

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**VLIV LOKÁLNÍCH REGULAČNÍCH SYSTÉMŮ  
NA ŘÍZENÍ ELKTRIZAČNÍ SOUSTAVY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

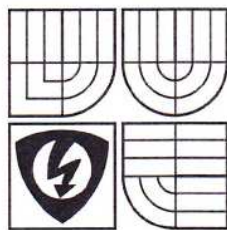
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**JIŘÍ KOSTOV**

**BRNO 2010**



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

**Student:** Jiří Kostov

**Ročník:** 3

**ID:** 78100

**Akademický rok:** 2009/10

**NÁZEV TÉMATU:**

## Vliv lokálních regulačních systémů na řízení elektrizační soustavy

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

- úvod do problematiky regulačních systémů
- způsoby regulace elektrizační soustavy
- analýza stávajících zařízení a jejich význam při regulaci
- nové možnosti v oblasti regulace a jejich požadavky na distribuční síť

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 31.5.2010

**Vedoucí práce:** Ing. Tomáš Bartošík

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.**

*předseda oborové rady*



**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

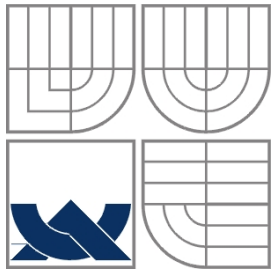
>>Vložit licenční smlouvu<<

Bibliografická citace práce:

KOSTOV, J. *VLIV LOKÁLNÍCH REGULAČNÍCH SYSTÉMŮ NA ŘÍZENÍ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY*. BRNO: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ, 2010. 63 s. VEDOUcí BAKALÁŘSKÉ PRÁCE ING. TOMÁŠ BARTOŠÍK.

Prohlašuji, že jsem svou **bakalářskou práci** vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**  
**Ústav elektroenergetiky**

**Bakalářská práce**

# **Vliv lokálních regulačních systémů na řízení elektrizační soustavy**

**Jiří Kostov**

**vedoucí: Ing.Tomáš Bartošík**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2010**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**



**Faculty of Electrical Engineering and Communication**

**Department of Electrical Power Engineering**



**Bachelor's Thesis**

# **Utilization of local systems for power system regulation**

**by**

**Jiří Kostov**

**Supervisor: Ing. Tomáš Bartošík**

**Brno University of Technology, 2010**

**Brno**

## ABSTRAKT

Bakalářská práce pojednává o obecném rozdělení způsobu regulace elektrizační soustavy, obsahující základní principy regulace kmitočtu, regulaci napětí a regulaci jalového a činného výkonu. Obsahuje informace o systému HDO, elektrárnách podílejících se na regulaci a vlastních zařízeních pro regulaci a řízení jalového výkonu. Práce se dále zabývá novými možnostmi v oblasti regulace a jejich požadavky na distribuční síť. Součástí práce byla i část zabývající se obnovitelnými zdroji elektrické energie a jejich požadavky na distribuční síť.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** >> napětí, jmenovité sdružené napětí, proud, činný proud, jalový proud, jmenovitý výkon, distribuční síť, přenosová síť, činný výkon, jalový výkon, kmitočet, jmenovitý kmitočet, změna kmitočtu, primární regulace kmitočtu, sekundární regulace kmitočtu, indukčnost, regulace, regulační transformátor, regulátor kmitočtu generátor, synchronní generátor, asynchronní generátor, fotovoltaická elektrárna, kogenerační jednotka, HDO, kompenzátor, vedení, kondenzátor, větrná elektrárna, nízké napětí, vysoké napětí, velmi vysoké napětí, přenos, rozvod, rozvod elektrické energie, provoz elektrické soustavy, spojené elektrizační soustavy, volné toky výkonů, předávané výkony, síťová charakteristika, saldo, přenosové soustavy, inverter, fotovoltaický článek, elektrárna se spalovací turbínou, paroplynová elektrárna, kapacitní proud, induktivní proud <<

**ABSTRACT**

Bachelor's Thesis deals general information about methods of regulation of elektrification systems, including basic principles of regulation of frequency, regulation of voltage and regulation of reactive and active power. Work includes information about aggregate remote control system, power plants that participate on regulation and self device for regulation and controlling of reactive power. Work engages on new options in section of regulation and his requirements for distribution sites. Part of work deals information about renewable natural energy sources and his requirements for distribution sites.

**KEY WORDS:**

>> voltage, namely aggregate voltage, current, active current, reactive current, namely power, distribution site, supergrid, active power, reactive power, frequency, namely frequency, change of frequency, primary regulation of frequency, secondary regulation of frequency, inductance, regulation, regulation converter, controller of frequency, generator, synchronous generator, asynchronous generator, photovoltaic power plant, cogeneration unit, aggregate remote control system, compensating device, power line, capacitor, aerogenerator, low voltage, high voltage, very high voltage, transmission, power distribution, traffic of electrical system , united electrical system, free flow of power, forwarded power, characteristics of site, saldo, invertor, photovoltaic unit, power plant with firing turbine, vapour-gas power plant, capacity current, inductive current <<



## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>13</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>15</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>16</b>
<b>1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY REGULAČNÍCH SYSTÉMU .....</b>	<b>19</b>
<b>1.1 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA .....</b>	<b>19</b>
1.1.1 ZVLÁŠTNOSTI PROVOZU ES .....	20
1.1.2 SPOJENÉ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY.....	20
<b>2 ZPŮSOBY REGULACE ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1 REGULECE KMITOČTU A PŘEDÁVANÝCH VÝKONŮ.....</b>	<b>22</b>
2.1.1 PŘÍČINY ZMĚN KMITOČTU.....	22
2.1.2 KMITOČTOVÉ CHARAKTERISTIKY ZATÍŽENÍ.....	23
2.1.3 PRIMÁRNÍ REGULACE KMITOČTU.....	24
2.1.4 SEKUNDÁRNÍ REGULACE KMITOČTU V ES S VOLNÝMI TOKY VÝKONŮ.....	27
2.1.5 REGULACE KMITOČTU A PŘEDÁVANÝCH VÝKONŮ PODLE SÍŤOVÝCH CHARAKTERISTIK .....	28
2.1.6 NĚKTERÉ PODPŮRNÉ SLUŽBY (PPS) POUŽÍVANÉ V PŘENOSOVÝCH SOUSTAVÁCH .....	30
<b>2.2 REGULACE NAPĚTÍ .....</b>	<b>31</b>
2.2.1 REGULACE NAPĚTÍ TRANSFORMÁTORY .....	31
2.2.2 REGULACE NAPĚTÍ JALOVÝM VÝKONEM.....	35
2.2.3 NĚKTERÉ SPOTŘEBIČE ELEKTRICKÉ ENERGIE V ES .....	37
2.2.4 VENKOVNÍ A KABELOVÁ VEDENÍ JAKO SPOTŘEBIČE A ZDROJE JALOVÉHO VÝKONU .....	38
2.2.5 REGULACE NAPĚTÍ V DISTRIBUČNÍCH SÍŤÍCH .....	38
<b>3 ANALÝZA STÁVAJÍCÍCH ZAŘÍZENÍ A JEJICH VÝZNAM PŘI REGULACI.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1 SYSTÉM HDO.....</b>	<b>39</b>
3.1.1 VYUŽITÍ SYSTÉMU HDO PRO OBLASTI POUŽITÍ.....	42
<b>3.2 VÝROBNY ELEKTRICKÉ ENERGIE A ZAŘÍZENÍ PODÍLEJÍCÍ SE NA REGULACI.....</b>	<b>44</b>
3.2.1 VÝROBNY ELEKTRICKÉ ENERGIE:.....	44
3.2.2 NĚKTERÁ ZAŘÍZENÍ A JEJICH REGULACE JALOVÉHO VÝKONU V ES .....	45
<b>4 NOVÉ MOŽNOSTI V OBLASTECH REGULACE A JEJICH POŽADAVKY NA DISTRIBUČNÍ SÍŤ.....</b>	<b>47</b>
<b>4.1 ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE A NĚKTERÉ JEJICH POŽADAVKY NA DISTRIBUČNÍ SÍŤ.....</b>	<b>47</b>
4.1.1 ZMĚNY NAPĚTÍ PŘI SPÍNANÍ .....	47
4.1.2 ŘÍZENÍ JALOVÉHO VÝKONU .....	47
<b>4.2 KOGENERAČNÍ JEDNOTKY .....</b>	<b>48</b>
4.2.1 KOGENERACE SE SPALOVACÍMI TURBÍNAMI.....	50
4.2.2 KOGENERACE SE SPALOVACÍMI MIKROTURBÍNAMI.....	50
4.2.3 MOŽNOSTI REGULACE KOGENERAČNÍCH JEDNOTEK: .....	51
4.2.4 POŽADAVKY PRO PŘIPOJENÍ SYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ K DISTRIBUČNÍ SÍŤI .....	51
<b>4.3 SOLARNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE.....</b>	<b>51</b>
4.3.1 FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK .....	52
4.3.2 ELEKTRONICKÝ KOMPENZÁTOR JALOVÉHO VÝKONU A ÚČINÍKU.....	54

---

4.3.3 POŽADAVKY PRO PŘIPOJOVÁNÍ VÝROBEN SE STRÍDAČI, EVENTUÁLNĚ MĚNIČI KMITOČTU K DISTRIBUČNÍ SÍTI.....	56
<b>4.4 VĚTRNÉ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE.....</b>	<b>56</b>
4.4.1 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY .....	56
4.4.2 REGULACE VÝKONŮ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN.....	57
4.4.3 POŽADAVKY PRO PŘIPOJENÍ ASYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ K DISTRIBUČNÍ SÍTI .....	59
<b>5 CÍLE PRÁCE.....</b>	<b>60</b>
<b>6 ZÁVĚR.....</b>	<b>60</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>62</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1-1 Asociace ENTSO-E synchroně propojených přenosových soustav v Evropě [4].....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2-1 Snížení zatížení generátoru [1].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 2-2 Statická charakteristika [1].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 2-3 Statická charakteristika ES [1].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 2-4 princip působení sekundární regulace kmitočtu [1].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 2-5 Plánované saldo z ES2 do ES1 [1].....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 2-7 Regulační transformátor v jednoduchém přenosu [1] .....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 2-8 Jednoduchá okružní síť [1].....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 2-9 Regulační transformátor s podélnou regulací v zokruhované síti [1] .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 2-10 Fázorový diagram okružní sítě s regulačním transformátorem [1].....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 2-11 Blokové schéma transformátoru s podélnou regulací [1].....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 2-12 Regulace napětí jalovým výkonem - jednoduchý přenos [1].....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 2-13 Fázorový diagram regulace napětí jalovým výkonem v jednoduchém přenosu [1].....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 2-14 fázorový diagram regulace napětí jalovým výkonem v jednoduchém přenosu určení potřebného kompenzačního výkonu v bodě B (obr 2-12) [1].....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 2-15 Fázorový diagram regulace napětí jalovým výkonem v jednoduchém přenosu v situaci, kdy <math>Q_2 &lt; Q_k</math> [1] .....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 2-16 Princip regulace napětí v distribuční síti [1] .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 3-1 Struktura seriového kódu pro HDO používaného v ČR [7] .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 3-2 Struktura paralelního kódu pro HDO používaného v ČR [7] .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 3-3 Blok vysílače HDO s paralelní volnou vazbou [7].....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 3-4 Blokové schéma přijímače HDO [7] .....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 3-5 Synchronní generátor pracující do sítě o nekonečně velkém výkonu s konstantním napětím <math>U</math> [1].....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 3-6 Fázorový diagram synchronního generátoru pracujícího do sítě o nekonečně velkém výkonu s konstantním napětím <math>U</math> [1].....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 4-1 Princip kogeneračního zařízení spalovací turbíny [11].....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 4-2 Schéma fotovoltaického systému s možností ostrovního provozu [10].....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 4-3 Příklad zapojení kompenzátoru k fotovoltaické elektrárně s vlastním distribučním transformátorem [17].....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 4-4 Zjednodušené liniové schéma elektronického kompenzátoru [17].....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 4-5 Vektorový diagram v režimu kapacitního proudu [17] .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 4-6 Vektorový diagram v režimu induktivního proudu [17] .....</i>	<i>55</i>

*Obr. 4-7 Větrná elektrárna [18]..... 57*

*Obr. 4-8 Blokové schéma regulace větrné elektrárny [20] ..... 58*

*Obr. 4-9 Blokové schéma pro připojení asynchronního generátoru s kotvou nakrátko u větrné elektrárny [21]..... 59*

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 2-1 Vymezení kmitočtu v Hz pro pásma provozu[5]</i> .....	22
<i>Tab. 2-2 Parametry ES a jejich předávné výkony podle síťových charakteristik [1]</i> .....	29
<i>Tab. 2-3 Přípustné odchylky od jmenovitého napětí [1]</i> .....	31
<i>Tab. 2-4 Nabíjecí výkony venkovních vedení [1]</i> .....	38
<i>Tab. 2-5 Orientační nabíjecí výkony kabelových vedení [1]</i> .....	38
<i>Tab. 3-1 Přímé ovládání elektrických spotřebičů [7]</i> .....	42
<i>Tab. 3-2 Ovládání pro tarifní účely [7]</i> .....	43
<i>Tab. 3-3 Provozní energetické účely [7]</i> .....	43
<i>Tab. 3-4 Ovládání různých druhů osvětlení[7]</i> .....	43
<i>Tab. 3-5 Signální účely[7]</i> .....	44
<i>Tab. 4-1 Použití kogenerace a pohonné jednotky [11]</i> .....	49
<i>Tab. 4-2 Charakteristické vlastnosti druhů kogeneračních zařízení [11]</i> .....	49
<i>Tab. 4-3 Přiřazení pásma účinníku pro synchronní generátor [10]</i> .....	51
<i>Tab. 4-4 Přiřazení pásma účinníku pro asynchronní generátor [10]</i> .....	59

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Jednotka
$P_z$	zatížení při kmitočtu $f$	W
$P_{zn}$	zatížení při jmenovitém kmitočtu $f_n$	W
$f_n$	jmenovitý kmitočet	Hz
$f$	kmitočet	Hz
$\Delta P_z$	změna zatížení soustavy	W
$\Delta f$	změna (odchylka) kmitočtu	Hz
$K_z$	výkonové číslo zatížení	MW/Hz
$k_z$	výkonový součinitel zatížení	-
$K_g$	výkonové číslo generátoru	MW/Hz
$P_{gn}$	jmenovité zatížení generátoru	W
$k_g$	výkonový součinitel generátoru	-
$\Delta P_g$	změna zatížení generátoru	W
$K_{gv}$	výsledné výkonové číslo ekvivalentního generátoru	MW/Hz
$K_{gi}$	Výsledný výkonový součinitel generátorů	MW/Hz
$P_{gn}$	celkový jmenovitý výkon všech generátorů	W
$k_{gv}$	výsledný výkonový součinitel veškerých generátorů	-
$\Delta P$	celková změna zatížení	W
$\Delta P_r$	změna regulačního výkonu sekundární regulace	W
$\Delta P_i$	odchylka předávaného výkonu	W
$K_{si}$	výkonové číslo $i$ -té soustavy	MW/Hz
$P_i$	skutečné saldo předávaných výkonů	W
$P_{zi}$	plánované saldo	W
$f_z$	žádaný kmitočet	W
$\Delta P_b$	požadovaná změna výkonu bloku	MW
$P_{nv}$	nominální výkon bloku	MW
$\delta_{spr}$	statika primární regulace	%
RZPR	regulační záloha primární regulace	MW
RZSR	regulační záloha sekundárního regulátoru	MW/min
RZTR+	regulační záloha kladné terciární regulace	
RZTR-	regulační záloha záporné terciární regulace	

TR	terciární regulace	
RRTR+	regulační rozsah terciární regulace TR +	
RRTR-	regulační rozsah terciární regulace TR -	
$U_n$	jmenovité sdružené napětí	V
U	napětí	V
I	proud	A
a	převod transformátoru	-
$I_c$	činný proud	A
$I_j$	jalový proud	A
$\bar{I}$	fázor proudu	A
Z	podélná impedance vedení na jednotku délky	$\Omega/\text{km}$
R	rezistance vedení na jednotku délky	$\Omega/\text{km}$
X	induktivní reaktance vedení na jednotku délky	$\Omega/\text{km}$
$\Delta U$	úbytek napětí na vedení	V
$e_p$	přídavné napětí	V
$i_p$	vyrovnávací proud	A
$\bar{U}$	fázové napětí	V
P	činný výkon	W
Q	jalový výkon	VAr
$\delta$	fázový posun mezi napětími	°
$Q_{2z}$	požadovaný jalový výkon	VAr
$\Delta U_z$	požadovaná hodnota úbytku napětí	V
$Q_k$	kompenzační výkon	VAr
$\Delta Q_k$	změna kompenzačního výkonu	VAr
$\Delta Q_t$	jalový příkon transformátoru	VAr
$\Delta Q_o$	jalové ztráty naprázdno u transformátoru	VAr
$S_n$	jmenovitý výkon	VA
S	skutečné zatížení transformátoru	VA
$e_k$	poměrné napětí nakrátko	%
$U_o$	sekundárního napětí vn transformátoru	V
$U_z$	základní hodnota napětí závisující na nastavení distribuční sítě	V
$I_z$	zatěžovací proud	A
k	činitel kompaudace	-

$X_S$	synchronní reaktance synchronního generátoru	$\Omega$
$E$	vnitřní napětí synchronního generátoru	V
$\Delta u$	relativní změna napětí	%
$k_{i\max}$	činitel zapínacího rázu	-
$I_a$	rozběhový proud	A
$I_{nG}$	jmenovitý proud generátoru	A
$P_{lt}$	flikr	-
$\cos \varphi$	účinník	-
$\bar{i}_p$	fázor vyrovnávacího proudu	A
$\Delta Q$	změna jalového výkonu	Var
vvn	velmi vysoké napětí	
vn	vysoké napětí	
nn	nízké napětí	
ES	elektrizační soustava	
HDO	hromadné dálkové ovládání	
PDS	Provozovatel lokální distribuční sítě	



# 1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY REGULAČNÍCH SYSTÉMU

V prvopočátcích elektrifikace koncem devatenáctého století se užilo hnacího motoru (parního stroje, turbíny) pro pohon dynama. To vytvářelo stejnosměrný proud, který byl vyveden až ke spotřebičům. S touto prvotní soustavou se paralelně spojovaly obdobné soustavy, což mělo za následek technické problémy s regulací napětí a rozdělování výkonů mezi jednotlivé spotřebiče. S příchodem střídavého proudu a transformátoru se mohla elektrická energie přenášet na velké vzdálenosti. Tím však přibyly technické problémy týkající se:

- synchronizace generátorů;
- kombinovaná výroba elektrické energie a tepla;
- regulace kmitočtu;
- rozdělení sítí na přenosové a rozvodné;
- rozvoj výstavby elektráren a postupné navyšování jejich vyvedených výkonů

## 1.1 Elektrizační soustava

Elektrizační soustava (ES) tvoří skladbu celého komplexu pro:

- výrobu elektrické energie (na bázi přeměn jednotlivých forem energie na energii elektrickou);
- přenos a rozvod elektrické energie (zahrnuje přenosové a rozvodné sítě kabelové i venkovní sítě včetně transformátorů a zařízení rozvoden a další zařízení k účelu dopravy a přenosu elektrické energie až k odběratelům);
- spotřebiče elektrické energie (probíhá v nich přeměna elektrické energie například na teplo, mechanickou práci, světlo atd). [1]

Výroba elektrické energie je pokryta v současné době převážně uhelnými elektrárnami, jež pracují na principu spalování uhlí v kotli a uvolnění tepla, které ohřívá vodu a mění její skupenství z kapalného na plynné, tedy na páru. Uvolněné teplo je následně přeměněno v turbíně na mechanickou práci. Turbína bývá spojena přes spojku s alternátorem v němž se mění mechanická vstupní energie na energii elektrickou. Na obdobné podstatě fungují i jaderné elektrárny, ale zde se na začátku procesu mění chemická energie na tepelnou pomocí štěpení jader izotopu uranu  $^{235}\text{U}$  v reaktoru, jenž je v primárním okruhu. Dalšími výrobny elektrické energie bývají například vodní, paroplynové, geotermální, fotovoltaické a větrné elektrárny. Výroby elektrické energie tedy můžeme klasifikovat podle vyvedených výkonů a podle struktury, přičemž podle výkonu mohou dodávat elektrickou energii do rozvodné sítě větrné, fotovoltaické, vodní a další elektrárny. Přenosová soustava má za úkol přenášet velké výkony na velké vzdálenosti z výroben elektrické energie do distribuční soustavy přes transformátory. Normalizované jmenovité napětí je dimenzováno v přenosových soustavách na hodnoty 400 kV, 220 kV, 110 kV o jmenovitém kmitočtu 50 Hz, vedení jsou střídavá (trojfázová) s uzlem uzemněným přímo v ČR. [1]

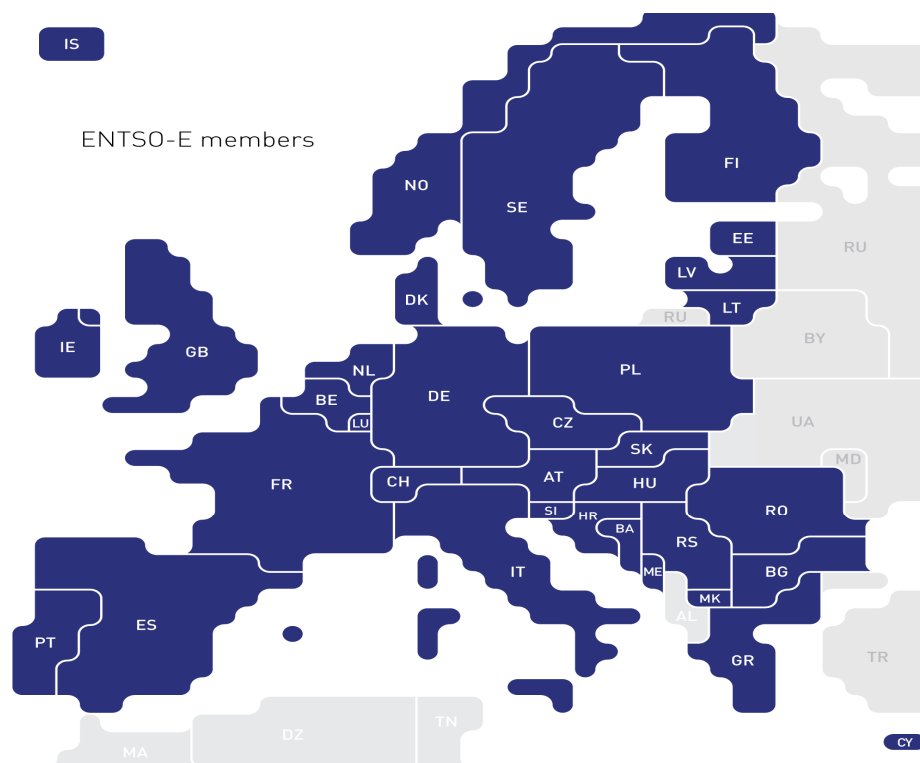
Rozvodná (distribuční) soustava je charakterizována o používaných jmenovitých napěťových hladinách 110 kV (vvn), 35 kV (vn), 22 kV (vn), 10 kV(vn), 6 kV (vn), 0,4 kV (nn) a 0,23 kV (nn) o jmenovitém kmitočtu 50 Hz. Distribuční soustava má za úkol rozvést elektrickou energii až na hladinu nízkého napětí. Transformátory a vn/nn slouží k rozvodu elektrické energie až k samotným spotřebitelům. Nedílnou součástí provozu ES jsou tedy i jednotlivé prvky transformátory, generátory, tlumivky, spínače, odpojovače a další, které bývají propojeny v jednu komplexní síť, ve které figurují jako větve. Uzlové body ve zmiňované síti tyto větve spojují. Uzlové body jsou tedy přípojnice v elektrárnách, rozvodnách a u odběratelů elektrické energie. ES je možno řešit jak v ustáleném, tak v přechodovém stavu.[1]

### 1.1.1 Zvláštnosti provozu ES

V ES jsou veškeré články soustavy propojeny na vzdálenosti i tisíce kilometrů a navzájem se ovlivňují. ES můžeme charakterizovat jako jeden nedílný celek. Elektrická energie se nedá skladovat, z toho vyplývá, že vyrobená energie musí být ihned spotřebována, a proto musí být výroba i spotřeba elektrické energie v bilanční rovnováze. Pokud dojde ke snížení spotřeby elektrické energie, ať už v důsledku poklesu výroby (např.: z důvodů havárie v elektrárně) nebo kvůli nižší poptávce u spotřebitelů, musí se omezit výroba elektrické energie. Z tohoto důvodu se sníží využití výrobního bloku elektrické energie. Například při vypínání zkratů je porušena stabilita soustavy ve zlomcích sekund nebo v několika málo sekundách dochází k dočasným přechodovým jevům v ES. Aby tedy byla dodržena stabilita soustavy, je zapotřebí ji opatřit automatickými zařízeními, například vypínači, automatickými regulátory, reléovými ochranami, ochranami při zemním spojení, ochranami generátorů, transformátorů, wattovými a dalšími automatickými zařízeními, které korigují správný chod soustavy z hlediska rychlého průběhu přechodových dějů, kde vlnové procesy bývají v řádu milisekund až mikrosekund. Při rozvoji ES se musí předpovídat do budoucna (v požadovaném čase) růst spotřeby elektrické energie a zajistit tak spolehlivé zásobování koncových odběratelů energií v patřičné kvalitě. [1]

### 1.1.2 Spojené elektrizační soustavy

Na území ČR provozuje přenosovou soustavu společnost ČEPS, a.s., která dispečersky řídí provoz a řízení přenosové soustavy a systémových zdrojů. Zajišťuje mezinárodní spolupráci prostřednictvím propojovacích vedení s elektrizačními soustavami sousedních zemí. ENTSO - E (Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny) tvoří asociaci synchronně propojených přenosových soustav 34 zemí v Evropě. [2][3]



Obr. 1-1 Asociace ENTSO-E synchroně propojených přenosových soustav v Evropě [4]

Mezi výhody paralelní spolupráce jednotlivých ES patří zmenšení potřebného rezervního výkonu v jednotlivých ES, zvýšení kvality dodávané elektrické energie z hlediska stability kmitočtu, výměny výkonů a energie při současném snížení potřebných investičních nákladů, větší zabezpečení dodávky el.energie v jednotlivých ES. K dalším výhodám se řadí vzájemné výměny elektrické energie při oboustranné výpomoci nebo plánované dodávky elektrické energie. Do kompetence dispečinků patří rozdělování činných a jalových výkonů výroby elektrické energie mezi jednotlivé elektrárny, regulace kmitočtu a mezistátní výměny výkonů, regulace činných a jalových výkonů v přenosových a rozvodných sítích, regulace napětí, řízení všech spínaných pochodů v ES, likvidace vzniklých poruch v ES, plánované vypínání jednotlivých elektrárenských bloků a vedení z důvodů provedení oprav a zařazení rezervních výkonů, řízení provozu vodních elektráren, bezpečnost ochran a automatik. Nejdůležitějším požadavkem při řízení ES je spolehlivost dodávky elektrické energie o patřičném výkonu, kvalita dodávané energie o požadovaném kmitočtu, napětí, symetrii a harmonickém průběhu se zřetelem na hospodárnost výroby, přenosu a rozvodu elektrické energie. [1]

## 2 ZPŮSOBY REGULACE ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY

### 2.1 REGULECE KMITOČTU A PŘEDÁVANÝCH VÝKONŮ

Při dodávce elektrické energie je zapotřebí, aby byl dodržen jmenovitý kmitočet  $f_n$  50 Hz, což je jeden z ukazatelů kvality dodávky elektrické energie v České republice. Na jmenovitý kmitočet bývají konstruovány také indukční motory, které jsou pro připojení do sítě dimenzovány na tento parametr. Při poklesu nebo vzrůstu kmitočtu sítě dochází ke zhoršení provozních vlastností spotřebičů, případně k jejich destrukci.

S rostoucím výkonem ES jsou kladeny požadavky na regulaci kmitočtu z pohledu zabezpečení výroby a okamžité spotřeby elektrické energie, a to i při vzájemném paralelním propojení jednotlivých ES, kde se musí regulovat také toky výkonů přes spojovací vedení elektrizačních soustav. Norma ČSN 330128 (Elektrotechnické předpisy jmenovité kmitočty od 0,1 do 10 000 Hz a jejich dovolené odchylky), stanovuje mezní odchylky kmitočtu  $\pm 1\%$  z jmenovitého kmitočtu, čili v šířce intervalu  $\langle 49,5; 50,5 \rangle$  Hz. [1]

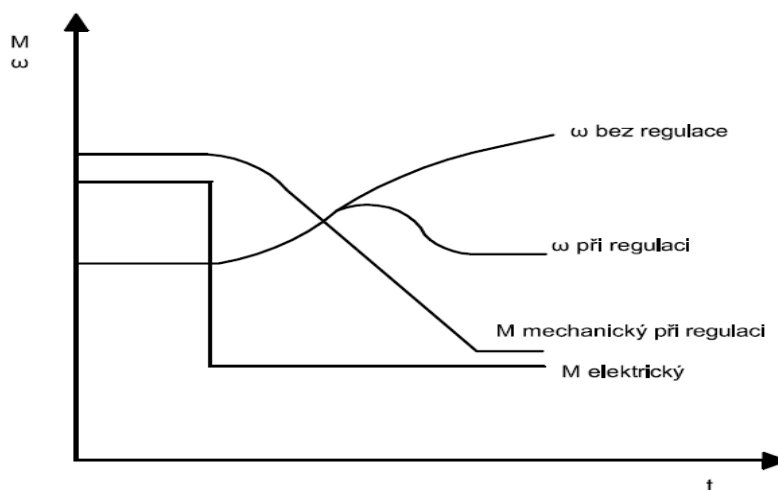
Tab. 2-1 Vymezení kmitočtu v Hz pro pásma provozu[5]

Typ elektrárny	Uhelné	JE		VE	PVE		Paro- plynové
		EDU	ETE		Turbína	Čerpání	
Provoz							
Normální bez omezení	48.5-50.5	48.5-50.5		48.5-50.5	48.5-50.5	49.5-50.5	48.5-51.5
Časově omezen	46-48.5 50.5-53	47.5-48.5 50.5-52.5	47.9-48.5 50.5-51.5	46-48.5 50.5-53	46-48.5 50.5-53	49-49.5 50.5-52(53)	48-48.5 51.5-52
Nepřípustný	$f > 53$ $f < 46$	$f > 52.5$ $f < 47.5$	$f > 51.5$ $f < 47.9$	$f > 53$ $f < 46$	$f > 53$ $f < 46$	$f > 52(53)$ $f < 49$	$f > 52$ $f < 48$
Automatické odpojení od ES	$f > 53$ $f < 47.5$	$f > 52.5$ $f < 47.9$	$f > 51.5$ $f < 47.9$	$f > 50.2(51.5)$ $f < 47.5$	$f > 50.2(51.5)$ $f < 47.5$	$f > 52(53)$ $f < 49.8-49.2$	$f > 52$ $f < 48$

#### 2.1.1 Příčiny změn kmitočtu

Jedna z možných příčin změn kmitočtu může nastat, když se dočasně změní zatížení v ES. To se projeví na hřídeli turbíny tak, že nastane nevyváženost mezi mechanickým a elektrickým momentem. Nevyváženost momentů je hrazena setrvačnými hmotami turbosoustrojí, rovnováha nastane po skončení elektromechanického přechodového děje. Při skokovém zvýšení zatížení generátoru dojde k poklesu otáček turbíny, tím se změní kmitočet a je potřeba zvýšit přísun energie do turbíny, aby bylo s časovou prodlevou bylo docíleno jmenovitého kmitočtu nebo jeho dovolené odchylky. K tomu se užívá primárního regulátoru otáček převážně typu P. Primární regulátor otáček umí vyhodnotit i situaci, kdy se skokově sníží zatížení generátoru. V tomto případě se zvýší otáčky turbíny z důvodů přebytku mechanického momentu a sníží se v patřičném poměru přísun energie do turbíny, aby nastala rovnováha momentů. Z charakteristiky proporcionálního regulátoru můžeme konstatovat, že otáčky se sice ustálí na požadované hodnotě, ale jsou rozdílné od původních. Regulátor tedy pracuje s časovou prodlevou danou jeho pásmem necitlivosti.[1]

V obr. 2-1 je znázorněna situace skokového snížení zatížení generátoru, dále závislost mechanického momentu na otáčkách a nezávislost elektrického momentu na otáčkách.



Obr. 2-1 Snížení zatížení generátoru [1]

Dle denního diagramu zátížení se změny zátížení dají rozčlenit:

- A) Pomalé změny zátížení – rychlost těchto změn bývá od 0,5 % do 3,5 % maximálního zátížení ES za 1 minutu podle rytmu denního diagramu zátížení.
- B) Nepravidelné nebo nahodilé bývají vytvořeny
  1. připojováním nebo odpojováním spotřebičů s velkými odběry, kýváním rotorů, necitlivostí regulátorů. Zapříčiňují změny kmitočtu od 0,005 -0,03 Hz s periodou 1 až 35 s Charakterizují se jako dýchání nebo šum sítě.
  2. nárazovým zátížením spotřebičů s velkými odběry (elektrické pece, těžní stroje, válcovací stolice atd) Změny kmitočtu bývají od 0,03 do 0,1 Hz s periodou 35 až 240 s i více. Změny zátížení dosahují 1 až 2,5 % (někdy až 5 %) maximálního zátížení ES při různé rychlosti.[1]

### 2.1.2 Kmitočtové charakteristiky zátížení

Kmitočtová charakteristika zátížení je definována jako změna zátížení ES v závislosti na kmitočtu.

$$P_z = P_{zn} \left( \frac{f}{f_n} \right)^{k_z} \quad (\text{W}) \quad (2.1)$$

$P_z$  - zátížení při kmitočtu  $f$  (W)

$P_{zn}$  - zátížení při jmenovitém kmitočtu  $f_n$  (W)

$f_n$  - jmenovitý kmitočet (Hz)

$f$  - kmitočet (Hz)

$k_z$  - výkonový součinitel zátížení; zjišťuje se pomocí měření, bývá proměnlivý v jednotlivých dnech i v roce. Nepatrné změny kmitočtu od  $f_n$  lze nahradit přímkou se směrnici.[1]

$$\left. \frac{\partial P_z}{\partial f} \right|_{f=f_n} = k_z \cdot \frac{P_{zn}}{f_n} \cong \frac{\Delta P_z}{\Delta f} = K_z \text{ (MW/Hz)} \quad (2.2)$$

$\Delta P_z$  - změna zatížení soustavy (W)

$\Delta f$  - změna (odchylka) kmitočtu (Hz)

$K_z$  - výkonové číslo zatížení; udává, o kolik se změní zatížení soustavy v řádu MW při změně kmitočtu o 1 Hz

Z předchozí rovnice (2.2) vyplývá vztah pro výkonový součinitel zatížení ( $k_z$ ). Výkonový součinitel zatížení je směrnici přímky, jež definuje poměrnou změnu zatížení na poměrné změně frekvence v blízkosti jmenovitého kmitočtu.

$$k_z = \frac{\frac{\Delta P_z}{\Delta f}}{\frac{P_{zn}}{f_n}} = \frac{\Delta P_z \cdot f_n}{P_{zn} \cdot \Delta f} \text{ (-)} \quad (2.3)$$

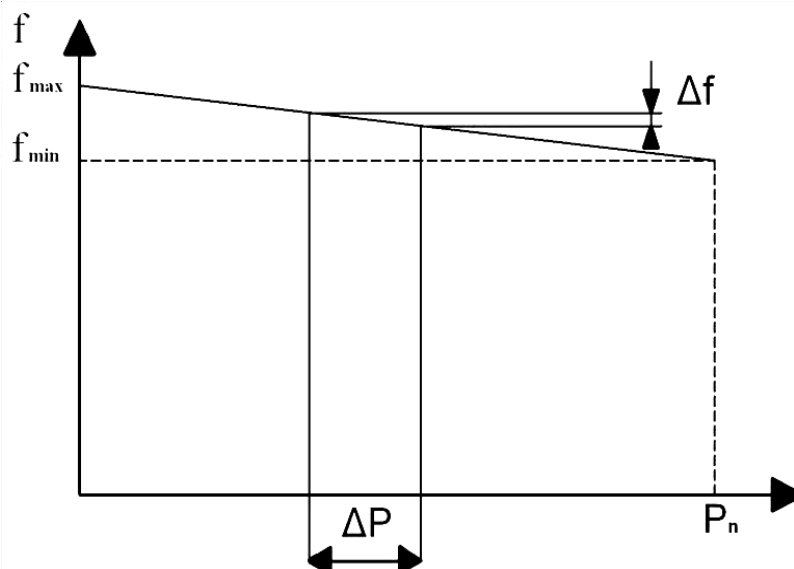
Při uvedených hodnotách v ES kde  $P_{zn} = 400$  (MW),  $\Delta P_z = 12$  (MW),  $\Delta f = 0,6$  (Hz), následným dosazením do vzorce pro výkonové číslo zatížení obdržíme  $K_z = 20$  (MW/Hz). Z toho zjistíme, že při poklesu frekvence o 1 Hz dojde ke snížení odběru v ES o 20 MW. Tento úkaz označujeme jako samoregulační účinky zátěže, tedy při snížení kmitočtu se sníží i odebíraný výkon dle hodnoty výkonového čísla zatížení. [1]

### 2.1.3 Primární regulace kmitočtu

Primární regulátory výkonu regulují výkony turbíny přívodem energie do turbíny. Podle potřeb je výkon turbíny regulován tak, aby vyhověl změnám zatížení v elektrické síti. Regulátory pracují tak, aby udrželi otáčky turbíny na jmenovité hodnotě nebo alespoň na hodnotě blízké hodnotě jmenovité.

#### 2.1.3.1 Kmitočtová charakteristika generátoru

Primární regulátor kmitočtu (proporcionální) má jistou necitlivost (okolo 0,4 %), již zanedbáváme. Nerovnoměrností regulátoru je rozdíl mezi chodem naprázdno a chodem při jmenovitém zatížení. Statická charakteristika je na obr. 2-2. [1]



Obr. 2-2 Statická charakteristika [1]

$K_g$  - výkonové číslo generátoru, které charakterizuje velikost změny zátěže generátoru při změně kmitočtu o 1 Hz.

$\Delta P_g$  - změna zatížení generátoru (W)

$$K_g = -\frac{\Delta P_g}{\Delta f} \quad (\text{MW/Hz}) \quad (2.4)$$

$$k_g = -\frac{\Delta P_g \cdot f_n}{P_{gn} \cdot \Delta f} = K_g \cdot \frac{f_n}{P_{gn}} \quad (-) \quad (2.5)$$

$P_{gn}$  - jmenovité zatížení generátoru (W)

$k_g$  - výkonový součinitel generátoru v poměrných jednotkách je podílem poměrné změny zatížení k poměrné změně kmitočtu, například při uvedené hodnotě  $k_g = 30$  lze říci, že při změně zatížení o 30 % dojde ke změně kmitočtu o 1 %; tyto úvahy platí pouze pro generátor pracující do vlastní izolované soustavy.

Výkonový součinitel generátoru i výkonové číslo generátoru bývají určeny pouze v rozsahu zatížení generátoru do jmenovitého výkonu; dosáhne-li zatížení generátoru jmenovité hodnoty, generátor nelze více zatěžovat. Při dalším následném poklesu kmitočtu bude tedy  $\Delta P_g = 0$  (W),  $K_g = 0$  i  $k_g = 0$ , aby nedošlo k přetížení generátoru.

Většinou v elektrizační soustavě spolupracuje více generátorů, pak pro celkovou změnu zatížení generátorů platí rovnice (2.6):

$$\Delta P_g = \sum_{i=1}^m \Delta P_{gi} = \Delta P_{g1} + \Delta P_{g2} + \Delta P_{gm} \quad (\text{W}) \quad (2.6)$$

Úpravou při dosazení z rovnice (2.4) za  $P_{gi} = -\Delta f \cdot K_{gi}$  do rovnice (2.6) obdržíme (2.7):

$$\Delta P_g = -\Delta f \cdot \sum_{i=1}^m K_{gi} = -\Delta f \cdot K_{gv} \quad (\text{W}) \quad (2.7)$$

$K_{gv}$  - je výsledné výkonové číslo ekvivalentního generátoru (MW/Hz), jež je součtem výkonových čísel jednotlivých generátorů, tedy při rostoucím počtu generátorů pracujících v ES roste i výsledné  $K_{gv}$  a dochází k menším odchylkám kmitočtu pro  $\Delta P_g = \text{konst}$ .

$$\sum_{i=1}^m K_{gi} = K_{gv} \quad (\text{MW/Hz}) \quad (2.8)$$

Celková změna zatížení se rozdělí poměrově mezi jednotlivé generátory podle jejich výkonových čísel, přičemž generátor s větším výkonovým číslem převezme větší zatížení, než generátor s menším výkonovým číslem. Generátor s charakteristikou  $K_g \rightarrow \infty$  převezme celou změnu výkonu  $P_g$ , což je astatická regulace kmitočtu, přičemž kmitočtová charakteristika je rovnoběžná s osou P. Výsledný výkonový součinitel generátorů určíme úpravou rovnice (2.5) na tvar [1]:

$$K_{gi} = \frac{k_{gi} \cdot P_{gni}}{f_n} \quad (\text{MW/Hz}) \quad (2.9)$$

$P_{gn}$  - celkový jmenovitý výkon všech generátorů (W)

$$P_{gn} = \sum_{i=1}^m P_{gni} \quad (\text{W}) \quad (2.10)$$

Následným dosazením rovnice (2.9) do rovnice (2.7) dostáváme pro celkovou změnu zatížení veškerých generátorů tvar rovnice:

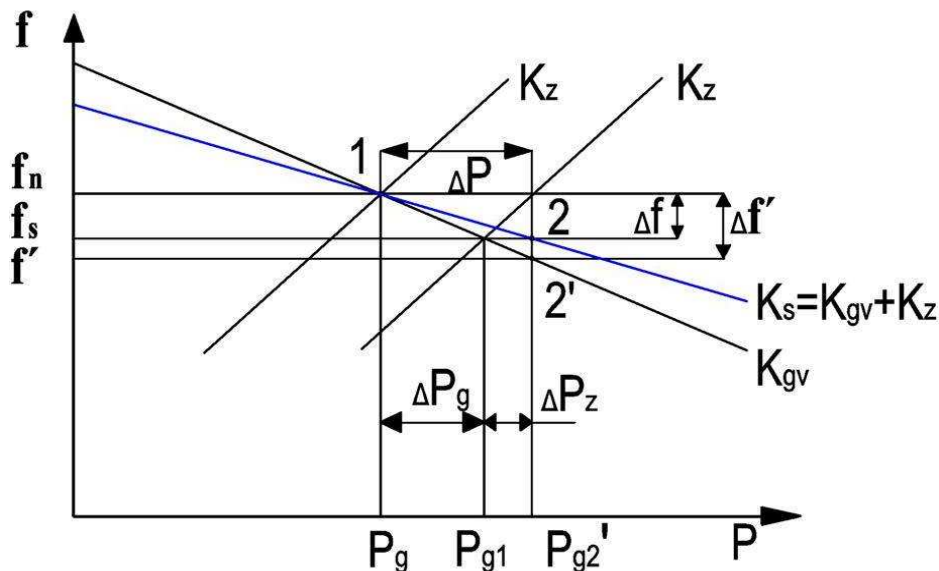
$$\Delta P_g = \frac{-\Delta f}{f_n} \cdot \sum_{i=1}^m k_{gi} \cdot P_{gni} = \frac{-\Delta f}{f_n} \cdot P_{gn} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m k_{gi} \cdot P_{gni}}{P_{gn}} = \frac{-\Delta f}{f_n} \cdot P_{gn} \cdot k_{gv} \quad (\text{W}) \quad (2.11)$$

Pro výsledný výkonový součinitel z rovnice (2.11) obdržíme:

$$k_{gv} = \frac{\sum_{i=1}^m k_{gi} \cdot P_{gni}}{P_{gn}} \quad (-) \quad (2.12)$$

### 2.1.3.2 Statická charakteristika ES

K přírůstu výroby výkonu dojde při poklesu kmitočtu o  $\Delta f$ , na straně spotřeby. Následně dojde k poklesu zatížení o  $\Delta P_z$ . Celou situaci popisuje obr. 2-3.



Obr. 2-3 Statická charakteristika ES [1]

Při zatížení  $P_{g1}$  a  $f_n$  je ustálený stav v bodě 1, následně dojde ke změně zatížení odběru o  $\Delta P$ . Dle statické charakteristiky ekvivalentního generátoru  $K_{gv}$  by převzal tuto celkovou změnu zatížení tento generátor a došlo by k ustálení v bodě 2' při zatížení  $P'_{g2}$  a kmitočtu  $f'$ , čemuž odpovídá i rovnice (2.7). Podle rovnice  $\Delta P_z = \Delta f \cdot K_z$  (2.2), tedy při snížení kmitočtu, dochází k



odlehčení soustavy, a to je pozitivní k stabilitě chodu soustavy. Celkovou změnu zatížení  $\Delta P$  při poklesu kmitočtu a zatížení definuje rovnice (2.13). [1]

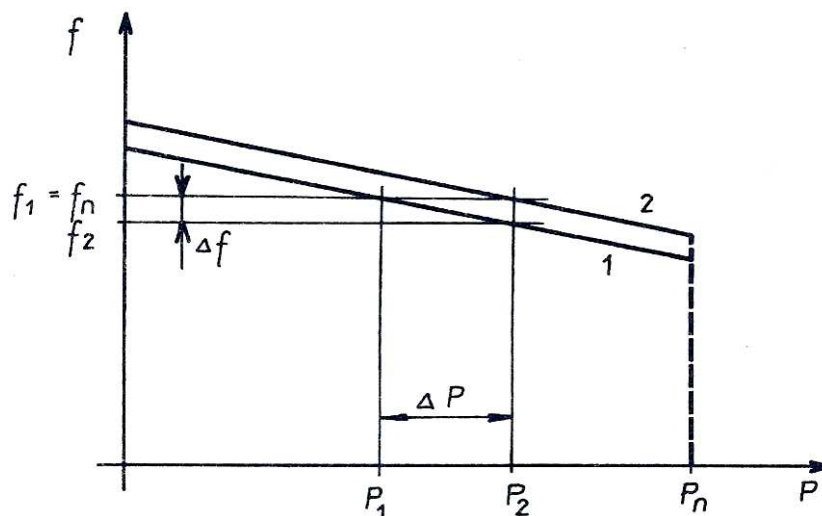
$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_g + (-\Delta P_z) \\ \Delta P_g &= -\Delta f \cdot K_{gv} \quad \Delta P_z = \Delta f \cdot K_z \quad (W) \quad (2.13) \\ \Delta P &= -\Delta f \cdot K_{gv} - \Delta f \cdot K_z = -\Delta f \cdot (K_{gv} + K_z) = -\Delta f \cdot K_s\end{aligned}$$

$K_s$  - výkonové číslo soustavy (MW/Hz)

Na obr. 2-3 se přímka  $K_s$  označuje jako síťová charakteristika ES a má menší sklon než kmitočtová charakteristika generátoru, z tohoto důvodu je pokles kmitočtu menší pouze o hodnotu  $\Delta f$ . Je to způsobeno kmitočtovou závislostí zatížení, jež samoregulačním účinkem pomáhá zmenšit kolísání kmitočtu. Výkonové číslo soustavy se určuje přímým měřením, při odpojení zatížení se měří změny kmitočtu. [1]

### 2.1.4 Sekundární regulace kmitočtu v ES s volnými toky výkonů

V obr. 2-4 přímka 1 znázorňuje charakteristiku primárního regulátoru. Při zatížení  $P_1$  je hodnota kmitočtu  $f_n$ , při změně zatížení na hodnotu  $P_2$  dojde k celkové změně zatížení o  $\Delta P$ , následně se změní i kmitočet, který klesne o  $\Delta f$  až na hodnotu  $f_2$ . Pro dosažení na hodnotu  $f_n$  je potřeba adekvátně přizpůsobit plnění turbíny pomocí změny otáček regulátoru a to buď dálkově nebo mechanicky. Tímto úkonem se docílí rovnoběžného posunutí statické charakteristiky primárního regulátoru v obr. 2-1.4 přímka 2, následně touto regulací dojde k odstranění nežádoucí výchylky kmitočtu. Velikost posunutí bývá do regulačních elektráren vysílána z dispečinku a je úměrná odchylce kmitočtu a výkonu od předem smlouvené hodnoty. Tento princip regulace byl používán v samostatně pracujících ES, kde v malých ES stačila jedna elektrárna fungující s astatickou charakteristikou pro požadovanou stálost kmitočtu. Přenosová vedení mezi zdroji a spotřebou pracovala v režimu volných toků výkonů, vázána na maximální proudové zatížení přenosových vedení, či udržením stability a hospodárným udržením výroby. Sekundární regulace tedy byla užita pro udržení  $f_n$ .



Obr. 2-4 princip působení sekundární regulace kmitočtu [1]

V dnes nepoužívaném systému regulace ARF bylo využito dvou základních regulačních principů pro sekundární regulaci kmitočtu:

A) Regulace podle okamžitých odchylek kmitočtu – proporciální P regulátor s kritériem.[1]

$$\Delta P_r = -k \cdot \Delta f \text{ (W)} \quad (2.14)$$

B) Regulace podle integrálu okamžitých odchylek kmitočtu - integrální I regulátor s kritériem

$$\Delta P_r = -k \cdot \int \Delta f \cdot dt \text{ (W)} \quad (2.15)$$

Sekundární regulátory kmitočtu pracují s větším zpožděním než regulátory primární. V principu sekundární regulace kmitočtu jde o posunutí kmitočtové charakteristiky  $f = F(P)$ , sklon charakteristiky je určen nastavením primárního regulátoru otáček. Úkolem sekundární regulace pro udržení  $f_n$  je tedy snížení množství páry vstupující do turbíny, nebo zvýšení množství páry vstupující do turbíny. Po skončení jednoho z těchto dvou procesů dojde k požadovanému posunu charakteristiky.[1]

### 2.1.5 Regulace kmitočtu a předávaných výkonů podle síťových charakteristik

Výkonové saldo je algebraickým součtem exportovaných a importovaných výkonů mezi sousedními ES. Sekundární regulátory mají regulační kritérium popsané rovnicemi (2.16) a (2.17).

$$\Delta P_i = -K_{si} \cdot \Delta f \text{ (W)} \quad (2.16)$$

$\Delta P_i$  - odchylka předávaného výkonu (W)

$K_{si}$  - výkonové číslo i-té soustavy (MW/Hz)

$$\Delta P_i = P_i - P_{zi} \text{ (W)} \quad (2.17)$$

$P_i$  - skutečné saldo předávaných výkonů

$P_{zi}$  - plánované saldo

$$\Delta f = f - f_z \text{ (Hz)} \quad (2.18)$$

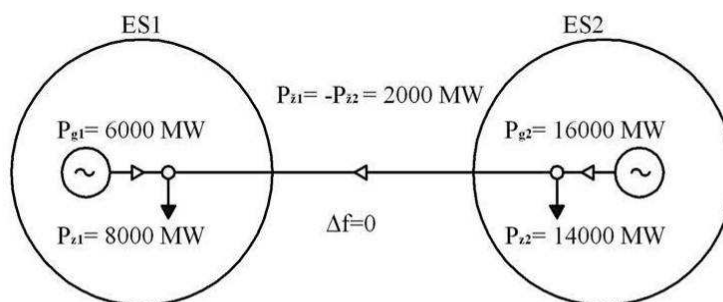
$f_z$  - žádaný kmitočet

Předávaný výkon (saldo) se mění při odchylce kmitočtu při tomto principu regulace podle rovnice (2.16). Klesne-li kmitočet a  $\Delta f$  je menší jak 0, dojde k nárůstu předávaného výkonu, což zabezpečuje v průběhu sekundární regulace výpomoc ostatních ES soustavě postižené změnou zatížení. Po skončení regulace je změna předávaných výkonů rovna 0 při změně kmitočtu rovno nule, pak naroste výroba v ES, kde došlo ke změně zatížení. Tuto situaci 2 ES znázorňuje Tabulka 2-2, Obr. 2-5 a Obr. 2-6.

Tab. 2-2 Parametry ES a jejich předávané výkony podle síťových charakteristik [1]

ES1	ES2
$P_{z1} = 8000 \text{ MW}$	$P_{z2} = 8000 \text{ MW}$
$P_{g1} = 6000 \text{ MW}$	$P_{g2} = 6000 \text{ MW}$
$K_{s1} = 4000 \text{ MW/Hz}$	$K_{s2} = 4000 \text{ MW/Hz}$
$P_{\dot{z}1} = +2000 \text{ MW}$ (dovoz el.energie)	$P_{\dot{z}2} = -2000 \text{ MW}$ (vývoz el.energie)

Na Obr. 2-5 je zobrazena počáteční situace při plánovaném saldu 2000 MW z ES2 do ES1 [1].



Obr. 2-5 Plánované saldo z ES2 do ES1 [1]

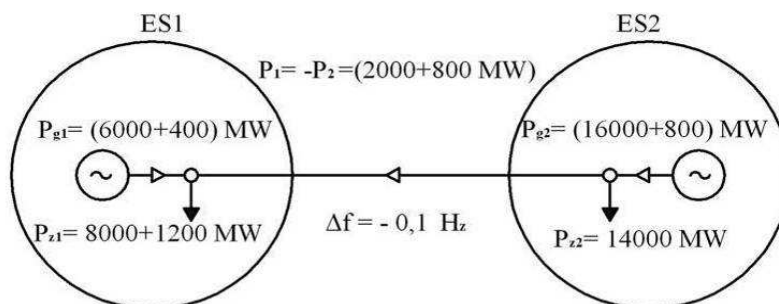
V elektrizační soustavě 1 (ES1) náhle dojde ke zvýšení zatížení o  $\Delta P = 1200 \text{ MW}$ , podle rovnic (2.13) dojde k snížení kmitočtu reakcí primárních regulátorů.

$$\Delta f = -\frac{\Delta P}{K_{s1} + K_{s2}} = -\frac{1200 \text{ MW}}{12000 \text{ MW} \cdot \text{Hz}^{-1}} = -0,1 \text{ (Hz)} \quad (2.19)$$

Následně reakcí primárních regulátorů se zvýší výroba v jednotlivých ES o:

$$\begin{aligned} ES1: \Delta P_1 &= -\Delta f \cdot K_{s1} = 0,1 \text{ Hz} \cdot 4000 \text{ MW} \cdot \text{Hz}^{-1} = 400 \text{ (MW)} \\ ES2: \Delta P_2 &= -\Delta f \cdot K_{s2} = 0,1 \text{ Hz} \cdot 8000 \text{ MW} \cdot \text{Hz}^{-1} = 800 \end{aligned} \quad (2.20)$$

Toky činných výkonů se rozdělí podle obr 2-6 po skončení primární regulace.



Obr. 2-6 rozdělení toku činných výkonů po skončení primární regulace [1]

Mezi dvěma ES došlo k neplánované zvýšené výměně výkonů o 800 MW a k poklesu kmitočtu o  $\Delta f = -0,1 \text{ Hz}$ . Sekundární regulace následně dorovná odchylky.

$$\begin{aligned} ES1: \Delta P_1 &= P_1 - P_{z1} = 2800 \text{ MW} - 2000 \text{ MW} = 800 \text{ MW} \text{ (zvýšený dovoz)} \\ ES2: \Delta P_2 &= P_2 - P_{z2} = -2800 \text{ MW} - (-2000 \text{ MW}) = -800 \text{ MW} \text{ (zvýšený vývoz)} \end{aligned} \quad (\text{MW}) \quad (2.21)$$

Elektrizační soustava 2 (ES2) převzala během nárazového zatížení v ES1 rázový výkon 1200 MW. Celý proces pak skončí současným působením sekundárních regulací v obou ES, přičemž soustava, v níž došlo ke zvýšení zatížení, dojde ke zvýšení výroby elektrické energie, aby v dané ES byla dosažena rovnováha mezi spotřebou a výrobou el.energie. [1]

### 2.1.6 Některé podpůrné služby (PpS) používané v přenosových soustavách

Primární regulace kmitočtu bloku (PR) - označována jako lokální automatická funkce řízena primární regulací. V principu jde o přesně definovanou změnu výkonu elektrárenského bloku danou k odchylce frekvence od požadované hodnoty. Je charakterizována regulační rovnicí:

$$\Delta P_b = -\frac{100}{\delta_{spr}} \cdot \frac{P_{nv}}{f_n} \cdot \Delta f \quad (\text{W}) \quad (2.22)$$

$\Delta P_b$  - požadovaná změna výkonu bloku (MW)

$P_{nv}$  - nominální výkon bloku (MW)

$\Delta f$  - odchylka frekvence od zadané hodnoty (Hz)

$\delta_{spr}$  - statika primární regulace (%)

$f_n$  - zadaná frekvence (obvykle jmenovitá 50 Hz)

Požadovaná regulační záloha (RZPR) musí být poskytovatelem Pps primární regulace zajištěna do 30 sekund od okamžiku vzniku odchylky kmitočtu. Při změně kmitočtu o 0,2 Hz od zadané hodnoty je maximální RZPR uvolňována (platí pro bloky do 300 MW). Pro bloky nad 300 MW je RZPR uvolňována při  $\Delta f = 0,1$  Hz od zadané hodnoty. Minimální RZPR distribuována z jednoho bloku je 3 MW.

#### 2.1.6.1 Sekundární regulace P bloku (SR)

Sekundární regulace P bloku (SR) je postup změny hodnoty výkonu regulovatelného elektrárenského bloku tak, jak je požadováno sekundárním regulátorem kmitočtu a saldem předávaných výkonů. Použití regulační zálohy sekundárního regulátoru (RZSR) je dáno algoritmem sekundárního regulátoru dispečinku ČEPS. Velikost RZSR bloku musí být zrealizována poskytovatelem PpS sekundární regulace P<sub>b</sub> bloku danou rychlostí, a to do 10 minut od požadavku, přičemž rychlost změny RZSR bloku je 2MW/min. Minimální velikost RZSR distribuována na jednom bloku je 10 MW při platnosti podmínky:

$$RZSR = \frac{1}{2} \cdot RRSR \quad (2.23)$$

RRSR – regulační rozsah sekundárního regulátoru

#### 2.1.6.2 Terciární regulace P bloku (TR)

Terciární regulace P bloku (TR) je (točivá) regulace P<sub>b</sub> bloku je založena na změně výkonu bloku podle požadavku poslaného z dispečinku ČEPS. Rozlišujeme pro zvýšení výkonu zálohu (RZTR+) a pro snížení výkonu zálohu (RZTR-). Velikost regulační zálohy bloku

musí být zrealizována do 30 minut od požadavku poskytovatelem PpS terciární regulací P bloku, přičemž blok připojený k regulátoru ČEPS je 10MW při platnosti podmínky:

$$\begin{aligned} RZTR- &= RRTR- \\ RZTR+ &= RRTR+ \end{aligned} \quad (2.24)$$

$RRTR+$  je regulační rozsah  $TR+$

$RRTR-$  je regulační rozsah  $TR-$

Minimální rychlost změny výkonu jsou 2 MW/min, maximální velikost poskytované TR na jednom bloku nesmí překročit 100 MW. [6]

## 2.2 REGULACE NAPĚTÍ

Při změnách zatížení v ES se mění napětí, proto je nutné udržet jmenovitá napětí v dovozených odchylkách od  $U_n$ . V přenosových sítích 400 kV, 220 kV, 110 kV je horní mez napětí dána korónou, izolací, ztrátami v železe transformátorů a rušením sdělovacích zařízení. Dolní mez napětí je určena stabilitou regulace generátorů, sníženou přenosovou schopností soustavy, v distribučních sítích vn a nn alternativní regulací napětí. V distribučních sítích bývají přípustné odchylky vázány na požadavky spotřebitelů el.energie. Regulace napětí se upravuje mezi přenosovou a distribuční soustavou odděleně buď ručně, nebo automaticky. Tabulka 2-3 uvádí dovolené odchylky napětí v přenosových a distribučních sítích.

Tab. 2-3 Přípustné odchylky od jmenovitého napětí [1]

Jmenovité sdružené napětí $U_n$ (kV)	do 1	6; 22 ;35	110; 220	400
Přípustná odchylka napětí od $U_n$ (%)	$\pm 10$	$\pm 10$	$\pm 10$	$\pm 5$

Prostředky a zařízení pro regulaci napětí můžeme klasifikovat do dvou hlavních skupin:

- 1) transformátory s přepínáním odboček vinutí;
- 2) zdroje pro výrobu jalového výkonu (synchronní stroje, kondenzátory) [1].

### 2.2.1 Regulace napětí transformátory

Rozdělení transformátorů pro regulaci napětí :

#### 2.2.1.1 Transformátory regulační

Transformátory regulační (s podélnou regulací) jsou transformátory větších výkonů, spojující sítě 400 (220)/110 kV (většinou v provedení autotransformátorů) a sítě 110 kV/22 (35 kV). Bývají opatřeny 8-16 regulačními stupni po 2 až 2,5%  $U_n$ . Pod zatížením se podle potřeby přepínají jejich odbočky dálkovým ovládním.

#### 2.2.1.2 Transformátory s odbočkami

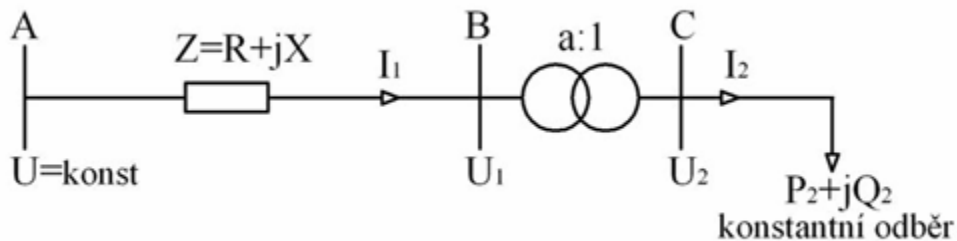
Transformátory s odbočkami (s podélnou regulací) se používají pro napájení v městských, venkovních a průmyslových rozvodných sítích. Jsou konstruovány za účelem vyrovnání rozdílů úbytků napětí v distribučních sítích vn. Jejich odbočky jsou většinou  $\pm 5\%$  nebo  $\pm 2.5\%$  z  $U_n$ . Tento způsob regulace rozdílů napětí v síti je jednoduchý a levný.

### 2.2.1.3 Transformátory s příčnou regulací

Transformátory s příčnou regulací se užívají pro řízení toku činných, případně i jalových výkonů v přenosových zokruhovaných sítích. V České republice se nepoužívají. U těchto transformátorů lze regulovat fázový posun mezi vstupním a výstupním napětím, oproti transformátorům s podélnou regulací jsou dražší.

### 2.2.1.4 Funkce regulačního transformátoru v jednoduchém přenosu

Na obr 2-7 je znázorněn regulační transformátor v jednoduchém přenosu. Vedení v bodě A napájí síť. Konec vedení je spojen se sekundární stranou ideálního transformátoru v bodě B, mezi body B a C je převod transformátoru  $a : 1$ , kde na primární straně ideálního transformátoru je napětí  $U_1$  a na sekundární straně transformátoru je napětí  $U_2$ . Ze sekundární strany ideálního transformátoru je zásobován elektrickou energií spotřebitel. Příčné admitance jsou zanedbány. [1]



Obr. 2-7 Regulační transformátor v jednoduchém přenosu [1]

Jalový (induktivní) proud spotřebitele  $I_{j2}$ :

$$I_{j2} = \frac{Q_2}{U_2} \quad (2.25)$$

$Q_2$  – jalový odběr spotřebitele (VAr)

$U_2$  – napětí (V)

$$I_1 = \frac{I_2}{a} \quad (2.26)$$

$I_1, I_2$  – proud (A)

$a$  – převod transformátoru ( $a = U_1 / U_2$ )

Po-té lze vyjádřit jalový proud na konci vedení:

$$I_{j1} = \frac{I_{j2}}{a} = \frac{Q_2}{a \cdot U_2} \text{ [A]} \quad (2.27)$$

$$\Delta U = R \cdot I_{e1} + X \cdot I_{j2} \text{ [V]} \quad (2.28)$$

$\Delta U$  – úbytek napětí na vedení (V)

$R$  – rezistance vedení na jednotku délky ( $\Omega/\text{km}$ )

$X$  - indukční reaktance vedení na jednotku délky ( $\Omega/\text{km}$ )

V případě, když  $X \gg R$ , lze vyjádřit úbytek napětí na vedení vztahem (2.29):

$$\Delta U \cong X \cdot I_{j_2} \text{ (V)} \quad (2.29)$$

Při dosazení rovnice (2.27) do rovnice (2.29) dostáváme po úbytek napětí na vedení (2.30):

$$\Delta U \cong X \cdot \frac{Q_2}{a \cdot U_2} \text{ (V)} \quad (2.30)$$

Pro velikost napětí  $U_1$  lze zapsat (2.31) [1]:

$$U_1 = U - \Delta U \text{ (V)} \quad (2.31)$$

Úpravou rovnice (2.31) při dosazení za  $U_1 = a \cdot U_2$  a za  $\Delta U$  pravou stranu rovnice (2.30) obdržíme (2.32):

$$U_2 \cdot a = U - X \cdot \frac{Q_2}{a \cdot U_2} \text{ (V)} \quad (2.32)$$

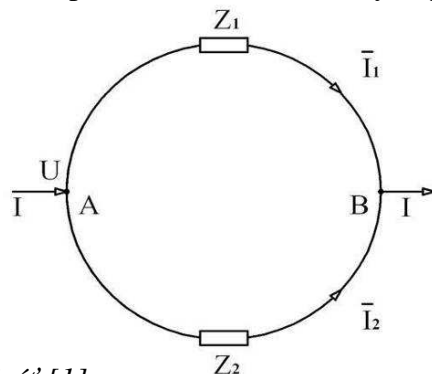
Řešením rovnice (2.32) je kvadratická rovnice upravená na tvar (2.33):

$$U_2 = \frac{U \pm \sqrt{U^2 - 4 \cdot X \cdot Q_2}}{2 \cdot a} \text{ (V)} \quad (2.33)$$

Rovnice (2.33) má dva kořeny řešení, pro vyloučení jednoho řešení budeme uvažovat pouze kladné znaménko + před odmocninou v rovnici (2.33) (záporné znaménko – před odmocninou udává velmi malé  $U_2$  a to neberme na zřetel z praktických důvodů). Sníží-li se převod  $a$ , dojde ke zvýšení napětí u spotřebitele a ke zvýšení proudu  $I_1$  na vedení a tím pádem se zvýší i jalová ztráta na vedení  $\Delta Q = I_{j_1}^2 \cdot X$  i jalový příkon transformátoru. Proto je na napájecí síť kladen větší požadavek na přenos jalového výkonu, což není dobré. Transformátorem lze nastavit snížení úbytku napětí na vedení, ale jalový odběr u spotřebitele  $Q_2$  transformátorem nevyregulujeme. Jalový výkon u odběratelů se sníží kompenzací (paralelní, sériovou, statickými kondenzátory) v místě spotřeby jalového výkonu, tím se sníží úbytky napětí na vedení, nezatěžuje se síť přenášeným jalovým výkonem a u transformátoru se sníží požadavky na převod  $a$ . [1]

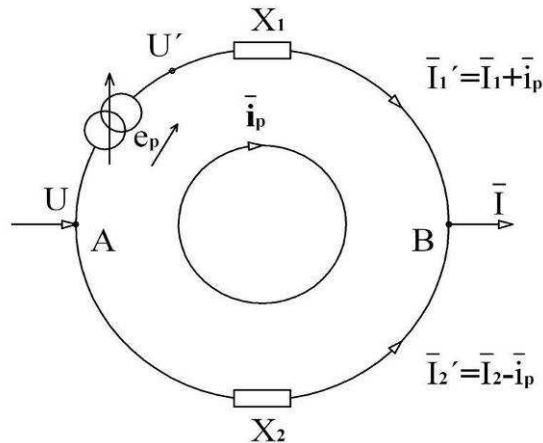
### 2.2.1.5 Funkce regulačního transformátoru v zokruhované síti

Na obr 2-8 je jednoduchá okružní síť. Proud odběru  $I$  se skládá součtem proudů  $\bar{I}_1 + \bar{I}_2$  a je rozdělen v poměru  $\bar{I}_1 : \bar{I}_2 = Z_2 : Z_1$ ; příčné admitance a činný odpor vedení neuvažujeme. [1]



Obr. 2-8 Jednoduchá okružní síť [1]

Pro změnu proudů zařadíme regulační transformátor s podélnou regulací. Na transformátoru se vytvoří přídatné napětí  $e_p = \bar{U}' - \bar{U}$ ; toto přídatné napětí vytvoří vyrovnávací proud  $i_p$ . [1]



Obr. 2-9 Regulační transformátor s podélnou regulací v zokruhované síti [1]

Poté pro Obr. 2-9 platí následující rovnice pro vyrovnávací proud  $i_p$ :

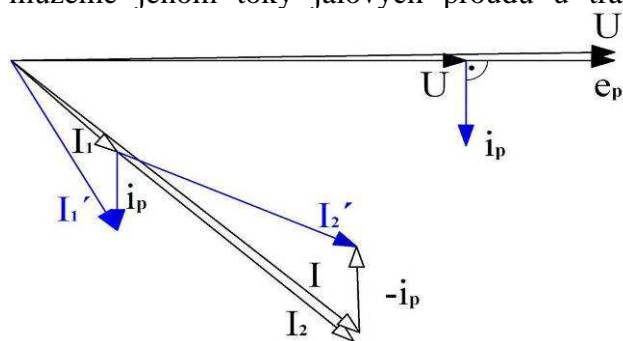
$$\bar{i}_p = \frac{\bar{U}' - \bar{U}}{X_1 - X_2} \quad (\text{A}) \quad (2.34)$$

$\bar{U}$  – fázové napětí (V)

Výsledné proudy:

$$\begin{aligned} \bar{I}_1' &= \bar{I}_2 + \bar{i}_p \\ \bar{I}_2' &= \bar{I}_2 - \bar{i}_p \quad (\text{A}) \\ \bar{I} &= \bar{I}_1' + \bar{I}_2' \end{aligned} \quad (2.35)$$

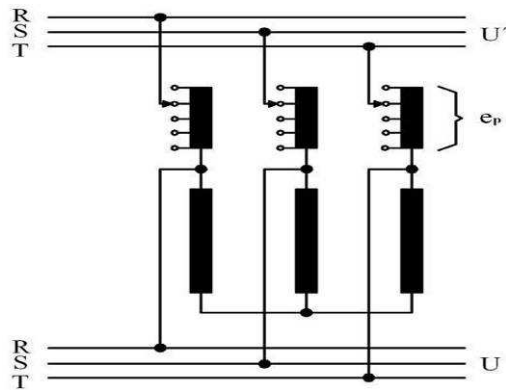
Přídavný proud  $i_p$  je čistě jalový a je zpožděn za přídatným napětím o  $90^\circ$ , což znázorňuje Obr. 2-10. Regulovat můžeme jenom toky jalových proudů u transformátoru s podélnou regulací.[1]



Obr. 2-10 Fázorový diagram okružní sítě s regulačním transformátorem [1]



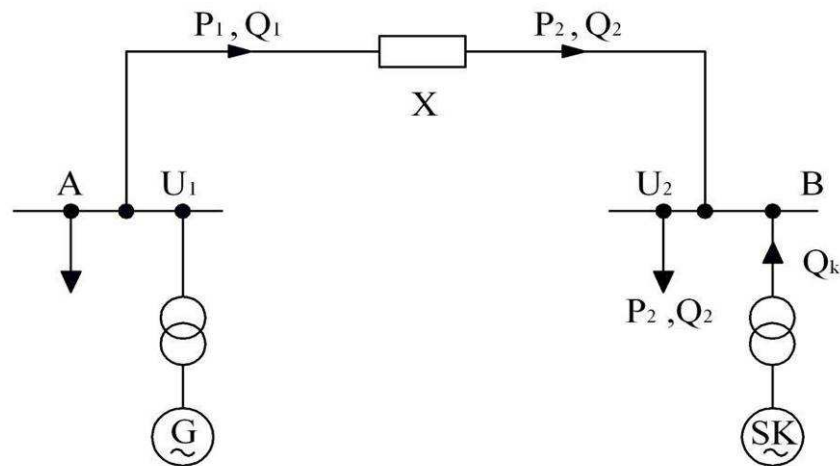
Blokové schéma autotransformátoru s podélnou regulací je zobrazeno na obr .2-11. [1]



Obr. 2-11 Blokové schéma transformátoru s podélnou regulací [1]

### 2.2.2 Regulace napětí jalovým výkonem

Přenosové vedení je uvažováno bez příčných admitancí a se zanedbatelným ohmickým odporem  $X \gg R$  na obr 2--12, kde SK v tomto obrázku je synchronní kompenzátor. [1]



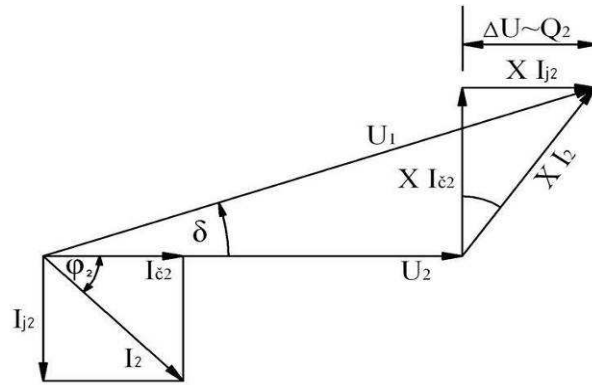
Obr. 2-12 Regulace napětí jalovým výkonem - jednoduchý přenos [1]

Na Obr. 2-13 je fázorový diagram Obr. 2-12. Při relativně malém úhlu  $\delta$  mezi fázory napětí  $\vec{U}_1, \vec{U}_2$  můžeme úbytek na vedení vyjádřit rovnicí (2.36):

$$\Delta U = X \cdot \frac{Q_2}{U_2} = U_1 - U_2 \text{ (V)} \quad (2.36)$$

Fázový posun mezi napětími je vyjádřen (2.37):

$$\delta \approx X \cdot I_{\varepsilon 2} = X \cdot \frac{P_2}{U_2} \text{ (}^\circ\text{)} \quad (2.37)$$



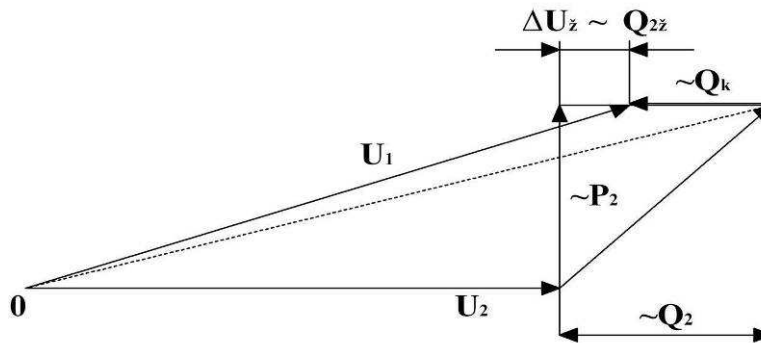
Obr. 2-13 Fázorový diagram regulace napětí jalovým výkonem v jednoduchém přenosu [1]

Podle fázorového diagramu (obr 2-13.) vedení mezi body A a B v obr 2-12 vede jalový i činný výkon mezi body A a B. V obr 2-13 je napětí  $U_1$  v předstihu před napětím  $U_2$  ( $U_1 > U_2$ ). Přenos činného výkonu po vedení je doprovázen úhlovým natočením mezi fázory napětí na začátku a na konci vedení. Pro snížení úbytku napětí na vedení je zapotřebí vyrobit jalový výkon v místě spotřeby jalového výkonu (bod B). Konstantní úbytek napětí při konstantním  $U_1$  a  $U_2$  vyjádříme jalový žádaný odběr z rovnice 2.36, poté bude přípustný: žádaný, jalový odběr ( $Q_{2z}$ ) ve stanici B (2.38) [1]:

$$Q_{2z} = \frac{U_2 \cdot (U_1 - U_2)}{X} = \frac{U_2 \cdot \Delta U_z}{X} = \text{konst. (VAr)} \quad (2.38)$$

$\Delta U_z$  - požadovaná hodnota úbytku napětí

Jalový příkon spotřebitele  $Q_2$  je proměnný. Požadovaných konstantních hodnot úbytku napětí na vedení a přípustného - žádaného jalového odběru lze dosáhnout regulovatelnou výrobou jalového výkonu v místě spotřeby (kompenzací). Z fázového diagramu obr. 2-14



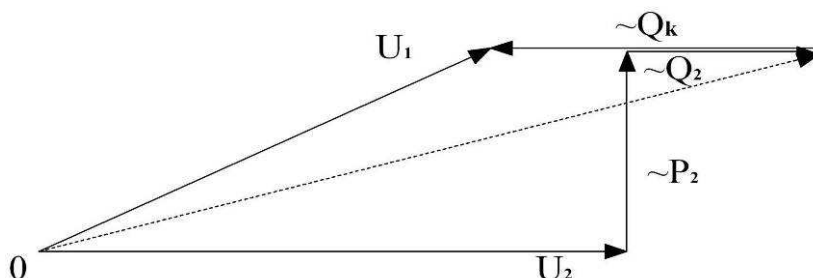
Obr. 2-14 fázorový diagram regulace napětí jalovým výkonem v jednoduchém přenosu určení potřebného kompenzačního výkonu v bodě B (obr 2-12) [1]

Velikost požadovaného jalového výkonu vyrobeného v bodě B, zobrazeno v obr 2-14.

$$Q_{2z} = Q_2 - Q_k \text{ (VAr)} \quad (2.39)$$

$Q_k$  – kompenzační výkon (VAr)

Tok jalového výkonu poteče z bodu B do bodu A (v obr 2-12) v případě, že bude kompenzační výkon větší než jalový příkon spotřebitele, napětí  $U_2 > U_1$ ; situaci zobrazuje Obr. 2-15 [1].



Obr. 2-15 Fázorový diagram regulace napětí jalovým výkonem v jednoduchém přenosu v situaci, kdy  $Q_2 < Q_k$  [1]

## 2.2.3 Některé spotřebiče elektrické energie v ES

### 2.2.3.1 Transformátory

Transformátory odebírají jalový výkon v ES, pro celkový jalový příkon platí přibližný vztah (2.40):

$$\Delta Q_t = \Delta Q_k \cdot \left( \frac{S}{S_n} \right)^2 + \Delta Q_o \quad (\text{VAr}) \quad (2.40)$$

Pro změnu kompenzačního výkonu platí vztah pro  $\Delta Q_k$ :

$$\Delta Q_k = e_k \cdot S_n \quad (\text{VAr}) \quad (2.41)$$

### 2.2.3.2 Asynchronní motory

Jalový příkon je závislý (silně) na změně zatížení na hřídeli asynchronního motoru, činný výkon (příkon) asynchronního motoru se změní nepříliš výrazně se změnou napětí a momentu na hřídeli. Při změně napětí 0-10 % klesne záběrný moment na 81 % původní hodnoty, což vede k zvětšení skluzu, snížení otáček a snížení výkonu motoru. Zvětšení skluzu způsobí i zvýšení proudu v asynchronním motoru.

### 2.2.3.3 Synchronní motory

Jalový výkon (dodávaný, odebíraný) je zcela závislý na změně napětí, činný příkon a moment na hřídeli synchronního motoru se mírně změní se změnou napětí, s neměnným buzením synchronního motoru.

### 2.2.3.4 Tepelné spotřebiče

V případě poklesu napětí o 5 % od jmenovitého napětí se zvětší doba ohřevu tekutiny o 11 % od původní doby, v případě poklesu napětí o 10 % se zvětší doba ohřevu tekutiny o 23 % od původní doby. Těmito tepelnými spotřebiči mohou být například elektrické sporáky, varné konvice, bojlerly.

### 2.2.3.5 Žárovky a zářivky

U žárovek při poklesu napětí o 5 % klesne svítivost přibližně o 10 %, při poklesu napětí o 10 % klesne svítivost o 20 % i více. S rostoucím napětím od jmenovitého napětí se zvětšuje teplota vlákna žárovky. U zářivek se světelný tok také mění se změnou napětí od jmenovité hodnoty napětí, avšak ne v takové míře jako u žárovek, přičemž se snížením napětí dochází k snížení světelného efektu zářivky. [1]

### 2.2.4 Venkovní a kabelová vedení jako spotřebiče a zdroje jalového výkonu

Při překročení dovoleného proudového zatížení značně větším výkonem, než je přirozený výkon venkovního vedení se stane toto vedení spotřebičem jalového výkonu přibližně podle vztahu  $\Delta Q = 3 \cdot X \cdot I^2$ , k čemuž dochází převážně v podélné impedanci vedení. Kabelová vedení mají relativně malou indukčnost. Venkovní vedení při malém zatížení k jejich přirozenému výkonu jsou zdrojem jalového výkonu, při 50 % zatížení k jejich přirozenému výkonu obsahuje kapacitní výkon okolo 70 % výkonu nabíjecího, výkonu při chodu naprázdno. Tabulka 2-4 uvádí nabíjecí výkony venkovních vedení.

Tab. 2-4 Nabíjecí výkony venkovních vedení [1]

$U$ (kV)	400	220	110
$Q_c$ (MVar/100 km)	60	13	3,5

U kabelových vedení je nabíjecí kapacita vyšší než v případě venkovních vedení. Větší kabelové sítě pozitivně přispívají k výrobě jalového výkonu. Tabulka 2-5 uvádí orientační nabíjecí výkony kabelových vedení. [1]

Tab. 2-5 Orientační nabíjecí výkony kabelových vedení [1]

$U$ (kV)	275	35
$Q_c$ (MVar/km)	6-7	0,13

### 2.2.5 Regulace napětí v distribučních sítích

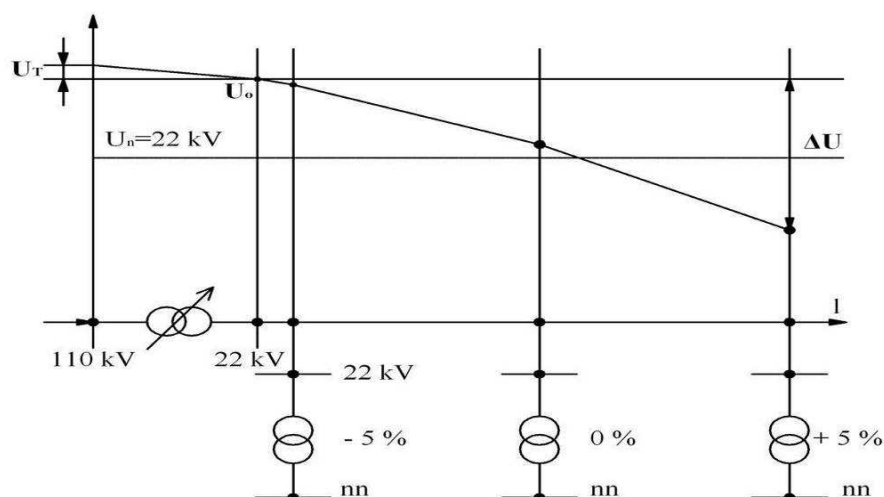
Distribuční transformátory 110/22(35) kV mohou regulovat své odbočky pod zatížením (jsou posledním stupněm regulace pod zatížením), čímž ovlivňují možnosti regulace například transformátorů 35/6 kV (22/0,4 kV), které zásobují konečné spotřebitele elektrické energie. Tyto transformátory mají pevně nastavitelné odbočky a to  $\pm 5\%$  z  $U_n$ . Množství výroben dodávající elektrickou energii do těchto sítí vn je zanedbatelné, proto mají z lokálního pohledu úzce ohraničený význam pro regulaci napětí. Převážně se užívá automatická regulace s kompaudací v distribučních sítích na velikost zatížení regulačního transformátoru. Podle zatěžovacího proudu  $I_z$  se mění hodnota sekundárního napětí vn transformátoru dle vztahu 2.42.

$$U_o = k \cdot I_z + U_z \quad (\text{V}) \quad (2.42)$$

$U_z$  - základní hodnota napětí závisící na nastavení distribuční sítě (V)

$k$  - činitel kompaudace (-)

Na Obr. 2-16 je průběh úbytku napětí a jeho následné doregulování nastavením odboček transformátorů 22/0,4 kV, což je principem regulace napětí v distribuční síti [1].



Obr. 2-16 Princip regulace napětí v distribuční síti [1]

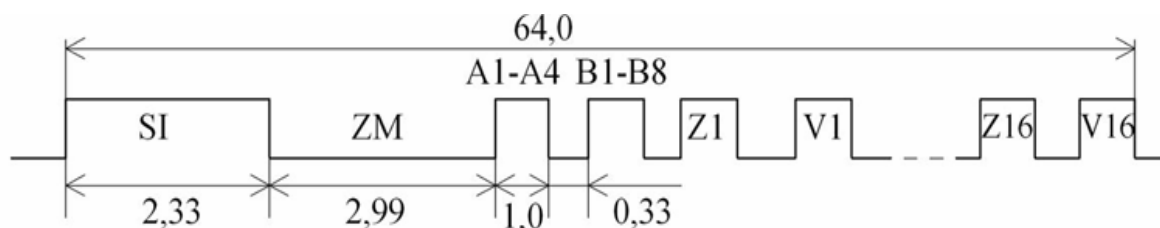
## 3 ANALÝZA STÁVAJÍCÍCH ZAŘÍZENÍ A JEJICH VÝZNAM PŘI REGULACI

### 3.1 SYSTÉM HDO

Hromadné dálkové ovládání (HDO) - V začátcích elektrifikace byl noční odběr elektrické energie nízký, a proto byl spotřebitelům elektrické energie nabídnut v nočních hodinách nižší cenový tarif. Využití nočního odběru elektrické energie započalo svoji éru se začátkem elektrifikace. Akumulační spotřebiče, například pro ohřev vody a vytápění byly řízeny spínacími hodinami pro spojení se sítí v nočních hodinách. Postupem času množství takto připojených nočních spotřebičů elektrické energie narůstalo. Prvotní problémy byly se stálým seřizováním intervalů spínacích hodin a s dobou řízení celkového odběru elektrické energie, protože v rozmezí 22 a 24 hodinou s rostoucím množstvím nočních spotřebičů rostly i špičky zatížení a častokrát překračovaly hodnoty špičkového zatížení celého dne. Důsledkem byl nákup nebo výroba drahé špičkové elektrické energie. Před šestou hodinou ranní se vlivem hromadného odpínání nočních spotřebičů vyskytoval proval zatížení. Možností řešení bylo zrovnoměnit průběh zatížení v nočních hodinách a využít provalů během dne řízením z dispečerského centra, které mohlo dané noční spotřebiče připojovat a odpojovat od sítě. Podmínkou byla vhodná přenosová cesta, po níž by bylo možné přenášet signály k jednotlivým spotřebičům. Nejvhodnější tedy bylo využití pro přenos signálu elektrické sítě jako přenosové cesty pro centrální řízení elektrických spotřebičů z dispečerského centra. Pro tento účel se vžil pojem HDO. V 30 letech 20. století byly v Evropě uváděny do provozu první systémy HDO. Využívaly se ke spínání a odpojování veřejného osvětlení. Později došlo v distribučních sítích k použití jediné ovládací frekvence a k časovému dělení přenosového kanálu. Do elektrických sítí se vysílají telegramy. Telegram (impulsní povelový kód) obsahuje impulzy tónovaného kmitočtu, tento telegram je šířen elektrickou sítí. Telegramy jsou paralelní a sériové.

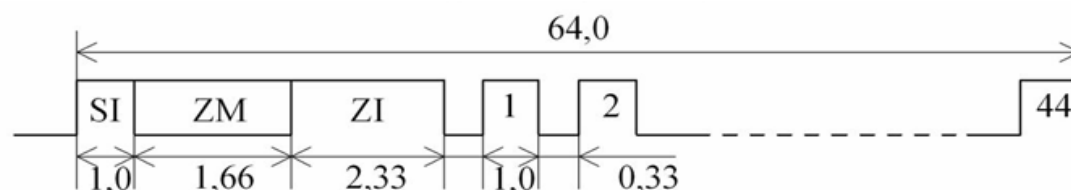
Sériový povelový kód (kód impulz-impulz) je složen ze startovacího impulzu (SI), za ním následuje zabezpečovací mezera a adresová část. Ta je tvořena jedním impulzem v předvolbové skupině A (4 předvolby A) a dalším impulzem v převolbové skupině B (8 předvoleb B). Také je možná varianta s jedním impulzem v převolbové skupině A a s následnou kombinací tří impulzů v převolbové skupině B; docílí se tím podstatně většího množství přenášených informačních

impulzů. Po adresových složkách se přenáší výkonové povely. Možnost vyslaného zapnutí a vypnutí spotřebičů se uskuteční přítomností impulzu ve dvoupovelu. Sériový povelový kód HDO používaný v ČR je zobrazen na obr 3-1. [7]



Obr. 3-1 Struktura seriového kódu pro HDO používaného v ČR [7]

Paralelní povelový kód (impulz-mezera) obsahuje taktéž startovací impulz (SI) trvající 1 sekundu, poté následuje zabezpečovací mezera (ZM) s dobou trvání 1,66 sekundy a po ní zabezpečovací impulz (ZI) trvající 2,33 sekund. Za zabezpečovacím impulzem následují povelové intervaly, celkem je jich 44 o době trvání 1 sekundy, mezi něž jsou vloženy oddělovací mezery o době trvání 0,33 sekund. Tyto dvojpovely jsou různé. Konkrétním dvojpovelem rozlišujeme stavy nechat zapnutý daný spotřebič a nechat vypnutý daný spotřebič pomocí vysílaného povelového impulzu. Při povelu nechat zapnutý daný spotřebič je vysílán povelový impulz v daném povelovém intervalu, přičemž povel nechat vypnutý daný spotřebič je vyjádřen nevysíláním impulzu v daném intervalu. Struktura paralelního povelového kódu HDO používaného v ČR je na obr 3-2.



Obr. 3-2 Struktura paralelního kódu pro HDO používaného v ČR [7]

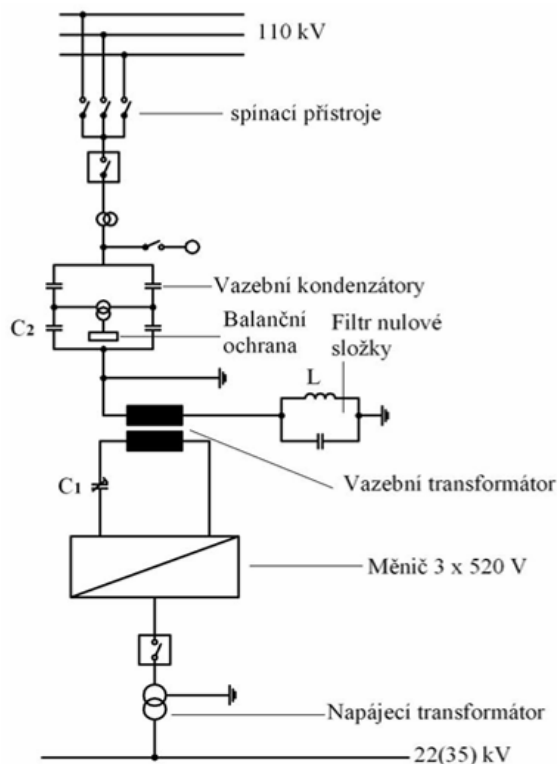
Výrobci HDO používají celou škálu telegramů odlišených délkou impulzu, mezer a významem jednotlivých impulzů. [7]

Vysílače HDO jsou umístěné v rozvodnách distribučních soustav. Kmitočty vysílané z vysílače HDO by se měly nacházet mezi vyššími harmonickými základního kmitočtu 50 Hz.

Vysílaný signál HDO je nejvhodnější vysílat do stejné napěťové úrovně vysokého napětí nebo velmi vysokého napětí do 110 kV. To vede k bezproblémovému a ekonomicky výhodnému pokrytí území signálem volbou jediného kmitočtu HDO nezávisle na změnách uspořádání sítě. Na území ČR jsou doporučené frekvence HDO, a to 110 Hz, 133,1/3 Hz, 167 Hz, 216,2/3 Hz a 232 Hz, 267 Hz, 283,1/3 Hz, 316,2/3 Hz, 383,1/3 Hz, 425 Hz, 500 Hz, 600 Hz, 760 Hz, 1060 Hz, přičemž s frekvencemi 760 a 1060(1050) Hz byly negativní zkušenosti. Do napětí 110 kV se osvědčilo používat kmitočty menší jak 250 Hz (nejpoužívanější 183,1/3 Hz a 217 Hz). Signál šířený v sítích má lepší vlastnosti pro nízké kmitočty (v okolí 200 Hz), což bylo potvrzeno vypracovanými studiiemi ve výzkumných ústavech energetiky [7].

Statický měnič kmitočtu představuje výkonovou část vysílače. Požaduje se od něj, aby jeho výstup tvořil třífázovou symetrickou soustavu, aby třífázová zátěž statického měniče kmitočtu byla zapojena do hvězdy s uzemněným uzlem a musí pracovat s konstantním výstupním

kmitočtem s přesností  $\pm 0,5$  Hz. Klíčování měniče při vysílání řídicích impulzů telegramu musí být elektronické, aby jeho provozuschopnost byla obnovena v co nejkratší době při výskytu poruchy v některé části měniče. Na obr 3-4 je blok vysílače s paralelní volnou vazbou, která je připojena paralelně k síti do napěťové úrovně 110 kV. Skládá se z vazby s potřebnými spínacími a měřicími přístroji pro 110 kV, (statického) měniče kmitočtu s řízením a silového napájení. Signál tónovaného kmitočtu je zaveden do sítě přes vazbu vysílače, která zakazuje i vnik síťového kmitočtu do silových obvodů. Při neočekávané poruše vazebního zařízení nedojde k přerušení dodávky elektrické energie, což je předností tohoto konceptu. Další výhodou je, že může být případná vyšší impedance transformátoru nadřazené sítě než impedance sítě, do níž vysílá signál. K síti 110 kV je připojena kondenzátorová baterie  $C_2$  ta je nastavena na současné namáhání síťovým kmitočtem, vysílaným tónovaným kmitočtem a vyššími harmonickými, které jsou zahrnuty v síťovém napětí. Balanční ochrana chrání kondenzátorovou baterii. [7] Dva obvody vazby L a  $C_2$  jsou laděny v blízkosti vysílaného kmitočtu. Druhá vazba je tvořena  $C_1$  a  $L_1$ , tato vazba je laděna na kmitočet vyšší než vysílaný. Do této vazby pracuje měnič kmitočtu. Využívá pro vysílaný kmitočet kapacitní charakter, což je nutností při zátěžové komunikaci. Kondenzátory  $C_1$  jsou namáhány impulzně.

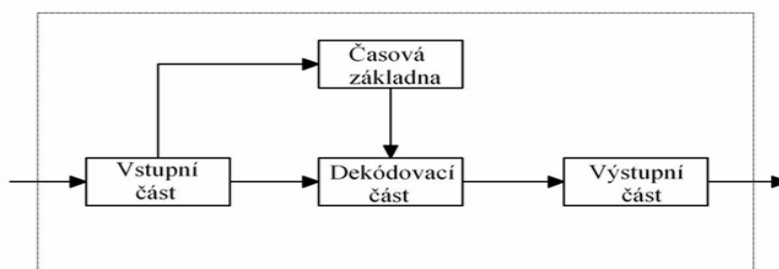


Obr. 3-3 Blok vysílače HDO s paralelní volnou vazbou [7]

Nejčastěji se užívají vysílače do napěťové hladiny 110 kV, kdy měnič kmitočtu má výkon 1600 kVA s maximálním proudem tónovaného kmitočtu 140 A, méně zastoupené jsou vysílače s výkonem 720 kVA s maximálním proudem tónovaného kmitočtu 70 A. Vysílače HDO se dvěma bloky jsou určeny pro stanici (rozvodnu) 400 (220)/110 kV. Ústřední a místní automatiky obstarávají řízení vysílačů HDO, kde ústřední automatika se nachází na dispečinku rozvodné společnosti a vzdáleně řídí vysílače HDO. Vysílací úroveň bývá obvykle 1,5 % až 2,5 % z  $U_n$  [6][7].

Přijímací část HDO (přijímač) umožňuje příjem povelového kódu z vysílače HDO, tedy má za úkol dekodovat povelový kód z vysílače HDO a následně uskutečnit v požadovaném čase

připojení či odpojení daného zařízení od elektrické sítě. Jeho blokové schéma je na obr 3-4. Vstupní část představuje kmitočtovou selekci a úpravu vstupní úrovně tónovaného signálu, obstarává spuštění časové základny přijímače a předá povelový kód do dekódovací části. Dekódovací část může vyhodnocovat jeden nebo více ovládacích úkonů podle povelového kódu. Vyhodnocené informace dále předává výstupní části přijímače, čímž ji vlastně řídí. Časová základna obstarává časovou synchronizaci přijímače a vysílače HDO a ovládá činnost dekódovací části. Výstupní část přijímače je určena k následnému provedení požadovaného úkonu (vypnutí či zapnutí daného spotřebiče). Přijímač pracuje (zpracovává telegram) na napěťové hladině nízkého napětí a je zapojen mezi jednu ze tří libovolných fází a nulový vodič [7].



Obr. 3-4 Blokové schéma přijímače HDO [7]

### 3.1.1 Využití systému HDO pro oblasti použití

První oblastí použití HDO je pro přímé ovládání elektrických spotřebičů větších výkonů v daném časově omezeném provozu. Tabulka 3-1 uvádí tyto spotřebiče:

Tab. 3-1 Přímé ovládání elektrických spotřebičů [7]

Elektricky vytápěné kotle
Akumulační elektrické vytápění v veřejných institucích a v domácnostech
Zásobníky horké vody v průmyslu, domácnostech a v zemědělství
Průmyslové pece
Elektrické motory v zemědělství
Velké elektricky vytápěné pračky
Zásobníková, závlahová a jiná čerpadla
Jiné další spotřebiče uvnitř průmyslových nebo zemědělských závodů a soukromých firem

Druhou oblastí použití HDO je ovládání pro tarifní účely, což uvádí tabulka 3-2:



Tab. 3-2 Ovládání pro tarifní účely [7]

Přepínání trojtarifových elektroměrů pro různé typy trojtarifů
Přepínání dvojtarifových elektroměrů pro různé typy dvojtarifů
Ovládání elektroměrů pro měření maxima odběrů v daných časových intervalech
Ovládání elektroměrů pro měření maxima odběrů s předsignálem
Ovládání elektroměrů pro měření maxima odběru s kumulativním číselníkem

Třetí oblast použití HDO je pro provozní energetické účely, tabulka 3-3.

Tab. 3-3 Provozní energetické účely [7]

Spínání kondenzátorových baterií pro kompenzaci účinníku
Ovládání omezovačů příkonu a hlídačů maxima
Ovládání spínačů podružných silnoproudých vedení
Ovládání podružných trafostanic
Regulace odběrových diagramů elektřiny
Ovládání spínačů pro zkoušení zemních spojení
Spínání geograficky rozptýlených měřících bodů pro statistické účely energetiky
Jiné další spotřebiče uvnitř průmyslových nebo zemědělských závodů a soukromých firem

Čtvrtou skupinu pro oblasti použití HDO tvoří ovládání různých druhů osvětlení (tabulka 3-4). Přes nejkratší odbočku k veřejné sekundární síti je spojen přijímač HDO, který ovládá svítidla (nebo skupinu svítidel), proto není potřeba zřizovat další ovládací síť. Přijímače HDO mohou být umístěny do tělesa nebo patky stožáru, což umožňuje ovládat přímo konkrétní svítidla. [7]

Tab. 3-4 Ovládání různých druhů osvětlení [7]

Osvětlení historických budov
Veřejné osvětlení celoroční
Veřejné osvětlení polonoční s přerušovaným provozem (18-23 hod, 3-7 hod)
Veřejné osvětlení polonoční nepřerušovaným provozem (do 24 hod)
Ovládání světelných reklam a osvětlení výkladních skříní
Vnitřní a schodišťová osvětlení
Osvětlení sportovních hřišť, překladových nádraží a areálů
Osvětlení dopravního značení pro pozemní leteckou a lodní dopravu

Pátá oblast použití systému HDO je k signálním účelům (tabulka 3-5) a to převážně pro veřejné poplachy, svolávání skupin obyvatelstva a signály charakteru služeb pro obyvatelstvo. [7]

Tab. 3-5 Signální účely[7]

Poplacha při živelních pohromách
Poplachová zařízení pro účely civilní obrany
Poplacha pro různé skupiny příslušníků armády a policie
Poplacha pro různé opravářské a údržbářské čety
Poplacha při požárech

Systém HDO pozitivně přispívá k minimalizaci nákladů na výrobu el.energie, k lepšímu využití elektráren, ke snížení nákladů na nakupovanou elektrickou energii dodržením hodnot smluvního výkonu a k lepšímu využití vložených financí do zařízení v rozvodné síti, což vede k navýšení počtu spotřebičů připojených do rozvodné sítě, které umí elektrickou energii akumulovat nebo skladovat. Distributoři elektrické energie v současnosti nabízejí pro odběr elektrické energie tarif vysoký (VT), který platí v době mimo platnost nízkého tarifu (spotřebitelé elektrické energie platí vyšší cenu za spotřebovanou odebranou elektrickou energii v tomto tarifu) a tarif nízký (NT), který je využíván při nižším zatížení elektrické rozvodné sítě při menších nákladech na výrobu elektrické energie. Poněvadž spotřebitelé elektrické energie platí za množství spotřebované elektrické energie nižší cenu, je to motivující z hlediska úspory finančních nákladů při provozu spotřebičů přímo u spotřebitelů elektrické energie. Spotřeba elektrické energie je proměnná v průběhu roku, proto časové pásmo, kdy spotřebitel elektrické energie platí nižší cenu se dle typu sazby může měnit [7][8].

## 3.2 VÝROBNY ELEKTRICKÉ ENERGIE A ZAŘÍZENÍ PODÍLEJÍCÍ SE NA REGULACI

### 3.2.1 Výrobní elektrické energie:

#### 3.2.1.1 Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárny (s umělou akumulací) se podílejí na regulaci elektrizační soustavy v době špiček zatížení elektrizační soustavy, kdy dodávají elektrickou energii do elektrizační soustavy. Je-li elektrizační soustava méně zatížená odběrem elektrické energie převážně v nočních hodinách přečerpávají vodu z dolní akumulární nádrže do horní akumulární nádrže, ve které akumulují elektrickou energii pro denní špičky. Výhodou přečerpávacích vodních elektráren je, že mohou být pro dodávku elektrické energie do ES připojeny v řádu jednotek minut, případně odpojeny od ES také v řádu minut. Jsou tedy špičkovými zdroji elektrické energie pro rychlou regulaci. V ČR mají celkový instalovaný výkon 1100 MW [9].

#### 3.2.1.2 Akumulační vodní elektrárny

Akumulační vodní elektrárny mohou také příznivě přispívat k regulaci ES rychlou zvýšenou dodávkou elektrické energie tak, že se podle dispozičních možností zvýší objemový průtok vody vodními turbínami a současně se zvýší i dodávaný elektrický výkon z generátorů, čehož může být využito při zvýšeném zatížení ES. Akumulační vodní elektrárny mají tedy také význam při regulaci ES. Vltavská kaskáda vodních elektráren má celkový instalovaný výkon 764,85 MW [9].

### 3.2.1.3 Jaderné elektrárny

Jaderné elektrárny dodávají téměř konstantní výkon elektrické energie do ES (zabezpečují výrobu elektrické energie pro její okamžitou spotřebu); z pohledu regulace tedy mají malé možnosti pohotovité regulace. Při malém zatížení ES v nočních hodinách slouží jako zdroj elektrické energie k pohonu čerpadel pro čerpání vody do horní akumulární nádrže u přečerpávacích vodních elektráren [9].

### 3.2.1.4 Parní elektrárny spalující fosilní paliva

Parní elektrárny spalující fosilní paliva (převážně uhlí), mohou na turbosoustrojí regulovat výkon i kmitočet v daném provozně dovoleném rozmezí dle svých možností podle potřeb dispečinku. Změny zatížení by měly být časově pozvolné [9].

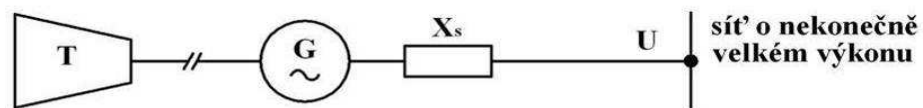
### 3.2.1.5 Elektrárny se spalovacími turbínami nebo paroplynové elektrárny

Elektrárny se spalovacími turbínami nebo paroplynové elektrárny mohou být nasazeny buď jako špičkové, nebo záložní zdroje elektrické energie. Uvedení do výrobního chodu i odstavení trvá několik minut, proto jsou tyto elektrárny vhodné pro rychlou regulaci elektrizační soustavy, aby v ní byla pokryta rovnováha mezi spotřebou a výrobou elektrické energie. [9]

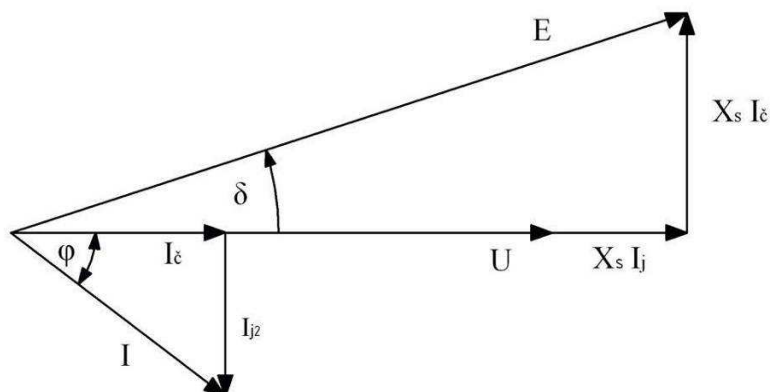
## 3.2.2 Některá zařízení a jejich regulace jalového výkonu v ES

### 3.2.2.1 Synchronní generátory

Synchronní generátory se užívají pro výrobu elektrické energie. V elektrárnách mohou být poháněny parními a plynovými turbínami při rychlosti otáčení 3000 ot /min. Při těchto otáčkách nesou označení turboalternátory. Synchronní generátory lze užít také pro výrobu nebo spotřebu jalového výkonu v závislosti na svých provozně přípustných mezích provozu, jež jsou charakterizovány například maximálním dovoleným proudem statoru, mezí budícího proudu a mezemi statické stability. Na obr. 3-5 je znázorněn synchronní generátor pracující do sítě o nekonečně velkém výkonu s konstantním napětím; činný odpor synchronního generátoru je zanedbán, uvažována je pouze synchronní reaktance synchronního generátoru  $X_s$ . Fázorový diagram obr. 3-5 je zobrazen v obr. 3-6 [1].



Obr. 3-5 Synchronní generátor pracující do sítě o nekonečně velkém výkonu s konstantním napětím  $U$  [1]



Obr. 3-6 Fázorový diagram synchronního generátoru pracujícího do sítě o nekonečně velkém výkonu s konstantním napětím  $U$  [1]

Z fázorového diagramu Obr. 3-6, kde  $E$  je vnitřní napětí synchronního generátoru, lze činný výkon dodávaný do sítě vyjádřit rovnicí (3.1) [1]:

$$P = U \cdot I_c = \frac{U \cdot E}{X_s} \cdot \sin \delta \text{ (W)} \quad (3.1)$$

Pro jalový výkon dodávaný do sítě platí rovnice (3.2) [1]:

$$Q = U \cdot I_j = \frac{U \cdot E}{X_s} \cdot \cos \delta - \frac{U^2}{X_s} \text{ (VAr)} \quad (3.2)$$

### 3.2.2.2 Synchronní kompenzátory

Synchronní kompenzátory se v přebuzeném chodu stávají zdroji jalového výkonu až do svého jmenovitého výkonu; výhodou je jejich okamžitá výroba jalového výkonu podle potřeb okamžitého zatížení v síti. V podbuzeném chodu se stávají spotřebiči jalového výkonu, tento jalový výkon spotřebovávají podle vztahu  $U^2/X_s$ , což je asi polovina jalového výkonu. Jsou připojeny do sítě přes terciární vinutí transformátorů, bývají to synchronní motory pracující bez zatížení. Jejich nevýhodou je vysoká cena, avšak výhodou je jejich okamžitá spotřeba jalového výkonu dle potřeb okamžitého zatížení v síti. V ČR mohou pracovat až s výkony 100 MVA.

### 3.2.2.3 Transformátory

Transformátory mezi přenosovou a rozvodnou soustavou mají přepínače odboček pod zatížením, přičemž transformátory 400/110 kV, 220/110 kV bývají postupně opatřovány hladinovými regulátory (HRT), jejichž úkolem je udržovat konstantní napětí na sekundární straně transformátoru s definovanou necitlivostí a časovou konstantou. Hromadným regulacím transformátorů na nižších napěťových hladinách se dá předejít rychlejší regulací transformátoru na vyšších napěťových hladinách, což je principem časového zpoždění. Při paralelní spolupráci transformátorů jsou hodnoty napětí hladinových regulátorů upravovány tak, že jalový výkon se rozloží mezi transformátory proporcionálně, aby došlo k rovnoměrnému zatížení transformátorů podle jejich jmenovitého výkonu  $S_n$ . Na primární straně je HRT regulátor schopen při podpětí blokovat změnu odbočky, tím zabrání hrozbě napěťového kolapsu. [5]

### 3.2.2.4 Statické kondenzátory

Jako statické kondenzátory se pro řízení plynulé regulace používají výkonové tyristory. V sítích nízkého a vysokého napětí mají využití pro výrobu jalového výkonu. Hlavní nevýhodou statických kondenzátorů je jednostupňová regulace jalového výkonu [1].

### 3.2.2.5 Kompenzační tlumivky

Kompenzační tlumivky jsou spotřebiči kapacitního jalového výkonu v přenosových sítích. Jsou spojeny přes transformátory, v uzlových bodech sítě se používají převážně pro její odlehčení při hladině napětí 400 kV. V ČR mívají výkon až 150 MWAr [1].

## 4 NOVÉ MOŽNOSTI V OBLASTECH REGULACE A JEJICH POŽADAVKY NA DISTRIBUČNÍ SÍŤ

### 4.1 ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE A NĚKTERÉ JEJICH POŽADAVKY NA DISTRIBUČNÍ SÍŤ

#### 4.1.1 Změny napětí při spínání

Při spínání musí být splněny podmínky maximální změny napětí ve společném napájecím bodě, ovlivněné připojováním a odpojováním dílčích generátorů nebo zařízení, proto relativní změny napětí vyroben s předávacím místem v síti nn nesmí překročit hodnotu  $\Delta u_{max nn} \leq 3 \%$ , což vyjadřuje vztah 4.2 pro síť nn, kde  $\Delta U$  je změna napětí a  $U_n$  je jmenovité napětí sítě:

$$\Delta u_{max nn} = \frac{\Delta U}{U_n} \leq 3 \quad (\%) \quad (4.1)$$

Pro výroby s předávacím místem v síti vn platí pro relativní změnu napětí rovnice (4.2):

$$\Delta u_{max vn} = \frac{\Delta U}{U_n} \leq 2 \quad (\%) \quad (4.2)$$

Změnu napětí při spínání lze také odhadnout pomocí zkratového výkonu  $S_{KV}$  v síti PDS pomocí jmenovitého zdánlivého výkonu  $S_{nE}$  podle rovnice (4.3)

$$\Delta u_{max} = k_{i max} \cdot \frac{S_{nE}}{S_{KV}} \quad (\%) \quad (4.3)$$

$k_{i max}$  se nazývá činitelem zapínacího rázu “největším spínacím rázem“ a je definován podle rovnice 4.4, kde  $I_a$  je rozběhový proud (zapínací ráz) a  $I_{nG}$  je jmenovitý proud generátoru.

$$k_{i max} = \frac{I_a}{I_{nG}} \quad (-) \quad (4.4)$$

#### 4.1.2 Řízení jalového výkonu

Řízení jalového výkonu je určeno PDS (provozovateli lokálních distribučních sítí), přičemž zdroje připojované do sítě nn musí dodržet tolerance jmenovitého napětí a požadavek na účinník zdroje, který musí být mezi 0,95 kapacitní a 0,95 induktivní a činná složka výkonu je nad 3 % jmenovitého proudu (transformátor proudu) předávacího místa. Zdroje připojované do sítě vn, které dodávají do sítě činný výkon  $P$  v předávacím místě, musí být opatřeny režimem řízení jalového výkonu pro:

- udržování pevné hodnoty zadaného účinníku  $\cos \varphi$  (tato podmínka postačuje pro zdroje o výkonu do 400 kW),
- udržování hodnoty  $\cos \varphi = f(P)$
- udržování zadané hodnoty jalového výkonu (odběr/ dodávka) v rámci provozního diagramu stroje,
- udržování napětí v předávacím místě (na výstupu z generátoru, za blokovým transformátorem nebo v pilotním uzlu) v rámci omezení diagramem PQ stroje.

Zdroj musí být schopen dodávat činný výkon v rozmezí účinníku 0,85-1 (dodávka jalového výkonu) a účinníku 1-0,95 (odběr jalového výkonu) s dovoleným rozsahem napětí na svorkách generátoru  $\pm 5 U_n$  a s kmitočtem v rozmezí 48,5-50,5 Hz (podle tabulek 4-3 pásma účinníku; doporučuje se použití spotřebičové orientace). V případě nižších hodnot činného výkonu se zjistí dovolené hodnoty jalového výkonu podle provozních diagramů zdroje, který musí být součástí provozně technické dokumentace [10].

V případě silně kolísajícího výkonu pohonu musí být kompenzace jalového výkonu automatická a dostatečně rychle regulovaná. Zdroje při provozu mohou potřebovat prostředky k restrikci napětí harmonických a pro zamezení nepřípustného zpětného ovlivnění HDO, proto PDS musí odsouhlasit výkon, zapojení a způsob regulace kompenzačního zařízení, případně i hrazení harmonických nebo kmitočty HDO vhodnými indukčnostmi. Před spuštěním generátoru nesmějí být připínány kompenzační kondenzátory, je-li generátor vypínán musejí musí být kondenzátory odpojeny současně. Flicker je kolísání světelného toku světelných zdrojů z příčin periodických poklesů napětí a je postřehnutelný lidským okem. Kolísání napětí vyvolává flicker. Je zapotřebí dodržet hodnotu flickru ve společném napájecím bodě vn, nn podle vztahu: (4.5) [10].

$$P_{fi} \leq 0,46 \quad (-) \quad (4.5)$$

## 4.2 KOGENERAČNÍ JEDNOTKY

Kombinovaná (sdružená) výroba elektrické energie a tepla se nazývá kogenerace. Užitím kogenerace se dosáhne snížení spotřeby primárních energetických zdrojů. Další výhodou kogenerace je při snížení spotřeby primárních energetických zdrojů i snížení škodlivých emisí při přeměně do požadovaných forem energie (PEZ). V odděleném způsobu výroby elektrické energie v kondenzační elektrárně a dodávaného tepla z výtopny lokálním spotřebitelům, se v obou výrobních spotřebuje větší množství paliva, než při použití kogenerace. Lokálně se volí takové kogenerační zařízení, aby přesně uspokojilo potřeby lokálních spotřebitelů energií.

Současná legislativa usnadňuje investice do kogenerační výroby i její provozování než minulá legislativa. Základní součásti kogeneračního stroje tvoří čtyři prvky a to motor (pohonná jednotka), elektrický alternátor spolu se zařízením pro připojení na distribuční síť, kotel a tepelný výměník včetně zařízení pro připojení na rozvodnou tepelnou síť a kontrolní a řídicí systém. Pohonná jednotka bývá zastoupena například parní turbínou, spalovací turbínou, paroplynovým (kombinovaným) zařízením, Stirlingovým motorem, mikroturbínou, zařízením využívajícím organický cyklus (ORC), parním motorem.

Kogenerační zařízení s palivovými články nebo s tepelnými čerpadly spolu s absorpčními chladicími systémy a zařízení pro výrobu nových (obnovitelných) paliv pro kogenerační pohony, a to zplyňovací zařízení, zařízení pro rychlou pyrolýzu, zařízení vyrábějící bioplyn jsou novými koncepcemi pro větší efektivnost při užití kogenerace. Použití kogenerace a její pohonné jednotky můžeme rozdělit do pěti skupin tab 4-1. [11]

Tab. 4-1 Použití kogenerace a pohonné jednotky [11]

Použití kogenerace	Pohonná jednotka
Malá kogenerační zařízení k vytápění budov	spalovací motory, mikroturbíny, Stirlingův motor, palivové články
Kogenerační zařízení menších průmyslových podniků	spalovací motory, palivové články
Velká kogenerační zařízení propojená s tepelnými centrály a spalovnami	parní turbíny středního a velkého výkonu, spalovací turbíny v paroplynovém zapojení
Kogenerační zařízení využívající obnovitelné palivové zdroje	spalovací motory méně časté spalovací parní turbíny
Velká kogenerační zařízení pro výrobu páry o vyšších parametrech pro užití v průmyslových aplikacích a velkých komplexech budov	spalovací a parní turbíny, spalovací motory velkého výkonu

Tabulka 4-2 udává charakteristické vlastnosti druhů kogeneračních zařízení:

Tab. 4-2 Charakteristické vlastnosti druhů kogeneračních zařízení [11]

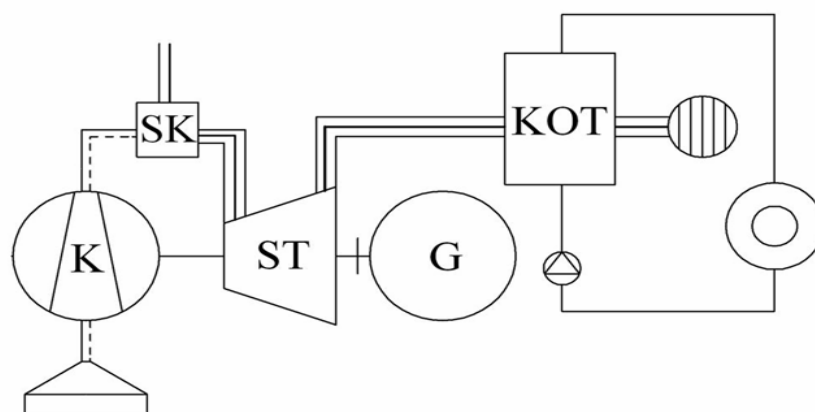
Pohonná jednotka	Užité palivo	Rozsah výkonu (MWe)	Modul teplotě výroby elektřiny	Elektrická účinnost (%)	Celková účinnost (%)	Forma tepla
Protitlaková parní turbína	libovolné	0,1-100	0,1-0,4	7-20	75-88	NT pára, horká voda
Odběrová parní turbína	libovolné	5-300	0,2-0,4(vztaženo na odběrovou páru)	10-30	78-88	NT pára, horká voda
Paroplynové zařízení	zemní plyn, LTO, bioplyn, produkty zplynování	10-400	0,8-2	35-60	85-90	teplá voda, horká voda, pára NT, VT
Spalovací turbína	zemní plyn, LTO, bioplyn, produkty zplynování	0,25-300 (Mikroturbíny 25-250 kW)	0,4-1,2	25-48	75-90	teplá voda, horká voda, pára NT, VT

Parní motor	biopaliva	0,02-1	0,1-0,3	10-25	70-80	teplá voda
Stirlingův motor	zemní plyn, biopalivo	0,001-0,03	0,3-0,7	20-40	70-85	teplá voda
Spalovací motor	zemní plyn, LTO, bioplyn, produkty zplynování	0,01-10	0,5-1,1	25-40	72-92	teplá voda, horká voda, pára NT

[11]

#### 4.2.1 Kogenerace se spalovacími turbínami

Na Obr. 4-1 je zobrazen princip kogenerační spalovací turbíny. Kompresor K stlačuje vzduch nasátý z atmosféry na požadovaný tlak, stlačený vzduch spolu s palivem je na vstupech spalovací komory SK, přičemž ve spalovací komoře se při proudu vzduchu při stálem tlaku spaluje palivo za poměrně velkého přebytku vzduchu (spaliny obsahují dostatek kyslíku, jenž umožňuje přívod dalšího paliva). Následně vzniklé spaliny o vysoké teplotě a tlaku na výstupu ze spalovací komory jsou svedeny do spalovací turbíny, kde expandují. Spalovací turbína pohání kompresor. Nadbytek výkonu se používá pro výrobu elektrické energie v generátoru (většinou synchronní generátor), spaliny vystupující ze spalovací turbíny mívají teplotu 450-550 °C, což umožňuje následnou dodávku horké a teplé vody nebo výrobu středotlaké a nízkotlaké páry (0,9-1,8 MPa) pro technologické účely vytápění, případně i výrobu vysokotlaké páry pro pohon parní turbíny nebo pro technologické účely. Ve špičkách dodávky elektrické energie bez výroby tepla je použit zvláštní komín u výstupu spalin ze spalovací turbíny, který zprostředkuje obtok spalinového kotle. KOT v obr 4-1 je kotel na odpadní teplo ze spalovací turbíny [11].



Obr. 4-1 Princip kogeneračního zařízení spalovací turbíny [11]

#### 4.2.2 Kogenerace se spalovacími mikroturbínami

Spalovací mikroturbíny jsou vysokootáčkové stroje. Bývají konstruovány v rozsahu 25-250 kW elektrického výkonu, většinou mají jednu hřídel a vzduchem chlazená ložiska. V principu pracují obdobně jako kogenerační jednotky se spalovací turbínou. Zahrnují



kompresor, spalovací komoru, regenerační výměník, mikroturbínu a generátor (synchronní, asynchronní). Do budoucna budou využívány jako lokální zdroje tepla, případně jako zdroje elektrické energie pro potřeby lokálních spotřebitelů těchto energií. Mezi jejich přednosti patří vysoká spolehlivost, dlouhý provoz bez nutnosti odstávek, rychlé najíždění a změna výkonu, nízké měrné finanční náklady, malá spotřeba vody, možnost každodenního odstavování, dostupnost vysokopotenciálního tepla, bezobslužný provoz a malé požadavky na chladicí nebo přídavnou vodu. Jejich nevýhodou jsou nároky na palivo, má být relativně kvalitní a čisté, při použití zemního plynu jako paliva je nutný vysoký tlak nebo výstavba zvláštní kompresorové stanice, vysoká hluková hladina, snižující se účinnost při menším zatížení a vyšších teplotách okolí, menší účinnost oproti spalovacím motorům a větší měrné investiční náklady při malých jednotkových výkonech. Otáčky turbíny reguluje převodovka pro potřebnou hodnotu otáček generátoru [11].

### 4.2.3 Možnosti regulace kogeneračních jednotek:

Regulací hodnoty budicího napětí na synchronním generátoru při paralelní spolupráci kogenerační jednotky s distribuční sítí je možné regulovat účinník  $\cos \varphi$ . Kogenerační jednotky mají možnost regulace výkonu pomocí řídicího systému jednotky, přičemž výkon může být plynule regulovatelný pro dodávku elektrické energie do distribuční sítě nebo spotřebu elektrické energie z distribuční sítě pro vlastní spotřebu nebo vyprodukovaná elektrická energie na synchronním (asynchronním) generátoru může být užita pro vlastní spotřebu. Kogenerační jednotka může být regulována také tak, aby provozovatel z distribuční sítě proud neodebíral ani ho do sítě nedodával, v tomto případě regulace kogenerační jednotky kopíruje vlastní spotřebu objektu. V elementárním zapojení rozlišuje kogenerační jednotka při regulaci s asynchronními generátory malých výkonů stavu plný výkon a prohřívací výkon [12].

Jelikož kogenerační jednotky se synchronními generátory mívají větší elektrický výkon než kogenerační jednotky s asynchronními generátory, budou popsány v následující kapitole požadavky pro připojení synchronních generátorů k distribuční síti.

### 4.2.4 Požadavky pro připojení synchronních generátorů k distribuční síti

Synchronní generátory by měly mít takové synchronizační zařízení, aby splnili podmínky rozdílu napětí  $\Delta U < \pm 10 \% U_n$ , rozdílu kmitočtu  $\Delta f < \pm 0,5 \text{ Hz}$  a rozdílu fáze  $\pm 10^\circ$ . Také by měli splnit požadavky z kapitoly 4.1 (str. 47). Směrná hodnota  $k_{imax}=1$  pro synchronní generátory [10].

Tab. 4-3 Přiřazení pásma účinníku pro synchronní generátor [10]

Příklad	Zdrojová orientace	Spotřebičová orientace
Synchronní generátor (přebuzený)	$P > 0$ a $Q > 0$ $0^\circ < \varphi < 90^\circ$	$P < 0$ a $Q < 0$ $180^\circ < \varphi < 270^\circ$

## 4.3 SOLARNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Slunce je zdrojem elektromagnetického záření, které dopadá na Zemi. V lokálním měřítku dopadne na parcelu rodinného domu s pozemkem zhruba 100 MWh energie ze slunce za rok. Na rozmezí zemské atmosféry je hustota dopadající solární energie zhruba 1,4 kW/m<sup>2</sup>, avšak množství dopadající energie je při průchodu atmosférou pohlceno nebo odraženo, proto na zemský povrch dopadne méně než 1 kW/m<sup>2</sup> při slunečním svitu, při zatažené obloze desítky W/m<sup>2</sup>. Globální záření je charakterizováno jako veškeré sluneční záření dopadající na zemský

povrch. Obsahuje záření všech vlnových délek přicházející ze všech směrů. Intenzita slunečního záření se dělí při měření na přímé a difúzní (rozptýlené, při zatažené obloze je pouze difúzní složka záření). Spektrální rozsah slunečního světla je 30-3000 nm, přičemž většina sluneční energie se nalézá v oblasti viditelného záření. Okolo vlnové délky 500 nm se nachází energetické maximum slunečního záření.

### 4.3.1 Fotovoltaický článek

Zařízení umožňující přeměnu slunečního záření na elektrickou energii se nazývá fotovoltaický článek. Fotovoltaický článek je v podstatě velkoplošná dioda. V principu je v malé hloubce pod povrchem vytvořen p-n přechod opatřený z obou stran vhodnými kovovými kontakty. V okamžiku dopadu slunečního záření se generují volné elektrony a díry. Elektrické pole p-n přechodu je oddělí a pošle na opačné strany. Elektrony odešle do vrstvy typu n a tato vrstva se tak stane záporným pólem fotovoltaického článku a díry do vrstvy typu p, která tvoří kladný pól fotovoltaického článku. Podle použitého polovodiče je dáno napětí na fotovoltaickém článku. Při použití křemíku jako polovodiče je hodnota napětí mezi kladným a záporným pólem okolo 0,6 V, při optimálním proudu (výkon je maximální) je hodnota napětí zhruba 0,5V. Při spojení článku do série vznikne modul, který je schopen dát napětí 18 V s 36 články v modulu. Křemíkový článek využije fotony, které mají energii větší než 1,1 eV (vlnové záření o vlnové délce menší než 1100 nm). Infračervené záření dopadající na Zemi obsahuje fotony o energii od 0,5 eV a ultrafialové záření dopadající na Zemi obsahuje fotony o energii do asi 2,9 eV. Křemíkové články dokáží využít velkou část slunečního záření, proto se často používají. Každý foton uvolní pouze jeden elektron a zbytek se přemění v teplo. K tomu dochází u fotonů s kratší vlnovou délkou, a z tohoto důvodu nelze dosáhnout účinnosti větší než 55 %.

#### 4.3.1.1 Současné fotovoltaické články

V současných fotovoltaických člancích, které jsou na trhu k dispozici se dosahuje účinnosti v rozmezí 10-20 %. Křemíkové monokrystalické články, polykrystalické články a amorfnní články jsou dostupné na trhu s fotovoltaickými panely, přičemž monokrystalické křemíkové články v současnosti dosahují lepších parametrů než polykrystalické a amorfnní fotovoltaické články. Ke konci roku 2010 se předpokládá, že instalovaný výkon fotovoltaických panelů přesáhne hodnotu 1 000 MWp na území ČR (není vyloučena ani hodnota instalovaného výkonu 1 500 MWp).

#### 4.3.1.2 Watt peak

Wp (Watt peak) je jednotkou špičkového výkonu dodávaného solárním zařízením za ideálních podmínek, jde tedy přibližně o výkon, který generuje fotovoltaický panel nebo fotovoltaický systém za běžného bezoblačného letního dne při hustotě záření  $1000\text{W/m}^2$ , teplotě  $25\text{ }^\circ\text{C}$  a světelném spektru odpovídajícím slunečnímu záření po průchodu bezoblačnou atmosférou. Výzbrojí fotovoltaických panelů můžou být i koncentrátoři. Toto zařízení umí sluneční záření z velké plochy soustředit na malou plochu fotovoltaického článku (modulu), čímž zvýší výkon (proud) fotovoltaického článku. Finanční náklady na koupi koncentrátoru jsou řádově menší než cena samotného fotovoltaického panelu, avšak v běžném (civilním) užití se objevují málokdy.

#### 4.3.1.3 Měníče proudu (Invertory)

Měníče proudu (invertory, střídače) - fotovoltaické panely dodávají na výstupu stejnosměrné napětí. Pro připojení do distribuční sítě je potřeba toto stejnosměrné napětí transformovat na

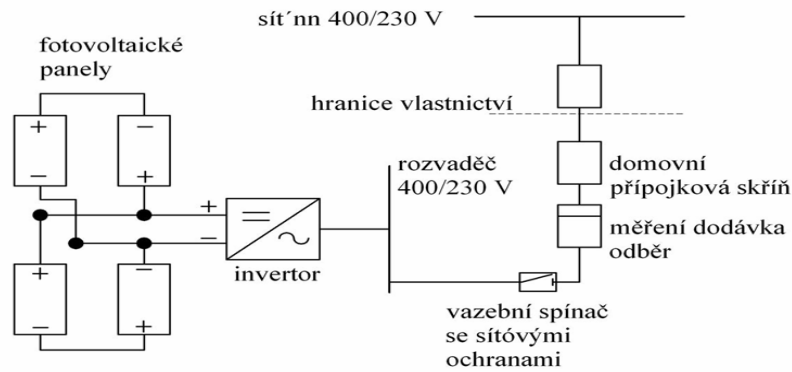
střídavé napětí o požadovaných parametrech (např. napětí, 0,4 kV pro nn, kmitočet 50 Hz, tvar střídavého napětí). Tuto transformaci umožňují invertory. Invertor musí pracovat ve fázi s distribuční sítí. Když je v síti vypnutý proud, fotovoltaická elektrárna se musí okamžitě odpojit nebo se musí automaticky odpojit, stejně jako se musí automaticky odpojit při vnitřní poruše. Účinnost výroby se odvíjí od zvoleného invertoru. Zvýšení účinnosti se dá docílit použitím menších měničů, ty pak spínají dle okamžitých požadavků na výkon [13][14][15].

V současnosti se při dodávce elektrické energie do distribuční sítě užívají tři typy invertorů, a to modulové, řetězové a centrální. Modulové invertory jsou živeny stejnosměrnou elektrickou energií pouze z jednoho fotovoltaického panelu. Toto řešení je ojedinělé, avšak umožňuje pozorovat ideální pracovní podmínky každého fotovoltaického panelu. K nevýhodám užití této koncepce patří větší množství invertorů, čímž se snižuje celková účinnost fotovoltaického systému a rostou celkové pořizovací náklady na fotovoltaickou elektrárnu. Tyto invertory se užívají obvykle pro laboratorní účely. Řetězové invertory pracují s výkony v řádu jednotek kW a zpravidla v jednofázovém provedení, přičemž bývají napájeny napětím několika paralelně spojených fotovoltaických panelů. K jejich přednostem patří paralelní záloha, odolnost proti poruchám a možnost pozorovat ideální pracovní podmínky v každém paralelně spojeném bloku fotovoltaických panelů. Střídače mohou být sloučeny do skupin. Centrální invertory se používají u velkých fotovoltaických elektráren větších výkonů (10-250 kW). K distribuční soustavě jsou připojeny až několika desítkami spojených řetězců. Tyto invertory zprostředkovávají centrální obsluhu a údržbu, avšak porucha jedné části způsobí výpadek celé fotovoltaické elektrárny. Invertory lze klasifikovat i podle jejich konstrukce, a to buď s vestavěným transformátorem, anebo bez transformátoru. Výhodou invertorů s vestavěným transformátorem je galvanické oddělení, které umožňuje lepší bezpečnost provozu (odděluje AC a DC část), jejich nevýhodou oproti invertorům bez transformátoru je nižší účinnost (o 1-2 %), vyšší cena a hmotnost. Některé třífázové invertory bez transformátoru dosahují účinnosti i 99 %. [16]

#### 4.3.1.4 Fotovoltaické elektrárny:

Fotovoltaické elektrárny vystavené čistě pro dodávku elektrické energie do distribuční sítě nesou označení jako tzv. grid – on systémy. V odlehlých oblastech bez možnosti přípojky k distribuční síti nebo z důvodů finančně nákladného zřízení přípojky z distribuční sítě nebo při jiných negativních faktorech připojení k distribuční síti vznikají fotovoltaické systémy označované jako tzv. grid – off systémy, které pracují v ostrovním provozu (nejsou spojeny s distribuční sítí). [16]

Množství dodávané el.energie z fotovoltaického systému do sítě je měřeno elektroměrem. U fotovoltaických elektráren do výkonu 4,6 kVA/na fázi (včetně 4,6 kVA) se při připojení do sítě nn kompenzace účiníku nepožaduje. Schéma fotovoltaického systému s možností ostrovního provozu je na obr 4-2. Toto uskupení umožňuje dodávku elektrické energie do distribuční sítě, ale i ostrovní provoz [10].

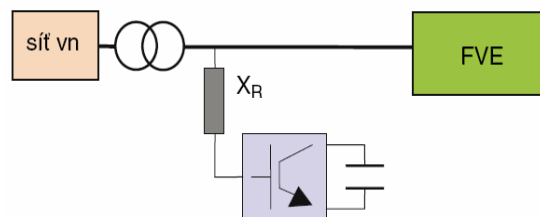


Obr. 4-2 Schéma fotovoltaického systému s možností ostrovního provozu [10]

### 4.3.2 Elektronický kompenzátor jalového výkonu a účinníku

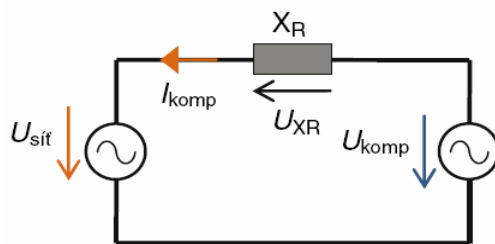
Distribuční soustava a její regulace byla původně koncipována pro distribuci elektrické energie od definovaných zdrojů ke spotřebičům. S možností finančních dotací pro obnovitelné zdroje elektrické energie dochází v současnosti k růstu počtu rozsáhlých fotovoltaických elektráren (grid - on) o výrobních výkonech v řádu MW či domácích fotovoltaických elektráren o menších výkonech připojovaných k distribuční soustavě, proto je nutné do budoucna dimenzovat distribuční síť jako inteligentní distribuční síť, jež zvládne řízení rozptýlené výroby elektrické energie, její akumulaci a spotřebu. Elektronický kompenzátor STELCOM je proudový zdroj s možností rychlé a plynulé regulace jalového proudu pro regulaci požadovaného účinníku. Pracuje s rychlou odezvou a je dimenzován pro fotovoltaické elektrárny s výkonem až 1 520 kWp. V případě, že generovaný proud se fázově zpožďuje za napětím (induktivní oblast), pracuje kompenzátor jako tlumivka, tedy umožňuje dekompenzaci. V případě, že proud fázově přebíhá napětí (kapacitní oblast) pracuje zařízení jako výkonový kondenzátor, tedy umožňuje kompenzaci. Na obr. 43 vidíme příklad zapojení elektronického kompenzátoru k fotovoltaické elektrárně s vlastním distribučním transformátorem připojeným do sítě vn. Generování proudu je v principu umožněno řízením napěťového zdroje spojeného přes indukčnost k síti. Zařízení je provedeno jako třífázové, ale lze jej modifikovat na jednofázové.

Elektronický kompenzátor se skládá z měniče, třífázového napěťového střídače obsahujícího tranzistory IGBT, akumulátoru energie v podobě kondenzátoru a tlumivky  $X_R$ , která tvoří filtr pro požadovaný průběh sinusového napětí. Napětí na kondenzátoru střídače zajišťuje regulátor napětí a toto napětí je podle potřeby vyšší nebo nižší, než je napětí sítě.



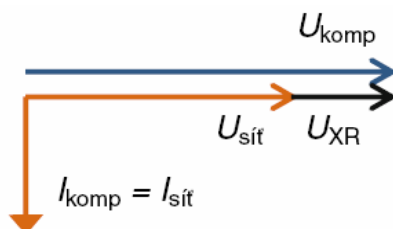
Obr. 4-3 Příklad zapojení kompenzátoru k fotovoltaické elektrárně s vlastním distribučním transformátorem [17]

Měnič elektronického kompenzátoru obsahuje tranzistory řízené pulzně šířkovou modulací. Tranzistory IGBT v třífázovém střídači jsou spínány tak, aby měnič elektronického kompenzátoru generoval napětí, které přes  $X_R$  vytvoří požadovaný regulovatelný proud dodávaný do sítě. Na obr. 4-4 je zjednodušené liniové schéma elektronického kompenzátoru.

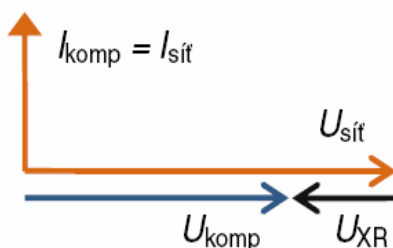


Obr. 4-4 Zjednodušené liniové schéma elektronického kompenzátoru [17]

Změnou amplitudy napětí na kondenzátoru střídače  $U_{komp}$  se reguluje jalový výkon. Je-li  $U_{komp} > U_{sítě}$ , dojde na  $X_R$  k úbytku napětí, které má stejnou fázi jako  $U_{komp}$ , následně dodává elektronický kompenzátor do sítě kapacitní proud. Elektronický kompenzátor se chová jako kondenzátor. Je-li  $U_{komp} < U_{sítě}$ , dojde na  $X_R$  k úbytku napětí, které má obrácenou fázi jako  $U_{komp}$ , následně elektronický kompenzátor dodává do sítě induktivní jalový proud. Elektronický kompenzátor se chová jako tlumivka. Oba možné stavy regulace jsou znázorněny v Obr. 4-5 a Obr. 4-6:



Obr. 4-5 Vektorový diagram v režimu kapacitního proudu [17]



Obr. 4-6 Vektorový diagram v režimu induktivního proudu [17]

Elektronický kompenzátor se schopností regulace velikosti a směru toku proudu první harmonické buď v oblasti kapacitní, nebo induktivní, disponuje tedy i regulací účinníku  $\cos \varphi$ , což je jeho základní vlastnost. Vylepšuje také kvalitu napětí v síti pomocí rozšířené funkce. V případě zkreslení napětí harmonických v síti přejde elektronický kompenzátor na funkci potlačení harmonických, čímž zlepší celkový opravdový účinník  $\lambda$ . V tomto režimu pracuje jako paralelní aktivní filtr, jenž eliminuje deformační výkon v síti. Dalšími doplňujícími funkcemi elektronického kompenzátoru je také možnost zmírnit v uzlu sítě nepříjemný flickr a zaručit symetrii dodávaného proudu do distribuční soustavy z fotovoltaických elektráren, které obsahují větší množství jednofázových invertorů. Celkově toto zařízení zlepšuje kvalitu napětí v síti. Nevýhodou elektronického kompenzátoru je jeho momentální vysoká cena. Při spolupráci s fotovoltaickými elektrárnami, ve kterých invertory nastavují maximální výstupní výkon, dochází ke snížení účinnosti fotovoltaických elektráren. Výhodou elektronického kompenzátoru je pohotová regulace jalového výkonu a komunikace s PDS přes dálkové řízení napěťových poměrů řízení  $U$ ,  $Q$ ,  $\cos \varphi$  v předávacím místě zdroje. Současně předává dálkově PDS aktuální parametry,

čímž ho informuje okamžitě o regulačních možnostech zdroje a o velikosti vyráběného výkonu. Tento produkt splňuje veškeré požadavky PDS. Parametry elektronického kompenzátoru typu 725-t1 600: výkon transformátoru do distribuční soustavy 1 600 kVA, napětí třikrát 400 V, proud 725 A, připojitelný výkon fotovoltaické elektrárny 1 520 kWp, regulační rozsah  $\cos \varphi$  0,95 kapacitní – 0,95 induktivní, rychlost odezvy volitelný parametr (minimálně 20 ms), celkové harmonické zkreslení proudu 5 %, kmitočet 50 Hz (60 Hz), komunikační protokol IEC 60870-5-104 nebo IEC 61850, komunikační připojení ethernet, GSM, RS-485 pro diagnostiku. [17]

### 4.3.3 Požadavky pro připojování výroben se střídači, eventuálně měniči kmitočtu k distribuční síti

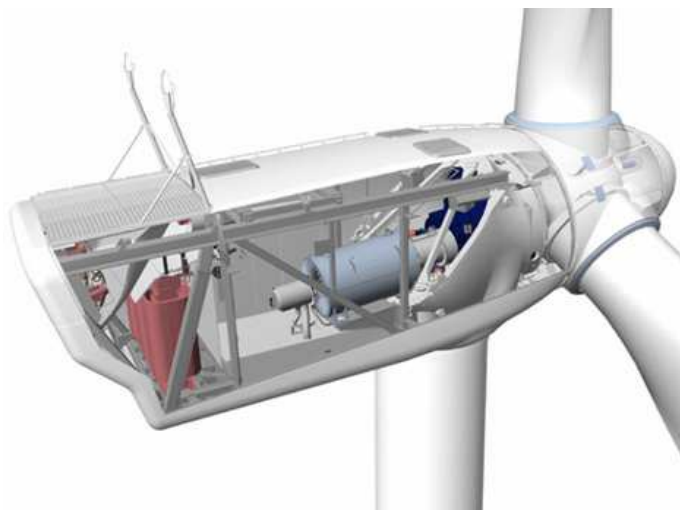
Střídače mohou být spínány pouze v případě, když jejich střídavá strana je bez napětí. Střídače schopné ostrovního provozu, jež nejsou spínány bez napětí musí dodržet podmínky připojování synchronních generátorů k distribuční síti (viz. str. 51). Také by měly splnit požadavky uvedené v kapitole 4.1 (str. 47). Směrná hodnota  $k_{imax} = 1$  pro střídače [10].

## 4.4 VĚTRNÉ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Větrné elektrárny jsou jedním z ekologických zdrojů elektrické energie. Výhodou větrných elektráren je, že energie větru je přírodním zdrojem, který je zdarma. Energie větru je převedena větrnou turbínou na mechanickou energii. Nevýhodou větrných elektráren bývá závislost na aktuálním stavu rychlosti větru, který se dá předpovídat například podle dlouholetých záznamů rychlosti větru v dané lokalitě nebo pravděpodobnostními výpočtovými metodami a meteorologickou předpovědí. Podle větrné mapy se dají předurčit lokality vhodné pro výstavbu větrné elektrárny na daném území. Dodávka elektrické energie do sítě je tedy do jisté míry předvídatelná, ale výkon dodávaný do sítě je zcela závislý na energii větru v daný čas a okamžik, protože je podmíněn aktuálními atmosférickými podmínkami.

### 4.4.1 Větrné elektrárny

Větrná elektrárna se skládá z věže, na níž je usazena gondola a rotor. Nejpoužívanější věže jsou kuželovitého typu z ocelových trubek. Používají se v rozsahu výšek 20-30 m. Mřížové věže jsou zhotoveny ze svařovaných ocelových profilů, jsou konstrukčně nejlevnější, avšak esteticky nezapadají do krajiny a v současnosti téměř vymizely. Věže bývají sešroubovány s betonovým základem, na němž stojí. Výkonná větrná elektrárna v přístavním městě Brunsbüttelu má 120 m vysokou ocelovou věž, rotor s průměrem 126 m, který se otáčí přibližně 7-12 krát za minutu, maximální jmenovitý výkon 5 MW. Na zhotovení tohoto větrného 180 m vysokého díla padlo okolo 1300 m<sup>3</sup> betonu a okolo 180 tun oceli.



Obr. 4-7 Větrná elektrárna [18]

Listy rotoru jsou spojovacím článkem mezi energií větru a větrnou elektrárnou, zprostředkovávají převod větrné energie na pohybovou energii a následně na elektrickou energii. Energie větru proudí zpředu na list rotoru. Listy rotoru bývají zhotoveny převážně z epoxidové pryskyřice, ojediněle z materiálu s uhlíkovými vlákny. Převodovka slouží k převedení otáček listu rotoru (15-20 ot/min) na potřebné otáčky hřídele generátoru (1 500 ot/min). Hnací hřídel je rozdělena tedy na pomalou (list rotoru) a rychlou hřídel generátoru. Její účinnost dosahuje hodnoty 98 %, vzniklé ztráty jsou způsobeny třením ozubených kol ve formě tepla a emisí zvuku. Nejčastěji používané synchronní a asynchronní generátory u větrných elektráren dosahují účinnosti 90-98%.

Synchronní generátory jsou připojovány k síti přímo přes střídač, potřebují finančně nákladné regulační zařízení, jejich výhodou je vyšší účinnost. Asynchronní generátory mají lepší synchronizaci s elektrickou sítí, jelikož skoro nepotřebují regulační techniku, avšak mají horší účinnost než synchronní generátory. Systémy regulace u větrných elektráren bývají navrhovány tak, aby při rychlostech větru kolem 15 m/s bylo dosaženo maximálního výkonu. Výkon větrných elektráren se musí snížit při velmi silném větru z toho důvodu, aby nedošlo ke škodám na zařízení [18].

#### 4.4.1.1 Rozdělení větrných elektráren

Větrné elektrárny můžeme podle výkonu rozdělit do několika skupin:

Větrné microelektrárny dodávají napětí na výstupu 12 V nebo 24 V a výkon od 10 W do 1 kW. Malé větrné elektrárny dodávají na výstupu napětí 230 V, případně 400 V a výkon do cca 15 kW.

Střední a velké větrné elektrárny připojené do distribuční sítě dodávají výkon převážně od 50 kW až po jednotky MW. Hodnota střídavého napětí na výstupu je 660 V a vyšší [20].

#### 4.4.2 Regulace výkonů větrných elektráren

V současnosti se používají převážně tři typy regulace výkonu u větrných elektráren.

##### 4.4.2.1 Regulace Stall

Regulace Stall (regulace odtržení proudu) - listy rotoru bývají našroubované k hlavě pod pevně nastaveným úhlem. Při velmi silném větru se na straně listů odvrácené od větru vytvářejí

turbulence, proto musí být profily listů rotoru dimenzovány z aerodynamického hlediska. Při regulaci se tedy využívá odtržení proudnice vzduchu od listů rotoru při dané rychlosti větru. Následně dojde ke snížení vztlakové síly pohánějící motor, a tedy i ke snížení výkonu větrné elektrárny. Výhodou je jednoduchá konstrukce a méně komplikovaný systém regulace, protože se dá takto vyhnout pohyblivému dílu u rotoru. Nevýhodou jsou značné nároky na aerodynamiku, jelikož se při nesprávném aerodynamickém dimenzování listů rotoru vyvolávají při odtržení proudnice vzduchu od listů rotoru vibrace celé větrné elektrárny [19] [20].

#### 4.4.2.2 Regulace Pitch

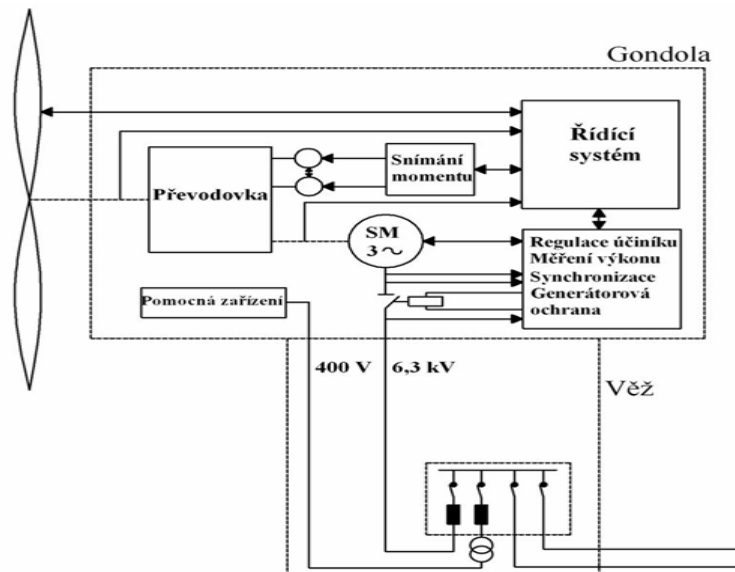
Regulace Pitch (regulace natáčením listů) - výkon větrné elektrárny nepřetržitě měří elektronický regulátor, podle aktuální rychlosti větru se mění natáčení listů rotoru tak, aby byl náběh proudu větru v každém okamžiku maximální. Výhodou regulace pitch je větší množství vyrobené energie i při nižších rychlostech větru, nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady.

#### 4.4.2.3 Aktivní regulace stall

Aktivní regulace stall umožňuje pomalé aktivní natáčení listů rotoru. V případě, že je dosaženo jmenovitého výkonu větrné elektrárny, listy rotoru se otočí do protilehlého směru, tím se úhel nastavení zvýší, odtržení proudu větru se zesílí a odrazí se přebytečná energie větru. Regulace výkonu je přesnější než u regulace stall. Tato regulace se využívá u větrných elektráren s výkonem 1 MW a více [19] [20].

#### 4.4.2.4 Propojení systému regulace u velké větrné elektrárny

Na obr. 4-8 je blokové schéma regulace velké větrné elektrárny, která využívá automatickou regulaci, jež obsahuje regulační podsystémy, jako je regulace natáčení listů rotoru v součinnosti s převodovkou s integrovaným systémem regulace proměnlivého převodového poměru. Tato regulace udržuje konstantní otáčky synchronního generátoru v závislosti na pracovním rozsahu otáček listů rotoru větrné elektrárny. Při silnějším větru dochází ke zvýšení přenášeného momentu, tudíž se sníží převodový poměr na převodovce a listy rotoru mohou mít větší otáčky za minutu. Při vichřicích a silných poryvech větru, kdy vítr dosahuje rychlosti přes 20 m/s, se větrné elektrárny odpojují od distribuční sítě [20].

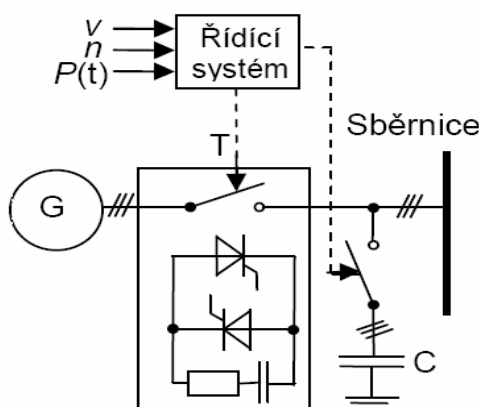


Obr. 4-8 Blokové schéma regulace větrné elektrárny [20]



#### 4.4.2.5 Připojení asynchronního generátoru s kotvou nakrátko u větrné elektrárny

Na obr. 4-9 je blokové schéma pro připojení asynchronního generátoru s kotvou nakrátko u větrné elektrárny. Parametry rychlosti a směru větru zpracovává řídicí a měřicí systém větrné elektrárny. Podle vyhodnocených parametrů je gondola natáčena proti směru větru a při dané limitní rychlosti větru dojde k odbrzdění větrného motoru. Při zjištění potřebné rychlosti větru a jeho udržení po stanovený časový interval dojde k připojení asynchronního generátoru s kotvou nakrátko k distribuční soustavě přes tyristorový spouštěč, aby se zamezilo proudovým rázům. Tyristorový spouštěč je odpojen po odeznění přechodového děje, následně je větrná elektrárna připojena přímo k distribuční soustavě a poté je připojena kondenzátorová baterie pro kompenzaci účinníku. Větrná elektrárna je připojena k distribuční soustavě přes výkonový transformátor při použití algoritmu řídicího systému [21].



Obr. 4-9 Blokové schéma pro připojení asynchronního generátoru s kotvou nakrátko u větrné elektrárny [21]

#### 4.4.3 Požadavky pro připojení asynchronních generátorů k distribuční síti

Pro asynchronní generátory připojované s 95 -105 % synchronních otáček do sítě nn nebo vn platí, že hodnota činitele zapínacího rázu  $k_{imax}$  musí být rovna čtyřem. Připojované asynchronní stroje do vn a nn mající vnitřní přechodové jevy způsobující krátkodobé poklesy napětí smí překročit  $\Delta u_{max}$  jenom dvě periody pro síť nn hodnota  $\Delta u_{max} \leq 6\%$  a u sítě vn hodnota  $\Delta u_{max} \leq 4\%$  po dvě periody. Také by měli splnit požadavky z kapitoly 4.1 (viz. str. 47) [10].

Tab. 4-4 Přiřazení pásma účinníku pro asynchronní generátor [10]

Příklad	Zdrojová orientace	Spotřebičová orientace
Asynchronní generátor	$P > 0$ a $Q < 0$ $270^\circ < \varphi < 360^\circ$	$P < 0$ a $Q > 0$ $90^\circ < \varphi < 180^\circ$

Hodnota flikru je menší při větším počtu listů větrné turbíny. U větrných elektráren je zprostředkovan buď poryvem větru nebo stožárem větrné elektrárny [21].

## 5 CÍLE PRÁCE

Tato bakalářská práce byla koncipována, tak aby pojednala o problematice regulačních systémů, způsobu regulace elektrizační soustavy, analýze stávajících zařízení a jejich významu při regulaci, dále o nových možnostech v oblasti regulace a jejich požadavcích na distribuční síť.

## 6 ZÁVĚR

Práce v úvodní kapitole Úvod do problematiky regulačních systémů obsahuje základní popis elektrizační soustavy a její zvláštnosti provozu. Elektrická energie se prozatím nedá vyrábět na sklad jako ostatní produkty jiných průmyslových odvětví, proto musí být výroba i spotřeba elektrické energie v elektrizační soustavě v bilanční rovnováze. Kapitola shrnuje i výhody paralelně spojených elektrizačních soustav.

V tématické oblasti regulace elektrizační soustavy jsou popsány základní možnosti regulace kmitočtu v elektrizační soustavě a regulace činného výkonu. Bylo komentováno, že regulace činného výkonu má přímou spojitost s regulací kmitočtu, neboť činným výkonem lze přímo regulovat kmitočet. Prvním stupněm regulace kmitočtu (tzv. Primární regulací kmitočtu) se rozumí regulace primárního zdroje energie (voda, pára apd.), obecně množství pracovní látky, do turbíny, kterým ovlivňujeme aktuální množství vyráběného elektrického výkonu. Druhý stupeň regulace kmitočtu (tzv. Sekundární regulace kmitočtu) je určena k doregulování a udržení jmenovitého kmitočtu 50Hz používaného v Evropské unii. Dále se tématická oblast regulace elektrizační soustavy zabývá regulací napětí v elektrizační soustavě s využitím transformátorů používajících přepínání odboček vynutí a zdrojů pro výrobu či spotřebu jalového výklonu, jako jsou synchronní stroje a statické kondenzátory.

Třetím okruhem této práce je analýza stávajících zařízení a jejich význam při regulaci. Z tématu je nejrozsáhleji probrána oblast regulačních zařízení a systému hromadného dálkového ovládní tzv. HDO systém. Systém HDO je využíván pro široké spektrum užití ovládní spotřebičů od domácností, veřejných služeb až po těžký průmysl. Zařízení dekódující signál HDO je vlastně spínač dálkově ovládaného spotřebiče. Spotřebitelé elektrické energie, kteří využívají systému HDO platí v době nízkého tarifu za množství spotřebované elektrické energie nižší cenu, což je nejdůležitějším ekonomickým aspektem pro pořízení takového zařízení. Nejčastěji je systém uplatňován u spotřebičů u kterých je provoz na noční proud žádoucí jakou jsou elektrické kotle, akumulární elektrické vytápění, zásobníky na horkou vodu, průmyslové pece, výkonné motory drtičů, mlýnů a třídičů, průmyslové pračky a sušičky, závlahová, zásobníková čerpadla, veřejného osvětlení atp., nebo u spotřebičů, které je nutno aktivovat dálkově a najednou pro celou oblast jako jsou systémy civilní obrany, tedy poplachové sirény apod. zabezpečovací zařízení.

Na regulaci se podílí i vlastní výroby elektrické energie tzv. špičkové zdroje, jakými jsou přečerpávací vodní elektrárny, akumulární vodní elektrárny, elektrárny se spalovacími turbínami nebo elektrárny paroplynové, které mohou dynamicky reagovat na aktuální požadovaný výkon a začít dodávat elektrickou energii do sítě během několika minut.

Dále se tématický okruh analýza stávajících zařízení a jejich význam při regulaci zabývá některými zařízeními využívanými při regulaci jalového výkonu v elektrizačních soustavách jako jsou synchronní generátor, kompenzátory a tlumivky.

Nové možnosti v oblastech regulace a jejich požadavky na distribuční síť byly zpracovány v souvislosti s obnovitelnými zdroji elektrické energie a kogeneračními jednotkami.

Nejprve byla probrána problematika regulace kogeneračních jednotek a jejich možnosti využití pro výrobu elektrické energie spojené s výrobou tepla pro domácnosti, nebo přílehlé průmyslové objekty a zóny. Do budoucna lze předpokládat značný rozvoj této technologie po celém světě. Za nejvýhodnější využití lze považovat jejich rozmístění v blízkosti hustě zabydlených oblastí, kde by lokálně uspokojili poptávku elektrické energie i potřebného tepla pro ohřev vody a vytápění. Z ekologického hlediska je vhodné využívat jako palivo obnovitelných zdrojů jako jsou přebytečné produkty zemědělství a biomasa (např. dřevoštěpky). Hlavní součástí kogenerační jednotky je spalovací turbína, nebo spalovací mikroturbína, kde regulovaným přívodem pracovní látky do turbíny lze snadno ovlivnit regulaci výkonu na generátoru elektrické energie, který je přímo mechanicky propojen s turbínou. Buzením synchronního generátoru může podle potřeby PDS upravovat velikost dodávaného nebo odebíraného jalového výkonu. Mezi hlavní požadavky pro připojení takového generátoru do distribuční sítě jsou splnění kritérií pro relativní změnu napětí  $\Delta u$ , v předávacím místě vn, nn a dodržení řízení jalového výkonu podle distriktů provozovatelem lokální distribuční sítě a dodržení pásma účinníku pro synchronní generátor.

Za obnovitelný zdroj elektrické energie považujeme takový zdroj energie, který se při správném hospodaření nedá v dlouhodobého hlediska vyčerpat (týká se primárně biomasy). Pro vlastní studium jejich možností připojení k distribuční síti a regulace byly vybrány dva typy elektráren využívající obnovitelných zdrojů energie a to fotovoltaické elektrárny a elektrárny větrné.

Nejprve byly probrány možnosti a úskalí využívání fotovoltaických panelů jako zdrojů elektrického proudu. Hlavní výhodou výroby elektrické energie pomocí fotovoltaických panelů je absolutně ekologická výroba, naopak nevýhodou je vysoká závislost účinnosti na aktuální míře slunečního svitu. Novou možností regulace dodávaného elektrického výkonu je elektronický kompenzátor jalového výkonu a účinníku. Elektronický kompenzátor je proudový zdroj s možností rychlé a plynulé regulace jalového proudu pro regulaci požadovaného účinníku. Pracuje s rychlou odezvou a je dimenzován pro fotovoltaické elektrárny s výkonem až 1 520 kWp. V případě, že generovaný proud se fázově zpožďuje za napětím (induktivní oblast), pracuje kompenzátor jako tlumivka, tedy umožňuje dekompenzaci. V případě, že proud fázově přebíhá napětí (kapacitní oblast) pracuje zařízení jako výkonový kondenzátor, tedy umožňuje kompenzaci. Požadavky distribuční sítě na fotovoltaické elektrárny jsou zaměřeny hlavně na dodržení kritérií pro relativní změnu napětí  $\Delta u$ , v předávacím místě vn, nn a dodržení řízení jalového výkonu podle požadavků kladených provozovatelem lokální distribuční sítě včetně dodržení pásma účinníku jako platí u synchronního generátoru.

V případě větrných elektráren jsou největší úskalí plynoucí z vlastního zdroje energie, kterým je v tomto případě vítr. V naší zeměpisné poloze nelze očekávat stabilní vítr jako je tomu v přímořských oblastech, proto je nutno dodávky těchto elektráren značně regulovat. Regulace se provádí přímo ve větrné elektrárně z pravidla regulací úhlu náběhu listů rotoru (tzv. regulace Pitch nebo aktivní regulace stall), nebo konstrukčním (pevným) řešením úhlu náběhu listu rotoru tak, že v případě možného přetížení dojde k utržení proudnic vzduchu z náběhové hrany listu rotoru a tím k značnému snížení otáček. Jako generátor byl volen často používaný asynchronní generátor, pro nějž plynou požadavky pro připojení k distribuční síti. Požadavky distribuční sítě na asynchronní generátory jsou zaměřeny hlavně na dodržení kritérií pro relativní změnu napětí  $\Delta u$ , v předávacím místě vn, nn a dodržení řízení jalového výkonu podle požadavků kladených provozovatelem lokální distribuční sítě včetně dodržení pásma účinníku pro asynchronní generátor.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HALUZÍK, Evžen. Řízení provozu elektrizačních soustav. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1984. 125 s. Sysno: 000715939 .
- [2] *O nás* [online]. 4.10.2006 [cit. 2010-02-12]. Čeps a.s. Dostupné z WWW: <<http://www.ceps.cz/detail.asp?cepsmenu=1&IDP=23&PDM2=0&PDM3=0&PDM4=0>>
- [3] *ENTSO-E European Network of Transmission Systems Operators for Electricity* [online]. 9.2.2010, 9.2.2010 [cit. 2010-02-9]. ENTSO-E. Dostupné z WWW: <<http://www.entsoe.eu/index.php?id=15>>.
- [4] *ENTSO-E European Network of Transmission Systems Operators for Electricity* [online]. 9.2.2010, 9.2.2010 [cit. 2010-02-9]. ENTSO-E. Dostupné z WWW: <[http://www.entsoe.eu/fileadmin/template/other/images/map\\_entsoe.png](http://www.entsoe.eu/fileadmin/template/other/images/map_entsoe.png)>.
- [5] *Pravidla provozování přenosové soustavy : Kodex přenosové soustavy* [online]. revize 09. Praha : ČEPS, a.s., leden 2009 [cit. 2010-03-24]. Část V.: Bezpečnost provozu a kvalita na úrovni PS, s. . Dostupné z WWW: <[http://www.ceps.cz/doc/kodex/částv\\_09\\_fin0.pdf](http://www.ceps.cz/doc/kodex/částv_09_fin0.pdf)>.
- [6] *Pravidla provozování přenosové soustavy : Kodex přenosové soustavy* [online]. revize 10. Praha : ČEPS, a.s., leden 2010 [cit. 2010-03-28]. Část II.: Podpůrné služby, s. . Dostupné z WWW: <[http://www.ceps.cz/doc/kodex/ČástII\\_10\\_fin1.pdf](http://www.ceps.cz/doc/kodex/ČástII_10_fin1.pdf)>.
- [7] POHORSKY, Jiří . HDO - hromadné dálkové ovládání. první. Praha : BEN, 2002. 118 s. ISBN 80-7300-054-7
- [8] *E.ON* [online]. 2010 [cit. 2010-04-15]. E.ON - slovník pojmů. Dostupné z WWW: <[http://www.eon.cz/cs/info/terms\\_dictionary.shtml](http://www.eon.cz/cs/info/terms_dictionary.shtml)>.
- [9] MATOUŠEK, Antonín. *VÝROBA ELEKTRICKÉ ENERGIE*. první. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ústav elektroenergetiky, 2007. 139 s. ISBN 978-80-214-3317-5.
- [10] BALOUN, Michal. *PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV* [online]. Brno : E.ON, 2009 [cit. 2010-05-20]. PŘÍLOHA 4: PRAVIDLA PRO PARALELNÍ PROVOZ ZDROJŮ SE SÍTÍ PROVOZOVATELE DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY, s. . Dostupné z WWW: <[http://www.eon-distribuce.cz/file/cs/electricity/regulations/PPDS\\_2009\\_4.pdf](http://www.eon-distribuce.cz/file/cs/electricity/regulations/PPDS_2009_4.pdf) >
- [11] KRBEK, Jaroslav; POLESNÝ, Bohumil; ČESKO. ENERGETICKÝ ZÁKON (2000, NOVELA 2006), Česko. Zákon o hospodaření energií (2000, novela 2006). Kogenerační jednotky - zřizování a provoz . 1. vyd. Praha : GAS, 2007. 201 s. ISBN 978-80-7328-151- 9
- [12] *AGROWEB* [online]. 29.8.2008 [cit. 2010-04-28]. Organický odpad a produkce bioplynu. Dostupné z WWW: <[http://www.agroweb.cz/Organicky-odpad-a-produkce-bioplynu\\_\\_s250x31561.html](http://www.agroweb.cz/Organicky-odpad-a-produkce-bioplynu__s250x31561.html)>.
- [13] MURTINGER, Karel; BERANOVSKÝ, Jiří; TOMEŠ, Milan. Fotovoltaika : elektřina ze slunce . 2. vyd. Praha : Brno: : EkoWATT ; ERA,, 2008. 81 s. ISBN 978-80-7366-133-5 (ERAGroup:brož.).

- [14] *EnviWeb* [online]. 15.01.2010 [cit. 2010-05-06]. Fotovoltaika: instalovaný výkon v roce 2009 a snížení výkupních cen pro rok 2011. Dostupné z WWW: <<http://www.enviweb.cz/clanek/archiv/80201/fotovoltaika-instalovany-vykon-v-roce-2009-a-snizeni-vykupnich-cen-pro-rok-2011>>.
- [15] *Solární elektrárny* [online]. 12 Únor 2009 [cit. 2010-05-06]. Jednotka Wp. Dostupné z WWW: <<http://www.solarni.info/component/content/article/8-jednotkawp?format=pdf>>.
- [16] WOLF, Petr. Fotovoltaické elektrárny od návrhu po realizaci. *Světlo* [online]. 2009, 4, [cit. 2010-05-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39403.pdf>>.
- [17] KORENC, Vladimír; BŮBELA, Tomáš; KYSNAR, František. STELCOM - statický regulátor jalového výkonu. *ELEKTRO* [online]. 2009, 10, [cit. 2010-05-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39640.pdf>>.
- [18] *WEB Větrná energie s.r.o* [online]. 2009 [cit. 2010-05-16]. Z čeho se skládá - Větrná elektrárna. Dostupné z WWW: <[http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie\\_9/z-ceho-se-sklada\\_26](http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie_9/z-ceho-se-sklada_26)>.
- [19] *WEB Větrná energie s.r.o* [online]. 2009 [cit. 2010-05-16]. Systémy regulace - Větrná elektrárna. Dostupné z WWW: <[http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie\\_9/systemy-regulace\\_27](http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie_9/systemy-regulace_27)>.
- [20] MÁGR, Josef. *Větrné elektrárny* [online]. 20.04.2009 [cit. 2010-05-17]. Větrné elektrárny. Dostupné z WWW: <<http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/489/obnovitelne-zdroje/Vetrne%20elektrany.pdf>>
- [21] MIŠÁK, Stanislav, et al. Větrné elektrárny s asynchronními generátory v sítích VN. *Elektrorevue* [online]. 11.12.2008, 47, [cit. 2010-05-18]. Dostupný z WWW: <[http://www.vetrneelektrany.bestweb.cz/info/asyn\\_generatory.pdf](http://www.vetrneelektrany.bestweb.cz/info/asyn_generatory.pdf)>. ISSN 1213-1539.