidaci.



Obr. 1.8: 10stopý BESS kontejner (70 - 210kWh) [13]

Akumulační zařízení připojené do distribuční sítě musí předávat data a informace pro řídicí systém PDS. Výchozí informace pro dispečerské řízení jsou hlavně aktuální činný a jalový výkon a dále pak kapacita baterie, aktuální stav nabití/vybití baterie, maximální možný odebíraný či dodávaný výkon do DS. Mezi akumulačním zařízením a DS jsou dále přenášeny informace o připravenosti nabíjení/vybíjení a teoreticky mohou být přenášeny povely pro regulaci dodávaného či odebíraného činného.



### 1.2.6 Regulační transformátory

Transformátory změnou odbočky mění velikost napětí mezi soustavami, a představují tak možnost regulovat velikost napětí. Změnou odbočky transformátoru se mění i impedance nadřazené sítě, a tím dochází i ke změně výkonových toků, především toku Q.

#### Transformátory 110 kV/vn

V řadě uzlových oblastí je tento transformátor jedinou možností, jak regulovat napětí na zadanou hodnotu  $U_{zad}$ . Z hlediska elektrických ztrát je vhodné provozovat transformátor na vyšší možné hladině s nutností respektovat maximální hranici napětí. U transformátorů 110kV/vn se regulace provádí pomocí přepínání odboček na straně vyššího napětí. Transformátor umožňuje měnit odbočky pod zatížením. Běžný převod transformátoru naprázdno je  $110 \pm 8 \times 2\% / 23$  kV, někdy  $110 \pm 8 \times 1,7\% / 23$  kV. Napětí na sekundární straně je udržováno v nastavených mezích pomocí automatiky HRT (hladinová regulace transformátorů), která automaticky přepíná odbočky transformátoru dle nastavených kritérií na  $U_{zad}$ . Je zajištěno určité pásmo necitlivosti a časové zpoždění, aby transformátor nepřepínal příliš často, například při krátkodobých výkyvech. Necitlivost musí být vyšší než regulační krok mezi odbočkami, a to z důvodu zamezení neustálého přepínání odboček, což by vedlo k opotřebení přepínače. Z podobného důvodu je tu i časové zpoždění eliminující krátké změny napětí. I při vnořených výrobnách v DS je automatika HRT stále zapnuta, a to z důvodu, že vnořené výrobní jsou většinou obnovitelné zdroje, u kterých není zaručen regulační potenciál. [14]

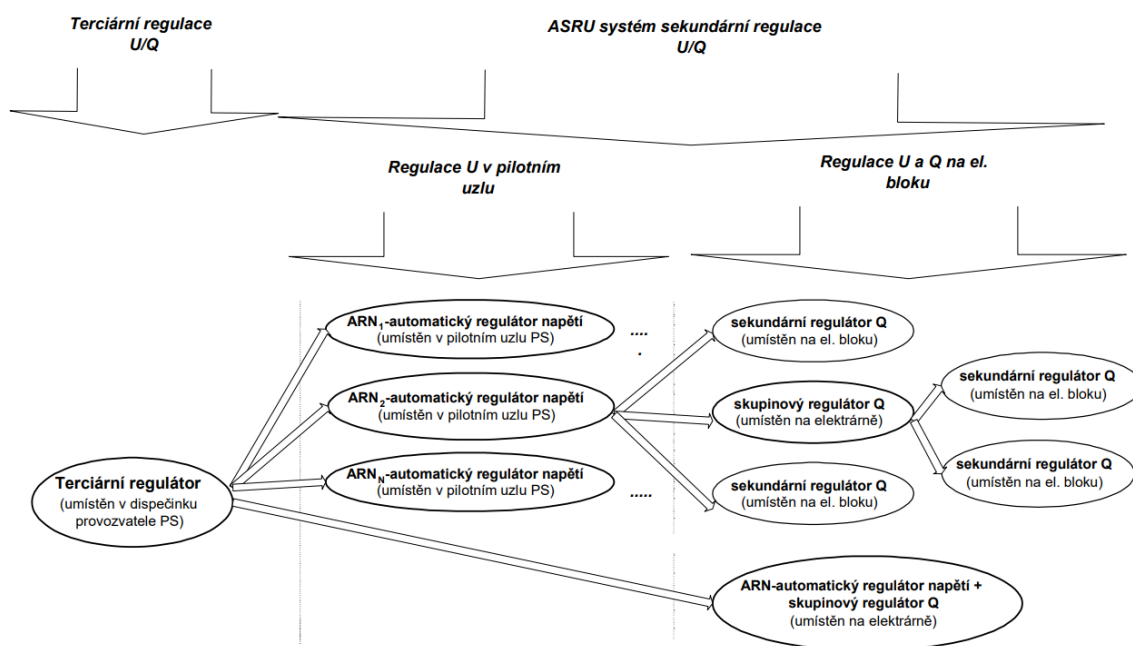
#### Transformátory VN/NN

V distribuční síti pro transformaci na nízké napětí jsou nejčastěji využívány transformátory s přepínáním odboček, kde je možné odbočky přepínat pouze v beznapěťovém stavu. Transformátory s regulací odboček pod zatížením jsou také vyráběny, ale z důvodu vysoké ceny nejsou běžně nasazovány. Běžný převod naprázdno je  $22 \pm 2 \times 2,5\% / 0,4$  kV, respektive  $22 \pm 2 \times 2,5\% / 0,42$  kV. [14]

## 2 Metody řízení napětí a proudového zatížení v sítích vn

### 2.1 Koncepce regulace U a Q v ES

Pro dodržení provozního režimu je nutné dispečersky řídit velikost napětí v uzlech nadřazené soustavy. Struktura regulace U a Q se skládá z primární, sekundární a terciární regulace. **Primární regulace** na systémových elektrárnách udržuje určitou hodnotu napětí na svorkách alternátoru. Velikost napětí je určena sekundární regulací, která spravuje část soustavy a je umístěna v pilotních uzlech. To jsou vytipovaná místa soustavy s velkou citlivostí z hlediska regulace napětí, ve kterých i malá změna jalového výkonu může velmi ovlivnit velikost napětí. Pilotní uzly je nutné navzájem zkoordinovat tak, aby soustava fungovala jako celek a navzájem se nerušila, a to je úkolem terciární regulace. Zde jsou dávány pokyny, na jakou velikost má být nastaveno napětí v pilotních uzlech. Pokyny jsou udávány na základě hospodárnosti i regulačních možností prvků v soustavě. Funkce je založena na optimalizačním programu udávajícím vhodnou velikost napětí pro pilotní uzly. Celá hierarchie řízení je zobrazena na Obr. 2.1. [1]



Obr. 2.1: vazby v hierarchické regulaci napětí a jalových výkonů v ES [16]

**Terciární regulace napětí (TRN)** - skládá se z optimalizačního výpočtu sítě (OPF – Optimal Power Flow) a ASRU. Výpočet OPF vychází z estimovaných hodnot a na jejich základě se snaží minimalizovat činné ztráty na vedení vvn a transformátorech při současném dodržení omezujících podmínek. Výsledek OPF je pravidelně přenášěn do automatické

regulace napětí přes ASRU. Zásadní výhodnou TRN je automatická, rychlá změna  $U_{\text{zad}}$  při rychlých změnách výkonů v síti. [17]

**Automatická sekundární regulace napětí (ASRU)** - funguje na principu udržení napětí v pilotním uzlu (PU) na zadané hodnotě  $U_{\text{zad}}$ . Regulace je realizována pomocí odběru či dodávky jalového výkonu výrobnami. Požadovaný jalový výkon je proporcionálně rozdělen mezi jednotlivé výrobní zapojené do stejného pilotního uzlu (PU). Takto je zamezeno nechtěné proti regulaci jednotlivých výroben a mohou být do regulace zapojeny i výrobní OZE. [17]

Mezi podmínky regulace patří udržení napětí v mezích na přípojnicích a svorkách generátorů/výrobních modulů (VM), toky jalového výkonu do nadřazené soustavy a udržení provozní velikosti proudu na vedení. [17]

Mezi regulační prostředky (akční členy) patří:

- Transformátory s přepínáním odboček (HRT)
- Regulace jalového výkonu  $Q$  na výrobnách (generátory/výrobní moduly – VM)
- Speciální kompenzační zařízení

Provozní limity regulace pro provozovatele PS a DS jsou omezeny pouze technicky (počet odboček, regulační rozsah). Pro připojení výroben do DS, mimo vlastnictví PDS, jsou kompetence pro řízení  $Q/U$  dány energetickým zákonem č. 458/2000 sb., vyhláškou o dispečerském řízení č. 79/2010 Sb., pravidly provozu DS příloha 4 a 7. Regulační rozsahy výroben jsou dány dle technických možností, povinnou podporou sítě, nefrekvenčními podpůrnými službami (Pps-N), případně dle dohody mezi PDS a výrobcem. [17]

Vzhledem k odchýlkám napětí v místech připojení odběratelů je nutné v každém místě připojení dbát na udržení napětí, k tomu je zapotřebí mít řádně vypracovaný projekt a dodržovat provozní režim. Základem projektu pro místo připojení je řádné zhodnocení vlivu odběratele na síť, tedy zhodnocení odběru na napětí a zatížení sítě. Tomu musí odpovídat dostatečné napájení, a to z hlediska počtu a vzdálenosti uzlových stanic 110 kV/vn a napájecích stanic vn/nn s náležitě dimenzovaným průřezem vedení. Vzhledem k přenášeným výkonům je nutné správné zvolení transformátorů, a to buď s automatickou regulací u uzlů 110 kV/vn, nebo s předem nastavenou odbočkou u transformátorů vn/nn. Z důvodu co nejvyšší kapacity vedení a ekonomického provozu navrhnout vhodná zařízení pro kompenzaci jalového výkonu. Důležité je také dispečerské řízení z hlediska výroby a spotřeby elektrické energie.

## 2.2 Regulace U/Q a proudové zatížení v DS vn

Schopnost regulace napětí a proudového zatížení v distribučních sítích závisí na schopnostech použitých zařízení a zvolených metodách řízení. Jak již bylo teoreticky popsáno v kapitole 1.2, lze zařízeními v DS řídit velikost napětí a proudového zatížení. Pomocí transformátorů 110 kV/vn s hladinovou regulací HRT je možné řízením odboček na transformátoru měnit velikost napětí v síti vn. Další možností je využití kompenzačních zařízení ke změně velikosti toků jalových výkonů, čímž dochází i ke změnám velikosti napětí. Pro regulaci jsou využity také výrobní, kde je možné regulovat velikost napětí pomocí dodávky nebo odběru Q. K tomu jsou určeny různé metody, ať již autonomní regulace využívající regulaci Q(U), P(U), anebo regulace na zásah dispečera, kdy podle zvolené metody jsou nastaveny parametry regulace. V DS je prováděna automatická regulace ASRU + HRT a zkušebně zaváděná optimalizace sítě (obdobu OPF využitá v sítích vvn), rozebráno v literatuře [6] a [17]. Níže jsou metody řízení využívané v sítích vn popsány.

V síti je také možné využít regulaci pomocí činného výkonu na výrobních či u odběratelů, ale to má svá omezení. Výrobní v síti vn jsou většinou s OZE, kde je výroba podporována, a tudíž je nechtěné jí omezovat, ale z určitých důvodů se k omezení přistupuje, viz režim negarantovaného výkonu v kapitole 1.1. Na straně spotřeby zase nelze jen tak odepínat spotřebitele, a možnost je tedy určitá kompenzace odběratelů za rozložení či odložení spotřeby na vhodnou dobu.

### Zásady podpory sítě

Výrobní musí být schopny při dodávce elektrické energie do sítě se podílet na udržování kvality napětí v síti. Musí splňovat podmínky na statickou a dynamickou podporu sítě.

Statická podpora sítě je mimo jiné schopnost udržet napětí ve smluvně stanovených mezích při pomalých změnách. U výroben je povinnost podílet se na stabilizaci napětí pomocí jalového výkonu v rozsahu účinníku 0,9 kapacitní a 0,9 induktivní.

Podmínky regulace jalového výkonu Q závisí na konkrétním místě distribuční soustavy a výkon je určen PDS po konzultaci s výrobcem. Způsoby řízení Q vyplývají z RfG (Requirements for Generators), platných norem a podmínek připojení do DS.

Dynamickou podporou sítě se rozumí udržování napětí při poklesech napětí v síti vvn a zvn, které zamezuje nežádoucímu odpojení výkonů napájejících sítí nn, vn a rozpadu sítě. Z toho důvodu se musí na této podpoře podílet i výrobny nn, vn a 110 kV. To znamená, že musí být schopny zůstat připojené i při poruchách v síti, při kterých dochází k poklesu napětí.

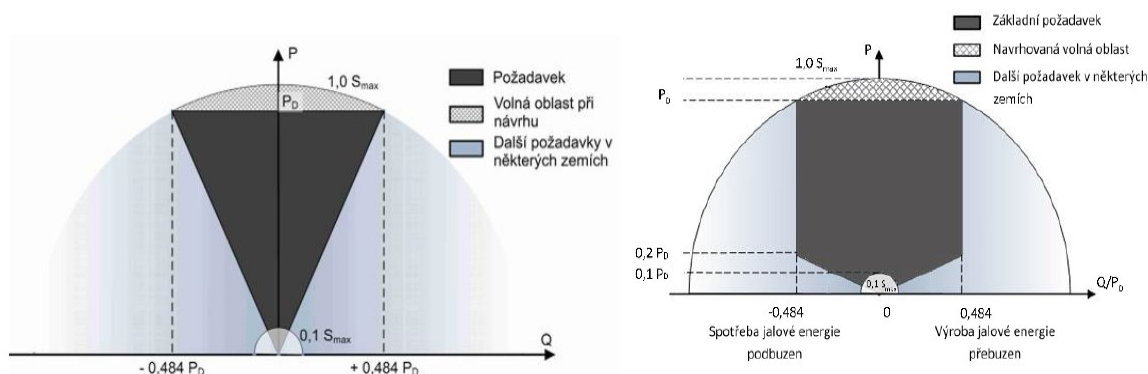
Řízení jalového výkonu výroben je součástí povinného udržování kvality elektrické energie a musí být využitelné kdykoliv. Výrobny jsou rozděleny do jednotlivých kategorií podle celkového výkonu uvedeného v tabulce Tab. 2.1.

Tab. 2.1: Výkonové kategorie výroben

Kategorie VM	Podkat. VM	Hranice PDS	Napěťová hladina
A	A1	$800 \text{ W} \leq P_{\text{inst}} \leq 11 \text{ kW}$	nn
	A2	$11 \text{ kW} \leq P_{\text{inst}} \leq 100 \text{ kW}$	nn, vn*
B	B1	$100 \text{ kW} \leq P_{\text{inst}} \leq 1 \text{ MW}$	vn, nn*
	B2	$1 \text{ MW} \leq P_{\text{inst}} \leq 30 \text{ MW}$	vn
C	C	$30 \text{ MW} \leq P_{\text{inst}} \leq 75 \text{ MW}$	vn
D	D	$P_{\text{inst}} \geq 75 \text{ MW}$	110 kV

\* výjimečně připojeno na tuto hladinu

Požadavky na odběr či dodávku jalového výkonu jsou znázorněny na Obr. 2.2. Pro výrobny připojené do nn a na vývodech vn platí část a), pro výrobny připojené do vvn a do přípojníc vn platí část b).



Obr. 2.2: Požadavky na PQ diagram výroben s U/Q regulací – a) výrobny nn; b) výrobny vvn a do přípojníc vn [3]

Výrobní modul B2, C a D musí být schopen dodávat/odebírat dodatečný jalový výkon. Tento dodatečný jalový výkon kompenzuje nabíjecí výkon vedení nebo kabelu

vysokého napětí mezi vysokonapěťovými svorkami blokového transformátoru výrobní a místem připojení. [3]

V tabulce Tab. 2.2 jsou vypsané jednotlivé výrobní moduly a k nim přiřazené nejčastější metody řízení výkonu  $Q$  v sítích ČEZd.

Tab. 2.2: Regulace  $Q$  podle typu výrobní

Napěťová hladina	kategorie VM		řízení $Q$
nn	A1 $800 \text{ W} \leq P_{\text{inst}} \leq 11 \text{ kW}$	nesynchronní VM	$Q(U)$
		synchronní VM	$\cos \phi_i = \text{konst.}$
	A2 $11 \text{ kW} \leq P_{\text{inst}} \leq 100 \text{ kW}$		$Q(U)$
	B1 $100 \text{ kW} \leq P_{\text{inst}} \leq 1 \text{ MW}$		$Q(U)$
vn	A2 $11 \text{ kW} \leq P_{\text{inst}} \leq 100 \text{ kW}$		$Q(U)$ , $\cos \phi_i$
	B1, B2, C $P_{\text{inst}} \geq 100 \text{ kW}$		$Q(U)$ , konst. $U(U/Q)$
VVN	D		konst. $U(U/Q)$

\* A2 na hladině vn – individuální zvážení regulace  $Q$ ; na konst. účinník je preferováno v místě vysokého zkratového výkonu

\* B, C - individuálně zvážena regulace, v  $Q(U)$  regulace je preferována v místech s velkým zatížením

\* Na vn a vvn zpravidla  $Q(U)$  do 1 MW, nad tuto mez konst.  $U(U/Q)$

## 2.3 Regulace jalového výkonu výroben

### 2.3.1 Regulace na konstantní hodnotu $U$ ( $U/Q$ ) na výrobních

Pro výrobní s rezervovaným výkonem vyšším než 1 MW požaduje ČEZ Distribuce (ČEZd) regulaci jalového výkonu na zadanou hodnotu  $U_{\text{zad}}$  v místě připojení. Rozsah regulace je dán PPDS v příloze 4. Každá výrobní je regulována samostatně. Regulace na konst.  $U$  stabilizuje kolísavé napětí dané proměnlivou výrobou činného výkonu. To je vyhovující pro využití ke stabilizaci napětí v místě připojení. Vhodným nastavením  $U_{\text{zad}}$  lze ovlivňovat toky  $Q$  vůči nadřazené soustavě. Regulační jalový výkon obvykle zvyšuje ztráty, ale jde o kompromis mezi ztrátami a kolísáním napětí. [3,17]

Pro výrobní nižších jednotek MW umístěných dále od rozvodny je hlavním účelem regulace konst.  $U$  stabilizace napětí v místě připojení. Tyto výrobní jsou většinou OZE, kde z charakteru výrobní dochází ke kolísání napětí. Regulace konst.  $U$  zde tedy pomáhá ke zlepšení kvality dodávky elektrické energie. [17]

Výrobní vyšších jednotek MW až 20 MW jsou připojeny přímo do rozvodny 110 kV/vn samostatným vývodem. Zde je již využíváno řízení jalového výkonu  $Q$  vůči nadřazené soustavě. K tomu přispívá i vyšší regulační rozsah výroben. Nastavení  $U_{zad}$ , na které má výrobní regulovat, je nutné korigovat s hodnotou  $U_{zad}$  nastavenou na HRT transformátoru tak, aby nedocházelo k neúměrnému přepínání odboček transformátoru. [17]

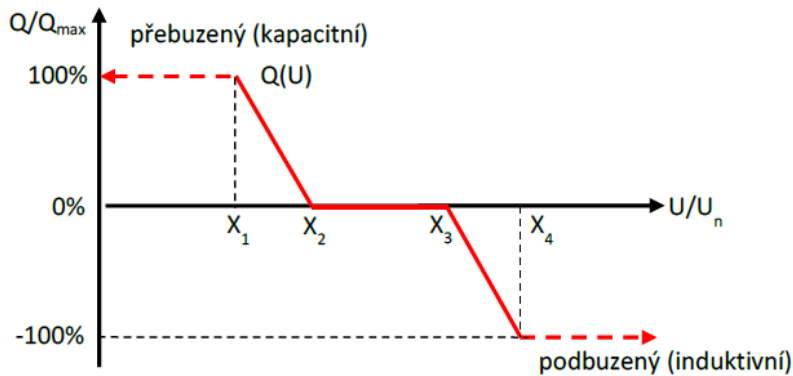
S růstem počtu výroben na hladině vn s provozovanou konst.  $U$  regulací začíná připadat v úvahu regulace jalového výkonu v čase podle aktuálního výkonu výroben a odběrů v DS, ale i na vyšších hladinách. Bude tedy vhodné nasadit optimalizační výpočty a automatické přesuny výsledků OPF výpočtu do  $U_{zad}$  výroben, obdobně jako na hladině vvn (principiálně podobné OPF a TRN provozované v PS). [17]

### 2.3.2 Regulace na konstantní účinník ( $\cos\varphi = \text{konst.}$ )

Tato regulace je v sítích ČEZd používána výjimečně, např. u menších výroben umístěných v areálech s vysokým odběrem. Velikost jalového výkonu se mění v závislosti na výkonu činném. Je zde nastavena konstantní hodnota účinníku, na kterou výrobní reguluje.

### 2.3.3 Autonomní regulace – $Q(U)$

Pro výrobní nn a výrobní vn s výkonem do 1 MW je v síti ČEZd požadována autonomní regulace prostřednictvím autonomních charakteristik  $Q(U)$ . Řízení je zcela autonomní a nepodléhá žádnému dispečerskému řízení. Hlavním úkolem je snížit vliv výroby na změny napětí vyvolané samotnými výrobny, tedy částečně stabilizovat napětí v síti s kolísavým charakterem výroby. Řízení jalového výkonu v závislosti na napětí je nejčastějším způsobem regulace. Charakteristika  $Q(U)$  musí být nastavitelná, přičemž nastavení je domluveno pro všechny PDS stejně. Charakteristika  $Q(U)$  je na Obr. 2.3. [3, 17]



Obr. 2.3: Nastavení funkce  $Q(U)$  [3]

Charakteristika  $Q(U)$  je definována 4 body, kde hodnoty  $X$  jsou definovány poměrem napětí v místě připojení ku jmenovitému napětí. Hodnoty na ose  $y$  odpovídají poměru dodávaného jalového výkonu ku maximálnímu jalovému výkonu, který je výrobní schopna vyrobit. Z charakteristiky  $Q(U)$  vychází, že při napětí blízkém jmenovitému pracuje výrobní s neutrálním účinníkem. Při poklesu napětí v přípojním bodě pracuje výrobní v kapacitním režimu (přebuzený stav, dodávka  $Q$ ) a snaží se napětí v síti zvýšit. Naopak při zvýšeném napětí pracuje v induktivním režimu (podbuzený stav, odběr  $Q$ ) a snaží se napětí snížit.

Příkladem nastavení mohou být hodnoty:

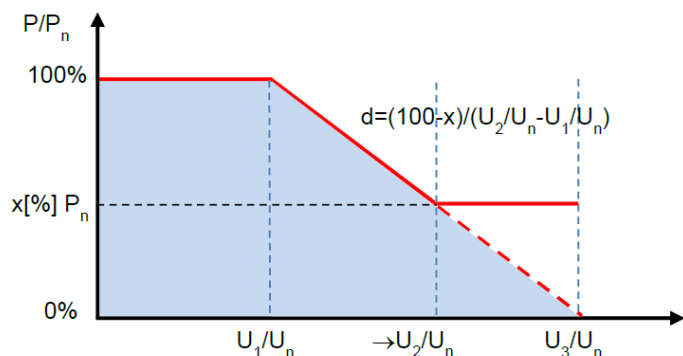
- $X_1=0,94:1$ ;  $X_2=0,97:0$ ;  $X_3=1,05:0$ ;  $X_4=1,08: -1$

Při nastavování charakteristiky je nutné brát ohled na velikost napětí na přípojnicích, nastavení odbočky na nadřazeném transformátoru a nastavení vhodné strmosti regulace s ohledem na napěťovou stabilitu podél vývodu.

## 2.4 Omezení činného výkonu v závislosti na napětí $P(U)$

Všechny výrobní musí být vybaveny funkcí pro řízení velikosti napětí činným výkonem. Na Obr. 2.4 je vidět charakteristika funkce  $P(U)$ , ze které je možno vyvodit snižování činného výkonu od určité velikosti napětí. Konkrétní hodnoty funkce  $P(U)$  jsou dány provozovateli DS. Důvodem nasazení funkce je zabránění odpojení výroben napěťovými ochranami. [3]





Obr. 2.4: Charakteristika funkce  $P(U)$  [3]

Další možností operativního omezení výkonu je vzhledem k vlastnění výroben soukromými subjekty finančně i legislativně náročnější, proto se k němu u výroben na hladině nn, vn přistupuje až v případě, že již nestačí regulace pomocí ostatních prostředků, viz negarantovaný výkon v kapitole 1.1. Omezení je dáno na pokyn správce přenosové soustavy. PDS je oprávněno využít snížení činného výkonu v nebezpečných stavech, jako je například ohrožení provozu soustavy, blackout, ohrožení statické či dynamické stability sítě. [3]

## 2.5 Regulace pomocí akumulčních zařízení – bateriové úložiště

Pro podporu napěťové stability v síti lze použít akumulční zařízení (Load shifting, Peak shaving). Při vysokém zatížení je možné pomocí dodávky energie z akumulčního zařízení snížit odběr ze sítě, a tím zlepšit napěťové poměry. Naopak při dodávce energie do sítě, například při výrobě z OZE, je možné elektrickou energii ukládat do akumulčního zařízení, a není tak nutné omezovat výkon výroben.

### 3 Citlivostní analýza vlivu výkonových toků regulačních prostředků na napěťové a proudové poměry

Tato kapitola se zabývá analýzou vlivu změn výkonových toků regulačních prostředků na napěťové a proudové poměry v distribuční síti. To je zkoumáno na modifikovaných typových vývodech. Jedná se o vývody složené z venkovního nebo kabelového vedení, z nichž vychází odlišné parametry. Vývody jsou popsány v kapitole 3.1. Pro modelované sítě jsou využity zařízení a principy popsány v teoretické části této diplomové práce. Pro modelování sítě je použitý program DNCalc.

**DNCalc** je výpočetní systém pro modelování a komplexní analýzu rozsáhlých elektrických sítí. Systém disponuje širokým spektrem prvků umožňujících popis modelovaných problémů spojených s provozem distribučních sítí. Díky použitým nástrojům je program schopný analyzovat provoz DS s respektováním aktuálních trendů vývoje elektroenergetiky. [18]

Model vn sítě je přizpůsoben velikostmi odběru provozními hodnotám, jaké se mohou vyskytovat v síti. Pro zkoumání stavů sítě jsou měněny velikosti odběru či dodávky elektrické energie nebo jejich regulace, a to jak samotnými výrobny, tak i přidáním regulačních zařízení.

V této kapitole jsou analyzovány případy:

- Zatížení sítě – zkoumán vliv zatížení na změnu velikosti napětí podél vývodu. To je zkoumáno jak na změně celkového zatížení sítě, tak i umístění centra spotřeby.
- Vliv vnořené výroby na napětí – zkoumání vlivu umístění a velikosti výroby na napěťový profil podél vývodu.
- Výpočet připojitelnosti – analýza maximálního připojitelného výkonu pro vyhovující napěťové podmínky a jeho možné navýšení změnou účinníku výroby.
- Regulace jalového výkonu – zkoumán vliv regulace  $Q$  na napěťové a proudové podmínky. Analýza je zaměřena na zkoumání regulace  $Q(U)$  a regulace na konstantní napětí. Dále je zde ukázán vliv kompenzačního zařízení v síti. Analýza je provedena na venkovním i kabelovém vedení.

### 3.1 Základní model sítě

Parametry nadřazené soustavy a transformátor 110 kV/vn jsou pro obě varianty vývodů stejné. Transformátor T101 je s hladinovou regulací HRT a jeho parametry jsou uvedeny v Tab. 3.1.

Tab. 3.1: Parametry transformátoru 110 kV/22 kV

Parametry Transformátoru 110 kV/22 kV								
Un1 [kV]	Un2 [kV]	St [MVA]	Pk [kW]	uk [%]	io [%]	Po [kW]	Počet odb.	Krok [%]
110	23	40	224,7	11,2	0,67	48,6	8	2

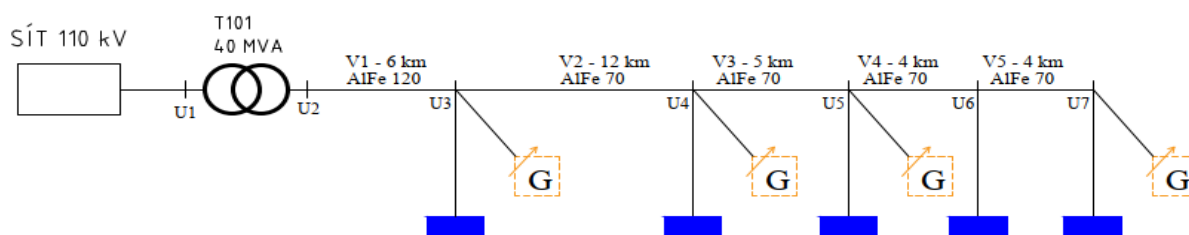
#### Vývod A (venkovní vedení 22 kV)

První namodelovaný vývod je složen z venkovního vedení s různou délkou a parametry podle Tab. 3.2. Jedná se o jednoduchý vývod vn zapojený do sítě 110 kV přes transformátor T101 - 110 kV/vn s výkonem 40 MVA. Na sekundární straně je celkem šest uzlů označených U2 až U7. Uzel U2 je přímo v rozvodně 22 kV a začíná v něm uvažovaný vývod. V ostatních uzlech (U3 až U7) jsou připojené zátěže a v některých případech v nich je připojena i výrobná.

Tab. 3.2: Parametry venkovního vedení – vývod A

Název	Typ	Průřez [mm <sup>2</sup> ]	Un [kV]	R [Ω/km]	X [Ω/km]	B [μS/km]	Délka [km]	I <sub>max</sub> [A]
V1	120AlFe6	120	22	0,225	0,363	1,469	6	357
V2	70AlFe6	70	22	0,434	0,391	1,427	12	225
V3	70AlFe6	70	22	0,434	0,391	1,427	5	225
V4	70AlFe6	70	22	0,434	0,391	1,427	4	225
V5	70AlFe6	70	22	0,434	0,391	1,427	4	225

Z parametrů je zřejmé, že pro nižší průřez vedení roste poměr R/X, tím se mění i výkonové vlivy na napětí. Celý vývod je ukázán na Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Schéma vývodu A – venkovní vývod

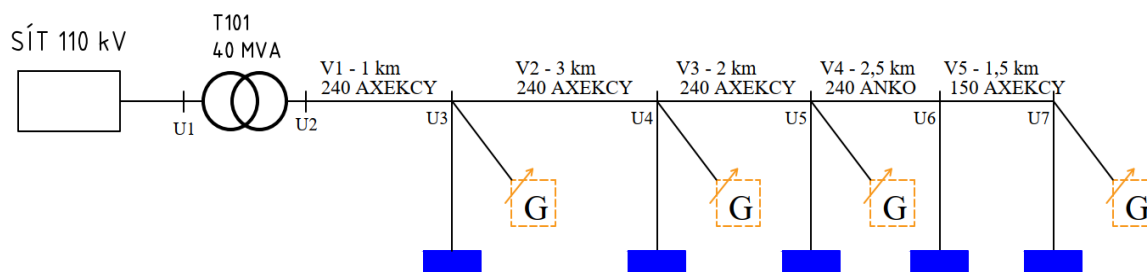
## Vývod B (kabelové vedení)

Druhá varianta je složena z kabelového vedení se zatížením podél vývodu, podobně jako u vývodu A. Vedení je oproti vývodu s venkovním vedením složeno z kratších délek kabelů, což odpovídá i reálnému stavu v síti. V Tab. 3.3 jsou vypsané parametry vývodu B.

Tab. 3.3: Parametry kabelového vedení – vývod B

Název	Typ	Průřez [mm <sup>2</sup> ]	Un [kV]	R [Ω/km]	X [Ω/km]	B [μS/km]	Délka [km]	I <sub>max</sub> [A]
V1	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	1	506
V2	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	3	506
V3	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	2	506
V4	240ANKO	240	22	0,157	0,082	98	2,5	371
V5	150AXEKCY	150	22	0,206	0,211	79	1,5	356

U kabelového vedení lze pozorovat mnohonásobně vyšší susceptanci nežli u venkovního vedení. Z toho vychází výrazně vyšší provozní kapacita kabelového vedení, a tudíž i mnohem větší generovaný jalový výkon. Hlavní příčinou velké provozní kapacity jsou malé vzdálenosti mezi fázovými vodiči v kabelu. Kabelový vývod je osazen stejným počtem uzlů, a tudíž i zátěží, popřípadě vyroben jako vývod venkovní a je zobrazen na Obr. 3.2.



Obr. 3.2: Schéma vývod B – kabelové vedení

## Zátěž

V rámci analýzy jednotlivých variant jsou vytvořeny varianty zatížení podle celkového zatížení vývodu a také podle centra zatížení vývodu. Zatížení jednotlivých vývodů je v řádu stovek kVA s uvažovaným účinníkem 0,95 induktivní. Tento účinník je hraniční hodnota pro velkoodběratele, při které nejsou penalizováni za nevyžádaný odběr jalového výkonu. Pro snadnější orientaci v této kapitole mají jednotlivé varianty zatížení své označení, jež je vysvětlené v následujícím textu.

Rozdělení dle velikosti zatížení:

- Nízké zatížení: 650 kVA; označení – Z0,65
- Základní zatížení: 1400 kVA; označení – Z1,4
- Vysoké zatížení: 3500 kVA; označení – Z3,5

Zatížení mimo výše uvedené hodnoty bude v dalším textu popsáno bez označení.

Rozdělení dle centra zatížení:

Tab. 3.4: Zatížení podél vývodu

zatěž	Sprov [kVA] ( $\cos \phi_i = 0,95$ )		
	na začátku (S)	základní (M)	na konci (E)
Z3	500	200	100
Z4	400	500	200
Z5	200	400	200
Z6	100	100	400
Z7	200	200	500

Písmena S, M a E označují zatížení na začátku vývodu, základní a na konci vývodu.

### Znaménková konvence

Pro sjednocené označení směru toku výkonů je v celé praktické části práce zvolena spotřebičová orientace výkonů. Tedy odebíraný činný výkon je označen kladným znaménkem. U jalových výkonů je nutné rozeznávat nejenom směr toku výkonu, ale i jeho charakter. Pokud se proud zpožďuje za napětím, jedná se o kladný Q, tedy odebraný induktivní výkon. Naopak pokud proud předbíhá napětí, jedná se o záporný Q, tedy odebraný kapacitní výkon. V praktickém příkladu to znamená, že kondenzátor připojený k síti dodává jalový výkon induktivního charakteru, a naopak tlumivka dodává záporný jalový výkon induktivního charakteru (spotřebovává jalový výkon induktivního charakteru). Značení je ukázáno v tabulce Tab. 3.5

Tab. 3.5: Znaménková konvence výkonů – spotřebičová orientace

Výkon		Dodávka	Odběr
Činný		-	+
Jalový	Induktivní	-	+
	Kapacitní	+	-

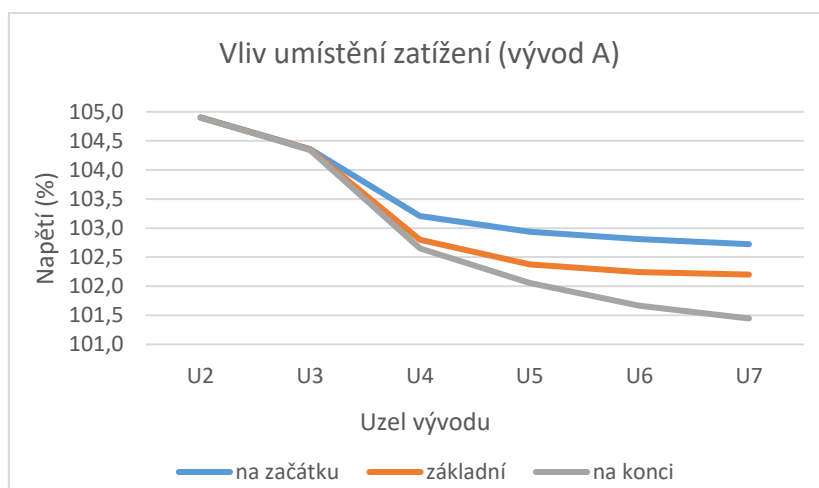
\* Pokud je v práci, zejména u grafů, uveden popis „dodávaný výkon“, jedná se o dodávaný výkon výrobními, a v tom případě jsou hodnoty výkonů výrobními kladné.

### 3.2 Varianta 1 - vliv zatížení na napětí (proudové poměry)

Nejprve je zkoumán vliv samotné zátěže na napěťové poměry podél vývodu. To je ukázáno na dvou případech, kdy v prvním je měněno pouze rozmístění zátěže podél vývodu a celkové zatížení zůstává stejné a v druhém je měněno celkové zatížení vývodu. Pro zkoumání je nastavena odbočka transformátoru (T101) 110kV/vn tak, aby na sekundární straně TR bylo napětí přibližně 23 kV. Příklady jsou namodelovány a spočteny v programu DNCalc.

#### Vliv umístění zátěže (vývod A; Z1,4; S, M, E)

Zde je zkoumán vliv rozložení spotřeby podél vývodu A (venkovní vedení). To je demonstrováno na celkovém zatížení vývodu 1,4 MVA, kdy je zatížení rozloženo do jednotlivých uzlů (U3 až U7) a mění se pouze umístění centra nejvyšší spotřeby, přičemž celkové zatížení se nemění (v tomto případě 1,4 MVA). Zátěž je rozdělena do tří variant podle Tab. 3.4. Vliv na velikost napětí je ukázán na grafu Obr. 3.3.



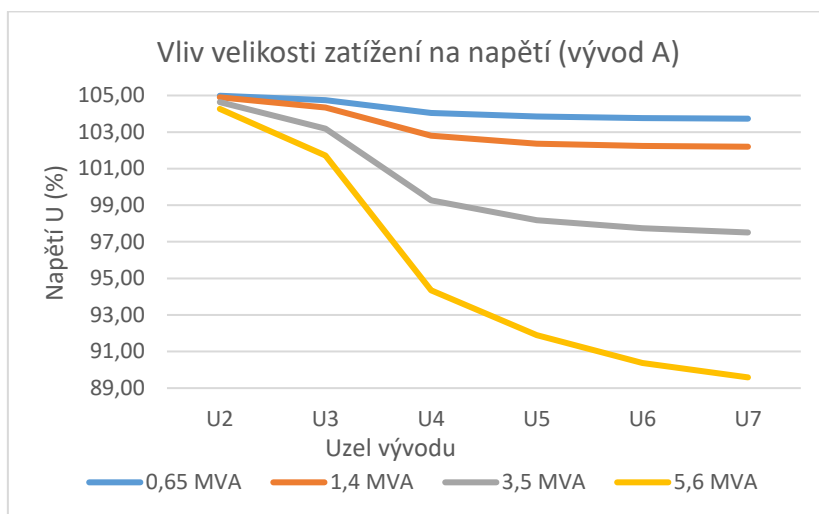
Obr. 3.3: Graf vlivu umístění zatížení podél vývodu vn; venkovní vývod A

Při umístění centra zátěže na konec vývodu je napěťový profil nižší, což je způsobeno vyšším zatížením ke konci vývodu, tedy v místě, kde je větší impedance.

#### Vliv velikosti zátěže (vývod A; Z0,65 – Z3,5, 5,6MVA; M)

Na obr. 3.4 je zobrazen vliv velikosti zatížení na velikost napětí. Jsou zde nastaveny stejné podmínky jako v předchozím případě, přičemž je pouze měněna velikost celkového zatížení a zkoumán vliv na napětí. Vliv na napětí je zkoumán na základní variantě rozdělení zatížení, jak při nižším zatížení 0,65 MVA, tak i zvýšeném zatížení 3,5 MVA a také zatížení 5,6 MVA, při kterém je již napětí v uzlu na konci vývodu menší než povolených 90 %

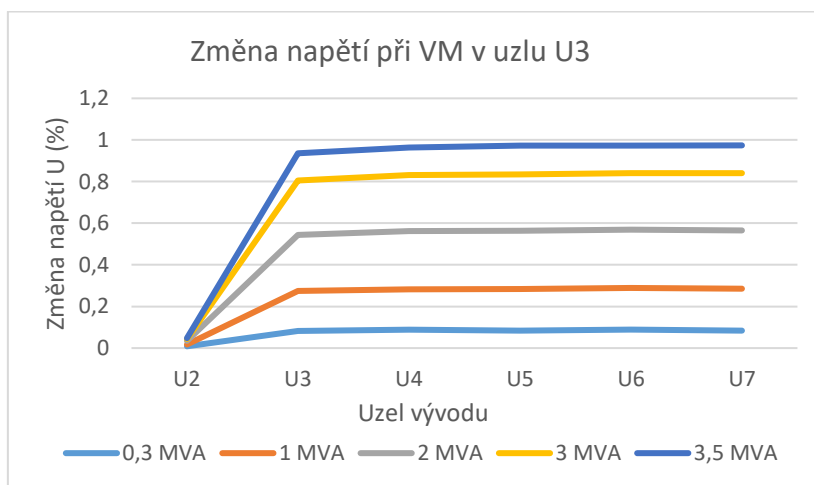
jmenovité hodnoty dané normou ČSN 50160. Zatížení 5,6 MVA je v síti vn nereálné a je v grafu znázorněno pouze pro ukázkou zatížení, kdy hodnota napětí klesne pod 90 %  $U_n$ .



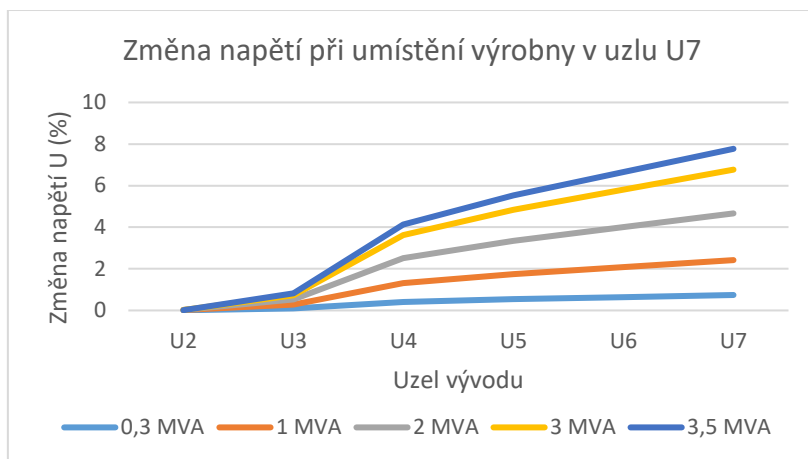
obr. 3.4: Graf vlivu velikosti zatížení na napětí, venkovní vývod A

### 3.3 Varianta 2 – vývod s vnořenou výrobnou (vývod A; Z1,4; M + VM)

Vlivem umístění vnořené výrobní dochází dodávkou elektrické energie k nárůstu napětí v síti. To je ukázáno na následujících grafech, v nichž je znázorněna změna napětí po připojení vnořené výrobní v porovnání s napětím před připojením výrobní. Na grafu Obr. 3.5 je ukázána změna napětí při připojení výrobní do uzlu U3, tedy na začátku vývodu vn. Na grafu Obr. 3.6 je výrobní umístěna na konci vývodu vn v uzlu U7. Pro obě varianty je měněn dodávaný výkon výrobnou v rozsahu od 300 kVA do 3,5 MVA. Pro zkoumání zatížení je využit vývod A v základním uspořádání a zatížení 1,4 MVA.



Obr. 3.5: Graf změny napětí při umístění VM v uzlu U3; Z1,4 MVA



Obr. 3.6: Graf změny napětí při umístění VM v uzlu U7; Z1,4 MVA

Při variantě umístění výroby na začátku vývodu je možné připojit výrobu s hodnotou 3,5 MVA, a i přesto dodržet podmínku na změnu napětí po připojení výroby. Oproti tomu při zapojení výroby na konci vývodu vyhovuje na podmínku 2% změny U pouze výrobní s výkonem 300 kVA.

#### Porovnání napětí pro uzel U7 se zatížením v základní variantě a se zatížením na konci vývodu (vývod A; Z1,4; M, E + výroba)

Zde je porovnán maximální možný připojitelný výkon výroby pro variantu základního zatížení (zatížení uprostřed vývodu) a variantu zatížení na konci vývodu. Zatížení vývodu je 1,4 MVA. Výrobní je umístěna v uzlu U7 a je na ní měněn dodávaný výkon od hodnoty 0,3 MW až do hodnoty 3,5 MW při účinníku výroby  $\cos \varphi = 1$ . Při variantě zatížení na konci vývodu se připojitelný výkon oproti základní variantě lehce snižuje. To je způsobeno nižším napětím před připojením výroby (větší zatížení na konci vývodu způsobí vyšší úbytek), které v porovnání s napětím po připojení výroby dělá vyšší procentuální nárůst napětí nežli ve variantě základního rozdělení zatížení. Při kontrole napětí ale zjistíme, že celková hodnota napětí při zatížení na konci vývodu je nižší. To je způsobeno právě vyšším zatížením na konci vývodu. V tabulkách Tab. 3.6 a Tab. 3.7 jsou uvedeny hodnoty napětí a jejich změna po připojení výroby pro rozdělení spotřeby základní (uprostřed) a na konci vývodu. Změna napětí je dána podle vztahu:

$$U(\%) = \frac{U_{po\ připojení\ VM} - U_{před\ připojením\ VM}}{U_n} \cdot 100 \quad (3.1)$$



Tab. 3.6: Napětí v uzlu U7 s výrobou umístěnou v U7, % nárůst napětí se základním zatížením

Vývod A; Z - 1,4 MVA, M (zatížení v základním rozdělení)						
Uzel/výroba	0 MVA	0,3 MVA	1 MVA	2 MVA	3 MVA	3,5 MVA
U7 (kV)	22,484	22,651	23,028	23,533	24,006	24,231
změna napětí po připojení výroby (%)						
U7 (kV)	0	0,76	2,47	4,77	6,92	7,94

Tab. 3.7: Napětí v uzlu U7 s výrobou umístěnou v U7, % nárůst napětí se zatížením na konci vývodu

Vývod A; Z - 1,4 MVA, E (zatížení na konci)						
Uzel/výroba	0 MVA	0,3 MVA	1 MVA	2 MVA	3 MVA	3,5 MVA
U7 (kV)	22,318	22,489	22,874	23,39	23,872	24,102
změna napětí po připojení výroby (%)						
U7 (kV)	0	0,78	2,53	4,87	7,06	8,11

### 3.4 Regulace pomocí jalového výkonu

Jelikož dochází k postupnému rozvoji decentralizovaných výroben (DECE) připojených do sítí vn, dochází ke změně výkonových toků v sítích, a tím i ke změně napěťových poměrů v sítích. Vzhledem k povinnosti provozovatele DS udržovat napětí v předávacích místech v limitech podle kvality dodávky elektrické energie, je napětí jedním z klíčových kritérií pro stanovení připojitelnosti výroben. Pro hladinu vn platí nutnost udržet napětí v rozmezí  $\pm 10\% U_n$ . Dále je nutné dodržení podmínky připojení výroben, podle níž nesmí v žádném místě sítě překročit 2 % změnu napětí po připojení výroby.

#### 3.4.1 Varianta 3 - Změna připojitelnosti pomocí změny účinníku

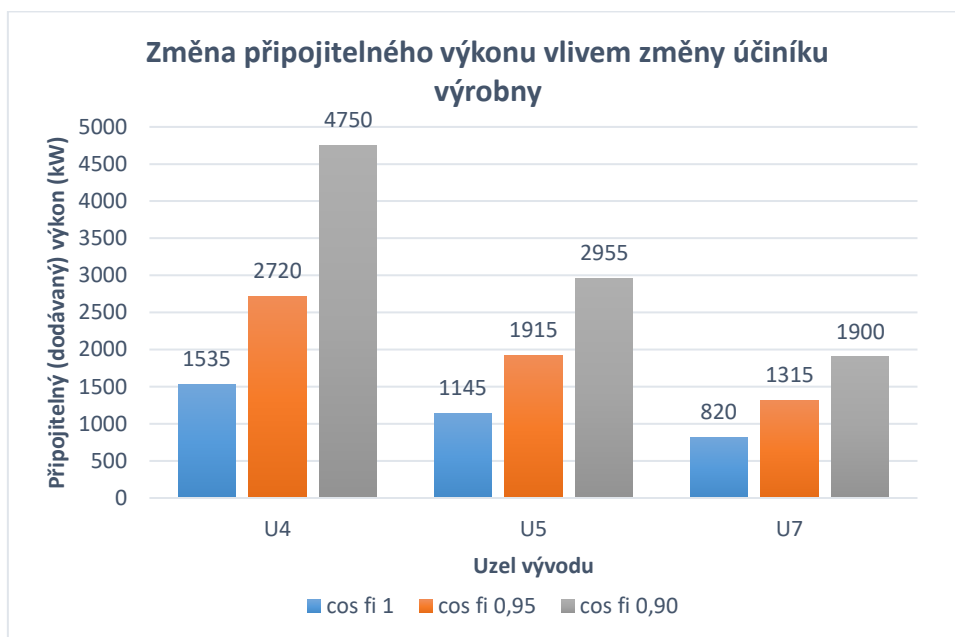
Pro typový vývod venkovního vedení je analyzována možnost zvýšení připojitelného výkonu výroben připojených do jednotlivých uzlů. Připojitelnost je analyzována při zatížení 1,4 MVA. Napětí v uzlu před připojením výroby je navýšeno o 2% podle rovnice (3.2) a poté je odvozen odpovídající výkon výroby (při  $\cos \varphi = 1$ ), který toto navýšení napětí způsobí. To samé je poté zkoumáno pro účinník výroby 0,95 a 0,9 induktivní. Příklad byl analyzován v programu DNCalc, kdy byl postupně zvyšován výkon dodávaný výrobnou až do hodnoty, v níž napětí dosáhlo hodnoty  $U_n + 2\%$ .

$$U_{n+2\%} = U_n \cdot 1,02 \quad (3.2)$$

Kde:  $U_n$  (V) je jmenovité napětí

Změnou účinníku na hodnoty 0,95 a 0,90 induktivní (odběr Q ze sítě) dochází k navýšení připojitelného výkonu výroby v daném uzlu. Velikost navýšení připojitelného

výkonu je ukázána na Obr. 3.7. Analýza tohoto vlivu je prováděna na vývodu A se zatížením 1,4 MVA a s výrobnou v uzlu U7 (vývod A, Z1,4, M + výrobná U7).



Obr. 3.7: Změna připojitelného výkonu, změnou účinníku výrobný; vývod A; Z1,4 MVA

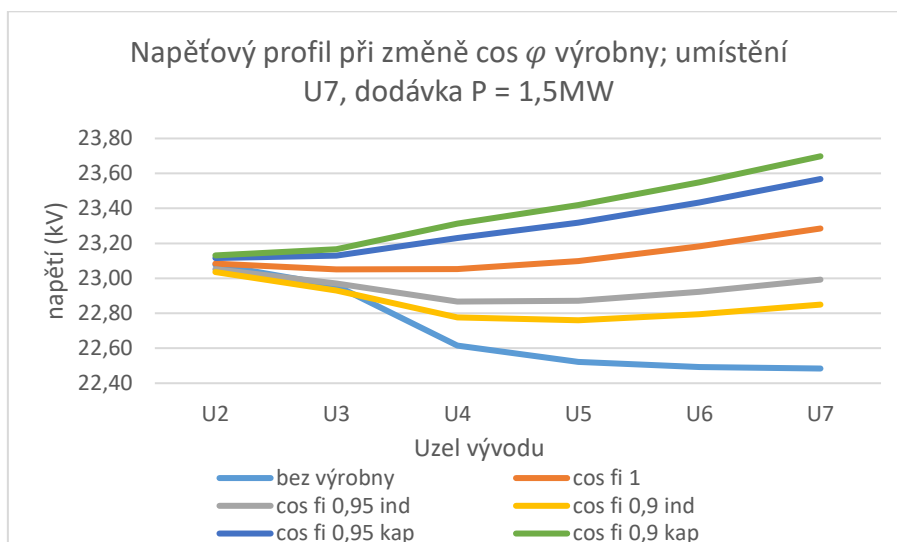
Jak je vidět na grafu Obr. 3.7, změnou účinníku při odběru jalového výkonu výrobnou je částečně kompenzováno zvýšení napětí. Navýšení připojitelného výkonu je pro každý uzel jiné, což je dáno rozdílným poměrem R/X, který je dán odlišnou vzdáleností uzlů od začátku vývodu. Pro uzel U4, ležící blíže začátku vývodu, je impedance i poměr R/X nízký, a proto je připojitelný výkon i jeho navýšení pomocí změny účinníku oproti uzlu U5 a U7 vyšší. Pro uzel U4 vychází při změně  $\cos \phi$  na 0,95 ind. navýšení napětí na hodnotu 1,77krát vyšší než pro  $\cos \phi$  rovno 1. V porovnání s uzlem U7, kde je při změně  $\cos \phi$  na 0,95 ind. navýšení napětí 1,6krát vyšší. Rozdíl navýšení není tak vysoký jako porovnání možného připojitelného výkonu, který pro uzel U4 vychází více jak dvojnásobný.

Pro uzel U3 vychází připojitelný výkon na 7,8 MW (při  $\cos \phi = 1$ ) a při uvažování účinníku 0,95 by již vedení naráželo na svůj proudový limit. V tomto případě se jedná o vedení AlFe 120 se zatížitelností 357 A, které zde odpovídá výkonu 14,6 MW při  $\cos \phi = 0,95$ .

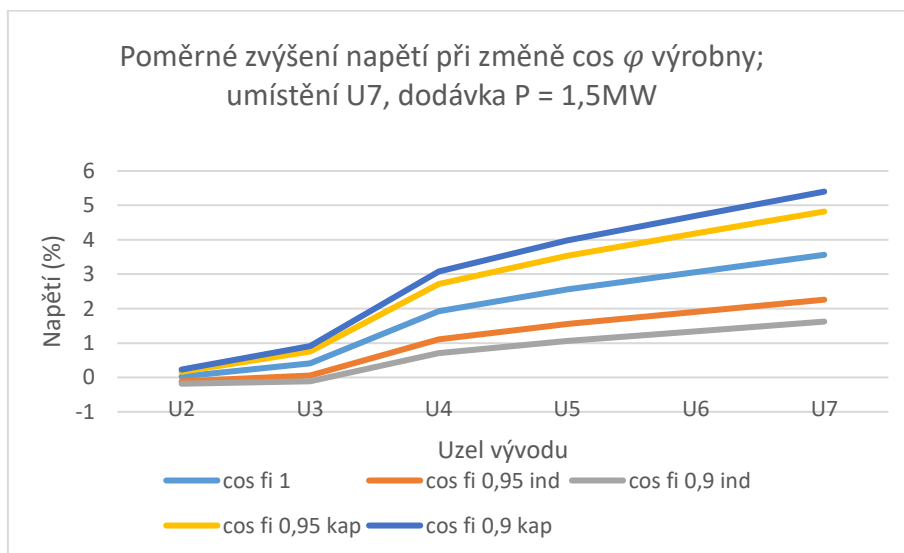
### Napěťový profil při změně účinníku

Na Obr. 3.8 je napěťový profil při změně účinníku výrobný s porovnáním napětí bez výrobný. To je zkoumáno pro venkovní vývod A při zatížení 1,4 MVA. Vývod je v místě U7 osazen výrobnou, která dodává výkon 1,5 MW. Lze zde pozorovat změnu velikosti

napětí pomocí změny účinníku výroby. Při induktivním odběru, tedy odběru jalového výkonu ze sítě výrobnou, napěťový profil klesá, a naopak při kapacitním účinníku (dodávka jalového výkonu do sítě) napětí roste. Na Obr. 3.9 je graf změny napětí při připojení výroby s různým účinníkem oproti napětí bez připojené výroby. Vzhledem k napěťové podmínce změny napětí po připojení výroby maximálně o 2 % je jasné, že nám ke zvýšení připojitelnosti pomáhá pouze induktivní účinník.



Obr. 3.8: Napěťový profil při změně účinníku výroby; VM osazen v uzlu U7; VM - 1,5 MW

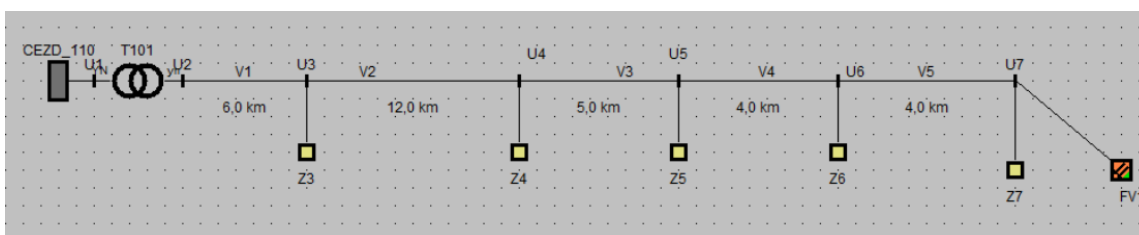


Obr. 3.9: Poměrné zvýšení napětí při změně účinníku výroby; VM osazen v uzlu U7; VM - 1,5 MW

### 3.4.2 Varianta 4 – Regulace napětí pomocí výroby

Pro analýzu regulace napětí pomocí výroby je nastaven transformátor 110 kV/22 kV tak, aby na sekundární straně TR byla hodnota přibližně 22 kV. Toto nastavení není v praxi běžné a je zde použito pro analýzu vlivu regulace napětí pouze pomocí výroby.

Pro analýzu je zvoleno zatížení vývodu 3,5 MVA, při kterém je již větší úbytek napětí podél vývodu. To napomáhá ke zvýšení působení jalového výkonu pro regulaci napětí. Vývod A s výrobnou je na Obr. 3.10. Modelované situace jsou opět vytvořeny a analyzovány v programu DNCalc.



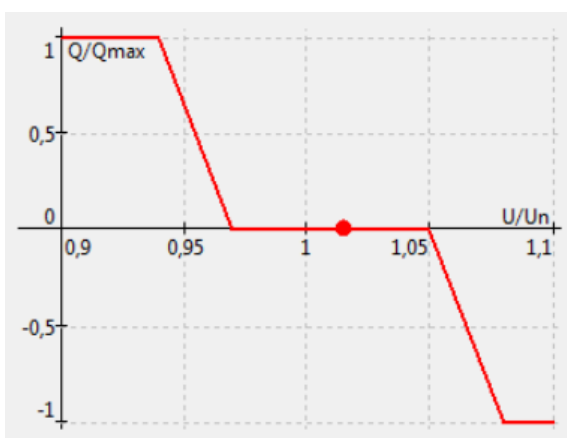
Obr. 3.10: Venkovní vývod A s výrobou v uzlu U7

#### Varianta 4.1 – Regulace Q(U) – (Vývod A; Z3,5; M + výroba v U7)

Pro analýzu regulace Q(U) pomocí výroby je využit venkovní vývod se zatížením 3,5 MVA s nastavením TR tak, aby na sekundární straně bylo napětí bez připojené výroby cca 22 kV. Meze regulace jsou nastaveny podle Obr. 3.11:

$$X_1 = 0,94 U_n; X_2 = 0,97 U_n; X_3 = 1,05 U_n; X_4 = 1,08 U_n$$

- Hodnota  $Q_{\max}$  je dána hodnotou dodávaného výkonu P při  $\cos \varphi = 0,9$

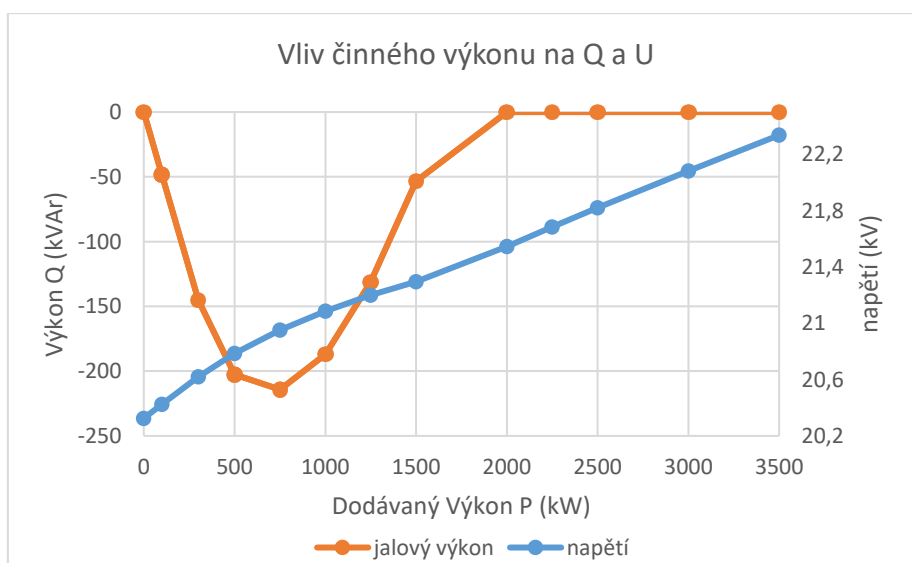


Obr. 3.11: Nastavení Q(U) regulace

Výrobná je v této variantě umístěna v uzlu U7 (na konci vývodu) a její dodávka je analyzována pro hodnoty výkonu od 100 kW do 3,5 MW. Postupně s rostoucím výkonem je zkoumán vliv na napětí, který je ovlivněn nejen dodávkou činného výkonu, ale i autonomní regulací Q(U).

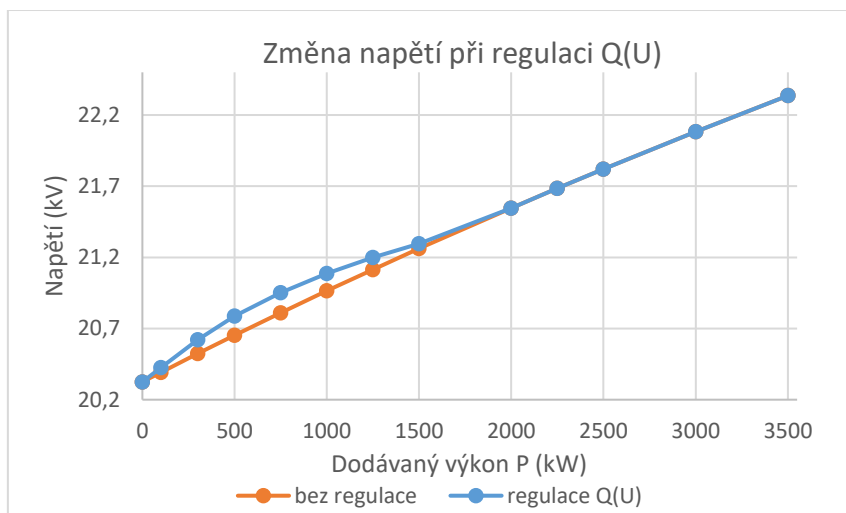
Napětí v uzlu U7 při regulaci se liší od napětí bez regulace v oblasti nižších hodnot dodávaného výkonu P až do výkonu 1,5 MW. Od této hodnoty se regulace nachází v pásmu necitlivosti a napětí je stejné jako v případě bez regulace.

Na grafu Obr. 3.12 je ukázána velikost jalového výkonu při nastavené Q(U) regulaci. Z nastavení regulace Q(U) je zřejmé, že v analyzovaném případě bude výrobná dodávat jalový výkon pouze do hodnoty  $U/U_n = 0,97$ . V tomto případě probíhá dodávka jalového výkonu do sítě až do hodnoty činného výkonu 1500 kW. Od této hodnoty je již  $U/U_n$  vyšší než 0,97, kdy se regulace nachází v pásmu necitlivosti. Nejvyšší jalový výkon je dodáván při hodnotě P přibližně 500 kW, kdy je hodnota  $U/U_n$  rovna 0,952, tudíž dle regulace je  $\cos \varphi = 0,962$ , pro který vychází jalový výkon 214,2 kVAr.



Obr. 3.12: Graf působení regulace Q(U) při změně dodávky P do sítě; výrobná v U7; Z3,5 MVA; vývod A

Výrobná se tedy pro nižší dodávané výkony snaží zvýšit napětí pomocí dodávky jalového výkonu do sítě. To je vidět na grafu Obr. 3.13, kde je napětí při regulaci Q(U) pro dodávaný výkon do 1500 kW vyšší než napětí bez regulace výrobní.

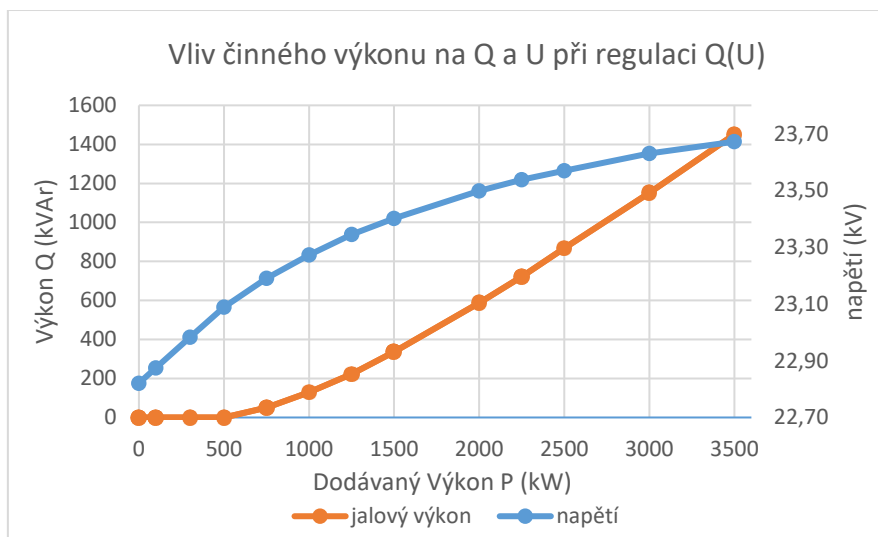


Obr. 3.13: Graf změny napětí při regulaci Q(U) výrobní v uzlu U7, Z3,5 MVA, vývod A

#### Varianta 4.1.1 - Regulace Q(U) – (Vývod A; Z0,65; M + výroba v U7)

Oproti předchozímu případu je změněno zatížení vývodu z 3,5 MVA na hodnotu 0,65 MVA, tudíž je vývod v odlehčeném stavu. Transformátor je nastaven na napětí přibližně 23 kV. Tímto nastavením je docíleno napětí v uzlu U7 bez výrobní 22,82 kV. Připojením výrobní napětí v uzlu U7 poroste, a proto je zde zapnuta regulace napětí Q(U), která bude velikost napětí pomocí jalového výkonu regulovat. Regulace Q(U) je nastavena na stejné hodnoty jako v předchozím případě.

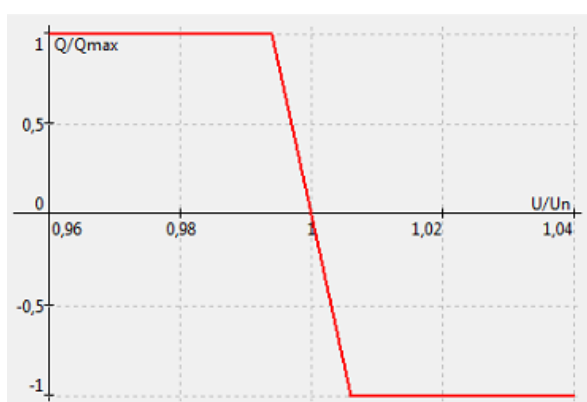
Na Obr. 3.14 je graf vlivu činného výkonu na velikost napětí a jalového výkonu. Pro malé dodávané výkony výrobnou je napětí v pásmu necitlivosti regulace a výrobní pracuje s účinníkem 1. Pro výkony od 750 kW výrobní začíná odebírat jalový výkon z důvodu regulace napětí v místě připojení. Odebíraný jalový výkon roste s velikostí činného výkonu dodávaného výrobnou. Nejvyššímu dodávanému činnému výkonu ( $P = 3,5 \text{ MW}$ ) odpovídá odebíraný výkon  $Q = 1451 \text{ kVAr}$ . To je již poměrně vysoký odebíraný jalový výkon, který je nutné přenášet soustavou a který způsobuje navýšení zatížení sítě.



Obr. 3.14: Graf napětí a jal. výkonu v uzlu U7 při dodávce P výrobnou s regulací Q(U); Z0,65 MVA

#### Varianta 4.2 – regulace výroby na konstantní napětí U (konst. U) - (Vývod A; Z3,5; M + výroba v U7)

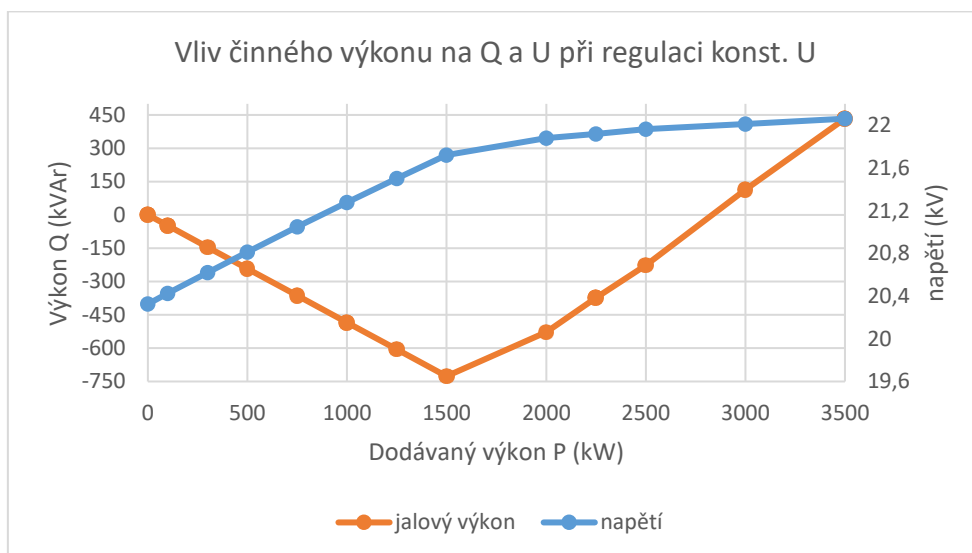
Jelikož v programu DNCalc není přímo zařazena funkce regulace na konstantní napětí U, byla pro potřeby analýzy upravena funkce autonomní regulace Q(U). Funkce je nastavena bez pásma necitlivosti a jsou pouze zadány meze, v nichž dojde k maximálnímu odebíranému či dodávanému výkonu Q. V programu DNCalc nelze nastavit charakteristika na konstantní napětí přesně, a tudíž v oblastech blízkých jmenovité hodnotě napětí může mít regulace malou odchylku, kdy napětí není doregulováno přesně na zadanou hodnotu. Tato nepřesnost funkce je svou velikostí pro účely analýzy zanedbatelná. Upravená funkce na konst. U je na Obr. 3.15. Maximální jalový výkon  $Q_{max}$  je určen z dodávaného výkonu P při  $\cos \varphi 0,9$ .



Obr. 3.15: Charakteristika upravené regulace na konstantní napětí U (konst. U)

Stejně jako u varianty 4.1 je uvažován venkovní vývod se zatížením 3,5 MVA a napětím na sekundární straně TR přibližně 22 kV.

Analýzou příkladu s regulací konst. U je zřejmé, že dodávaný jalový výkon roste s činným výkonem až do bodu, kdy se napětí dostane na jmenovitou hodnotu. Do tohoto bodu je účinník roven 0,9 kapacitní, aby co nejvíce podpořil napětí v místě připojení. Graf tohoto vlivu je na Obr. 3.16. Jalový výkon roste až do hodnoty výkonu  $P = 1,5$  MW, kdy se napětí dostane na jmenovitou hodnotu 22 kV. Od této chvíle je již výkon Q regulován pro dosažení  $U_n$ , tudíž je měněn účinník, se kterým výrobná pracuje. Při hodnotě činného výkonu 2,9 MW již není potřeba dodávat jalový výkon a napětí je na jmenovité hodnotě. Při dalším růstu činného výkonu, výrobná začíná pracovat s induktivním účinníkem, a naopak ze sítě jalový výkon odebírá.



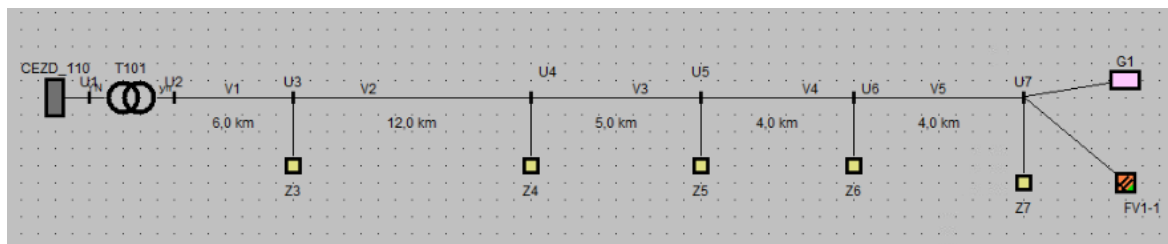
Obr. 3.16: Graf působení regulace na konst. U (U/Q); pro vývod A s výrobnou v U7

Napětí v tomto modelu se ustálí na hodnotě 22 kV až při dodávce činného výkonu 1,5 MW. Pro udržení nastavené konstantní hodnoty napětí bez použité výrobní nebo pouze s nižším dodávaným výkonem výrobní je možné do sítě přiřadit kompenzační zařízení.

### Regulace na konst. U pomocí kompenzačních prostředků

Ve výše uvedené variantě (Vývod A; Z3,5; M + výroba v U7; regulace konst. U) je bez dodávky činného výkonu napětí nižší než požadované, tudíž je pro kompenzování úbytku napětí do sítě nutné přiřadit kondenzátorové baterie. Toto zapojení je ukázáno na Obr. 3.17.





Obr. 3.17: Venkovní vývod A s výrobnou a přidaným kompenzačním zařízením v uzlu U7

Přiřazením kompenzačního zařízení do modelu sítě je zjištěno, že pro úplné kompenzování napětí při nulové dodávce výkonu výrobnou je potřeba připojit kondenzátorové baterie s celkovým výkonem 3,5 MVar. Takto velký kompenzační výkon je spojený s vyšším dodatečným proudovým zatížením, a tedy i s vyššími ztrátami. Jelikož jsou u vývodu uvažované zátěže ve všech uzlech s účínkem 0,95 induktivní, část výkonu kondenzátorových baterií je využita na hrazení odběru jalového výkonu jednotlivých spotřeb a není nutné přenášet celý kompenzační výkon ze sítě. Tabulka Tab. 3.8 a Tab. 3.9 nabízí srovnání bilance výkonů s použitím kompenzačního zařízení a s případem bez kompenzačního zařízení.

Tab. 3.8: Porovnání ztrát pro Vývod A; Z3,5; M; bez kompenzace a s kompenzací

Ztráty ve větvích				
	bez kompenzace		kapacitní kompenzace 3,5 MVar	
	dP (kW)	dQ (kVar)	dP (kW)	dQ (kVar)
T101	48,249	304,713	48,832	309,601
V1	52,390	82,401	56,806	89,450
V2	149,548	130,888	181,117	158,985
V3	45,800	39,770	65,308	57,123
V4	25,255	21,597	46,194	40,250
V5	9,927	7,812	40,260	34,896

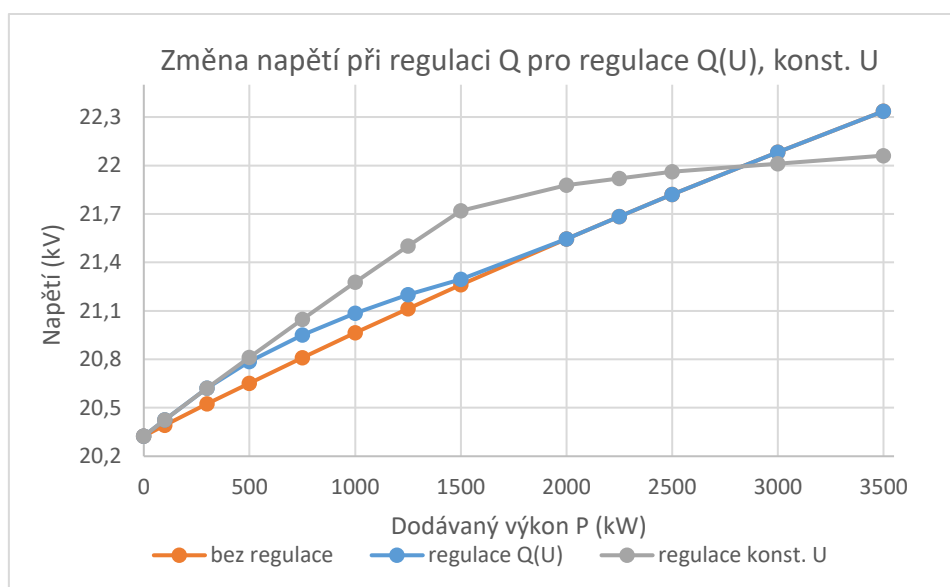
Tab. 3.9: Výkonová bilance pro Vývod A; Z3,5; M; bez kompenzace a s kompenzací

Bilance výkonů			
		bez kompenzace	kapacitní Kompenzace 3,5 MVar
dP [kW]		331,2	438,5
Q [kVar]	tok z napájecího uzlu	1,836,180	-1560,4
	spotřebováno	1249,0	1249,0
	vyrobena	0	-3 499,7
dQ [kVar]		587,2	690,3

V tomto případě nedošlo k tak velkému navýšení ztrát, a to z již zmíněného důvodu, že část dodávaného jalového výkonu kompenzačního zařízení je využita pro spotřeby podél vývodu A. Celkový jalový výkon ze sítě zde obrací svůj charakter a místo odebrání jalového výkonu z nadřazené sítě je po kompenzaci jalový výkon do nadřazené sítě dodáván.

### Porovnání napětí v uzlu U7 při regulaci jalového výkonu

V tomto případě jsou porovnány napětí v uzlu výroby U7 bez regulace, s regulací  $Q(U)$  a regulací na konst. U. Na Obr. 3.18 je porovnání velikosti napětí při regulaci. Je použito stejného vývodu jako v předchozích případech, tedy venkovního vývodu se zatížením 3,5 MVA a s umístěnou výrobou v uzlu U7.

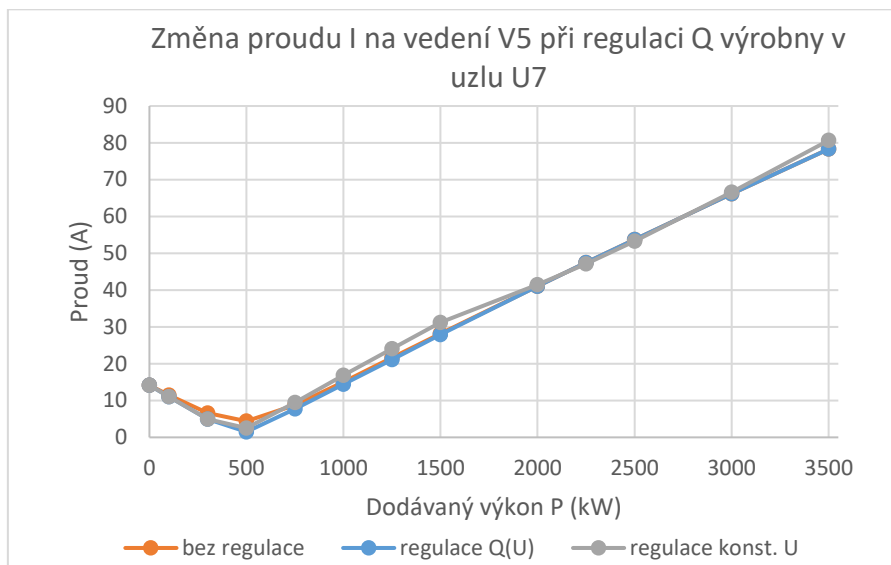


Obr. 3.18: Graf změny napětí vlivem regulace  $Q(U)$  a konst. U výroby uv uzlu U7; Z3,5 MVA

Regulace  $Q(U)$  pro malé dodávané výkony má v bodě připojení nízký poměr  $U/U_n$  a snaží se dodávkou jalového výkonu zvýšit napětí v místě připojení. Vzrůstajícím výkonem, a tedy i napětím, je poměr  $U/U_n$  vyšší a dle nastavené regulace již není potřeba dodávat tak velký výkon  $Q$ . V tom se liší s regulací na konstantní napětí, která se snaží pro každý dodávaný výkon doregulovat napětí na konstantní hodnotu  $U$ , v tomto případě 22 kV. Proto je až do hodnoty dodávaného výkonu 2,9 MW napětí při regulaci konst. U vyšší než při regulaci  $Q(U)$  a bez regulace. Naopak na dodávaných výkonech od 2,9 MW lze pozorovat opačný jev, kdy napětí bez regulace a s regulací  $Q(U)$  je vyšší než napětí s regulací konst. U, která v těchto bodech pracuje s induktivním účínkem, aby naopak napětí v uzlu U7 snížila.

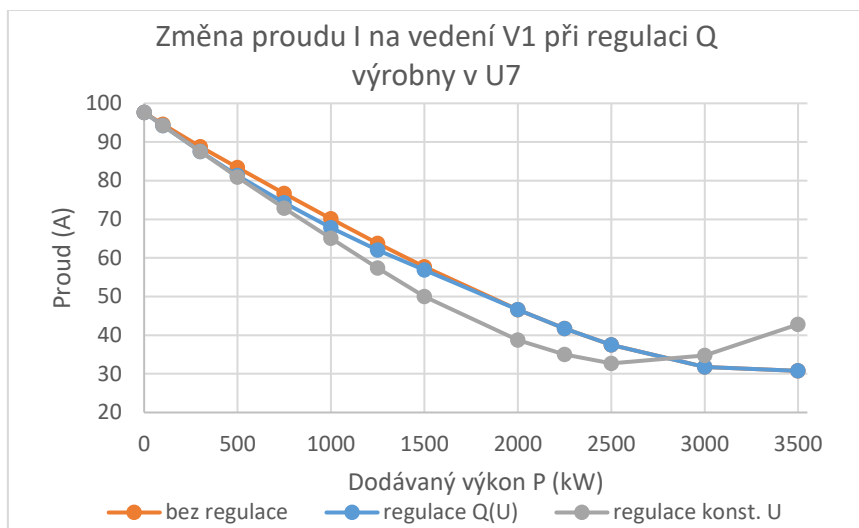
### Proudové zatížení při změně regulace jalového výkonu výroby

Vzhledem k vnořené výrobě na konci vedení v uzlu U7 a zapojení sítě na opačné straně je zkoumána velikost proudového zatížení na vedení V5 na konci vývodu a V1 na začátku vývodu. Na Obr. 3.19 a Obr. 3.20 jsou grafy velikosti proudu pro regulaci  $Q(U)$  a konst.  $U$  s porovnáním proudů bez regulace. To je zkoumáno pro venkovní vývod A se zatížením 3,5 MVA.



Obr. 3.19: Proudové zatížení na vedení V5 při výrobě s regulací  $Q(U)$  a konst.  $U$ , Z3,5 MVA

V obou případech regulace nejdříve s rostoucím dodávaným výkonem výrobnou proud na vedení V5 klesá. To je způsobeno zátěží ve stejném uzlu, jako je výrobná, a tudíž je tento proud dodáván z výroby a nezatěžuje vedení V5. S dalším růstem dodávaného výkonu již proud na vedení roste. Rozdíl mezi regulacemi je způsoben vyšším dodávaným jalovým výkonem v případě regulace na konstantní  $U$ , kdy je opět proud pro malé výkony nižší z důvodu vyššího dodávaného jalového výkonu, který je nejdříve odebíráán spotřebou ve stejném uzlu jako je výrobná.



Obr. 3.20: Proudové zatížení na vedení V1 při výrobě s regulací Q(U) a konst. U, Z3,5 MVA

Na grafu Obr. 3.20 je snížení proudu při regulaci na vedení V1 způsobeno dodávkou jalového výkonu výrobnou v uzlu U7, a není proto nutné tento výkon (proud) dodávat ze sítě. Pro oblast vysoké dodávky činného výkonu výrobnou (od hodnoty  $P = 2,9$  MW) je pro regulaci konst. U proud zvyšován. To je dáno nastavením regulace na 22 kV, kdy je pro vysoké výkony napětí snižováno odběrem výkonu Q výrobnou, čímž ale dochází k navýšení jalového proudu, a tím i celkového proudu na vedení V1.

### Porovnání výkonových ztrát a výkonové bilance

Pro výše uvedený vývod A zatížený 0,65 MVA s výrobnou v uzlu U7 je zkoumán vliv regulace napětí na výkonové ztráty a bilanci. V tabulkách Tab. 3.10 a Tab. 3.11 je porovnání pro výrobnou s dodávkou 3,5 MW bez regulace, s regulací Q(U) a regulací na konstantní napětí. V tabulce Tab. 3.10 jsou vyobrazeny činné a jalové ztráty v jednotlivých větvích vedení.

Tab. 3.10: Ztráty ve větvích pro vývod A, Z3,5, M + výrobná 3,5 MW s různým typem regulace

Ztráty ve větvích – výkon výrobní 3,5 MW						
	bez regulace		regulace Q(U) 1451 kVAr		regulace konst. U 1695 kVAr	
	dP (kW)	dQ (kVAr)	dP (kW)	dQ (kVAr)	dP (kW)	dQ (kVAr)
T101	50,1	286,4	50,4	295,3	50,5	298,0
V1	18,6	27,7	26,7	40,8	29,2	44,8
V2	76,7	64,4	107,1	91,9	116,6	100,5
V3	36,2	30,6	48,3	41,6	52,2	45,1
V4	31,6	26,8	41,0	35,4	44,1	38,1
V5	33,5	28,5	42,7	36,9	45,7	39,6
	U (kV)		U (kV)		U (kV)	
uzel U7	24,52		23,67		23,52	

V tabulce Tab. 3.11 je bilance celkových ztrát na vývodu a jalové toky výkonu na vývodu.

Tab. 3.11: Bilance výkonů pro vývod A, Z3,5; M + výroba 3,5 MW s různým typem regulace

Bilance výkonů – výkon výroby 3,5 MW				
		bez regulace	regulace Q(U) Q = 1451 kVAr	regulace konst. U Q = 1695 kVAr
dP [kW]		246,7	316,2	338,2
Q [kVAr]	tok z napájecího uzlu	667,1	2195,8	2464,3
	spotřebováno	203	1654	1898,1
dQ [kVAr]		464,4	541,8	566,2

Z porovnání tabulek je zřejmé, že největší ztráty vznikají při regulaci na konstantní napětí, při které je využíváno nejvyššího odebíraného jalového výkonu ( $Q = 1695$  kVAr). To je dáno charakteristikou regulace, ve které se regulace na konstantní U snaží co nejvíce doregulovat napětí na zadanou hodnotu. Při regulaci Q(U) je odebíraný výkon nižší ( $Q = 1451$  kVAr), a tudíž i ztráty na vývodu jsou celkově nižší. Naopak nejnižší ztráty jsou pro variantu bez použití regulace, ale v tomto případě je v uzlu výroby 24,52 kV, což překračuje povolenou mez napětí v síti vn a tudíž by nebylo možné dodávat činný výkon 3,5 MW do sítě.

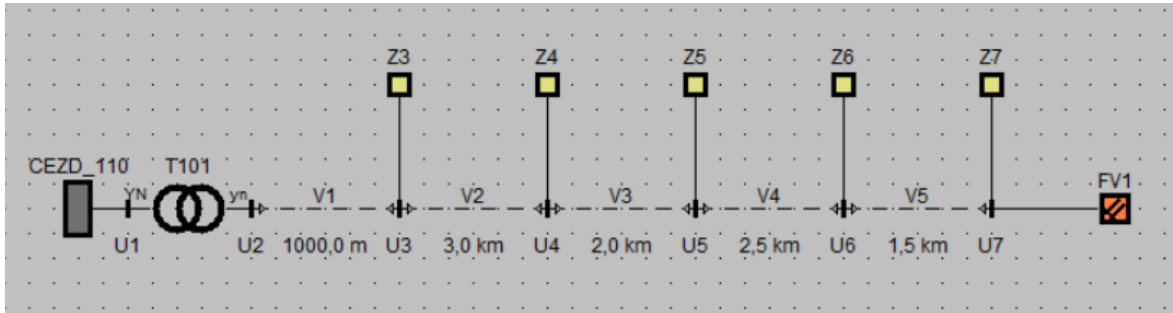
### 3.4.3 Regulace Q na kabelovém vývodu (vývod B; Z-3,5; M + výroba U7)

Kabelový vývod B má použity nižší vzdálenosti vedení s vyššími průřezy vodičů. Obecně v porovnání s venkovním vedením má nižší indukční reaktanci a vyšší kapacitní susceptanci. Z toho vychází nižší úbytky napětí  $\Delta U$  a jalové ztráty  $\Delta Q$  vlivem nižší reaktance. Parametry vedení jsou porovnány v Tab. 3.12.

Tab. 3.12: Parametry venkovního a kabelového vedení

Typ	Průřez [mm <sup>2</sup> ]	Un [kV]	R [Ω/km]	X [Ω/km]	B [μS/km]	I <sub>max</sub> [A]
<b>Venkovní vedení</b>						
120AlFe6	120	22	0,225	0,363	1,469	357
70AlFe6	70	22	0,434	0,391	1,427	225
<b>Kabelové vedení</b>						
120AXEKCY	120	22	0,253	0,219	75	307
70AXEKCY	70	22	0,443	0,182	63	263

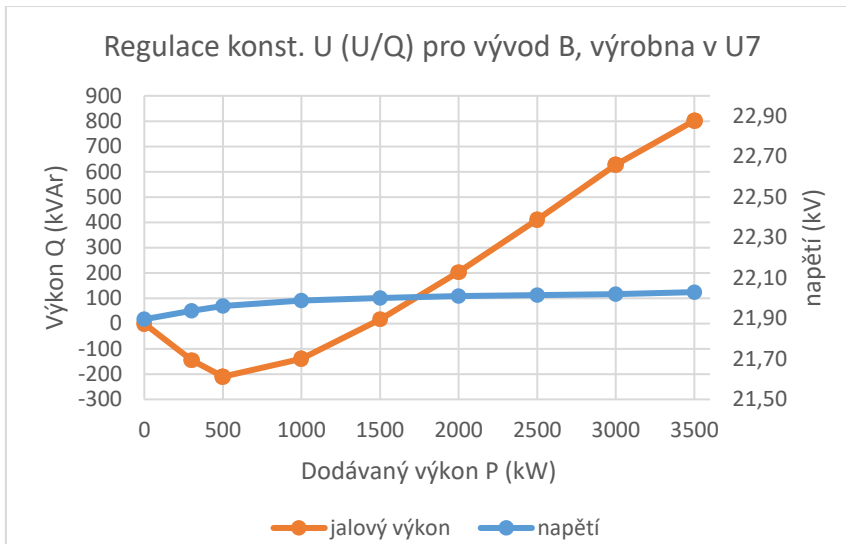
V této variantě je použit vývod B (kabelový) s vyšším zatížením 3,5 MVA a výrobnou v uzlu U7 (na konci vedení). Pro vývod, stejně jako pro předchozí variantu, je nastaven transformátor 110 kV/22 kV na hodnotu napětí přibližně 22 kV. Kabelový vývod B s výrobnou na konci vedení je na Obr. 3.21.



Obr. 3.21: Kabelový vývod B s výrobnou v uzlu U7

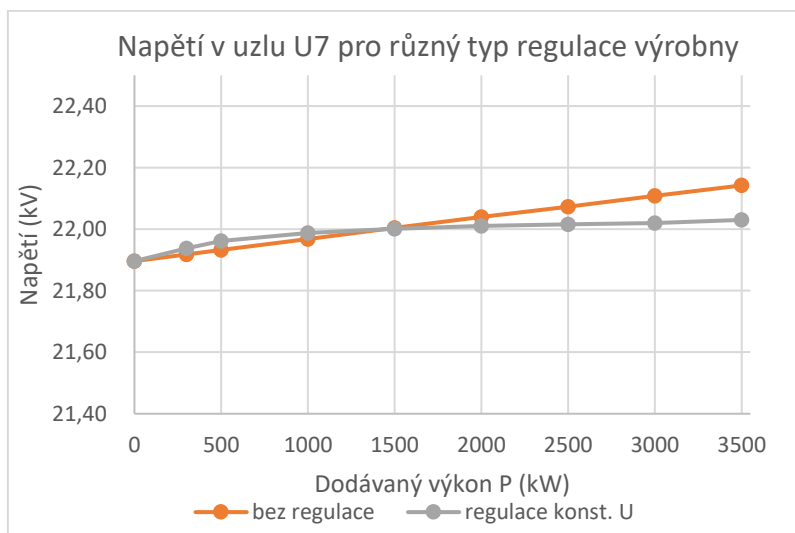
Z analýzy uvedené varianty je potvrzen předpoklad menšího vlivu zatížení na úbytek napětí oproti vývodu A s venkovním vedením. Pro vysoké zatížení 3,5 MVA vychází úbytek napětí  $\Delta U$  na konci vývodu na 0,47 %, napětí na konci vývodu je tedy rovno 21,89 kV. Z důvodu malého úbytku napětí by v tomto případě autonomní  $Q(U)$  regulace v žádném bodě neregulovala, a proto není zkoumána.

Regulace konst.  $U$  ( $U/Q$ ) se i při malém úbytku snaží doregulovat napětí na 22kV, kde v tomto případě potřebuje dodat relativně vysoký výkon  $Q$ . Na Obr. 3.22 je graf regulace konst.  $U$ . Zpočátku z důvodu malého dodávaného činného výkonu výrobnou je do sítě dodáván i jalový výkon pro zvýšení napětí v místě připojení. Pro hodnotu činného výkonu přibližně 1,5 MW je napětí vlivem dodávky  $P$  na jmenovité hodnotě a regulace jalového výkonu je proto nulová. S dalším růstem dodávky činného výkonu je již pro udržení konstantní hodnoty napětí nutné odebírat jalový výkon ze sítě. Při dodávané hodnotě 3,5 MW je odebírán jalový výkon 0,802 MVar.



Obr. 3.22: Graf regulace na konst. U pro vývod B; Z3,5+ výroba

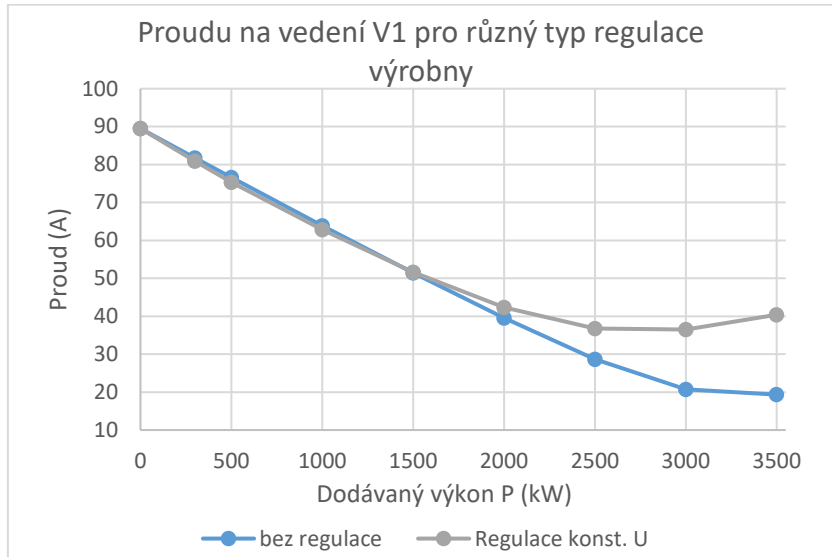
Napětí v bodě výrobní je pro dodávaný činný výkon bez regulace 3,5 MW rovno 22,14 kV. V porovnání s napětím při zapnuté regulaci konst. U, kdy je napětí 22,03 kV je odebíraný jalový výkon velmi vysoký ( $Q = 0,802$  MVar), a to především při uvážení, že je napětí změněno pouze o 112 V. Vzhledem k vysokému odebíranému jalovému výkonu je ze sítě odebírána vysoký jalový proud, který způsobuje dodatečné zatížení vedení a je nutné ho přenášet celým vývodem. Srovnání napětí a proudů s použitím regulace konst. U a bez regulace je na grafech Obr. 3.23 a Obr. 3.24.



Obr. 3.23: Graf vlivu regulace konst. U výrobní na napětí v uzlu U7; VM v uzlu U7, Z3,5

Pro menší dodávaný činný výkon je lehce menší proud na vedení V1 při regulaci konst. U, který je způsobený dodávkou jalového proudu výrobnou pro zátěže, a není proto nutné jalový proud přenášet z nadřazené sítě. Na opačné straně, pro velký dodávaný výkon,

je proud při regulaci konst. U více jak dvojnásobný. To je způsobeno odběrem jalového výkonu pro regulaci napětí, a je proto nutné odebírat jalový proud ze sítě. Pro dodávaný výkon 3,5 MW je proud bez regulace 19,34 A a proud při regulaci konst. U je 40,38 A.



Obr. 3.24: Graf vlivu regulace konst. U výroby na proud vedení V1; VM v uzlu U7, Z3,5

Výše uvedený vliv, kdy pro malou změnu napětí je potřeba vysokého jalového výkonu, je o to významnější při odlehčeném stavu sítě.

### Regulace na konstantní napětí U, vývod B; Z-0,65; M + výroba U7

V tomto příkladě je provedena regulace na konstantní napětí U výroby pro kabelový vývod v odlehčeném stavu zatížení 650 kVA. Transformátor je opět nastaven na hodnotu sekundárního napětí přibližně 22 kV.

Při odlehčeném zatížení je napětí podél vývodu ve všech uzlech ustálené na hodnotě 22,1 kV. Pro výrobu v uzlu U7 je napětí při dodávce výkonu 3,5 MW v bodě U7 rovno 22,34 kV. Z předchozí varianty je zřejmé, že regulací jalového výkonu se nám příliš napětí nezmění, a navíc je vedení dodatečně zatěžováno jalovým proudem. Napětí při dodávce výkonu s  $\cos \varphi = 0,9$  není v bodě U7 doregulováno na jmenovitou hodnotu 22 kV a je mírně vyšší. Proto je zde zkoumán vliv regulace při nastavení regulace napětí v místě připojení na konstantní hodnotu napětí 22,2 kV. Vliv této regulace je porovnán v tabulkách Tab. 3.13 a Tab. 3.14.



Tab. 3.13: Porovnání vlivu regulace konst. U na napětí a výkon Q; vývod B, Z0,65, M + výroba

Výkon Dodávaný P (kW)	Napětí v uzlu U7			Jalový výkon	
	U (kV) - bez regulace	U (kV) konst. U (22 kV)	U (kV) konst. U (22,2kV)	Q (kVAr) konst. U (22kV)	Q (kVAr) konst. U (22,2 kV)
0	22,10	22,10	22,10	0,0	0,0
300	22,12	22,10	22,14	145,3	-145,3
500	22,13	22,10	22,16	242,2	-206,0
1000	22,17	22,10	22,19	484,3	-137,6
1500	22,20	22,10	22,20	726,5	11,2
2000	22,24	22,10	22,21	968,6	193,3
2500	22,27	22,10	22,21	1210,8	193,3
3000	22,30	22,10	22,22	1453,0	607,2
3500	22,34	22,10	22,22	1695,1	817,5

Tab. 3.14: Porovnání vlivu regulace konst. U na proudové zatížení V5; vývod B; Z0,65; M + výroba

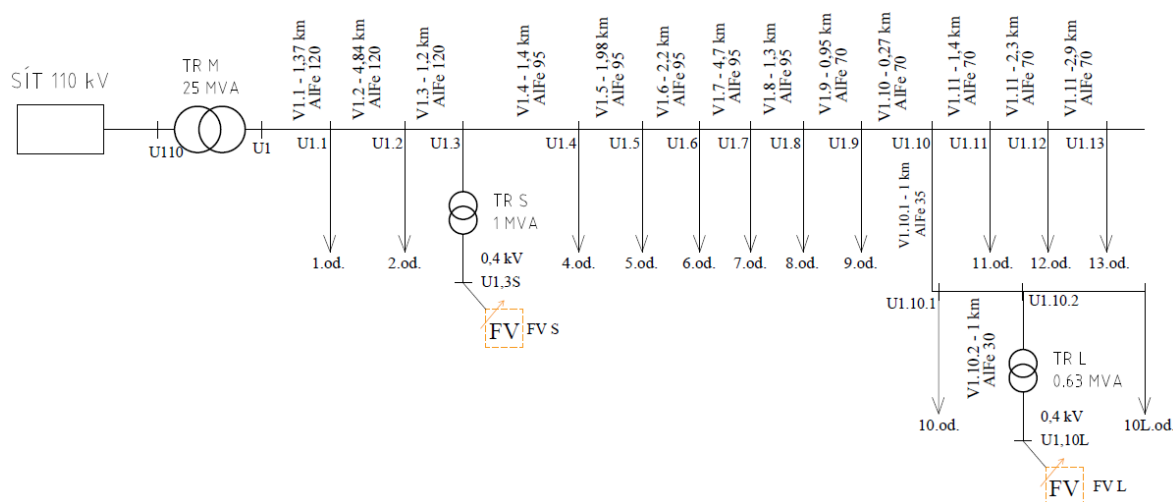
Výkon Dodávaný P (kW)	Proudy na vedení V5		
	I (A) - bez regulace	I (A) - konst. U (22 kV)	I (A) – konst. U (22,2 kV)
0	2,58	2,58	2,58
300	5,40	6,19	6,98
500	10,59	11,99	12,17
1000	23,58	26,49	23,94
1500	36,54	41,00	36,54
2000	49,47	55,51	49,71
2500	62,35	70,03	49,71
3000	75,20	84,54	76,97
3500	88,01	99,06	90,81

Z tabulek vychází, že při regulaci na konstantní napětí 22,2 kV je potřeba nižšího jalového výkonu než při regulaci na napětí 22 kV a tento výkon se mění z kapacitního na induktivní jalový výkon. Vzhledem k malému vlivu regulace konst. U na změnu napětí, kdy je pro regulaci odebrán vysoký jalový výkon způsobující dodatečné zatížení sítě, nemá regulace konst. U pro tento vývod prakticky téměř žádný význam z hlediska regulace napětí.

## 4 Specifická technická řešení

V této části je namodelována síť tvořena dvěma vývody. Tyto vývody jsou pro potřeby analýzy upraveny do zjednodušeného tvaru. Všechny vytvořené modely sítí jsou modelovány pomocí programu DNCalc.

Prvním vývodem je vývod „Kasejovice“ na napěťové hladině 22 kV vycházející ze stanice Mirovice. Jedná se o vedení napájející především občanskou zástavbu s částečným podílem pro zemědělství a velmi malým podílem napájení průmyslových závodů. K vývodu jsou připojeny dvě fotovoltaické elektrárny. První FV S je s instalovaným výkonem 900 kVA a je instalována blíže k začátku vývodu do uzlu U1.3. Druhá FVE L je s instalovaným výkonem 600 kVA a je umístěna dále od začátku vývodu v samostatné odbočce uzlu U1.10. Mapa vývodu je v příloze 3, zjednodušené schéma na Obr. 4.1.

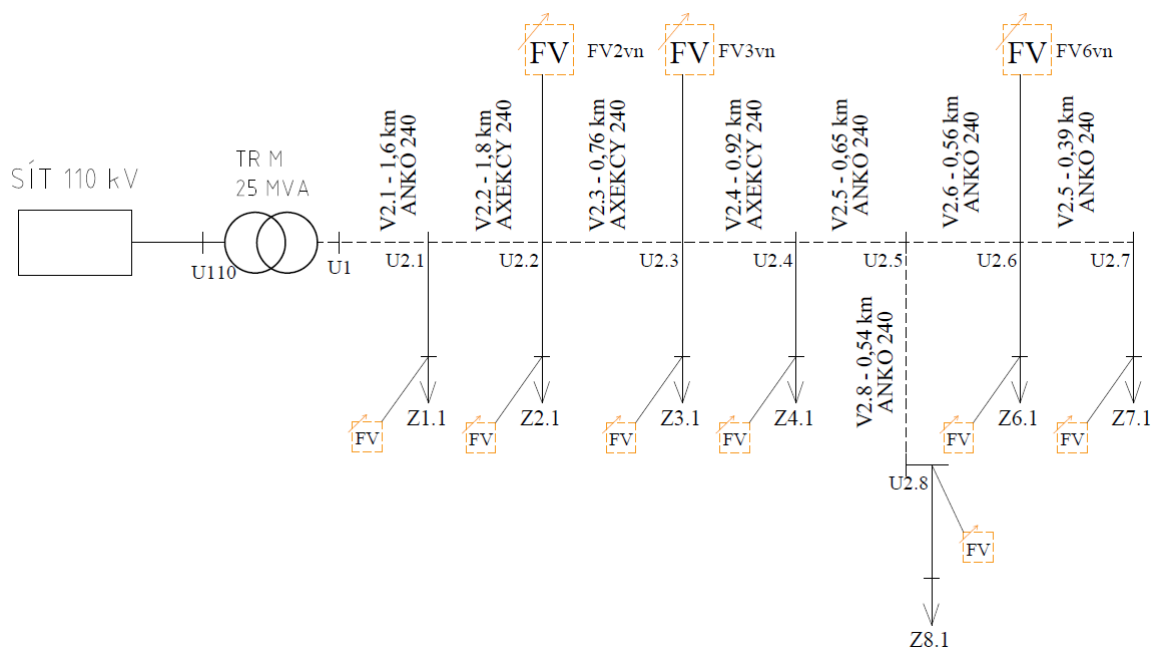


Obr. 4.1: Zjednodušené schéma – Vývod „Kasejovice“ – venkovní vedení

Celkově má vývod 95 transformátorů s různou velikostí zatížení rozmístěných podél vývodu. Ve zjednodušeném schématu jsou distribuční transformátory vynechány a počet vývodů je zjednodušen do 13 uzlů, do kterých byla celková zátěž podél vývodu rozdělena tak, aby odpovídala reálnému zatížení. Kmen vývodu je dlouhý 26,8 km. Pro vedení po uzel U1,3 je použito AIFe 120, od tohoto uzlu je použito vedení AIFe 95 a od uzlu U1.9 vedení AIFe 70. Pro odbočku v uzlu U1.10 je využito lan AIFe 35. Zjednodušený vývod se všemi parametry se nachází v příloze 5.

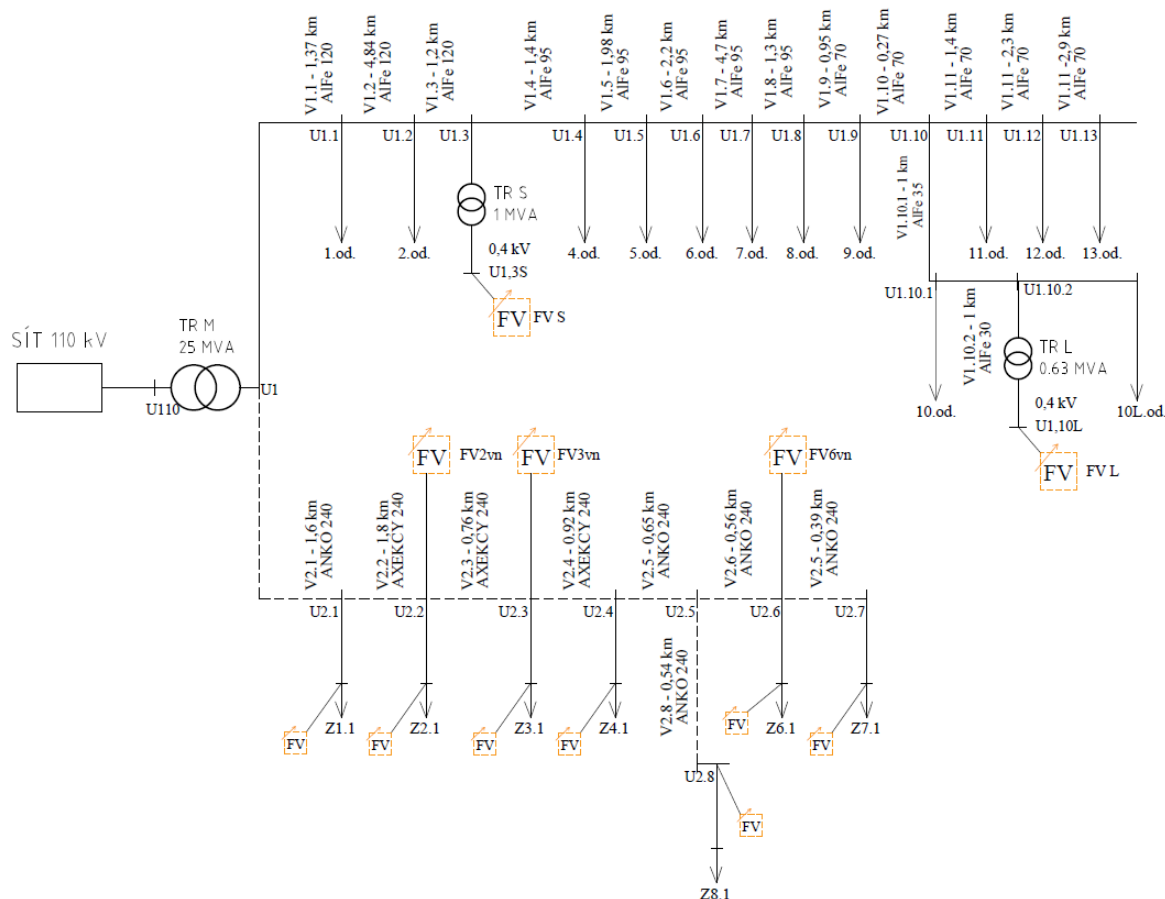
Druhým vývodem je typový vývod 11 charakterizující průmyslovou zónu s použitím pouze kabelového vedení. Podél vývodu je umístěno 21 transformátorů s různě velikou

instalovanou spotřebou. Do vývodu se spotřebou jsou zapojeny i malé fotovoltaické elektrárny s velikostí v desítkách kW. Mimo to je vývod osazen třemi většími FVE. První je umístěna do uzlu U2.2 s velikostí instalovaného výkonu 2300 kW. Druhá je umístěna v uzlu U2.3 s instalovaným výkonem 3000 kW. Poslední je umístěna téměř na konci kmene vývodu, v uzlu U2.5 a její instalovaný výkon je 482 kW. Vývod je pro potřeby analýzy zjednodušen do 7 vývodů s délkou hlavního kmene 6,7 km. Vývod je složen z kabelového vedení s průřezem 240 mm<sup>2</sup> typu AXEKCY nebo ANKO. Zjednodušený vývod je na Obr. 4.2, celkový vývod s parametry je v příloze 4.



Obr. 4.2: Zjednodušené schéma – typový vývod 11 – průmyslová zóna

Dva výše uvedené vývody jsou připojeny do stejného uzlu napájecího transformátoru TR M 110 kV/22 kV. Celkové schéma vývodu je na Obr. 4.3. Čerchované čáry na schématu značí použití kabelového vedení.



Obr. 4.3: Schéma spojeného vývodu Kasejovice s vývodem průmyslové zóny

Transformátor 110 kV/22 kV je s hladinovou regulací HRT a jeho parametry jsou v Tab. 4.1.

Tab. 4.1: Parametry transformátoru TR M 110 kV/22 kV

Parametry transformátoru 110kV/22kV								
Un1 [kV]	Un2 [kV]	St [MVA]	Pk [kW]	uk [%]	io [%]	Po [kW]	Počet odb.	Krok [%]
110	23	25	161.8	11,2	0,93	33,3	8	2

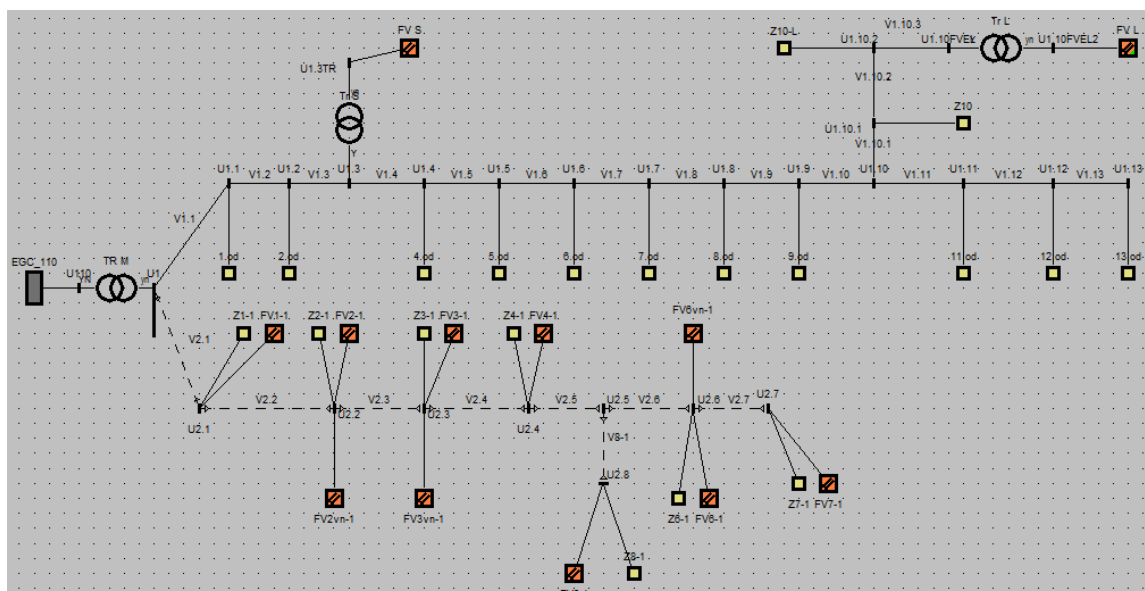
Na vývodu je zkoumán vliv při různých stavech v síti:

- Stav nízkého zatížení bez dodávky FVE
- Stav nízkého zatížení s dodávkou FVE
- Stav vysokého zatížení bez dodávky FVE
- Stav vysokého zatížení s dodávkou FVE

Zatížení vývodu:

- Nízké zatížení: Celkové zatížení je 1,96 MVA. Spotřeba je rozdělena do jednotlivých odboček podél vývodu v poměru k instalovaným výkonům distribučních transformátorů. Pro vývod Kasejovice je výkon zatížení roven 1042 kVA a pro vývod průmyslové zóny 918 kVA. Uvažovaný účinník spotřeb je roven 0,98 induktivní a je pro všechny spotřeby stejný.
- Vysoké zatížení: Celkové zatížení je 9,25 MVA. Pro vývod Kasejovice je zatížení rovno 5,2 MVA a pro vývod průmyslové zóny 4,04 MVA. Pro vysoké zatížení je také uvažován účinník 0,98 induktivní.

Namodelovaný vývod v programu DNCalc je ukázán na Obr. 4.4.

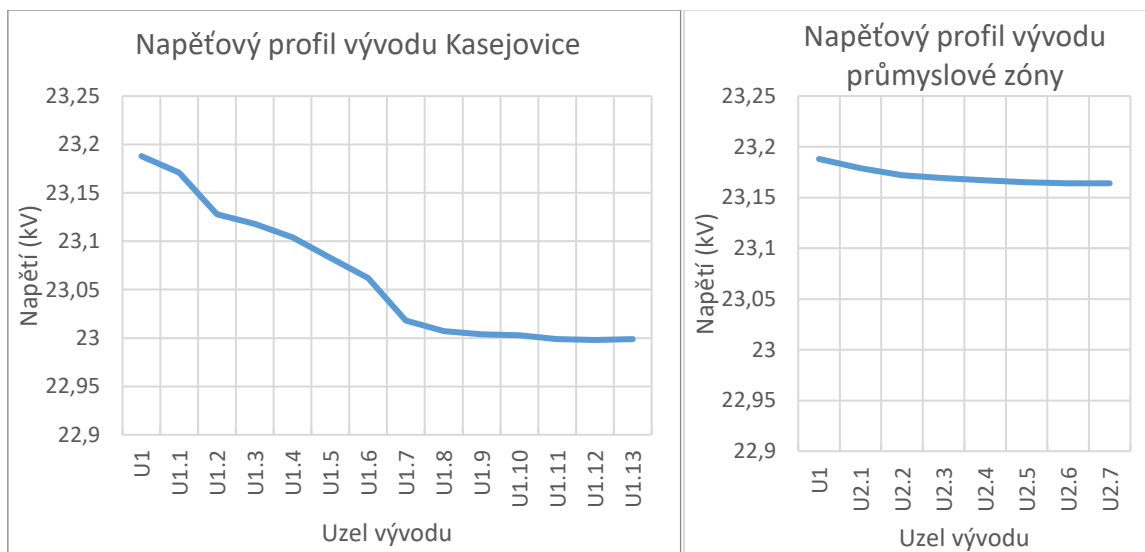


Obr. 4.4: Namodelovaný vývod složený z vývodu Kasejovice a vývodu průmyslové zóny

#### 4.1 Příklad 1 - varianta venkovního vývodu Kasejovice a kabelového vývodu průmyslové zóny

##### Minimální zatížení bez dodávky FVE

Tato varianta odpovídá stavu sítě v nočních hodinách. Vnořené výrobní FVE nedodávají do sítě žádný výkon. Celkové uvažované zatížení obou vývodů je rovno 1,96 MVA a je rozděleno do jednotlivých odboček úměrně velikosti instalovaného výkonu distribučních transformátorů na odbočkách. Transformátor 110 kV/22 kV je nastaven na odbočce 2, kdy je na sekundární straně TR napětí 23,1 kV. Graf napěťového profilu je na Obr. 4.5.

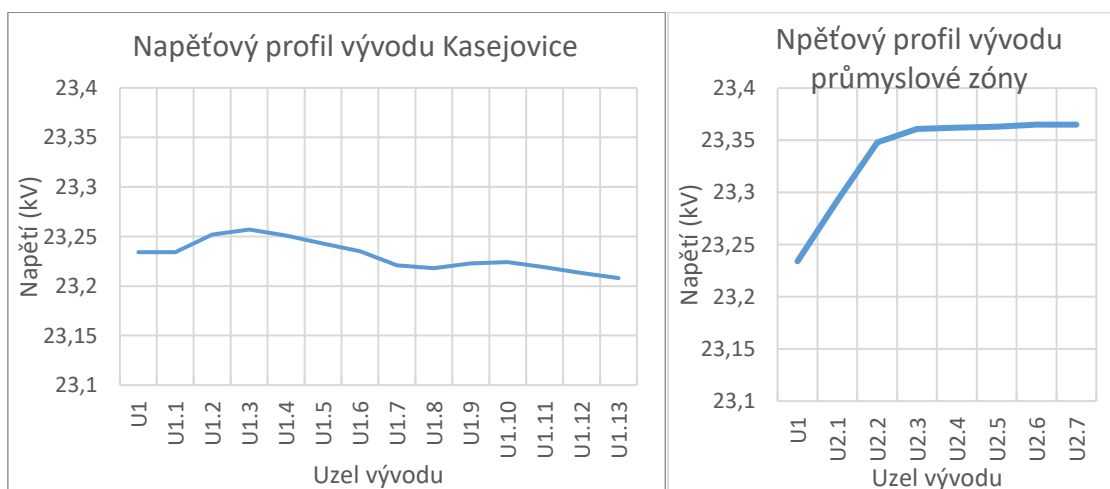


Obr. 4.5: Graf napěťového profilu vývodu Kasejovice a průmyslové zóny s nízkým zatížením bez FVE

Napěťový profil vývodu Kasejovice má oproti vývodu průmyslové zóny strmější pokles. To je způsobeno mnohem větší délkou vedení a použitím venkovního vedení nižšího průřezu.

#### Nízké zatížení s maximálním dodávaným výkonem FVE

Velikost spotřebovaného výkonu je stejná jako v předchozím případě. Výrobní dodávají maximální výkon, odpovídající pro vývod Kasejovice, 1,5 MVA rozdělený do dvou výroben, viz schéma na Obr. 4.1. Vývod průmyslové zóny dodává celkově výkon 6,23 MW rozdělený dle popisu vývodu, viz Obr. 4.2. Graf napěťového profilu pro nízké zatížení s FVE je na Obr. 4.6.

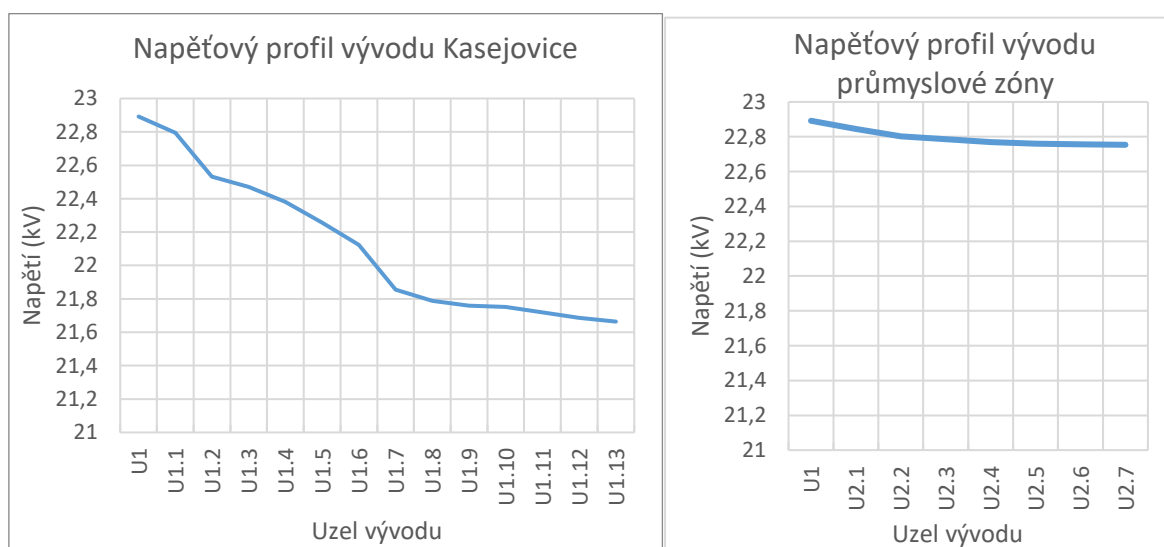


Obr. 4.6: Graf napěťového profilu vývodu Kasejovice a průmyslové zóny s nízkým zatížením a dodávkou výkonu FVE

Na vývodu Kasejovice je v uzlech U1.3 a U1.9 na napěťovém profilu nárůst napětí způsobený dodávkou výkonu do sítě pomocí vnořených fotovoltaických výroben. Tím je celý napěťový profil vyrovnanější. U vývodu průmyslové zóny napětí na začátku vývodu vzrostlo, což je způsobeno osazením dvou větších výroben právě blízko začátku vývodu. Dále vývod udržuje napětí poměrně na stejné úrovni, která je způsobena osazením malých výroben vyrovnávajících odběry energie. Vývod je osazen výrobnyami s celkovým výkonem 6,23 MW.

### Vysoké zatížení bez FVE

Uvažovaný odběr při vysokém zatížení je roven 9,25 MVA. Zvýšenému zatížení odpovídá stejné poměrné rozdělení spotřeby jako pro nízké zatížení. Pro vývod Kasejovice je zatížení rovno 5,2 MVA a pro vývod průmyslové zóny 4,04 MVA. Pro vysoké zatížení je také uvažován účinník 0,98 induktivní. Graf napěťového profilu vývodu je na Obr. 4.7.

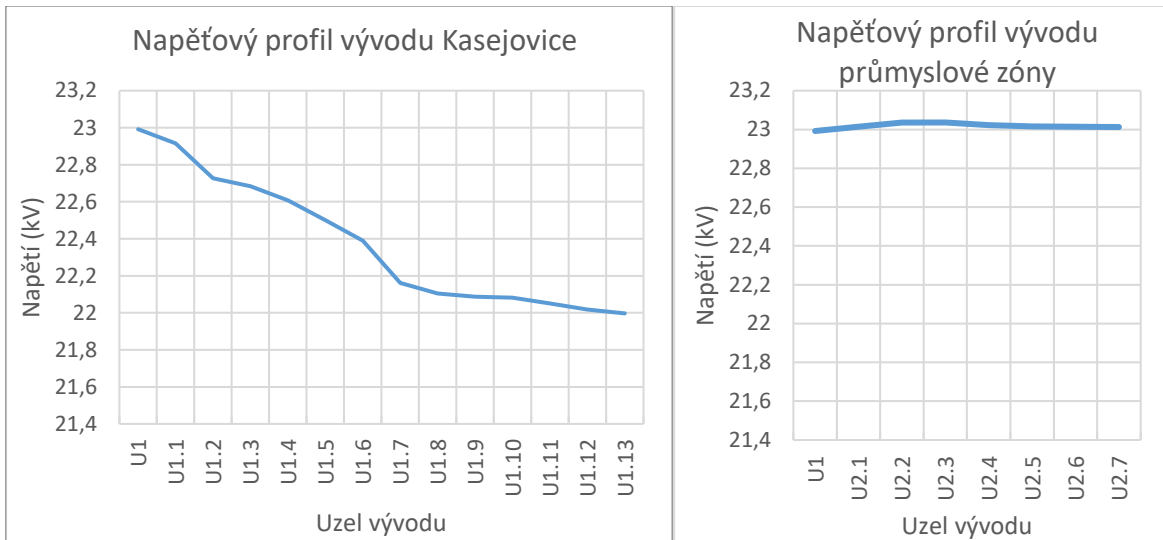


Obr. 4.7: Graf napěťového profilu vývodu Kasejovice a průmyslové zóny s vysokým zatížením bez FVE

Oproti nízkému zatížení je pokles napětí podél vývodu strmější, také napětí v uzlu transformátoru U1 vlivem celkového zatížení pokleslo. Pokles napětí na vývodu průmyslové zóny je velmi malý. To je způsobeno použitím kabelového vedení vysokého průřezu.

### Vysoké zatížení s dodávaným výkonem FVE

Zatížení vývodu je stejné jako v předchozím případě. Vývod je osazen výrobnyami podle schématu Obr. 4.3 s celkovým instalovaným výkonem výroben 7,73 MW. Graf napěťového profilu je na Obr. 4.8.

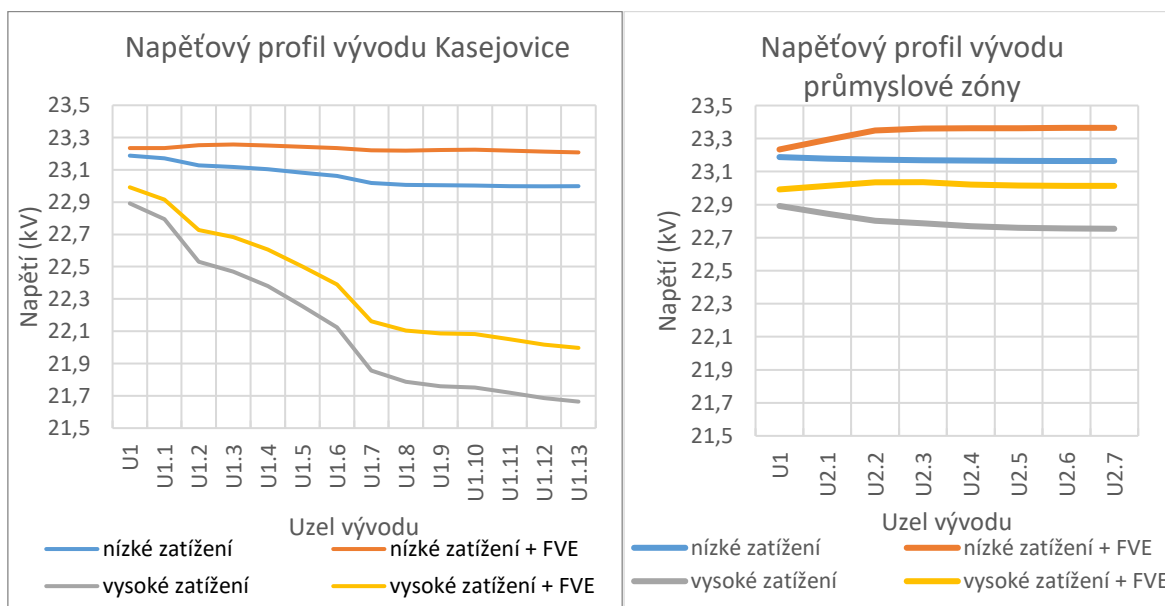


Obr. 4.8: Graf napěťového profilu vývodu Kasejovice a průmyslové zóny s vysokým zatížením s dodávkou výkonu FVE

Napěťový profil vývodu Kasejovice pro vysoké zatížení i dodávkou pomocí výroben má vlivem malé dodávky FVE stále klesající charakter. Oproti tomu vývod průmyslové zóny díky vysokému instalovanému výkonu a použitému kabelovému vedení má téměř stejnou velikost napětí podél celého vývodu.

### Porovnání napěťového profilu jednotlivých zatížení

Na grafu Obr. 4.9 jsou porovnány napěťové profily pro jednotlivé stavy zatížení a dodávek výkonů na společném vývodu.



Obr. 4.9: Graf porovnání napěťových profilů analyzovaných stavů v síti; nízké/vysoké zatížení, dodávka FVE

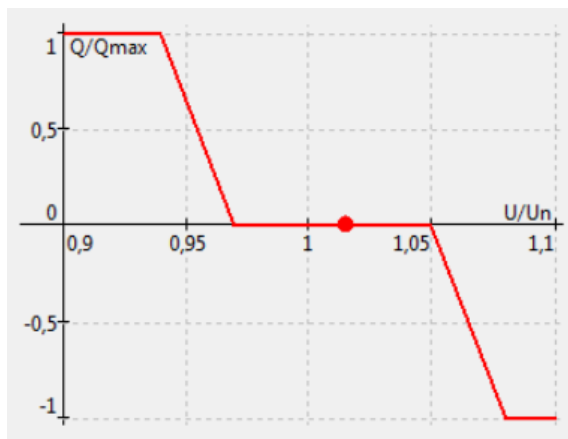


Na grafech pro vývod Kasejovice vidíme rozevírání napěťového profilu, kdy v uzlu U1.13 mezi stavy nízkého zatížení s FVE a vysokého zatížení bez FVE je rozdíl napětí 1,54 kV. Podobný jev je vidět i u vývodu průmyslové zóny, ale rozdíl napětí nedosahuje takové velikosti.

### Regulace Q(U) pomocí výroben pro nízké zatížení s maximální výrobou FVE

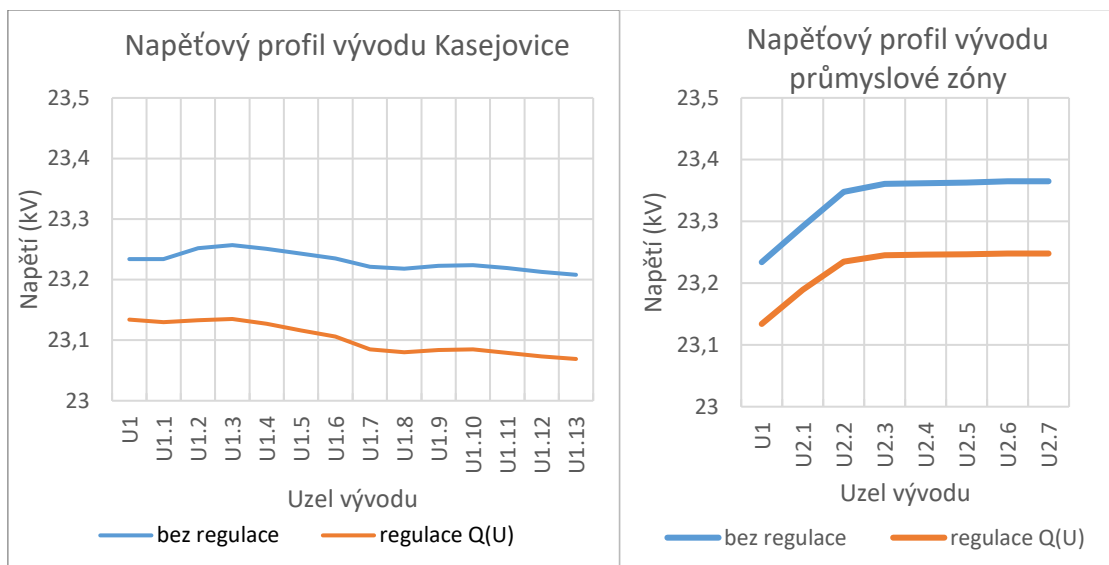
Na všech výrobních podél obou vývodů je nastavena autonomní regulace Q(U). Vliv regulace je zkoumán pro nízké zatížení sítě, kdy výrobny zvyšují napěťový profil pomocí dodávky činného výkonu do sítě. Nastavení regulace Q(U) je na Obr. 4.10:

- $X_1 = 0,94 U_n$ ;  $X_2 = 0,97 U_n$ ;  $X_3 = 1,05 U_n$ ;  $X_4 = 1,08 U_n$
- Hodnota  $Q_{\max}$  je dána hodnotou dodávaného výkonu P při  $\cos \varphi = 0,9$



Obr. 4.10: Nastavení mezí Q(U) regulace

Porovnání napěťového profilu výroben pracujících pouze s dodávkou činného výkonu bez regulace Q a výroben s regulací Q(U) je na grafu Obr. 4.11.



Obr. 4.11: Graf porovnání napětí při zapnuté regulaci Q(U) na výrobnách při nízkém zatížení

Napětí při regulaci Q(U) je menší o hodnotu přibližně 100 V, která platí pro oba vývody. Celkový odebíraný jalový (induktivní) výkon při nastavené regulaci Q(U) a dodávaném činném výkonu 7,73 MW činí 821,15 kVAR. V tabulce Tab. 4.2 jsou výkony jednotlivých výroben při regulaci Q(U).

Tab. 4.2: Velikost odebíraného jalového výkonu při regulaci Q(U) na výrobnách

Tabulka výkonů výroben při regulaci Q(U)			
Kasejovice			
Výrobna	P [kW]	Q [kVAR]	cos φ
FV S	-900	107812,00	0,993
FV L	-600	80291,00	0,991
Průmyslová zóna			
FV3vn-1	-3000	317672,00	0,994
FV2vn-1	-2300	225704,00	0,995
FV6vn-1	-482	52102,00	0,994
FV1-1	-90	5813,00	0,998
FV2-1	-30	2944,00	0,995
FV3-1	-90	9,53	0,994
FV4-1	-30	3185,00	0,994
FV6-1	-60	0,00	1
FV7-1	-30	3238,00	0,994
FV8-1	-120	12859,00	0,994

## 4.2 Příklad 2 – varianta dlouhé kabelové a krátké venkovní vedení

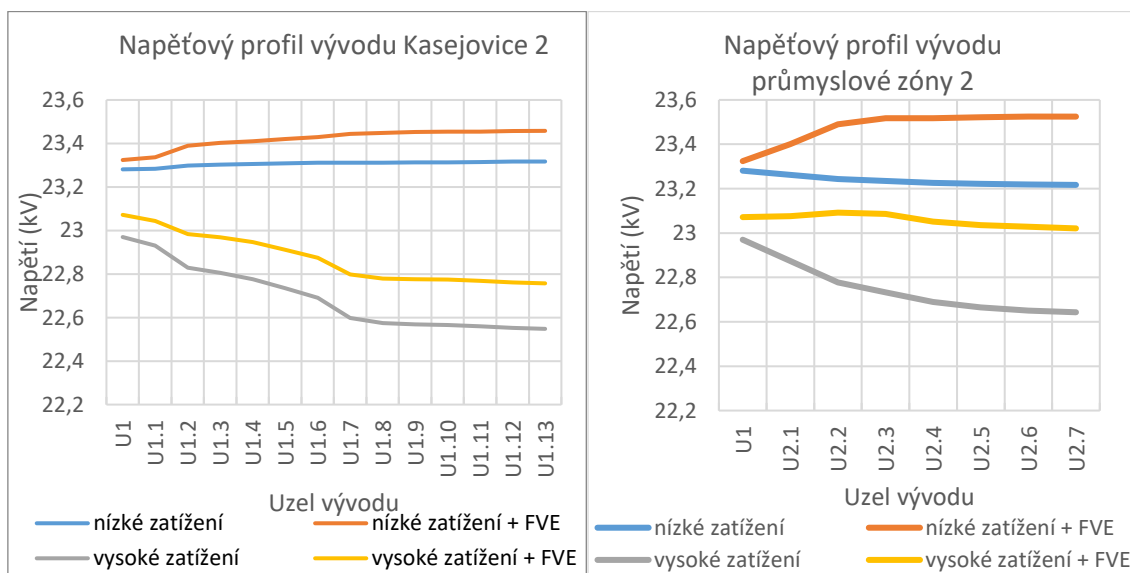
V tomto příkladu je upravena varianta z příkladu 1. Jsou zde zaměněny použité typy vedení. Pro dlouhý vývod Kasejovice je použito kabelové vedení typu AXEKCY 240. Naopak pro krátký vývod průmyslové zóny je použité venkovní vedení složené z vedení AlFe s průřezem od 70 do 120 mm<sup>2</sup>. Obrácený vývod je zkoumán z důvodu odlišných

parametrů venkovní a kabelové sítě, které mohou měnit napěťový profil podél vedení. Vývod je analyzován v programu DNCalc, kde jsou, jako v příkladu 1, spočteny jednotlivé stavy sítě. Pro lepší orientaci a rozlišení v textu je v tomto příkladu označen dlouhý kabelový vývod jako Kasejovice 2 a krátký venkovní vývod jako průmyslová zóna 2. Celý namodelovaný vývod i s parametry je v příloze 6.

Jako u předcházejícího příkladu je namodelována síť a jsou spočteny jednotlivé stavy zatížení v programu DNCalc. Platí zde zatížení z předchozího příkladu. Uvažovaný účinník odběru je 0,98 induktivní. Modelované stavy sítě jsou:

- Stav nízkého zatížení bez dodávky FVE
- Stav nízkého zatížení s dodávkou FVE
- Stav vysokého zatížení bez dodávky FVE
- Stav vysokého zatížení s dodávkou FVE

Porovnání výsledků napěťového profilu pro jednotlivé stavy zatížení a dodávky elektrické energie je na grafu Obr. 4.12. U dlouhého kabelového vývodu lze pozorovat, že i bez výroby vlivem nabíjecí kapacity kabelového vedení roste napětí podél vývodu mírně. Tento růst je o to větší, když jsou k vývodu připojeny výroby.

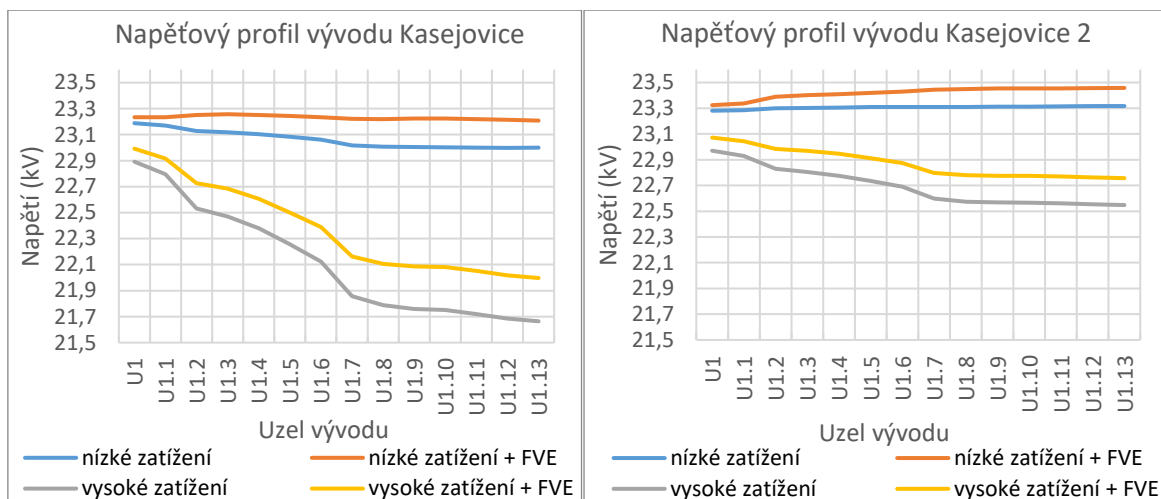


Obr. 4.12: Graf porovnání napěťových profilů analyzovaných stavů v síti; nízké/vysoké zatížení, dodávka FVE pro příklad 2

Lze zde pozorovat, že napěťový profil pro nízké zatížení s výrobami FVE je již vcelku vysoký a dosahuje hodnoty 23,46 kV, to odpovídá 107 % jmenovité hodnoty  $U_n$ .

### Srovnání vývodu Kasejovice s venkovním a kabelovým vedením

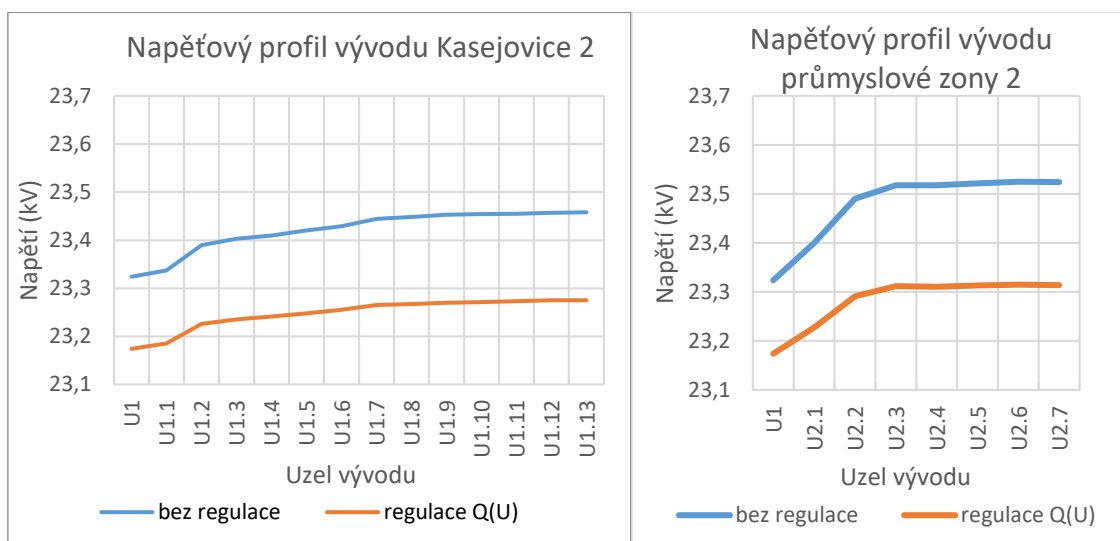
Vlivem kabelového vedení je napěťový profil podél vývodu posazený výše viz Obr. 4.13. Vývod i bez dodávky výkonu výrobnami má podél vývodu vzrůstající charakter. To je dáno vysokou nabíjecí kapacitou dlouhého kabelového vedení. Naopak při vysokém zatížení je na vývodu nižší úbytek napětí daný nižší impedancí kabelového vedení.



Obr. 4.13: Graf napěťového profilu vývodu Kasejovice a Kasejovice 2; venkovní / kabelové vedení

### Regulace Q(U) pomocí výroben pro nízké zatížení s maximální výrobou FVE

Pro vylepšení napěťového profilu je na všech výrobnách podél vývodu zapnuta autonomní regulace Q(U). Porovnání napěťového profilu při zapnuté regulaci Q(U) je na Obr. 4.14. Zapnutou regulací napětí podél vývodu klesne přibližně o 150 V.



Obr. 4.14: Graf porovnání napětí při zapnuté regulaci Q(U) na výrobnách při nízkém zatížení; příklad 2

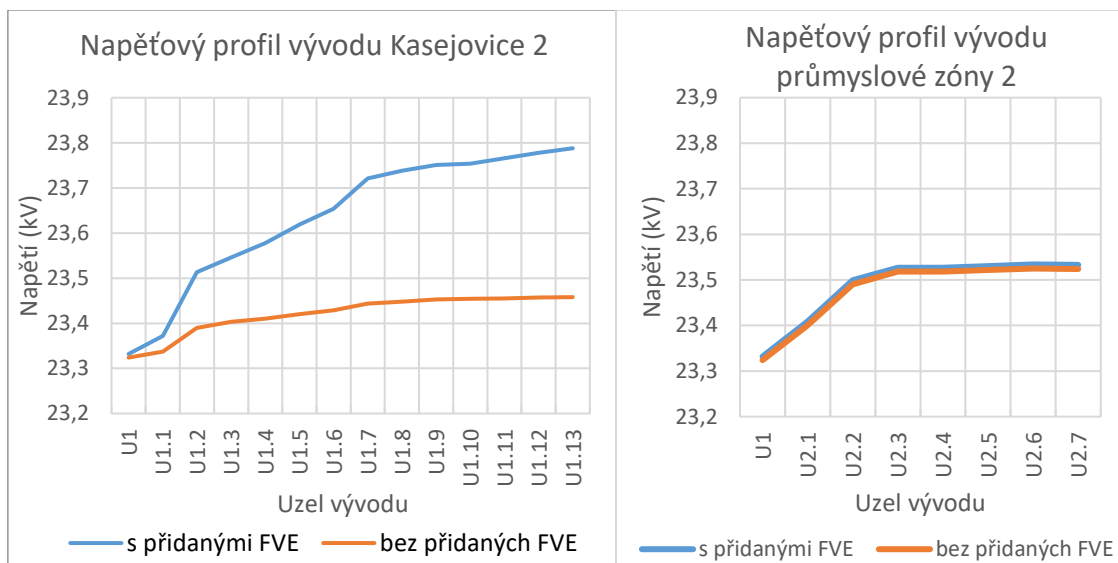
Tabulka Tab. 4.3 ukazuje velikost výkonů při regulaci Q(U) pro příklad 2. Vzhledem k nastavení regulace se výrobní odběrem jalového výkonu snaží snížit napětí v místě připojení.

Tab. 4.3: Velikost odebíraného jalového výkonu při regulaci Q(U) na výrobnách; příklad 2

Tabulka výkonů výroben při regulaci Q(U)			
Kasejovice 2			
Výrobna	Dodávaný P [kW]	Q [kVAR]	cos φ
FV S	900	145,534	0,987
FV L	600	130,647	0,977
průmyslová zóna 2			
FV3vn-1	3000	472,752	0,988
FV2vn-1	2300	326,42	0,99
FV6vn-1	482	77,062	0,987
FV1-1	90	8,562	0,996
FV2-1	30	4,258	0,99
FV3-1	90	14,183	0,988
FV4-1	30	4,693	0,988
FV6-1	60	9,593	0,987
FV7-1	30	4,773	0,988
FV8-1	120	18,936	0,988

#### 4.2.1 Příklad s přidáním výroben k vývodu Kasejovice 2

Vzhledem k podpoře rozšiřování decentralizovaných výroben v sítích vn i nn je na vývodu Kasejovice 2 osazena v každém uzlu nová výrobní představující zapojené drobné výrobní na hladině nn. Většina nových výroben je s instalovaným výkonem 200 kW až na výrobní v uzlu U1.11, U1.13 s osazenou výrobní s instalovaným výkonem 600 kW a v uzlu U1.5 s výrobní 800 kW. Celkové navýšení výkonu výroben pro vývod Kasejovice 2 je 3,6 MW. Pro tento příklad je uvažováno pouze s dodávkou činné energie do sítě a není zde zapnuta regulace na výrobních. Na grafu Obr. 4.15 je porovnání napěťového profilu s přidávanými výrobními. Jak je zřejmé, napěťový profil po přidání výroben vzrostl a napětí v U1.13 je o 330 V výše než před přidáním výroben. Toto navýšení se neprojeví na vývodu průmyslové zóny.

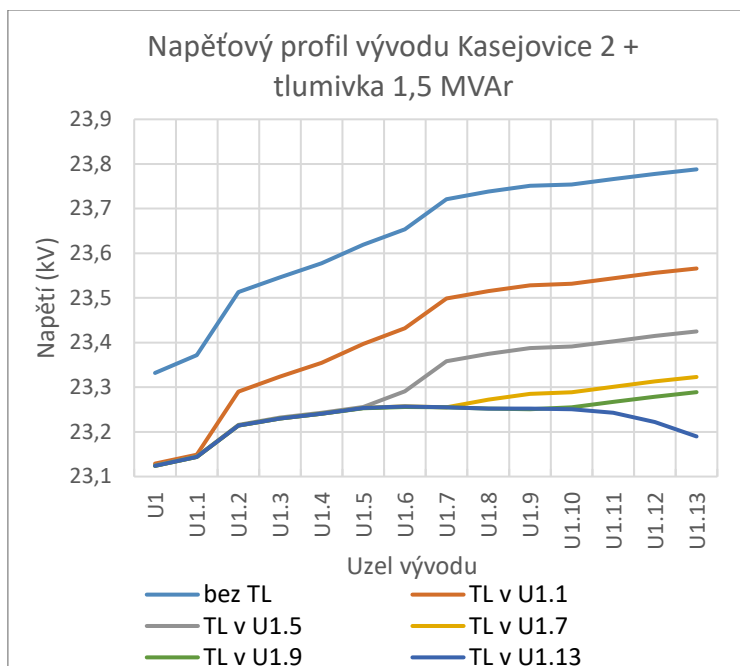


Obr. 4.15: Graf porovnání napěťového profilu s přidáním nových FVE, příklad 2

Jelikož přidáním výroben dochází ke zvýšení napětí na vývodu, tak pro zrovnomměnění napětí podél vývodu Kasejovice 2 je do vývodu v další části připojena kompenzační tlumivka.

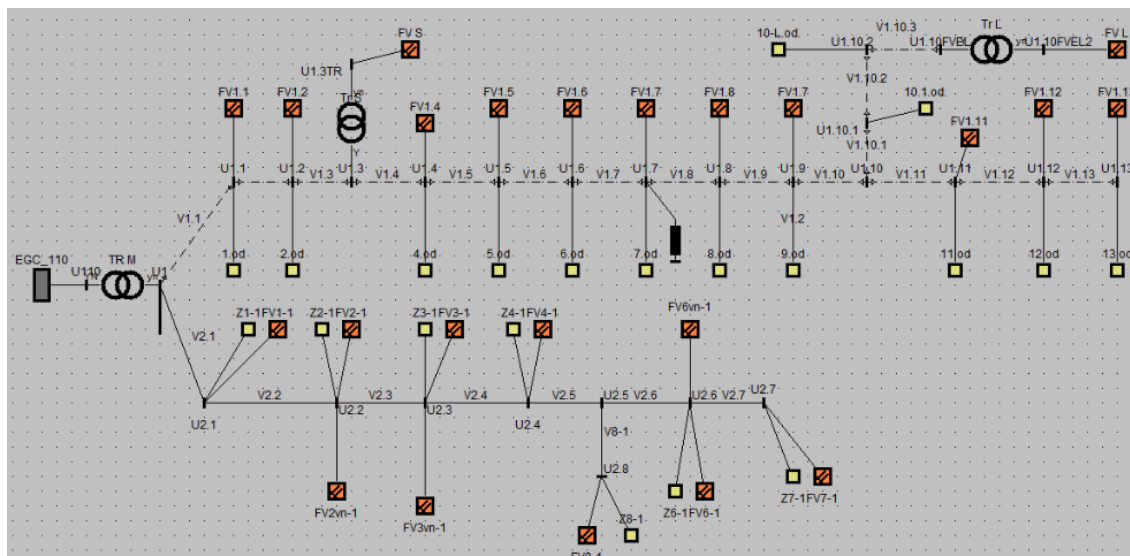
### Kompenzace vývodu Kasejovice 2 pomocí kompenzační tlumivky

Vlivem dlouhého kabelového vedení dochází na vývodu Kasejovice 2 k toku kapacitního jalového výkonu do uzlu U1 a dále do nadřazené soustavy. Přetok do uzlu U1 dosahuje velikosti 869 kVAr. Pro dekompenzování tohoto kapacitního výkonu a pro snížení napětí způsobeného vysokou dodávkou činného výkonu výrobnami je v této části uvažováno osazení řízené tlumivky s celkovým výkonem 1,5 MVAR, která je postupně osazována do uzlů podél vývodu. Velikost tlumivky 1,5 MVAR je volena na základě úvahy, že tento výkon v síti obrací směr toku jalového výkonu a způsobí přijatelně vysoké snížení napětí. Na vývodu je poté analyzováno, které místo sítě by pro osazení bylo nejvhodnější. Výkon tlumivky 1,5 MVAR se jeví jako vhodná velikost pro dekompenzaci kapacitního jalového výkonu a dodatečného snížení napěťového profilu vývodu. V další části bude ověřeno, zda je tento výkon tlumivky žádoucí. Analýza s přidáním výrobnami a kompenzační tlumivkou je provedena v programu DNCalc. Graf s vypočteným napětím podél vývodu je na Obr. 4.16.



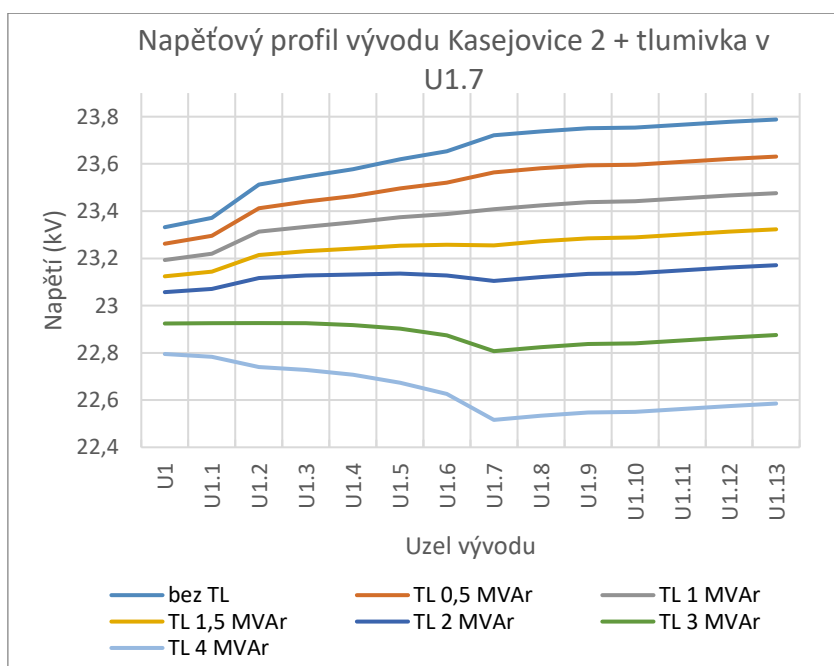
Obr. 4.16: Graf napěťového profilu vývodu Kasejovice 2 při přidání výrobních FVE + změna umístění kompenzační tlumivky

Podle výsledků grafu se jeví jako vhodné místo pro tlumivku uzel U1.7, kde je již profil napětí poměrně vyrovnaný a nedochází k významnému navýšení na konci vývodu. Pro umístění tlumivek do uzlů blíže začátku vývodu je napětí ve vzdálenějších bodech stále poměrně vysoké. Naopak umístěním do vzdálenějších uzlů sítě není dosaženo téměř žádného zlepšení napětí oproti osazení v uzlu U1.7. Při umístění na konci vývodu napětí zbytečně poklesne. Umístěním tlumivky na konci vývodu by navíc byl celý vývod zatěžován dodatečným přenášeným jalovým výkonem tlumivky. Na Obr. 4.17 je namodelovaný vývod s kompenzační tlumivkou umístěnou v uzlu U1.7 (model v programu DNCalc).



Obr. 4.17: Namodelovaný vývod z příkladu 2 s osazenou tlumivkou v uzlu U1.7

V další části je zkoumán vliv velikosti tlumivky na napětí. Tlumivka je umístěna v uzlu U1.7 a je postupně měněna její velikost od hodnoty 0,5 MVar do 4 MVar. Graf s porovnáním napětíového profilu při různých velikostech kompenzačních tlumivek je na Obr. 4.18.



Obr. 4.18: Graf napětíového profilu vývodu Kasejovice 2 při přidání výrobních FVE + změna velikosti kompenzační tlumivky; příklad 2

Z charakteristik je zřejmé, že čím větší bude kompenzační tlumivka, tím více se sníží napětí podél vývodu. Pro větší výkony v bodě připojení tlumivky (uzel U1.7) dochází



k napětíovému propadu v bodě umístění tlumivky. Pro tlumivku 1,5 MVar vychází napětíový profil s lehkým růstem napětí a bez propadu v místě připojení.

Kompenzační tlumivka nejenom snižuje napětí podél vývodu, ale i mění proudové zatížení v síti odběrem jalového proudu. Z toho důvodu je zkoumán vliv tlumivky na proudové zatížení vedení V1.7, tedy vedení, které je ukončeno v uzlu U1.7 (v místě připojení kompenzační tlumivky). V tabulce Tab. 4.4 jsou hodnoty proudů na vedení V1.7 při měněné velikosti tlumivky.

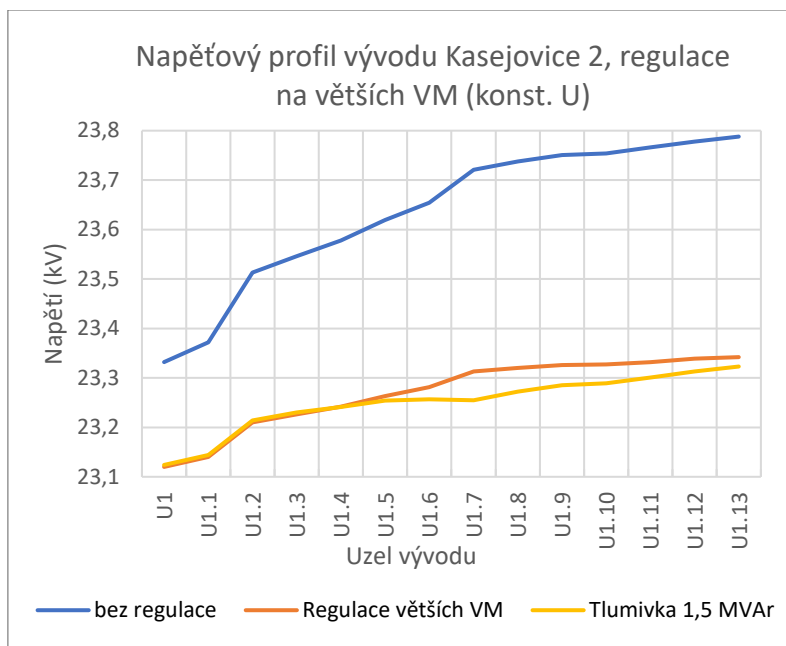
Tab. 4.4: Tabulka proudového zatížení vedení V1.7 vývodu Kasejovice 2 při osazení různých velikostí tlumivky v uzlu U1.7

proudové zatížení vedení V1.7 při osazené velikosti tlumivky v uzlu U1.7							
vedení	bez TL	0,5 MVar	1 MVar	1,5 MVar	2 MVar	3 MVar	4 MVar
V1.7	48,7	47,1	49,6	55,5	63,8	84,2	106,8

Při výkonu tlumivky 0,5 MVar proud na vedení V1.7 lehce klesl. To je způsobeno kompenzací kapacitního jalového výkonu kabelového vedení. Nejnižší proudové zatížení vedení vychází pro tlumivku velikost 0,5 MVar, ale pro takový výkon je napětí ještě poměrně veliké. S dalším zvětšováním kompenzační tlumivky začíná růst proud na vedení V1.7. Vhodná velikost kompenzační tlumivky je v tomto případě 1,5 MVar, která vyhovuje jak z hlediska snížení napětíového profilu, tak i přijatelného zvýšení zatížení vedení V1.7. Menší výkony tlumivky se na vývodu mohou podílet i na hospodárnosti provozu sítě a v neposlední řadě na omezení přetoků jalového výkonu kapacitního charakteru do nadřazené soustavy.

### Porovnání se zapnutou regulací na konstantní napětí u větších výroben

V této části je na větších výrobnách vývodu Kasejovice 2 zapnuta regulace na konstantní napětí U. To platí pro výrobní FV S, FV L, FV1.5, FV1.11 a FV1.13. Na těchto výrobnách je nastavena regulace na konstantní napětí 23,1 kV odpovídající hodnotě 105 % jmenovité hodnoty 22 kV. Ostatní výrobní dodávají do sítě pouze činný výkon a není na nich zapnuta regulace. Na grafu Obr. 4.19 je porovnání napětíového profilu při zapnuté regulaci konst. U s variantou zařazené tlumivky do uzlu U1.7 s výkonem 1,5 MVar bez regulace na výrobnách. Z výpočtu při zapnuté regulaci konst. U vychází celkový odebíraný jalový výkon výrobnami na 1695,2 kVar.



Obr. 4.19: Napěťový profil vývodu Kasejovice 2 při regulaci na konst. U a při regulaci tlumivkou

Napěťový profil pro regulaci na konst. U a při použití kompenzační tlumivky se liší pro vzdálenější uzly vývodu pouze o desítky voltů. To je dáno přibližně stejným odebíraným jalovým výkonem. Malé rozdíly v napětí jsou dané jiným rozložením odebíraného jalového výkonu.

V tabulce Tab. 4.5 jsou regulované výrobní s velikostí dodávaného činného a jalového výkonu. Výrobní z důvodu vysoké dodávky činného výkonu, a tím pádem i vysokého napětí, pracují s účinnkem 0,9, kdy odebírají svůj maximální možný jalový výkon.

Tab. 4.5: Tabulka hodnot výkonů výroben Kasejovice 2 s regulací konst. U

	Regulace	Dodávka P [kW]	Q [kVAr]	cos φ
FV S	Konst. U.	900	435,9	0,9 (ind.)
FV L	Konst. U.	600	290,6	0,9 (ind.)
FV1.5	Konst. U.	800	387,5	0,9 (ind.)
FV1.11	Konst. U.	600	290,6	0,9 (ind.)
FV1.13	Konst. U.	600	290,6	0,9 (ind.)

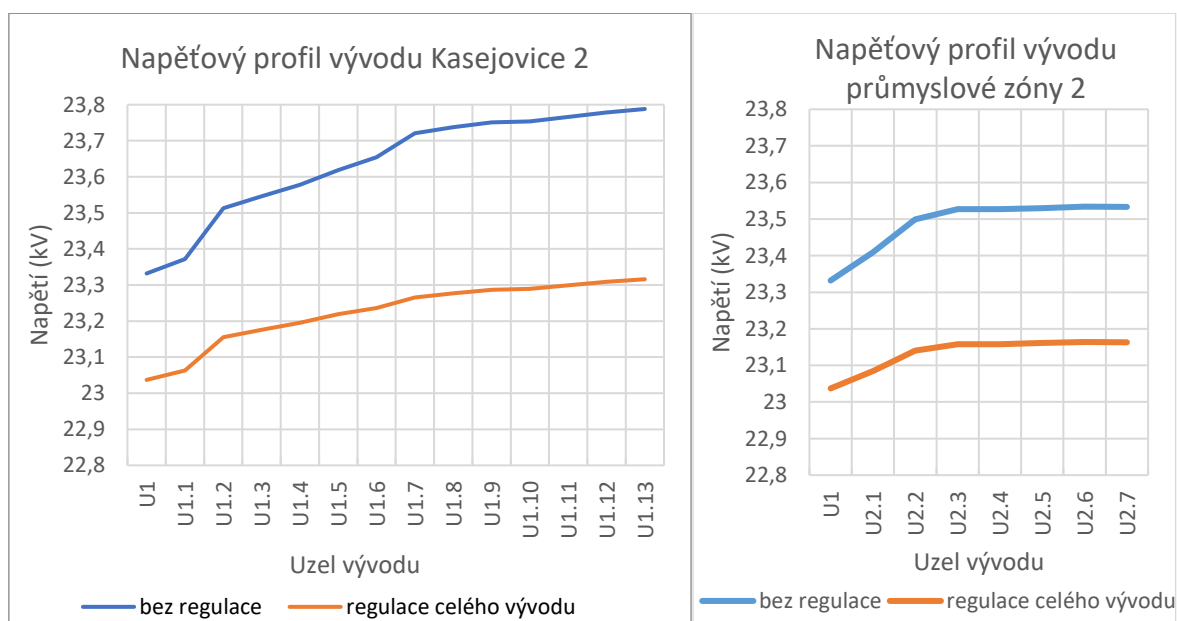
### 4.3 Návrh nasazení a nastavení regulačních prostředků

V tomto příkladu jsou v celém vývodu nasazeny různé regulační prostředky a je vyzkoušeno, jak se bude vývod chovat jako celek. Jednotlivé typy regulací výroben a přidaná kompenzační zařízení se mohou vzájemně ovlivňovat a jejich výsledný účinek je tedy dán jejich správným nastavením.

## Analýza vývodu příklad 2 – Kasejovice 2 a průmyslová zóna 2

Síť jako celek bude analyzována pro nízké zatížení s vysokou dodávkou činného výkonu na spojeném vývodu Kasejovice 2 a průmyslová zóna 2 z příkladu 2. Celkové zatížení vývodu je tedy 1,96 MVA s účínkem zátěži 0,98, viz zatížení v úvodu této kapitoly. Instalovaný výkon vyroben je pro vývod Kasejovice 2 roven 5,1 MW a pro vývod průmyslové zóny 6,23 MW.

Pro výrobní do 1 MW je zvolena autonomní regulace  $Q(U)$  a nastavení charakteristiky je dle Obr. 4.10. Pro vyšší instalované výkony vyroben je zvolena regulace na konstantní napětí s nastavením napětí na hodnotu 23,1 kV. To platí pro výrobní FV2vn-1 a FV3vn-1. Dále je v modelu na vývodu Kasejovice 2 v uzlu U1.7 osazena tlumivka pro kompenzaci nabíjecího výkonu dlouhého kabelového vedení. Velikost kompenzační tlumivky je 0,5 MVar. Větší výkon tlumivky není uvažován, protože se předpokládá dodatečný odběr jalového výkonu pomocí vyroben se zapnutou regulací. Tlumivka je zde určena hlavně pro kompenzaci nabíjecího (kapacitního) výkonu vedení. Graf napěťového profilu regulace celého vývodu a bez regulace je na Obr. 4.20.



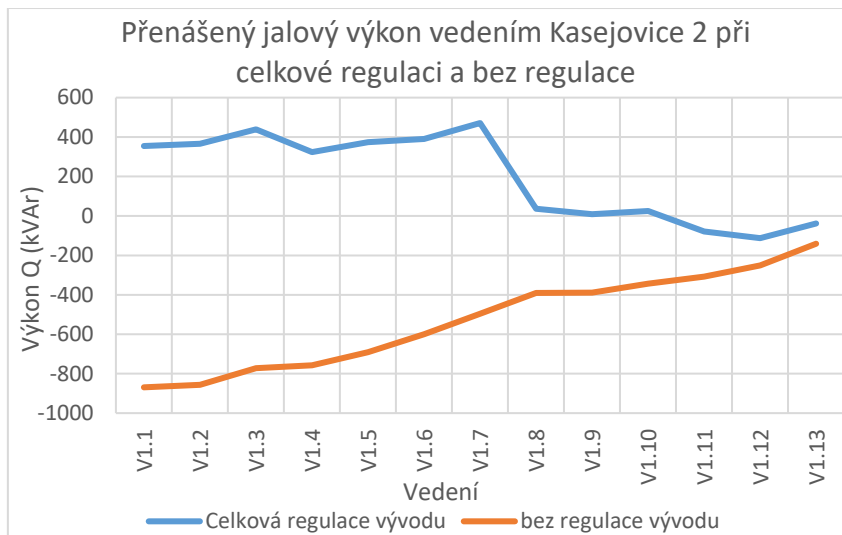
Obr. 4.20: Graf napětí podél vývodu Kasejovice 2 při celkové regulaci vývodu;  $Q/U$ , konst.  $U$ , tlumivka

Napěťový profil vývodu při celkové regulaci má stále rostoucí charakter. Profil je vlivem regulace oproti napěťovému profilu bez regulace posazený přibližně o 300 V níže a není tak strmý. V tabulce Tab. 4.6 jsou srovnány poměry ve větvích při celkové regulaci a bez regulace výkonu  $Q$  na výrobních. Pro vývod Kasejovice 2 lze pozorovat obrácení toku jalového výkonu, kdy bez regulace je do nadřazené sítě výkon dodáván, a naopak při celkové

regulaci je jalový výkon odebírán. Porovnání jalových výkonu vývodu Kasejovice 2 při regulaci a bez regulace je na grafu Obr. 4.21. Proud na vedení vlivem regulace na vývodu Kasejovice 2 lehce poklesl. Pro vývod průmyslové zóny 2 vlivem regulace stoupl odebíraný jalový výkon, a tím stoupl i proud na vedení.

Tab. 4.6: Poměry ve větvích pro vývod Kasejovice 2 a průmyslová zóna 2 při celkové regulaci

Poměry ve větvích						
Vývod Kasejovice 2						
vedení	Celková regulace vývodu			bez regulace vývodu		
	Ia [A]	P [kW]	Q [kVAr]	Ia [A]	P [kW]	Q [kVAr]
V1.1	100,8	-4004,7	354,9	101,8	-4020,9	-869,1
V1.2	101,9	-4055,0	365,3	102,8	-4071,4	-857,0
V1.3	98,4	-3921,4	439,0	98,5	-3937,9	-771,8
V1.4	76,0	-3033,7	324,5	77,0	-3049,7	-757,4
V1.5	71,4	-2844,1	374,5	72,1	-2860,2	-691,0
V1.6	52,7	-2083,3	390,6	53,4	-2099,4	-600,6
V1.7	49,1	-1918,0	471,0	48,7	-1934,1	-496,1
V1.8	44,7	-1801,0	35,6	44,9	-1801,5	-391,2
V1.9	47,9	-1932,3	8,5	48,0	-1932,8	-389,3
V1.10	43,4	-1748,3	25,2	43,3	-1748,8	-342,9
V1.11	29,9	-1203,1	-78,3	30,2	-1203,1	-307,1
V1.12	17,0	-677,1	-112,7	17,5	-677,1	-250,3
V1.13	13,3	-536,1	-39,0	13,5	-536,1	-141,0
Vývod průmyslové zóny 2						
V2.1	137,4	-5283,1	1461,0	131,0	-5287,6	247,1
V2.2	137,8	-5328,7	1405,7	131,6	-5331,3	194,8
V2.3	80,9	-3102,4	948,9	76,3	-3102,9	145,2
V2.4	5,3	-151,8	148,3	4,7	-151,9	113,5
V2.5	9,0	-346,9	102,0	8,7	-346,9	68,5
V2.6	9,0	-351,9	71,9	8,7	-351,9	44,0
V2.7	1,8	70,0	21,5	1,8	70,0	20,0



Obr. 4.21: Graf porovnání přenášeného jalového výkonu pro vývod Kasejovice 2 s regulací Q a bez regulace

V tabulkách Tab. 4.7 a Tab. 4.8 jsou jednotlivé výrobny s použitým typem regulace. Dále je zde jejich dodávaný činný výkon a velikost jalového výkonu, jenž při dané regulaci na vývodu využívají.

Tab. 4.7: Tabulka výkonů pro vývod Kasejovice 2 při celkové regulaci vývodu

Výrobny – Vývod Kasejovice 2				
	Regulace	Dodávaný P [kW]	Q [kVAR]	cos φ
FV1.1	Q(U)	200	0,00	1,000
FV1.2	Q(U)	200	8,28	0,999
FV S	Q(U)	900	124,25	0,991
FV1.4	Q(U)	200	14,20	0,997
FV1.5	Q(U)	800	70,89	0,996
FV1.6	Q(U)	200	20,19	0,995
FV1.7	Q(U)	200	24,40	0,993
FV1.8	Q(U)	200	26,23	0,992
FV1.9	Q(U)	200	27,68	0,991
FV L	Q(U)	600	134,86	0,976
FV1.11	Q(U)	600	88,35	0,989
FV1.12	Q(U)	200	30,86	0,988
FV1.13	Q(U)	600	95,96	0,987

Tab. 4.8: Tabulka výkonů pro vývod průmyslová zóna 2 při celkové regulaci vývodu

Výrobny – Vývod průmyslová zóna 2				
	Regulace	Dodávaný P [kW]	Q [kVAR]	cos $\phi$
FV1-1	Q(U)	90	0,00	1,000
FV2-1	Q(U)	30	0,92	1,000
FV2vn-1	konst. U	2300	402,78	0,985
FV3-1	Q(U)	90	4,01	0,999
FV3vn-1	konst. U	3000	764,22	0,969
FV4-1	Q(U)	30	1,33	0,999
FV6-1	Q(U)	60	2,93	0,999
FV6vn-1	Q(U)	482	23,52	0,999
FV7-1	Q(U)	30	1,44	0,999
FV8-1	Q(U)	120	5,56	0,999

Při regulaci na daném vývodu pracují výrobny s induktivním účínkem až účínkem rovným  $\cos \phi = 1$ . Výrobny FV2vn-1 a FV3vn-1 s regulací na konst. U pracují s nižším účínkem, a odebírají tedy vyšší jalový výkon ze sítě, což je dáno typem regulace, kdy se výrobny snaží regulovat napětí na přesně danou hodnotu. Jak bylo popsáno v kapitole 3, v programu DNCalc nelze nastavit regulace na konst. U, a je zde pro ni proto upravena funkce Q(U), v níž regulace není úplně přesná a má menší odchylku. V tomto případě je v uzlu U2.3 vývodu průmyslové zóny napětí 23,158 kV při regulaci konst. U na hodnotu 23,1 kV. Regulace tedy není úplně přesná, ale pro účely tohoto příkladu je nepřesnost zanedbána. Vlivem regulace větších výroben na vývodu průmyslové zóny 2 na konst. U, ostatní výrobny pracují s účínkem téměř 1. Na vývodu Kasejovice 2 lze pozorovat snižující se účíník se vzdáleností výroben osazených na vývodu. To je zapříčiněno zvyšujícím se napětím podél vývodu, které je snižováno vyšším odběrem jalového výkonu výrobny, z čehož vyplývá i nižší účíník induktivního charakteru.

## 5 Závěr

V první části diplomové práce jsou teoreticky popsány vlivy výkonových toků na velikost napětí, proudového zatížení a jejich ovlivnění parametry soustavy. Je zde popsáno chování soustavy při různých stavech zatížení nebo výroby elektrické energie a důvody proč je elektrickou soustavu nutné regulovat. Dále jsou shrnuty podmínky správného chodu soustavy, a to zejména napěťové podmínky podle platných norem a podmínek distributorů elektrické energie. Na to navazují technologie a prostředky pro řízení výkonových toků jak na straně výroby, tak na straně spotřeby. Kde na straně výroby jsou shrnuty jednotlivé typy synchronních a nesynchronních výrobních modulů. Na straně spotřeby jsou popsány možnosti akumulace, kompenzace a časového rozložení spotřeby a v neposlední řadě je popsána regulace pomocí transformátorů.

V druhé části práce je shrnuta koncepce regulace  $U$  a  $Q$  v ES a její složení z primární, sekundární a terciární regulace. Jsou zde popsány metody regulace  $U$  a  $Q$  a jejich možnosti nasazení ať již pomocí transformátorů s HRT regulací, kompenzačních prostředků anebo regulací na výrobních. Pro výroby jsou rozděleny VM a popsány stanovené podpory podle PPDS. Dále jsou popsány jednotlivé druhy regulací, jako je regulace na konstantní  $U$ , autonomní regulace  $Q(U)$  a další. V závěru kapitoly jsou sepsány omezené možnosti regulace činného výkonu a akumulace pomocí bateriového úložiště.

Ve třetí části je analyzováno chování sítě na dvou jednoduchých vývodech venkovního a kabelového vedení. Analýza vývodu je provedena v programu DNCalc, kde jsou jednotlivé stavy sítě namodelovány. Citlivostní analýzou je demonstrován vliv spotřeby a výroby na napěťový profil vývodu. Vzhledem k stálému rozšiřování decentralizovaných výroben jsou prozkoumané možnosti regulace a zvýšení připojitelného výkonu. V práci je zkoumáno možné zvýšení maximálního instalovaného výkonu výroben při změně účinníku, který pro místa s malým poměrem  $R/X$  může být i vícenásobný při dodávce výkonu s induktivním účinníkem. Výroby se zapnutou regulací  $Q$  v síti pomáhají snižovat napětí při vysoké dodávce činného výkonu odběrem výkonu jalového, a naopak při nízkém napětí v bodě připojení s nižším dodávaným výkonem výroby se mohou podílet na zvýšení napětí dodávkou jalového výkonu. Z porovnání regulací  $Q(U)$  a konst.  $U$  vychází lepší doregulování napětí pro možnost regulace na konst.  $U$ , ale nevýhodou může být větší jalový výkon způsobující dodatečné zatížení sítě a zvýšení ztrát. U obou druhů regulace je nutné

zvolit vhodné nastavení regulačních mezí, aby nedocházelo k zbytečnému navyšování ztrát v síti a k přetokům jalového výkonu do nadřazené sítě.

Ve čtvrté části jsou analyzovány stavy sítě na dvou spojených vývodech zapojených do rozvodny 22 kV. Lze zde pozorovat rozevírání napěťového profilu, který se mění podle velikosti spotřeby nebo výroby v dané síti a je vzájemně ovlivněn oběma vývody. Z porovnání výsledků analyzovaných příkladů vychází menší změny napětí pro různé zatížení při využití kabelového vedení pro dlouhý vývod. Zároveň je zde vidět, že na odlehčeném kabelovém vedení i bez dodávky výkonu výrobnami napětí lehce stoupá, a to vlivem nabíjecí kapacity vedení podél. Tím je do nadřazené sítě dodáván nevyžádaný jalový výkon, jenž může být hospodárně kompenzovat pomocí kompenzační tlumivky osazené ve vhodně zvoleném místě vývodu, čímž dosáhneme i snížení napěťového profilu. Podobného efektu jako osazením kompenzační tlumivky je dosaženo využitím regulací výroben na konstantní napětí. Na závěr je na celkovém modelu využito pro výrobní s výkonem nad 1 MW regulace na konst. U, na ostatních výrobnách je zapnuta autonomní regulace  $Q(U)$  a v síti je použita kompenzační tlumivka pro dekompenzaci kapacitního výkonu kabelového vedení. Z výsledků modelu vychází celkové snížení napěťového profilu, kdy se do regulace nejvíce zapojují výrobní s regulací na konst. U a ostatní výrobní pracují s vysokým účinníkem a pouze lehce doregulovávají napětí v místě připojení.

Přínosem práce je prozkoumání jednotlivých regulačních možností v distribuční síti. Jsou zde prověřeny regulační potenciály a využity zařízení pro regulaci P a Q pro zlepšení napěťových a proudových poměrů v sítích vn. Dalším přínosem je provedení návrhu specifických řešení. Do budoucna by bylo vhodné analyzovat reálný vývod, na kterém by bylo využito zařízení pro regulaci P a Q s vhodně nastavenými parametry regulace.



## Literatura

- [1] TESAŘOVÁ, Miloslava. Přednášky z předmětu PDS. Plzeň, 2020. Západočeská univerzita v Plzni.
- [2] ČSN EN 50160. Ed. 4 Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [3] Pravidla provozování distribučních soustav. Příloha 4: Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy. Praha : Energetický regulační úřad, 2022.
- [4] ŠVEC, Jan; DERNER, Pavel; HES, Stanislav a KŮLA, Jan. Možnosti zvýšení připojitelnosti výroben s autonomními regulačními charakteristikami na hladině nn. Konference ČK CIRED 2018. Tábor, 2018.
- [5] ŠVEC, Jan; DERNER, Pavel; HES, Stanislav a KŮLA, Jan. Integrace výroben s U/Q regulací do distribučních sítí vn. Konference ČK CIRED 2018. Tábor, 2018.
- [6] ŠVEC, Jan. Řízení U/Q v sítích ČEZ distribuce. ČK CIRED, Tři Studně, 2022.
- [7] Metodika ověřování a prokazování souladu výroben s požadavky. Mpo.cz [online]. Brno, 2022 [cit. 2024-01-12]. Dostupné z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/vyzkum-a-vyvoj-v-energetice/resene-dokoncene-projekty-a-jejich-vystupy/projekty-podporene-v-ramci-4-verejne-souteze-programu-theta/2023/1/Metodika-overovani-a-prokazovani-TK04010060-V1\\_.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/vyzkum-a-vyvoj-v-energetice/resene-dokoncene-projekty-a-jejich-vystupy/projekty-podporene-v-ramci-4-verejne-souteze-programu-theta/2023/1/Metodika-overovani-a-prokazovani-TK04010060-V1_.pdf)
- [8] HABRYCH, Richard. Řízení jalového výkonu synchronního generátoru. Energetika [online]. 2015, 146 – 152 [cit. 2023-11-12]. Dostupné z: [http://www.orgrez.cz/fileadmin/user\\_upload/750/E\\_3\\_2015\\_habrych.pdf](http://www.orgrez.cz/fileadmin/user_upload/750/E_3_2015_habrych.pdf)
- [9] MÁŠLO, Karel. Řízení a stabilita elektrizační soustavy. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/PrilohyVyuka/%C5%98%C3%ADzen%C3%AD%20a%20stabilita%20elektriza%C4%8Dn%C3%AD%20soustavy.pdf>
- [10] KORENC, Vladimír a HOLOUBEK, Jiří. Kompenzace jalového výkonu v praxi. Vyd. 1. Praha: IN-EL, 1999. 127 s. Elektro; sv. 39. ISBN 80-86230-07-4.
- [11] TLUSTÝ, Josef. Monitorování řízení a chránění elektrizačních soustav. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [12] LUO, Xing; WANG, Jihong; DOONER, Mark a CLARKE, Jonathan. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application

- potential in power system operation. Applied Energy [online]. Elsevier, 2015, 137(C), 511-536 [cit. 2023-11-21]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914010290>
- [13] Vysokonapěťová bateriová úložiště AMVOLT (BESS). [online]. [cit. 2024-11-21]. Dostupné z: <https://amvolt.energy/velka-uloziste-70-kwh-1-mwh/>
- [14] VÁPENÍK, René. Regulace napětí v distribuční soustavě vn a nn. Elektrotechnika [online]. 2011, roč. 13, č. 3 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: [www.elektrotechnika.cz/file.php?id=200000599-5a5255b4c5](http://www.elektrotechnika.cz/file.php?id=200000599-5a5255b4c5)
- [15] What does Peak shaving mean? Virtual Power Plant (VPP) for Renewable Energies [online]. [cit. 2024-01-09]. Dostupné z: <https://www.nextkraftwerke.com/knowledge/what-is-peak-shaving>
- [16] Kodex PS. Čeps.cz [online]. [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>
- [17] ŠVEC, Jan. Aktuální vývoj v řízení U/Q v sítích ČEZ distribuce. Konference ČK CIRED 2023. České Budějovice, 2023.
- [18] DNCalc: analýza poměrů v DS. EGC-EnerGoConsult ČB s.r.o. [online]. 2017 [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: [DNCalc: analýza poměrů v DS | EnerGoConsult ČB s.r.o. \(egc-cb.cz\)](https://www.egc-cb.cz/)
- [19] Negarantovaný výkon. ČEZ distribuce [online]. [cit. 2024-25-04]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/pro-vyrobce/negarantovany-vykon>

## Seznam obrázků

Obr. 1.1: Vliv zdroje vn na napětí podél vedení [6].....	- 4 -
Obr. 1.2: Podpora napětí regulací výroben [1].....	- 5 -
Obr. 1.3: DRS – Load shifting vs. Peak shaving [15].....	- 8 -
Obr. 1.4: Provozní diagram synchronního generátoru [8].....	- 9 -
Obr. 1.5: Dodávka/odběr Q při jmenovitém napětí a nižší než maximální dodávce P pro nesynchronní VM [3].....	- 10 -
Obr. 1.6 SVC a jeho V-A pracovní oblast [11].....	- 12 -
Obr. 1.7: STATCOM a jeho V-A pracovní oblast [11].....	- 13 -
Obr. 1.8: 10stopý BESS kontejner (70 - 210kWh) [13].....	- 14 -
Obr. 2.1: vazby v hierarchické regulaci napětí a jalových výkonů v ES [16].....	- 16 -
Obr. 2.2: Požadavky na PQ diagram výroben s U/Q regulací – a) výrobní vn; b) výrobní vvn a do přípojnic vn [3].....	- 19 -
Obr. 2.3: Nastavení funkce Q(U) [3].....	- 22 -
Obr. 2.4: Charakteristika funkce P(U) [3].....	- 23 -
Obr. 3.1: Schéma vývodu A – venkovní vývod.....	- 25 -
Obr. 3.2: Schéma vývod B – kabelové vedení.....	- 26 -
Obr. 3.3: Graf vlivu umístění zatížení podél vývodu vn; venkovní vývod A.....	- 28 -
obr. 3.4: Graf vlivu velikosti zatížení na napětí, venkovní vývod A.....	- 29 -
Obr. 3.5: Graf změny napětí při umístění VM v uzlu U3; Z1,4 MVA.....	- 29 -
Obr. 3.6: Graf změny napětí při umístění VM v uzlu U7; Z1,4 MVA.....	- 30 -
Obr. 3.7: Změna připojitelného výkonu, změnou účinníku výrobní; vývod A; Z1,4 MVA.....	- 32 -
Obr. 3.8: Napěťový profil při změně účinníku výrobní; VM osazen v uzlu U7; VM - 1,5 MW ..	- 33 -
Obr. 3.9: Poměrné zvýšení napětí při změně účinníku výrobní; VM osazen v uzlu U7; VM - 1,5 MW.....	- 33 -
Obr. 3.10: Venkovní vývod A s výrobou v uzlu U7.....	- 34 -
Obr. 3.11: Nastavení Q(U) regulace.....	- 34 -
Obr. 3.12: Graf působení regulace Q(U) při změně dodávky P do sítě; výrobní v U7; Z3,5 MVA; vývod A.....	- 35 -
Obr. 3.13: Graf změny napětí při regulaci Q(U) výrobní v uzlu U7, Z3,5 MVA, vývod A.....	- 36 -
Obr. 3.14: Graf napětí a jal. výkonu v uzlu U7 při dodávce P výrobní s regulací Q(U); Z0,65 MVA.....	- 37 -
Obr. 3.15: Charakteristika upravené regulace na konstantní napětí U (konst. U).....	- 37 -
Obr. 3.16: Graf působení regulace na konst. U (U/Q); pro vývod A s výrobní v U7.....	- 38 -
Obr. 3.17: Venkovní vývod A s výrobní a přidáním kompenzačním zařízením v uzlu U7.....	- 39 -

Obr. 3.18: Graf změny napětí vlivem regulace Q(U) a konst. U výrobní u uzlu U7; Z3,5 MVA- 40	-
Obr. 3.19: Proudové zatížení na vedení V5 při výrobě s regulací Q(U) a konst. U, Z3,5 MVA .-	41 -
Obr. 3.20: Proudové zatížení na vedení V1 při výrobě s regulací Q(U) a konst. U, Z3,5 MVA .-	42 -
Obr. 3.21: Kabelový vývod B s výrobnou v uzlu U7.....	- 44 -
Obr. 3.22: Graf regulace na konst. U pro vývod B; Z3,5+ výroba.....	- 45 -
Obr. 3.23: Graf vlivu regulace konst. U výrobní na napětí v uzlu U7; VM v uzlu U7, Z3,5.....	- 45 -
Obr. 3.24: Graf vlivu regulace konst. U výrobní na proud vedení V1; VM v uzlu U7, Z3,5.....	- 46 -
Obr. 4.1: Zjednodušené schéma – Vývod „Kasejovice“ – venkovní vedení.....	- 48 -
Obr. 4.2: Zjednodušené schéma – typový vývod 11 – průmyslová zóna.....	- 49 -
Obr. 4.3: Schéma spojeného vývodu Kasejovice s vývodem průmyslové zóny .....	- 50 -
Obr. 4.4: Namodelovaný vývod složený z vývodu Kasejovice a vývodu průmyslové zóny .....	- 51 -
Obr. 4.5: Graf napěťového profilu vývodu Kasejovice a průmyslové zóny s nízkým zatížením bez FVE .....	- 52 -
Obr. 4.6: Graf napěťového profilu vývodu Kasejovice a průmyslové zóny s nízkým zatížením a dodávkou výkonu FVE.....	- 52 -
Obr. 4.7: Graf napěťového profilu vývodu Kasejovice a průmyslové zóny s vysokým zatížením bez FVE .....	- 53 -
Obr. 4.8: Graf napěťového profilu vývodu Kasejovice a průmyslové zóny s vysokým zatížením s dodávkou výkonu FVE.....	- 54 -
Obr. 4.9: Graf porovnání napěťových profilů analyzovaných stavů v síti; nízké/vysoké zatížení, dodávka FVE.....	- 54 -
Obr. 4.10: Nastavení mezí Q(U) regulace.....	- 55 -
Obr. 4.11: Graf porovnání napětí při zapnuté regulaci Q(U) na výrobních při nízkém zatížení .-	56 -
Obr. 4.12: Graf porovnání napěťových profilů analyzovaných stavů v síti; nízké/vysoké zatížení, dodávka FVE pro příklad 2 .....	- 57 -
Obr. 4.13: Graf napěťového profilu vývodu Kasejovice a Kasejovice 2; venkovní / kabelové vedení .....	- 58 -
Obr. 4.14: Graf porovnání napětí při zapnuté regulaci Q(U) na výrobních při nízkém zatížení; příklad 2.....	- 58 -
Obr. 4.15: Graf porovnání napěťového profilu s přidáním nových FVE, příklad 2.....	- 60 -
Obr. 4.16: Graf napěťového profilu vývodu Kasejovice 2 při přidání nových výrobních FVE + změna umístění kompenzační tlumivky .....	- 61 -
Obr. 4.17: Namodelovaný vývod z příkladu 2 s osazenou tlumivkou v uzlu U1.7.....	- 62 -
Obr. 4.18: Graf napěťového profilu vývodu Kasejovice 2 při přidání nových výrobních FVE + změna velikosti kompenzační tlumivky; příklad 2 .....	- 62 -

---

Obr. 4.19: Napěťový profil vývodu Kasejovice 2 při regulaci na konst. U a při regulaci tlumivkou. -  
64 -

Obr. 4.20: Graf napětí podél vývodu Kasejovice 2 při celkové regulaci vývodu; Q/U, konst. U,  
tlumivka..... - 65 -

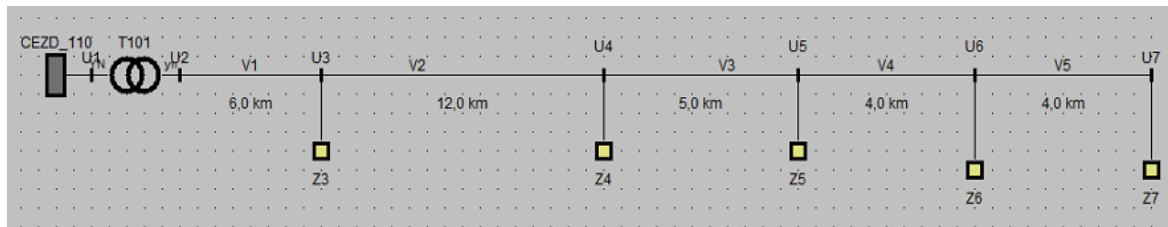
Obr. 4.21: Graf porovnání přenášeného jalového výkonu pro vývod Kasejovice 2 s regulací Q a bez  
regulace ..... - 67 -

## Seznam tabulek

Tab. 2.1: výkonové kategorie výroben.....	- 19 -
Tab. 2.2: regulace Q podle typu výrobný.....	- 20 -
Tab. 3.1: Parametry transformátoru 110kV/22kV.....	- 25 -
Tab. 3.2: Parametry venkovního vedení – vývod A.....	- 25 -
Tab. 3.3: Parametry kabelového vedení – vývod B .....	- 26 -
Tab. 3.4: Zatížení podél vývodu.....	- 27 -
Tab. 3.5: Znaménková konvence výkonů – spotřebičová orientace .....	- 27 -
Tab. 3.6: Napětí v uzlu U7 s výrobou umístěnou v U7, % nárůst napětí se základním zatížením-	31 -
-	
Tab. 3.7: Napětí v uzlu U7 s výrobou umístěnou v U7, % nárůst napětí se zatížením na konci vývodu .....	- 31 -
Tab. 3.8: Porovnání ztrát pro Vývod A; Z3,5; M; bez kompenzace a s kompenzací.....	- 39 -
Tab. 3.9: Výkonová bilance pro Vývod A; Z3,5; M; bez kompenzace a s kompenzací.....	- 39 -
Tab. 3.10: Ztráty ve větvích pro vývod A, Z3,5,M + výrobná 3,5 MW s různým typem regulace ...	- 42 -
Tab. 3.11: Bilance výkonů pro vývod A, Z3,5; M + výrobná 3,5 MW s různým typem regulace-	43 -
-	
Tab. 3.12: Parametry venkovního a kabelového vedení .....	- 43 -
Tab. 3.13: Porovnání vlivu regulace konst. U na napětí a výkon Q; vývod B,Z0,65,M + výroba-	47 -
Tab. 3.14: Porovnání vlivu regulace konst. U na proudové zatížení V5; vývod B; Z0,65; M + výroba .....	- 47 -
Tab. 4.1: Parametry transformátoru TR M 110 kV/22 kV .....	- 50 -
Tab. 4.2: Velikost odebíraného jalového výkonu při regulaci Q(U) na výrobnách .....	- 56 -
Tab. 4.3: Velikost odebíraného jalového výkonu při regulaci Q(U) na výrobnách; příklad 2.....	- 59 -
Tab. 4.4: Tabulka proudového zatížení vedení V1.7 vývodu Kasejovice 2 při osazení různých velikostí tlumivky v uzlu U1.7.....	- 63 -
Tab. 4.5: Tabulka hodnot výkonů výroben Kasejovice 2 s regulací konst. U.....	- 64 -
Tab. 4.6: Tabulka výkonů pro vývod Kasejovice 2 při celkové regulaci vývodu.....	- 67 -
Tab. 4.7: Tabulka výkonů pro vývod průmyslová zóna 2 při celkové regulaci vývodu .....	- 68 -

## Příloha 1 – Venkovní vývod A

Schéma sítě



Základní parametry pro základní zatížení (Z1,4; M):

TR	Název	Un1 [kV]	Un2 [kV]	St [MVA]	Pk [kW]	uk [%]	I0 [%]	P0 [kW]
	T101	110,00	23,00	40,00	224,7	11,2	0,67	48,6

Vedení	Název	Typ	růřez [mm]	Un [kV]	R [Ω/km]	X [Ω/km]	B [μS/km]	Délka [km]	I <sub>max</sub> [A]
	V1	120AlFe6	120,00	22,00	0,225	0,363	1469,00	6,00	357,00
	V2	70AlFe6	70,00	22,00	0,434	0,391	1427,00	12,00	225,00
	V3	70AlFe6	70,00	22,00	0,434	0,391	1427,00	5,00	225,00
	V4	70AlFe6	70,00	22,00	0,434	0,391	1427,00	4,00	225,00
	V5	70AlFe6	70,00	22,00	0,434	0,391	1427,00	4,00	225,00

Zátěž	Název	Un [kV]	In [A]	cos φ <sub>n</sub>	P <sub>n</sub> [kW]	Q <sub>n</sub> [kVAr]	S <sub>n</sub> [kVA]
	Z3	22,00	5,24	0,95	190,00	62,45	200,00
	Z4	22,00	10,5	0,95	380,00	124,9	400,00
	Z5	22,00	13,12	0,95	475,00	156125,00	500,00
	Z6	22,00	5,24	0,95	190,00	62,45	200,00
	Z7	22,00	2,62	0,95	95,00	31225,00	100,00

**Poměry v uzlech**

/	U <sub>a</sub> [kV]	α <sub>a</sub> [°]	dU <sub>na</sub> [%]
U1	115,00	30,00	-4,55
U2	23,08	29,79	-4,90
U3	22,96	29,53	-4,35
U4	22,62	29,15	-2,80
U5	22,52	29,05	-2,37
U6	22,49	29,01	-2,24
U7	22,48	29,00	-2,20

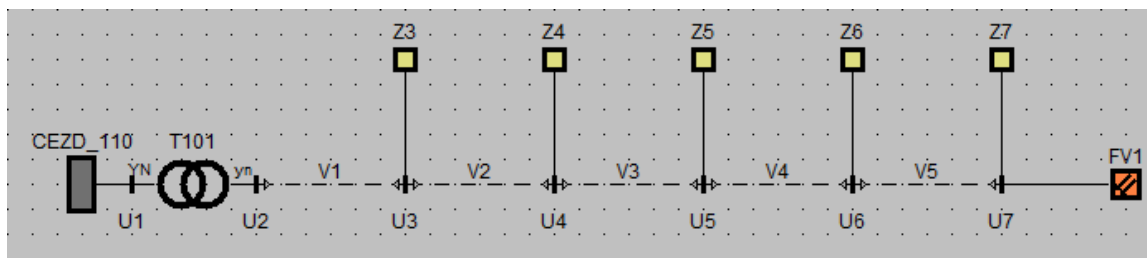
  

**Poměry ve větvích**

/	Uzel	I <sub>a</sub> [A]	α <sub>a</sub> [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]
T101	U1	7,92	-27,25	1402,27	722,05	1577,25
V1	U2	35,67	-18,61	1352,93	450,00	1425,81
V2	U3	30,66	-18,71	1157,78	381,56	1219,03
V3	U4	20,48	-18,84	763,08	247,86	802,32
V4	U5	7,68	-18,66	285,34	91,09	299,53
V5	U6	2,56	-18,40	95,03	29,81	99,60

## Příloha 2 – Kabelový vývod B

Schéma sítě



Základní parametry pro nízké zatížení (Z0,65; M):

TR	Název	Un1 [kV]	Un2 [kV]	St [MVA]	Pk [kW]	uk [%]	IO [%]	PO [kW]
	T101	110,00	23,00	40,00	224,7	11,2	0,67	48,6

Vedení	Název	Typ	růřez [mm <sup>2</sup> ]	Un [kV]	R [Ω/km]	X [Ω/km]	B [μS/km]	Délka [km]	Imax [A]
	V1	240AXEKCY	240,00	22,00	0,13	0,20	94,00	1,00	506,00
	V2	240AXEKCY	240,00	22,00	0,13	0,20	94,00	3,00	506,00
	V3	240AXEKCY	240,00	22,00	0,13	0,20	94,00	2,00	506,00
	V4	240ANKO	240,00	22,00	0,16	0,08	98,00	2,50	371,00
	V5	150AXEKCY	150,00	22,00	0,21	0,21	79,00	1,50	356,00

Zátěž	Název	Un [kV]	In [A]	cos φn	Pn [kW]	Qn [kVAr]	Sn [kVA]
	Z3	22,00	2,62	0,95	95,00	31,23	100,00
	Z4	22,00	2,62	0,95	95,00	31,23	100,00
	Z5	22,00	3,94	0,95	142,50	46,84	150,00
	Z6	22,00	5,25	0,95	190,00	62,45	200,00
	Z7	22,00	2,62	0,95	95,00	31,23	100,00

**Poměry v uzlech**

/	Ua [kV]	αa [°]	dUna [%]
U1	115,00	30,00	-4,55
U2	22,12	29,90	-0,53
U3	22,11	29,88	-0,52
U4	22,11	29,84	-0,49
U5	22,11	29,82	-0,48
U6	22,10	29,81	-0,46
U7	22,10	29,81	-0,45

**Poměry ve větvích**

/	Uzel	Ia [A]	αa [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]
T101	U1	3,38	7414,00	667,18	86,81	672,80
V1	U2	16,81	16,19	618,01	-180,68	643,88
V2	U3	14,32	17,50	522,90	-166,09	548,65
V3	U4	11,66	16,59	427,67	-128,74	446,63
V4	U5	7,76	16,21	285,07	-83,85	297,15
V5	U6	2,58	15,47	95,01	-26,64	98,67

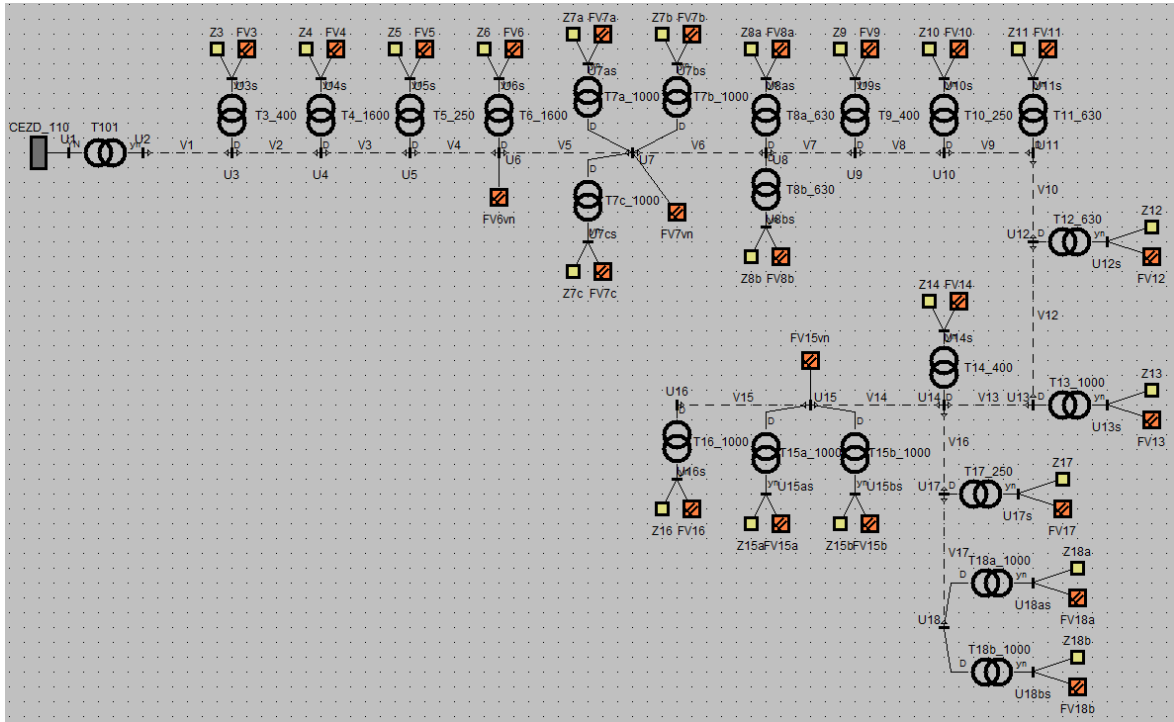




## Příloha 4 – Vývod průmyslová zóna

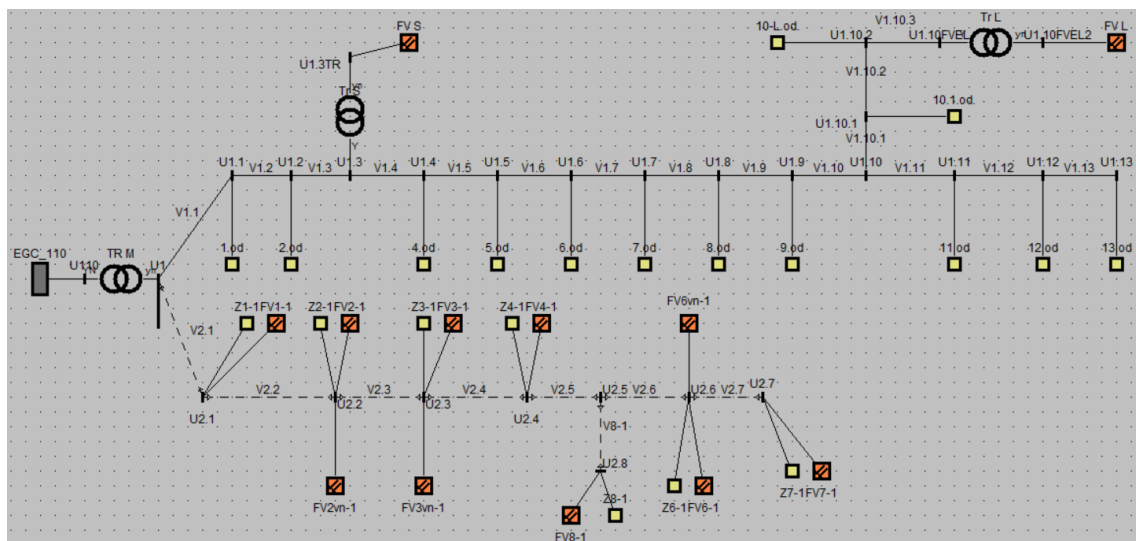
Celkový vývod průmyslová zóna:

Schéma:



## Příloha 5 – Složený vývod Kasejovice a průmyslová zóna

Schéma; parametry pro nízkou zátěž + FVE

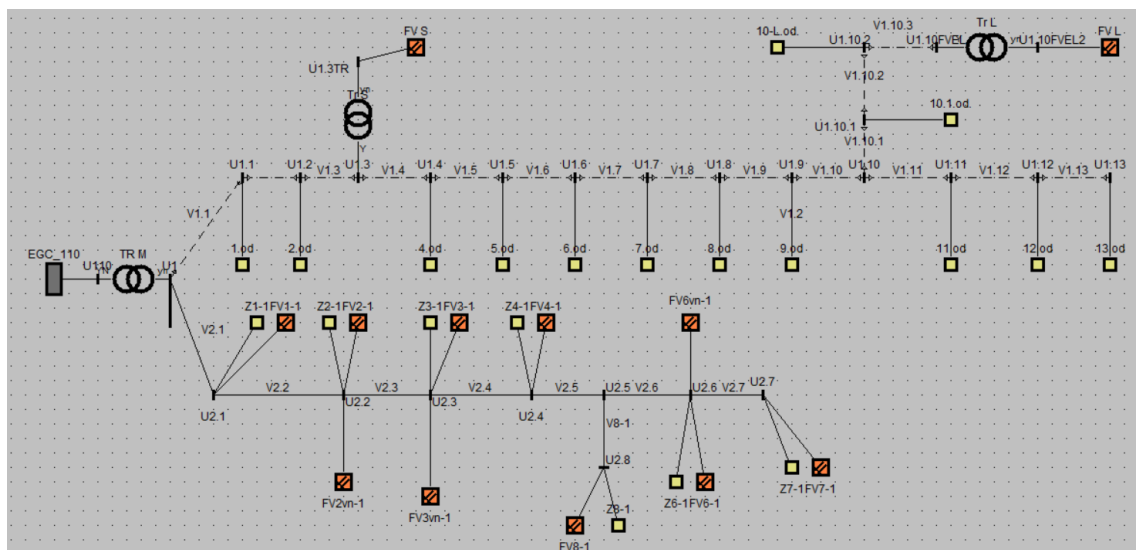


Napájecí uzel								
Název	Un [kV]	Uprov [kV]	Izkr [kA]	Szkr [MVA]	R/X			
EGC_110	110	115, 115, 115	6,29837	1200	0,15			
Transformátor								
Název	Un1 [kV]	Un2 [kV]	St [MVA]	Pk [kW]	uk [%]	l0 [%]	P0 [kW]	Reg. odb.
TR M	110	23,1	25	161,8	11,2	0,93	33,3	●
Tr L	22	0,4	0,63	6,5	4	0	0	
Tr S	22	0,4	1	10,5	6	0	0	
Vedení								
Název	Typ	Průřez [mm <sup>2</sup> ]	Un [kV]	R [Ω/km]	X [Ω/km]	B [μS/km]	Délka [km]	I <sub>max</sub> [A]
V1.1	120AlFe6	120	22	0,225	0,363	1,469	1,37	357
V1.2	120AlFe6	120	22	0,225	0,363	1	4,837	357
V1.3	120AlFe6	120	22	0,225	0,363	1	1,2	357
V1.4	95AlFe6	95	22	0,301	0,374	1	1,395	289
V1.5	95AlFe6	95	22	0,301	0,374	1	1,98	289
V1.6	95AlFe6	95	22	0,301	0,374	1	2,185	289
V1.7	95AlFe6	95	22	0,301	0,374	1,448	4,713	289
V1.8	95AlFe6	95	22	0,301	0	1,448	1	289
V1.9	70AlFe6	70	22	0,434	0	1,427	,96	225
V1.10	70AlFe6	70	22	0,434	0,391	1,427	0,269	225
V1.10.1	35AlFe6	35	22	0,778	0,389	1,339	0,239	150
V1.10.2	35AlFe6	35	22	0,778	0,389	1,339	0,678	150
V1.10.3	35AlFe6	35	22	0,778	0,389	1,339	0,036	150
V1.11	70AlFe6	70	22	0,434	0,391	1,427	1,366	225
V1.12	70AlFe6	70	22	0,434	0,391	1,427	2,29	225
V1.13	70AlFe6	70	22	0,434	0,391	1	2,9	225
V2.1	240ANKO	240	22	0,157	0	98	1,62	371
V2.2	240AXEKCY	240	22	0,128	0	94	1,85	506
V2.3	240AXEKCY	240	22	0,128	0	94	,76	506
V2.4	240AXEKCY	240	22	0,128	0	94	,92	506
V2.5	240ANKO	240	22	0,157	0,082	98	0,647	371
V2.6	240ANKO	240	22	0,157	0,082	98	0,564	371
V2.7	240ANKO	240	22	0,157	0,082	98	0,394	371
V8-1	240ANKO	240	22	0,157	0,082	98	0,538	371

Zátěž						
Název	Un [kV]	Iprov [A]	cos φ prov	Pprov [kW]	Qprov [kVAr]	Sprov [kVA]
1.od	22	6,5608	0,98	245	49,7494	250
2.od	22	1	0,98	47,04	9,55188	48
4.od	22	0	0,98	7,35	1,49248	7,5
5.od	22	1	0,98	35,28	7,16391	36
6.od	22	1	0,98	32,34	6,56692	33
7.od	22	2	0,98	63,21	12,8353	64,5
8.od	22	9	0,98	330,26	67,0622	337
9.od	22	0,41	0,98	15,19	3,08446	15,5
10-L.od.	22	0,65608	0,98	24,5	4,97494	25
10.1.od.	22	0,65608	0,98	24,5	4,97494	25
11.od	22	1,96824	0,98	73,5	14,9248	75
12.od	22	1,57459	0,98	58,8	11,9398	60
13.od	22	2	0,98	63,7	12,9348	65
Z1-1	22,0	3,080	0,98	115	23,3517	117,347
Z2-1	22,0	2,142	0,98	80	16,2447	81,6327
Z3-1	22,0	3,615	0,98	135	27,4129	137,755
Z4-1	22,0	6,025	0,98	225	45,6882	229,592
Z6-1	22,0	3,213	0,98	120	24,367	122,449
Z7-1	22,0	2,678	0,98	100	20,3059	102,041
Z8-1	22	3	0,98	125	25,3823	127,551
Fotovoltaická elektrárna						
Název	Un [kV]	Sn [kVA]	Pprov [kW]			
FV L	0,40	600	600,00			
FV S	0,40	900,00	900,00			
FV1-1	22,00	90,00	90,00			
FV2-1	22,00	30,00	30,00			
FV2vn-1	22,00	2 300,00	2 300,00			
FV3-1	22,00	90,00	90,00			
FV3vn-1	22,00	3 000,00	3 000,00			
FV4-1	22,00	30,00	30,00			
FV6-1	22,00	60,00	60,00			
FV6vn-1	22,00	482,00	482,00			
FV7-1	22,00	30,00	30,00			
FV8-1	22,00	120,00	120,00			

## Příloha 6 – Složený vývod Kasejovice 2 a průmyslová zóna 2

Schéma; parametry pro nízkou zátěž + FVE

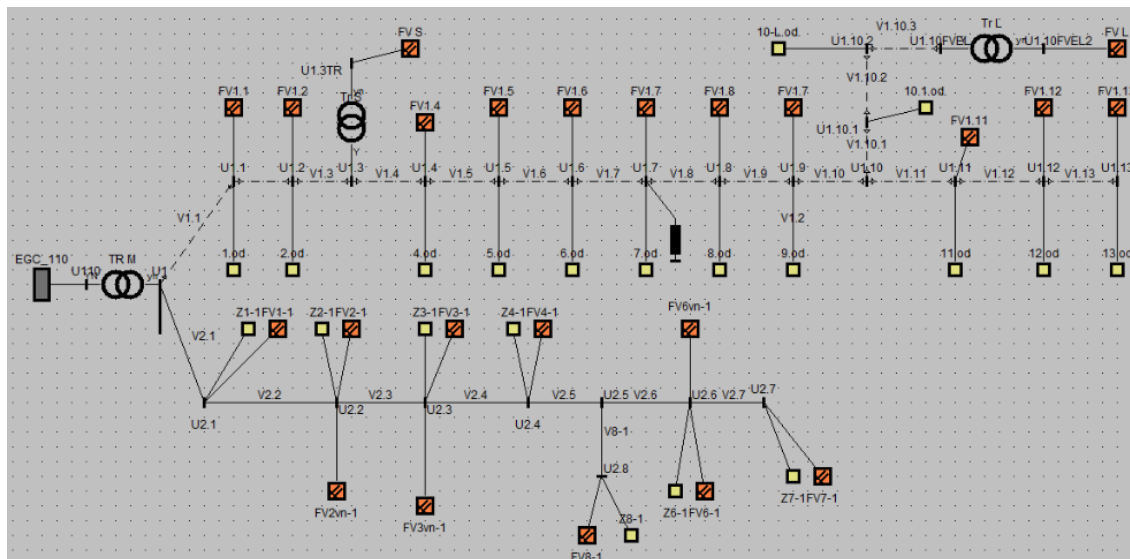


Napájecí uzel									
Název	Un [kV]	Uprov [kV]	Izkr [kA]	Szkr [MVA]	R/X				
EGC_110	110	15, 115, 11	6,29837	1200	0,15				
Transformátor									
Název	Un1 [kV]	Un2 [kV]	St [MVA]	Pk [kW]	uk [%]	I0 [%]	P0 [kW]	Reg. odb.	
TR M	110	23,1	25	161,8	11,2	0,93	33,3	●	
Tr L	22	0,4	0,63	6,5	4	0	0		
Tr S	22	0,4	1	10,5	6	0	0		
Vedení									
Název	Typ	řůřez [mm <sup>2</sup> ]	Un [kV]	R [Ω/km]	X [Ω/km]	B [μS/km]	Délka [km]	I <sub>max</sub> [A]	
V1.1	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	1,37	506	
V1.10	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	0,269	506	
V1.10.1	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	0,239	506	
V1.10.2	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	0,678	506	
V1.10.3	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	0,036	506	
V1.11	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	1,366	506	
V1.12	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	2,29	506	
V1.13	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	2,9	506	
V1.2	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	4,837	506	
V1.3	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	1,2	506	
V1.4	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	1,395	506	
V1.5	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	1,98	506	
V1.6	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	2,185	506	
V1.7	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	4,713	506	
V1.8	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	1,332	506	
V1.9	240AXEKCY	240	22	0,128	0,198	94	0,958	506	
V2.1	120AlFe6	120	22	0,225	0,363	1,469	1,617	357	
V2.2	120AlFe6	120	22	0,225	0,363	1,469	1,848	357	
V2.3	95AlFe6	95	22	0,301	0,374	1,448	0,755	289	
V2.4	95AlFe6	95	22	0,301	0,374	1,448	0,916	289	
V2.5	70AlFe6	70	22	0,434	0,391	1,427	0,647	225	
V2.6	70AlFe6	70	22	0,434	0,391	1,427	0,564	225	
V2.7	35AlFe6	35	22	0,778	0,389	1,339	0,394	150	
V8-1	95AlFe6	95	22	0,301	0,374	1,448	0,538	289	

Zátěž						
Název	Un [kV]	Iprov [A]	cos φ prov	Pprov [kW]	Qprov [kVAr]	Sprov [kVA]
1.od	22	6,5608	0,98	245	49,7494	250
10-L.od.	22	0,65608	0,98	24,5	4,97494	25
10.1.od.	22	0,65608	0,98	24,5	4,97494	25
11.od	22	1,96824	0,98	73,5	14,9248	75
12.od	22	1,57459	0,98	58,8	11,9398	60
13.od	22	1,70581	0,98	63,7	12,9348	65
2.od	22	1,25967	0,98	47,04	9,55188	48
4.od	22	0,196824	0,98	7,35	1,49248	7,5
5.od	22	0,944755	0,98	35,28	7,16391	36
6.od	22	0,866025	0,98	32,34	6,56692	33
7.od	22	1,69269	0,98	63,21	12,8353	64,5
8.od	22	8,84396	0,98	330,26	67,0622	337
9.od	22	0,40677	0,98	15,19	3,08446	15,5
Z1-1	22	3,07956	0,98	115	23,3517	117,347
Z2-1	22	2,1423	0,98	80	16,2447	81,6327
Z3-1	22	3,61513	0,98	135	27,4129	137,755
Z4-1	22	6,02522	0,98	225	45,6882	229,592
Z6-1	22	3,21345	0,98	120	24,367	122,449
Z7-1	22	2,67788	0,98	100	20,3059	102,041
Z8-1	22	3,34735	0,98	125	25,3823	127,551
Fotovoltaická elektrárna						
Název	Un [kV]	Sn [kVA]	Pprov [kW]			
FV L	0,4	600	600			
FV S	0,4	900	900			
FV1-1	22	90	90			
FV2-1	22	30	30			
FV2vn-1	22	2300	2300			
FV3-1	22	90	90			
FV3vn-1	22	3000	3000			
FV4-1	22	30	30			
FV6-1	22	60	60			
FV6vn-1	22	482	482			
FV7-1	22	30	30			
FV8-1	22	120	120			

## Příloha 7 – Analýza na celkově regulovaném vývodu příklad 2

Schéma vývodu



Parametry a spočtené hodnoty programem DNCalc:

Poměry v uzlech						
	Ua [kV]	ca [°]	dUna [%]	Zk [Ω]	α [°]	Sk [MVA]
U110	114,905	30,415	-4,459	10,088	81,463	1199,429
U1	23,037	32,817	-4,714	2,581	85,847	187,536
U1.1	23,063	32,942	-4,832	2,871	82,714	168,602
U1.2	23,155	33,387	-5,249	3,939	75,437	122,88
U1.3	23,176	33,494	-5,346	4,21	74,209	114,956
U1.4	23,195	33,59	-5,433	4,528	72,966	106,894
U1.5	23,219	33,72	-5,541	4,981	71,478	97,163
U1.6	23,236	33,829	-5,618	5,484	70,124	88,252
U1.7	23,265	34,053	-5,748	6,574	67,927	73,623
U1.8	23,277	34,104	-5,805	6,886	67,42	70,289
U1.9	23,287	34,144	-5,85	7,11	67,084	68,07
U1.10	23,289	34,153	-5,861	7,173	66,994	67,472
U1.11	23,299	34,187	-5,904	7,493	66,56	64,594
U1.12	23,309	34,218	-5,948	8,029	65,916	60,283
U1.13	23,316	34,252	-5,983	8,706	65,222	55,591
U1.10.1	23,29	34,157	-5,863	7,229	66,917	66,954
U1.10.2	23,291	34,166	-5,869	7,387	66,705	65,525
U1.10FVEL	23,291	34,166	-5,87	7,395	66,694	65,451
U1.10FVEL2	0,424	36,16	-5,952	0,013	73,434	12,716
U1.3TR	0,422	36,305	-5,419	0,011	79,199	14,564
U2.1	23,084	33,209	-4,926	3,209	80,117	150,841
U2.2	23,14	33,655	-5,18	3,952	75,843	122,472
U2.3	23,158	33,772	-5,266	4,284	73,819	112,979
U2.4	23,158	33,782	-5,264	4,693	71,751	103,134
U2.5	23,161	33,794	-5,278	5,025	69,613	96,326
U2.6	23,164	33,804	-5,292	5,319	67,969	90,998
U2.7	23,163	33,804	-5,287	5,58	65,641	86,732
U2.8	23,161	33,794	-5,277	5,27	68,725	91,836

Poměry ve větvích										
	Uzel	Ia [A]	oa [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]				
TRM	U110	47,988	-164,721	-9231,08	2449,911	9550,644				
V1.1	U1	100,758	-172,118	-4004,69	354,918	4020,387				
V1.2	U1.1	101,924	-171,91	-4055,04	365,315	4071,461				
V1.3	U1.2	98,389	-170,226	-3921,43	438,96	3945,922				
V1.4	U1.3	76,005	-170,401	-3033,69	324,456	3050,994				
V1.5	U1.4	71,404	-168,91	-2844,15	374,451	2868,689				
V1.6	U1.5	52,705	-165,66	-2083,32	390,608	2119,622				
V1.7	U1.6	49,073	-162,373	-1918,02	471,016	1975,003				
V1.8	U1.7	44,703	-174,816	-1800,99	35,571	1801,337				
V1.9	U1.8	47,927	-175,643	-1932,27	8,505	1932,288				
V1.10	U1.9	43,35	-175,029	-1748,3	25,244	1748,487				
V1.11	U1.10	29,888	-179,572	-1203,09	-78,346	1205,635				
V1.12	U1.11	17,008	174,739	-677,054	-112,672	686,365				
V1.13	U1.12	13,314	-179,938	-536,103	-38,955	537,516				
V1.10.1	U1.10	13,828	-163,739	-545,412	117,003	557,821				
V1.10.2	U1.10.1	14,46	-163,551	-569,93	124,186	583,303				
V1.10.3	U1.10.2	15,221	-161,338	-594,485	153,698	614,032				
Tr L	U1.10FVEL	15,232	-161,173	-594,488	155,528	614,496				
10-L.od.	U1.10.2	0,62	-7,312	24,5	4,975	25				
Tr S	U1.3	22,617	-165,834	-892,207	168,125	907,909				
EGC_110	U110	47,988	15,279	9231,075	-2449,91	9550,644				
FV S	U1.3TR	1243,948	-165,835	-900	124,245	908,535				
FV L	U1.10FVEL	837,767	-161,173	-600	134,86	614,969				
FV3vn-1	U2.3	77,18	-161,937	-3000	764,223	3095,809				
V2.2	U2.1	137,836	-162,014	-5328,68	1405,669	5510,963				
V2.3	U2.2	80,947	-159,337	-3102,38	948,941	3244,263				
FV2vn-1	U2.2	58,26	-166,412	-2300	402,777	2335,001				
V2.4	U2.3	5,292	-131,9	-151,846	148,328	212,27				
FV6vn-1	U2.6	12,028	-173,402	-482	23,52	482,574				
V2.5	U2.4	9,014	-159,833	-346,869	101,994	361,554				
V2.6	U2.5	8,954	-164,659	-351,938	71,901	359,208				
V2.7	U2.6	1,825	-13,243	70,003	21,465	73,22				
V8-1	U2.5	0,771	-76,903	5	30,527	30,933				
V2.1	U1	137,373	-161,724	-5283,08	1460,99	5481,37				
Napájecí uzel										
Název	Un [kV]	Uprov [kV]	Izkr [kA]	Szkr [MVA]	R/X	R0/R1				
EGC_110	110	115, 115, 1	6,29837	1200	0,15	1				
Transformátor										
Název	Un1 [kV]	Un2 [kV]	St [MVA]	Pk [kW]	uk [%]	i0 [%]	P0 [kW]	Prim.	Sekun.	Reg. odb.
TRM	110	23,1	25	161,8	11,2	0,93	33,3	YN	yn	●
Tr L	22	0,4	0,63	6,5	4	0	0	Y	yn	
Tr S	22	0,4	1	10,5	6	0	0	Y	yn	



Vedení												
Název	Typ	Průřez [mm <sup>2</sup> ]	Un [kV]	R [Ω/km]	X [Ω/km]	B [μS/km]	Délka [km]	I <sub>max</sub> [A]				
V1.1	240AXEKC	240	22	0,128	0,198	94	1,37	506				
V1.10	240AXEKC	240	22	0,128	0,198	94	0,269	506				
V1.10.1	240AXEKC	240	22	0,128	0,198	94	0,239	506				
V1.10.2	240AXEKC	240	22	0,128	0,198	94	0,678	506				
V1.10.3	240AXEKC	240	22	0,128	0,198	94	0,036	506				
V1.11	240AXEKC	240	22	0,128	0,198	94	1,366	506				
V1.12	240AXEKC	240	22	0,128	0,198	94	2,29	506				
V1.13	240AXEKC	240	22	0,128	0,198	94	2,9	506				
V1.2	240AXEKC	240	22	0,128	0,198	94	4,837	506				
V1.3	240AXEKC	240	22	0,128	0,198	94	1,2	506				
V1.4	240AXEKC	240	22	0,128	0,198	94	1,395	506				
V1.5	240AXEKC	240	22	0,128	0,198	94	1,98	506				
V1.6	240AXEKC	240	22	0,128	0,198	94	2,185	506				
V1.7	240AXEKC	240	22	0,128	0,198	94	4,713	506				
V1.8	240AXEKC	240	22	0,128	0,198	94	1,332	506				
V1.9	240AXEKC	240	22	0,128	0,198	94	0,958	506				
V2.1	120AlFe6	120	22	0,225	0,363	1,469	1,617	357				
V2.2	120AlFe6	120	22	0,225	0,363	1,469	1,848	357				
V2.3	95AlFe6	95	22	0,301	0,374	1,448	0,755	289				
V2.4	95AlFe6	95	22	0,301	0,374	1,448	0,916	289				
V2.5	70AlFe6	70	22	0,434	0,391	1,427	0,647	225				
V2.6	70AlFe6	70	22	0,434	0,391	1,427	0,564	225				
V2.7	35AlFe6	35	22	0,778	0,389	1,339	0,394	150				
V8-1	95AlFe6	95	22	0,301	0,374	1,448	0,538	289				
Zátěž												
Název	Un [kV]	In [A]	cos φ <sub>n</sub>	P <sub>n</sub> [kW]	Q <sub>n</sub> [kVAr]	S <sub>n</sub> [kVA]	I <sub>prov</sub> [A]	cos φ <sub>prov</sub>	P <sub>prov</sub> [kW]	Q <sub>prov</sub> [kVA]	S <sub>prov</sub> [kVA]	
1.od	22	6,5608	0,98	245	49,7494	250	6,5608	0,98	245	49,7494	250	
10-L.od.	22	0,65608	0,98	24,5	4,97494	25	0,65608	0,98	24,5	4,97494	25	
10.1.od.	22	0,65608	0,98	24,5	4,97494	25	0,65608	0,98	24,5	4,97494	25	
11.od	22	1,96824	0,98	73,5	14,9248	75	1,96824	0,98	73,5	14,9248	75	
12.od	22	1,57459	0,98	58,8	11,9398	60	1,57459	0,98	58,8	11,9398	60	
13.od	22	1,70581	0,98	63,7	12,9348	65	1,70581	0,98	63,7	12,9348	65	
2.od	22	1,25967	0,98	47,04	9,55188	48	1,25967	0,98	47,04	9,55188	48	
4.od	22	0,196824	0,98	7,35	1,49248	7,5	0,196824	0,98	7,35	1,49248	7,5	
5.od	22	0,944755	0,98	35,28	7,16391	36	0,944755	0,98	35,28	7,16391	36	
6.od	22	0,866025	0,98	32,34	6,56692	33	0,866025	0,98	32,34	6,56692	33	
7.od	22	1,69269	0,98	63,21	12,8353	64,5	1,69269	0,98	63,21	12,8353	64,5	
8.od	22	8,84396	0,98	330,26	67,0622	337	8,84396	0,98	330,26	67,0622	337	
9.od	22	0,40677	0,98	15,19	3,08446	15,5	0,40677	0,98	15,19	3,08446	15,5	
Z1-1	22	3,07956	0,98	115	23,3517	117,347	3,07956	0,98	115	23,3517	117,347	
Z2-1	22	2,1423	0,98	80	16,2447	81,6327	2,1423	0,98	80	16,2447	81,6327	
Z3-1	22	3,61513	0,98	135	27,4129	137,755	3,61513	0,98	135	27,4129	137,755	
Z4-1	22	6,02522	0,98	225	45,6882	229,592	6,02522	0,98	225	45,6882	229,592	
Z6-1	22	3,21345	0,98	120	24,367	122,449	3,21345	0,98	120	24,367	122,449	
Z7-1	22	2,67788	0,98	100	20,3059	102,041	2,67788	0,98	100	20,3059	102,041	
Z8-1	22	3,34735	0,98	125	25,3823	127,551	3,34735	0,98	125	25,3823	127,551	

Chod	Regulace	U [kV]	U/Un [-]	P/Pn [-]	P [kW]	Q/Qmax [-]	Q [kVAR]	cos φ
FV S	Q(U)	0,243	1,058		900	0,283	124,245	0,991
FV L	Q(U)	0,245	1,064		600	0,462	134,86	0,976
FV3vn-1	Q(U)	13,371	1,003		3000	0,506	764,223	0,969
FV2vn-1	Q(U)	13,36	1,002		2300	0,342	402,777	0,985
FV6vn-1	Q(U)	13,374	1,053		482	0,097	23,52	0,999
FV1-1	Q(U)	13,327	1,049		90	0	0	1
FV2-1	Q(U)	13,36	1,052		30	0,06	0,919	1
FV3-1	Q(U)	13,371	1,053		90	0,089	4,012	0,999
FV4-1	Q(U)	13,37	1,053		30	0,088	1,329	0,999
FV6-1	Q(U)	13,374	1,053		60	0,097	2,928	0,999
FV7-1	Q(U)	13,373	1,053		30	0,096	1,44	0,999
FV8-1	Q(U)	13,372	1,053		120	0,092	5,562	0,999
FV1.1	Q(U)	13,315	1,048		200	0	0	1
FV1.2	Q(U)	13,368	1,052		200	0,083	8,279	0,999
FV1.4	Q(U)	13,392	1,054		200	0,144	14,204	0,997
FV1.5	Q(U)	13,406	1,055		800	0,18	70,892	0,996
FV1.6	Q(U)	13,415	1,056		200	0,206	20,194	0,995
FV1.7	Q(U)	13,432	1,057		200	0,249	24,402	0,993
FV1.8	Q(U)	13,439	1,058		200	0,268	26,226	0,992
FV1.9	Q(U)	13,445	1,058		200	0,283	27,681	0,991
FV1.11	Q(U)	13,452	1,059		600	0,301	88,354	0,989
FV1.12	Q(U)	13,457	1,059		200	0,316	30,858	0,988
FV1.13	Q(U)	13,462	1,06		600	0,328	95,955	0,987