

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Zapojení farmy větrné elektrárny do distribuční sítě

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr HRDINA**
Osobní číslo: **E13B0027P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Zapojení farmy větrné elektrárny do distribuční sítě**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

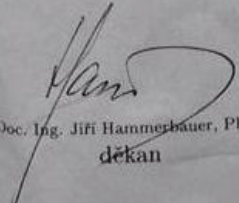
1. Popište charakteristické rysy větrné elektrárny.
2. Vysvětlete princip regulace napětí a jalového výkonu v distribuční síti.
3. Popište, jak je možné využít větrnou elektrárnu pro regulaci U a Q.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. Literatura uváděná k předmětům EE1, EE2, přednášky k uvedeným předmětům.
2. Dle pokynů, které udá sám vedoucí nebo konzultant.

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. Jiřina Mertlová, CSc.
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015
Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá zapojením větrné elektrárny do distribuční soustavy a využití jalového výkonu dodaného z těchto větrných elektráren k regulaci napětí v pilotních uzlech tak, aby hodnota napětí byla držena v tolerančním pásmu. V úvodní části jsou uvedené parametry, které ovlivňují výkon větrné elektrárny, následně jsou popsány způsoby řízení činného a jalového výkonu. Ve třetí kapitole je vysvětlená fyzikální vazba mezi napětím a jalovým výkonem a také je popsán systém ASRU. Ve čtvrté kapitole je provedena analýza regulace napětí v pilotním uzlu při provozu farmy větrné elektrárny a její vliv na elektrizační soustavu.

Klíčová slova

System ASRU, podmínky připojení větrné elektrárny, fyzikální vazba mezi napětím a jalovým výkonem, regulace, jalový výkon, regulační rezerva, stabilizace napětí

Abstract

The topic of this final thesis is the integration of a wind power plant into distribution grid and how to use reactive power generated from these wind power plants to regulate the voltage in pilot nodes to keep the voltage value within tolerance band. In the introductory part there are presented parameters, which can affect the output of a wind power plant, followed with the description of managing active and reactive power. In Chapter 3 there is explained the physical bond between voltage and reactive power and system ASRU. The fourth chapter contains the analysis of regulation of voltage in pilot node during operation of wind power plant farm and its affect on power grid.

Key words

System ASRU, wind power plant connection conditions, physical link between voltage and reactive power, regulation, reactive power, regulation reserve, voltage stabilization

Prohlášení

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

.....
podpis

V Plzni dne 31.5.2016

Petr Hrdina

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Jiřině Mertlové, CSc. a Ing. Richardovi Habrychovi, Ph.D. za jejich odborné rady a především za čas, který mi věnovali v průběhu zpracování bakalářské práce.

Obsah

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1. PARAMETRY VTE, ŘÍZENÍ ČINNÉHO A JALOVÉHO VÝKONU	11
1.1 VELIKOST VÝKONU VTE V ZÁVISLOSTI NA PARAMETRECH.....	11
1.2 REGULACE ČINNÉHO A JALOVÉHO VÝKONU.....	14
1.2.1 Řízení činného výkonu VTE	15
1.2.2 Typy řízení činného výkonu VTE	17
1.2.3 Řízení jalového výkonu VTE	18
1.2.4 Strategie řízení jalového výkonu v soustavě	21
2. PŘIPOJOVACÍ PODMÍNKY	22
2.1 ZVÝŠENÍ NAPĚTÍ.....	22
2.2 ZMĚNY NAPĚTÍ PŘI SPÍNÁNÍ	25
2.3 PŘIPOJOVACÍ PODMÍNKY SYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ	27
2.4 PŘIPOJOVACÍ PODMÍNKY ASYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ	27
2.6 OBNOVITELNÉ ZDROJE A JEJICH VÝJIMKY	27
3. REGULACE NAPĚTÍ V PILOTNÍCH UZLECH SOUSTAVY	28
3.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP ŘÍZENÍ NAPĚTÍ A JALOVÉHO VÝKONU	28
3.2 AUTOMATICKÁ SEKUNDÁRNÍ REGULACE NAPĚTÍ (ASRU).....	30
3.2.1 Fyzikální princip automatické sekundární regulace napětí.....	31
3.2.2 Charakteristika pilotních uzlů	31
3.2.3 Zadaná hodnota napětí.....	32
3.2.4 Regulovaná hodnota napětí.....	33
3.2.5 Anomální provozní stav ASRU	33
3.2.6 Přínos ASRU.....	34
3.3 ZAJIŠTĚNÍ JALOVÉHO VÝKONU SYNCHRONNÍMI GENERÁTORY	35
4. POPIS PRACOVNÍHO STAVU FARMY VTE SE SYSTÉMEM ASRU.....	39
4.1 BEZPROBLÉMOVÁ REGULACE NAPĚTÍ FARMY VTE, PŘIPOJENÉ DO ROZVODNY 110 kV	39
4.2 NEUREGULOVÁNÍ NAPĚTÍ V PILOTNÍM UZLU VLIVEM FARMY VTE PŘIPOJENÉ K ROZVODNĚ	41
ZÁVĚR.....	44
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	45

Seznam symbolů a zkratk

a_{ij}	.....	součinitel senzitivity
ASRU	.....	automatická sekundární regulace napětí
C_p	.....	účinnost stroje [%]
DS	.....	distribuční soustava
d	.....	poruchová veličina
e	.....	regulační odchylka
ES	.....	elektrizační soustava
ENTSO-E	.....	Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny
F	.....	Frekvence [Hz]
HDO	.....	hromadné dálkové ovládání
m	.....	hmotnost
n_n	.....	nízké napětí
P	.....	činný výkon [W]
PS	.....	Přenosová soustava
P_v	.....	potencionální výkon větru
Q	.....	jalový výkon [VAr]
R	.....	regulátor
S	.....	plocha rotoru [m^2]
U	.....	napětí [V]
u	.....	akční veličina
U_i	.....	napětí v uzlu
v_n	.....	vysoké napětí
v	.....	rychlost proudění vzduchu [$m \cdot s^{-1}$]
VTE	.....	větrná elektrárna
w	.....	žádaná veličina
y	.....	regulovaná veličina
ΔQ_j	.....	potřebná změna dodávky jalového výkonu v pilotním uzlu j
ΔU_i	.....	potřebná změna napětí v pilotním uzlu i
ρ	.....	hustota vzduchu [$kg \cdot m^{-3}$]

Úvod

V této práci bude vysvětleno možné využití jalového výkonu větrných elektráren ke stabilizaci napětí v pilotních uzlech soustavy. V elektrizační soustavě je napětí lokální parametr, který lze měnit změnou jalového výkonu v regulovaném uzlu. Závislost mezi napětím a jalovým výkonem využívá systém automatické sekundární regulace napětí (systém ASRU), který vyhodnocuje a provádí potřebnou změnu dodávky jalového výkonu tak, aby byla hodnota napětí v pilotním uzlu udržována v tolerančních mezích. Potřebný jalový výkon je čerpán z regulační rezervy jalového výkonu poskytnuté z energetických výroben. Věrné elektrárny tak lze využít pro zajištění dostatečného množství regulační rezervy.

V první kapitole budou popsány parametry, které ovlivňují velikost vyráběného výkonu, jakým způsobem lze řídit činný a jalový výkon a při jakých provozních stavech sítě k dané regulaci dochází.

Druhá kapitola bude zaměřena na připojovací podmínky, které musí být výrobní schopná zajistit pro minimalizování zpětných vlivů na síť.

Ve třetí kapitole bude vysvětlen princip řízení napětí jalovým výkonem a podrobněji popsán systém ASRU, a také to, jakým způsobem se zajišťuje regulační rezerva vyráběná synchronními generátory.

Ve čtvrté kapitole dojde k analýze dat získaných z farmy VTE, podle kterých lze určit, v jakém stavu se větrná elektrárna právě nachází. Bude zde zobrazena závislost regulace napětí na regulační rezervě jalového výkonu a to, jaký má vliv na regulované napětí v pilotním uzlu při jejím nedostatku.

1. Parametry VTE, řízení činného a jalového výkonu

1.1 Velikost výkonu VTE v závislosti na parametrech

Rychlost větru je hlavním parametrem, který ovlivňuje výkon VTE a zvětšuje se s rostoucí výškou od povrchu. Rychlost proudění vzduchu se vlivem tření o zemský povrch snižuje. Z tohoto důvodu se větrné elektrárny umisťují v kopcích nebo v méně členitém terénu. Vítr vznikne při vyrovnávání tlakových rozdílů vzduchu na různých místech v atmosféře. Vzduch proudí z místa s vyšším tlakem do místa s nižším tlakem a síla větru je závislá na velikosti tlakového rozdílu, tedy s rostoucím tlakovým rozdílem roste i síla větru [1].

Zjednodušený vztah pro výpočet výkonu větru

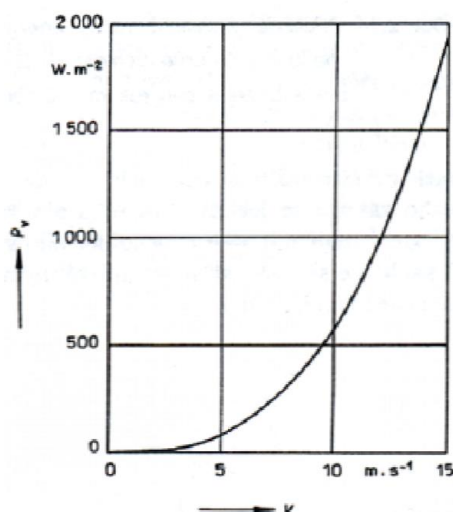
$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 ,$$

P_v - potenciační výkon větru

ρ - hustota vzduchu

v - rychlost proudění vzduchu

Závislost výkonu větru na jeho rychlosti proudění je znázorněná v grafu č. 1.



Graf č. 1 Závislost P_v na rychlosti větru plochou 1m² [1]

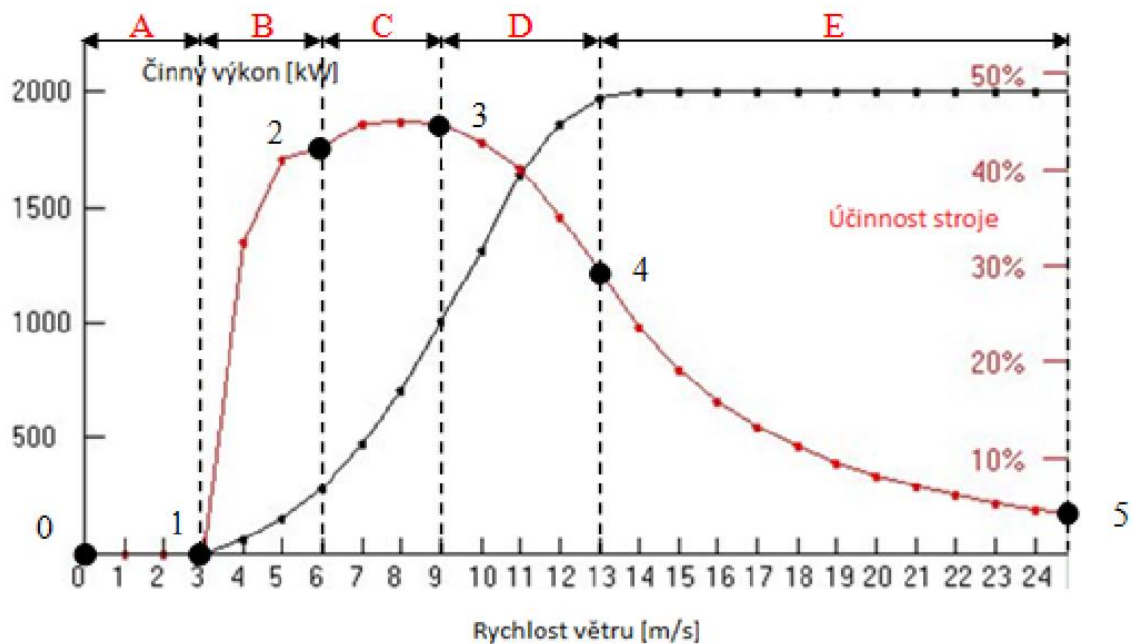
Větrná elektrárna je zařízení převádějící kinetickou energii větru na energii elektrickou. Pro určení velikosti instalovaného výkonu je potřeba vztah pro výpočet výkonu větru doplnit o plochu rotoru a účinnost stroje. [2]

Vztah velikosti instalovaného výkonu VTE:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot C_p \cdot S$$

P - výkon VTE	[W]
ρ - hustota vzduchu	[$kg \cdot m^{-3}$]
v - rychlost proudění vzduchu	[$m \cdot s^{-1}$]
C_p - účinnost stroje	[%]
S - plocha rotoru	[m^2]

Parametr rychlosti proudění vzduchu, který je umocněn na třetí, má největší vliv na okamžitou výrobu a účinnost VTE. Závislost výroby energie na rychlosti vzduchu a účinnosti stroje zobrazuje graf č. 2.

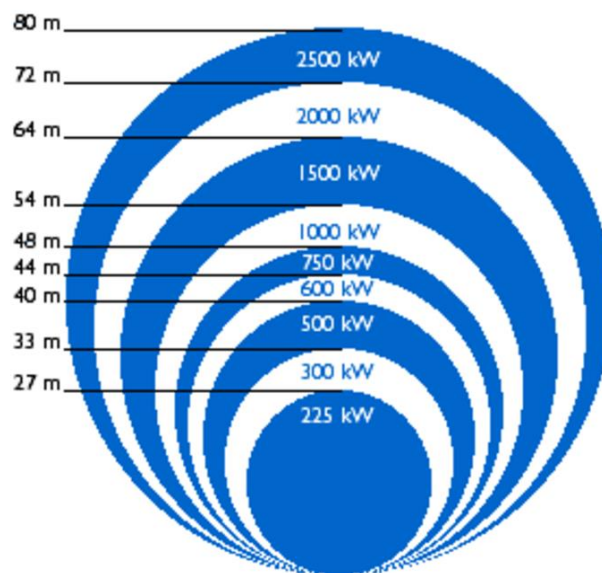


Graf č. 2 Křivky výkonu a účinnosti VTE [4]

V grafu č. 2 je vidět, jak se zvyšuje činný výkon podle rychlosti větru. Při rychlosti od 3 m/s do 6 m/s výkon naroste z hodnoty 0 kW na hodnotu 250 kW. Zvýší-li se rychlost větru z 6 m/s na 9 m/s, nárůst výkonu bude z 250 kW na 1000 kW a účinnost se pohybuje v rozmezí 45–48 %. Při dalším nárůstu rychlosti větru z 9 m/s na 13 m/s se začne účinnost snižovat ze 48 % na 30 %, ale výkon naroste z 1000 kW na jmenovitý výkon 2000 kW. Ideální rychlost větru pro provoz VTE se pohybuje v rozsahu od 9 m/s do 13 m/s.

Větrná elektrárna je schopna vyrábět elektrickou energii v rozsahu rychlosti větru od 3 m/s do 25 m/s. Při překročení maximální rychlosti VTE skokově přestává dodávat do soustavy elektrickou energii, protože musí být kvůli vlastní bezpečnosti zastavena. Po zastavení VTE přichází soustava o celý její výkon, a to v rozsáhlých větrných parcích může být ztráta několik megawatt výkonu.

Vývoj směřuje k vyšším stožárům a větším průměrům rotorů VTE. Vyšší stožáry vynesou rotor do efektivnější oblasti proudění vzduchu. Z velké části je výkon VTE ovlivněn plochou rotoru, při zvětšení plochy rotoru stoupne výkon VTE. Zvýšením průměru rotoru o několik metrů naroste výsledná plocha o několik desítek až stovky metrů čtverečních, na obr. 1 je zobrazena průměrná velikost rotoru ke jmenovitému výkonu VTE. [2]



Obr. č. 1 Závislost průměru rotoru na výkonu VTE [2]

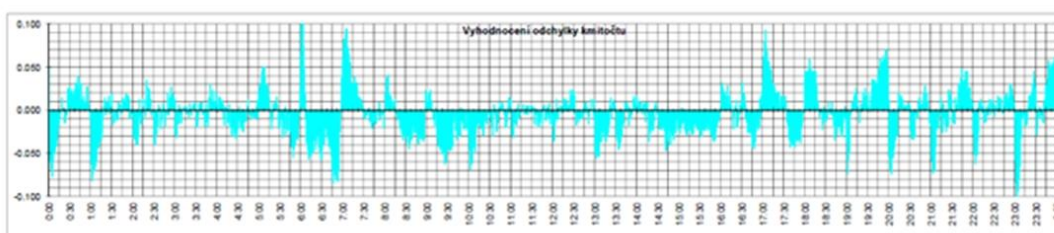
Parametr rychlosti proudění vzduchu je neovlivnitelný a v čase se mění, proto výroba činného výkonu VTE je nestálá v závislosti na rychlosti větru. Regulace činného výkonu je problematická, proto jsou větrné elektrárny náročnější na připojení do přenosové nebo distribuční sítě než klasické elektrárny. [3]

1.2 Regulace činného a jalového výkonu

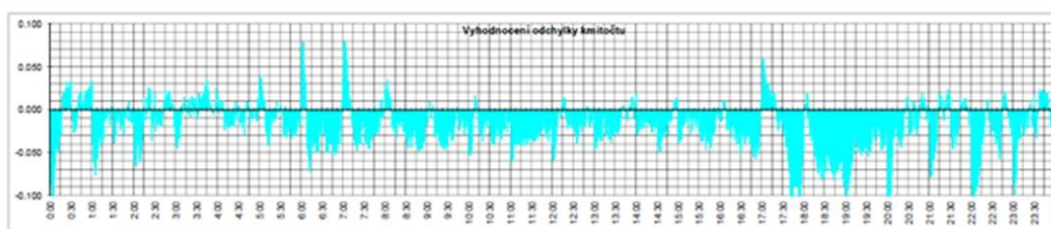
Frekvence a napětí jsou dva hlavní parametry poukazující na kvalitu dodávané elektrické energie. V každém uzlu soustavy je jiná hodnota napětí, která závisí na vyrovnaní bilance jalového výkonu ve sledovaném uzlu soustavy. Aktuální hodnota frekvence závisí na vyrovnaní bilance činného výkonu v celé propojené soustavě ENTSO-E (*European Network of Transmission System Operators for Electricity*). [4]

Vyrovnaní bilance činných výkonů je nejproblematictější v provozování propojené soustavy ENTSO-E. Obrázek č. 2 ukazuje frekvenční odchylky od požadované hodnoty, které se mění v čase. [10]

Průběh frekvence v soustavě Entso-e



Časový průběh odchylky frekvence 7.2.2012 –maximum **50.136 Hz** v 6:00



Časový průběh odchylky frekvence 10.2.2012 –minimum **49.872 Hz** v 19:01

Obr. č. 2 Časový průběh odchylky frekvence [10]

Při zhoršeném průběhu frekvence hrozí nebezpečí odpojení výroby elektrické energie frekvenčními ochranami ze soustavy a zvýšení nákladu do podpůrných systémů. [6]

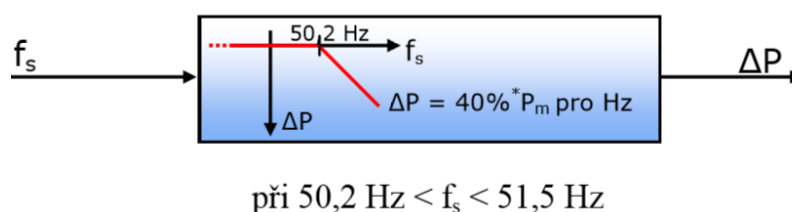
Na snížení nebo zvýšení hodnoty frekvence má vliv poruchový výpadek velkých bloků, náhodná fluktuace zatížení, připojení zemí se špatným dispečerským řízením nebo s vyšším výskytem poruch v soustavě, a dále výroby se špatnou možností vlastního řízení.

1.2.1 Řízení činného výkonu VTE

Podle vztahu pro výpočet instalovaného výkonu VTE je zřejmé, že v provozu se činný výkon dá reálně regulovat plochou rotoru. Regulaci zajišťuje prvek Pitch Controller, jenž zajišťuje natáčení listů rotoru. Veškeré elektrárny připojené do DS musí automaticky snížit činný výkon v závislosti na frekvenci v síti, nebo se samočinně odpojit z DS. [10]

Snížení činného výkonu při nadfrekvenci

Větrné elektrárny připojené do distribuční soustavy musí být schopny snižovat okamžitě činný výkon gradientem 40 % na Hz, při překročení frekvence nad 50,2 Hz. VTE se automaticky odpojí od sítě, pokud frekvence přesáhne 51,5 Hz a více – viz obr. 3. V rozsahu od 47,5 Hz do 50,2 Hz je frekvence v provozní toleranci [6].



Obr. č. 3 Princip snížení činného výkonu [6]

$$\Delta P = 20 \cdot P_m \cdot \frac{50,2\text{Hz} - f_s}{50\text{Hz}}$$

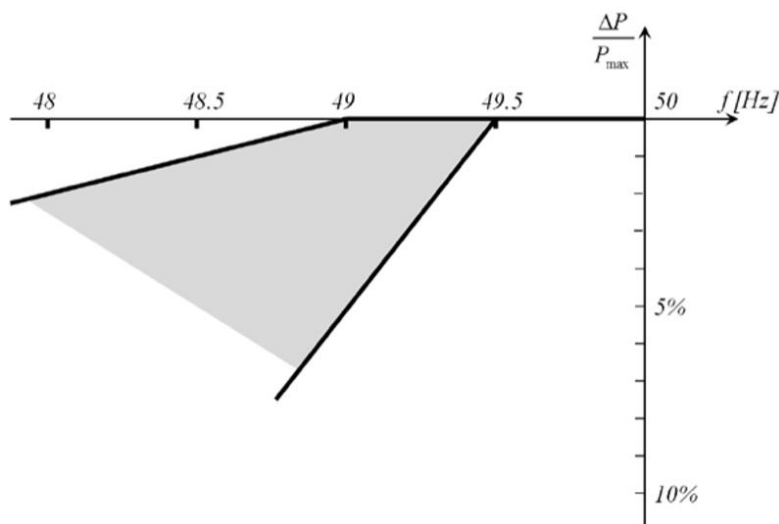
ΔP snížení výkonu

P_m okamžitý dostupný výkon

f_s frekvence sítě

Snížení činného výkonu při podfrekvenci

Při snižující se frekvenci v síti určí provozovatel přenosové soustavy, o kolik se sníží činný výkon z maximální hodnoty činného výkonu. Snížení činného výkonu je definováno z rozsahu, který je vidět na obrázku č. 4 [6].



Obr. č. 4 Meze maximálního snížení činného výkonu v závislosti na kmitočtu [6]

Ke zvýšení činného výkonu dojde, jakmile je frekvence v provozní toleranci, a to od 47,5 Hz do 50,2 Hz [6].

Výrobní elektrické energie musí být schopna pracovat se sníženým činným výkonem. Provozovatel distribuční soustavy mění hodnotu činného výkonu podle různých stavů sítě. Důvod k regulaci je zvýšení frekvence, provádění údržby, přetížení v síti nebo ohrožení bezpečného provozu. Tyto provozní podmínky ovlivňují regulaci činného výkonu. [10]

Při řízení činného výkonu větrných elektráren nezáleží pouze na technické vyspělosti VTE, ale i na provozovateli soustavy, na tom, jak je schopný nejefektivněji pracovat s dodávaným výkonem. Větrná elektrárna dodává výkon, který je neustále proměnlivý. Z tohoto důvodu bylo vyvinuto několik strategií řízení. Možné řízení je stupňovité, přímé, nepřímé a virtuální. [10]

1.2.2 Typy řízení činného výkonu VTE

- a) Stupňovité řízení: Tento způsob řízení činného výkonu využívá přijímač HDO (tj. hromadné dálkové ovládání). Provozovatel soustavy posílá řídicí impuls do přijímače, kterým jsou ovládány spínací prvky umístěné mezi VTE a distribuční sítí. Spínací prvky zajistí podle požadavku buď odpojení výrobní od sítě, nebo její připojení. Takto jsou řízeny v České Republice výrobní s výkonem od 30 kW do 100 kW. Výrobní s výkonem nad 100 kW mají přijímač HDO s třemi přepínacími relé, které podle povelu omezí výrobu činného výkonu o 40, 70 nebo 100 % jmenovitého výkonu. Nebude-li sepnuté žádné relé, nedojde k výkonnému omezení výrobní. [10]
- b) Přímé řízení – popsáno na modelu Španělska: Dispečink pro obnovitelné zdroje obstarává řízení výroby větrných parků podle povelu od nadřazeného dispečinku (tj. státní dispečink). [10]
- c) Nepřímé řízení: Podle předpokládané rychlosti větru se nastaví možná úroveň výroby větrné elektrárny. V řídicím systému jsou nastaveny časové intervaly, každý interval má definovanou velikost činného výkonu. Velikostí časového intervalu se určí jemnost regulace výroby. [10]
- d) Virtuální elektrárna: Jedná se o propojení více elektráren společným řídicím systémem. Skupina zdrojů propojená tímto způsobem se vůči elektrizační soustavě chová jako jeden celek. Připojením větrné elektrárny do tohoto celku se zmírní nežádoucí účinky způsobené nestálou výrobou elektrické energie. Používané systémy v ČR jsou Smart Grids a Amper Market. Prvně zmíněný systém může pracovat v ostrovním režimu. Jestliže bude systém odpojen od elektrizační soustavy, je virtuální elektrárna sama schopná systém Smart Grids napájet. Připojení větrných elektráren do této strategie řízení je dobrý způsob, jak zvýšit efektivitu obchodování s takto vyrobenou energií. Tímto způsobem můžou vstoupit do obchodování i větrné elektrárny s menšími výkony, které by na trh s regulační energií nebyly vůbec zapojeny [8] [10].

1.2.3 Řízení jalového výkonu VTE

Větrné elektrárny je možné integrovat do elektrizační soustavy pro řízení napětí a jalového výkonu. V oblasti řízení mají význam hlavně velké parky větrných elektráren, které dodávají výkon do elektrizační soustavy o vyšších napěťových hladinách, a to například 110 kV, 220 kV, 400 kV. VTE začínají vytlačovat z této oblasti řízení stávající elektrárny, které efektivně regulovaly jalový výkon v síti [11] [12].

Je-li provozovatel schopen efektivně řídit jalový výkon, sníží tím možné riziko vzniku problémů při provozu dané soustavy a zajistí tím větší bezpečnost nepřerušované dodávky elektrické energie ke spotřebiteli. Zamezí se tak fluktuaci a množství skokových změn napětí v uzlu soustavy. Dále se také omezí ztráty vzniklé na vedení a transformátoru a zmenší se nebezpečí napěťového výpadku. Provozovatel soustavy vypočítává množství jalového výkonu, které je potřeba v určitém místě a čase dodat nebo odebrat ze soustavy [12].

Bez ohledu na to jestli jsou povětrnostní podmínky příznivé, výrobci poskytují GE – systém Wind free, který umožňuje omezenou dodávku jalového výkonu i při stojící VTE [12].

Provozovatel potřebuje ve své soustavě mít dostatek regulační rezervy jalového výkonu, kterou může kdykoliv využít k regulaci. VTE má velkou regulační rezervu jalového výkonu a s rychlým vývojem se tato rezerva neustále rozšiřuje. Pro každý typ VTE zobrazuje regulační rezervu její provozní diagram, ve kterém se jalový výkon mění v závislosti na činném výkonu [12].

Je-li prováděna regulace jalového výkonu v dané soustavě, je možné použít jednu z těchto úrovní:

- a) Na úrovni samotné VTE: Z technického hlediska jsou možnosti řízení na této úrovni buď pevným účínkem, nastavitelným účínkem, nebo povelováním jalového výkonu. V první variantě je účínek pevně nastavitelný od výrobce a nelze ho při provozování měnit. U nastavitelného účínku lze tento účínek měnit v daném rozsahu, a to na místě nebo dálkově. Povelování jalového výkonu má smysl pouze u jedné připojené VTE přímo do soustavy. Zde se provádí změna dodávaného jalového výkonu podle potřeby, ovládaní je opět možné místně nebo dálkově [12].

- b) Na úrovni větrného parku: Řízení jalového výkonu je provedeno třemi možnostmi. První možnost je pevně daný nebo nastavitelný účinník celého větrného parku. Druhou možností je pevná nebo měnitelná hodnota jalového výkonu větrného parku. Posledním řešením je udržování nastavené hodnoty napětí v rozvodně větrného parku [12].
- c) Na úrovni pilotního uzlu je řízení možné u rozvodny se schopností změny dodávaného jalového výkonu. V pilotním uzlu je provedena regulace na konstantní nebo proměnou hodnotu napětí, tím že se změní dodávka jalového výkonu přivedeného z větrných parků. Hodnota jalového výkonu je v pilotním uzlu konstantní a od této hodnoty je realizováno snížení nebo zvýšení dodávaného jalového výkonu. Jde o automatickou sekundární regulaci napětí [12].

Podle výkonů větrných parků určí provozovatel soustavy, do jaké napěťové hladiny se připojí. Malé výkony okolo 12 MW se připojují do soustavy o napěťové hladině VN. VTE o výkonu do 80 MW lze vyvést do soustavy 110 kV, větší výkony jen do přenosové soustavy. Hodnota napěťové hladiny, do které je VTE připojena, ovlivní také zvolenou strategii pro řízení jalového výkonu. Do všech napěťových úrovní lze realizovat automatickou sekundární regulaci napětí [12].

Provozovatel soustavy při dodávce činného výkonu určí neměnnou hodnotu jalového výkonu nebo dálkově nastavitelnou žádanou hodnotu [6].

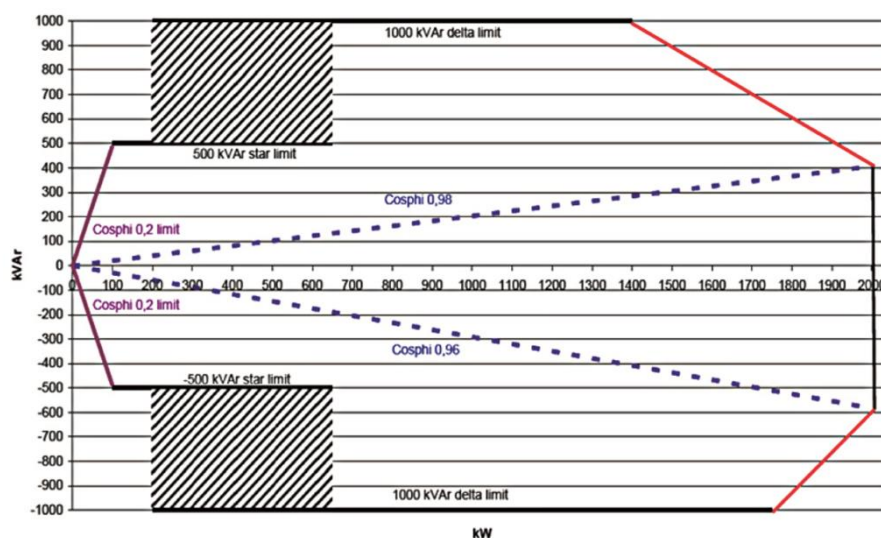
Žádané hodnoty:

- | | |
|---|-------------------|
| - Stálá hodnota jalového výkonu | Q fix |
| - Jalový výkon závislý na napětí | Q (U) |
| - Jalový výkon závislý na činném výkonu | Q (P) |
| - Stálá hodnota účinníku | Cos φ fix |
| - Účinník závislý na napětí | Cos φ (U) |
| - Účinník závislý na činném výkonu | Cos φ (P) |

U větrných elektráren dochází k silnému kolísání výkonu, které je způsobeno časově proměnlivou silou větru. Z toho to důvodu větrná elektrárna musí být schopná velmi rychle automatické regulace jalového výkonu [11].

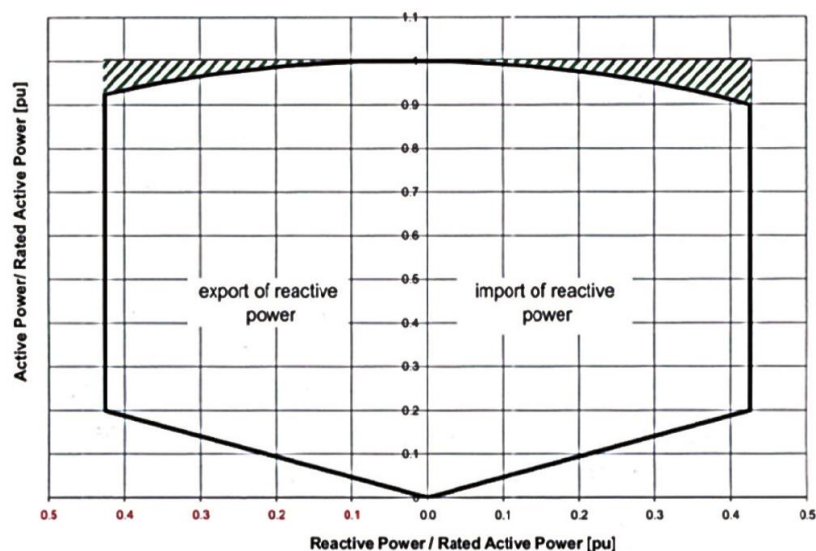
Provozní diagram VTE

Provozní diagram VTE je dán konstrukcí stroje a připojením generátoru k síti. Generátor ve VTE typu Vestas 2 MW je rovnou připojen do elektrizační soustavy přes přepínač hvězda – trojúhelník. V provozním diagramu (obrázek č. 6) Vestas 2 MW je vidět omezení jalového výkonu při rozběhu, kdy je generátor zapojen do hvězdy a po přepojení do trojúhelníka naroste množství jalového výkonu. Provozní diagram VTE také ukazuje využitelné pásmo jalového výkonu pro regulaci [12].



Obr. č. 6 Provozní diagram VTE Vestas 2 MW [12]

Provozní diagram stroje Enercon bez rozběhového omezení jalového výkonu na rozdíl od Vestas 2 MW lze vidět na obr. č. 7. V tomto případě je VTE připojena do elektrizační soustavy přes řízený střídač. Je-li generátor připojen do tvrdé sítě, při patrném zvýšení amplitudy napětí dojde ke zvýšení dodávky jalového výkonu do sítě. Výsledná amplituda napětí ve střídači je dána z PWM modulace, která je řízena referenčním napětím. Regulací amplitudy napětí lze tedy řídit dodávaný jalový výkon [12].



Obr. č. 7 Provozní diagram VTE Enercon [12]

1.2.4 Strategie řízení jalového výkonu v soustavě

Je nutné, aby si provozovatel soustavy, a to jak přenosové, tak i distribuční, zvolil určitou strategii řízení jalového výkonu. Strategie řízení jsou popsány v podmínkách provozování dané soustavy [12]. Nejčastější druhy řízení jsou:

- a) Neřízení – dispečink soustavy neovládá výrobu jalového výkonu od dodávaného zdroje[12].
- b) Udržování nastaveného účinníku výroby – při použití této strategie je dodávaný jalový výkon přímo závislý na výrobě činného výkonu. Tento způsob řízení je pro VTE nejméně vhodný, protože výroba činného výkonu je nestálá a jalový výkon je dán nastaveným účinníkem. Takto řízený jalový výkon zhoršuje napěťové poměry v dané soustavě[12].
- c) Dopředné ovládaní – dispečer rozhodne podle výpočtu o jednorázové změně dodávaného množství jalového výkonu. Jednorázová změna má pro dynamickou soustavu jen krátkodobý přínos[12].

- d) Zpětnovazební řízení (regulace se zápornou zpětnou vazbou) – tento způsob řízení je pro dynamickou proměnnou soustavu nejvýhodnější. Změnou dodávaného jalového výkonu se udržuje nastavené napětí v pilotních uzlech soustavy [12].

Volba strategie pro řízení jalového výkonu větrné elektrárny závisí na konkrétní soustavě, na její technické vyspělosti týkající se komunikačního, řídicího a měřicího systému, který se v dané soustavě nachází. Dále záleží na provozovateli soustavy, jak je schopen se dané problematice věnovat, a na odbornosti pracovníků zabývajících se touto oblastí. Velmi častá bývá kombinace těchto řídicích strategií v jedné soustavě. Rozdílné požadavky od provozovatele soustavy na řízení jalového výkonu v soustavách činí problém jak velkým investorům, tak i výrobcům větrných elektráren. Provozovatel může požadavky na řízení jalového výkonu pozměnit a strategie řízení se tomu musí přizpůsobit [12].

2. Připojovací podmínky

Technickými zařízeními je potřeba zajistit, aby nedošlo k zavlečení zpětného napětí do přenosové a distribuční soustavy. Zařízení tedy zajišťují, že připojení vlastní výroby do přenosové nebo distribuční soustavy nesmí být provedeno do té doby, kdy jsou všechny fáze pod daným napětím. Pro připojení je využit nejen spínač spojující celé zařízení odběratele se sítí, ale i spínač spojující jeden generátor či více paralelně připojených generátorů k zařízení odběratele. Zapnutí spínače je blokováno až do momentu, ve kterém má každá fáze nad minimální hodnotu napětí podpěťové ochrany. Z důvodu bezpečnosti vlastní výroby je doporučeno časové zpoždění připojení výroby v řádu minut, než je obnoveno napětí v soustavě [6].

2.1 Zvýšení napětí

V kterémkoliv bodu soustavy nesmí dojít vlivem provozu připojené výroby k navýšení napětí natolik, že by překročilo maximální přípustnou hranici danou pro konkrétní napěťovou hladinu oproti hodnotě napětí bez připojení této výroby k síti. Zároveň v předávacím místě zdroje nesmí dojít k překročení stanoveného limitu napětí určeného ze vztahu (3) [6].

Připojená výrobná do místa v síti VN a 110 kV nesmí překročit navýšení napětí o 2 %, tedy

$$\Delta U_{vn110} \leq 2 \%, \quad (1)$$

Připojená výrobná do místa v síti NN nesmí překročit navýšení napětí o 2 %, tedy

$$\Delta U_{nn} \leq 3 \%, \quad (2)$$

Zkratovým poměrem výkonů (3) je možné snadno zhodnotit podmínku (2), jestliže je jen jedno přípojné místo v síti NN a VN [6].

$$K_{k1} = \frac{S_{kv}}{\sum S_{amax}}, \quad (3)$$

Ve vztahu (3) je $\sum S_{amax}$ součet maximálních zdánlivých výkonů všech plánovaných nebo připojených výroben a S_{kv} je hodnota zkratového výkonu v připojovacím místě. Pro větrné elektrárny hodnota S_{amax} vychází z řešení maximálních zdánlivých výkonů určitého zařízení S_{amax} [6].

$$S_{EMAX} = S_{EMAX10min} = S_{nG} \cdot P_{10min} = \frac{P_{nG}}{\lambda} \cdot P_{10min}, \quad (4)$$

kde P_{10min} je maximální střední výkon v časovém intervalu 10 min, tato hodnota se určí podle zkušebního protokolu. Zařízení může být s omezeným výkonem, pak se dosazuje tato omezující hodnota [6].

Jestliže je v soustavě jediné předávací místo, podmínka pro zvýšení napětí bude splněna, pokud zkratový poměr výkonu je

pro výrobný připojené do sítě VN

$$K_{k1VN} \geq 55, \quad (5)$$

pro výrobný připojené do sítě NN

$$K_{k1nn} \geq 33, \quad (6)$$

Použití činitele K_{k1} pro zhodnocení ve výrazně induktivní síti NN nebo VN není vhodné. Dodávaný výkon by se tak velmi omezil, aby byla splněna podmínka pro zvýšení napětí. Velmi přesný výsledek přináší výpočet s komplexní hodnotou impedance sítě s fázovým úhlem Ψ_{kv} [6].

Výrobní v síti VN musí splňovat podmínku pro maximální výkon:

$$S_{AMAX} \leq \frac{2\% \cdot S_{kv}}{|\cos(\Psi_{kv} - \varphi)|} = \frac{S_{kv}}{50 \cdot |\cos(\Psi_{kv} - \varphi)|}, \quad (7)$$

Výrobní připojené v síti NN:

$$S_{AMAXNN} \leq \frac{3\% \cdot S_{kv}}{|\cos(\Psi_{kv} - \varphi)|} = \frac{S_{kv}}{33 \cdot |\cos(\Psi_{kv} - \varphi)|}, \quad (8)$$

Při maximální hodnotě zdánlivého výkonu S_{AMAX} výrobní φ udává fázový posuv proudu od napětí. Pokud výrobní jsou dodávající jalový výkon do sítě, platí:

$$P > 0 \text{ a } Q > 0 \\ 0^\circ \leq \varphi_E \leq 90^\circ.$$

U výroben odebírající jalový výkon ze sítě platí:

$$P > 0 \text{ a } Q < 0 \\ 270^\circ \leq \varphi_E \leq 360^\circ \text{ } (-90^\circ \leq \varphi_E \leq 0^\circ).$$

Následující vztah udává hodnotu zvýšení napětí z maximálního připojitelného zdánlivého výkonu S_{AMAX}

$$\Delta U_{AV} = \frac{S_{AMAX} \cdot \cos(\Psi_{kv} - \varphi)}{S_{kv}} \quad (9)$$

Připojitelnost výrobní se posuzuje z neutrálního účinku v připojeném místě do distribuční soustavy. Provozovatel distribuční soustavy však může stanovit jinak z důvodu napětí v síti nebo bilance jalového výkonu, pak jsou vypočítávané bilanční ztráty v síti bez zapojené výrobní a při jejím provozu [6].

2.2 Změny napětí při spínání

Při připojování nebo odpojování generátory a zařízení vyvolávají změny napětí ve společné napájecí části. Tyto změny napětí nezpůsobují nežádoucí zpětné vlivy, jestliže výrobní připojené v síti NN nepřekročí 3 %

$$\Delta U_{\max NN} \leq 3\% \quad (10)$$

a výrobní připojené v síti VN nepřekročí 2 %

$$\Delta U_{\max VN} \leq 2 \quad (11)$$

Uvedené vztahy (10), (11) jsou platné, není-li spínání v síti opakovanější než jednou za 90 sekund. Provozovatel distribuční soustavy může povolit větší změny napětí v případě nevelké frekvence spínání v síti. V místě připojeného zdroje nesmí být překročen limit napětí $\pm 10\% U_n$ v případě, jsou-li zároveň spínané zdroje v soustavě NN a VN [6].

VTE připojená v soustavě o napěťové hladině 110 kV má restrikcii změny napětí způsobené spínáním:

a) Standardní provoz:

- Spínaná jedna výrobní jednotka, a to například jeden generátor větrné turbíny.

$$\Delta U_{\max} \leq 0,5\% \quad (12)$$

- Spínané celé zařízení (VTE)

$$\Delta U_{\max} \leq 2\% \quad (13)$$

b) Při poruchovém stavu:

$$\Delta U_{\max} \leq 5\% \quad (14)$$

Změna napětí se dá předpokládat z hodnot jmenovitého zdánlivého výkonu S_{nE} a zkratového výkonu S_{kV} , podle níže uvedeného vztahu (15)

$$\Delta U_{\max} = K_{i\max} \cdot \frac{S_{nE}}{S_{kV}} \quad (15),$$

kde činitel $K_{i_{\max}}$ je největší spínací ráz v závislosti na největší hodnotě proudu při sepnutí I_a a na jmenovitém proudu generátoru či zařízení

$$K_{i_{\max}} = \frac{I_a}{I_{nG}} \quad (16),$$

Činitel největšího spínacího rázu se liší pro různá zařízení a podle jejich použití. Uvedený vztah (16) je výpočet pro činitele spínacího rázu asynchronního generátoru motoricky rozbíhaného ze sítě. Například synchronní generátor s jemnou synchronizací a střídač má činitel $K_{i_{\max}} = 1$, asynchronní generátor připojený synchronními otáčkami má činitel $K_{i_{\max}} = 4$, není-li známá největší hodnota proudu, při spínání je činitel $K_{i_{\max}} = 8$ [6].

U větrných elektráren se počítá se zvláštním činitelem (tj. činitel spínání závislý na síti), kterým se posuzuje spínání VTE a zohledňují velmi krátkodobé přechodové jevy.

Pomocí tohoto činitele je možné spočítat fiktivní náhradní změnu napětí podle vztahu (17):

$$\Delta U_{ers} = K_{i\Psi} \cdot \frac{S_{nE}}{S_{kV}} \quad (17),$$

kde činitel $K_{i\Psi}$ je dán podle funkce úhlu impedance sítě Ψ . Náhradní změna napětí ΔU_{ers} také nesmí překročit restrikcí změny napětí způsobené spínáním uvedené ve vztahu (10) až (14) [6].

V případě zapojení více generátorů v jednom předávacím místě je potřeba zabránit jejich soudobému zapínání z důvodů co největšího snížení zpětného vlivu na soustavu. To lze provést tak, že jednotlivé generátory budou spouštěny po určitém časovém intervalu v závislosti na vzniklých změnách napětí. Délka intervalu se řídí podle velikosti výkonu. Dodává-li generátor maximálně přípustný výkon, bude časový odstup od dalšího sepnutí 90 sekund, při polovině výkonu přípustné hodnoty však postačí odstup 12 sekund [6].

2.3 Připojovací podmínky synchronních generátorů

Je-li připojován synchronní generátor, je zapotřebí zvolit synchronizační zařízení dodržující podmínky pro synchronizaci, které jsou:

- a) Rozdíl napětí nebude větší nebo menší než 10 % jmenovité hodnoty.
- b) Rozdíl frekvence bude maximálně 0,5 Hz
- c) Rozdíl fáze bude maximálně 10°.

2.4 Připojovací podmínky asynchronních generátorů

Asynchronní generátory s možností pracovat v ostrovním režimu se řídí podle stejných podmínek zapnutí jako synchronní generátory. Však asynchronní generátory, které se rozbíhají pomocí pohonu, jsou připojené bez napětí synchronními otáčkami v jejich rozsahu 95–105 % [6].

2.5 Připojovací podmínky střídačů

Střídač splňuje podmínky připojení tehdy, jestliže při spínání je bez napětí jeho střídavá strana. Střídače s možností pracovat v ostrovním režimu a spínané pod napětím musí dostát podmínek sepnutí, které platí pro synchronní generátory [6].

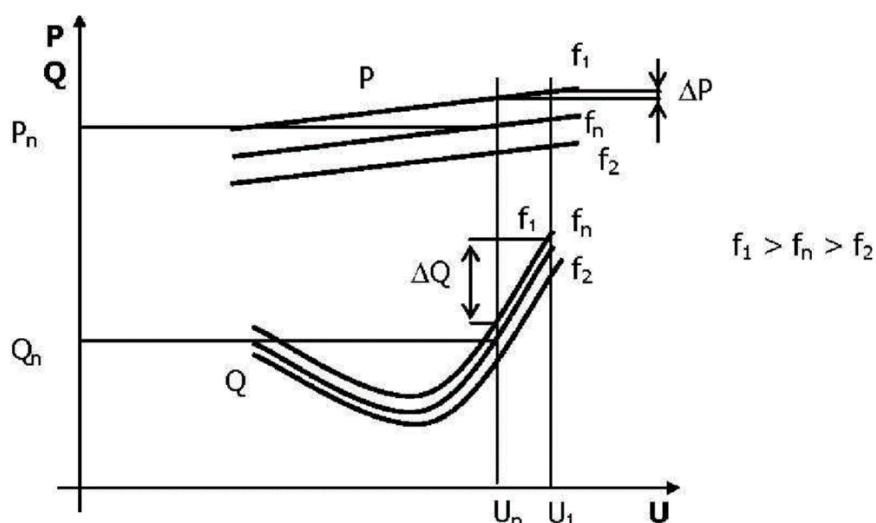
2.6 Obnovitelné zdroje a jejich výjimky

Tento typ elektráren nemusí být využíván pro primární regulaci, ale musí být technicky přizpůsoben v dané soustavě natolik, aby mohl efektivně regulovat vzniklé výkonové nerovnováhy [6].

3. Regulace napětí v pilotních uzlech soustavy

3.1 Základní princip řízení napětí a jalového výkonu

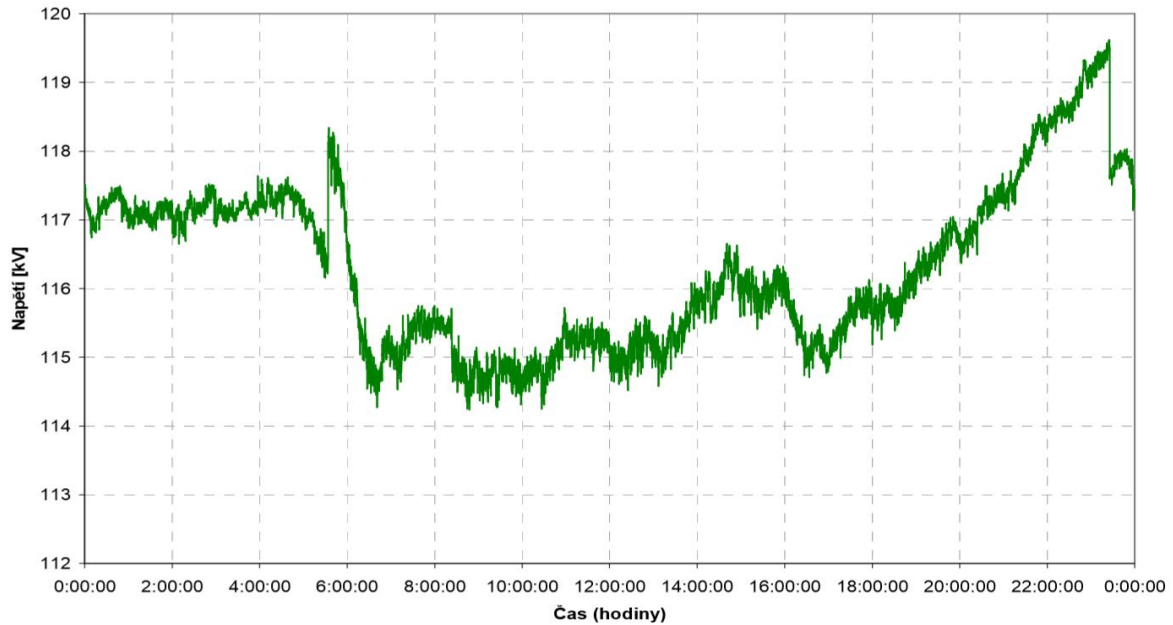
Hodnota napětí ve sledovaném uzlu soustavy je závislá na vyrovnávací bilanci jalového výkonu. Tato závislost je patrná na obrázku č. 8, který ukazuje, že při velmi malé změně napětí se značně ovlivní velikost jalového výkonu, a to jeho snížením nebo zvýšením [4].



Obr. č. 8 Statická charakteristika zobrazující závislost P , Q na U a F [4]

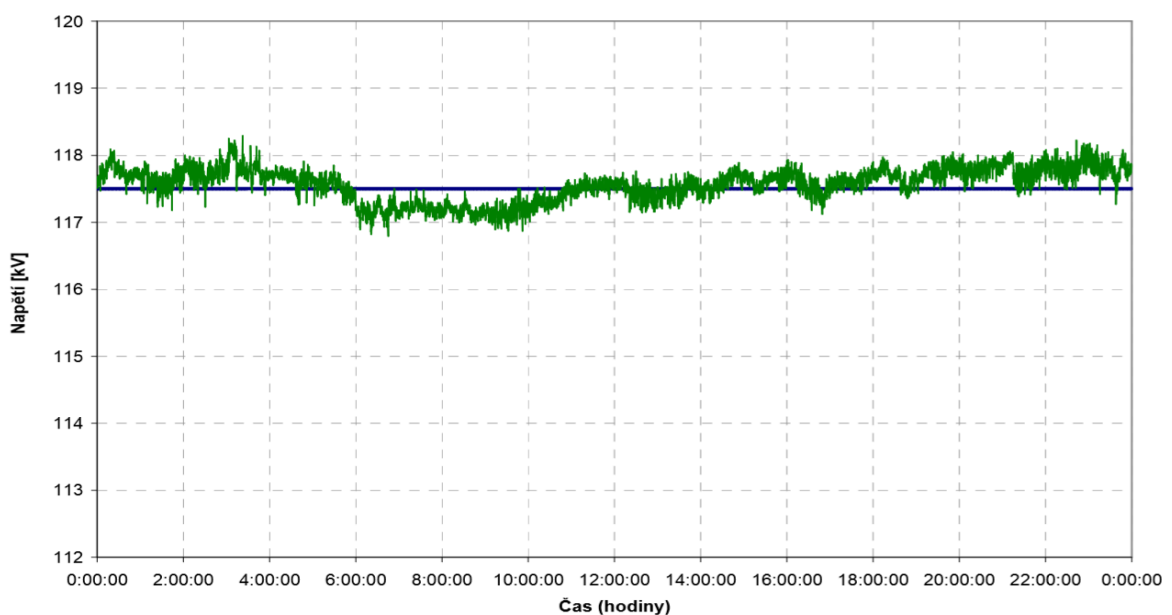
Dále je z obrázku č. 8 patrné, že malá změna napětí neovlivní zásadně hodnotu činného výkonu, ale značný vliv na tento parametr má především změna dané frekvence, která posune pracovní bod činného výkonu na jinou statickou charakteristiku. Napětí je lokální parametr určité částí elektrizační soustavy, který se reguluje v pilotních uzlech jalovým výkonem. Na rozdíl od napětí je frekvence globální parametr, její hodnota je tedy stejná pro celou elektrizační soustavu [4]

Jestliže bude například distribuční soustava o napěťové hladině 110 kV zcela neregulovaná, bude mít hodnotu jalového výkonu neměnnou, pak se v této soustavě projeví velká fluktuace napětí v pilotních uzlech, jak je vidět na obrázku č. 9. Fluktuace jakožto nežádoucí zpětný vliv na soustavu je způsobená spínáním vedení, transformátorů, připojováním výroben nebo jejich odpojením, špatnou regulací, a také poruchami vzniklými při provozu soustavy [4].



Obr. č. 9 Neregulovaná distribuční soustava 110 kV [13]

Bude-li výše zmíněná soustava regulovatelná, hodnota napětí v pilotních uzlech se bude udržovat ve stanoveném tolerančním rozsahu. Požadovaná hodnota napětí se bude regulovat změnou dodávaného jalového výkonu a fluktuace se minimalizuje, jak je možné vidět na obrázku č. 10. Je potřeba velmi efektivně zajišťovat regulaci jalového výkonu a napětí v soustavě, aby byla zajištěna spolehlivost a bezpečnost dodávané elektrické energie při jakémkoliv provozním stavu [13].



Obr. č. 10 Regulovaná distribuční soustava 110 kV [13]

Při dodávání jalového výkonu do soustavy však musí být dodržena vyrovnávací bilance jalového výkonu podle níže uvedeného vztahu (26) [4].

$$\Sigma Q_G + \Sigma Q_{KZ} + \Sigma Q_B = \Sigma Q_C + \Delta Q \quad (26),$$

kde ΣQ_G – součet veškerého vytvořeného jalového výkonu z výroben.

ΣQ_{KZ} – součet veškerého jalového výkonu kompenzačních zařízení.

ΣQ_B – součet veškerého naakumulovaného výkonu ve vedení.

ΣQ_C – součet veškeré zátěže jalového výkonu.

ΔQ – součet veškerých ztrát jalového výkonu v soustavě.

Při splnění této bilance bude napětí v pilotních uzlech soustavy drženo v dovoleném tolerančním rozsahu. Při změně hodnoty dané frekvence v celé soustavě nebo napětí v pilotním uzlu se změní i vyrovnávací bilance jalového výkonu. Totéž platí při změně dodávaného jalového výkonu nebo odebíraného výkonu ze soustavy, vlivem těchto změn se budou měnit provozní parametry v elektrizační soustavě, tedy frekvence a napětí [4].

3.2 Automatická sekundární regulace napětí (ASRU)

Systém ASRU slouží k zajištění stabilizace napětí v pilotních uzlech tak, aby byla hodnota stále v tolerančním pásmu při jakémkoliv provozním stavu soustavy. Udržování požadované hodnoty napětí se provádí změnou dodávky jalového výkonu v takto regulované soustavě. Tento systém také zvyšuje kontrolu nad toky jalového výkonu, kvalitu dodávky elektrické energie a ekonomičnost přenosu. Systém ASRU disponuje zpětnou vazbou vázanou na regulovanou soustavu, proto se velikost změny jalového výkonu řídí podle aktuální potřeby. Zpětná vazba ASRU je důležitá především u soustav, ve kterých často probíhají dynamické změny napětí a kde hrozí vyšší riziko vzniku podpětí nebo přepětí. Systém ASRU má velký podíl na splnění podmínek, které jsou vyžadovány pro připojení elektrizační soustavy České republiky do evropské sítě provozovatelů přenosových soustav elektřiny (ENTSO-E). Tento systém pomáhá zvládnout velké výkonové přetoky, které jsou přenášeny přes naše území ze severní Evropy na jih [14], [15], [16].

3.2.1 Fyzikální princip automatické sekundární regulace napětí

V pilotních uzlech soustavy systém ASRU udržuje požadovanou hodnotu napětí vyrovnáváním bilance jalového výkonu. Do pilotního uzlu jsou vyvedeny výkony elektráren nebo kompenzačních zařízení, pomocí nichž se mění podle potřeby dodávka jalového výkonu, která má vliv na změnu napětí. Vztah zobrazující fyzikální princip tohoto systému regulace je (88) [17].

$$\Delta U_i = a_{ij} \cdot \Delta Q_j \quad (88)$$

ΔU_i – Potřebná změna napětí v pilotním uzlu i ,

a_{ij} – součinitel senzitivity změny napětí v pilotním uzlu i na změnu dodávky jalového výkonu v pilotním uzlu j ,

ΔQ_j – potřebná změna dodávky jalového výkonu v pilotním uzlu j .

Změna napětí v libovolném uzlu soustavy je závislá na změně velikosti dodávaného jalového výkonu do určitého pilotního uzlu a na součiniteli senzitivity mezi regulovanými uzly dané soustavy [17].

3.2.2 Charakteristika pilotních uzlů

V soustavě jako jediná část vhodná pro regulaci napětí a jalových výkonů jsou pilotní uzly, ve kterých lze spolehlivě regulovat napětí změnou množství dodávaného jalového výkonu bez sledování napěťových hodnot okolních pilotních uzlů. Další méně efektivní a náročnější je způsob regulace žádané napěťové hodnoty například v odběrovém uzlu většího odběratele. Lze také regulovat hodnotu napětí u výroby elektrické energie, hned na výstupu blokového transformátoru. Tento způsob z hlediska náročnosti výpočtu potřebné regulace není efektivní. V pilotním uzlu lze v dané napěťové toleranci regulovat zadanou hodnotu napětí i při velkých změnách jalového výkonu, a to je důvod, proč je tento uzel v soustavě napěťově stabilní [17].

V tomto uzlu dochází k rychlému vyrovnání bilance jalového výkonu v případě změny toku jalového výkonu. Schopnost regulovat zadanou hodnotu je možné do vyčerpání regulační rezervy jalového výkonu [17].

3.2.3 Zadaná hodnota napětí

Požadovanou hodnotu napětí, kterou bude systém ASRU udržovat v dané toleranci, je potřeba zadat. Možné způsoby zadání požadované hodnoty:

- a) Požadovaná hodnota napětí je neměnně zadaná: Tento způsob je využíván v soustavě o napěťové hladině VN. V soustavě jsou transformátory VN/NN, které jsou bez napěťové regulace. Hodnota napětí je pevně zadaná podle toho, aby na sekundární straně transformátoru byla jmenovitá hodnota napětí NN [17].
- b) Požadovaná hodnota napětí je zadávána ručně: Dispečer soustavy podle konkrétní situace realizuje změnu žádané hodnoty napětí. Takto zadávat hodnotu napětí je možné spíše v soustavách, které nejsou tolik dynamicky proměnné [17].
- c) Požadovaná hodnota napětí je zadávána programem: Podle programu je vyhodnocena nová změna potřebné hodnoty napětí. Používaný program pro výpočet a regulaci je z kategorie Optimal Power Flow (OPF). Program může být jednoúčelový (tj. terciální regulace napětí), nebo můžou být zvoleny programy s komplexnějším systémem SCOPT [17].

Požadovanou hodnotu napětí, kterou je potřeba zadat, je možné vypočítávat periodicky, kde výpočet probíhá po uplynutí daného časového intervalu. Další možnost, kdy probíhá vypočítávání, závisí na dispečerském rozhodnutí. Výpočet je potřebný také při změně stavu regulované soustavy, a to třeba při sepnutí či odpojení vedení [17].

V systému ASRU je důležitá hystereze, která udává povolenou odchylku od zadaného napětí, při které ještě nedochází k regulaci napětí. Hystereze zanedbává malé regulační odchylky, a tím nedochází k nepotřebné regulaci. Dovolená odchylka od zadaného napětí však nesmí být velká, aby se nesnížila citlivost regulátoru. V soustavách o napěťových hladinách 400 kV a 220 kV je dovolená odchylka $\pm 0,5$ kV, odchylka u 110 kV je $\pm 0,25$ kV a v distribuční soustavě 22 kV je $\pm 0,11$ kV [17].

3.2.4 Regulovaná hodnota napětí

V pilotním uzlu dochází k měření hodnoty regulovaného napětí. Tato hodnota je potřebná k výpočtu regulační odchylky ($e = w - y$), která udává diferenci zadané hodnoty napětí a regulované hodnoty napětí. Na základě velikosti regulační odchylky se provádí regulátorem změna dodávaného jalového výkonu neboli akčního členu [17].

Regulační odchylku způsobí porucha, která vyznačuje změnu vnějších podmínek. Účel regulačního procesu je takto vzniklé regulační odchylky minimalizovat zásahem akční veličiny. Napěťová porucha nastane například při změně stavu vedení (vypnutí, zapnutí), změně výrobního bloku (snížení nebo zvýšení výkonu, odpojení, připojení), změně důležitého odběru (výpadek, vypnutí, zapnutí), a také změní-li se stav výkonové tlumivky jejím zapnutím či vypnutím [17].

3.2.5 Anomální provozní stav ASRU

Návrh a následné provedení systému ASRU v soustavě je velice obtížná činnost. Při špatném návrhu systému může docházet k anomálním provozním stavům ASRU. Jestliže v regulované soustavě vznikne anomální provozní stav, je vhodné systém ASRU nechat v provozu, musí však být pozastavené automatické ovládání zadané hodnoty napětí podle optimalizace jalových toků. V případě anomálního provozního stavu je zadaná hodnota nastavená dispečerem a systém ASRU slouží jen k stabilizaci hodnoty napětí v určitých mezích [17].

Možné anomální stavy, které mohou nastat:

- a) Dojde k přeregulování či nedoregulování regulační odchylky: Tento problém může nastat při technické závadě na zařízení v regulované soustavě, dále při špatném výpočtu regulační rezervy jalového výkonu, kdy pracující generátor neposkytuje systému ASRU takovou hodnotu jalového výkonu, se kterou je při regulaci počítáno. Dále také při nesprávně daném poměru dQ/dU , jelikož potřebná změna dodávaného jalového výkonu nebude odpovídat potřebám soustavy. Dalším případem, kdy dochází k tomuto anomálnímu stavu, je integrování nových technologií

v regulovaném systému, které mohou zhoršovat současný chod. Jestliže dojde k přeregulování hodnoty napětí v pilotním uzlu, v regulované soustavě může dojít k destabilizaci [17].

- b) V pilotním uzlu dochází k ohromnému množství regulací: Tento anomální stav nastává při malé dovolené odchylce napětí v pilotním uzlu, jelikož pro splnění nastaveného napětí dochází k neustálé regulaci. Problém se vyskytuje jak ve velmi dynamických soustavách, tak i u změny napětí v pilotním uzlu při probíhajícím anomálním stavu [17].
- c) Zadané napětí v pilotních uzlech není správně určené: Jestliže dojde ke špatnému určení zadaného napětí v pilotním uzlu, regulace se většinou neprovede. Důvodem je nedostatek regulační rezervy jalového výkonu, kterým nelze dosáhnout nesprávné hodnoty napětí [17].

System ASRU však není schopný zcela uregulovat vzniklé regulační odchylky v pilotním uzlu, jestliže došlo k výpadku velkých výrobních bloků nebo při jejich ostrovním režimu, a také v případě přenosů velkého množství jalového toku v regulované soustavě. System automatické sekundární regulace napětí však značně zlepšuje svou stabilizační činností přechod z anomálního provozního stavu zpět do normálního provozního stavu [17].

3.2.6 Přínos ASRU

System ASRU byl z hlediska jeho činnosti po dlouhou dobu sledován a vyhodnocován. Potvrdil se tak hlavní přínos systému, pro který byl system navržen, ale také byly vysledované další přínosy v distribuční soustavě. Tyto další přínosy jsou například:

- a) System ASRU u připojené výrobní může mít vliv na snížení průměrného množství dodávaného jalového výkonu za sledované časové období. Za pomoci systému se odebírá z výrobních bloků právě takové množství jalového výkonu, které regulovaná soustava opravdu potřebuje [17].

- b) Obsahuje-li systém ASRU počítadlo, které složí k zaznamenání počtu proběhlých regulací, dá se určit z daného počtu stav regulované soustavy. Při výrazném zvyšování počtu proběhlých regulací se zvyšuje dynamika regulované soustavy, a to může být příčina vzniku anomálního provozního stavu. Je nutné se takovému stavu vyhnout a provést nezbytná opatření [17].
- c) Vyhodnocování systému ASRU významně přispívá k vyhledání anomálních stavů vzniklých vlivem technických zařízení v regulované soustavě nebo téhož systému [17].
- d) U provozovatelů výroben regulujících zadanou hodnotu napětí na přípojnicích, ze které se napájí jejich vlastní spotřeba, dochází ke zlepšení vlastních napěťových podmínek [17].
- e) Podle počtu proběhlých regulací se dá zjistit špatně nastavená toleranční hodnota zadaného napětí, chování velkoodběratelů v blízkosti pilotního uzlu, snížení nebo zvýšení dynamiky regulované soustavy, provozní nebo technické problémy [17].
- f) Systém ASRU minimalizuje nežádoucí zpětný vliv na soustavu, který způsobují obnovitelné zdroje. Lze tak efektivně využívat větrné elektrárny pro regulaci dané soustavy, a tím zvýšit jejich využití v elektrizační soustavě [17].
- g) Systém ASRU zvyšuje provozní hospodárnost regulované soustavy, jelikož zajišťuje dodávku jalového výkonu podle potřeby regulované soustavy, a tím se minimalizují ztráty vzniklé při přenosu nepotřebného jalového výkonu [17].

3.3 Zajištění jalového výkonu synchronními generátory

V přenosových a distribučních sítích musí jejich provozovatel zajistit dostatečné množství okamžité rezervy jalového výkonu. Tyto rezervy jsou získány jak ze synchronních generátorů, tak i z určitých druhů kompenzátorů. Vhodné použití těchto regulačních rezerv jalového výkonu pomáhá zabránit vzniku napěťových kolapsů, zabezpečit přenos elektrické energie konečnému odběrateli při napěťové stabilitě a dále omezuje vzniklé technické ztráty

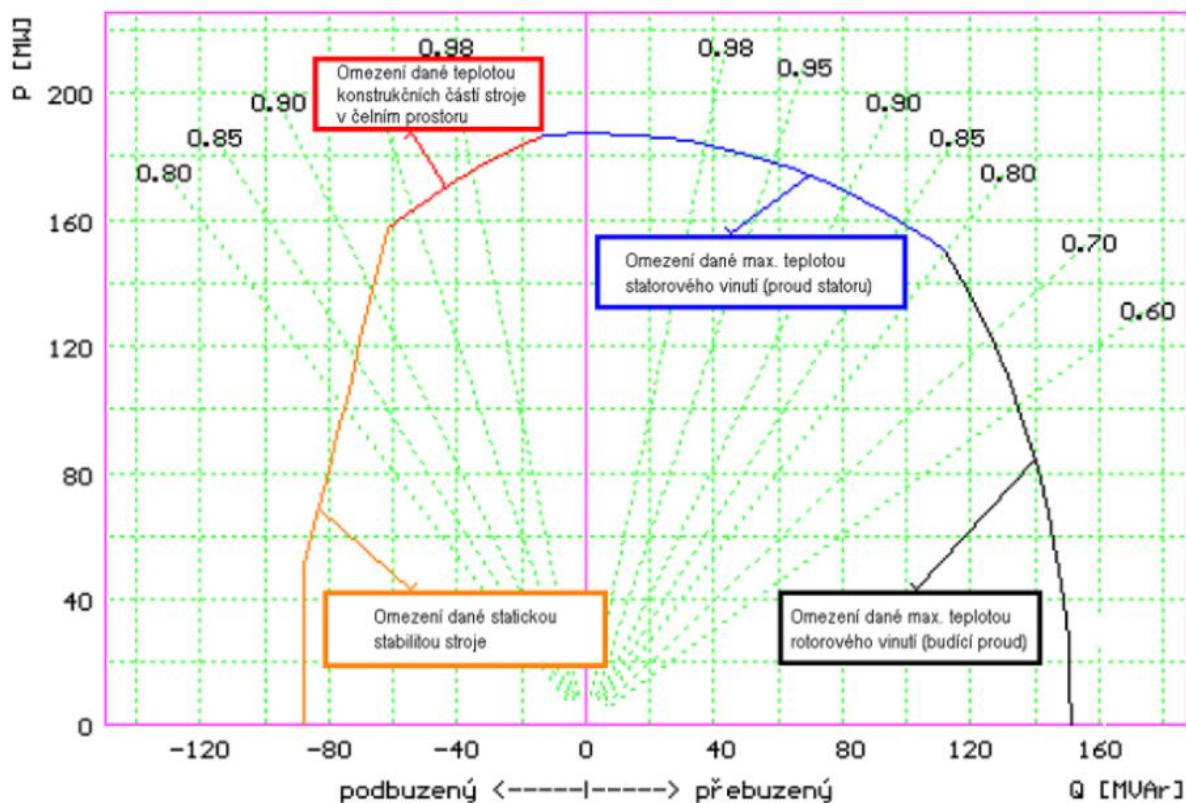
v regulované soustavě. Provozovatel musí zajistit, aby v soustavě bylo právě jen takové množství jalového výkonu, který je v daném okamžiku potřeba. Tato podmínka musí být dodržena za všech provozních stavů, které mohou v soustavě nastat. Provozovatel pro splnění této podmínky využívá jalový výkon vytvořený v synchronních generátorech výroben, které jsou připojené do regulované soustavy. Vzniklý jalový výkon v synchronních generátorech je při výrobě činného výkonu sekundární produkt, který by byl jinak nevyužit. Takto získaný jalový výkon lze regulovat s velkou přesností a plynulostí [11].

Fyzikální vazba napětím a jalovým výkonem byla popsána v podkapitole 3.2.1. Změna hodnoty napětí v určitém uzlu soustavy je vyvolaná změnou dodávky jalového výkonu synchronními generátory do jiného uzlu. Je-li zvýšena hodnota dodávaného jalového výkonu do soustavy, zvýší se hodnota regulovaného napětí v uzlu, a naopak při snížení dodávky jalového výkonu klesne hodnota napětí. Podle provozního diagramu synchronního generátoru (PQ-diagram) se určí možná rezerva jalového výkonu, kterou může daný generátor poskytnout k regulaci do soustavy [11].

Výrobce musí uvést provozní diagram u každého dodaného synchronního generátoru. Tento diagram podle proudových a napěťových hodnot zobrazuje závislost na jalovém a činném výkonu synchronního generátoru. Pracovní bod v pracovním diagramu udává, v jakém pracovním režimu se generátor právě nachází [11].

PQ-diagram se vyznačuje těmito částmi:

- U induktivního zatížení černá část kružnice udává omezení způsobené maximálním budícím proudem.
- U induktivního zatížení modrá část kružnice udává omezení způsobené maximálním proudem statoru.
- U kapacitního zatížení červená část kružnice udává omezení zapříčiněné magnetickým polem čelního prostoru.
- U kapacitního zatížení oranžová část kružnice zobrazuje omezení zapříčiněné statickou stabilitou.



Obr. č. 11 Provozní diagram synchronního diagramu [11]

Omezení způsobené maximálním budícím proudem – hodnota proudu protékajícím rotorovým vinutím nesmí vyvolat takové oteplení ve vodičích rotoru, které by bylo větší, než je dovolené pro daný stroj [11].

Omezení způsobené maximální statorovým proudem – ve vodičích statoru nesmí procházející proud vyvolat větší oteplení vodičů, než je dovolené a stanovené dle normy pro maximální oteplení statorového vinutí [11].

Omezení zapříčiněné magnetickým polem čelního prostoru – v čelní části vinutí rotoru a statoru se budí rozptylové magnetické pole, které indukuje vířivé proudy do masivních částí dané konstrukce generátoru. Dodává-li generátor jalový výkon do soustavy, pracuje v přebuzeném stavu a pole vzniklé ve vinutí rotoru a statoru působí proti sobě, rozptylové magnetické pole proto bude slabé. U generátoru odebírajícího jalový výkon ze soustavy však bude působení vzniklých polí ve statoru a rotoru způsobovat zesílení výsledného rozptylového magnetického pole. V takovém případě generátor pracuje v podbuzeném stavu [11].

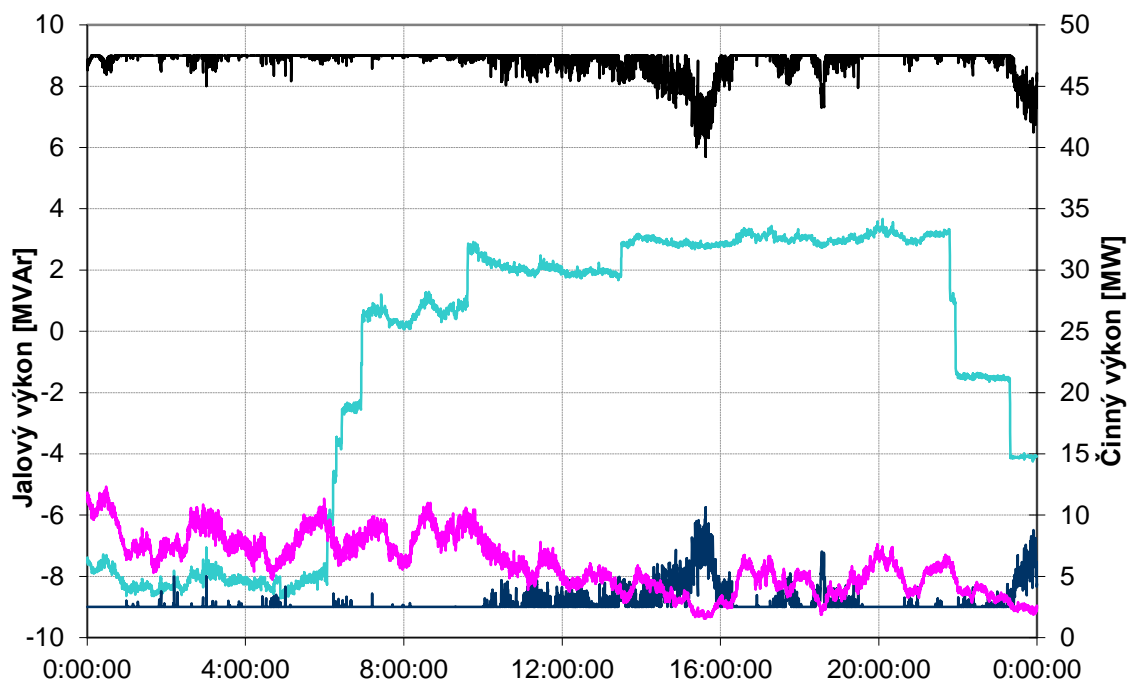
Omezení zapříčiněné statickou stabilitou – aby generátor nevypadl ze synchronizmu, nesmí dojít k překročení meze statické stability. To je pracovní režim, při kterém se synchronizační moment rovná nule. Velikost momentu je závislá na sinu úhlu mezi budícím a magnetizačním proudem [11].

4. Popis pracovního stavu farmy VTE se systémem ASRU

V této kapitole budu analyzovat data získané z farmy VTE. Podle dat lze určit, v jakém pracovním stavu se farma VTE právě nachází. Ze získaných dat vyplývá závislost regulovaného napětí na jalovém výkonu. Výkon nejmenované farmy VTE je vyveden do rozvodny o napěťové hladině 110 kV, kde je v pilotním uzlu prováděna regulace zadaného napětí. Nastavená hodnota zadaného napětí v pilotním uzlu je 117,5 kV a dovolená odchylka od zadané hodnoty je $\pm 0,5$ kV.

4.1 Bezproblémová regulace napětí farmy VTE, připojené do rozvodny 110 kV

Graf č. 3 zobrazuje využití regulační rezervy jalového výkonu pro regulaci zadaného napětí během jednoho dne.

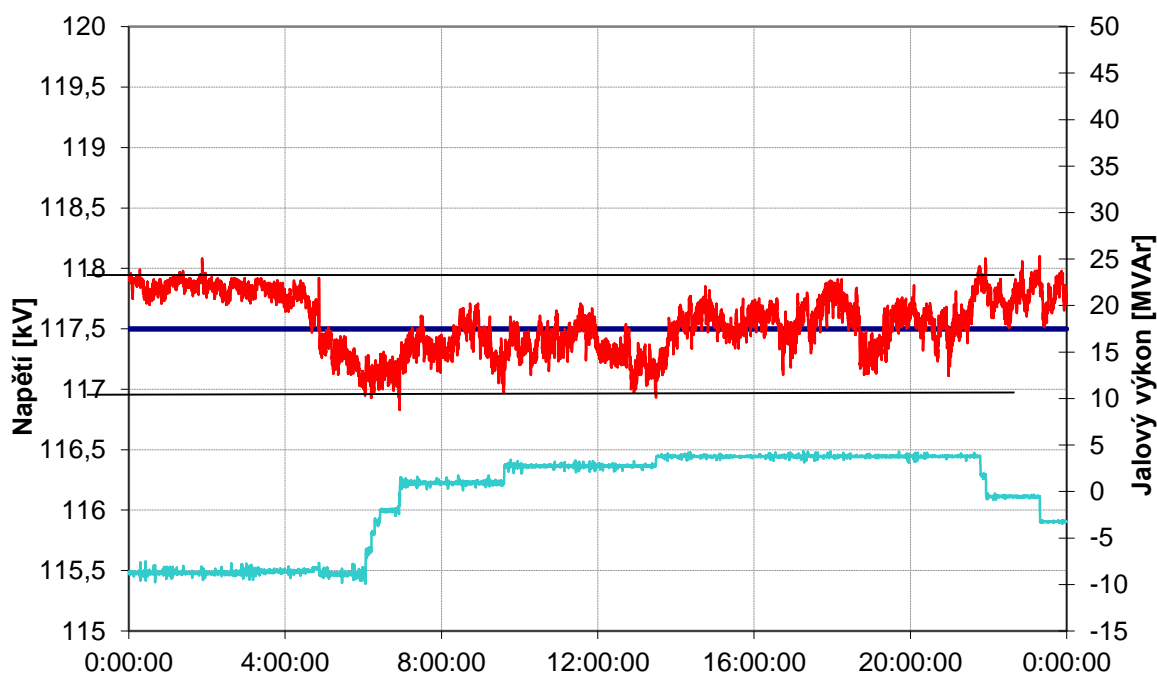


Graf č. 3 Využití regulační rezervy jalového výkonu

V grafu č. 3 je vidět pásmo regulační rezervy jalového výkonu, které je v daném okamžiku možné využít pro regulaci zadaného napětí. Regulační pásmo je ohraničeno horní černou křivkou a dolní tmavě modrou křivkou. V daném regulačním pásmu je zobrazen okamžitý průběh jalového výkonu pod světle modrou barvou a fialová křivka značí okamžitou výrobu činného výkonu. Během celého dne bylo dostatek regulační rezervy

jalového výkonu pro regulaci zadaného napětí. Výroba činného výkonu před 16:00 byla na krátký čas snížena téměř na nulu, a to ovlivnilo pásmo regulační rezervy, které bylo sniženo o zhruba 2 MW. Na regulaci zadaného napětí nemělo zúžení regulačního pásma vliv.

V grafu č. 4 je vidět regulace zadaného napětí v pilotním uzlu během celého dne. Dovolená odchylka zadaného napětí je $\pm 0,5$ kV, horní hranice zadaného napětí tedy může dosáhnout 118 kV a dolní hranice je 117 kV. Je-li hodnota okamžitého napětí v pilotním uzlu v tolerančním pásmu, nedochází k regulaci.



Graf č. 4 regulace zadaného napětí v pilotním uzlu

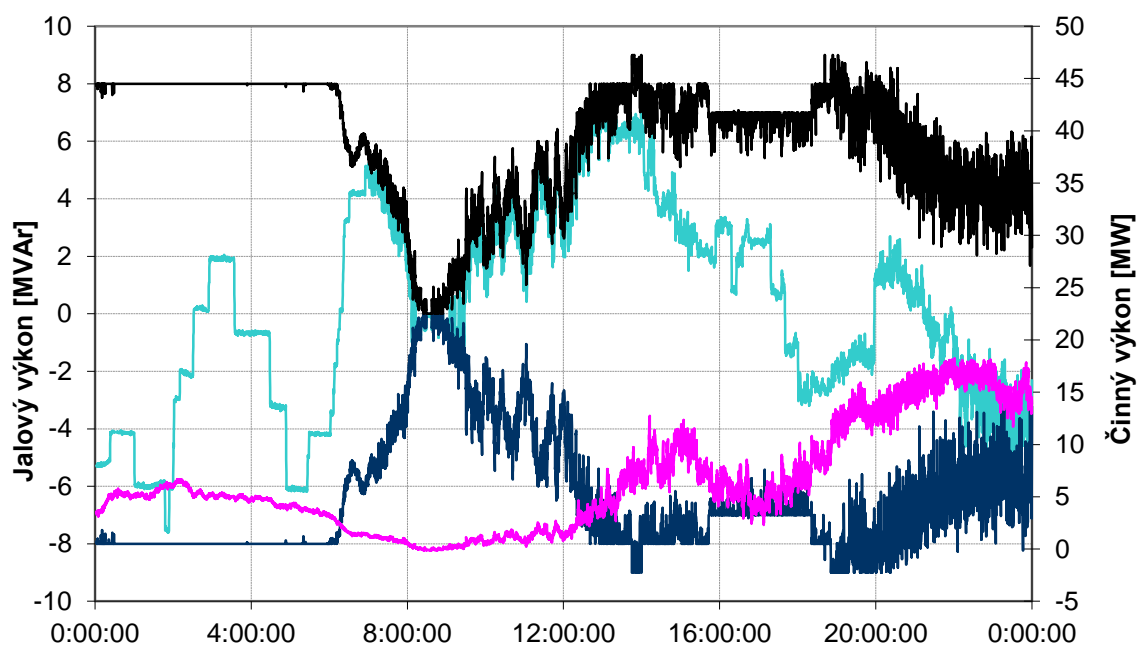
Tmavě modrá křivka v grafu č. 4 označuje hodnotu zadaného napětí, které je nastavené na hodnotu 117,5 kV, a určené toleranční pásmo je ohraničené tenkou černou křivkou označující horní mez při 118 kV a dolní mez 117 kV. Systém zaznamenává každé překročení okamžité hodnoty napětí z tolerančního pásma a následně vyhodnocuje změnu jalového výkonu. Průběh jalového výkonu je značen světle modrou křivkou. Velikost změny dodávaného jalového výkonu se určí podle velikosti překročení okamžitého napětí z tolerančního pásma a podle toho, jestli byla překročena dolní nebo horní hranice pásma.

V čase od 0:00 do cca 5:00 hodin se napětí drželo u horní hranice tolerančního pásma. Aby nedošlo k překročení této hranice, byla dodávka jalového výkonu záporná o hodnotě přibližně -9 MVar. Po 5:00 hodině dochází k poklesu napětí pod křivku zadaného napětí 117,5 kV, a to je důvod zvyšování dodávky jalového výkonu až do kladné hodnoty 5 MVar. Ve 22:00 se napětí v pilotním uzlu opět dostává k horní hranici, proto systém ASRU postupně snižoval dodávaný jalový výkon na zápornou hodnotu cca -4 MVar.

Podle grafů č. 3 a 4 nebyl problém v jakékoliv části dne udržet napětí v nastaveném tolerančním pásmu, tedy napětí v pilotním uzlu bylo stabilní. Na bezproblémovou regulaci během tohoto dne mají velký vliv dobré povětrnostní podmínky a žádný výskyt poruchy v regulované soustavě.

4.2 Neuregulování napětí v pilotním uzlu vlivem farmy VTE připojené k rozvodně

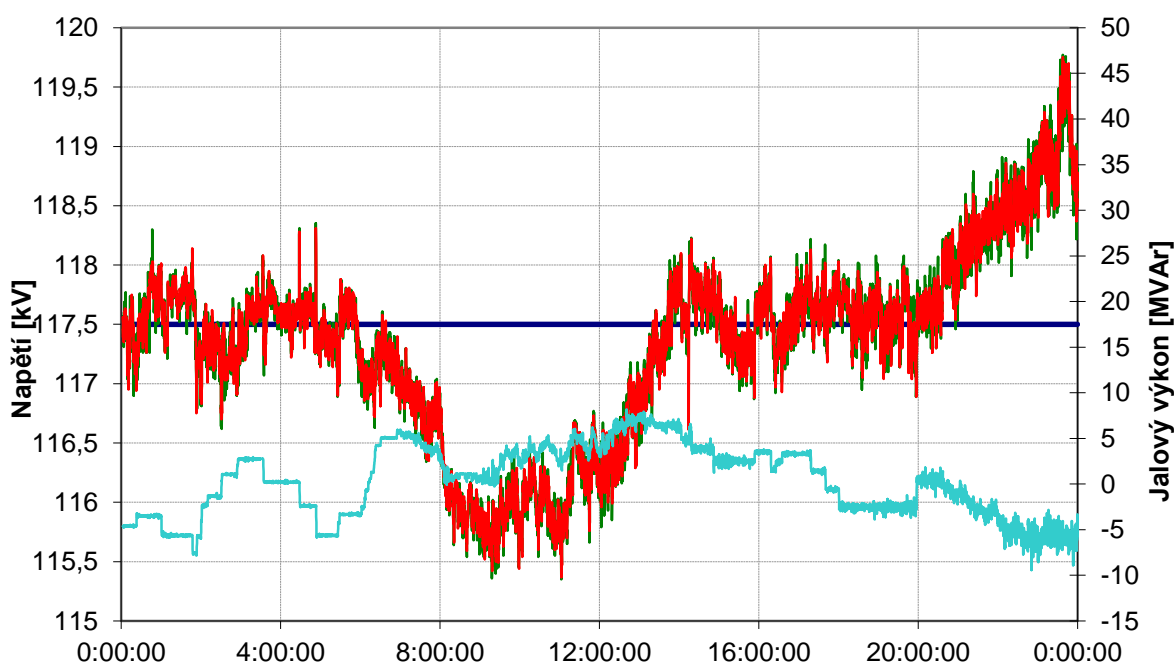
V grafech č. 5 a 6 jsou zobrazeny stavy, při kterých systém ASRU není schopen uregulovat napětí v daném pilotním uzlu tak, aby se pohybovalo v tolerančním pásmu. Náhlé skokové změny napětí v pilotním uzlu jsou způsobeny vyčerpáním regulační rezervy jalového výkonu a nečekaným zastavením farmy VTE.



Graf č. 5 Využití regulačních rezerv jalového výkonu

V grafu č. 6 je zobrazeno využití regulační rezervy jalového výkonu v daném okamžiku. Regulační pásmo vyznačené horní černou křivkou a dolní světle modrou křivkou bylo do 6:00 h dostatečně velké tak, aby zajistilo potřebné množství jalového výkonu pro provedení dané regulace napětí. Po 8:00 h došlo ke krátkému odpojení farmy VTE a až do cca 13:00 h nestačilo množství regulační rezervy pro potřebnou regulaci. Okamžitý odběr jalového výkonu z regulační rezervy je značen světle modrou křivkou a činný výkon označuje červená křivka. Činný výkon farmy VTE se začal přibližně v 19:00 h zvyšovat, to však mělo vliv na zúžení regulačního pásma, a tím byl nedostatek jalového výkonu pro uregulování napětí v tolerančním pásmu.

V případě špatných povětrnostních podmínek, kdy rychlost vzduchu bude nižší než 3 m/s nebo vyšší než 25 m/s, dojde k odstavení VTE, aby nebyl ohrožen bezpečný provoz větrné farmy. V tomto případě bude nulová regulační rezerva jalového výkonu a systém ASRU nemá potřebný jalový výkon k udržení napětí v tolerančním pásmu.



Graf č. 6 Regulační rezervy a výkon v pilotním uzlu

Červená křivka v grafu č. 6 představuje průběh napětí v pilotním uzlu během celého dne. V čase od 0:00 do cca 6:00 h se napětí pohybuje v tolerančním pásmu, které je dáno dovolenou odchylkou $\pm 0,5$ kV od zadaného napětí 117,5 kV. Po 8:00 h došlo ke krátkému odstavení VTE, a tak systém ASRU nemohl využít regulační rezervu pro udržení napětí

v tolerančním pásmu. Ani po krátkém výpadku VTE však nedošlo k uregulování napětí zpět do tolerančního pásma, z důvodu nedostatečného množství regulační rezervy jalového výkonu. Přibližně až po 13:00 h se povedlo stabilizovat napětí. K dalšímu problému s uregulováním napětí došlo po 19:00 h, kdy byl opět nedostatek regulační rezervy způsobený zvýšením činného výkonu, a tak se napětí pohybovalo nad horní hranicí tolerančního pásma.

Vzniklé napěťové změny způsobené větrnou elektrárnou zásadně neovlivňují provoz elektrizační soustavy. Napěťová stabilita elektrizační soustavy by však byla ohrožena v případě, že by se na vzniklé napěťové změně podílelo více výroben.

Závěr

V této bakalářské práci jsem se snažil přiblížit problematiku, která se týká připojení farmy větrné elektrárny do elektrizační soustavy a toho, jak lze využít dodávaný jalový výkon z těchto elektráren k regulaci napětí v pilotních uzlech dané soustavy.

Z důvodu zajištění spolehlivé a bezpečné dodávky elektrické energie je potřeba stabilizovat napětí v pilotních uzlech soustavy tak, aby hodnota napětí byla stále v tolerančním pásmu při jakémkoliv provozním stavu dané soustavy. Tato stabilizace je zajištěná systémem ASRU. V regulované soustavě tento systém udržuje požadovanou hodnotu napětí změnou dodávky jalového výkonu do pilotního uzlu. Jestliže klesá hodnota napětí ve sledovaném uzlu, systém vyhodnotí a zajistí zvýšení dodávky jalového výkonu. V případě, že je napětí v horní části tolerančního pásma, dojde ke snížení dodávaného množství. Rozdíl mezi regulovaným a neregulovaným uzlem soustavy je zobrazen v kapitole 3 na uvedených obrázcích č. 9 a 10, kde je vidět vzniklá fluktuace, kterou je třeba co nejvíce minimalizovat.

Ve 4. kapitole jsem analyzoval výstupní data ze systému ASRU, která jsem obdržel od jedné větrné elektrárny za účelem vypracování této práce.

První analýza v podkapitole 4.1 ukazuje provozní režim VTE, pracující při příznivých povětrnostních podmínkách. Systém ASRU má dostatečné množství regulační rezervy jalového výkonu (graf č. 3), kterou využije podle potřeby k udržení napětí v požadovaném tolerančním pásmu. Jak je vidět v grafu č. 4, nedošlo během celého dne k výrazné odchylce napětí z tolerančního pásma.

Ve druhé analýze v podkapitole 4.2 je ukázaný pracovní režim, ve kterém dojde k odpojení větrné elektrárny ze soustavy vlivem nízké rychlosti větru, to je při rychlosti nižší než 3 m/s, nebo naopak při rychlosti větru vyšší než 25 m/s. Jestliže dojde k odpojení, hodnota napětí se dostane skokově z tolerančního pásma, jak je možné vidět v grafu č. 6. Další případ, při kterém dojde k odchylce napětí z tolerančního pásma, nastane, jestliže systém ASRU nemá dostatečné množství regulační rezervy jalového výkonu pro vyhodnocenou regulaci. Proměnlivost regulační rezervy je zobrazená v grafu č. 5.

Větrné elektrárny připojené systémem ASRU jsou výborným nástrojem pro zlepšení napěťových poměrů v síti a pro snížení ztrát vzniklých při přenosu toku jalového výkonu. Je však třeba se touto problematikou zabývat dále, aby se větrné elektrárny mohly více integrovat v elektrizační soustavě.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Mastný Petr. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 254 s. ISBN 978-80-01-04937-2
- [2] Velikost větrné elektrárny a její vývoj [online]. [cit. 2016-5-1]. Dostupné: <http://www.csve.cz/clanky/velikost-vetrne-elektrarny-a-jeji-vyvoj/110>
- [3] Ing. Richard Habrych Ph.D. Energie 21: časopis obnovitelných zdrojů energie Moderní větrné elektrárny nabízejí nová řešení. 2013, VI, s. 28-31. DOI: 1803-0394.
- [4] Ing. Richard Habrych Ph.D. Západočeská univerzita v Plzni. Systém regulace napětí a jalového výkonu v DS. Plzeň. 2012. Sys.č. 000185006.
- [5] Bc. Tomáš Jiránek. Západočeská univerzita v Plzni. Zapojení farmy VTE do ASRU DS. Plzeň. 2014
- [6] Energetický regulační úřad. Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy: Příloha 4. 2014.
- [7] Ing. Richard Habrych Ph.D. Energetika: Výstavba a provoz velkých parků větrných elektráren v Rumunsku. 2012. XII. s. 1-6.
- [8] Koncept virtuální elektrárny funguje i v praxi [online]. [cit. 2016-5-1]. Dostupné: <http://www.prumysl.cz/koncept-virtualni-elektrarny-funguje-i-v-praxi/>
- [9] HDO – smart grid fungující již půl století [online]. [cit. 2016-5-1]. Dostupné: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/hdo-smart-grid-fungujici-jiz-pul-stoleti/>
- [10] Ing. Richard Habrych Ph.D. Řízení činného výkonu větrných elektráren. 2014
- [11] Ing. Richard Habrych Ph.D. Energetika: Řízení jalového výkonu synchronního generátoru. 2015. III. s. 146-152.

- [12] Ing. Richard Habrych Ph.D. Energetika: Řízení jalového výkonu větrných elektráren. 2013. XII. s. 688-693.
- [13] Ing. Richard Habrych Ph.D. Západočeská univerzita v Plzni. Autoreferát. Systém regulace napětí a jalového výkonu v DS. Plzeň. 2012. Sys.č. 000185006.
- [14] Ing. Karel Máslo a kolektiv: Řízení a stabilita elektrizační soustavy. Československá odborná sekce IEEE PES, 2013
- [15] Ing. Josef Křeček, Ing. Pavel Švejnar: Regulace napětí a jalových výkonů v přenosové soustavě ČR. Časopis Energetika 1994/11
- [16] Doc. Ing. Miloš Beran, CSc.: Elektrická zařízení tepelných elektráren. Skripta VŠSE Plzeň, 1988
- [17] Ing. Richard Habrych Ph.D. Energetika: Automatická sekundární regulace napětí. 2015. V. s. 264-271.