

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Hodnocení napěťových a výkonových poměrů
v distribuční síti VN při různých režimech regulace výroben**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš VALTA**
Osobní číslo: **E19N0041P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Hodnocení napěťových a výkonových poměrů v distribuční síti VN
při různých režimech regulace výroben**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

1. Popište požadavky kladené na výrobní z hlediska podpory/regulace napětí.
2. Vyhodnoťte dostupná měření s ohledem na napěťové a výkonové poměry v DS VN (analýza při napěťových extrémech a skocích, analýza přetoků činných i jalových výkonů, apod.)
3. Zhodnoťte režim regulace výroben na konstantní účinník ve vztahu k napěťovým a výkonovým poměrům v síti.
4. Zhodnoťte dopad přenastavení výroben na jinou konstantní hodnotu účinníku či jiný způsob regulace ve vztahu k napěťovým a výkonovým poměrům v síti.
5. Zhodnoťte přínosy a úskalí různých způsobů regulace napětí výroben VN a posuďte vhodnost jejich použití v praxi.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Pravidla provozování distribučních soustav, 2019
2. ČSN EN 50160: Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě, 3.vydání 2012

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

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



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

V Plzni dne 9. října 2020

Abstrakt

Předložená diplomová práce se zabývá vyhodnocením napěťových a výkonových poměrů v síti VN při různých režimech regulace výkonu. V teoretické části budou popsány požadavky, které jsou kladeny na nově připojované výrobní do distribuční sítě. Druhá část práce bude zaměřena na vyhodnocení dat z fotovoltaických, větrných a bioplynových elektráren a jejich vlivu na distribuční síť. Změnou režimu regulace jalového výkonu na vybraných výrobních bude zjišťováno jejich nové působení na distribuční síť. V závěrečné části dojde k vyhodnocení různých režimů regulace.

Klíčová slova

Distribuční soustava, regulace jalového výkonu, regulace napětí, výrobní modul, napěťové a výkonové poměry, připojení výrobní

Abstract

The presented master thesis deals with the evaluation of voltage and power flows in the MV distribution network under different Q-control modes of generating plants. The theoretical part will describe the requirements that are placed on newly connected generating plants to the distribution network. The second part of the work will focus on the evaluation of data from photovoltaic, wind and biogas power plants and their impact on the distribution network. By changing the regulation Q-control mode at selected generating plants, their new effect on the distribution network will be ascertained. In the final part, the different Q-control modes will be evaluated.

Key words

Distribution system, reactive power regulation, voltage regulation, power generators, voltage and power flows, power generators connections,

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 25.5.2021

Bc. Tomáš Valta

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za cenné rady, připomínky a za čas, který věnovala korekcím práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Martinu Kašpírkovi, Ph.D. ze společnosti EGD za konzultace a poskytnutá data pro vypracování. Nakonec své rodině za podporu během celého studia.

Seznam veličin a zkratk

U_n	Jmenovité napětí
ΔU_f	Fázový úbytek napětí
R_c	Rezistence vedení
X_c	Reaktance vedení
I_ξ	Činná složka proudu
I_j	Jalová složka proudu
P	Činný výkon
Q	Jalový výkon
S	Zdánlivý výkon
S_k	Zkratový výkon
DS	Distribuční soustava
VN, NN	Vysoké, nízké napětí
OZE	Obnovitelné zdroje energie
FVE	Fotovoltaická elektrárna
VTE	Větrná elektrárna
BPS	Bioplynová stanice
DTR	Distribuční transformátor
VM	Výrobní modul
PPDS	Pravidla provozování distribuční soustavy
TR	Transformátor

Obsah

Úvod	10
1. Řízení napěťových a výkonových poměrů v DS	12
1.1. Vliv výroben připojovaných do DS na napětí	12
1.2. Udržení velikosti napětí v DS.....	13
1.3. Zařízení pro řízení napěťových a výkonových poměrů.....	15
1.4. Přínosy řízení napěťových a výkonových poměrů	17
2. Požadavky kladené na připojované výrobní	18
2.1. Legislativa	18
2.2. Rozdělení požadavků na výrobní podle PPDS	19
2.3. Požadavky na zpětné vlivy způsobené výrobnou.....	21
2.4. Chování výrobní	22
2.5. Řízení činného výkonu výroben.....	26
2.6. Řízení jalového výkonu výroben.....	28
3. Vyhodnocení vlivu výroben na napěťové a výkonové poměry	34
3.1. Odchylky napětí U při režimu regulace $\cos\varphi_{\text{fix}}$	35
3.2. Napěťové poměry v závislosti na P a Q – FVE.....	37
3.3. Napěťové poměry v závislosti na P a Q – VTE	48
3.4. Napěťové poměry v závislosti na P a Q – BPS	53
3.5. Zhodnocení regulace na konstantní účinník	55
4. Napěťové a výkonové poměry pro různé regulace výrobní	56
4.1. Regulace na účinník = 0,97 a 0,95	59
4.2. Regulace $\cos\varphi=f(P)$	64
4.3. Regulace na konstantní napětí U	67
4.4. Regulace $Q=f(U)$	70
5. Zhodnocení a porovnání různých regulací výrobní	77
6. Závěr	79
Seznam literatury a použitých zdrojů	81
Přílohy	82

Úvod

Z názvu DS vyplývá, že má za úkol distribuovat (dopravit a rozdělit) elektrickou energii koncovým odběratelům. O distribuci se stará tzv. provozovatel DS, kterým může být fyzická nebo právnická osoba držící licenci pro distribuci elektrické energie. V Česku se nachází mnoho distributorů s lokálním působením. Mezi velké regionální provozovatele řadíme E.ON, ČEZ a PRE. Provozovatel DS se zodpovídá za spolehlivý a bezpečný provoz, rozvoj a ekologický vliv DS.

Velkou integraci výroben do DS na hladiny VN a NN zapříčinil rozvoj výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů, zejména solární boom v letech 2008-2009, kdy do roku 2012 bylo v ČR instalováno kolem 2 GW ve FVE. Tento instalovaný výkon ve FVE se v posledních letech téměř nezměnil, z důvodu zastavení podmínek pro získání dotace. Evropskou unií byl přijat tzv. Zimní balíček, který chce navýšením podílu OZE na energetickém mixu, chce snížit uhlíkovou stopu. Jako cíl si zadává do roku 2030 zvýšit podíl spotřebované energie z OZE na 32 %, ČR se momentálně pohybuje na 15% podílu OZE. Z toho lze odvodit, že v příštích letech dojde k navýšení instalovaných OZE, které právě bývají instalovány na hladiny VN a NN. Dále byl, v březnu roku 2015, vládou ČR schválený Národní akční plán – Smart Grids (NAP SG) zabývající se rozvojem nárůstu instalovaného OZE, podle kterého by do roku 2040 měl vzrůst instalovaný výkon OZE na 10,4 GW. K největšímu nárůstu instalovaného výkonu OZE má dojít na hladině NN a to o 4,7 GW, přičemž instalovaný výkon FVE by se měl dostat na hodnotu 4 GW. [1,2]

Na dříve připojované zdroje nebyly kladné nároky na podporu napětí, většina zdrojů byla provozována s regulací na konstantní hodnotu účinníku, která k udržení kvality napětí příliš nepřispívala. Od dubna 2019 jsou kladeny na výrobní přísnější požadavky. Ty jsou dány implementací NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/631 do PPDS, nařízení udává požadavky pro připojované výrobní. Nově připojované zdroje musí disponovat prostředky pro podporu napětí v síti, tím může být autonomní regulace $Q(U)$, $P(U)$ nebo režimy regulace Q podle PPDS. Starší výrobní jsou od těchto požadavků osvobozeny, i když je otázkou, zda by nebylo pro ně lepší přejít na tento typ regulace, pokud jim to technické podmínky dovolují a napomáhat tak kvalitě napětí. Při provozování výrobní s autonomní regulací, není po výrobních požadováno udržení účinníku v požadovaných mezích. Vzhledem k očekávanému nárůstu připojovaných výroben je zapotřebí tyto požadavky přijmout co nejdříve, neboť starší zdroje bez autonomní regulace sráží efektivitu nových zdrojů.

Díky autonomním regulacím je možné dosáhnout stálejšího napětí v místě připojení výrobní a omezit rozkolísání napěťového profilu, tím jsme schopni navýšit celkovou kvalitu napětí v síti. Zvláště u OZE typu FVE nebo VE může díky proměnlivé výrobě činného výkonu během dne, závislého na slunečném záření, resp. povětrnostních podmínkách, docházet k silným změnám napětí. [2]

V diplomové práci jsem si stanovil cíle, jimž se budu věnovat ve dvou částech. První praktická část se bude zaměřena na výrobní na hladině VN s regulací na konstantní účinník. Z obdržných měření vyhodnotím tento typ regulace z hlediska jeho vlivu na napěťové a výkonové poměry v místě připojení výrobní. V druhé části vytipuji sítě, ve kterých dochází díky připojeným výrobnám k nejhorším napěťovým a výkonovým poměrům. Výrobnám pracujících do těchto sítí změní způsob regulace jalového výkonu a vyhodnotím nové napěťové a výkonové poměry. V závěru bych měl dojít k výsledku, která regulace je pro kvalitu napětí v DS výhodnější.

1. Řízení napěťových a výkonových poměrů v DS

Hlavním úkolem provozovatele DS je udržení napětí v dovolených mezích. Velikost napětí v DS může svoji velikost měnit v rozsahu daném normou ČSN EN 50160 a to $\pm 10\% U_n$. Nejdůležitějším a základním prostředkem pro udržení napětí je správně vypracovaný projekt DS. Při návrhu je třeba dodržet správnou délku vedení VN a počet napájecích stanic mezi hladinami napětí DS, toto se pozitivně projeví na menších odchylkách napětí. Mezi nejhlavnější prostředky pro regulaci napětí v DS můžeme zařadit transformátory. S rostoucím počtem připojovaných výroben do DS je třeba volit i správné průřezy vodičů, které v dnešní době bývají unifikované. Při návrhu sítě je nutné také počítat s možným rozšířením sítě. Pro udržování odchylek napětí v již provozovaných sítích mohou dopomoci různé řídicí operace. Mezi ně řadíme zejména odepínání málo zatíženého vedení, tím lze zamezit přetokům jalového výkonu, obzvláště v kabelových sítích. Většinou se provozovatel snaží držet napětí v napájecích místech v co nejvýše možné dovolené odchylce napětí, aby mohl snadněji dosáhnout rezervy v odchylce napětí i na konci dlouhých vedení. Dodržením těchto pravidel jsme schopni zajistit bezpečný a správný chod zařízení připojených do DS. Potom je možné připojit více odběratelů a výroben do DS. V neposlední řadě také dochází ke snížení ztrát v DS. [2]

1.1. Vliv výroben připojovaných do DS na napětí

V běžné koncepci DS, bez vnořených zdrojů, byla elektrická energie distribuována od centralizovaných výroben ke spotřebiteli. V DS nedocházelo ke zvýšení napětí, ale pouze k poklesu jeho velikosti v závislosti na vzdálenosti od distribučního transformátoru. Nynější koncepce DS je se zdroji připojovanými na hladinu VN a NN, které jsou označovány jako decentralizované zdroje. Nejčastěji se jedná o lokální obnovitelné zdroje. OZE jako FVE a VTE mají díky svému charakteru proměnlivou a časově nestálou výrobu a tím ovlivňují kvalitu napětí v síti, např. problém s udržením napětí v definovaných mezích $\pm 10\% U_n$. Rozšířením těchto decentralizovaných zdrojů následně dochází k zpětným přetokům výkonu do nadřazených soustav.

Připojením výroby do DS dochází ke změnám výkonových poměrů, které působí na parametry napětí. Zejména se jedná o zvýšení napětí, které bývá největší v místě připojení výroby. Ke zvýšení napětí dochází, pokud je aktuální výroba elektrické energie větší než spotřeba. Velikost zvýšeného napětí je závislá na dodávaném výkonu výrobnou a lze jej vyjádřit z následující rovnice:

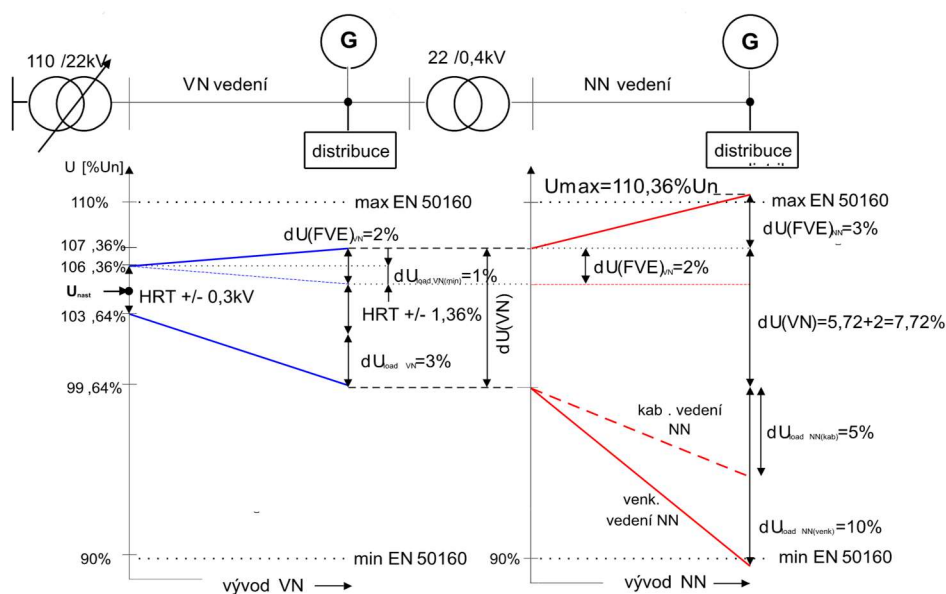
$$\Delta U_f = R_v \cdot I_\xi \pm X_v \cdot I_j = R_v \cdot \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U} \pm X_v \cdot \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (1.1)$$

Z této rovnice je zřejmé, že ke zvýšení dochází při dodávce činného výkonu, kdy má proud opačný směr ($-I_c$) oproti spotřebě, a tedy dojde k přičtení napětí ΔU_f . Snížení ΔU_f je v tomto případě možné odběrem jalového výkonu, který přímo ovlivňuje proud I_j . Ovšem odběrem proudu I_j navyšujeme celkové proudové zatížení vedení a tím i ztráty na vedení. Při případné regulaci odběrem jalového výkonu, musí být síť kapacitně připravena. Dále je z rovnice také patrné, že velikost zvýšeného napětí je závislá na parametrech napájecího vedení R_v a X_v . Pokud bude v síti nízký poměr R_v/X_v , má Q má slabý vliv na U . Pro hladinu VN, kde převládá parametr X_s ($R/X \approx 0,2 \div 1$) je tedy výhodnější použít autonomní regulaci $Q(U)$. Pro hladinu NN, kde je R_s patrnější, je vhodnější použít regulaci $P(U)$.

Kolísání napětí je způsobeno změnou dodávky činného výkonu, ke kterému dochází převážně u FVE a VTE. Nesymetrie napětí se vyskytuje převážně na hladině NN, na kterou mohou být připojovány jednofázové, popřípadě dvoufázové výroby. Při připojení výroby, např. pomocí střídače, může dojít k deformaci sinusové průběhu napětí, díky generování harmonických složek střídačem.[2]

1.2. Udržení velikosti napětí v DS

Obrázek níže (obr. 1.1) ukazuje napěťové profily neboli tzv. rozevírání napěťových nůžek, které mohou nastat připojením výroby na hladinu napětí VN a NN a s nastavením odbočky transformátoru. V DS se pro řízení napětí nejčastěji využívá změna odbočky regulačního transformátoru nebo řízení výroby. Regulační transformátory 110/22 kV dokáží měnit svou odbočku pod zatížením a tím měnit napěťové poměry i během dodávky elektrické energie.



Obr. 1.1: Rozevírání napěťových nůžek v DS [3]

Spodní napěťový profil může značit případ, kdy je síť silně zatížena a vnořené FVE nevyrobí (to může nastat ve večerních hodinách). Napěťový profil vycházející z hodnoty 103,64 % U_n , který odpovídá hodnotě napětí sekundárního vinutí regulačního transformátoru. Ten obvykle bývá pro oblast E.ON západ, s předpokladem úbytku napětí, nastaven na hodnotu 23,1 kV (105 %), do této hodnoty je zahrnuta polovina necitlivosti regulátoru transformátoru 0,3 kV (1,36 %), potom tedy 103,64 % U_n . Na vedení VN nám dochází k úbytku napětí o 4 %. Při nastavení střední odbočky na DTR a charakteristickým úbytku 10 % se dostáváme na konci vedení NN na hodnotu 89,64 % U_n . Na konci vedení NN tedy dochází k podpětí. Z obr. 1.1 je zřejmé, že podmínky pro kabelové vedení na hladině NN jsou značně lepší.

Horní napěťový profil odpovídá případu, který může nastat např. během letního poledne, kdy je síť odlehčena, ale FVE vyrábějí naplno. Napěťový profil vychází z hodnoty 106,36 % U_n , kdy má regulační transformátor na sekundárním vinutí hodnotu 23,1 kV (105 %), opět je zahrnuta polovina necitlivosti regulátoru 0,3 kV (1,36 %). Připojením výroby na hladinu VN, můžeme napětí zvýšit maximálně o 2 %, přičemž minimální zatížení sítě VN je kolem 1 %, tím se dostáváme v místě předání mezi VN a NN na hodnotu již 107,36 % U_n . Na DTR ponecháme střední odbočku. Pro výroby na hladině NN je zvýšení napětí stanoveno až na 3 %, díky tomu se na konci vedení, kde je i výroba připojena, dostáváme na hodnotu napětí 110,36 % U_n , kdy se už jedná o přepětí a dochází tak přetokům elektrické energie zpět do nadřazených soustav. Tato velikost napětí již neodpovídá normě ČSN EN 50160. Odstranění přepětí je možné docílit přepnutím ze střední odbočky distribučního transformátoru VN/NN na odbočku +2,5 %, tím dojde k poklesu napětí na straně NN, ovšem zvýšíme tím problém s podpětím. Nevýhodou DTR (22/0,4 kV) je, že nelze přepínat jejich odbočku pod zatížením. Poté nemůže docházet během dne k přepínání odboček a tím tak eliminaci přepětí nebo podpětí. Tento problém je tedy možné vyřešit regulačním transformátorem VN/NN nebo autonomní regulací napětí výroby, kdy by výroba poté nezvyšovala napětí v místě svého připojení. Pro vylepšení napěťových a výkonových poměrů se mohou využít statické kompenzátory, které vyrábějí jalový výkon, často v místě spotřeby. Potom nedochází k velkým přetokům jalového výkonu po vedení a následně se snižuje i úbytek napětí.[3]

1.3. Zařízení pro řízení napěťových a výkonových poměrů

a) Regulační transformátor

Transformátory 110/22 kV, konstrukčně řešeny jako klasické transformátory, mají odbočky přepínané na straně vyššího napětí pod zatížením. Přepínání odbočky, vycházející z hodnoty napětí změřené na straně nižšího napětí, je realizováno pomocí hladinového regulátoru napětí HRT. Tyto transformátory zvýšením hladiny napětí kompenzují velké zatížení sítě, kterou napájí. Nejčastěji jsou transformátory vybaveny 17 odbočkami, kdy 9 odbočka je střední a odpovídá jmenovitému převodu. Odbočky se nejčastěji číslují od nejnižší, která odpovídá nejmenšímu počtu vstupních závitů. Pro zvýšení napětí na straně nižšího napětí je nutno přepnout odbočku na nižší číslo a obráceně. Nejpoužívanější typ transformátoru je $110 \pm 8 \times 2 \% / 23 \text{ kV}$.

Pro distribuční transformátory 22/0,4 kV jsou odbočky přepínané na straně vyššího napětí, ale bez zatížení. Přepínání je prováděno ručně. Slouží pro regulaci úbytku napětí na vedení a zlepšení napěťových poměrů pro vzdálenější transformátory. Transformátory mají regulační rozsah $VN \pm 2 \times 2,5 \% / NN \text{ kV}$ nebo starší typy $VN \pm 5 \% / NN \text{ kV}$. Jmenovitý převod je VN/0,4 kV pro starší transformátory, novější transformátory využívají převod VN/0,42 kV nebo v ojedinělých případech VN/0,41 kV. V DS se díky většímu zastoupení starších typů transformátoru častěji objevuje první případ jmenovitého převodu. Ten se ovšem zdá vhodnější v případě připojování zdrojů na hladinu NN, kdy je větší rezerva pro zvýšení napětí způsobené dodávkou činného výkonu výrobnou. [4]

b) Regulace na výrobně

Synchronní výrobní modul

Synchronní generátor, používaný pro synchronní VM, umožňuje změnou budícího proudu řídit tok jalového výkonu a přecházet tím do režimu přebuzeného nebo podbuzeného. Pokud bude pracovat synchronní generátor v přebuzeném režimu, má z pohledu sítě kapacitní charakter a dodává jalový výkon. Přebuzený režim je omezen zejména tepelnými parametry, které odpovídají jmenovitému chodu. Omezuje se velikost budícího proudu v rotoru a statorového proudu. V podbuzeném režimu má induktivní charakter a jalový výkon ze sítě odebírá. Do tohoto režimu se přechází např. při odlehčení soustavy. Provoz při tomto režimu je dán oteplením čel statoru a statickou stabilitou stroje. [5]

Nesynchronní výrobní modul

Pro nesynchronní VM se nejčastěji používají střídače, popřípadě asynchronní generátor.

Střídače jsou měniče stejnosměrného napětí na střídavé napětí, používající výkonové polovodičové součástky. V dnešní době jsou to zejména výkonové tranzistory IGBT. Pro spínání se používá pulzně šířková modulace PWM, tímto řízením měnič přeměňuje stejnosměrné napětí na sinusové napětí, avšak i s poměrně velkým obsahem vyšších harmonických, které způsobují rušení. Moderní střídače řízením výstupního úhlu PWM modulací jsou schopny dodávat jalový výkon, v případě možnosti reverzního chodu i odebrat jalový výkon. Řídící úhel, který je dán fázovým posunem výstupního napětí a proudu, je úměrný fázovému posunu harmonického napětí a proudu v klasických střídavých soustavách. Střídače se používají pro připojení všech fotovoltaických elektráren do distribučních soustav. [6]

Asynchronní generátor může být klasický asynchronní motor s kotvou nakrátko pracující v generátorickém režimu, který je do veřejné třífázové sítě připojen pomocí frekvenčního měniče, jenž umožňuje řízení jalového výkonu. Starší asynchronní generátory přímo připojené k síti jalový výkon pouze odebíraly, a proto bylo nutné tento odebíraný jalový výkon kompenzovat např. kondenzátorovými bateriemi.

c) Statické kompenzátory pro regulaci Q

Statické kompenzátory jsou tvořeny pasivními výkonovými (kondenzátor nebo tlumivky) a polovodičovými spínacími prvky a mohou se využívat pro kompenzaci jalového výkonu např. u FVE nebo VTE, kde ale musí mít zajištěnou rychlou regulaci. Nejjednodušší statické kompenzátory jsou spínané kondenzátory, resp. spínané tlumivky sloužící pro dodávku, resp. odběr jalového výkonu při paralelním zapojení. Jako kombinace dvou výše uvedených statických prvků slouží statický VAR kompenzátor SVC, který je standardně tvořen paralelní kombinací kondenzátorů, pevných nebo tyristorově spínaných, a tyristorově řízenou a spínanou tlumivkou. Přes zvyšovací transformátor je SVC paralelně připojen k soustavě. Díky říditelným tyristorům je možné plynulé nastavení reaktance SVC. Toto nastavení umožní dodávat nebo odebrat jalový výkon dle nastaveného kapacitního nebo induktivního charakteru SVC. Při kapacitním charakteru dochází k poklesu reaktance mezi konci vedení a vzrůstu činného výkonu. Induktivní charakter SVC má opačný vliv.[7]

Více informací o všech statických kompenzátorech lze najít v [7].

1.4. Přínosy řízení napěťových a výkonových poměrů

- **Pro zvýšení bezpečnosti a hospodárnosti provozu** se za pomoci efektivního využití, dostupného regulačního jalového výkonu výroben, předchází napěťové nestabilitě soustavy a vyloučí se neefektivní přetok jalového výkonu a s tím spojené snižování technických ztrát.
- Udržováním správné bilance jalového výkonu v pilotních uzlech zajistíme stabilitu napětí v DS, čím **navýšíme kvalitu dodávky elektrické energie pro zákazníka**.
- S použitím regulace Q a U jsme schopni **dodržovat smlouvenou hodnotu toku jalového výkonu** přes transformátory nebo na vedení.
- Při připojování větrných a fotovoltaických výroben do DS, dochází k ovlivňování napěťových a výkonových poměrů. Při zařazení těchto výroben do regulačního procesu Q a U, jsme schopni **odstranit nevýhody větrných a fotovoltaických výroben**, právě ve prospěch regulované soustavy.
- Pro užitek regulované soustavy, při použití regulace Q a U, je možnost do regulačního procesu DS **připojit závodní elektrárny a jejich kompenzační zařízení**.
- Regulovaná soustava dokáže zareagovat na změny napětí rychleji než automatika, popřípadě než ruční zásah pro změnu odbočky regulačního transformátoru. Je tedy možnost **použít levnější transformátor s menším počtem regulačních odboček**.
- Při použití ASRU je regulace Q a U zcela automatická a vyžaduje tak **minimální zásah z dispečinku DS nebo výroby**.
- Řízením generátorů systémem pro regulaci Q a U jsme schopni **snížit nežádoucí přetok jalového výkonu** mezi nimi.[8]

2. Požadavky kladené na připojované výrobní

2.1. Legislativa

Zákon č. 458/2000 Sb. – Energetický zákon

Zákon č. 458/2000 Sb. „o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon)“ zpracovává předpisy vydané Evropskou unií pro podnikání v energetických oblastech – Elektroenergetika, plynárenství a teplárenství.

Tento zákon č. 458/2000 Sb. dle § 23 uděluje práva a povinnosti výrobcí elektřiny. Pro připojení do DS musí splnit obchodní podmínky dle PPDS a zajistit svou technickou kvalitu. Při splnění podmínek je výrobce povinen připojení do DS hradit na své náklady. Po připojení má výrobce právo dodávat vyrobenou energii zákazníkům za pomoci DS. Pokud mu podmínky dle PPDS dovolí, může také nabízet a poskytovat podpůrné služby pro stabilní chod DS, ovšem je povinen se řídit pokyny technického dispečinku. V případě neoprávněného odběru má výrobce právo až ukončit dodávku elektrické energie zákazníkovi.

Provozovatel distribuční soustavy je dle § 25 definován jako subjekt zajišťující spolehlivý provoz, obnovu a rozvoj DS. Je povinen řídit toky elektrické energie v DS v kooperaci s ostatními provozovateli DS, popřípadě provozovatelem PS. § 25 uděluje PDS právo přerušit odběr elektrické energie z výrobní ve prospěch spolehlivého chodu DS. [9]

Všechna práva a povinnosti pro výrobce elektrické energie, resp. provozovatele DS jsou uvedeny v zákoně č. 458/2000 Sb. § 23, resp. § 25 dostupného např. na stránkách ERÚ.

Pravidla pro provozování distribučních soustav

Při připojování výrobních modulů VM k DS je třeba dodržovat podmínky a požadavky dané dokumentem PPDS, a to přesněji dle přílohy „č.4 – Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení“. Je nezbytné zajistit technické požadavky pro ochranu, měření nebo HDO. Na výrobní jsou kladené požadavky zajišťující podporu sítě. PPDS také udává povolené hodnoty zpětných vlivů výroben na DS. Tento dokument přebírá a implementuje požadavky dané „NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/631“, dále jen RfG. [11,12]

Požadavky kladené PPDS se nevztahují na VM poskytující záložní elektřinu, které jsou v provozu méně než 5 minut během jednoho měsíce při normálním stavu, nebo na VM sloužící k dočasným dodávkám elektrické energie. [11]

ČSN EN 50160

ČSN EN 50160, přesný název: „Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí“, je do češtiny přeložená evropská norma určená pro uživatele veřejných DS NN, VN a VVN. Norma předkládá hlavní charakteristiky napětí v místě připojení při normálních provozních podmínkách. Pro charakteristiky napětí, jako jsou odchylky napájecího napětí, kolísání napětí, nesymetrie napájecího napětí nebo harmonická napětí, jsou normou definovány limitní hodnoty, které musí být dodrženy pro procentní část sledované doby. [10]

2.2. Rozdělení požadavků na výrobní podle PPDS

Při připojení výrobní musí být splněny především 4 základní předpoklady [13]:

- a) **Dostatečná kapacita sítě** schopná přenést maximální výkon dodávaný výrobnou
- b) **Zpětné vlivy způsobené výrobou**, které jsou příčinou zvýšeného napětí v místě připojení, změny napětí při spínání nebo kolísání napětí. Výrobní, připojené pomocí střídače, nesmí ovlivňovat kvalitu napětí generováním nadměrného množství proudů vyšších harmonických. Je nežádoucí, aby zpětné vlivy způsobené výrobou, ovlivňovaly signál HDO. Ve všech přípojních místech výroben musí být splněny limity kvality napětí dle ČSN EN 50160
- c) **Požadavky na statickou a dynamickou podporu sítě**, které vyhází z RfG.
 1. Normální stav
 - a. Provozní frekvenční rozsah
 - b. Rozsah napětí
 2. Odolnost proti rušení – dynamická podpora
 - a. RoCoF – rychlost změny frekvence
 - b. Schopnost překlenutí poruchy během podpětí LRVT
 - c. Schopnost překlenutí poruchy během přepětí HRVT
 3. Výkonové odezvy při změně napětí
 - a. Podpora napětí jalovým výkonem – PQ diagramy, režimy řízení Q
 - b. Snížení činného výkonu na při poklesu napětí – P(U)
 - c. Schopnost dodávky zkratového proudu
 4. Odezva činného výkonu na změnu frekvence – při podfrekvenci nebo nadfrekvenci
 5. Specifické požadavky na podporu sítě – ostrovní provoz, fázování, start ze tmy
- d) **Požadavky na přípojovací rozhraní** zajišťující ochrany, dálkové ovládání, měření atd.

Výrobní jsou rozděleny do jednotlivých kategorií, které jsou určeny podle jmenovitých činných výkonů výroben. Tyto kategorie jsou definovány v RfG. Rozdělení výroben je členěno do čtyř kategorií A až D, přičemž kategorie A a B je tvořena ještě podkategoriemi vycházející z české legislativy. Ke každé kategorii je přiřazena napěťová hladina, pro kategorii A až C je napětí v místě připojení menší než 110 kV a pro kategorii D je napětí v místě připojení 110 kV nebo vyšší. Rozdělení výroben dle PPDS viz. *Tab.2.1*.

Tab.2.1: Výkonové kategorie výrobních modulů [11]:

Kategorie VM	Podkategorie VM	Rozsah P_{inst}	Napěťová hladina
A	A1	$800 \text{ W} \leq P_{inst} \leq 11 \text{ kW}$	NN
	A2	$11 \text{ kW} < P_{inst} < 11 \text{ kW}$	NN, VN*
B	B1	$100 \text{ kW} \leq P_{inst} < 1 \text{ MW}$	VN, NN*
	B2	$1 \text{ MW} \leq P_{inst} < 30 \text{ MW}$	VN
C	C	$30 \text{ MW} \leq P_{inst} < 75 \text{ MW}$	VN
D	D	$P_{inst} \geq 75 \text{ MW}$	110 kV

*Ve výjimečných případech lze připojit na tuto napěťovou hladinu.

Pro každý typ výrobního modulu jsou dle RfG definované požadavky na podporu sítě, tento seznam je uveden v příloze.

Pro synchronní moduly se velikost činného výkonu určuje podle jednotlivých VM. Synchronní modul je výrobní (parní, bioplynná nebo větrná) se synchronním generátorem bez výkonové elektroniky. Nesynchronní moduly jsou připojené a dodávají elektrickou energii pomocí výkonových měničů nebo pomocí asynchronního generátoru. Činný výkon nesynchronního modulu je dán celkovým výkonem VM. Typický nesynchronní modul je FVE s výkonovým měničem.[11]

2.3. Požadavky na zpětné vlivy způsobené výrobou

Připojením výroby do DS nesmí docházet k velkému ovlivnění kvality elektrické energie, proto jsou PPDS definovány určité rozsahy pro zpětné vlivy vznikající připojením výroby, které musí být při provozu dodrženy.

2.3.1. Zvýšení napětí

Zvýšení napětí vzniká připojením výroby do sítě. Při normálních podmínkách mohou VN výroby zvýšit napětí $\Delta u_{VN\%}$ v místě připojení maximálně o 2 % oproti velikosti napětí bez jejich připojení. Pro NN výroby je maximální možné zvýšení napětí $\Delta u_{NN\%}$ povoleno do hodnoty 3 %. Změna napětí v místě připojení ovšem nevychází ze jmenovitého napětí, ale ze skutečného napětí v daném místě, ovlivněného parametry sítě. V případě abnormálních podmínek v síti, je pro výrobu dovolené zvýšit napětí $\Delta u_{VN\%}$ až o 5 %. Pro oba stavy platí, že musí být zároveň splněny limity pro odchylky napětí dané ČSN EN 50160 ($\pm 10\% U_n$) a limity zvýšeného napětí udané v PPDS. Chceme-li posoudit zvýšení napětí, je důležité počítat se všemi výrobkami připojenými do sítě. Pokud jsou výroby připojené v různých bodech nebo je síť složitá (mřížová síť), musíme zvýšení napětí počítat pomocí analýzy výkonových toků. V případě nedostatku dat o síti, se pro výpočet uvažuje nejhorší možný scénář, kdy je síť VN zatížena jen 25 %.

2.3.2. Změna napětí při spínání

Pro výroby na hladině VN je určena změna napětí při připojování nebo odpojování generátoru na hodnotu $\Delta u_{\max VN\%} \leq 2\%$. Tento požadavek je určen těm výrobnám, které připojují nebo odpojují své generátory méně než jednou za dobu 1,5 minuty. Výroby spínající velmi zřídka, např. jednou za den, mohou vyvolat větší změnu napětí, ta musí být dána provozovatelem DS. V obou případech je opět povinné dodržet maximální odchylky napětí definované normou ČSN EN 50160.

2.3.3. Rychlé změny a kolísání napětí

Flicker je vyvoláván kolísáním napětí (např. způsobený nestálou výrobou elektrické energie větrnou elektrárnou). Příspěvek k hodnotě dlouhodobého flickeru v místě připojení je pro výroby VN a NN stanovena PPDS $P_{f \leq 0,46}$.

2.3.4. Proudů vyšších harmonických

Proudy vyšších harmonických v síti vytvářejí pouze výrobní moduly připojené pomocí střídače. Pro výrobní VN se přípustné harmonické proudy odvozují ze zkratového výkonu S_{kV} místě připojení a ze vztažné hodnoty harmonických proudů $i_{vpř}$. Velikost přípustného harmonického proudu je dle PPDS definována následující rovnicí:

$$I_{vpř} = i_{vpř} \cdot S_{kV}$$

2.3.5. Hromadné dálkové ovládání HDO

Při připojení VN výrobní je nutné zajistit, aby nedocházelo k ovlivnění signálu HDO ze strany výrobní nebo kompenzační zařízení. Připojením VN výrobní můžeme navýšit zatížení vysílače HDO maximálně o 2 A. Pokud se vytížení vysílače přiblíží ke své maximální hodnotě, je nutné učinit opatření, jinak je připojení výrobní nemožné. Maximální možný pokles úrovně signálu HDO způsobený výrobnou je 5 %, úroveň však nesmí klesnout pod minimální úroveň definovány v PPDS.

Kapitola 2.3 byla zpracována na základě [11, 12, 13]

2.4. Chování výrobní

2.4.1. Normální stav

Pro zamezení odpojování výrobní od sítě, při změnách frekvence nebo napětí, jsou v PPDS definovány rozsahy Tab.2.2. Zde je uvedeno, za jakých podmínek výrobní provozovat trvale či po určitou dobu trvání, po kterou dojde k odpojení. Díky zamezení odpojení je výrobní schopna podpořit stabilitu sítě. Dovolené frekvenční rozsahy s příslušnou dobou trvání do odpojení jsou uvedeny v tabulce a jsou platné pro všechny kategorie výroben připojených na hladinách NN, VN a 110 kV.

Tab.2.2: Provozní frekvenční rozsah [11]:

Frekvenční rozsah	Doba trvání
47-47,5 Hz	20 s
47,5-48,5 Hz	30 min
48,5-49 Hz	90 min
49-51 Hz	neomezeně
51-51,5 Hz	30 min

Pro výše zmíněné kategorie výroben, viz. *Tab.2.2*, platí ještě požadavek RoCoF (hodnota rychlosti změny frekvence), kdy se výrobná nesmí odpojit, pokud je hodnota RoCoF do ± 2 Hz/s. Velikost RoCoF je definována jako střední hodnota derivace frekvence během časového intervalu 500ms.

Rozsah trvalého provozního napětí pro výrobný je různý, podle hladiny napětí, do které je výrobná připojena. Trvalé připojení výroben kategorie A je nutné, až do hodnoty napětí $-15 \%/+10 \% U_n$. V případě poklesu napětí pod tento rozsah má VM možnost snížit velikost dodávaného výkonu, jenž je úměrný s poměrným úbytkem napětí $1-(U/U_n)$.

Další uvedené napěťové rozsahy uvedené v následující tabulce (*Tab.2.3*), jsou platné pro výrobný kategorie B nebo C, připojované do hladin VN a 110 kV. Pro tyto výrobný jsou již uvedeny doby provozu, po které výrobná může pracovat, dojde-li k poklesu nebo nárůstu napětí. Pro výrobný, spadající do kategorie D a připojované na hladinu 110 kV, je omezena doba provozu na 60 minut, jen v případě nárůstu napětí, a to na hodnoty v rozsahu 1,118 p.j. až 1,15 p.j..

Tab.2.3: Rozsah napětí pro výrobný připojované na hladinu VN [11]:

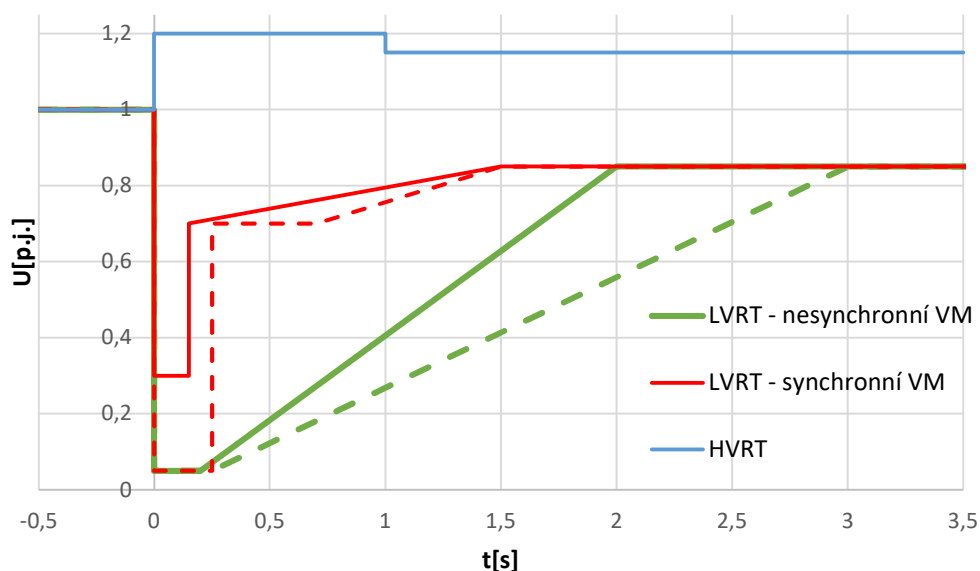
Rozsah napětí	Doba provozu
0,85 p.j. – 0,90 p.j.	60 min
0,90 p.j. – 1,118 p.j.	neomezeně
1,118 p.j. – 1,15 p.j.	60 min

2.4.2. Mimořádný stav – dynamická podpora

Dynamická podpora se využívá pro předcházení nežádoucího odpojení výroben na hladinách VN, NN a rozpadnutí sítě, při případných poklesech napětí. Poklesy napětí jsou způsobované v nadřazených sítích ZVN, VVN během poruch vyvolaných všemi druhy zkratů. Výrobný na hladinách 110 kV, VN a NN musí být technicky přizpůsobeny pro setrvání v síti i během těchto poklesů. Velikost poklesu vychází z měřeného napětí v síti, kdy se pro síť NN uvažuje nejmenší fázové napětí a v případě tzv. nevyvedené nuly nejmenší sdružené napětí. Pro výrobný na hladině 110 kV a VN je potřeba uvažovat nejmenší sdružené napětí.

Schopnost překlenutí poruchy

Nastavený regulační rozsah (určen plno čarou, nad který nesmí dojít k odpojení výroby) je zobrazen na obr.2.1. Jedná se o regulační rozsah zobrazující maximální velikost poklesu napětí a příslušný čas, po který pokles může trvat. První typem je „Schopnost překlenutí poruchy během podpětí LRVT“, kde červená čára je pro synchronní výroby a zelená čára pro nesynchronní výroby připojené pomocí střídače. Plné čáry určují standartní požadavek, přerušované zobrazují přísnější požadavek. Vyskytne-li se v síti nadpětí, výroba musí být schopna zůstat připojena do hodnoty $1,2 U_n$ po dobu 1 s nebo $1,15 U_n$ až 60 s. Tento limit je vyznačen na obrázku níže, fialovou barvou, a odpovídá „Schopnosti překlenutí poruchy během přepětí HRVT“. Pro sítě, které jsou provozovány se systémem OZ, je třeba beznapěťové přestávky pro odpojení. Výroby, které se musí podílet na dynamické podpoře, jsou určeny z jejich předpokládaných technických možností provozovatelem DS.



Obr. 2.1: Schopnost překlenutí poruchy HRVT a LRVT [11]

Schopnost dodávky zkratového proudu

Nastane-li v síti porucha, při které dojde k poklesu napětí pod hodnotu $0,9 U_n$ nebo k nárůstu napětí nad $1,1 U_n$, musí být nesynchronní VM kategorie B1 až D schopny přejít na podporu dodávky zkratového proudu. Nesynchronní VM musí aktivovat tuto dynamickou podporu pro zajištění dodávky rychlého poruchového proudu do místa svého připojení. Druhou možností je změřit velikost odchylky na svorkách jednotlivých VM a následným dodáním rychlého zkratového proudu na tyto svorky.

Start ze tmy

VM kategorie C a D, provozovány se schopností startu ze tmy, musí být připraveny do 30 minut dodat činný výkon do určené části DS bez pomoci externí dodávky energie. Pro VM je tato schopnost nepovinná, avšak pro její provozování je nezbytné uzavřít s provozovatelem DS smlouvu o poskytnutí této schopnosti.

Ostrovní provoz

Pro provoz výrobní v ostrovním režimu je požadováno po VM C a D, po předchozím požadavku provozovatele PS. Během tohoto provozu jsou napěťové a frekvenční limity stejné jako pro normální provoz viz. kapitola 2.4.1. Doba, kdy je výrobní v ostrovním provozu, je frekvenčně závislá. Výrobní je schopna přejít na nový pracovní bod provozovaného PQ diagramu a tím snížit výstupní činný výkon v případě přebytku. Velikost výstupního činného výkonu by měla být snížena na nejnižší technologicky možnou hodnotu, minimálně na 55 % vlastní kapacity.

Přechod z normálního provozu do ostrovního, dohodnutý mezi vlastníkem výrobní a provozovatelem PS, je dán průběhem frekvence a napětí. Při změně frekvence o hodnotu 200 mHz je jednoznačně detekován nutný přechod do ostrovního provozu. Před odpojením výrobní, když přechází na ostrovní režim, je stále kladen požadavek na podporu sítě.

Rychlé přifázování

Pro možnost rychlého přifázování k síti je pro VM C a D určen 2hodinový interval, během kterého generují elektrickou energii pouze k vlastní spotřebě. Po uplynutí intervalu dojde k odstavení VM.

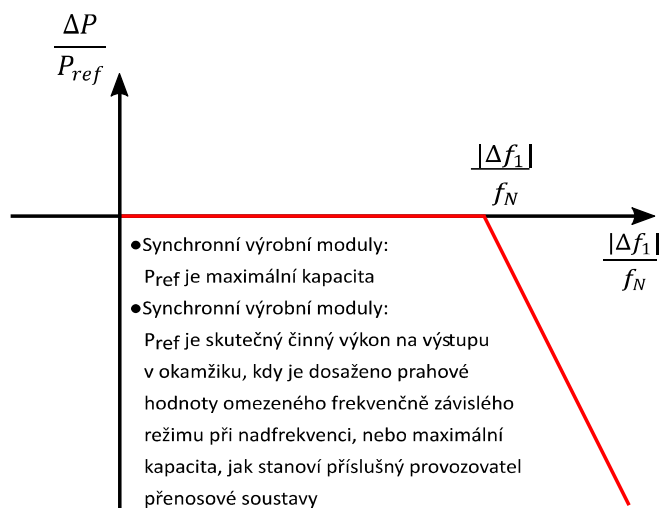
Kapitola 2.4 je zpracovaná na základě použité literatury [11], [12] a [13]

2.5. Řízení činného výkonu výroben

Po výrobnách, připojených do DS, je požadováno snížení dodávky činného výkonu, v případě změny frekvence a poměrů v síti, neboť má frekvence silnou vazbu na činný výkon. Ke snížení by mělo docházet automaticky i dle příkazů z dispečinku DP, v nejhorším případě musí dojít k automatickému odpojení výrobní od sítě.

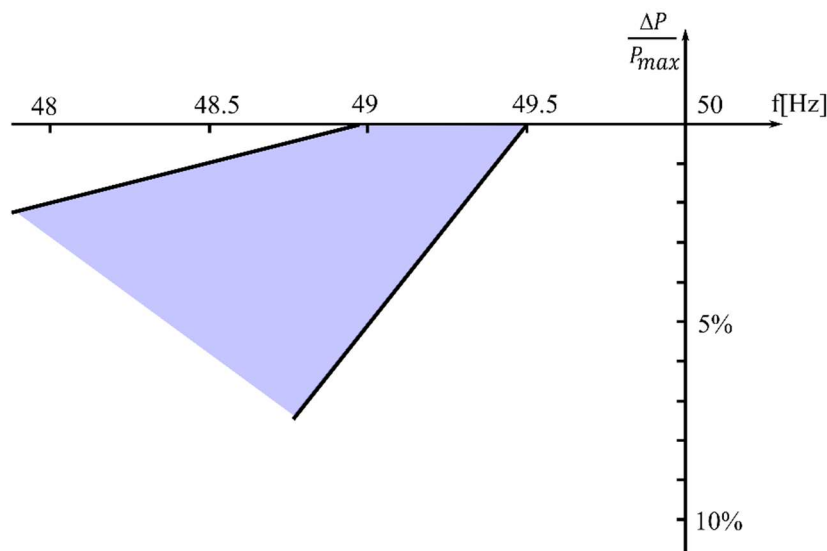
2.5.1. Odezva činného výkonu na změnu frekvence

Na obr.2.2 můžeme vidět chování činného výkonu při nadfrekvenci. Při překročení hodnoty prahové frekvence, udanou provozovatelem PS, je po výrobně požadováno snížit svou dodávku činného výkonu dle dané statiky. Prahová hodnota frekvence je pro Českou republiku stanovena na 50,2 Hz. Do této hodnoty nedochází k žádnému snižování činného výkonu. Po překročení této hodnoty dochází ke snižování činného výkonu, podle udané statiky, pro ČR $s_2=5\%$.



Obr.2.2: Omezení činného výkonu při nadfrekvenci [11]

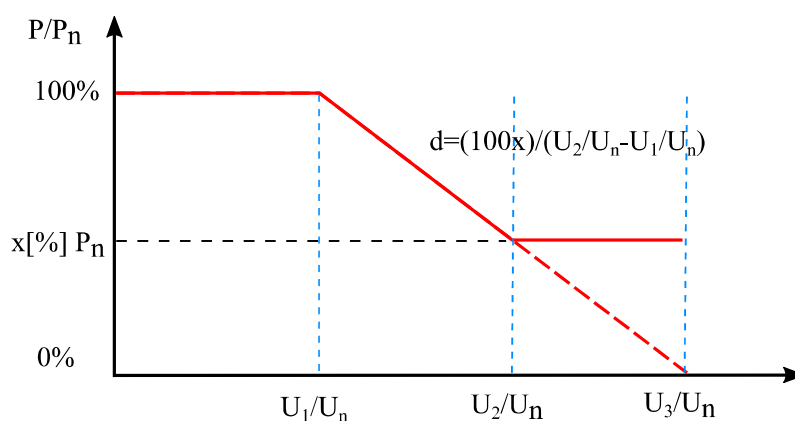
V druhém případě, kdy dochází v soustavě k podfrekvenci, je provozovatelem PS definován rozsah dle obrázku obr.2.3. Ke snižování činného výkonu dochází od frekvence 49,5 Hz o 10 % na 1 Hz. Pro druhou limitní čáru je pokles stanoven od frekvence 49 Hz o 2 % na 1 Hz. Je nutné se pohybovat v uvedeném rozsahu, který je dán plnými čarami.



Obr. 2.3: Omezení činného výkonu při podfrekvenci[11]

2.5.2. Závislost činného výkonu na napětí – P(U)

Funkcí P(U) (obr.2.4), snížení činného výkonu v závislosti na napětí, musí disponovat všechny nesynchronní VM s proudem 16 A na fázi a synchronní VM s proudem nad 16 A na fázi spadající do DS na hladině NN. Snížením dodávky činného výkonu při zvýšeném napětí, dle P(U) charakteristiky na obr.12, se výrobní snaží zamezit vybavením nadpěťových ochran a tím zapříčiněnému odpojení od DS. Čárkovaná čára udává rozsah snížení činného výkonu pro nesynchronní VM, mírnější plná čára platí pro synchronní VM.



Obr.2.4: Omezení činného výkonu při změně napětí, funkce P(U)[11]

2.5.3. Řízení činného výkonu při výjimečných provozních podmínkách

Nastane-li v DS stav, při kterém může dojít k ohrožení provozu nebo stability DS nebo k nutným pracím na DS, má provozovatel DS právo zadat výrobnám pokyn ke snížení dodávky činného výkonu. V mimořádných stavech není ze strany provozovatele DS zasahováno do řízení výroby, pouze je zadána požadovaná hodnota v přípojném bodě. Požadovaná hodnota je nastavována podle definovaných výkonových bodů. Pro výroby s $P > 100$ kW jsou to body 60 %, 30 % a 0 % P_n . Bioplynná stanice má výkonové body dané na hodnoty 100 %, 75 % a 50 % P_n . Při snížení výkonu na 0 % nesmí dojít k odpojení výroby.

Kapitola 2.5 je zpracovaná za použití literatury [11], [12] a [13]

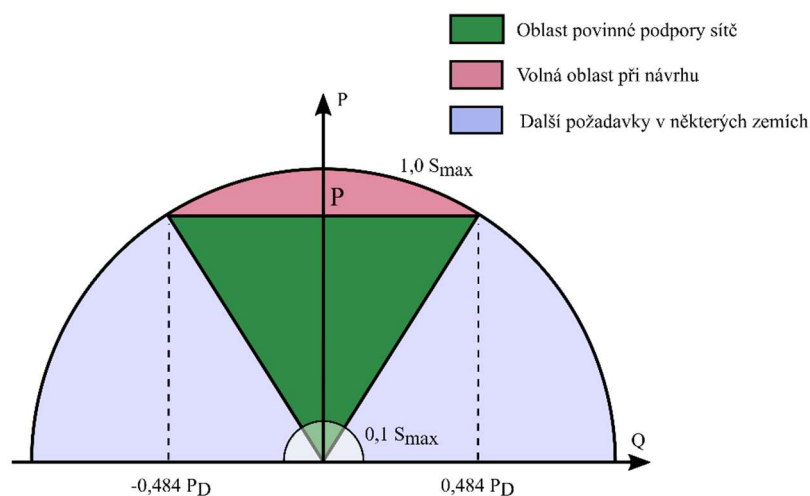
2.6. Řízení jalového výkonu výroben

2.6.1. Statické řízení napětí jalovým výkonem

Statické řízení napětí definuje rozsah pro jalový výkon. Je definováno jako schopnost výroby udržet požadované napětí v předem definovaných mezích za normálního provozu sítě při pomalých změnách napětí. K udržení napětí slouží jalový výkon, kdy při dodávce jalového výkonu napětí zvyšujeme a při odběru jalového výkonu napětí snižujeme. Účinník výroby je zadán v rozsahu $0,90_{ind}$ až $0,90_{kap}$.

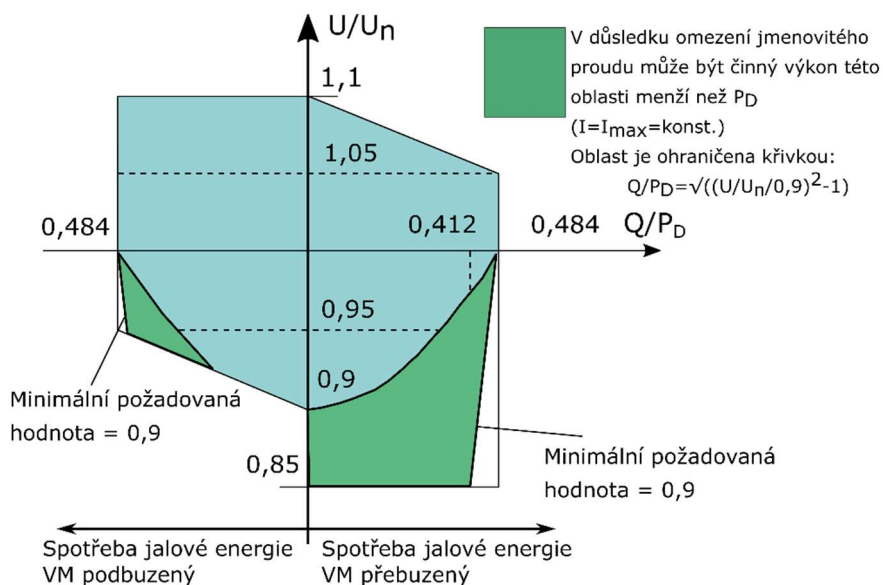
Podpora napětí jalovým výkonem zdrojů NN

Malé výroby kategorie A1 a A2, připojované na hladinu NN, mají určený regulační rozsah dodávky jalového výkonu (obr.2.5). Regulační rozsah je platný pouze pro jmenovité napětí.



Obr.2.5: Požadavek na dodávku/odběr jalového výkonu při U_n pro VM A1 a A2[11]

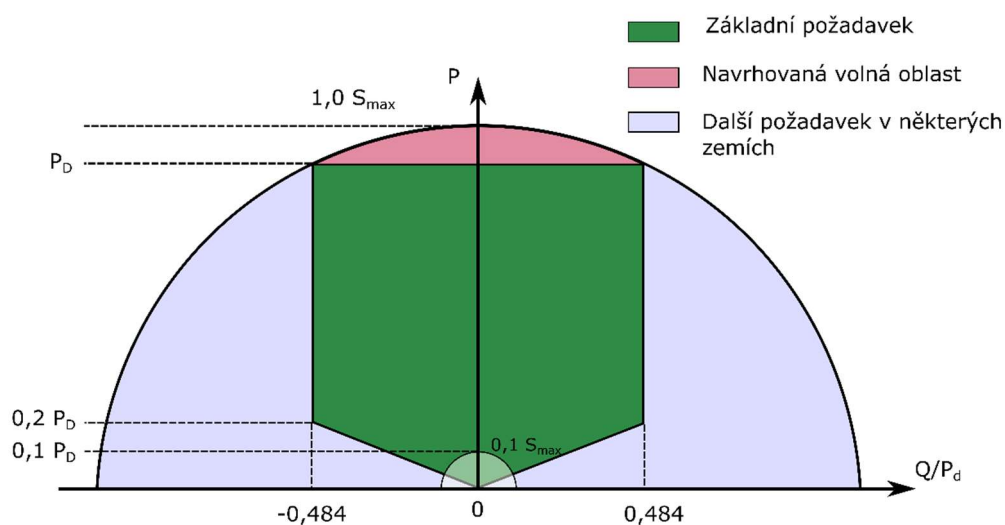
Pro případ, kdy napětí není rovno jmenovité hodnotě, ale setrvává v rozsahu pro trvalé připojení výrobní, jsou minimální požadavky kladené na výrobu z hlediska jalového výkonu dány následujícím obrázkem *obr.2.6*.



Obr.2.6: Minimální požadavek na jalový výkon při rozdílném napětí oproti U_n [11]

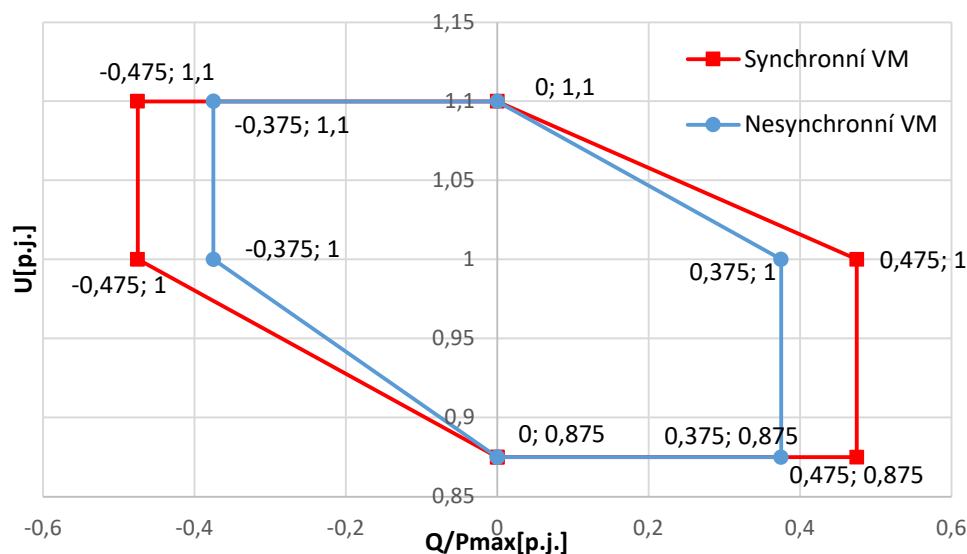
Podpora napětí jalovým výkonem výroben A2, B, C a D

Regulační rozsah výrobní, při jmenovitém napětí, znázorňující základní a volitelné požadavky na dodávku nebo odběr jalové energie je zobrazen na *obr.2.7*. Je platný pro všechny synchronní VM kategorie A2 až D, které se připojují na VN a 110 kV.



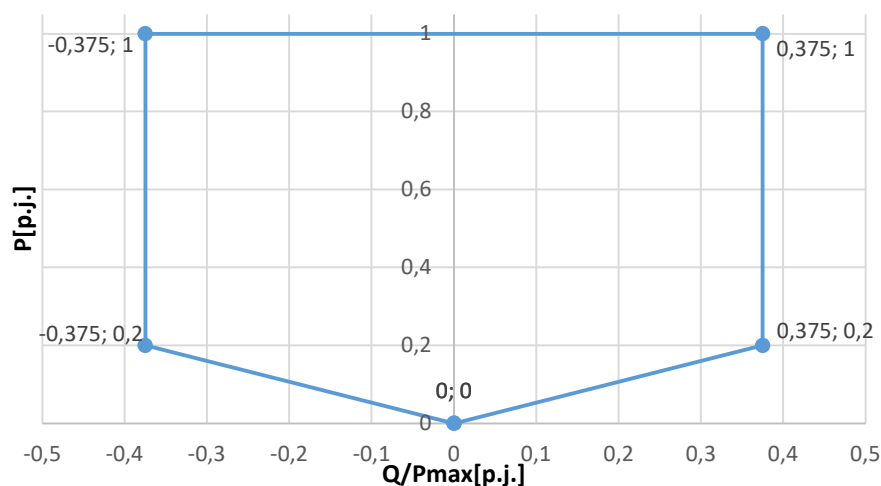
Obr.2.7: Dodávka/odběr jalového výkonu při U_n pro synchronní VM A2, B, C a D [11]

Dále jsou regulační rozsahy, dle PPDS, rozšířeny pro synchronní a nesynchronní VM o tzv. dodatečné jalové výkony, které musí být VM schopen dodávat nebo odebírat. Pro synchronní VM B2, C a D se dodatečný jalový výkon používá pro kompenzaci nabíjecího výkonu vedení nebo kabelu mezi transformátorem a výrobnou. Nesynchronní VM využívají dodatečný jalový výkon pro stejný účel kompenzace, ovšem hodnoty jsou nižší. Na obr.2.8 je znázorněn regulační rozsah rozšířený o dodatečný jalový výkon při maximální dodávce činného výkonu výrobnou.



Obr.2.8: Dodávka/odběr Q při rozdílném napětí U a maximálním výkonu pro B2, C a D [11]

Dojde-li k případu, že nesynchronní modul není schopen dodávat maximální činný výkon, je třeba se řídit dle regulačního rozsahu na obr.2.9.



Obr. 2.9: Dodávka/odběr Q při U_n a menšímu výstupnímu výkonu pro VM B2, C a D [11]

Při skokových změnách napětí musí nesynchronní VM B2, C a D reagovat změnou jalového výkonu do 4 s, a to minimálně na 90 % požadované hodnoty jalového výkonu a ustálit svoji hodnotu nejpozději do 30 s s maximální odchylkou 5 %.

2.6.2. Požadavky na řízení jalového výkonu

Jalový výkon a napětí jsou vzájemně závislémi a napětí je označováno jako lokální parametr, je tedy různé velikosti v různých částech sítě. Díky závislosti jsme schopni pomocí řízení jalového výkonu výrobní řídit i velikost napětí v místě připojení výrobní.

Povinnost říditelného jalového výkonu platí po výrobní s instalovaným výkonem od 100 kVA. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.6.1, rozsah účinníku pro řízení jalového výkonu se pohybuje v rozsahu $0,90_{\text{ind}}$ až $0,90_{\text{kap}}$. V jiném případě, pokud dojde k uzavření smlouvy mezi vlastníkem výrobní a provozovatel DS o poskytování podpůrné služby, je možné provádět řízení jalového výkonu i mimo tento rozsah daný PPDS. Řízením jalového výkonu je výrobní schopna udržet kvalitu elektrické energie.

Velikost jalového výkonu je daná aktivovaným režimem řízení Q a je určena předem provozovatelem DS na fixní nebo proměnlivou hodnotu. Pro zdroje o výkonu nad 100 kVA se nastavuje dálkově. Výrobní by měla být schopna provozovat všechny režimy, ale aktivní může být v daný moment pouze jeden. Režim požadované hodnoty, a tedy i hodnoty jalového výkonu jsou zadávány provozovatelem DS s ohledem na místní parametry sítě, přičemž musí provozovatel DS brát v úvahu technickou stránku výrobní.

Možné režimy pro řízení Q výroben:

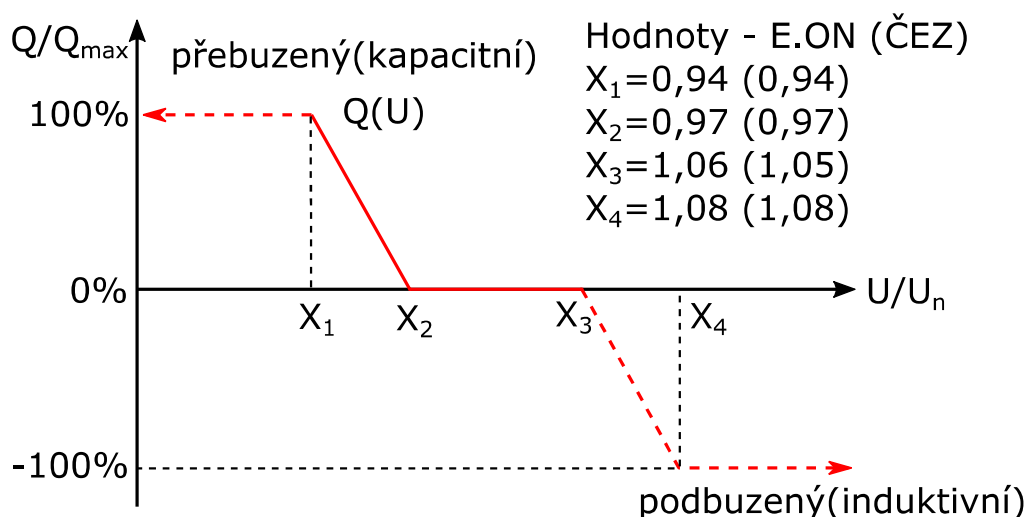
- pevná hodnota účinníku cos φ fix,
- hodnota jalového výkonu závislá na napětí Q(U),
- požadovaná hodnota napětí U fix,
- pevná hodnota jalového výkonu Q fix,
- hodnota jalového výkonu závislá na činném výkonu Q(P),
- hodnota účinníku závislá na napětí cos φ (U),
- hodnota účinníku závislá na činném výkonu cos φ (P).

Po zadání požadované hodnoty Q provozovatelem DS, musí výrobní automaticky přejít na novou ustálenou hodnotu jalového výkonu. Požadované hodnoty mohou být výrobní nastavovány dohodnutou hodnotou nebo harmonogramem přiděleným provozovatelem DS. Splňují-li technické možnosti výrobní pro zadávání online, může být žádaná hodnota zadávána online příkazem provozovatele DS a nová ustálená hodnota jalového výkonu musí být nastavena do 60 s.

Výrobní větrného nebo fotovoltaického typu je třeba osadit dostatečně rychlým regulátorem jalového výkonu, aby svojí rychlou změnou vyráběného výkonu nezhoršovaly kvalitu napětí. Výrobní využívající statické kompenzátory jalového výkonu musí zajistit jejich připnutí až po zapnutí generátoru, ale odpínají se společně. Tyto výrobní nesmí ovlivňovat signály HDO.

Závislost jalového výkonu Q na napětí U – funkce $Q(U)$

Křivka na obr.2.10 představuje pracovní oblast autonomní regulace $Q(U)$, jejíž tvar a nastavení určuje provozovatel DS, a to pomocí lokálních síťových podmínek. Při určitém poklesu napětí bude mít výrobní kapacitní charakter a začne dodávat jalový výkon, tím dojde ke zvyšování napětí. V opačném případě bude výrobní, díky induktivnímu charakteru, jalový výkon ze sítě odebírat a tím napětí v místě připojení snižovat. V praxi používané režimy řízení Q společností ČEZ Distribuce, a.s., lze vidět v tab.2.4. Penále při nedodržení $\cos\varphi$ v neutrálním pásmu je účtováno jen výrobním, které jsou řízené režimem $\cos\varphi_{\text{fix}}$



Obr.2.10: Řízení jalového výkonu při změně napětí, funkce $Q(U)$ [11]

Tab.2.4: Používané režimy řízení Q výroben [13]:

Napěťová hladina	Kategorie VM		Režim Q
NN	A1	se střídačem	$Q(U)$
		bez střídače	$\cos\varphi_{\text{fix}}$
	A2		$Q(U)$
	B1		$Q(U)$
VN	A2		$Q(U)$ nebo $\cos\varphi_{\text{fix}}$
	B1, B2, C		$Q(U)$ nebo U_{fix}
110 kV	D		U_{fix}

Konstantní účinník – $\cos\varphi_{\text{fix}}$

Jedná se o nejčastěji se vyskytující řízení jalového výkonu v doposud instalovaných výrobnách na všech hladinách DS. Pro výroby s instalovaným výkonem $P_{\text{inst}} \geq 100 \text{ kW}$ dochází k zadávání hodnoty účinníku dálkově. Řízení jalového výkonu je závislé na účinníku, který má definovanou oblast. Při nedodržení definované oblasti hrozí účtování penále. Tento způsob řízení není moc účinný k řízení napětí, neboť velikost jalového výkonu se mění společně s dodávkou činného výkonu pro udržení konstantní hodnoty účinníku.

Konstantní napětí U_{fix} – ASRU

Regulace na konstantní napětí neboli automatická regulace napětí ASRU, používaná pro vybrané výroby na hladině VN a 110 kV, která má za úkol udržet konstantní napětí v tzv. pilotním uzlu za pomoci dodávky jalového výkonu. Tato regulace je řízená z dispečinku provozovatele DS.

Konstantní jalový výkon Q_{fix}

Způsob řízení jalového výkonu používaný převážně pro výroby na hladině 110 kV, které nejsou připojeny do systému ASRU. Velikost požadovaného jalového výkonu je zadávána provozovatelem DS podle potřeb. Při nedodržení účinníku není účtováno penále.

Tato kapitola 2.6 byla zpracována pomocí [11], [12],[13].

3. Vyhodnocení vlivu výroben na napěťové a výkonové poměry

Napěťové a výkonové poměry budou hodnoceny z obdržných měření z deseti FVE a VTE od společnosti E.ON (nyní EGD). U BPS dojde k vyhodnocení pouze ze sedmi měření, k dalším BPS nejsou data zatím dostupná. Důležité informace od výroben jsou uvedeny v tabulce níže. Pro vyhodnocení bylo potřeba projít velké množství dat, kdy data byla obdržena v souboru XLSX. Jedno měření obsahovalo od 40000 do 65000 buněk dat. Soubor obsahoval informace o datu a času měření, desetiminutová měření, dále velikosti jednotlivých sdružených napětí a fázových proudů, kdy se jednalo o efektivní průměrné hodnoty z desetiminutového měření. Efektivní průměrné hodnoty napětí byly ještě rozšířené o maximální a minimální hodnoty napětí, ke kterým došlo během desetiminutového měření. Soubor také obsahoval třífázový činný a jalový výkon a příslušný účinník. Pro vyhodnocování byla použita sdružená napětí zprůměrovaná na jedinou hodnotu, činný výkon P , jalový výkon Q , účinník $\cos\varphi$ a příslušné časové údaje. Všechny výroby byly regulovány na konstantní účinník. Měření probíhalo ve spotřebičové orientaci, kde znaménko mínus značí dodávku výkonu do sítě. Z níže uvedených FVE byly po analýze všech dat zvoleny FVE č.6, 8, 9 a 10. Z VTE byly vybrány č.3, č.6, č.9 a pro BPS č.3. Výroby byly voleny s ohledem na zkratový výkon S_k , instalovaný výkon nebo různý charakter $\cos\varphi$.

Tab.3.1: Měřené FVE – základní informace:

FVE	Název	S_k [MVA]	P_n [kW]	Měřicí kampaň
č.1	FVE Embra – Tišnov	153,4	2000	29.5-23.6.2020
č.2	FVE Ekonet	170,9	3000	28.5-25.6.2020
č.3	FVE Věchnov	104,8	810	2.7-13.7.2020
č.4	FVE Solární	164,6	2000	2.7-13.7.2020
č.5	FVE Chrudichromy park	200,5	5024	13.7-27.7.2020
č.6	FVE Chrudichromy Photon Forest	206,0	5019	13.7-28.7.2020
č.7	FVE Svitávka Dynevor	206,4	1500	28.7-14.8.2020
č.8	FVE Vísky s.r.o.	87,5	1600	30.6-28.7.2020
č.9	FVE Velké Opatovice – YLS 70	157,5	1600	28.7-14.8.2020
č.10	FVE Fini	106,7	2150	28.7-14.8.2020

Tab.3.2: Měřené BPS – základní informace:

BPS	Název	P_n [kW]	Měřicí kampaň
č.1	BPS Mutěnice	71	5.3-16.3.2020
č.2	BPS Prostějov	2000	27.10-24.11.2020
č.3	BPS Rostěnice	1190	20.4-21.5.2020
č.4	BPS Smržice Agropelets	1951	11.12-21.12.2020
č.5	BPS Smržice Uniagris	1189	24.11-11.12.2020
č.6	BPS Švábenice	2250	10.3-18.03.2020
č.7	BPS Velešovice	500	8.4-20.4.2020

Tab.3.3: Měřené VTE – základní informace:

VTE	Název	S_k [MVA]	P_n [kW]	Měřicí kampaň
č.1	VTE Pavlov	67,3	4000	5.11-18.11.2020
č.2	VTE Pavlov Wind Power	67,0	1700	6.5-31.7.2020
č.3	VTE Bantice	146,2	2000	18.11-26.11.2020
č.4	VTE Brodek u Konice	60,3	1200	6.5-19.5.2020
č.5	VTE Tulešice	95,1	2000	26.11-8.12.2020
č.6	VTE Drahaný	33,7	2000	22.4-6.5.2020
č.7	VTE Rozstání Eldaco	50,1	1800	22.4-6.5.2020
č.8	VTE Protivanov	42,3	3000	6.5-19.5.2020
č.9	VTE Březany	46,4	4250	18.11-26.11.2020
č.10	VTE Věžnice	67,1	3200	20.5-14.8.2020

3.1. Odchytky napětí U při režimu regulace $\cos\varphi_{\text{fix}}$

Norma ČSN EN 50160 udává pro síť VN, do kterých jsou všechny hodnocené FVE, VTE a BPS připojené, kde by odchytky napětí za normálních podmínek neměli překročit mez $\pm 10 U_n$. Pro měření napětí, po dobu nejméně jednoho týdne jsou určeny tyto limity, kdy 99 % všech hodnot napětí musí být v rozsahu $\pm 10 U_n$ a 100 % hodnot v rozsahu $\pm 15 U_n$. [10]

Z měření vychází následující tabulky (tab.3.4, 3.5, 3.6), které udávají odchytky napětí v místě připojení FVE, VTE a BPS při režimu regulace $\cos\varphi_{\text{fix}}$. Odchytky napětí jsou uváděny v procentních poměrných hodnotách ($U_V = 22 \text{ kV}$). $U_{\text{max}100\%}$ a $U_{\text{min}100\%}$ jsou největší, resp. nejmenší naměřené hodnoty během měřicí kampaně. $U_{\text{max}99\%}$ a $U_{\text{min}99\%}$ jsou vyhodnocené 99% percentily. Rozkolísanost napětí, rozdíly mezi U_{max} a U_{min} , je v tabulce označena jako ΔU .

Tab.3.4: Rozkolísanost napětí – FVE:

FVE	$U_{\text{max}100\%}$ [%]	$U_{\text{min}100\%}$ [%]	$\Delta U_{100\%}$ [%]	$U_{\text{max}99\%}$ [%]	$U_{\text{min}99\%}$ [%]	$\Delta U_{99\%}$ [%]
č.1	104,7	102,1	2,6	104,4	102,3	2,2
č.2	105,4	101,9	3,5	104,8	102,3	2,5
č.3	104,7	102,1	2,6	104,4	102,3	2,1
č.4	104,4	101,8	2,6	104,2	101,9	2,3
č.5	104,8	102,1	2,7	104,5	102,3	2,2
č.6	104,7	102,0	2,7	104,4	102,1	2,3
č.7	104,8	102,0	2,8	104,5	102,2	2,3
č.8	105,5	101,9	3,6	105,1	102,1	3,0
č.9	104,7	102,2	2,5	104,5	102,3	2,2
č.10	105,1	102,2	2,9	104,9	102,3	2,6

Tab.3.5: Rozkolísanost napětí – VTE:

VTE	$U_{\max 100\%}$ [%]	$U_{\min 100\%}$ [%]	$\Delta U_{100\%}$ [%]	$U_{\max 99\%}$ [%]	$U_{\min 99\%}$ [%]	$\Delta U_{99\%}$ [%]
č.1	106,0	101,8	4,2	105,3	102,1	3,2
č.2	106,1	99,7	6,4	105,3	100,6	4,7
č.3	104,6	101,6	3,0	104,0	101,8	2,2
č.4	104,1	99,7	4,3	103,6	100,0	3,6
č.5	105,7	101,1	4,5	105,4	101,5	3,9
č.6	106,1	98,9	7,2	105,6	100,1	5,5
č.7	105,7	98,3	7,4	104,7	99,6	5,0
č.8	106,5	100,5	6,0	105,7	100,8	5,0
č.9	104,7	100,7	4,0	104,2	101,0	3,1
č.10	106,1	100,6	5,5	104,6	101,1	3,4

Tab.3.6: Rozkolísanost napětí –BPS:

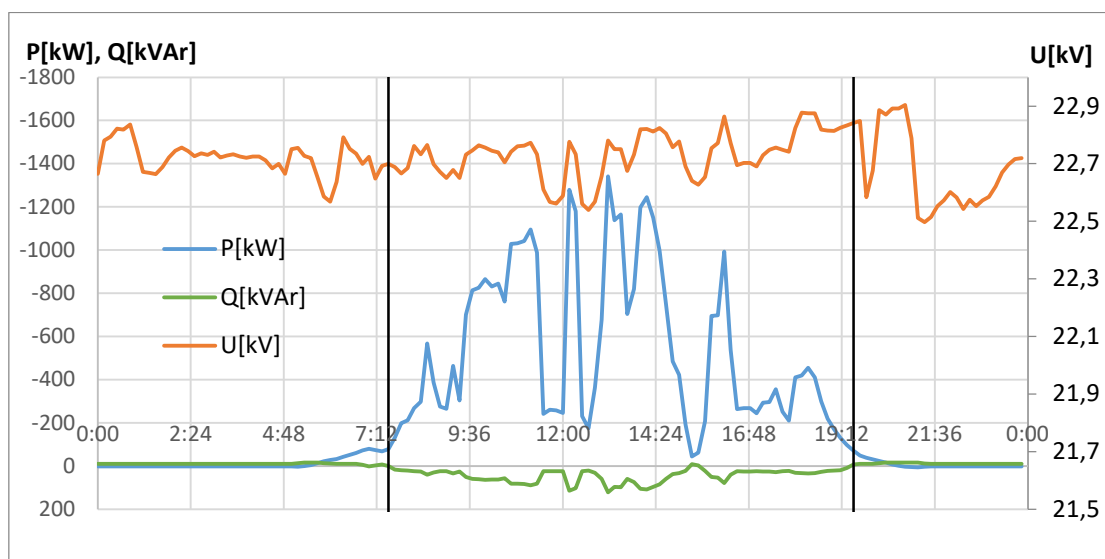
BPS	$U_{\max 100\%}$ [%]	$U_{\min 100\%}$ [%]	$\Delta U_{100\%}$ [%]	$U_{\max 99\%}$ [%]	$U_{\min 99\%}$ [%]	$\Delta U_{99\%}$ [%]
č.1	104,1	99,8	4,2	103,8	100,3	3,5
č.2	104,7	102,1	2,6	104,4	102,3	2,1
č.3	105,2	101,3	3,9	104,9	102,6	2,3
č.4	105,8	101,4	4,4	105,4	101,6	3,7
č.5	105,6	99,9	5,7	105,1	100,6	4,5
č.6	106,1	102,3	3,9	105,9	102,8	3,1
č.7	104,8	102,1	2,6	104,5	102,3	2,2

Z naměřených hodnot napětí vyplývá, že v místě připojení všech hodnocených FVE, VTE a BPS nedošlo k překročení limitních hodnot daných normou ČSN EN 50160. Dále je patrná i souvislost zkratového výkonu s rozdílem U_{\max} a U_{\min} , kde v místě připojení FVE nebo VTE s nižším zkratovým výkonem, např. FVE č.8, č.10 nebo VTE č.6, je rozdíl těchto napětí větší a dochází zde k větším změnám napětí. Rozkolísanost napětí v místech připojení VTE je větší, to je způsobeno převážně větší nestálostí dodávky činného výkonu P oproti FVE. Rozkolísání napětí v sítích s BPS je ovlivněno především zatížením sítě společně s regulačními transformátory. BPS v místě svého připojení způsobují navýšení napětí, ale díky stále dodávce činného výkonu P nevznikají prudké poklesy nebo nárůsty napětí v závislosti na nestálé výrobě jako u VTE nebo FVE.

3.2. Napěťové poměry v závislosti na P a Q – FVE

Detailní rozbor vzorku

První hodnocený vzorek je ze dne 20.7.2020 naměřený na FVE Vísky. Na průběhu níže (obr.3.1) jsou zobrazeny všechny hodnocené veličiny U, P a Q, měřeny během celého dne. Znaménko mínus značí dodávku do sítě, pro lepší přehlednost byla osa y invertována. Pro další hodnocení je černými čarami vymezena oblast pro přesnější hodnocení, ve které výrobná začala vyrábět, a tedy i ovlivňovat napěťové poměry v místě svého připojení. V oblastech mimo černé čáry jsou napěťové poměry ovlivňovány pouze zatížením sítě.

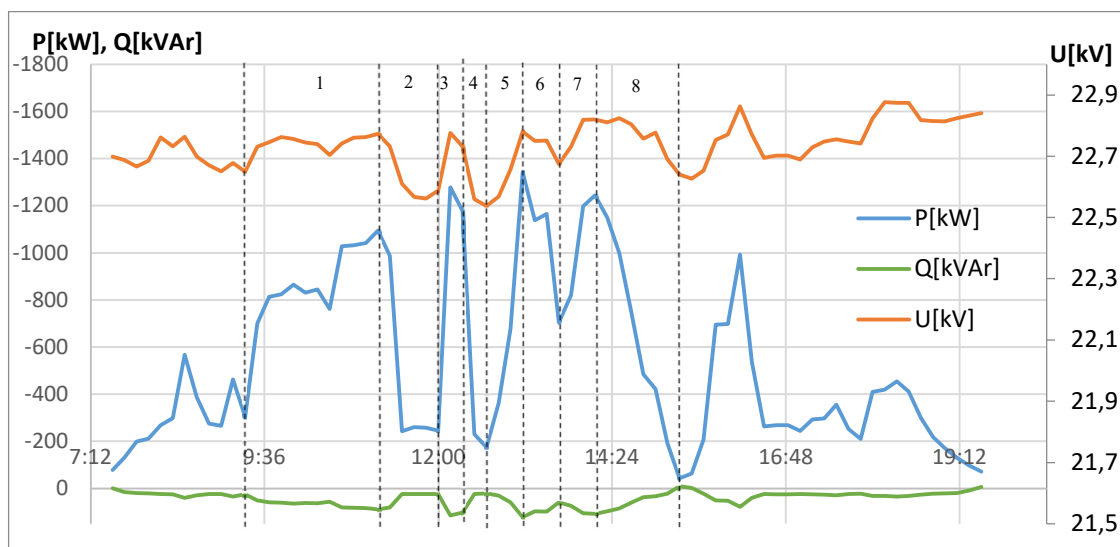


Obr.3.1: Závislost U na P, Q – celý den (FVE Vísky)

V oblasti 1 (obr.3.2) dochází k nárůstu dodávaného činného výkonu P do sítě, přitom je patrné i zvýšení napětí U a zvýšený odběr jalového výkonu Q. Velikost jalového výkonu se v průběhu dne mění minimálně, pouze v závislosti na velikosti P pro udržení konstantního účinníku, a téměř nenapomáhá k udržení stálějšího napětí.

V oblasti 2 a 4 dochází k extrémnímu poklesu dodávaného činného výkonu P z hodnot přibližně 1150 kW na 200 kW. Značný je i úbytek napětí, který se z hodnoty 22,77 kV dostává na hodnotu 22,55 kV. Při takto velkém poklesu dodávaného výkonu se hodnota napětí v místě připojení zmenšila o 220 V, tedy 1 %. Tuto hodnotu lze téměř považovat za hodnotu rovnou velikosti změně napětí, kterou výrobná v místě připojení zvýší svou výrobou. Dle PPDS je tato hodnota v pořádku, neboť VN výrobní mohou zvýšit napětí v místě svého připojení o maximálně 2 %. Odběr jalového výkonu Q se díky regulaci na konstantní účinník zmenší skokově, díky tomu se zmenší úbytek napětí způsobený odběrem jalového výkonu.

Oblast 3 a 5 je charakterizována extrémním nárůstem dodávaného činného výkonu P, kde je pro obě oblasti nárůst dodávaného činného výkonu přes 1000 kW, napětí vzrůstá přibližně o 1 %. Chování jalového výkonu Q je nyní opačné, odběr ze sítě společně vzrůstá s P a díky tomuto nárůstu dochází alespoň k minimálnímu snižování napětí, resp. odběr jalového výkonu Q nezpůsobuje navýšení hodnoty napětí U.



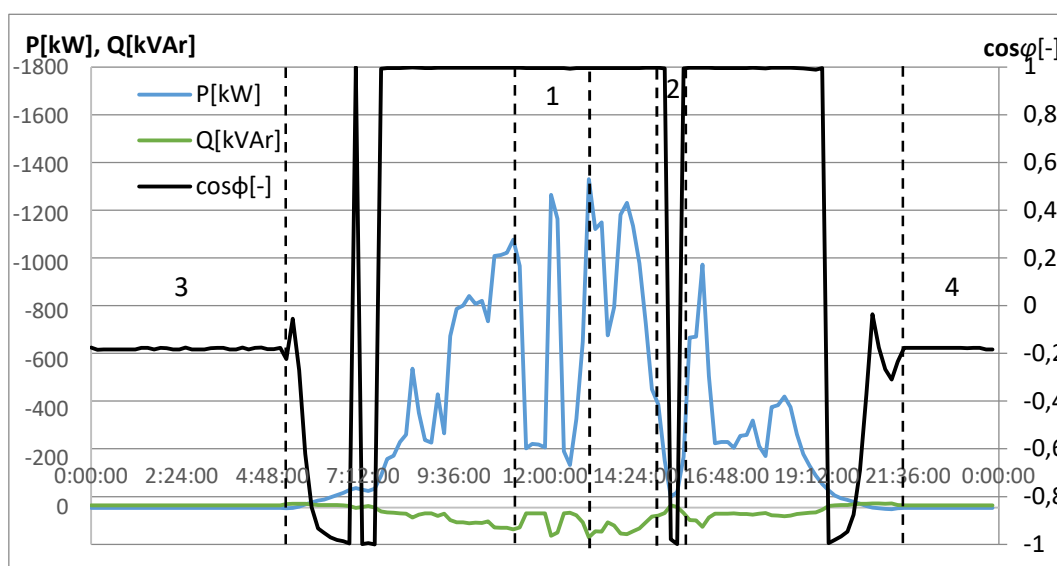
Obr.3.2: Závislost U na P, Q – detailní průběh (FVE Vísky)

V oblastech 6 a 7 dochází ke stejným výše popsaným dějům. Pokles, resp. nárůst P zde není tak extrémní jak v přechozích oblastech a jeho velikost je přibližně poloviční. Různý je úbytek, resp. nárůst napětí, kdy v oblasti 6 je 0,5% úbytek napětí U. V oblasti 7 dochází k nárůstu napětí 0,7 % i přes přibližně stejnou změnu dodávaného výkonu P, to může být způsobeno odlehčením sítě.

Oblast 8 je specifická zejména změnou charakteru výroby, největší pokles dodávaného činného výkonu P způsobí, že se výroba začne chovat jako zdroj jalového výkonu. Začne tak dodávat jalový výkon do sítě. Tato změna je patrnější na obr.3.3. Zřejmě se nejedná o změnu regulace výroby na kapacitní účinník, ale o nabíjecí výkon vedení. Při dodávce jalového výkonu by mělo dle teoretických předpokladů docházet ke zvyšování napětí. I během tohoto je účinník udržován blízko hodnoty 1, a proto je velikost dodávaného jalového výkonu Q malá. Na zvýšení napětí má minimální vliv, ovšem nedochází k dalšímu úbytku napětí odběrem jalového výkonu Q ze sítě.

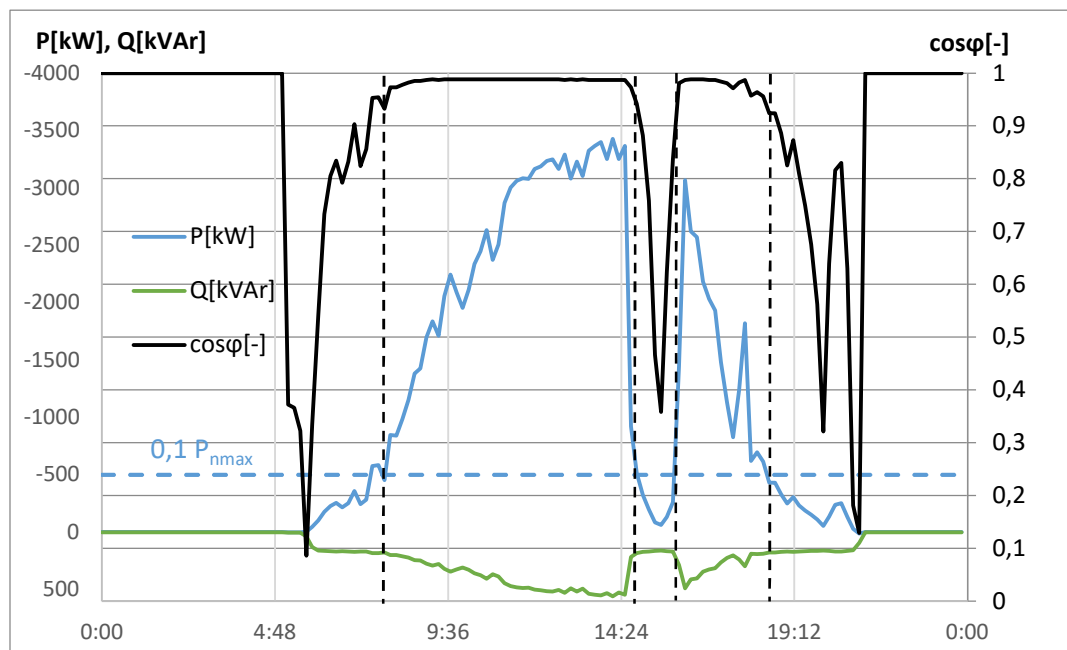
Účinnost v závislosti na výkonových poměrech

Na grafu (obr.3.3) byl místo průběhu napětí dosazen průběh účinníku výroby. Jak již bylo zmíněno, vybraná výroba je regulována na konstantní hodnotu účinníku rovné 1 s induktivním charakterem. Tato výroba je schopna dodržet konstantní účinnost i při tak velkých poklesech dodávky činného výkonu P jako v oblasti 1. V oblasti 2 dochází ke změně charakteru účinníku na kapacitní, dodávaný výkon P v této oblasti klesl pod hodnotu 90 kW, což je přibližně 6 % P_{\max} . V oblastech 3 a 4, kdy výroba nevyrobí, se účinnost pohybuje kolem hodnoty 0,18_{kap}, to je zapříčiněno velkým množstvím kabelového vedení s velkou provozní kapacitou, které se ve výrobě nachází. To je během nočních hodin nabíjeno, výroba se v tuto dobu chová jako kapacita a odebírá kapacitní výkon do sítě.



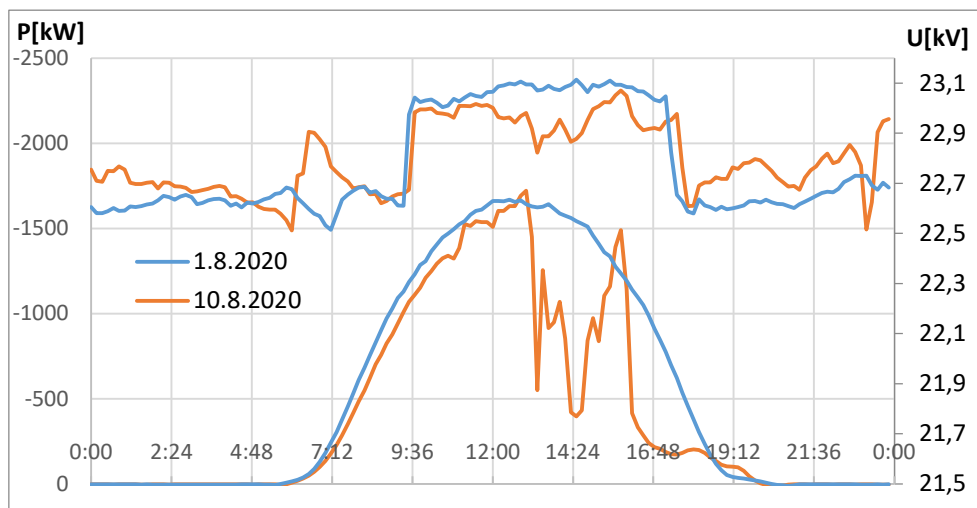
Obr.3.3: Průběh $\cos\phi$ (FVE Visky)

Pro další vyhodnocení účinníku bylo použito měření z FVE Chrudichromy (obr.3.4) ze dne 24.7.2020. Tento průběh slouží pouze k zobrazení různého průběhu účinníku během nárůstu, resp. poklesu dodávaného činného výkonu P . Na rozdíl od předchozího vzorku zde dochází během změny dodávky činného výkonu P ke značné změně účinníku. Černými svislými čarami je vymezena doba kdy výroba dodávala větší výkon než 0,1 P_{\max} a byl po výrobě požadován účinnost větší než 0,9. Z grafu je patrné, že to i tato výroba splnila a účinnost dosahoval hodnot pod 0,9 až při nízké dodávce P , kdy ale není účinnost dle PPDS hodnocen.

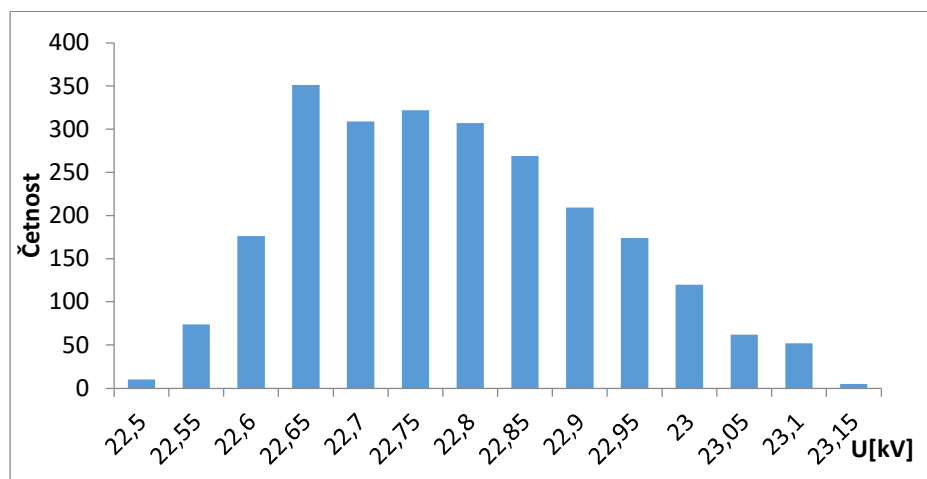
Obr.3.4: Průběh $\cos\varphi$ (FVE Chrudichromy)

Napěťové poměry

Hodnoceny jsou dva vzorky naměřené na FVE Fini a FVE Chrudichromy, které byly pro hodnocení vybrány s ohledem na rozdílný zkratový výkon v místě připojení. Horní průběh ukazuje změny napětí U a spodní dodávku činného výkonu P do sítě. Prvním hodnoceným vzorkem je modrý průběh ze dne 1.8.2020 (obr.3.5), kdy dodávaný činný výkon P roste společně s dopadajícím slunečním zářením a není nikterak narušen oblačností, jedná se o slunečný den. Během dne byla dosažena hodnota dodávaného výkonu $P=1669,87$ kWp. Tento charakter dodávaného výkonu P má pozitivní vliv na stálost napětí U , a to i přes fakt nízkého zkratového výkonu v místě připojení. Mezi časy 9:30 až 17:10 je vidět korelace mezi nárůstem P a U , funkcí CORREL v programu MS Excel byl stanoven korelační koeficient 0,35. U dosáhlo maximální hodnoty 23,116 kV a minimální 23,004 kV. Během této sledované doby se napětí měnilo v rozsahu 112 V, tedy 0,51 %.

Obr.3.5: Závislost velikosti U na dodávce P – měkká síť (FVE Fini)

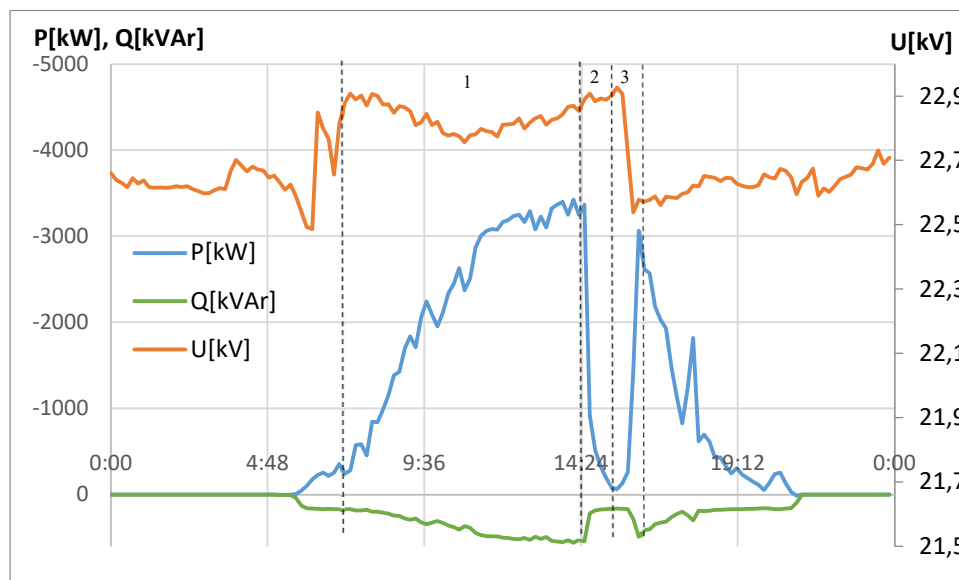
Na oranžovém průběhu je znázorněna dodávka činného výkonu P , která je ovlivněna oblačností a dochází tak ke značným poklesům P . Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, změna činného výkonu P souvisí i se změnou napětí U a tyto změny jsou patrnější v impedančně hůře přizpůsobených místech. Ve sledované době od 9:40 do 17:30 dosáhlo napětí maximální hodnoty 23,071 kV. Minimální hodnota napětí 22,823 kV byla způsobena největším poklesem dodávky činného výkonu P , která klesla o více než 1100 kW. Ve sledované době se napětí měnilo v rozmezí 248 V (1,12 %). Korelace mezi P a U byla pro oranžový průběh silnější než pro modrý průběh, korelační koeficient byl 0,54.



Obr.3.6: Histogram napětí – měkká síť (FVE Fini)

Na histogramu (obr.3.6) je zobrazena četnost velikostí napětí během celé měřicí kampaně na FVE Fini. Jedna třída má vždy rozsah napětí 50 V. Z histogramu je zřejmé, že velikost napětí se v místě připojení často pohybovala v relativně širokém pásmu od 22,65 kV do 22,85 kV. To může být způsobeno touto výrobou, které svou výrobou značně ovlivňuje velikost napětí. Velikost napětí větší než 22,85 kV byla zejména dosahována po přepnutí odbočky regulačního transformátoru, kdy velikost napětí poté klesala společně se zatěžováním sítě nebo v případech nepřerušované dodávky P, kdy se velikost napětí dostávala až na hodnotu 23 kV a výše. Pokud velikost napětí klesla pod hodnotu 22,6 kV, docházelo velmi často k přepnutí odbočky na regulačním transformátoru, proto je četnost těchto velikostí malá.

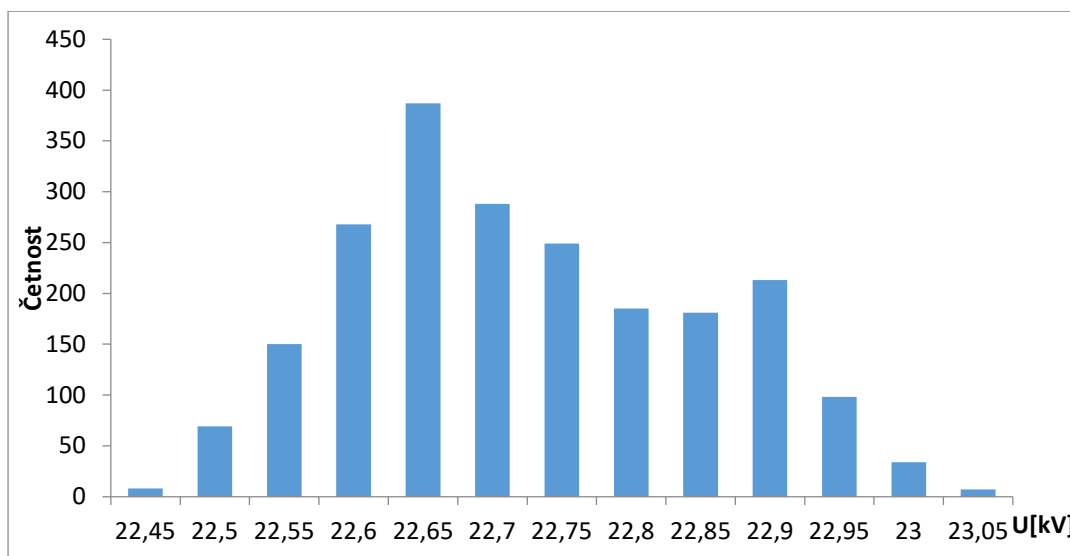
Jako druhý hodnocený vzorek je ze dne 24.7.2020 (obr.3.7) naměřený na FVE Chrudichromy. Zkratový výkon v místě připojení je 206,022 MVA, tedy značně větší než v případě první hodnocené FVE.



Obr.3.7: Průběh U v závislosti na P, Q – tvrdá síť (FVE Chrudichromy)

V oblasti 1 dochází k postupnému nárůstu dodávaného výkonu P do sítě, ale díky lepšímu impedančnímu přizpůsobení sítě nedojde ke zvýšení napětí nárůstem P. Korelační koeficient mezi P a U je 0,04, tedy značně menší než u předchozí hodnocené výroby. Změny ve velikosti napětí jsou způsobeny zatížením sítě, když nejdříve dochází k jejímu zatížení a následnému odlehčení. Dodávaný činný výkon P začne v oblasti 2 klesat. Podle již dříve popisovaného chování výroby by mělo dojít v závislosti toho k poklesu napětí. V tomto případě se velikost nadále zvětšuje odlehčováním sítě.

K výraznému snížení velikosti napětí U dochází až v oblasti 3, které je ale způsobeno regulačním transformátorem. Po přepnutí odbočky regulačního transformátoru se napětí nemění i přes velký nárůst dodávaného výkonu.



Obr.3.8: Histogram napětí – tvrdá síť (FVE Chrudichromy)

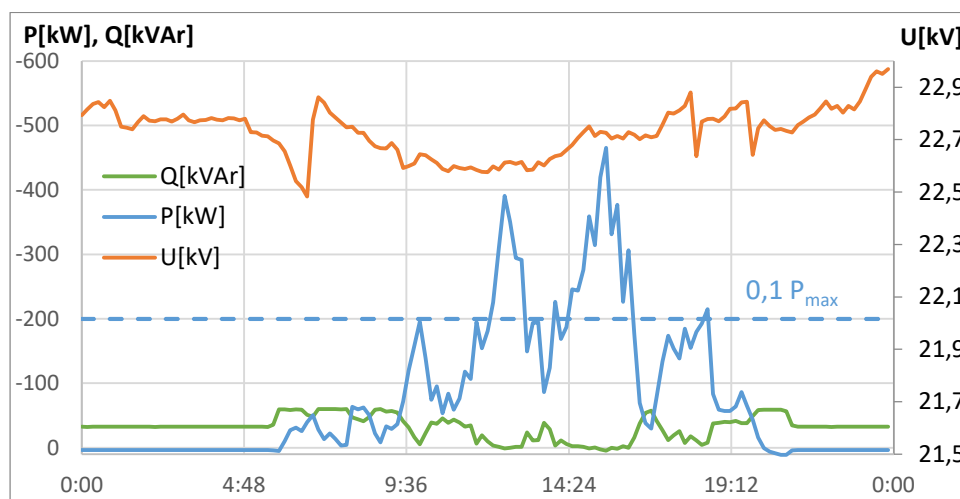
Výše uvedený histogram (obr.3.8) je pro velikost napětí v místě připojení FVE Chrudichromy II během celé měřicí kampaně. Nejčetnější velikost napětí je 22,65 kV, podle obdržených dat, napětí této velikosti dosahovalo převážně během doby, kdy výrobná nevyroběla. Také se velikost napětí na tuto hodnotu dostávala během dne při průběžném zatěžování sítě. Z výše uvedených informací se jedná o FVE, která je připojená do místa s vyšším zkratovým výkonem a výrobná tedy svou dodávkou P téměř neovlivňuje velikost napětí. Hodnota napětí 29,9 kV není způsobena dodávkou činného výkonu výrobnou, ale opět odpovídá hodnotě napětí po přepnutí odbočky na regulačním transformátoru. K vyšším hodnotám napětí než 23 kV, docházelo při odlehčení sítě, než došlo k přepnutí odbočky pro snížení napětí.

Z výše popsaných vzorků lze usoudit, že pro místa s nižším zkratovým výkonem má kolísání dodávky činného výkonu P negativní vliv na stálost napětí viz. oranžový průběh (obr.3.5). Tyto změny napětí se poté i nepříznivě projevují na nižších napěťových hladinách.

Dodávka/odběr Q při různé velikosti P

Pro první vyhodnocení je zvoleno měření z FVE Fini ze dne 3.8.2020 (obr.3.9). Dodávaný činný výkon P je po celý den velmi malý, dodávka Q do sítě je dána velikostí nabíjecího výkonu kabelů. Další příspěvek do kapacitního jalového výkonu mohou přidat při odlehčení střídače, které se většinou chovají právě jako kapacitní zátěž. Díky tomu se výrobná pohybuje v regulačním rozsahu v kapacitní oblasti. Tato dodávka jalového výkonu do sítě může alespoň částečně napomoci ke zvýšení napětí.

Při dodávce P pod $0,1 P_{\max}$ je z průběhu zřejmé, že není dodržen požadovaný neutrální účinník, to přináší nepříznivé účinky na chod sítě, ale po výrobně není dodržení účinníku požadováno. Při zvyšování výkonu P se velikost dodávaného Q snižuje a při hodnotě $0,1 P_{\max}$ je již účinník v neutrálním pásmu. Při dalším růstu P by výrobná začala dodávat jalový výkon do sítě a $\cos\varphi$ se dostal do induktivní oblasti.

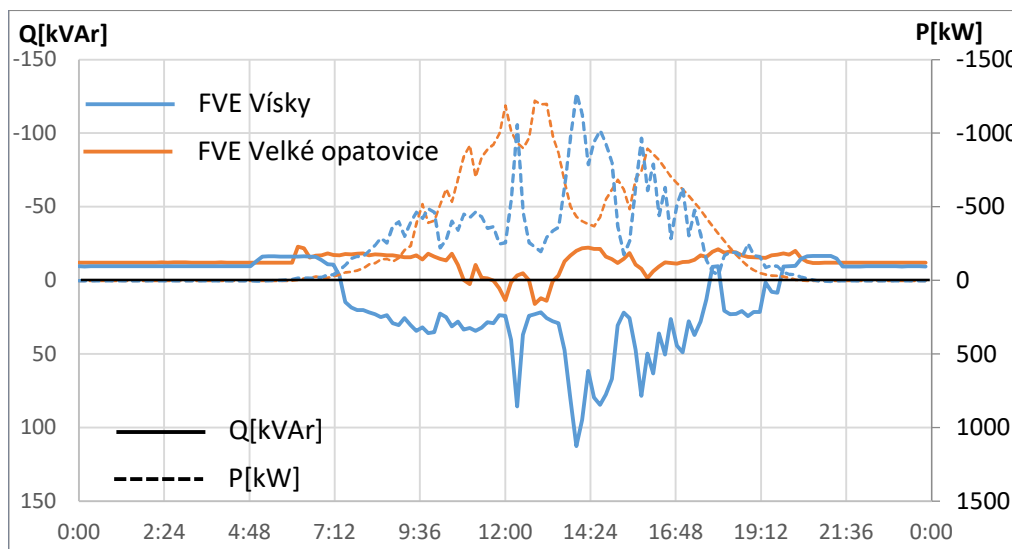


Obr.3.9: Dodávka/odběr Q při malé dodávce P (FVE Fini)

Pro další vyhodnocení charakteru jalového výkonu byla pro oranžový průběh FVE Velké Opatovice a pro modrý průběh vybrána FVE Visky (obr.3.10). Průběhy byly vybrány s ohledem na podobný průběh dodávaného činného výkonu P během dne, tedy dochází zde k maximální dodávce výkonu, ale i k velkým poklesům. Ovšem jalový výkon má rozdílnou dodávkou, resp. odběr jalového výkonu Q. Na oranžovém průběhu je výrobná regulována na kapacitní $\cos\varphi_{\text{fix}}$, až v případě značné dodávky P do sítě přechází výrobná na regulaci na induktivní $\cos\varphi_{\text{fix}}$. Z obdržených dat je patrné, že FVE Velké Opatovice má téměř po celou měřicí kampaň účinník $\cos\varphi$ pohybující se v kapacitní oblasti. Může se jednat o výrobnu, která má navyšovat hodnotu napětí v místě svého připojení, díky dodávce jalového výkonu do sítě.

Také to může být způsobeno umístěním měřicího zařízení, kdy mohlo být za ním připojené dlouhé kabelové vedení, které i přes vyrábějící FVE mohlo stále dodávat kapacitní výkon. Jak již bylo výše uvedeno je kabelové vedení zdrojem kapacitního výkonu. Tento fakt usuzuji vzhledem k plynulosti přechodu mezi kapacitním a induktivním $\cos\varphi$, kdy induktivní $\cos\varphi$ je dosahován během peaků dodávky činného výkonu. V dalším případě mohlo být připojené kompenzační zařízení. Vyšší dodávka jalového výkonu jalového výkonu není žádoucí, ovšem v tomto případě se jedná o přijatelnou hodnotu jalového výkonu. Naopak modrý průběh naznačuje, že při začínající dodávce P je výroba regulována na induktivní $\cos\varphi_{\text{fix}}$, a to i v případě značných poklesů dodávaného výkonu.

Pro FVE Vísky z dat vychází, že je výroba regulována na induktivní účinník. Kapacitního účinníku je dosaženo při poklesu dodávaného výkonu pod určitou mez, poté dochází i ke zhoršení velikosti účinníku.



Obr.3.10: Různý charakter Q při dodávce P (FVE Fini a Velké Opatovice)

Zvýše uvedených průběhů je zřejmé, že ve všech třech případech docházelo při malém dodávaném výkonu P k nedodržení neutrálního $\cos\varphi$. Dle obrázku na straně 25, při dodávaném výkonu nižším než $0,1 S_{\text{max}}$, není po výrobně udržení účinníku v neutrálním pásmu požadováno. Při minimu dodávaného výkonu regulují výrobny na induktivní nebo kapacitní $\cos\varphi_{\text{fix}}$, kdy bude záviset na předpokladech zmíněných výše.

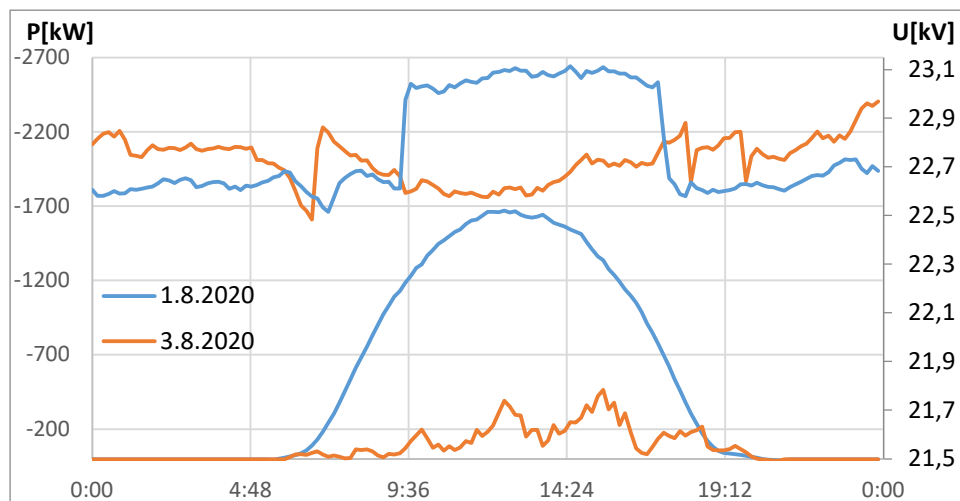
Následující tabulka (tab.3.7) popisuje chování výroben a jejich dodávku jalového výkonu při maximální dodávce činného výkonu do sítě. P_{\max} je maximální hodnota dodaného činného výkonu během celé měřicí kampaně. Z tabulky lze usoudit, že při velkých dodávaných výkonech je výroba provozována s induktivním $\cos\varphi$ a jalový výkon je výrobnou odebrán. Tímto odběrem jalového výkonu se alespoň částečně snižuje velikost napětí, které vzrostlo společně s dodávaným činným výkonem. Velikost $\cos\varphi$ je závislá na dodávaném činném výkonu. Při maximu dodávaného P je to vždy induktivní $\cos\varphi_{\text{fix}}$. Hodnoty odebíraného jalového výkonu Q při P_{\max} jsou dány regulační charakteristikou výroby.

Tab.3.7: Velikost $\cos\varphi$ při P_{\max} – FVE:

FVE	P_{\max} [kWp]	Q [kVAr]	$\cos\varphi$ [-]
č.1	-1988,881	204,902	0,995
č.2	-2788,838	324,026	0,993
č.3	-766,330	13,632	1,000
č.4	-2041,764	169,676	0,997
č.5	-4730,863	711,019	0,989
č.6	-4709,575	829,783	0,985
č.7	-1410,535	15,118	0,999
č.8	-1426,071	132,000	0,996
č.9	-1221,169	16,074	1,000
č.10	-1857,298	96,715	0,999

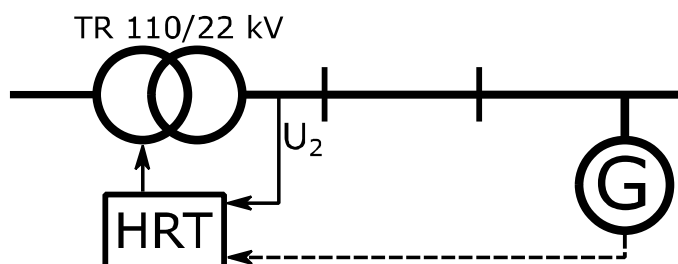
Napěťové poměry – regulační transformátory

Pro vyhodnocení správně přenastavené odbočky regulačním transformátorem, jsou použity již výše popisované průběhy z FVE Fini. Na obou průbězích (obr.3.11) jsou patrné napěťové skoky o hodnotě přibližně 400 V (2 %), což odpovídá přepnutí jedné odbočky na regulačním transformátoru $110 \pm 8 \times 2 \% / 23$ kV. Na oranžovém průběhu dochází po přepnutí odbočky k zatěžování sítě a s tím spojenému poklesu napětí. Jelikož FVE v měřený den dodávala do sítě jen malý výkon P , nedochází v důsledku toho k navýšení napětí. Díky navýšení napětí pomocí regulačního transformátoru byl eliminován tento úbytek daný zatížením sítě. Dle ČSN EN 50160 jsou pro oranžový průběh v místě připojení splněny požadavky, ale pokud by nedošlo k přepnutí odbočky nemusely by být tyto požadavky splněny na nižších napěťových hladinách. Přepnutí odbočky v tomto případě lze požadovat za správné.



Obr.3.11: Součinnost FVE Fini s regulačními transformátory

Na modrém průběhu ke zvýšení napětí, kromě regulačního transformátoru, také přispívá výrobná, dodávající po celý den vcelku vysoký výkon P . V místě připojení jsou i v tomto případě splněny požadavky dané ČSN EN 50160. Pokud by na nižších hladinách byly další vnořené zdroje, které by pravděpodobně v tento měřený den dodávaly do sítě také vysoký výkon P , mohlo by na hladinách NN docházet k značným přepětím a nesplnění požadavků. Změna odbočky v tomto případě byla s velkou pravděpodobností nesprávná, neboť FVE nejsou zařazeny do algoritmu pro změnu odbočky regulačního transformátoru. Změna odbočky probíhá na základě velikosti napětí U_2 na sekundární straně transformátoru TR 110/22 kV. Pro správné vyhodnocení přepnutí odbočky regulačního transformátoru, a tedy i ke zlepšení napěťových poměrů, by bylo vhodné v budoucnu zavést zpětnou vazbu z FVE do algoritmů řízení regulačních transformátorů. Zpětná vazba je naznačena přerušovanou čarou na obrázku níže.



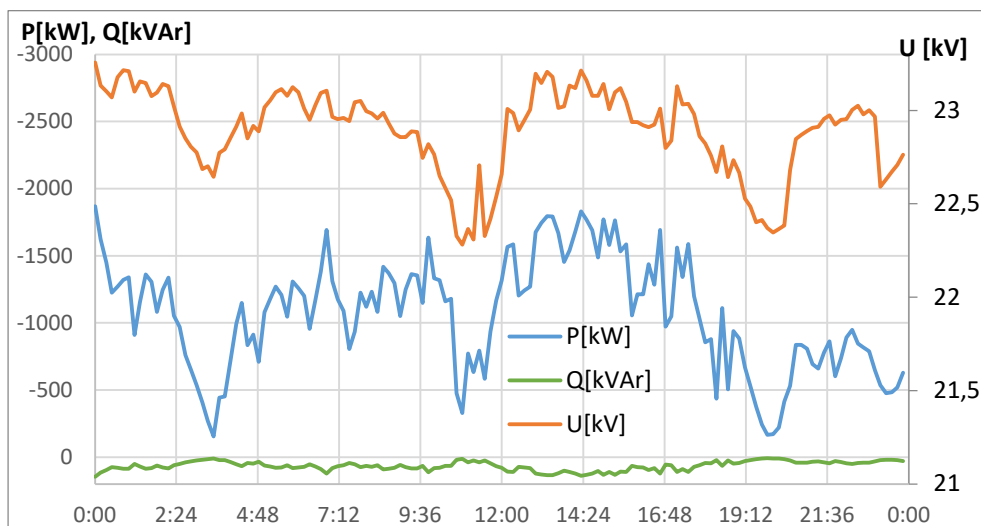
Obr.3.12: Regulační schéma s uvažováním FVE

FVE by poté mohla informovat o stavu dodávky činného výkonu do sítě, s tím spojenému zvýšení napětí způsobené výrobou G . Díky tomu by nemuselo docházet ke zbytečnému přepnutí odbočky, které může způsobit například přepětí na hladinách NN.

3.3. Napěťové poměry v závislosti na P a Q – VTE

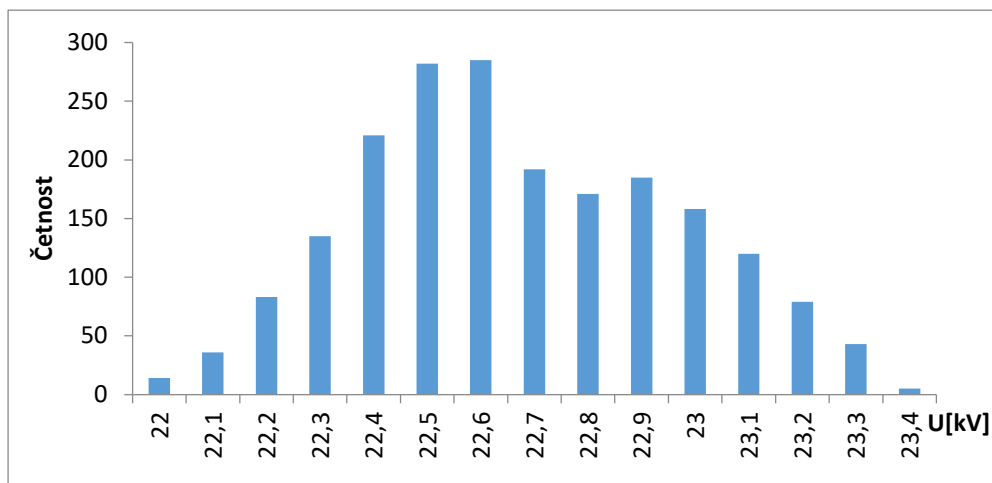
Napěťové poměry

Pro vyhodnocení vlivu dodávaného činného výkonu P na napětí U byl vybrán vzorek z VTE Drahaný ze dne 3.5.2020 (obr.3.13). Jedná se o výrobu s nejmenším zkratovým výkonem v místě svého připojení, také měla ze všech deseti VTE největší rozkolísanost napětí. Na grafu níže vidíme průběh napětí, která po celý den dochází k velkým změnám a velikost napětí je značně nestálá. Z grafu je patrné, že velikost napětí silně koreluje s velikostí dodávky činného výkonu P. Korelační činitel během tohoto dne dosahoval hodnoty 0,73 a během měřicí kampaně na této VTE dokonce hodnoty 0,83. Tato silná závislost mezi napětím a činným výkonem se projevuje díky hůře impedančně přizpůsobené síti. Jalový výkon Q je po celý den odebírán a jeho velikost odpovídá regulaci na $\cos\varphi = 1$. Odběr jalového výkonu Q je malý a téměř nenapomáhá ke snížení napětí.



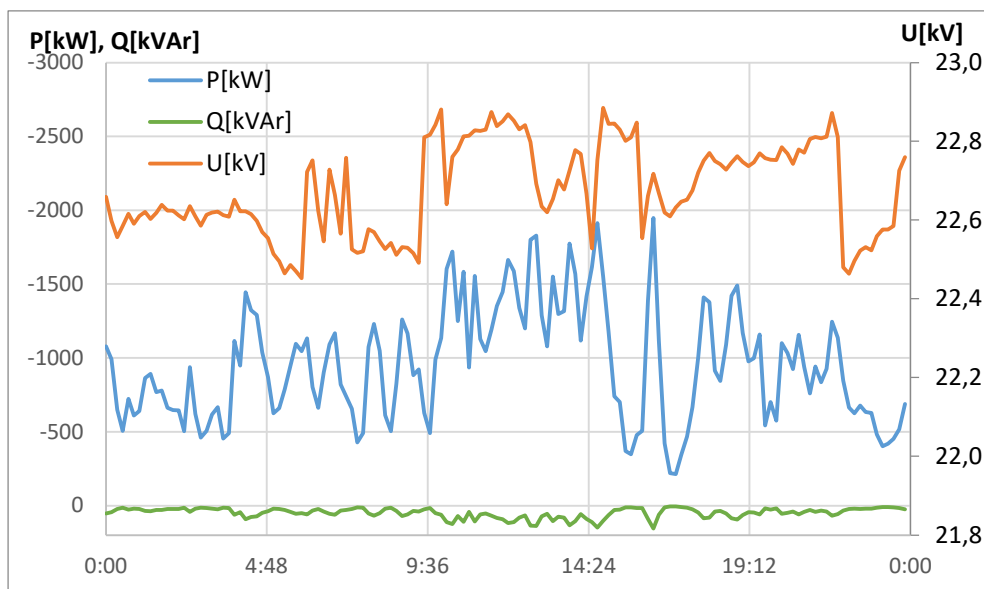
Obr.3.13: Průběh U v závislosti na P, Q – měkká síť (VTE Drahaný)

V histogramu napětí (obr.3.14) je zobrazeno rozložení velikostí napětí během měřicí kampaně, to se pohybovalo ve velkém rozsahu hodnot. Nejčtenější velikost napětí je mezi hodnotami 22,5 - 22,6 kV. Tyto hodnoty, dle dat, odpovídají dvou stavům, kdy výroba nevyrobí a síť je odlehčena či naopak. Hodnoty napětí o velikostech kolem 23 kV jsou dosahovány zejména v nočních hodinách během dodávky činného výkonu.



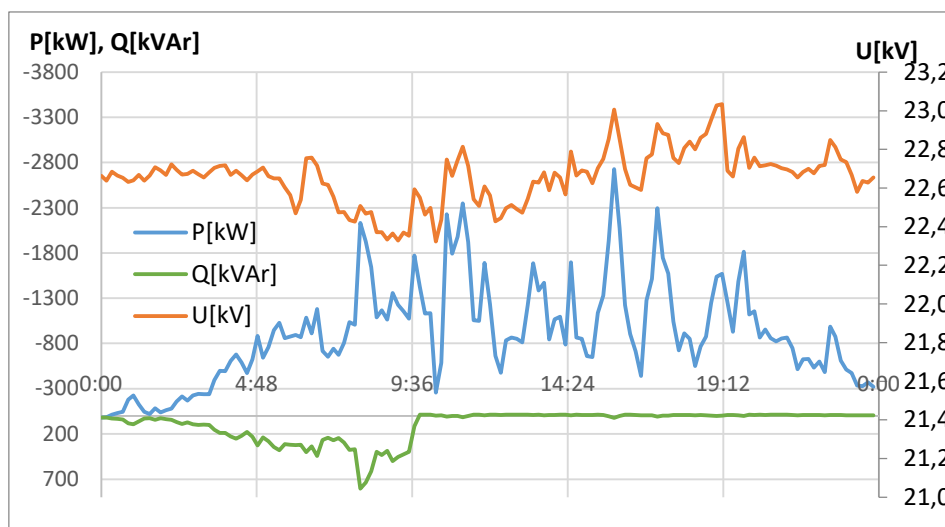
Obr.3.14: Histogram napětí – měkká síť (VTE Drahaný)

Druhý vzorek zobrazující napěťové poměry pochází z VTE Bantice zde dne 20.11.2020 (obr.3.15). Měla nejmenší rozkolísanost napětí, a jedná se o VTE s největším zkratovým výkonem v místě připojení. Změny napětí U při změně dodávky P již nejsou tak zřejmé, jako v předchozím případě. Korelační činitel byl pro tento den roven 0,37. Korelační činitel pro celou měřicí kampaň nebylo možné stanovit, neboť výrobně během měřicí kampaně téměř nevyráběla elektrickou energii, čímž by byl korelační činitel ovlivněn. Na průběhu napětí se objevují napěťové skoky, velké přibližně 400 V, které jsou ale způsobené přepínáním odboček regulačního transformátoru.



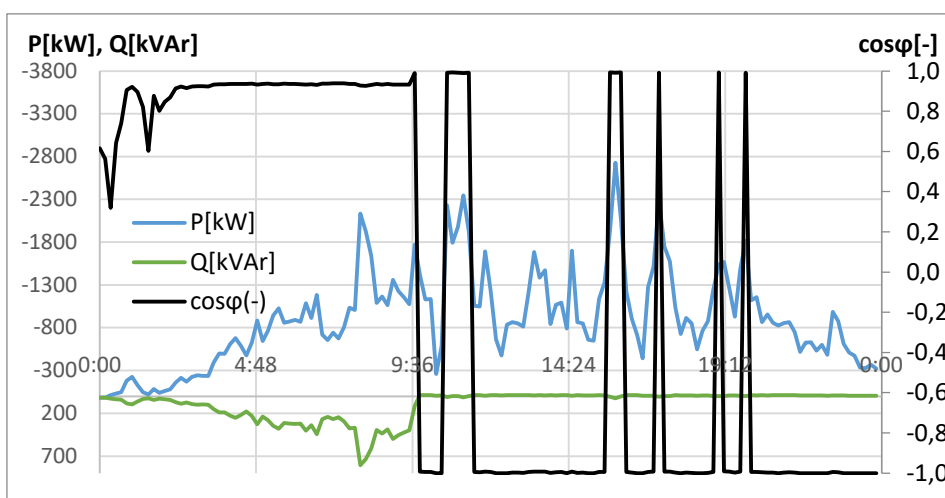
Obr.3.15: Průběh U v závislosti na P , Q – tvrdá síť (VTE Bantice)

Posledním hodnoceným vzorkem zobrazující napěťové poměry je ze dne 25.5.2020 naměřený na VTE Věžnice (obr.3.16). Zajímavostí na tomto průběhu je právě vliv odběru jalového výkonu Q na napětí U . Výrobná je v čase 0:00 až 9:40 regulována na $\cos\varphi = 0,92$. Tato regulace je zřejmá z velikosti odebíraného jalového výkonu Q . Velikost odebíraného jalového výkonu Q je již značná a má pozitivní vliv na rozkolísanost napětí, která je v tomto časovém období značně menší, než v čase od 9:40, kdy dochází k přepnutí regulace na $\cos\varphi = 1$. Odběr jalového výkonu je opět malý a výrobná není schopna kompenzovat zvýšení napětí způsobené dodáváním činného výkonu P do sítě. Po přepnutí regulace je rozkolísanost napětí značnější.



Obr.3.16: Průběh U v závislosti na P , Q – různá regulace výroby (VTE Věžnice)

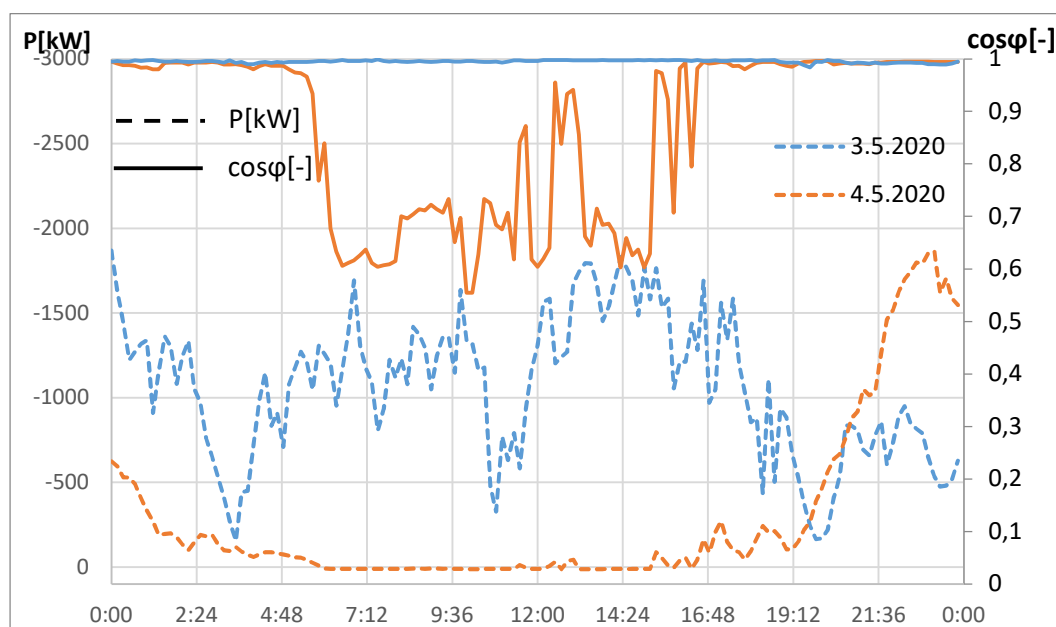
Na průběhu níže (obr.3.17) je zobrazen průběh účinníku místo velikosti napětí. Je tedy zřejmé, že byla výrobná do 9:40 regulována na nižší účinník. V dalším časovém úseku je vcelku dobře viditelné, že k regulaci na induktivní účinník dochází během peaků dodávky činného výkonu P , při nižší dodávce je výrobná regulována na kapacitní účinník.



Obr.3.17: Průběh $\cos\varphi$ (VTE Věžnice)

Účinnost a jalový výkon v závislosti na P

Pro popis účinnosti byly použity data z VTE Drahaný (obr.3.18). Ve VTE Drahaný je použita větrná turbína Vestas V90. Dle výrobce je výrobní schopná pracovat v rozsahu účinnosti $0,96_{ind}$ - $0,98_{kap}$. Tento rozsah je zajištěn pomocí rotorového střídače, který umožňuje pohyb pracovního bodu v tomto rozsahu. Jalový výkon u tohoto typu větrné turbíny je tedy dodáván tímto střídačem a výrobní není běžně osazena výkonovými kondenzátory. Modrý průběh značí případ, kdy VTE dodávala po celý den značně velký činný výkon (čárkovaný průběh). Z průběhu $\cos\varphi$ (plný průběh) je zřejmé, že výrobní nemá při takto velké dodávce P problém udržet zadanou hodnotu účinnosti, ten se mění jen nepatrně. Oranžový průběh reprezentuje bezvětrný den, kdy je patrné zhoršení účinnosti. Ovšem z analýzy dat vyplývá, že k poklesu účinnosti pod hodnotu danou regulačním rozsahem výrobní, došlo až při poklesu dodávky činného výkonu pod 50 kW. To odpovídá 2,5 % P_{inst} , pod hodnotu účinnosti 0,9 až dokonce při poklesu pod 20 kW. Dle PPDS je účinnost vyhodnocován až v případě dodávky větší než 10 % P_{inst} , všechny VTE, kromě č.4, toto splňují, dokonce byl účinnost dodržen i při menší dodávce činného výkonu. V čase přibližně 6:00-15:00 dochází ke zhoršení účinnosti, v tuto dobu je výrobní činný výkon odebírán. Činný výkon slouží pro pokrytí vlastní spotřeby. Mezi zařízení vlastní spotřeby můžeme zařadit hydraulickou pumpu (20 kW) nebo činné ztráty transformátoru (3,9kW), kdy se tyto spotřebiče chovají jako induktivní zátěž.



Obr.3.18: Průběh $\cos\varphi$ v závislosti na dodávce P (VTE Drahaný)

V tabulce níže (tab.3.8), jako u FVE, je uveden stav maximální dodávky činného výkonu během měřicí kampaně a k tomu příslušný jalový výkon a účinník. Pro všechny VTE platí, že při maximech dodávky činného výkonu pracují s regulací na induktivní účinník. Odběrem jalového výkonu se tedy snaží snížit zvýšení napětí způsobené právě velkou dodávkou P.

Tab.3.8: Velikost $\cos\varphi$ při P_{max} – VTE:

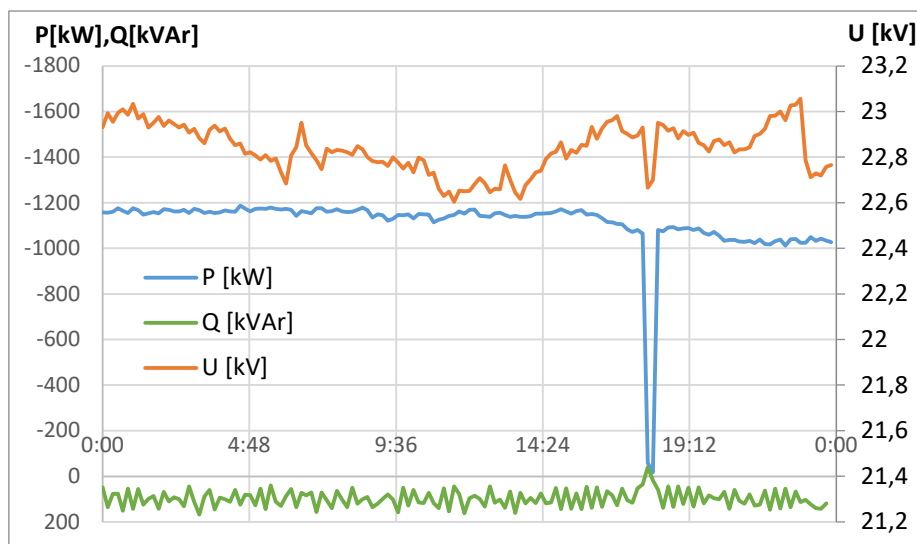
VTE	P_{max} [kW]	Q [kVAr]	$\cos\varphi$ [-]
č.1	-3975,251	308,788	0,997
č.2	-1564,704	102,033	0,996
č.3	-1948,187	155,178	0,997
č.4	-1023,915	122,320	0,965
č.5	-1939,403	183,928	0,987
č.6	-1878,004	146,282	0,997
č.7	-1759,658	153,796	0,983
č.8	-3037,98	687,341	0,975
č.9	-3169,669	161,341	0,983
č.10	-3016,620	1196,758	0,919

Z výsledků a obdržných dat je zřejmé, že ne všechny VTE byly regulovány na $\cos\varphi = 1$. U VTE č.5 je účinník při maximech dodávky činného výkonu snížen, během menší dodávky P byla výrobná regulována na $\cos\varphi = 1$. U dvou VTE č.4, č.8 docházelo po celou dobu měření k regulaci na $\cos\varphi = 0,97$, VTE č.7 byla regulována na $\cos\varphi = 0,98$. VTE č.9, jako jediná ze všech hodnocených VTE, byla regulována na $\cos\varphi = -0,98$, pomocí induktivního účinníku byla výrobná regulována pouze při maximech dodávky P. Poslední zvláštností je VTE č.10, která byla v některých časových úsecích, většinou při stálejší vyšší dodávce P, regulována na $\cos\varphi \approx 0,92$. Při nižších hodnotách dodávky P byla regulována na $\cos\varphi = 1$.

3.4. Napěťové poměry v závislosti na P a Q – BPS

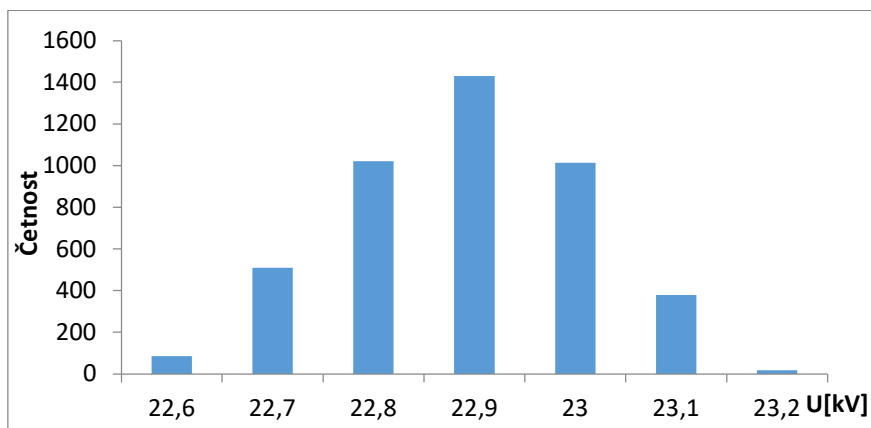
Napěťové poměry

Průběh níže (obr.3.19) zobrazuje vzorek naměřený na BPS Rostěnice dne 4.5.2020. Výrobná dodává značně stálý výkon P do sítě přibližně o velikost 1200 kW. Velikost jalového výkonu Q odpovídá regulaci na $\cos\varphi_{\text{fix}} = 1$. V čase 17:50 došlo k prudkému poklesu dodávky činného výkonu P z hodnoty 1100 kW na 20 kW, během toho došlo k poklesu napětí o přibližně 250 V, to odpovídá 1,14 % U_n . Můžeme říci, že výrobná svou dodávkou P zvyšuje napětí v místě svého připojení právě o tuto hodnotu napětí. V této síti nedochází k žádné rozkolísanosti napětí dané nestálou dodávkou P jako u VTE nebo FVE. Pokles napětí je dán zatěžováním sítě, díky této BPS a jejímu navýšená napětí, je tento úbytek částečně kompenzován.



Obr.3.19: Průběh napětí U v závislosti na P a Q (BPS Rostěnice)

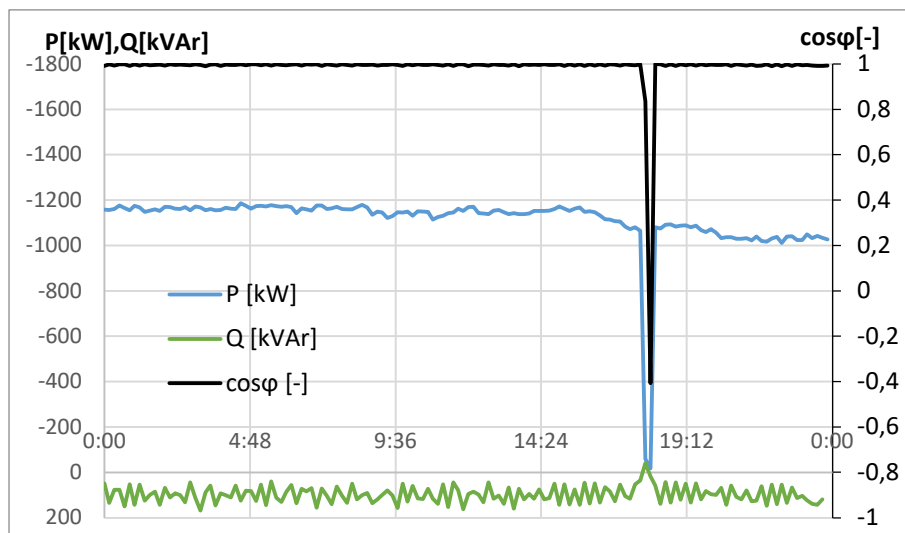
Positivní vliv provozu BPS na kvalitu napětí je patrné i z histogramu uvedeného níže (obr.3.20). Napětí se pohybuje, oproti FVE nebo VTE, v úzkém pásmu hodnot.



Obr.3.20: Histogram napětí – celá měřicí kampaň (BPS Rostěnice)

Účinník a jalový výkon v závislosti na P

Pro zobrazení průběhu účinníku (obr.3.21) byl použit stejný vzorek. Výrobná je po celý den regulována na induktivní $\cos\varphi = 1$. Pouze při pozorovaném poklesu dodávky P v 17:50, se účinník dostal do kapacitní oblasti, kde díky dodávce jalového výkonu Q byla snaha o zvýšení napětí.



Obr.3.21: Průběh $\cos\varphi$ v závislosti na P a Q (BPS Rostějnice)

V tabulce níže (tab.3.9) jsou uvedeny hodnoty maximální dodávky činného výkonu P během měřicí kampaně na jednotlivých výrobnách. U BPS č.1 se $\cos\varphi$ pohyboval v uvedeném rozsahu během maximálních hodnot dodávaného výkonu, výkon byl oproti ostatním výrobnám po celou dobu měřicí kampaně velmi malý. Výrobná č.2 byla jako jediná regulována na kapacitní účinník. Zbylé výrobní byly regulovány na konstantní účinník induktivního charakteru.

Tab.3.9: Velikost $\cos\varphi$ při P_{max} – BPS:

BPS	P_{max} [kW]	Q[kVAr]	$\cos\varphi$ [-]
č.1	-70,474	47,058	0,82-0,99
č.2	-1983,144	-161,042	-0,997
č.3	-1199,477	80,013	0,998
č.4	-1454,455	118,167	0,986
č.5	-1025,274	110,742	0,980
č.6	-1166,671	30,655	1,000
č.7	-612,347	53,242	0,996

3.5. Zhodnocení regulace na konstantní účinník

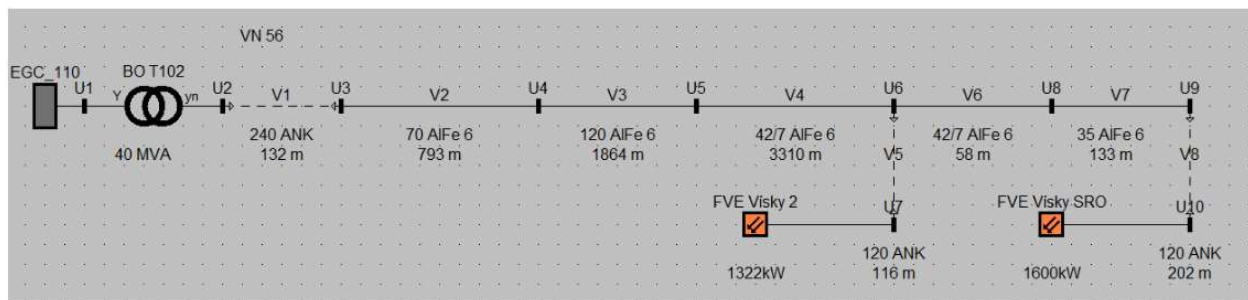
Po analýze všech obdržných dat a z výše uvedených informací, jsem dospěl k názoru, že regulace na konstantní účinník se jeví v některých případech jako nevhodná pro napěťové poměry. Tento způsob regulace se nejhůře projevuje v místech připojení výroben s malým zkratovým výkonem, kde v těchto místech, především díky nestálosti dodávky činného výkonu P , dochází ke značné napěťové rozkolísanosti. I přes to jsem našel výrobní, které s tímto způsobem regulace přispívají ke zhoršení napěťových poměrů jen minimálně a mohou se dle mého názoru nadále s touto regulací provozovat. Jako příklad mohu uvést FVE č.6, kdy její vliv na napěťové poměry popisuje *obr.3.7*. Dále všechny hodnocené BPS mohou být nadále provozovány s konstantním účinníkem, protože nezpůsobují zhoršení napěťových poměrů. Výše popisovaná BPS sice svým výpadkem způsobila relativně velký pokles napětí, ale k tomu došlo pouze dvakrát během celé měřicí kampaně. Dle předpokladu dochází k většímu ovlivnění napěťových poměrů větrnými elektrárnami, kde téměř všechny způsobovaly větší rozkolísanost napětí než fotovoltaické elektrárny. Změnu regulace výrobní bych doporučoval tedy skoro u všech VTE a u vybraných FVE. Jiným způsobům regulace a jejich dopadem na napěťové poměry se budu zabývat v následující kapitole, do které jsem vybral výrobní FVE Visky a VTE Drahany.

4. Napěťové a výkonové poměry pro různé regulace výrobní

Z předchozí kapitoly je zřejmé, že regulace výroben na konstantní účinník roven 1, v hůře impedančně přizpůsobených sítích, nenapomáhá ke stálosti napětí v případě nestálosti dodávky činného výkonu P . Dalším problémem je zvýšení napětí způsobené připojením výrobní, které dle předchozí analýzy dat, mohlo dosahovat až 1 %, přičemž dle PPDS jsou povoleny 2 %. K odstranění těchto problémů může dopomoci jiný způsob regulace výrobní, kterým se bude tato část zabývat. Vyhodnocení vlivu jiné regulace výrobní je nutné z hlediska, již dříve uváděného, budoucího rozvoje počtu připojovaných zdrojů na hladiny VN a NN, kdy současně nejrozšířenější způsob regulace na konstantní účinník roven 1 se jeví jako nedostatečný.

Pro vypracování tohoto bodu zadání, byla vybrána FVE Vísky SRO a VTE Drahaný. Dopad těchto výroben byl popisován již v předchozí části. Výrobní byly vybrány s ohledem na nejnižší zkratový výkon v místě svého připojení, díky kterému jsou změny napětí více závislejší na změnách dodávky činného výkonu P do sítě. Pro výpočty napěťových a výkonových poměrů po aplikaci jednotlivých režimů regulace bude použit nástroj MS Excel, ve kterém budou pro jednotlivé režimy regulace vypracovány výpočtové postupy k docílení nových napěťových a výkonových poměrů. Vypočítané parametry sítě a schémata zobrazující způsob připojení výroben do sítě jsou následující:

Parametry sítě FVE Vísky



Obr.4.1: Schéma sítě (FVE Vísky SRO)

Níže jsou uvedeny tabulky obsahující informace o jednotlivých prvcích ve schématu.

Tab.4.1: Připojené FVE – základní parametry:

FVE	Název	U_n [kV]	S_n [kVA]	P_n [kW]	$\cos \varphi_n$	k	P_{prov} [kW]	Q_{prov} [kVar]	$\cos \varphi_{prov}$	Zapojení
	FVE Vísky 2	22	1322	1322	1	1	1322	0	1	Yn: A B C
	FVE Vísky SRO	22	1600	1600	1	1	1600	0	1	Yn: A B C

Tab.4.2: Napájecí uzel – základní parametry:

Napájecí uzel	Název	U_n [kV]	U_{prov} [kV]	I_{zkr} [kA]	S_{zkr} [MVA]	R/X	R_0/R_1	X_0/X_1
	EGC_110	110	115	6,298	1200	0,15	1	1

Tab.4.3: Transformátor – základní parametry:

Transformátor	Název	U _{n1} [kV]	U _{n2} [kV]	S _t [MVA]	P _k [kW]	u _k [%]	I ₀ [%]	P ₀ [kW]	Prim.	Sekun.
	BO T102	110	22	40	109,7	11,02	0,08	20	Y	yn

Tab.4.4: Venkovní vedení a kabely – základní parametry:

Vedení	Název	Typ	Průřez [mm ²]	U _n [kV]	R _i [Ω/km]	X _i [Ω/km]	B _i [μS/km]	Délka [km]	I _{max} [A]	R ₀ /R ₁	X ₀ /X ₁
	V1	240ANK		240	22	0,154	0,113	123	0,132	353	4,7
V2	70AlFe6		70	22	0,434	0,391	1,427	0,793	225	3	3
V3	120AlFe6		120	22	0,225	0,363	1,469	1,864	357	3	3
V4	42/7AlFe6		42	22	0,667	0,421	1,837	3,31	163	3	3
V5	120ANK		120	22	0,309	0,125	97	0,116	241	3,6	4,4
V6	42/7AlFe6		42	22	0,667	0,421	1,837	0,058	163	3	3
V7	35AlFe6		35	22	0,778	0,389	1,339	0,133	150	3	3
V8	120ANK		120	22	0,309	0,125	97	0,202	241	3,6	4,4

Nadřazená síť:

$$Z_s = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_{zkr}} \cdot \left(\frac{U_{n2}}{U_{n1}} \right)^2 = \frac{1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6,298 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{22 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} \right)^2 = 0,444 \Omega \approx X_s$$

$$R_s = 0,15 \cdot X_s = 0,07 \Omega$$

Transformátor:

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{n2}^2}{S_t} = \frac{11,02}{100} \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{40 \cdot 10^6} = 1,334 \Omega$$

$$R_T = P_k \cdot \left(\frac{U_{n2}}{S_t} \right)^2 = 109,7 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{22 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^6} \right)^2 = 0,033 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{(Z_T^2 - R_T^2)} = \sqrt{1,334^2 - 0,033^2} = 1,333 \Omega$$

Vedení:

$$R_{V1} = R_{IV1} \cdot l = 0,154 \cdot 0,132 = 0,02 \Omega$$

$$X_{V1} = X_{IV} \cdot l = 0,113 \cdot 0,132 = 0,015 \Omega$$

Tab.4.5: Vypočtené R a X pro jednotlivá venkovní vedení a kabely:

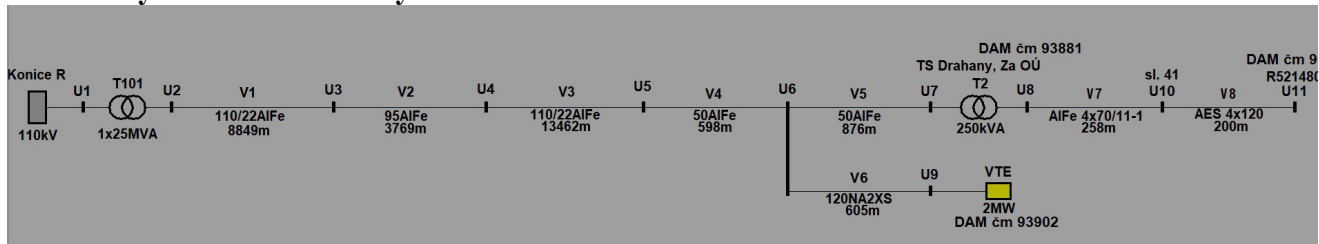
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
R _v [Ω]	0,020	0,344	0,419	2,208	0,036	0,039	0,103	0,062
X _v [Ω]	0,015	0,310	0,677	1,394	0,015	0,024	0,052	0,025

Celkové hodnoty v místě připojení výroby:

$$R_c = R_s + R_T + R_{V1} + R_{V2} + R_{V3} + R_{V4} + R_{V6} + R_{V7} + R_{V8} = 3,298 \Omega$$

$$X_c = X_s + X_T + X_{V1} + X_{V2} + X_{V3} + X_{V4} + X_{V6} + X_{V7} + X_{V8} = 4,274 \Omega$$

Parametry sítě VTE Drahaný



Obr.4.2: Schéma sítě (VTE Drahaný)

Tab.4.6: Připojená VTE:

VTE	Název	U_n [kV]	I_n [A]	$\cos\varphi$ [-]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Q_k [kVAr]
	Drahaný	22	52,49	1	2000	0	2000	0

Tab.4.7: Napájecí uzel – základní parametry:

Napájecí uzel	Název	U_n [kV]	U_{prov} [kV]	I_{zkr} [kA]	S_{zkr} [MVA]	R/X	R_0/R_1	X_0/X_1
	Konice R	110	110	6,298	1200	1	1	1

Tab.4.8: Transformátor – základní parametry:

Trafo	Název	U_1 [kV]	U_2 [kV]	S_t [MVA]	P_k [kW]	u_k [%]	Zap. Prim.	Zap. Sekun.	R_0/R_1	X_0/X_1
	T101	110	23	25	163	11	YN	yn	1	1
	T2	22	0,4	0,25	3,25	4	D	yn	-	-

Tab.4.8: Venkovní vedení a kabely – základní parametry:

	Název	Typ	U_n [kV]	R_l [Ω /km]	X_l [Ω /km]	B_l [μ S/km]	Délka [km]	I_{max} [A]	R_0/R_1	X_0/X_1
Vedení	V1	110/22AlFe6	22	0,259	0,368	1,46	8,849	318	1	1
	V2	95AlFe6	22	0,301	0,374	1,448	3,769	286	1	1
	V3	110/22AlFe6	22	0,259	0,368	1,46	13,462	318	1	1
	V4	110/22AlFe6	22	0,259	0,368	1,46	0,598	318	1	1
	V5	50AlFe6	22	0,615	0,396	1,407	0,876	177	1	1
	V6	120NA2XS2Y	22	0,253	0,127	73	0,605	285	1	1
	V7	70/11AlFe6_7	0,4	0,401	0,28	1	0,258	305	1	1
	V8	120AES120	0,4	0,253	0,066	1	0,2	291	1	1

Tab.4.9: Dopočítané hodnoty prvků z uvedených parametrů:

X_s [Ω]	0,485
Z_t [Ω]	2,323
R_t [Ω]	0,138
X_t [Ω]	2,324

Tab.4.10: Vypočtené R a X pro jednotlivá venkovní vedení a kabely:

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
R_v [Ω]	2,292	1,134	3,487	0,155	0,539	0,153	0,103	0,051
X_v [Ω]	3,256	1,410	4,954	0,220	0,347	0,077	0,072	0,013

Celkové hodnoty v místě připojení výrobní VTE Drahaný:

$$R_c = R_T + R_{V1} + R_{V2} + R_{V3} + R_{V4} + R_{V6} = 7,359 \Omega$$

$$X_c = X_s + X_T + X_{V1} + X_{V2} + X_{V3} + X_{V4} + X_{V6} = 12,725 \Omega$$

Výše byly vypočteny parametry sítí, do kterých jsou hodnocené výrobní připojeny. Výpočet je důležitý zejména pro výpočet úbytků napětí. Poměr R/X pro FVE Vísky je 0,77 a pro VTE Drahaný 0,58, to jsou typické hodnoty pro VN síť.

4.1. Regulace na účinník = 0,97 a 0,95

První možnou změnou regulace jalového výkonu je změna velikosti účinníku, podle kterého bude výrobní regulovat. Starší výrobní mohly regulovat pouze v rozsahu 0,95_{ind} až 0,95_{kap}, přičemž operátor mohl zadávat hodnotu účinníku právě v těchto třech stupních účinníku 1; 0,97 nebo 0,95. Vliv změny účinníku na jinou hodnotu účinníku bude proveden podle vztahů (4.1-4.5), kde bude nejdříve doložena hodnota napětí v místě připojení výrobní bez jejího připojení. Dále bude podle vztahu doložena hodnota ΔU , ale již při změně hodnoty účinníku.

FVE Vísky

Z následujícího vzorového výpočtu vychází průběhy při různé hodnotě $\cos\phi$, které lze vidět na obr. 4.3. Pro ukázkou byl vybrán čas 13:10, tedy peaková dodávka činného výkonu. Z měření víme, že v tento časový úsek dosahoval dodávaný činný výkon hodnoty $P = 1342,17$ kW, odběr jalového výkonu byl 120,77 kVAr a napětí v místě připojení výrobní bylo 22,78 kV. Výrobní byla regulována na $\cos\phi=1$, tyto hodnoty P a Q ve skutečnosti odpovídají $\cos\phi=0,996$. Pro výpočet velikosti napětí bez připojené výrobní, byly vždy použity naměřené hodnoty pro každý časový úsek. Výpočet ještě vyžaduje znalost parametrů sítě R_c a X_c , které jsou vypočítané výše. Indexy 1;0,97;0,95 značí hodnotu účinníku na kterou byla výrobní regulována, index BV odpovídá případu, kdyby výrobní nebyla připojena. ΔU je změna napětí vyvolaná dodávkou činného výkonu P do sítě při různém režimu regulace napětí.

1) Výpočet velikosti napětí U_{BV} bez připojené výrobní:

$$\Delta U_1 = R_c \cdot \frac{P}{U} - X_c \cdot \frac{Q_1}{U} = 3,298 \cdot \frac{1342,17}{22} - 4,274 \cdot \frac{120,77}{22} = 0,178 \text{ kV} \quad (4.1)$$

$$U_{BV} = U_1 - \Delta U_1 = 22,780 - 0,178 = 22,602 \text{ kV} \quad (4.2)$$

2) Výpočet $U_{0,97}$ v případě regulace na $\cos\varphi=0,97$:

$$Q_{0,97} = P \cdot \tan(\cos^{-1}(0,97)) = 1342,17 \cdot \tan(\cos^{-1}(0,97)) = 336,4 \text{ kVAr} \quad (4.3)$$

$$\Delta U_{0,97} = R_c \cdot \frac{P}{U} - X_c \cdot \frac{Q_1}{U} = 3,298 \cdot \frac{1342,17}{22} - 4,274 \cdot \frac{336,4}{22} = 0,136 \text{ kV} \quad (4.4)$$

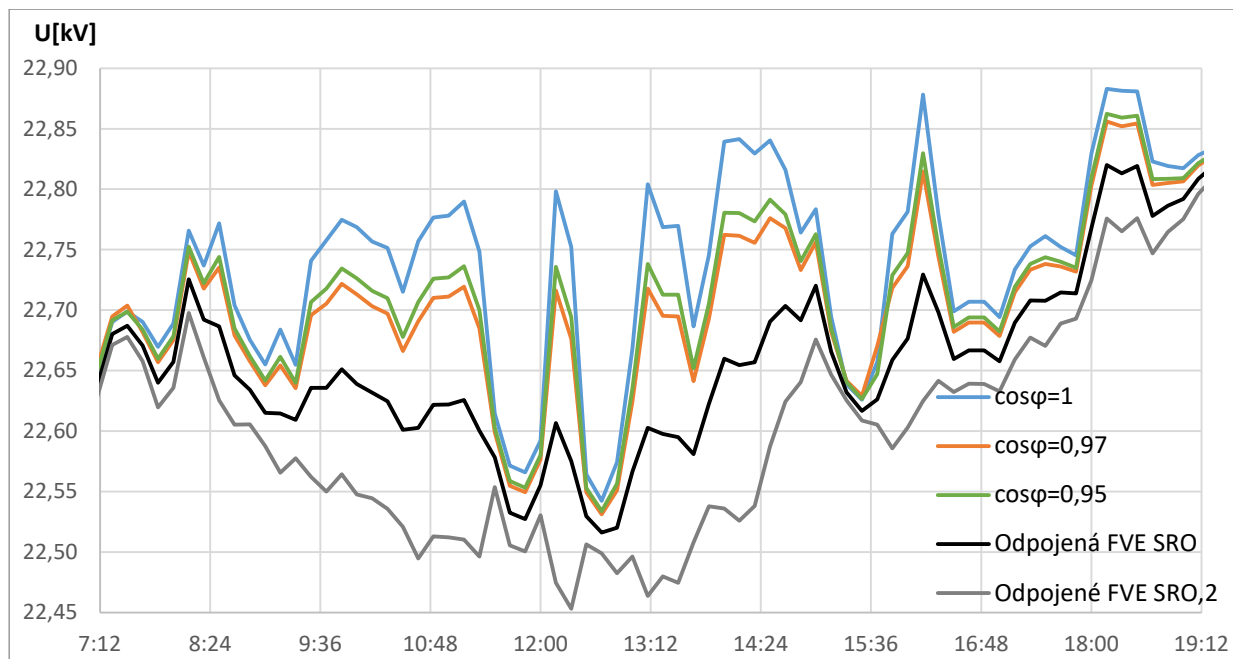
$$U_{0,97} = U_{BV} + \Delta U_{0,97} = 22,602 + 0,136 = 22,738 \text{ kV} \quad (4.5)$$

Obdobný postup byl použit i pro výpočet hodnot napětí při regulaci na $\cos\varphi=0,95$. Vzhledem k tomu, že díky odběru jalového výkonu dochází k poklesu napětí, je dopočten i průběh $\cos\varphi = 1$, kde dochází pouze k navýšení napětí způsobené dodávkou činného výkonu a to bude sloužit k pozdějšímu porovnání všech režimů regulace. Nakonec byl stejný princip aplikován na celý měřený den, ze kterého tato kapitola 4.1 vychází.

Dle teoretických předpokladů je výrobní schopna navýšit napětí v místě připojení až o 240 V při dodávce jmenovitého činného výkonu $P = 1600 \text{ kW}$. Pokud by byla regulována na účinník 0,97, resp. 0,95 byla by schopna odběrem jalového výkonu Q snížit napětí o 76 V, resp. 98 V. Tyto uvedené hodnoty jsou pouze teoretické, proto bude přenastavení účinníku zobrazeno na jednom ze vzorku z FVE Vísky.

Následující graf (*obr. 4.3*), vycházející z měření ze dne 20.7.2020, zobrazuje napěťové poměry, pokud by bylo v tento den regulováno podle různého nastavení účinníku. Dále je zde zobrazen průběh napětí bez připojení FVE Vísky SRO. Průběh napětí bez připojené FVE stále značně kolísá, to je zřejmě způsobené druhou výrobnou – FVE Vísky 2, která také napěťové poměry také ovlivňuje. FVE Vísky 2 nebyla měřena, ale jelikož se nachází nedaleko FVE Vísky SRO, můžeme snadno odhadnout diagram výroby. Z instalovaného výkonu této FVE poté dopočítáme přibližný dodávaný výkon P . Poté byl aplikován opět stejný postup pro výpočet změny napětí. Hodnocená oblast byla zúžena pouze pro časové období, kdy výroba dodávala P do sítě. Z grafu je patrné, že změna účinníku pozitivně ovlivnila velikost napětí. Při maximech dodávky činného výkonu bylo napětí při regulaci $\cos\varphi=0,97$ menší o 65 V (0,30 %) a pro $\cos\varphi=0,95$ o 86 V (0,39 %) oproti regulaci na $\cos\varphi=1$. Při minimech dodávky P , jsou velikosti napětí při všech režimech téměř stejné. Pokud bychom chtěli docílit úplného vyregulování napětí, tedy jako by výrobní nebyla připojena, bylo by třeba regulovat výrobnou přibližně na $\cos\varphi=0,8$. Účinník by se nenacházel v neutrálním pásmu, navíc není tento rozsah PPDS dovolen. Regulace na různou hodnotu účinníku byla použita pouze na FVE Vísky SRO. V případě použití i na FVE Vísky II by došlo dalšímu snížení napětí, avšak díky lepším parametrům v místě připojení této výrobní, by byla regulace méně účinná.

Šedý průběh odpovídá velikosti napětí v místě připojení FVE Vísky SRO, pokud by byla i druhá FVE odpojena. Jedná se čistě o teoretický průběh, který nebyl naměřen, ale vykreslen dle dopočtených hodnot.



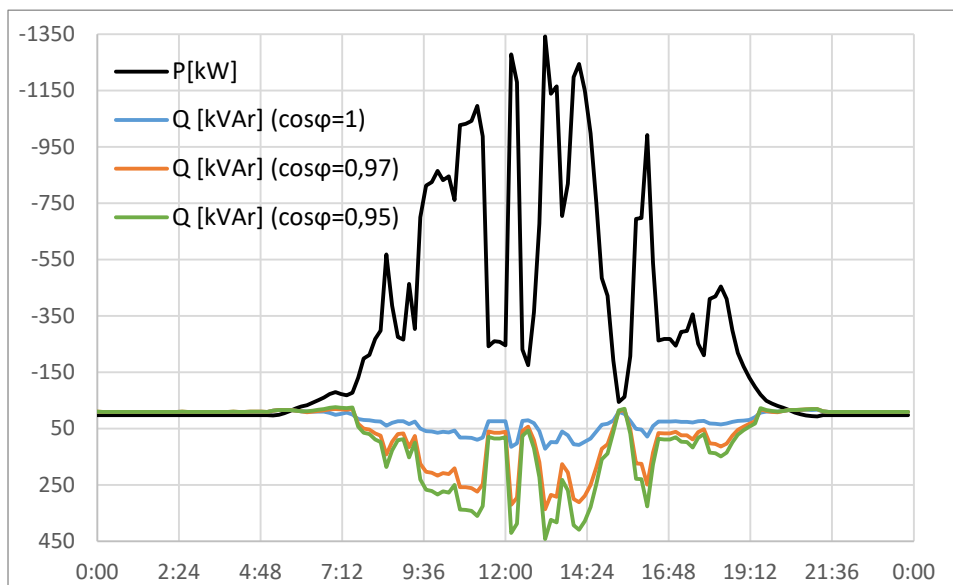
Obr.4.3: Velikost napětí při různé hodnotě $\cos\varphi$ a bez FVE

V tabulce níže jsou uvedeny teoretické maximální, resp. minimální hodnoty napětí a rozkolísanost napětí pro všechny výše uvedené hodnoty účinníku během celé měřicí kampaně. Se snižující se velikostí účinníku klesá také rozkolísanost ΔU , pokles není nikterak velký.

Tab.4.11: Rozkolísanost napětí při různé velikosti $\cos\varphi$:

$\cos\varphi$	$U_{\max 100\%}$ [%]	$U_{\min 100\%}$ [%]	$\Delta U_{99\%}$ [%]	$U_{\max 99\%}$ [%]	$U_{\min 99\%}$ [%]	$\Delta U_{99\%}$ [%]
1	105,6	101,9	3,7	105,2	102,2	3,0
0,97	105,3	101,9	3,4	105,0	102,2	2,8
0,95	105,3	101,9	3,4	104,9	102,1	2,8
Bez FVE	104,7	101,8	2,9	104,5	102,1	2,4

Dále stojí za zmínění nárůst odběru jalového výkonu Q výrobnou ze sítě při změně účinníku (obr.4.4). Při původní regulaci na konstantní účinník výrobná odebírala ze sítě 120,8 kVAr při P_{peak} . Při změně účinníku na hodnotu 0,97 došlo k výrazné změně odebíraného jalového výkonu, ten se zvýšil až na hodnotu 336,4 kVAr. Při změně na $\cos\varphi=0,95$ nebyla změna velikost Q tolika výrazná, jako v přechodím případě a maximální odběr Q během sledované doby byl 441,2 kVAr. Pro případ plného vyregulování zvýšeného napětí, tedy regulace výrobnou na $\cos\varphi=0,8$, by bylo třeba ze sítě odebírat 958,4 kVAr.



Obr.4.4: Velikost odebíraného jalového výkonu při různé velikosti $\cos\varphi$ (FVE Visky SRO)

Se zvýšeným odběrem jalového výkonu také narůstá velikost proudu, a tedy v případě změny režimu regulace jalového výkonu je třeba s tímto počítat. V tabulce níže je uvedena velikost proudu I_{fmax} , odpovídající maximu dodávaného výkonu P , pro výše uvedené hodnoty účinníku. Z tabulky je zřejmé, že navýšení velikosti proudu není velké. Změna účinníku na hodnotu 0,97 (0,95) se jeví vcelku jako dobrá možnost, s ohledem na snížení napětí v místě připojení, ke kterému během regulace na $\cos\varphi = 1$ nedochází a zároveň dochází pouze k menšímu nárůstu proudového zatížení. Činné i jalové ztráty v síti jsou závislé na celkovém proudu, nikoli na činné nebo jalové složce proudu a také na příslušných parametrech R a X .

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I_f^2$$

$$\Delta Q = 3 \cdot X \cdot I_f^2$$

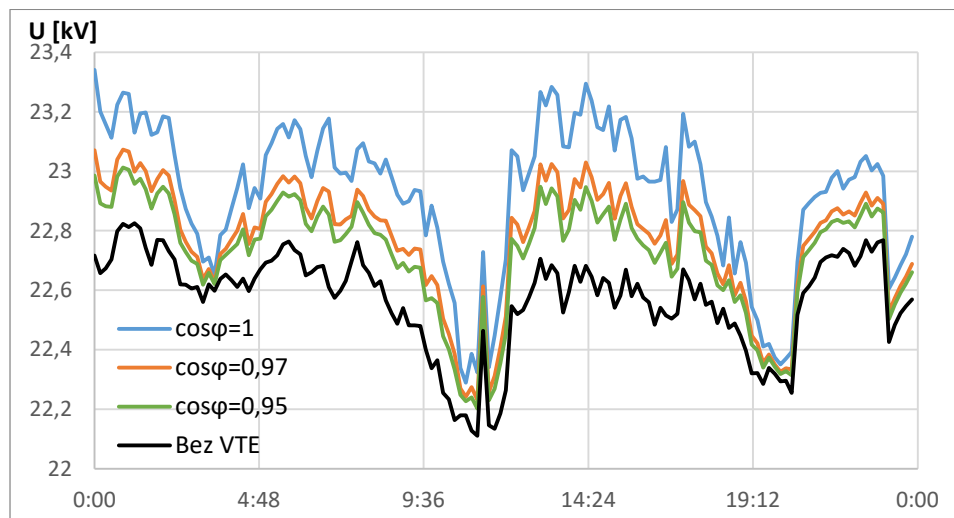
V sítích VN dochází k převaze velikosti X nad R . Zvýšený tok jalového výkonu Q , díky tomu způsobí větší velikost jalových ztrát než ztrát činných. Pro tento konkrétní případ došlo k malému nárůstu ztrát.

Tab.4.12: Proudové zatížení a ztráty při různé velikosti $\cos\varphi$:

$\cos\varphi$	1	0,97	0,95	0,8
I_{fmax} [A]	34,2	35,1	35,9	40,8
ΔP_{max} [kW]	11,5	12,2	12,8	16,5
ΔQ_{max} [kVAr]	15,0	15,9	16,6	21,5

VTE Drahaný

Stejným způsobem (obr.4.5) byla provedena změna regulace na jinou hodnotu účinníku u VTE Drahaný. Po aplikaci stejného výpočtu, jako u FVE, dostáváme teoretický průběh napětí v místě připojené VTE při změně hodnoty účinníku.



Obr.4.5: Teoretický průběh napětí při různé hodnotě $\cos\phi$ a bez VTE Drahaný

Vliv této regulace na velikost napětí je z průběhu značně patrná. Při regulaci $\cos\phi = 1$ bylo napětí výrobnou navýšeno až o 613 V (2,79 % U_n) při dodávce výkonu P 1800 kW. Změnou hodnoty účinníku na 0,97 je výrobnou napětí navýšeno o 347 V (1,58 % U_n), působením regulace došlo díky zvětšenému odběru jalového výkonu o snížení napětí o 266 V (1,21 % U_n). Regulací na $\cos\phi = 0,95$ docílíme dalšího snížení napětí, výrobní poté napětí v místě svého připojení zvyšuje o 264 V (1,2 % U_n), to odpovídá snížení napětí oproti původní regulaci o 349 V (1,59 % U_n). Při změně velikosti účinníku dostáváme následující tabulku (tab.4.13). Tato tabulka udává teoreticky možné maximální/minimální hodnoty napětí a rozkolísanost napětí během měřicí kampaně, pokud by byla použita jiná hodnota účinník pro řízení výrobní. Z tabulky plyne, že pouhá změna hodnota účinníku silně působí na snížení maximálních hodnot napětí a s tím spojené rozkolísanosti napětí v síti.

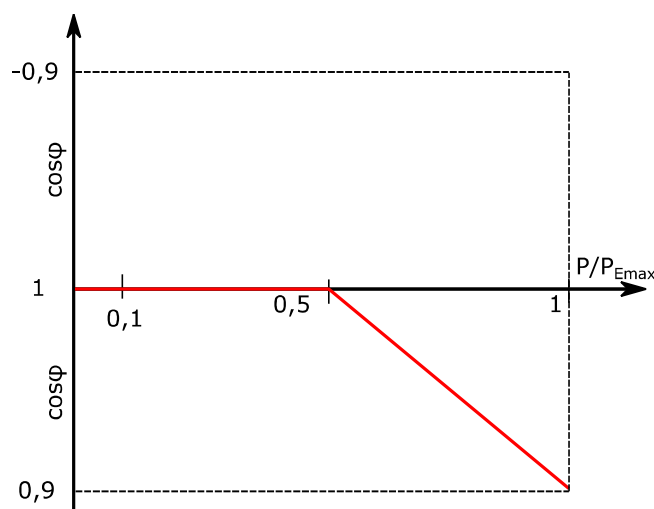
Tab.4.13: Rozkolísanost napětí v místě připojení VTE Drahaný při různé velikosti $\cos\phi$:

$\cos\phi$	$U_{\max 100\%}$ [%]	$U_{\min 100\%}$ [%]	$\Delta U_{100\%}$ [%]	$U_{\max 99\%}$ [%]	$U_{\min 99\%}$ [%]	$\Delta U_{99\%}$ [%]
1	106,3	98,9	7,4	105,9	100,1	5,8
0,97	105,4	98,8	6,6	104,9	100,0	4,9
0,95	105,1	98,8	6,3	104,6	100,0	4,6
Bez VTE	104,3	98,7	5,6	103,8	99,9	3,8

Proudové zatížení, způsobené nárůstem odebíraného jalového výkonu Q pro výše uvedený průběh (obr.4.5), je při maximu dodávaného výkonu 1800 kW rovno velikosti proudu $I_1=46,5$ A pro $\cos\varphi = 1$. Pro stejný výkon P , ale při změně velikosti $\cos\varphi$ na 0,97, vzrostl proud $I_{0,97}$ na hodnotu 48,2 a pro $\cos\varphi = 0,95$ je proud $I_{0,95}$ roven hodnotě 49,4 A. Při změně hodnoty účinníku je nárůst proudu nepatrný, podobně jako u FVE.

4.2.Regulace $\cos\varphi=f(P)$

S tímto typem regulace se můžeme setkat na výrobnách v Německu. U nás se tento režim regulace jalového výkonu nepoužívá, ovšem dle PPDS je možno tento režim regulace použít, proto stojí tento režim na zhodnocení. Rozdíl oproti regulaci na konstantní $\cos\varphi$ je zřejmé z obrázku níže (obr.4.6). Tento režim využívá změny účinníku v závislosti na dodávce činného výkonu P . Hodnota účinníku je měněna až od určité hodnoty činného výkonu. Se změnou účinníku dochází k navýšení odběru jalového výkonu Q ze sítě a s tím spojenému poklesu napětí. Nejmenší hodnota účinníku je dosažena při maximální hodnotě dodávaného činného výkonu, stále je ale splněna podmínka daná PPDS pro podporu napětí.



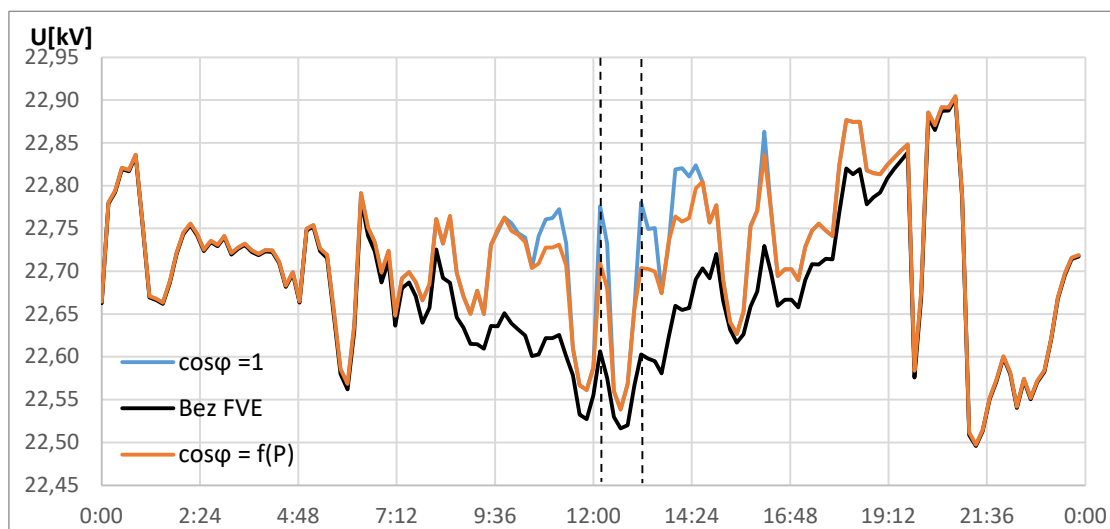
Obr.4.6: Regulační charakteristika režimu regulace $\cos\varphi = f(P)$

Napěťové poměry při režimu regulace $\cos\varphi = f(P)$ byly, jako v předchozím případě, dopočteny pomocí obdobných vztahů (4.1-4.5) pro výpočet úbytku napětí. V tomto případě docházelo ke kontinuální změně velikosti $\cos\varphi$ dle regulační charakteristiky, kde z hlediska teoretické ukázky této regulace, mohla být použita pro dopočítání aktuální velikosti $\cos\varphi$ jednoduchá trojčlenka. Změnou účinníku docházelo ke změně odběru jalového výkonu Q a ke změně velikosti úbytku napětí.

FVE Vísky

Výsledný napěťový průběh je zobrazen níže (obr.4.7), pro porovnání je také dosazen průběh napětí při regulaci $\cos\varphi = 1$. Dle předpokladů docházelo k největšímu snížení napětí, díky regulační charakteristice, při vyšších dodávkách činného výkonu P v časech 12:10 nebo 13:10 (označeno čárkovanou čarou). Během těchto výkonových peaků docházelo při regulaci $\cos\varphi = 1$ k navýšení napětí až o 180 V, to odpovídá 0,82 % U_n . V případě řízení regulace výrobní podle režimu $\cos\varphi = f(P)$, bylo během těchto peaků výrobní napětí zvýšeno o 100 V, tedy o 0,45 % U_n .

Pro snížení napětí o tuto hodnotu musela výrobní ze sítě odebrat jalový výkon o hodnotě cca 500 kVAr. Během toho dosáhl účinník hodnoty 0,934 i přesto, že se jednalo o maximální dodávku činného výkonu během hodnoceného dne. To je dáno regulační charakteristikou, kdy její regulační rozsah byl nastaven na instalovaný výkon výrobní. Při maximální teoretické dodávce je výrobní schopna, dle regulační charakteristiky, odběrem jalového výkonu Q při $\cos\varphi = 0,9$ snížit napětí o 136 V.



Obr.4.7: Velikost U při regulaci $\cos\varphi = f(P)$ (FVE Vísky SRO)

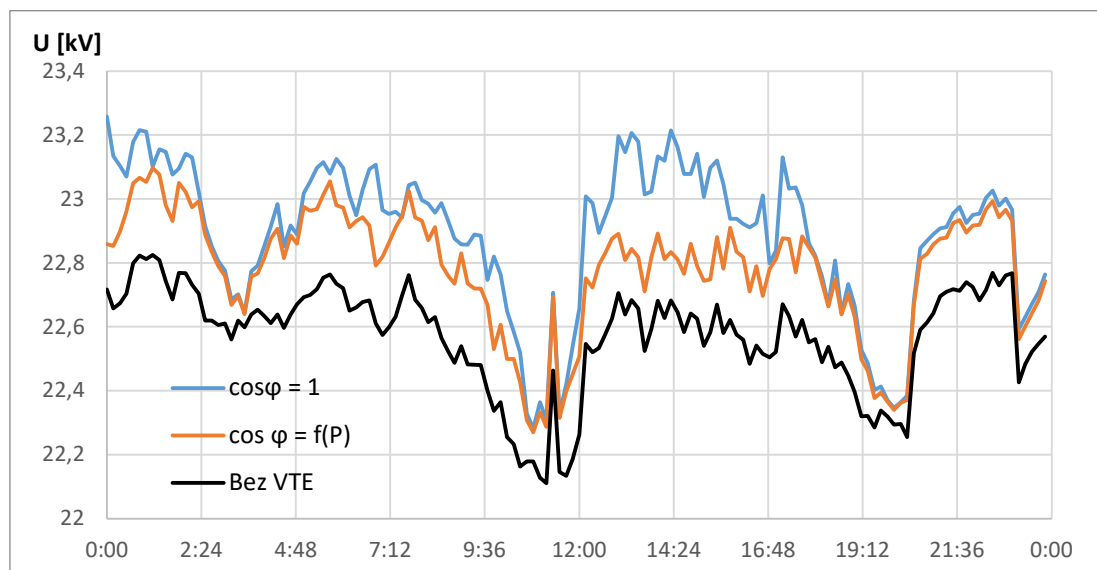
Působením regulace $\cos\varphi = f(P)$ na výrobně FVE Vísky během měřicí kampaně, by bylo teoreticky možno dosáhnout hodnot uvedených v tabulce níže (tab.4.14).

Tab.4.14: Rozkolísanost napětí v místě připojení FVE Vísky při $\cos\varphi = f(P)$:

$\cos\varphi$	$U_{\max 100\%}$ [%]	$U_{\min 100\%}$ [%]	$\Delta U_{100\%}$ [%]	$U_{\max 99\%}$ [%]	$U_{\min 99\%}$ [%]	$\Delta U_{99\%}$ [%]
1	105,6	101,9	3,7	105,2	102,1	3,1
$f(P)$	105,2	101,9	3,3	104,9	102,2	2,7
Bez FVE	104,7	101,8	2,9	104,4	102,1	2,3

VTE Drahany

Při použití regulace $\cos\varphi = f(P)$ na VTE Drahany dostaneme následující průběh napětí (obr. 4.8) v místě připojení výroby.



Obr.4.8: Velikost U při regulaci $\cos\varphi = f(P)$ (VTE Drahany)

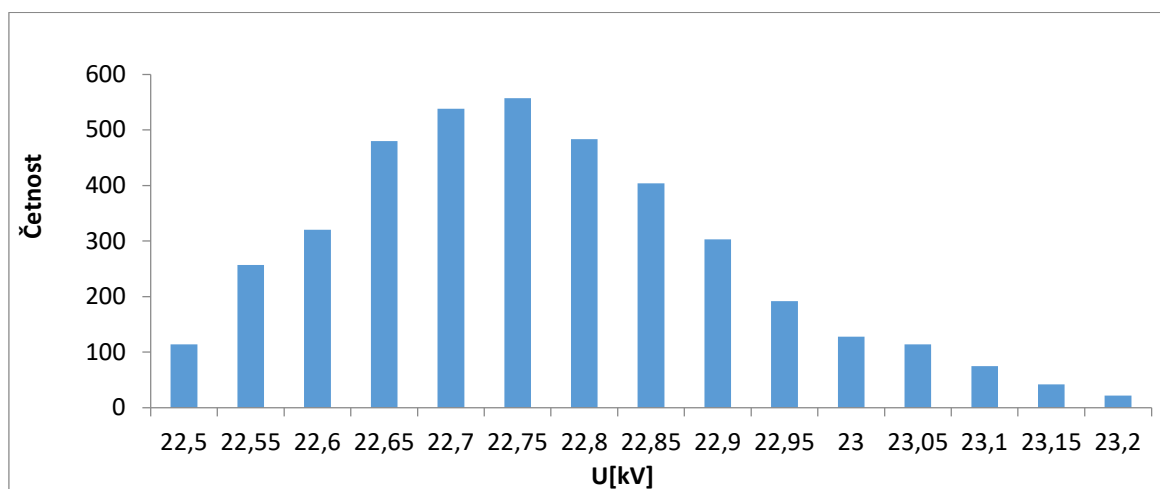
Vliv této regulace na VTE Drahany je možno posoudit dle napěťových poměrů při maximech dodávky P . Z dříve uvedených informací vyplývá, že maximální dodávaný výkon během tohoto dne byl 1800 kW a tomu odpovídá zvýšení napětí o 613 V (2,79 % U_n) při původní regulaci na $\cos\varphi = 1$. Při použití regulace $\cos\varphi = f(P)$ dochází téměř k plnému využití regulačního rozsahu a napětí je zvýšeno jen o 150 V (0,68 % U_n) při $\cos\varphi = 0,92$. Tomu odpovídá i značný nárůst odebíraného jalového výkonu, který při této dodávce P vzroste na 800 kVAr. Proudové zatížení při těchto hodnotách vzroste na 50,5 A. V tabulce níže (tab.4.15) je uvedena rozkolísanost napětí v místě připojení VTE Drahany. V případě použití regulace $\cos\varphi = f(P)$ je patrné podobné zlepšení jako při regulaci na $\cos\varphi = 0,97$.

Tab.4.15: Rozkolísanost napětí v místě připojení VTE Drahany při $\cos\varphi = f(P)$:

$\cos\varphi$	$U_{\max 100\%}$ [%]	$U_{\min 100\%}$ [%]	$\Delta U_{100\%}$ [%]	$U_{\max 99\%}$ [%]	$U_{\min 99\%}$ [%]	$\Delta U_{99\%}$ [%]
1	106,3	98,9	7,4	105,9	100,1	5,8
$f(P)$	105,4	98,8	6,5	104,9	100,1	4,8
Bez VTE	104,3	98,7	5,6	103,8	99,9	3,8

4.3. Regulace na konstantní napětí U

Pro tuto diplomovou práci jsem rozhodl použít tento typ regulace na vybranou FVE Vísky SRO. Bude se jednat o zjednodušený a idealizovaný návrh, zejména pro naznačení výkonových poměrů, hlavně tedy jalového výkonu. Fiktivní pilotní uzel jsem zvolil v místě připojení výrobní. Z histogramu (obr.4.9) vyplývá, že se v místě připojení výrobní pohybuje nejčastěji velikost napětí kolem 22,75 kV. Při použití funkce Median dostáváme velikost napětí 22,728 kV a průměrná velikost napětí v místě připojení je 22,741 kV. Z těchto hodnot určíme požadovanou velikost napětí v místě připojení výrobní. Výrobna bude mít tedy za úkol pomocí dodávky/odběru jalového výkonu udržet napětí na hodnotě 22,75 kV.



Obr.4.9: Histogram velikosti napětí v místě připojení FVE Vísky SRO

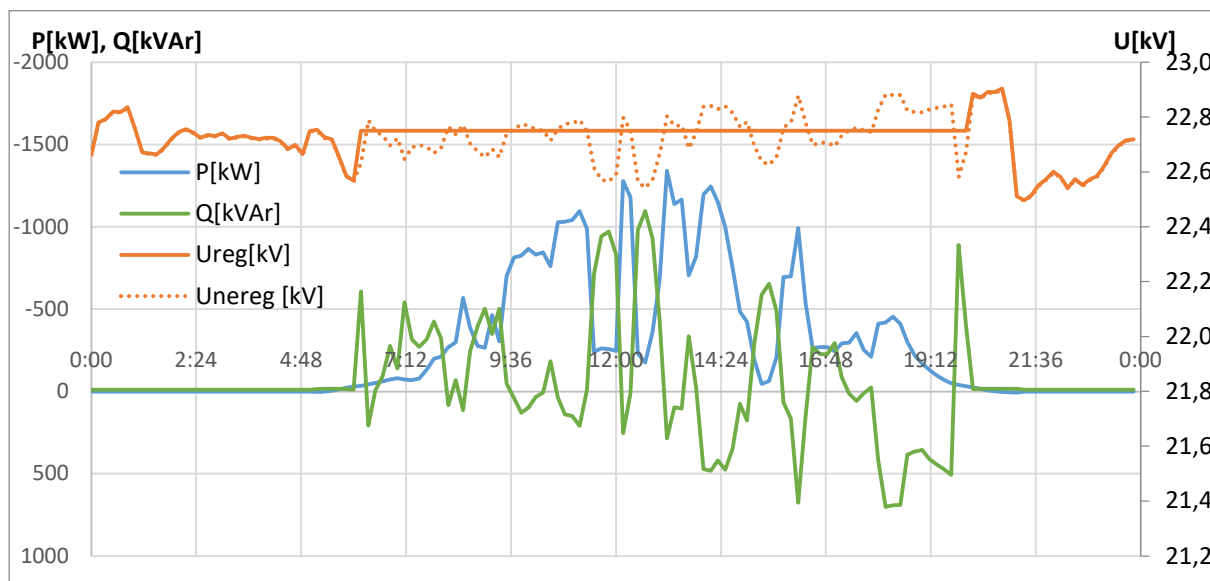
Aktuální dodávka nebo odběr jalového výkonu Q_p jsou úměrné rozdílu napětí ΔU od požadované hodnoty U_{PU} , tento rozdíl vytváří nejen zatížení sítě, ale i sama výrobnou svou dodávkou činného výkonu do sítě. Pro výpočet aktuálně požadovaného jalového výkonu byl použit následující vzorec.

Jalový výkon potřebný pro vykompenzování napěťové odchylky:

$$Q_p = \frac{U_{PU} \cdot \Delta U}{X_c}$$

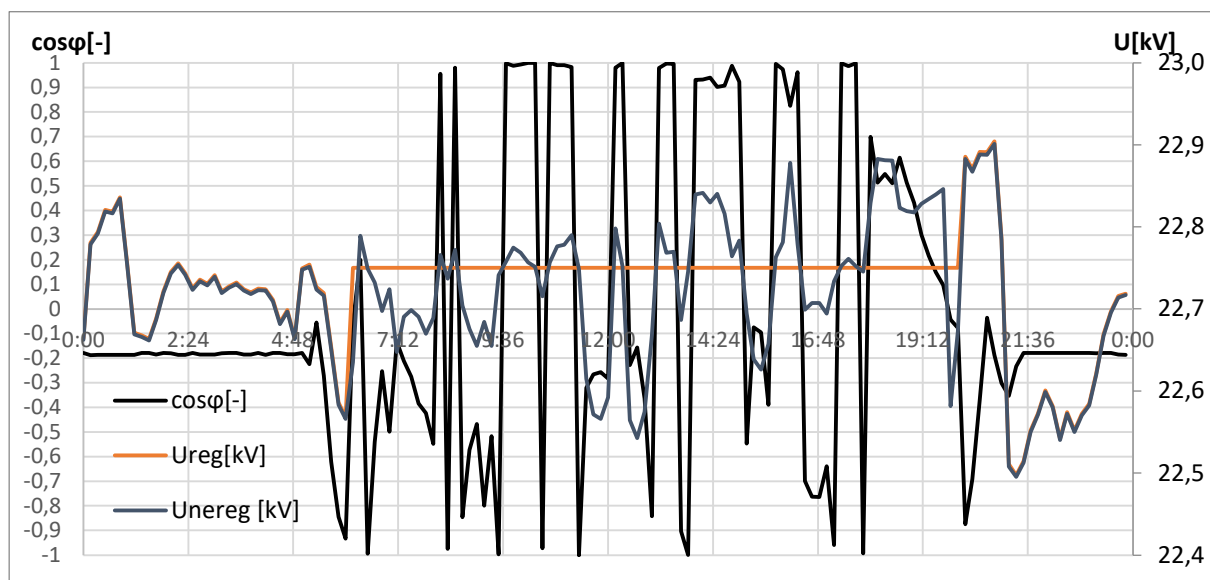
Na průběhu (obr.4.10) je zobrazen teoreticky ideální průběh napětí po regulaci na konstantní napětí. Pro výpočet nebyl zohledněn samotný regulátor, kterému chvíli trvá, než rozdělí požadavek na jalový výkon, během které by došlo ke změně poměrů v síti, proto vyšla konstantní hodnota napětí. Regulace byla spouštěna společně se začínající dodávkou P do sítě výrobnou, vypnuta v opačném případě, proto jsou napěťové poměry mimo tento časový úsek shodné průběhů napětí bez regulace.

Pro udržení napětí na hodnotě 22,75 kV je potřeba značně vysoká hodnota jalového výkonu v určitých případech. Zejména při vyšší dodávce P, kdy značně vzrůstá napětí nebo při rychlých poklesech dodávky P, kdy napětí zase značně klesá.



Obr.4.10: Výkonové a napěťové poměry při regulaci U_{fix}

Pro zajímavost můžeme na obrázku níže (obr.4.11) vidět průběh zobrazující změny účinníku při režimu U_{fix} . Během dne docházelo ke značnému zhoršení účinníku, nicméně pokud nemusela výrobní kompenzovat velké změny napětí, účinník se stále držel v neutrálním pásmu $0,9_{ind}-0,9_{kap}$, i když to není v případě tohoto režimu regulace požadováno a zhoršení účinníku není penalizováno.



Obr.4.11: Průběh účinníku při regulaci U_{fix}

Pokud určíme potřebný jalový výkon pro zvýšení, resp. snížení napětí o 1 V, dostáváme se v případě této sítě na hodnotu $\pm 5,28$ kVAr/V a proudovému navýšení jalového proudu I_j o 0,13 A. Tento jalový proud bude současně zvětšovat celkový proud I a zatěžovat tak vedení, které musí být, v případě použití této regulace U_{fix} , kapacitně připraveno. V sítích s vyšší impedancí tento potřebný jalový výkon Q poroste.

Tento režim regulace se z hlediska kvality napětí jeví jako ideální, ovšem pro udržení napětí na konstantní hodnotě vyžaduje velké množství jalového výkonu. Z dříve uvedeného průběhu (*obr. 4.10*) je zřejmé, že v určitých momentech dosahuje dodávka jalového výkonu velkých hodnot. Ve skutečnosti by se pracovní bod výroby s velkou pravděpodobností nacházel mimo možný regulační rozsah. Výrobna by nebyla schopna sama tento výkon dodat, neboť by to nebylo technologicky možné. Výrobny musí disponovat dostatečnou regulační rezervou nebo nemůže být požadavek na jalový výkon splněn. Dále zde také nebylo uvažováno s pásmem necitlivosti regulátoru, díky tomu dochází k neustálému doregulování napětí na požadovanou hodnotu, v praxi by to mělo za následek zejména rychlé opotřebení technologie související s regulací. Tato regulace bude spíše vhodnější u zdrojů se stálejší dodávkou výkonu, které mohou zajistit dostatečnou regulační rezervu a budou reagovat hlavně na změny způsobené v síti.

U výroben jako FVE a VTE, s méně stálou výrobou, dochází ke změnám napětí i díky těmto zdrojům a je tedy třeba regulovat i tyto změny napětí. Regulaci U_{fix} bude vhodnější použít u výroben připojených dále od rozvodny, tyto výrobny zvyšují napětí více než výrobny připojené blíže rozvodně. Dojde tedy k lepšímu využití potenciálu této regulace, ovšem vždy je potřeba hledat nejlepší možnost použití z hlediska snížení napětí a ztrát.

4.4. Regulace $Q=f(U)$

V této kapitole budou pro výpočet působení regulace $Q=f(U)$ použity obě výrobní FVE Visky a VTE Dražany. Z obdržených dat budou zjištěny maximální hodnoty napětí a dodávaného činného výkonu P v místě jejich připojení. Následně budou na tyto stavy aplikovány různé regulační charakteristiky $Q=f(U)$ a bude sledováno, jak daná regulační charakteristika zapůsobí na velikost napětí v místě připojení výrobní. Vzhledem k absenci režimu regulace $Q=f(U)$ v softwaru E-vlivy, bude působení regulačních charakteristik na výrobní počítáno pomocí iteračního postupu. Ze znalosti napětí v místě připojení výrobní, dáno napětím v síti a dodávkou činného výkonu P , je regulační charakteristikou dána velikost odebíraného jalového výkonu Q pro toto napětí.

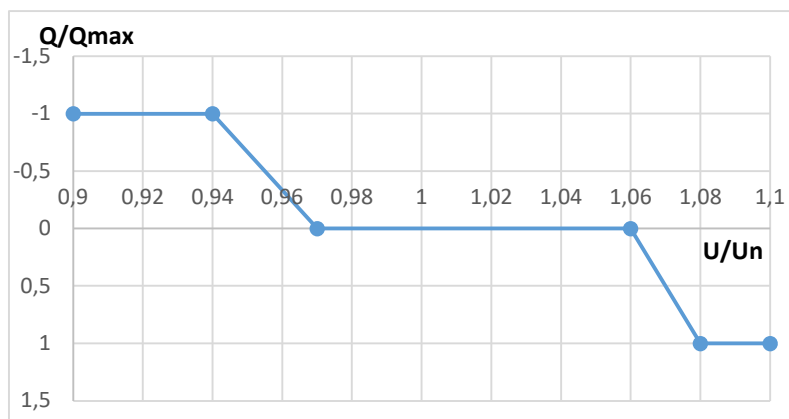
Za pomoci silné vazby mezi napětím a jalovým výkonem dojde odběrem Q ke snížení napětí. To má za následek posun po regulační charakteristice, díky kterému získáme novou hodnotu napětí, té odpovídá dle regulační charakteristiky opět jiná hodnota odebíraného jalového výkonu Q . Tento postup se neustále opakuje, než dojde k ustálení na určitou hodnotu.

4.4.1. Bez regulace

Data vychází z měření, kdy byly výrobní provozovány na $\cos\varphi = 1$ a tyto hodnoty odpovídají tedy stavu, kdy výrobní nebyla regulována za účelem snížení napětí. V místě připojení FVE Visky bylo naměřeno maximální napětí $U_{FVE} = 23,239$ kV to odpovídá poměrné hodnotě 1,056. Během tohoto napěťového peaku výrobní dodávala do sítě činný výkon $P_{FVE} = 1299,33$ kW a tím zvýšila napětí o 195 V. Pro VTE Dražany bylo během měřicí kampaně naměřeno maximální napětí $U_{VTE} = 23,389$ kV ($1,063 U_n$) při dodávce činného výkonu $P_{VTE} = 1878$ kW. Výrobní zvýšila napětí v místě svého připojení o 628 V.

4.4.2. Nastavení $Q=f(U)$ – E.ON (EGD)

Nastavení regulační charakteristiky $Q=f(U)$ podle společnosti E.ON (nyní EGD) je na následujícím obrázku (obr.4.12). Regulační charakteristika má široké pásmo necitlivosti, k regulačnímu pochodu pro snížení napětí dochází až od hodnoty napětí $1,06 U_n$.



Obr.4.12: Nastavení regulační charakteristiky $Q=f(U)$ společností E.ON

V místě připojení FVE Vísky během měřicí kampaně nedošlo k překročení velikosti napětí přes $1,06 U_n$, proto nebylo možné aplikovat tuto regulační charakteristiku. Na VTE Drahany to již bylo teoreticky možné, napětí dosáhlo hodnoty $1,063 U_n$. Pokud bychom uvažovali ideální případ, kdy by regulátor nebyl ovlivněn svou necitlivostí a na toto napětí zareagoval, bylo by dosaženo těchto výsledků:

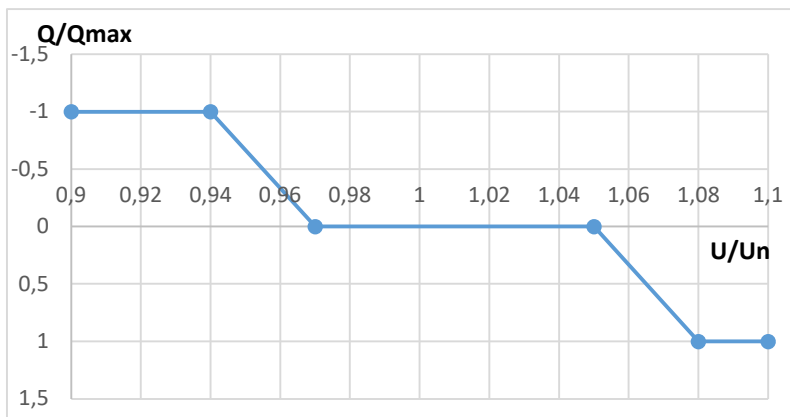
Tab.4.16: Výsledné hodnoty při použití $Q=f(U)$ – E.ON (VTE Drahany):

Iter.	Q [kVAr]	ΔU [V]	U [kV]	u [-]	q [-]
1	142,540	82,447	23,307	1,059	0,157
2	0	0,000	23,389	1,063	0
3	142,540	82,447	23,307	1,06	0,157
4	0	0,000	23,389	1,063	0

Z výsledků plyne, že nastavení této charakteristiky není pro tuto výrobnu vhodné. Díky strmější části charakteristiky pro snížení napětí, je velikost odebíraného jalového výkonu natolik velká, že během první iterace je velikost napětí snížena na hodnotu napětí $1,06$ a výrobná přestává regulovat. Při druhé iteraci nedochází k žádnému odběru jalového výkonu a napětí vzrůstá na původní hodnotu. Během dalších iterací dochází k opakování těchto výsledků. S obdrženích měření nedocházelo na jiných výrobnách k většímu zvýšení napětí a tato regulační charakteristika by se tedy na nich neuplatnila.

4.4.3. Nastavení $Q=f(U)$ – ČEZ

Nastavení regulační charakteristiky společností ČEZ (obr.4.13) je podobné předchozí charakteristice, ke snížení napětí dochází ale od hodnoty 1,05, charakteristika je tedy méně strmější.



Obr.4.13: Nastavení regulační charakteristiky $Q=f(U)$ společností ČEZ

Toto nastavení lze aplikovat na FVE Vísky, kde k ustálení regulačního pochodu dochází po 4 iteracích a je dosaženo následujících výsledků. U VTE Drahaný došlo k dosažení výsledků až po 27 iteracích.

Tab.4.17: Výsledné hodnoty při použití $Q=f(U)$ – ČEZ (FVE Vísky):

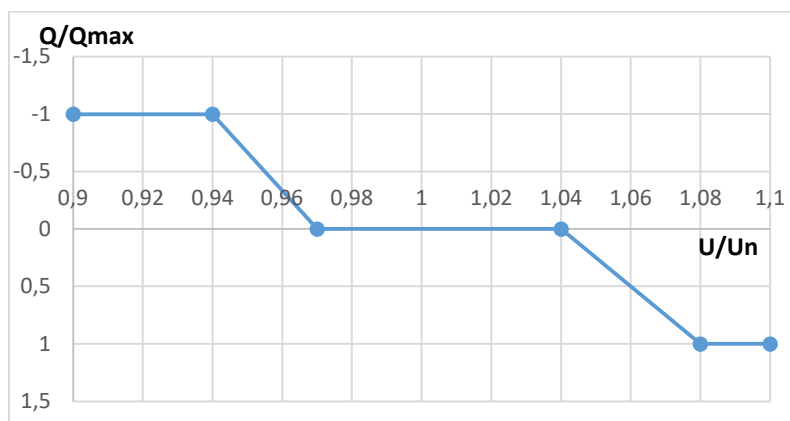
Iter.	Q [kVAr]	ΔU [V]	U [kV]	u [-]	q [-]
4	111,517	21,797	23,217	1,055	0,177

Tab.4.18: Výsledné hodnoty při použití $Q=f(U)$ – ČEZ (VTE Drahaný):

Iter.	Q [kVAr]	ΔU [V]	U [kV]	u [-]	q [-]
27	222,015	128,415	23,261	1,057	0,244

4.4.4. Nastavení $Q=f(U)$ č.1

Při tomto nastavení regulační charakteristiky (obr.4.14) došlo k posunutí hodnoty napětí, od které začíná výrobná regulovat. Jelikož se v hodnocených sítích téměř nevyskytují hodnoty vyšší než $1,05 U_n$, bude velikost napětí začátku regulace snížena na $1,04 U_n$. V tomto nastavení dojde k většímu položení charakteristiky, než tomu je u charakteristiky od společnosti ČEZ. Regulační jalový výkon je tak rozdělen mezi větší napěťový pás, během kterého se může měnit.



Obr.4.14: Nastavení regulační charakteristiky $Q=f(U)$ č.1

Tab.4.19: Výsledné hodnoty při použití $Q=f(U)$ č.1 (FVE Vísky):

Iter.	Q [kVAr]	ΔU [V]	U [kV]	u [-]	q [-]
4	225,024	43,982	23,195	1,054	0,358

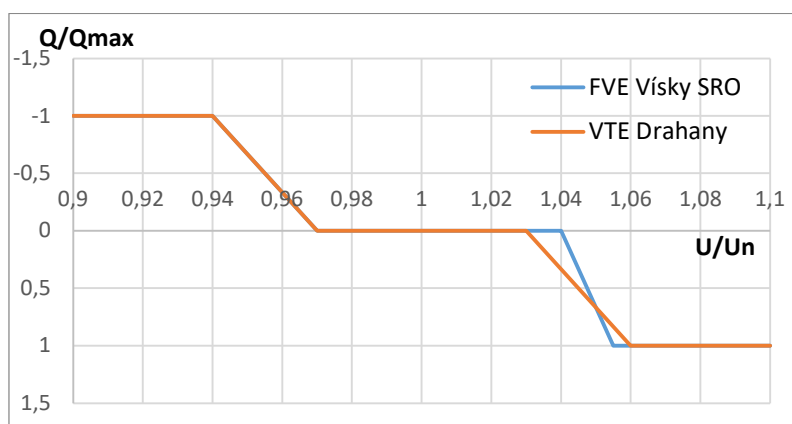
Tab.4.20: Výsledné hodnoty při použití $Q=f(U)$ č.1 (VTE Drahaný):

Iter.	Q [kVAr]	ΔU [V]	U [kV]	u [-]	q [-]
15	329,263	190,449	23,199	1,054	0,362

Z výše uvedených tabulek je patrné, že položení regulační charakteristiky více napomohlo k regulaci napětí u VTE Drahaný. U FVE se položení regulační charakteristiky nejvíce jeví jako správná volba. Ke snížení napětí oproti předchozím nastavením došlo, ale při téměř stejném využití regulační charakteristiky u obou výroben, je vliv u FVE Vísky slabší.

4.4.5. Nastavení $Q=f(U)$ č.2

V místech připojení hodnocených výroben se během měřicí kampaně neobjevovalo právě vyšší napětí než $1,061 U_n$. Proto bude hodnota napětí, od které výrobná začíná odebírat maximální možný jalový výkon, posunuta směrem k maximálním hodnotám napětí, která se v těchto místech objevovaly. Regulační charakteristika pro FVE Vísky SRO bude strmější, protože hodnota napětí 1,04, od které začíná výrobná regulovat napětí zůstane stejné s ohledem na velikost napětí, které se v místě připojení běžně vyskytuje a nedocházelo tak ke zbytečnému regulování. V případě VTE Drahaný je možné velikost napětí pro začátek regulace ještě o něco snížit, a to na hodnotu 1,03. Na výrobný budou aplikovány individuální regulační charakteristiky, mělo by tak dojít k většímu využití regulačního rozsahu.



Obr.4.15: Nastavení regulační charakteristiky $Q=f(U)$ č.2

Tab.4.21: Výsledné hodnoty při použití $Q=f(U)$ č.2 (FVE Vísky):

Iter.	Q [kVAr]	ΔU [V]	U [kV]	u [-]	q [-]
3	516,564	100,965	23,138	1,052	0,821

Tab.4.22: Výsledné hodnoty při použití $Q=f(U)$ č.2 (VTE Drahaný):

Iter.	Q [kVAr]	ΔU [V]	U [kV]	u [-]	q [-]
31	559,207	323,451	23,066	1,048	0,615

Vliv této charakteristiky se lépe projevil na FVE Vísky, kde po páté iteraci došlo k ustálení na výše uvedených hodnotách. Regulační charakteristika je více využita a došlo i k většímu snížení napětí. Naopak u VTE Drahaný se toto individuální nastavení regulační charakteristiky projevilo delším regulačním pochodem, ale je díky tomu dosaženo většího snížení napětí.

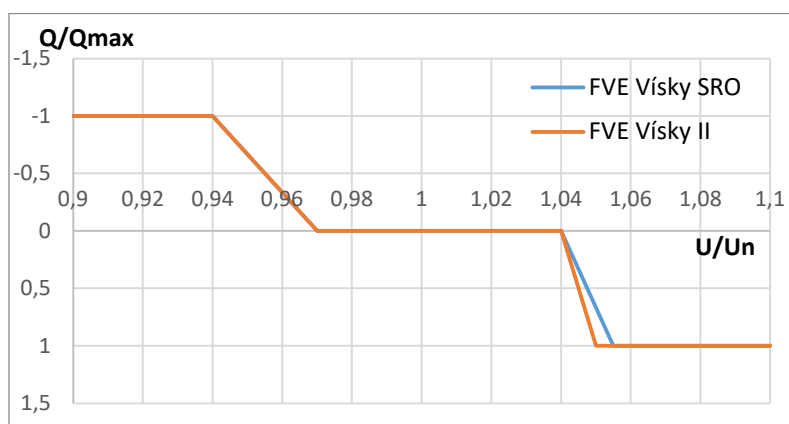
4.4.6. Nastavení $Q=f(U)$ – dvě výroby

Nastavení regulační charakteristiky by mělo být pro každou výrobu posuzována zvlášť. V případě použití stejné regulační charakteristiky na výroby vyskytující se ve stejné síti, ale připojené v jiném místě, dochází k nevyužití regulačního rozsahu. Pro tuto ukázkou je vybrána síť s FVE Vísky SRO, kde se vyskytuje ještě FVE Vísky II, schéma sítě můžeme vidět na *obr.4.1*. FVE Vísky II dodávala výkon 1073,3 kW a napětí v místě připojení bylo 23,044 kV (1,048 U_n). Nejdříve byla použita na obě výroby charakteristika pro FVE Vísky (*obr.4.16*). Po provedených iteracích dostáváme pro obě výroby výsledky uvedené v tabulce níže.

Tab.4.23: Výsledné hodnoty při použití $Q=f(U)$ pro FVE Vísky SRO (FVE Vísky SRO, II):

FVE	Iter.	Q [kVAr]	ΔU [V]	U [kV]	u [-]	q [-]
Vísky SRO	3	516,564	100,965	23,138	1,052	0,821
Vísky II	5	198,668	37,819	23,006	1,046	0,382

FVE Vísky II, díky svému bližšímu umístění k napájecímu uzlu má nižší reaktanci vedení a zvýšení napětí způsobené dodávkou P je menší než u FVE Vísky SRO. Z toho vychází nižší využití regulačního rozsahu této charakteristiky. Pokud bychom použili regulační charakteristiku (*obr.4.16*) vhodnější pro výrobu FVE Vísky II, jsme schopni tento regulační rozsah lépe využít a docílit tak většího snížení napětí.



Obr.4.16: Nastavení regulační charakteristiky $Q=f(U)$ pro FVE Vísky SRO, II

Po provedení iteračního výpočtu dostáváme následující výsledky. Regulační rozsah u FVE Vísky SRO je po ustálení regulačního pochodu téměř z plna využit. U FVE Vísky II došlo, dle očekávání, k většímu využití regulační charakteristiky. I přesto, že pro FVE Vísky II je regulace využita jen z poloviny, další napřímení regulační charakteristiky má za následek prodloužení regulačního pochodu. Z toho plyne, že výroby blíže k napájecímu uzlu, nebudou regulační rozsah využívat v plné šíři.

Tab.4.24: Výsledné hodnoty při použití $Q=f(U)$ pro FVE Vísky II (FVE Vísky SRO, II):

FVE	Iter.	Q [kVAr]	ΔU [V]	U [kV]	u [-]	q [-]
Vísky SRO	5	626,420	122,437	23,117	1,051	0,996
Vísky II	7	267,543	50,930	22,993	1,045	0,515

Při použití vždy jedné regulační charakteristiky na obě výrobní vnáší v obou případech nevýhody. Lepší proto bude na každou výrobní použít individuální regulační charakteristiky uvedené na obr.4.16. Poté dostaneme pro výrobní výsledky uvedené v tab.4.25, regulační rozsah je lépe využit a dochází i ke značnému snížení napětí.

Tab.4.24: Výsledné hodnoty při použití $Q=f(U)$ individuální charakteristiky (FVE Vísky SRO, II):

FVE	Iter.	Q [kVAr]	ΔU [V]	U [kV]	u [-]	q [-]
Vísky SRO	3	516,564	100,965	23,138	1,052	0,821
Vísky II	7	267,543	50,930	22,993	1,045	0,515

5. Zhodnocení a porovnání různých regulací výroby

V tabulce níže (tab.5.1) jsou shrnuta výsledná data při použití různých režimů regulace na FVE Vísky SRO a VTE Drahaný. Pro porovnání jednotlivých režimů regulace byly vybrány pro jednotlivé výroby vždy stejné hodnoty napětí, které odpovídají maximální hodnotě získané během měřicí kampaně. Při režimu $\cos\varphi = 1$ je do sítě dodáván pouze činný výkon a dodávka/odběr jalového výkonu je nulový. Pro tento režim bylo stanoveno výchozí napětí U_{nereg} . Pro tyto hodnoty napětí také odpovídá i velký dodávaný činný výkon, kde pro FVE Vísky SRO to bylo 1299 kW, který způsobí v této síti zvýšení napětí v místě připojení o 195 V (0,89 %). Pro VTE Drahaný je dodávaný činný výkon 1878 kW a tomu odpovídá zvýšení napětí o 628 V (2,85 %). U_{nereg} a U_{reg} jsou velikosti napětí v místě připojení výroben před a po aplikování různých režimů regulace. ΔU je změna napětí vyvolaná příslušným režimem regulace, Q je velikost odebíraného jalového výkonu. ΔP a ΔQ značí činné a jalové ztráty vznikající během provozovaného režimu regulace.

Tab.5.1: Tabulka pro zhodnocení použitých režimů regulace na FVE Vísky SRO a VTE Drahaný:

	Režim	U_{nereg} [%]	U_{reg} [%]	ΔU [%]	Q [kVAr]	ΔP [kW]	ΔQ [kVAr]	
FVE Vísky SRO	$\cos\varphi = 1$	105,63	105,63	0	0	10,34	13,47	
	$\cos\varphi = 0,97$		105,34	0,29	325,64	11,02	14,37	
	$\cos\varphi = 0,95$		105,25	0,38	427,07	11,51	15,00	
	$\cos\varphi = f(P)$		105,20	0,43	481,93	11,83	15,42	
	U_{fix}		103,41	2,22	2460,05	49,35	64,31	
	$Q = f(U)$		E.ON	-	-	-	-	-
			ČEZ	105,53	0,1	111,52	10,41	13,57
			č.1	105,43	0,2	225,02	10,67	13,90
č.2		105,17	0,46	516,56	12,05	15,70		
VTE Drahaný	$\cos\varphi = 1$	106,31	106,31	0	0	47,66	82,41	
	$\cos\varphi = 0,97$		105,08	1,23	470,67	51,62	89,25	
	$\cos\varphi = 0,95$		104,69	1,62	617,27	54,21	93,74	
	$\cos\varphi = f(P)$		104,10	2,21	843,57	59,47	102,83	
	U_{fix}		-	-	-	-	-	
	$Q = f(U)$		E.ON	105,99	0,32	142,54	48,01	83,02
			ČEZ	105,73	0,58	225,015	48,66	84,14
			č.1	105,45	0,86	329,263	49,71	85,95
č.2		104,85	1,46	559,207	53,10	91,83		

Největšího snížení napětí pro výrobu FVE Vísky SRO došlo při použití regulace na konstantní napětí, kde velikost U_{reg} vychází z kapitoly 4.3. Díky této regulaci jsme oproti ostatním schopni docílit velkého snížení napětí, které má ale za následek výrazné zvýšení ztrát.

Pokud nebudeme uvažovat tento režim regulace jalového výkonu díky ztrátám jako vhodný, vychází nám nadále z hlediska největšího snížení napětí nejlépe režim regulace $Q=f(U)$ č.2, který má nastaveno velké využití regulačního rozsahu pro takto velká napětí. V tomto konkrétním případě dokázal tento režim svým zapůsobením snížit nárůst napětí způsobený výrobou v místě připojení o více než polovinu. Dále je nutné nezapomenout, že k takovému snížení napětí bude docházet zvýší-li se v místě připojení napětí na hodnotu podobné jako $U_{nereg.}$. Podobným snížením napětí disponuje také režim $\cos\varphi = f(P)$, který není závislý na velikosti napětí, ale na dodávce činného výkonu a měl by stejnou účinnost i při nižší velikost napětí. Režimy, u kterých dochází pouze ke změně velikosti konstantního účinníku, jsou ze všech režimů nejméně účinné. Svou aplikací dokáží snížit nárůst napětí v místě připojení výrobní maximálně o 0,29-0,38 %, dle hodnoty účinníku. Výhodou tohoto režimu regulace je, že i staré výrobní jsou schopny měnit hodnotu účinníku, na který mají regulovat, a tak je možné tento režim na ně aplikovat.

Pro VTE Drahaný jsou výsledky po aplikování režimu regulace jiné oproti FVE Drahaný. Jako neúčinnější režim regulace se jeví $\cos\varphi = f(P)$, kdy zvýšení napětí výrobou o 2,85 % bylo sníženo na 0,64 %. V případě režimu regulace $U = f(U)$ č.2, který je opět nastaven s ohledem na největší napětí vyskytující se v síti, je s porovnáním s $\cos\varphi = f(P)$ značně slabší, než tomu bylo u FVE Vísky SRO. Z předchozí kapitoly vyplývá, že u této výrobní je využití regulačního rozsahu menší a v případě pokusu o zvýšení využití regulačního rozsahu a získání tak většího snížení napětí, nebyl iterační výpočet schopen docílit ustáleného stavu. Režimy s různou hodnotou konstantního účinníku jsou svou účinností podobné právě režimu $Q = f(U)$, kde ale došlo oproti FVE Vísky SRO ke zlepšení využití tohoto režimu.

Díky rozdílné konfiguraci sítí je možné doporučit režim regulace pro jednotlivé výrobní. Vzhledem k tomu, že se FVE Vísky SRO nachází blíže k napájecímu uzlu a síť je lépe impedančně přizpůsobená než U VTE Drahaný, bych v místě připojení očekával častěji vyšší hodnotu napětí, která bude také způsobena regulačním transformátorem společně s výrobou a tím dojde k častějšímu zafungování režimu $Q = f(U)$. Naopak VTE Drahaný se nacházejí mnohem dále od napájecího uzlu než FVE Vísky SRO, díky úbytkům na vedení bych v místě připojení výrobní očekával vyšší hodnoty napětí způsobené právě dodávkou činného výkonu. Proto by bylo lepší použít režim regulace $\cos\varphi = f(P)$, který silně potlačuje zvýšení napětí způsobené velkou dodávkou činného výkonu. Obecně se tedy jeví použití režimu regulace $Q = f(U)$ vhodnější na výrobní, které sice ovlivňují napětí v místě svého připojení, ale nachází se blíže k napájecímu uzlu. Pro výrobní vzdálenější, které silně ovlivňují napětí v místě svého připojení se jeví režim $\cos\varphi = f(P)$ jako dobrá volba, vhodný by také byl režim $U_{fix.}$

6. Závěr

Úkolem této diplomové práce bylo zhodnocení vlivu různých režimů regulace na výrobní připojované na hladinu VN. V první části došlo k obecnému popsání řízení napěťových a výkonových poměrů v DS a co má provozovatel DS k dispozici. Protože se práce zabývá výrobami, došlo k popsání jejich vlivu na napětí, které díky dodávce činného výkonu v místě připojení výrobní vzrůstá. Zvýšení napětí, dle rovnice popisující úbytek napětí, jsme schopni odběrem jalového výkonu snížit. Ten navyšuje celkové zatížení sítě, a tak v případě použití jakékoliv regulace je nutné, aby byla síť kapacitně připravena. Dnešní koncept DS je tvořen decentralizovanými výrobami, které díky nestálé výrobě způsobují během dne různé rozložení napěťových profilů, tzv. rozevírání napěťových nůžek. Zejména v sítích NN může poté docházet k silným přepětím nebo naopak k podpětím. Regulací napětí mají provozovatelé DS za úkol udržet napětí v daných mezích dle ČSN EN 50160 s pomocí dostupných zařízení, kterým mohou být regulační transformátory nebo právě samotné výrobní.

Ve velké části práce jsem se zabýval vyhodnocením výkonových a napěťových poměrů při provozu výroben na konstantní hodnotu účinníku. Všechny vyhodnocované výrobní v době měřicí kampaně nepřesáhly limitní hodnoty napětí $\pm 10\% U_n$ dané normou ČSN EN 50160. Větší rozkolísanost napětí jsem pozoroval u výroben s nižším zkratovým výkonem S_k . Největší rozkolísanosti napětí poté dosahovaly VTE, díky silně proměnné dodávce činného výkonu. Účinník byl udržován na konstantní hodnotě, ke snížení pod neutrální pásmo docházelo v případě velmi malé dodávky činného výkonu, v tento moment není účinník vyhodnocován. U FVE můžeme zpozorovat, že během nočních hodin dochází k dodávce induktivního jalového výkonu do sítě. To je způsobeno kabelovým vedením, kterým je velká část FVE tvořena a v nočních hodinách dochází k jeho nabíjení. Velikost tohoto jalového výkonu není velká, proto nemusíme odpojovat FVE od sítě.

V části, která se zabývala změnou režimů regulace jalového výkonu, jsem již při změně hodnoty účinníku na 0,97 byl schopen napětí v místě výrobní snížit. V mém případě o 0,29 – 1,23 % U_n , v závislosti na parametrech sítě. Zvýšením odběru jalového výkonu jsem navýšil proudové zatížení sítě pouze o 0,9 – 1,7 A. Pro hodnotu účinníku 0,95 jsem docílil snížení napětí u VTE Drahaný až o 1,62 % U_n a zvýšení napětí způsobené dodávkou činného výkonu bylo sníženo o více než polovinu, při navýšení proudového zatížení o 2,9 A. U výkonových ztrát došlo k většímu nárůstu jalových ztrát, protože na hladině VN je reaktance dominantnější než činný odpor. Režimem regulace $\cos = f(P)$ jsem dokázal, při peaku dodávky činného výkonu, snížit napětí o 2,21 % U_n pro VTE Drahaný.

Pro režim regulace $Q = f(U)$ jsem odzkoušel čtyři možná nastavení regulačních charakteristik. Tento režim regulace se lépe projevil u FVE Vísky SRO, kde jsem vhodným nastavením regulační charakteristiky dokázal využít téměř celý rozsah regulace a velikost napětí tak snížit o 0,46 % U_n . Nastavení regulační charakteristiky u VTE Drahaný bylo náročnější, díky větší reaktanci dokázal odběr jalového výkonu způsobit velké snížení napětí. Poté jsem se dostal do necitlivostního pásma, kdy výrobná neodebírá žádný jalový výkon a velikost napětí se tak opět navýší. Můj způsob iteračního výpočtu se tedy neustálil, ale začal kolísat, a proto jsem nebyl schopen využít celý rozsah regulační charakteristiky.

Pro výrobný s nižším zkratovým výkonem a nestálou dodávkou činného výkonu doporučuji změnit režim regulace jalového výkonu. Pokud výrobná disponuje stálou dodávkou činného výkonu (BPS), jsme režimem $\cos\varphi = 1$ schopni navýšit napětí v místě připojení, které může kompenzovat snížení napětí způsobené zatížením. Jiné režimy regulace bych volil s ohledem na umístění výrobný. Pro výrobný připojené dále od napájecího bodu (VTE Drahaný) jsem dosáhl nejlepší účinnosti u režimu regulace $\cos\varphi = f(P)$ nebo změnou hodnoty $\cos\varphi_{\text{fix}}$. V případě výroben, jako byla FVE Vísky SRO, jsem byl schopen dosáhnout lepšího výsledku při použití režimu $Q = f(U)$. Ovšem je třeba tyto regulační charakteristiky posuzovat pro každou výrobný samostatně, neboť regulační charakteristiky používané společnostmi E.ON nebo ČEZ byly oproti ostatním režimům regulace na hladině VN téměř neúčinné.

Seznam literatury a použitých zdrojů

- [1] VYKUKA, Roman. *ROZVOJ A PROVOZ DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ SE ZAMĚŘENÍM NA ZABEZPEČENÍ A KVALITU DODÁVEK ELEKTRICKÉ ENERGIE* [online]. Plzeň, 2019 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/40701>. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [2] TESAŘOVÁ, Miloslava. *Přednášky z předmětu PE*. Plzeň, 2020. Západočeská univerzita v Plzni.
- [3] KAŠPÍREK, Martin, David MEZERA a David ŠIMÁČEK. KVALITA NAPĚTÍ V DISTRIBUČNÍ SÍTI NN S VYSOKOU PENETRACÍ OZE. In: *Konference ČK CIRED 2015*. 2015, s. 21.
- [4] HEJTMÁNKOVÁ, Pavla. *Přednášky z předmětu TPR*. Plzeň, 2019.
- [5] NOHÁČ, Karel. *Pracovní oblast a provozní diagram alternátoru* [online]. In: . [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~nohac/E2/Elektrarny2-cast09-v3.pdf>
- [6] DRÁBEK, Pavel. *Přednášky z předmětu VE*. Plzeň, 2018.
- [7] TLUSTÝ, Josef. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [8] MÁSLA, Karel. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. [Praha]: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.
- [9] *Zákon č. 458/2000 Sb. Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon)*. In: . Zákon 458/2000 Sb.
- [10] ČSN EN 50160. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [11] *Pravidla pro provozování distribučních soustav: příloha č.4 – Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulačních zařízení* [online]. Energetický regulační úřad, 2018, 85 [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <https://www.eon-distribuce.cz/sites/default/files/2019-01/p%C5%99%C3%ADloha%204%20Pravidla%20pro%20paraleln%C3%AD%20provoz%20v%C3%BDroben%20a%20akumula%C4%8Dn%C3%ADch%20za%C5%99%C3%ADzen%C3%AD%20-11%202018.pdf>
- [12] *NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/631* [online]. 2016, , 68 [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0631&from=EN>
- [13] TESAŘOVÁ, Miloslava. *Requirements for generating plants in the Czech Republic*. Plzeň, 2019. Západočeská univerzita v Plzni.
- [14] SCHOLZ, Vojtěch. *Vyhodnocení provozu fotovoltaické elektrárny s akumulačním zařízením* [online]. Plzeň, 2020 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/40210>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.

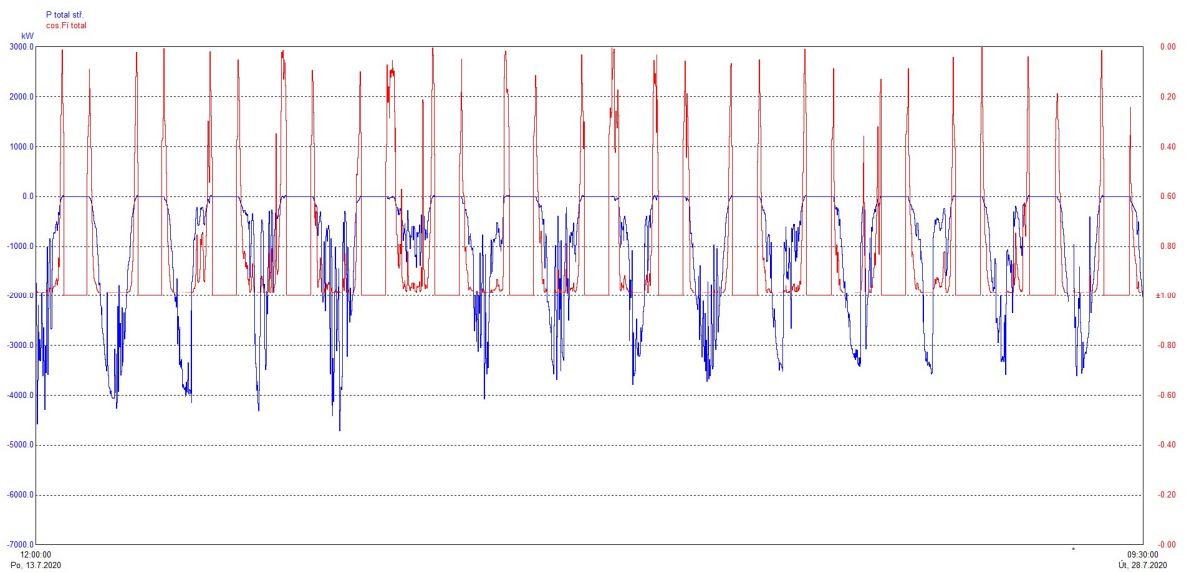
Přílohy

Požadavky na výroby dle RfG:

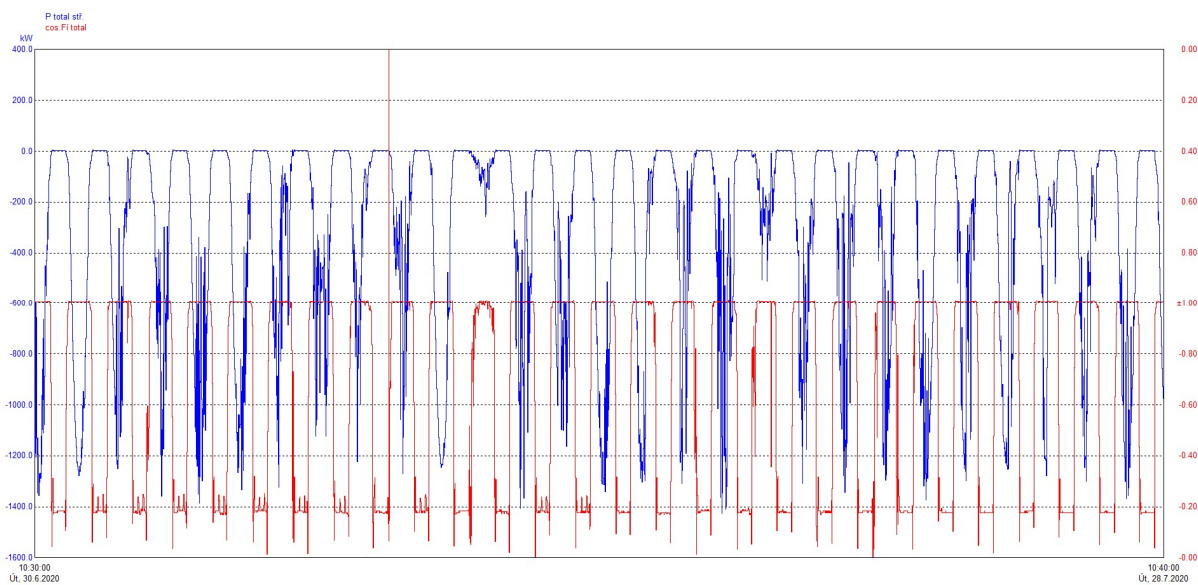
Článek RfG	Požadavky RfG	Typ výrobního modulu					
		A1	A2	B1	B2	C	D
13.1a	Frekvenční rozsahy a časové limity pro VM	X	X	X	X	X	X
13.1b	Hodnota rychlosti změny frekvence (RoCoF)	X	X	X	X	X	X
13.6	Logické rozhraní pro přerušení dodávky činného výkonu ⁴	X	X	X	X		
13.7	Podmínky pro automatické připojení k soustavě	X	X	X	X	X	
14.2	Rozhraní pro snížení činného výkonu		X	X			
14.5d	Komunikace a výměna informací		X	X	X	X	X
15.2a,b	Regulovatelnost činného výkonu			X	X	X	X
15.2g	Komunikace a výměna informací o režimu FSM					X	X
15.5a	Schopnost startu ze tmy				X ⁵	X	X
15.5b	Schopnost ostrovního provozu					X	X
15.5c	Rychlé opětovné přifázování					X	X
15.6a	Kritéria pro detekci ztráty úhlové stability nebo ztráty regulace					X	X
15.6b	Přístrojové vybavení			X	X	X	X
15.6c	Simulační modely				X	X	X
15.6e	Minimální a maximální limity rychlosti změn činného výkonu				X	X	X
16.2b	Doby připojení VM k soustavě v případě přepětí a podpětí						X
16.2c	Automatické odpojení na základě hodnoty napětí						X
16.4	Nastavení synchronizačních zařízení						X
17.2a	Dodávka jalového výkonu			X			
18.2	Dodávka jalového výkonu				X	X	X
20.2a	Dodávka jalového výkonu u nesynchronních VM		X	X			
20.2b,c	Rychlý poruchový proud v případě poruchy			X	X	X	X
21.3b,c	Dodávka jalového výkonu				X	X	X
21.3d	Režimy regulace jalového výkonu				X	X	X

Grafy hodnocených výroben z originálního software měřícího přístroje:

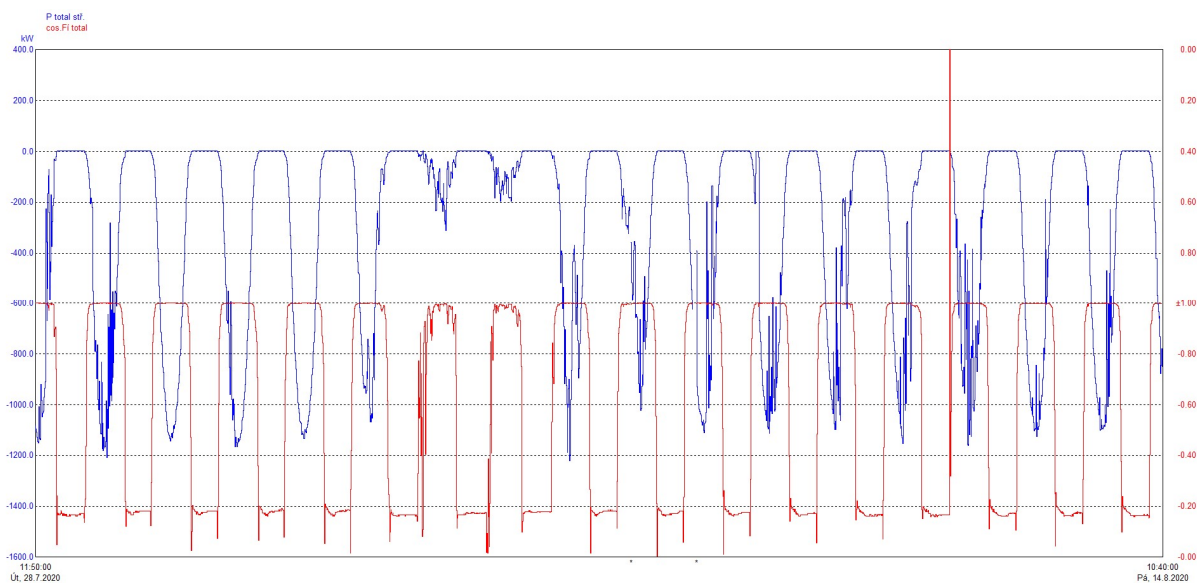
FVE Chrudichromy



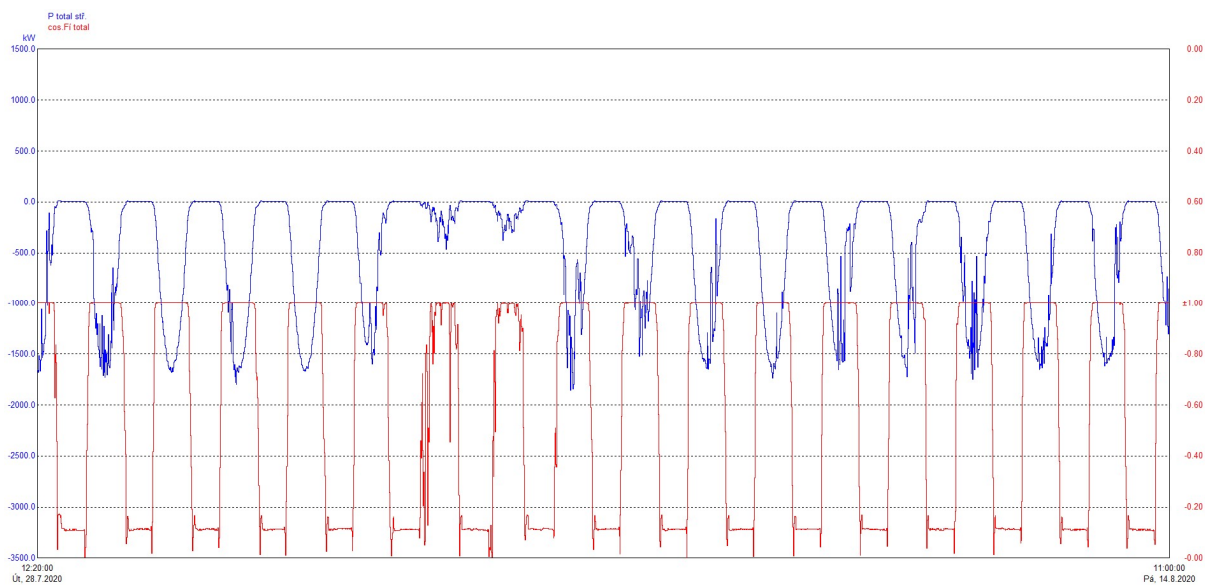
FVE Vísky SRO



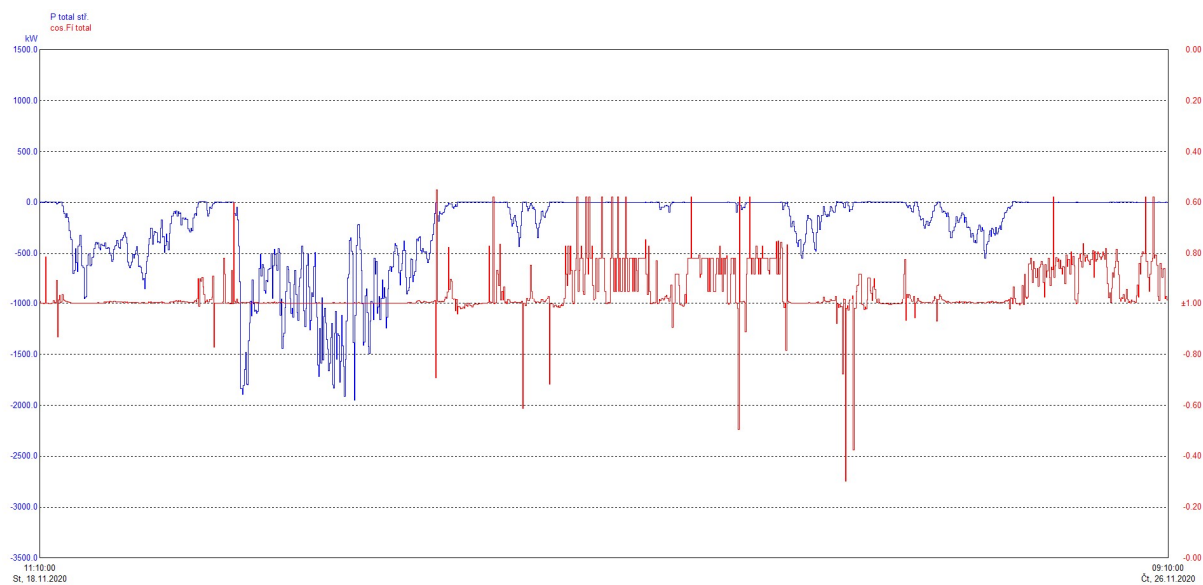
FVE Velké Opatovice



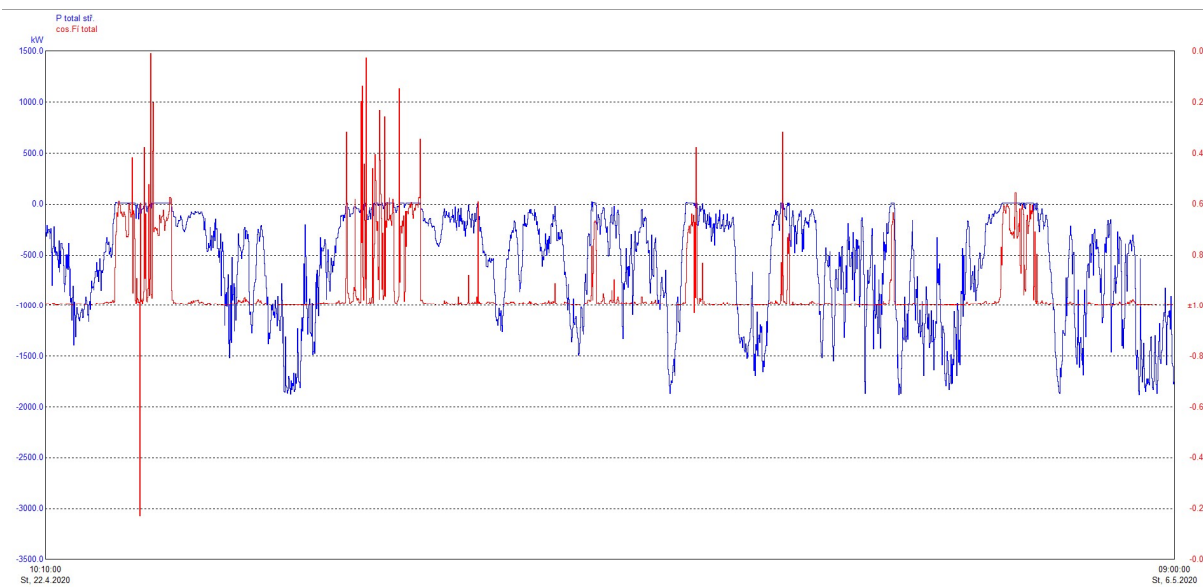
FVE Fini



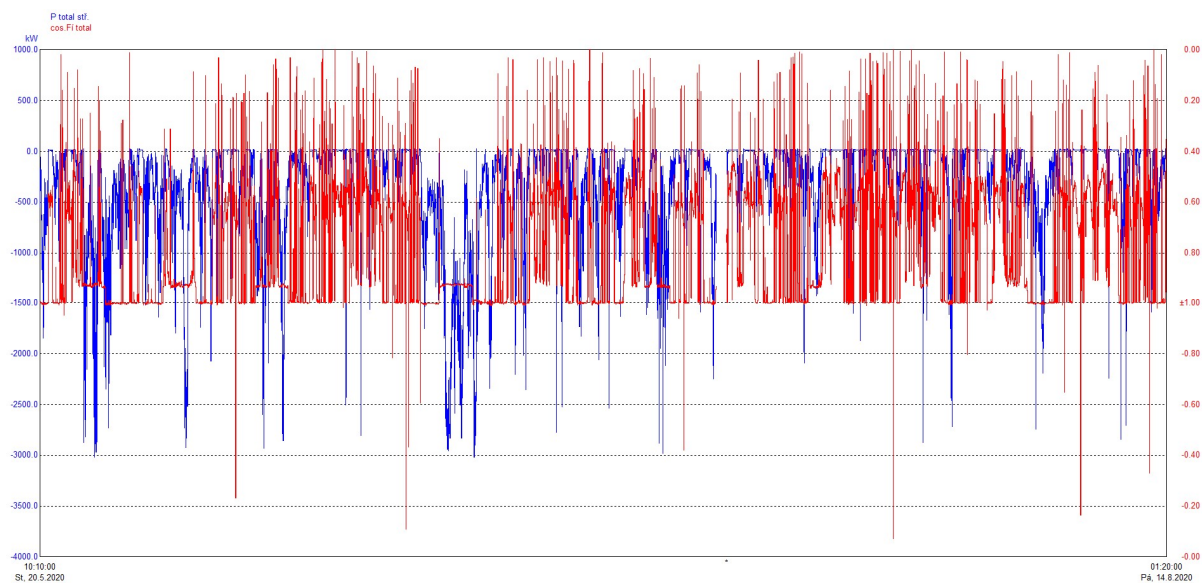
VTE Bantice



VTE Drahany



VTE Věžnice



BPS Rostěnice

