

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Způsoby modelování provozu rozptýlených zdrojů energie
v distribučních sítích**

**vedoucí práce: prof. Ing. Jan Mühlbacher, CSc.
autor: Bc. Ondřej Hrubý**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej HRUBÝ**
Osobní číslo: **E10N0068P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Způsoby modelování provozu rozptýlených zdrojů energie v distribučních sítích**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Uveďte obecné podmínky začlenění rozptýlených zdrojů el. energie do distribučních sítí.
2. Popište hlediska provozu rozptýlených zdrojů energie v distribuční síti.
3. Popište vlivy rozptýlené výroby na regulaci napětí a jalových výkonů v distribuční síti.
4. Popište metody modelování různých provozních stavů rozptýlených zdrojů energie v distribuční síti.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:


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

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Jan Mühlbacher, CSc.**

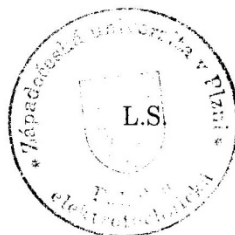
Katedra elektroenergetiky a ekologie

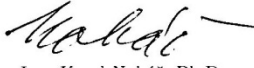
Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá rozptýlenými zdroji energie, jejichž uplatnění a začleňování do distribučních sítí je jedním z hlavních témat současné energetiky. V diplomové práci jsou popsány jednotlivé zdroje rozptýlené výroby, podmínky jejich začleňování do distribučních sítí a hlediska jejich provozu v České republice. Práce také obsahuje zpracování problematiky zpětných vlivů rozptýlené výroby do distribučních sítí a možnosti pro jejich minimalizování. V souvislosti s různými provozními stavy, které mohou nastat v distribuční síti, je v práci posouzen význam využití matematicko-fyzikálních modelů pro potřeby elektroenergetiky.

Klíčová slova

Rozptýlená výroba, obnovitelné zdroje energie, distribuční síť, připojovací podmínky, hlediska provozu, zpětné vlivy, metody modelování.

Methods of modelling of operation of distribution power sources in distribution network

Abstract

This diploma thesis is dealing with the issue of distribution power sources whose usage and involvement into distribution network are one of the main topics of today's energetics. The diploma thesis is describing particular sources of the distributed generation, conditions of applying into the distribution network and operational aspects in the Czech Republic. Moreover, I mention feedbacks of the distributed generation and the possibilities for their minimizing. In the relation to various operation aspects that may happen within the distribution network, the importance of mathematical and physics models for electro-energetics purposes is also considered.

Key words

Distributed generation, renewable energy sources, distribution network, connection conditions, operational aspects, feedbacks, methods of modelling.

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 10.5.2012

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Janu Mühlbacherovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych ještě rád poděkoval své rodině za pochopení a podporu během celé doby mého studia.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| OBSAH | 8 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 10 |
| SEZNAM TABULEK | 11 |
| SEZNAM GRAFŮ | 12 |
| SEZNAM SYMBOLŮ | 13 |
| ÚVOD | 15 |
| CÍL PRÁCE | 15 |
| 1 OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE | 16 |
| 1.1 VODNÍ ELEKTRÁRNY..... | 17 |
| 1.1.1 Rozdělení vodních elektráren..... | 18 |
| 1.1.2 Rozdělení vodních turbín..... | 19 |
| 1.1.3 Situace vodních elektráren v ČR..... | 19 |
| 1.1.4 Výhody a nevýhody vodních elektráren..... | 20 |
| 1.2 BIOMASA..... | 21 |
| 1.2.1 Rozdělení druhů biomasy..... | 21 |
| 1.2.2 Využití biomasy..... | 22 |
| 1.2.3 Spalování biomasy..... | 23 |
| 1.2.4 Anaerobní fermentace biomasy..... | 23 |
| 1.2.5 Emise při využívání biomasy..... | 24 |
| 1.2.6 Výhody a nevýhody využití biomasy..... | 24 |
| 1.3 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY..... | 25 |
| 1.3.1 Princip větrných elektráren..... | 25 |
| 1.3.2 Výpočet výkonu větrné elektrárny..... | 25 |
| 1.3.3 Rozdělení větrných elektráren..... | 26 |
| 1.3.4 Základní části větrných elektráren..... | 27 |
| 1.3.5 Stav větrných elektráren v ČR..... | 29 |
| 1.3.6 Výhody a nevýhody větrných elektráren..... | 30 |
| 1.4 FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY..... | 31 |
| 1.4.1 Základní princip přímé přeměny..... | 31 |
| 1.4.2 Technologie výroby solárních článků..... | 32 |
| 1.4.3 Situace fotovoltaiky v ČR..... | 33 |
| 1.4.4 Problematika spojená s fotovoltaickými elektrárnami..... | 34 |
| 1.4.5 Výhody a nevýhody fotovoltaických elektráren..... | 36 |
| 1.5 PŘEHLED INSTALOVANÉHO VÝKONU V ČR A PODÍLŮ VÝROBY JEDNOTLIVÝCH ZDROJŮ..... | 36 |
| 1.5.1 Struktura instalovaného výkonu v ČR [%]..... | 37 |
| 1.5.2 Přehled výkupních cen za elektřinu z OZE v ČR..... | 37 |
| 2 ENERGETICKÁ LEGISLATIVA ČESKÉ REPUBLIKY | 38 |
| 3 ZAČLEŇOVÁNÍ ROZPTÝLENÝCH ZDROJŮ ELEKTRICKÉ ENERGIE DO DS | 39 |
| 3.1 PŘIPOJITELNOST VÝROBNY..... | 39 |
| 3.2 PŘIPOJENÍ K SÍTI..... | 40 |
| 3.3 SPÍNACÍ ZAŘÍZENÍ..... | 40 |
| 3.4 OCHRANY..... | 40 |
| 3.5 PODMÍNKY PRO PŘIPOJENÍ..... | 41 |
| 3.5.1 Zvýšení napětí..... | 41 |
| 3.5.2 Změny napětí při spínání..... | 42 |
| 3.5.3 Připojování synchronních generátorů..... | 43 |
| 3.5.4 Připojování asynchronních generátorů..... | 43 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.5.5 | <i>Připojování výroben se střídači, ev. měniči kmitočtu</i> | 43 |
| 3.5.6 | <i>Zvláštní požadavky na výroby s OZE s výkonem nad 15 MW připojované do sítí 110 kV</i> | 44 |
| 4 | HLEDISKA PROVOZU ROZPTÝLENÝCH ZDROJŮ ELEKTRICKÉ ENERGIE V DS | 46 |
| 4.1 | ZÁSADY PODPORY SÍTĚ | 46 |
| 4.2 | PŘIZPŮSOBENÍ ČINNÉHO VÝKONU..... | 46 |
| 4.2.1 | <i>Řízení činného výkonu v závislosti na provozních podmínkách</i> | 47 |
| 4.3 | ŘÍZENÍ JALOVÉHO VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA PROVOZNÍCH PODMÍNKÁCH | 47 |
| 4.4 | ZPĚTNÉ VLIVY NA NAPÁJECÍ SÍŤ | 48 |
| 4.4.1 | <i>Změna napětí</i> | 48 |
| 4.4.2 | <i>Proudy harmonických</i> | 49 |
| 4.4.3 | <i>Ovlivnění zařízení HDO</i> | 50 |
| 5 | VLIV ROZPTÝLENÉ VÝROBY NA REGULACI NAPĚTÍ A JALOVÝCH VÝKONŮ V DS | 52 |
| 5.1 | REGULACE NAPĚTÍ A JALOVÉHO VÝKONU V ČR | 52 |
| 5.1.1 | <i>Primární regulace</i> | 52 |
| 5.1.2 | <i>Sekundární regulace</i> | 52 |
| 5.1.3 | <i>Terciární regulace</i> | 52 |
| 5.2 | PROBLEMATIKA REGULACE U FVE..... | 53 |
| 5.2.1 | <i>Kompenzace a dekompenzace</i> | 53 |
| 5.2.2 | <i>Princip elektronické (de)kompenzace</i> | 54 |
| 5.2.3 | <i>Dynamika kompenzace</i> | 55 |
| 5.2.4 | <i>Rizika při nesprávně navržené regulaci</i> | 56 |
| 5.2.5 | <i>Bilance výkonů reálné FVE</i> | 56 |
| 5.3 | OVlivňování U v předávacím místě a změny účinníku při provozu farmy VTE | 57 |
| 5.3.1 | <i>Bilance rozdílu napětí při různých provozních stavech</i> | 57 |
| 5.3.2 | <i>Bilance účinníku při různých provozních stavech</i> | 59 |
| 5.4 | Soudobost výroby..... | 61 |
| 5.5 | ROZVOJ ES | 61 |
| 5.5.1 | <i>Zásobníky elektrické energie</i> | 61 |
| 5.5.2 | <i>Smart Grids</i> | 63 |
| 6 | METODY MODELOVÁNÍ PROVOZNÍCH STAVŮ ROZPTÝLENÝCH ZDROJŮ ENERGIE V DS | |
| | 64 | |
| 6.1 | CHARAKTERISTIKA MODELOVÁNÍ | 64 |
| 6.2 | PROVOZNÍ STAVY V ES | 65 |
| 6.3 | MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ | 66 |
| 6.3.1 | <i>Postup vytváření deduktivních matematických modelů</i> | 66 |
| 6.3.2 | <i>Bilanční matematické modely</i> | 68 |
| 6.4 | MODELOVACÍ METODY | 68 |
| 6.1 | SBĚR DAT PRO POTŘEBY MODELOVÁNÍ | 69 |
| 6.2 | SIMULAČNÍ PROGRAMY VYUŽÍVANÉ V ELEKTROENERGETICE..... | 70 |
| | ZÁVĚR | 73 |
| | POUŽITÁ LITERATURA | 1 |
| | PŘÍLOHY | 3 |
| | SEZNAM PŘÍLOH | 3 |
| | PŘÍLOHA A | 4 |
| | PŘÍLOHA B | 5 |
| | PŘÍLOHA C | 6 |
| | PŘÍLOHA D | 7 |
| | PŘÍLOHA E | 8 |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1-1 Křivka ročního průtoku..... | 17 |
| Obr. 1-2 Náskres a) derivační elektrárny, b) přečerpávací elektrárny..... | 18 |
| Obr. 1-3 Princip přeměny energie VtE..... | 25 |
| Obr. 1-4 Výkonostní křivka větrné turbíny 2,5 MW [38]..... | 26 |
| Obr. 1-5 Náskres horizontální a vertikální větrné turbíny..... | 27 |
| Obr. 1-6 Výkonové křivky při regulaci a)"pitch", b)"stall"..... | 27 |
| Obr. 1-7 VtE - zapojení s indukčním generátorem s dvojitým vinutím..... | 29 |
| Obr. 1-8 VtE - zapojení s přímo poháněným synchronním generátorem..... | 29 |
| Obr. 1-9 Řez struktury solárního článku..... | 31 |
| Obr. 1-10 Typy solárních článků [39]..... | 32 |
| Obr. 1-11 Příklad kolísání dodávky činného výkonu FVE [18]..... | 34 |
| Obr. 1-12 Využití společného zapojení měničů..... | 34 |
| Obr. 1-13 Znázornění vzniku přepětí na vedení odběratele od předávacího místa k FVE..... | 35 |
| Obr. 3-1 Snížení činného výkonu OZE při nadfrekvenci..... | 44 |
| Obr. 3-2 Meze průběhu napětí v přípojovacím bodě pro výrobu s OZE typu 2 při poruše v síti..... | 45 |
| Obr. 5-1 Vliv kapacitního a induktivního charakteru výkonu na velikosti napětí..... | 54 |
| Obr. 5-2 a) Připojení kompenzátoru k síti, b) Schéma kompenzátoru..... | 54 |
| Obr. 5-3 - Vektorový diagram v režimu a) induktivního proudu, b) kapacitního proudu..... | 55 |
| Obr. 5-4 Ideální a pozdní průběh kompenzace..... | 55 |
| Obr. 5-5 Průběh závislosti jalového výkonu na činném výkonu FVE - 2400 kW, záporně je dodávka do sítě [19]. | 56 |
| Obr. 5-6 Průběh dodávky VtE na straně 110 kV [14]..... | 57 |
| Obr. 5-7 Průběhy ΔU při různých stavech dodávky P [14]..... | 58 |
| Obr. 5-8 Průběh ΔU v závislosti na dodávaném výkonu [14]..... | 58 |
| Obr. 5-9 Průběhy účinníku při různých provozních stavech [14]..... | 59 |
| Obr. 5-10 Závislost účinníku na činném výkonu [14]..... | 60 |
| Obr. 5-11 Závislost účinníku na činném výkonu při malé dodávce [14]..... | 60 |
| Obr. 5-12 Úhel vektoru zdánlivého výkonu v závislosti na P [14]..... | 60 |
| Obr. 5-13 Princip využití Smart Grids pro regulaci napětí v síti vn..... | 64 |
| Obr. 6-1 Kategorie provozních stavů v ES..... | 65 |
| Obr. 6-2 Obecný postup vytváření deduktivního matematického modelu..... | 67 |

Seznam tabulek

| | |
|---|-----------|
| <i>Tabulka 1-1 Členění vodních elektráren podle výkonu</i> | <i>18</i> |
| <i>Tabulka 1-2 Hrubá výroba elektřiny a instalovaný výkon vodních elektráren v ČR v roce 2010</i> | <i>20</i> |
| <i>Tabulka 1-3 Výhřevnost biopaliv s proměnným obsahem vody</i> | <i>22</i> |
| <i>Tabulka 1-4 Výroba z biomasy v elektrárnách ČEZ, a.s., v ČR</i> | <i>23</i> |
| <i>Tabulka 1-5 Rozdělení VtE</i> | <i>26</i> |
| <i>Tabulka 1-6 Podíl OZE na spotřebě energie</i> | <i>36</i> |
| <i>Tabulka 1-7 Struktura instalovaného výkonu v ČR</i> | <i>37</i> |
| <i>Tabulka 3-1 Nastavení ochran</i> | <i>41</i> |
| <i>Tabulka 4-1 Umožnění připojitelnosti výroby k síti bez posouzení ovlivnění HDO</i> | <i>51</i> |

Seznam grafů

| | |
|---|----|
| <i>Graf 1-1 Vývoj instalovaného výkonu a výroby VtE v ČR</i> | 30 |
| <i>Graf 1-2 Instalace VtE podle krajů ČR</i> | 30 |
| <i>Graf 1-3 Výkon a výroba FVE v jednotlivých letech</i> | 33 |
| <i>Graf 1-4 Výroba elektřiny z OZE za rok 2010</i> | 36 |
| <i>Graf 1-5 Vývoj struktury instalovaného výkonu v ČR</i> | 37 |
| <i>Graf 1-6 Vývoj výkupních cen elektrické energie z OZE v ČR</i> | 37 |

Seznam symbolů

Zkratky:

| | |
|-------------|---|
| RZ | Rozptýlené zdroje |
| OZE | Obnovitelné zdroje energie |
| FVE | Fotovoltaické elektrárny |
| VtE | Větrné elektrárny |
| VE | Vodní elektrárny |
| PS | Přenosová soustava |
| DS | Distribuční soustava |
| ES | Elektrizační soustava |
| OZ | Opětovné zapnutí |
| PDS | Provozovatel distribuční sítě |
| PPDS | Pravidla provozování distribučních soustav |
| ERÚ | Energetický regulační úřad |
| ČEPS | ČEPS, a.s. – provozovatel přenosové soustavy ČR |
| HDO | Hromadné dálkové ovládání |
| SG | Smart Grids |

Značení:

| | | |
|------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| nn | nízké napětí | (0,4/0,23; 0,5; 0,69 kV) |
| vn | vysoké napětí | (3; 6; 10; 22; 35 kV) |
| vvn | velmi vysoké napětí | (110; 220 kV) |
| Q | průtok vodním motorem | $[m^3 \cdot s^{-1}]$ |
| ρ | měrná hmotnost vody | $[kg \cdot m^{-3}]$ |
| g | tíhové zrychlení | $[m \cdot s^{-2}]$ |
| H | využitelný spád | [m] |
| P | výkon vodní turbíny | [W] |
| T | počet hodin provozu | [h] |
| v | rychlost vzduchu | $[m \cdot s^{-1}]$ |
| A | činná plocha rotoru | $[m^2]$ |
| c_p | výkonový součinitel | [-] |
| ρ_v | hustota vzduchu | $[kg \cdot m^{-3}]$ |
| S_{kV} | zkratový výkon | [VA] |
| S_{Amax} | maximální zdánlivý výkon | [VA] |

| | | |
|-------------|---|---------|
| S_{nE} | jmenovitý zdánlivý výkon výrobní jednotky | [VA] |
| S_{nG} | jmenovitý zdánlivý výkon generátoru | [VA] |
| k_{kl} | zkratový poměr výkonů | [-] |
| ψ_{kV} | fázový úhel zkratové impedance | [°] |
| φ | fázový úhel mezi proudem a napětím | [°] |
| f_s | frekvence sítě | [Hz] |
| ΔP | snížení výkonu | [W] |
| P_m | okamžitý výkon | [W] |
| I_v | přípustný harmonický proud | [A] |
| i_v | vztažný proud | [A/MVA] |
| P_{lt} | dlouhodobý flickr | [-] |
| c | činitel flickru | [-] |

Úvod

V dnešní době je už bezpochyby nemyslitelné představit si život, jak ho známe, bez elektrické energie. Technický pokrok a s ním neustále se zvyšující požadavky právě na elektrickou energii s sebou nesou i problematiku, jak rostoucí potřeby uspokojit. Jednou z variant, jak lze přispět k výrobě elektrické energie, je využívání tzv. rozptýlených zdrojů elektrické energie (RZ). Rozptýlená výroba se týká lokální výroby elektrické energie, v případě kogeneračních systémů i tepla. Rozptýlená výroba tedy zpravidla probíhá blízko míst, kde je energie současně spotřebována. Mezi rysy rozptýlené výroby patří např. necentrální dodávka, často je provozována nezávislými výrobci, bývá menších výkonů – do 50 MW (ačkoliv některé systémy mají i několikanásobně větší výkon) a vzhledem k výkonu je připojována do distribuční sítě. Jak již bylo řečeno, mezi zástupce RZ patří kombinovaná výroba tepelné a elektrické energie (kogenerace), která využívá technologií spalovacích motorů, plynových turbín, mikroturbín a Stirlingových motorů. Častěji je však rozptýlená výroba spojována s obnovitelnými zdroji energie (OZE), a právě na ně se v této práci zaměřuji.

Hlavním lákadlem OZE je jejich prakticky nevyčerpatelný potenciál. Problémem zůstává, že v současné době jsme, dá se říci, stále na začátku a teprve se učíme tyto zdroje smysluplně využívat. Nehledě na problémy, které nové technologie přinášejí do stávajících technologických řešení distribuce elektrické energie.

Mezi takovéto zdroje patří v našich podmínkách především fotovoltaické elektrárny, větrné elektrárny, vodní elektrárny a elektrárny využívající biomasu. Tyto výrobní mají oproti klasickým elektrárnám některé specifické vlastnosti. Zejména se jedná o FVE a VtE, jejichž výkon je přímo ovlivňován aktuálním stavem počasí. Z důvodu možných nežádoucích zpětných vlivů musí být jejich začleňování a provozování v elektrizačních soustavách rozumně uváženo.

Cíl práce

Cílem mé diplomové práce je vysvětlení problematiky rozptýlených zdrojů elektrické energie, popsání podmínek pro začlenění těchto zdrojů do elektrizační soustavy a uvedení hledisek jejich provozu v distribuční síti. S tím souvisí i posouzení zpětných vlivů na distribuční soustavu, jež tyto zdroje vyvolávají. Posledním úkolem je pak nastínit metody modelování různých provozních stavů RZ v distribuční síti.

1 Obnovitelné zdroje energie

Definice obnovitelného zdroje podle českého zákona o životním prostředí zní: „*Obnovitelné přírodní zdroje mají schopnost se při postupném spotřebovávání částečně nebo úplně obnovovat, a to samy nebo za přispění člověka.*“ [21]

Celý svět uznává potřebu podpory obnovitelných zdrojů energie jako jednu z priorit dnešní doby. Proto je nutné zajistit, aby byl tento potenciál lépe využíván v rámci vnitřního trhu s elektřinou. A přesto, že obnovitelné zdroje energie zažívají rozvoj, je důležité si všimnout některých problémů.

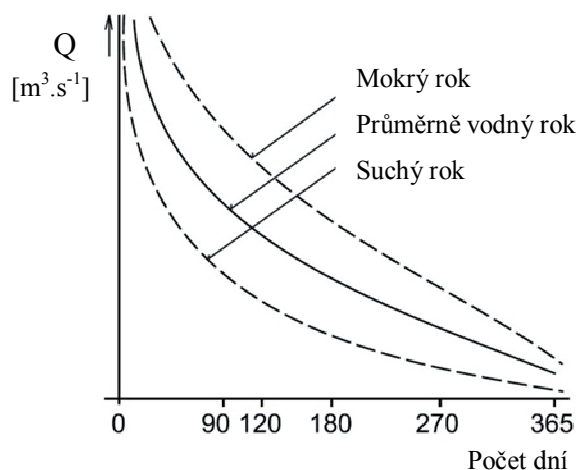
Za první, dostupnost obnovitelných zdrojů energie při úměrných nákladech má své technické a praktické hranice. V intenzitě větrné a sluneční energie existují výrazné zeměpisné rozdíly. Výroba biomasy musí konkurovat dalším způsobům využití půdy, zejména v zemědělství. Počet lokalit, které mohou být využity pro výrobu elektřiny z vodní energie, je omezen.

Za druhé, obnovitelné zdroje energie potřebují tradiční zdroje energie jako zálohu. Větrná a sluneční energie je nestálá a omezená. Klimatické faktory mohou v jednotlivých letech způsobit velké rozdíly v dostupnosti biomasy i vodní energie. Tak může vzniknout nadměrná záložní kapacita tradičních zdrojů, vedoucí k dalším nákladům. Z těchto důvodů existuje určitá hranice podílu obnovitelných zdrojů energie, které jsou naše současné systémy zásobování energií schopny zpracovat. Rozvoj obnovitelných zdrojů energie také vyžaduje nové investice do současných energetických systémů, jako například elektrických sítí a záložních systémů.

V ČR je výroba z OZE zastoupena zejména výrobami pracujícími s energií vody, biomasy, bioplynu, větru a slunce. Výrobny využívající obnovitelné zdroje energie mají určité specifické vlastnosti oproti klasickým elektrárnám používajících fosilní paliva. Nejmarkantnější rozdíl představuje závislost větrných a fotovoltaických elektráren na aktuálním stavu počasí. U těchto typů výroben vyvolávají změny počasí výrazné kolísání výkonu, což může ve výsledku nepříznivě ovlivňovat kvalitu elektrické energie. Vzhledem k individualitě jednotlivých výroben OZE popisují další podkapitoly jejich základní vlastnosti a principy přeměn energie.

1.1 Vodní elektrárny

Vodní elektrárny pracují ve své podstatě na jednoduchém principu přeměny potenciální (spád) a kinetické (průtok) energie vodního toku na energii elektrickou. K přeměně energií slouží tzv. turbogenerátor. Jedná se o soustrojí skládající se z turbíny a generátoru na společné hřídeli. Mechanická energie proudící vody se díky tomuto soustrojí přeměňuje na základě elektromagnetické indukce na energii elektrickou. Rozeznáváme několik základních technologických typů turbín, kdy se každá hodí pro jiné hodnoty spádu a průtoku. Každá turbína má definovanou velikost minimálního a maximálního průtoku, při kterém pracuje a tím i vlastně udává rozsah možného dodávaného výkonu elektrárny. Zejména u malých elektráren se pak při znalosti ročního průtoku (Obr. 1-1) volí mezi použitím např. dvou menších turbín místo jedné velké z důvodu pokrytí širšího výrobního pásma během celého roku. Rozhodujícím kritériem pro výběr by mělo být porovnání účinnosti variant a ekonomicko-hospodářského zhodnocení.



Obr. 1-1 Křivka ročního průtoku

Výkon vodní turbíny je dán vztahem:

$$P = \rho * g * Q * H \text{ [W]} \quad (1-1)$$

kde Q je průtok vodním motorem [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
 ρ je měrná hmotnost vody [$1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 g je tíhové zrychlení [$9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$],
 H je využitelný spád [m].

Množství vyrobené elektrické energie je dáno vztahem:

$$A = P * T \text{ [Wh]} \quad (1-2)$$

kde P je výkon vodní turbíny [W],
 T je počet hodin provozu [h].

1.1.1 Rozdělení vodních elektráren

Vodní elektrárny se dělí podle několika základních kritérií, např. podle výkonu, konstrukce, spádu a použité turbíny.

Členění vodních elektráren podle výkonu:

| | |
|-----------|--|
| Od 100 MW | Velké elektrárny |
| Do 100 MW | Střední elektrárny |
| Do 10 MW | Horní výkonová hranice pro malé VE |
| Do 1 MW | Malé vodní elektrárny (průmyslové, veřejné, závodní) |
| Do 100 kW | Malé vodní elektrárny drobné |
| Do 35 kW | Mikrozdroje |

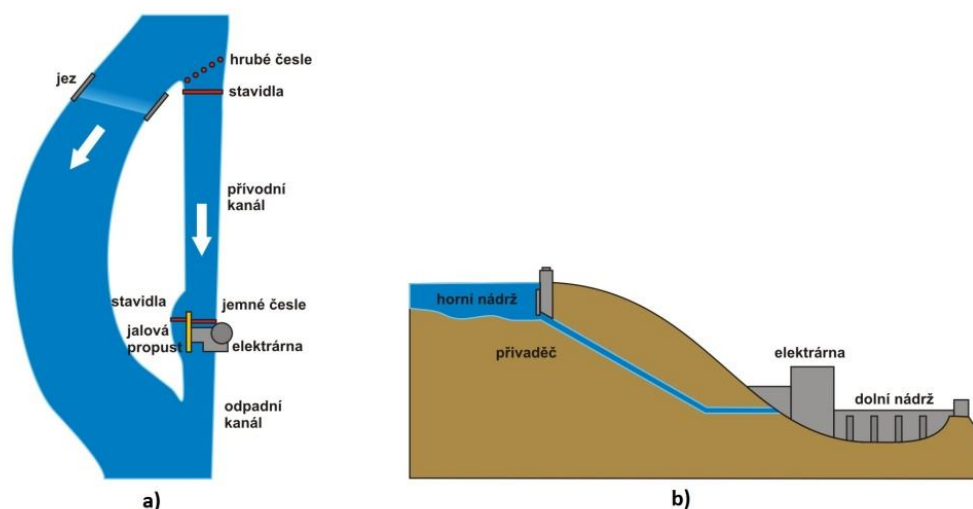
Tabulka 1-1 Členění vodních elektráren podle výkonu

Dle spádu:

- nízkotlaké – spád do 20 m; středotlaké – do 100 m; vysokotlaké – nad 100 m

Dle konstrukce:

- průtočné (jezové) elektrárny – jsou umístěny v přímém kontaktu s vodním tokem,
- derivační (náhonové) elektrárny (Obr. 1-2) – jsou umístěné na uměle vytvořeném kanálu, kterým se po určitém úseku derivace vrací voda do původního toku,
- akumulační (přehradní) elektrárny – spád je vytvořen pomocí přehrady,
- přečerpávací elektrárny (Obr. 1-2) – slouží k vyvažování energetických špiček v rozvodné síti. Přečerpávací elektrárny mají dvě nádrže a v době přebytku energie v síti tuto energii spotřebovávají k čerpání vody ze spodní nádrže do nádrže horní, zatímco v době energetických špiček naopak průtokem vody z horní nádrže do spodní nádrže elektrickou energii vyrábějí.



Obr. 1-2 Nákres a) derivační elektrárny, b) přečerpávací elektrárny

1.1.2 Rozdělení vodních turbín

Podle způsobu přenosu energie vody rozlišujeme turbíny na:

- a) rovnotlaké – akční turbíny
- b) přetlakové – reakční turbíny

Turbíny rovnotlaké:

- Bánkiho turbína (použitelná pro spády 2 až 30 m) – pracuje na principu zdokonaleného vodního kola,
- Peltonova turbína (od 30 do 700 m) – paprsek vody proudí z dýzy, která je regulovaná pohybem jehly, a dopadá na lopatky ve tvaru dvojité lžice rozdělené břitem,
- Šneková turbína (od 1 do 10 m) – je založena na principu Archimedova šroubu. Využívá se všude, kde je malý spád a značné kolísání průtoku. Používá se i jako doplňkový motor ke stávajícím turbínám (Bánki, Kaplan).

Turbíny přetlakové:

- Kaplanova turbína (od 1,5 do 70 m) – je v podstatě reakční přetlakový stroj, který dosahuje několikanásobně vyšší rychlosti než je rychlost proudění vody. Je vhodná pro velká množství vody a pro menší spády. V závislosti na rozdílu hladin může být nainstalována buď svisle, nebo s vodorovnou osou otáčení. Regulace výkonu turbíny se provádí pomocí natáčivých lopatek.
- Francisova turbína (od 10 do 70 m) – podle uložení hřídele se dělí na horizontální a vertikální. Více méně jde o jednodušší variantu Kaplanovi turbíny. Francisova turbína se používá v několika modifikacích (klasická spirální, kašnová a reversní).[26]

Principy jednotlivých turbín jsou uvedeny spolu s oblastmi použití v části Přílohy.

1.1.3 Situace vodních elektráren v ČR

V českých zemích má využívání vodní energie dlouholetou tradici, od přímého mechanického pohonu zařízení mlýnů a pil až k přeměně na elektrickou energii. Nejstarším zařízením tohoto typu v Čechách byla vodní elektrárna v Písku, vybudovaná v roce 1888. Přestože v ČR nejsou přírodní poměry pro budování velkých vodních energetických děl ideální, mají VE z hlediska všech obnovitelných zdrojů největší podíl na výrobě elektrické energie. Všechny velké vodní elektrárny, s výjimkou Dalešic, Mohelna a Dlouhých Strání, jsou situovány na toku Vltavy.

V podmínkách našich řek se nejčastěji používají Kaplanovy turbíny s nastavitelnými lopatkami. Pro vysoké spády se používá akční Peltonova turbína. V přečerpávacích vodních elektrárnách pak reverzní Francisova turbína s přestavitelnými lopatkami, která při zpětném chodu funguje jako čerpadlo. V malých vodních elektrárnách se převážně zabydlela malá horizontální turbína Bánkiho spolu s upravenou jednoduchou turbínou Francisovou.

| | Hrubá výroba elektřiny | Instalovaný výkon |
|------------------|------------------------|-------------------|
| | MWh | MW |
| VE celkem | 2 789 474 | 1 049,6 |
| MVE < 1 MW | 554 754 | 140,9 |
| MVE 1 až < 10 MW | 603 823,00 | 155,9 |
| VVE ≥ 10 MW | 1 630 897,00 | 752,8 |

Tabulka 1-2 Hrubá výroba elektřiny a instalovaný výkon vodních elektráren v ČR v roce 2010

1.1.4 Výhody a nevýhody vodních elektráren

Výhody

- **dlouhá životnost elektrárny** – VE vydrží mnohem déle než např. větrné, tepelné nebo jaderné (u vodních elektráren se celkové opravy plánují podle způsobu provozu a celkového stavu zařízení v obvyklé periodě 20 až 30 let)
- **nezatěžují životní prostředí** – téměř nulové emise CO₂ (oxid uhličitý je produkováný jedině při výstavbě)
- **ekonomické** – nízké provozní náklady a nulové výdaje na nákup a dovoz paliva – zejména MVE se vyznačují podstatně delší životností, než je doba návratnosti investic na výstavbu. Dá se říci, že výroba MVE patří k nejlevněji získávané elektrické energii
- **regulační schopnost** – výhodou přečerpávacích a přehradních elektráren je jejich použitelnost pro vyrovnávání energetických špiček

Nevýhody

- **investice** – vysoká vstupní investice u velkých vodních elektráren
- **závislost na průtoku vody**
- **ekosystém** – přehrady jsou velkým zásahem do krajiny, zatopení velké části půdy
- **provoz** – přehradní hráze a jezy brání běžnému provozu na řece
- **katastrofa** – při selhání nádrže může dojít ke katastrofě v podobě záplavy

1.2 Biomasa

Biomasa, v níž je uložena sluneční energie, představuje další významný obnovitelný zdroj energie. Pojmem biomasa se obvykle rozumí rozložitelná část výrobků, odpadů a zbytků ze zemědělství, lesnictví a souvisejících průmyslových odvětví, dále zemědělské produkty cíleně pěstované pro energetické účely a také biologicky rozložitelná část průmyslového a komunálního odpadu.

Pro zemědělství představuje cíleně pěstovaná biomasa pro energetické účely novou příležitost. Pro pěstování energetických rostlin lze s výhodou využít půdu, nepotřebnou pro produkci potravin nebo krmiv. Nové využití tak nacházejí i plochy, které nejsou vhodné pro pěstování potravinářských plodin.

Energetické plodiny

Energetické plodiny jsou rostliny pěstované přímo pro energetické účely. Jejich kvalitu udávají faktory jako druh půdy, způsob využití, možnosti sklizně a dopravy. Při pěstování energetických plodin je třeba brát v potaz rovněž ekonomický aspekt, tedy jestli náklady na pěstování a výrobu těchto plodin odpovídají energii z nich získané.

Energetické plodiny se rozdělují podle způsobu jejich využití. Zatímco **olejnaté** rostliny (především řepka olejná) a rostliny **obsahující škrob a cukr** (brambory, cukrová řepa) se pěstují hlavně za účelem výroby paliv a pohonných látek, pro vytápění a výrobu energie se pěstují rostliny **lignocelulózové**. Do této skupiny řadíme např. rychle rostoucí dřeviny (vrby, topoly, olše), obiloviny, travní porosty.[1]

1.2.1 Rozdělení druhů biomasy

Biomasa se dělí, dle přílohy č. 1 k vyhlášce č. 482/2005 Sb. o stanovení druhů, způsobů využití a parametrů biomasy při podpoře výroby elektřiny z biomasy v platném znění, na tři hlavní druhy:

- zemědělskou biomasu – fytomasu pěstovanou na zemědělské půdě
- lesní biomasu – dendromasu
- zbytkovou biomasu – vedlejší produkty zemědělského a zpracovatelského průmyslu

V podmínkách ČR představují biomasu zejména:

- dřevní odpady – štěpky, piliny, hobliny, kůra, větve a pařezy
- nedřevní fytomasa – zelená biomasa, obilná a řepková sláma, energetické plodiny průmyslové a komunální odpady rostlinného původu (např. papírenské odpady)
- produkty živočišné výroby – chlévská mrva, čistírenské kaly, skládky odpadů, tříděný komunální odpad

Energetická účinnost jednotlivých typů paliv je dána hodnotou výhřevnosti, ta mimo jiné závisí na obsahu vody v biopalivu (Tabulka 1-3).

| Druh biomasy | Obsah vody v % | Výhřevnost MJ/kg | Objemová hmotnost kg/m ³ |
|-------------------------|----------------|------------------|-------------------------------------|
| Polena | 10 | 16,4 | 375 |
| Polena | 20 | 14,28 | 400 |
| Polena | 30 | 12,18 | 425 |
| Dřevní odpad | 10 | 16,4 | 170 |
| Dřevní odpad | 20 | 14,28 | 190 |
| Dřevní štěpka | 30 | 12,18 | 210 |
| Dřevní štěpka | 40 | 10,1 | 225 |
| Sláma obilovin (balíky) | 10 | 15,5 | 120 |
| Sláma kukuřice (balíky) | 10 | 14,4 | 100 |
| Lněné stonky (balíky) | 10 | 16,9 | 140 |
| Sláma řepky (balíky) | 10 | 16 | 100 |

Tabulka 1-3 Výhřevnost biopaliv s proměnným obsahem vody

Vzhledem k použité technologii se podle zákona rozlišuje:

- spalování čisté biomasy
- spoluspalování biomasy a fosilních paliv v jednom zařízení
- paralelní spalování biomasy a fosilních paliv v oddělených zařízeních, při následném využití uvolněné energie v jednom společném zařízení

1.2.2 Využití biomasy

Z energetického hlediska lze energii z biomasy získávat **přímo** – spalováním, nebo **nepřímo** – výrobou paliv a zpracováním na plynné či kapalně produkty. energii lze pak využívat pro výrobu tepla nebo elektřiny.

Pro vytápění se používá především přímého spalování fytomasy. K získání energie z odpadní biomasy je však zapotřebí speciálních kotlů.

Pro výrobu elektřiny z biomasy se používá stejný princip, na kterém funguje většina klasických elektráren, tzv. parní R-C cyklus. Dalším způsobem je přímé spalování produktů z biomasy ve spalovacích motorech.

1.2.3 Spalování biomasy

Spalování a následná výroba el. energie patří v současné době k nejběžnějším způsobům využití energie biomasy. V menším měřítku cca do 10 MW se využívá spalování na roštu. Pro větší aplikace je možné použití technologie fluidního spalování. Ostatně právě tato technologie má v ČR asi nejsilnější zastoupení, co se výroby elektrické energie týče. Důvod je ten, že ve velkém se biomasa (nejčastěji ve formě dřevní štěpky) začíná využívat v klasických elektrárnách, kde je spalována spolu s uhlím ve fluidních kotlích.

Sice už se nejedná o přímé spalování biomasy, ale o spoluspalování, nicméně vzhledem k plnění kvót a legislativním změnám ohledně obnovitelných zdrojů energie představuje tento typ výroby el. energie perspektivní směr. Využití stávajících kotlů pro spoluspalování biomasy je jednoznačně nejlevnějším a nejjednodušším řešením. Jediné omezení je dáno přípustným poměrem biomasa/uhlí, při kterém lze spoluspalovat tato dvě paliva bez úpravy spalovacího prostoru, s přijatelnými emisemi a bez technických obtíží (udává se do 15% biomasy). [22]

| | Výroba 2009 (MWh) | Výroba 2010 (MWh) | Výroba 2011 (MWh) |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Tisová | 45 956 | 12 705 | 10 270 |
| Poříčí | 92 418 | 87 437 | 99 068 |
| Teplárna Dvůr Králové | 11 944 | 9 572 | 18 630 |
| Hodonín | 177 348 | 197 921 | 223 076 |
| Vítkovice | - | 29 | 202 |
| Celkem v ČR | 327 666 | 307 664 | 351 246 |

Tabulka 1-4 Výroba z biomasy v elektrárnách ČEZ, a.s., v ČR

1.2.4 Anaerobní fermentace biomasy

Jednou z variant pro zpracování bioodpadu je proces tzv. anaerobní fermentace. Jedná se o proces, kdy se v hermeticky uzavřených nádržích (fermentory) nechají rozkládat organické látky bioodpadu, čímž vzniká bioplyn. Fermentory se používají z toho důvodu, že kyslík je pro anaerobní bakterie, které přeměňují bioodpad na bioplyn, jedovatý. Základní druhy biomasy, běžně využívané pro anaerobní výrobu bioplynu, představují zejména exkrementy hospodářských zvířat (kejda, trus, hnůj, močůvka, hnojůvka) a fytomasa (senáž, siláž, části a kořeny rostlin, vybrané druhy energetických rostlin). [1]

Fermentaci rozdělujeme do dvou základních skupin:

- 1) Mokrý fermentace – zpracování biomasy s obsahem sušiny < 12%
- 2) Suchá fermentace – zpracování biomasy s obsahem sušiny 20 až 60 %

1.2.5 Emise při využívání biomasy

Vedle energetického přínosu ze spalování biomasy, kdy díky ní částečně nahrazujeme fosilní paliva, je spalování biomasy spojeno ještě s bonusem v podobě neutrálních emisí oxidu uhličitého. Neutrálních z toho důvodu, že při spalování biomasy se uvolní srovnatelné množství oxidu uhličitého jako je jeho spotřeba při růstu dané rostliny (fotosyntetické procesy). Tento proces se popisuje stechiometrickou rovnicí (1-3).[1]



1.2.6 Výhody a nevýhody využití biomasy

Výhody

- oproti FVE a VtE nezávislost na stavu počasí (vzhledem k elektrizační soustavě stejné chování jako klasické elektrárny)
- dostupnost paliva (využití odpadu)
- emise – uzavřený cyklus CO₂
- využití půdy nevhodné pro pěstování potravinářských plodin
- nová příležitost pro zemědělce
- velký potenciál

Nevýhody

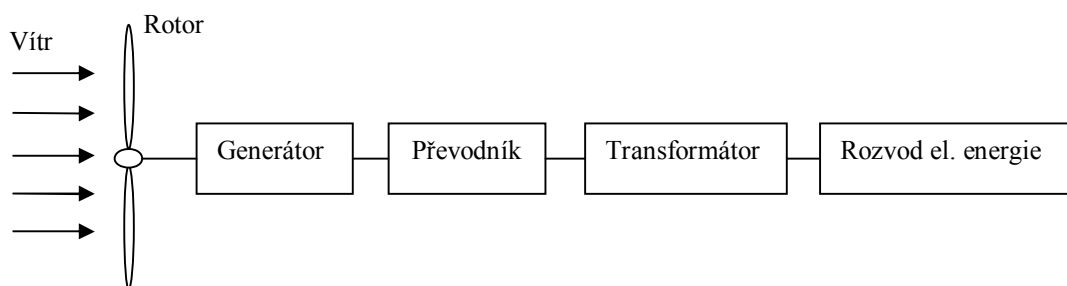
- nižší výhřevnost oproti klasickým palivům
- velký vliv vlhkosti na spalovací procesy
- nutnost úpravy paliva (sušení, tvarování)
- větší objem paliva (vyšší skladovací nároky)

1.3 Větrné elektrárny

Energie větru je další z variant obnovitelného zdroje energie, kterou naše planeta nabízí. Nicméně energie větru je vlastně jen jednou z forem energie slunce. Vítr chápeme jako proudění vzduchu, vznikající díky nerovnoměrnostem zemského povrchu a tlakovým rozdílům způsobených nestejně zahřátými oblastmi vzduchu v zemské atmosféře (teplý vzduch stoupá vzhůru, na jeho místo se tlačí vzduch studený). Vítr jako zdroj mechanické energie dokázali využívat již naši předkové např. pro mletí obilí pomocí větrných mlýnů. První větrné mlýny jsou datovány dokonce v 7. století našeho letopočtu v oblasti mezi dnešním Afganistánem a Íránem. Ovšem využívání větrných elektráren k výrobě elektrické energie je stále velmi mladou technickou oblastí. Intenzivnější výzkum a rozvoj začal někdy na začátku sedmdesátých let, kdy si společnost začala uvědomovat možnost nebezpečí ekologické krize a omezenosti fosilních paliv.

1.3.1 Princip větrných elektráren

Působením aerodynamických sil na listy rotoru se převádí kinetická energie větru na rotační mechanickou energii rotoru. Vlivem proudění vznikají podél listů velké aerodynamické síly, a proto musejí mít listy speciálně tvarovaný profil, podobně jako profily křídel letadel. Rotační energie se přeměňuje na energii elektrickou v generátoru, který může být spojen s rotorem přes převodovku, záleží na použité technologii. Princip přeměny kinetické energie větru na energii elektrickou je znázorněn na (Obr. 1-3).[27]



Obr. 1-3 Princip přeměny energie VtE

1.3.2 Výpočet výkonu větrné elektrárny

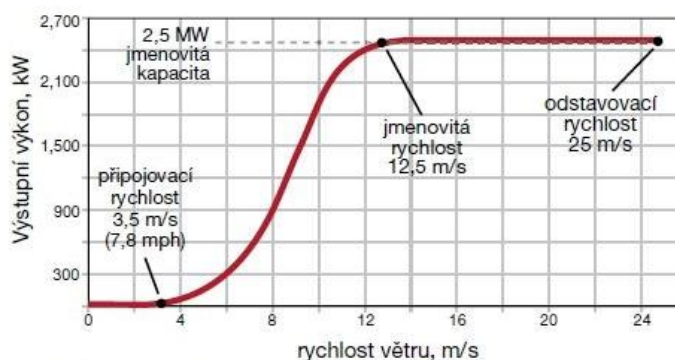
Nejdůležitějším parametrem ovlivňujícím využití větrné energie je rychlost větru, která se udává v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Se vzrůstající rychlostí vzdušného proudu rostou vztlakové síly s druhou mocninou rychlosti větru a energie vyprodukovaná generátorem s třetí mocninou (1-4). Rychlost větru závisí na různých faktorech, nejzásadnějšími jsou nadmořská výška, členitost terénu, druh povrchu (louka, vodní hladina apod.) a další.

Pro okamžitý výkon VtE platí vztah:

$$P = \frac{1}{2} * c_p * \rho_v * A * v^3 \text{ [W]} \quad (1-4)$$

kde v je rychlost vzduchu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
 A je činná plocha rotoru [m^2],
 c_p je výkonový součinitel [-],
 ρ_v hustota vzduchu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

Pro každou větrnou elektrárnu existuje tzv. výkonnostní křivka udávající pracovní pásmo elektrárny. Výkonnostní křivka znázorňuje nejdůležitější rychlosti větru ve vztahu k dané elektrárně. Těmito rychlostmi jsou – přípojovací rychlost, jmenovitá rychlost a odstavovací rychlost (Obr. 1-4).[27]



Obr. 1-4 Výkonnostní křivka větrné turbíny 2,5 MW [38]

1.3.3 Rozdělení větrných elektráren

VtE se dělí do tří skupin podle velikosti vrtule a dodávaného výkonu (Tabulka 1-5).

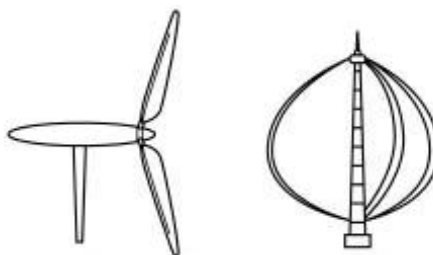
| Větrné elektrárny | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------------|-------|------------|-------------------------|-------|------------|-------------------------|-------|
| Malé | | | Střední | | | Velké | | |
| vrtule | | výkon | vrtule | | výkon | vrtule | | výkon |
| průměr [m] | plocha [m^2] | do kW | průměr [m] | plocha [m^2] | do kW | průměr [m] | plocha [m^2] | do kW |
| ≤ 8 | ≤ 50 | 10 | 16,1 – 22 | 200,1 – 400 | 130 | 45,1 – 64 | 1600,1 – 3200 | 1500 |
| 8,1 – 11 | 50,1 – 100 | 25 | 22,1 – 32 | 400,1 – 800 | 310 | 64,1 – 90 | 3200,1 – 6400 | 3100 |
| 11,1 – 16 | 100,1 – 200 | 60 | 32,1 – 45 | 800,1 – 1600 | 750 | 90,1 – 128 | 6400,1 – 12800 | 6400 |

Tabulka 1-5 Rozdělení VtE

Větrné elektrárny se ještě dále rozdělují na systémy nezávislé na rozvodné síti (grid-off), tedy samostatné zdroje, jež nemají možnost připojení k rozvodné síti. Jedná se zejména o mikroelektrárny s výkonem do 5kW pracující v ostrovním provozu (napájení rodinných

domků apod.). Druhou skupinu tvoří systémy dodávající energii do rozvodné sítě (grid-on). Tato skupina je dominantní a využívá se pro komerční výrobu elektrické energie.

Podle konstrukce se pak rozlišují větrné turbíny horizontální a vertikální (Obr. 1-5). Vertikální turbíny se však zatím používají jen zřídka a to z jednoduchého důvodu, že technologie klasické horizontální lopatkové turbíny je vzhledem ke zkušenostem z letectví mnohem lépe zvládnuta.



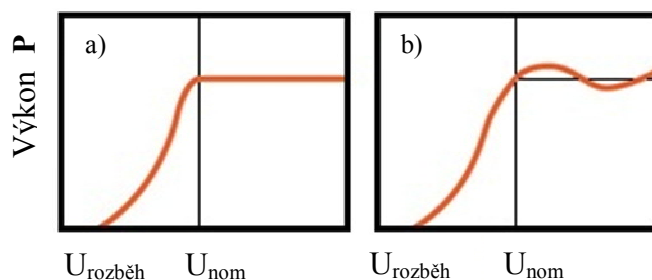
Obr. 1-5 Nákres horizontální a vertikální větrné turbíny

1.3.4 Základní části větrných elektráren

Rotor

V drtivé většině případů je rotor VtE zastoupen vrtulí. Z rovnice pro okamžitý výkon elektrárny (1-4) je zřejmé, že výkon je přímo závislý na ploše vrtule a velikosti součinitele výkonu. Z toho důvodu jsou vrtule stěžejní částí celého zařízení VtE. Vrtule prošly v posledních letech značným vývojem a jejich zvětšující se velikost klade vysoké nároky na konstrukci a použité materiály. Vzhledem k velkým vztakovým silám, které rostou s druhou mocninou rychlosti větru a následnou energií vyprodukovanou generátorem, je také třeba zajistit efektivní, rychle pracující regulaci výkonu rotoru, aby se zabránilo mechanickému a elektrickému přetížení elektrárny. Ve své podstatě rozlišuje dva základní principy regulace vrtule (Obr. 1-6), a to:

- 1) regulace pasivní – odtržením proudu na listech vrtule s konstantním úhlem nastavení listů (tzv. „stall“ regulace)
- 2) regulace aktivní – přestavováním listů vrtule na větší úhly nastavení a tím snížení vztakové síly a výkonu (tzv. „pitch“ regulace)



Obr. 1-6 Výkonové křivky při regulaci a) "pitch", b) "stall"

Regulace „stall“

Rotor elektrárny má pevné listy a pro snížení výkonu využívá odtržení proudnice vzduchu od listu rotoru při určité rychlosti větru. Mezi výhody této regulace patří jednoduchá konstrukce, nenáročná údržba (vzhledem k menšímu počtu pohyblivých částí) a vysoká spolehlivost regulace výkonu. Nevýhodou je, že vzhledem k odtržení proudnice vzduchu při vysokých rychlostech klesá výkon vrtule a tím i účinnost. Za další nevýhodu se považuje nutnost jemného nastavení listů a neschopnost vrtule startovat samostatně.[1]

Regulace „pitch“

Tento typ regulace využívá natáčení celého listu rotoru podle okamžité rychlosti větru a výkonu generátoru. Výhodami regulace „pitch“ jsou zvýšení produkce energie ve stejných podmínkách oproti regulaci „stall“, možnost samostatného startu rotoru pomocí nastavení úhlu náběhu listů a odpadá potřeba silné brzdy pro náhlé zastavení rotoru. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena.[1]

Převodovka

Přizpůsobuje rychlost otáček poskytovaných rotorem na rychlost vhodnou pro elektrický generátor. V současnosti se používají speciální několikastupňové převodovky, na nichž je obvykle připojena brzda. Z důvodů velké životnosti, nízké hlučnosti a vysoké těsnosti se klade velký důraz na kvalitu převodových ústrojí.

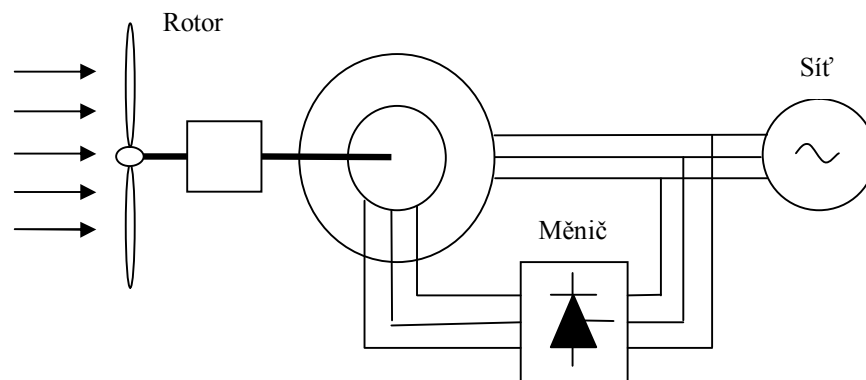
Převodovka není nutnou součástí VtE, vyrábějí se i elektrárny bezpřevodkové. Řešení takovýchto elektráren je založeno na využití nízkorychlostních multiplových generátorů.

Generátor

Generátor slouží k přeměně mechanické energie rotoru na energii elektrickou. V průmyslové výrobě se uplatňují generátory asynchronní a synchronní.

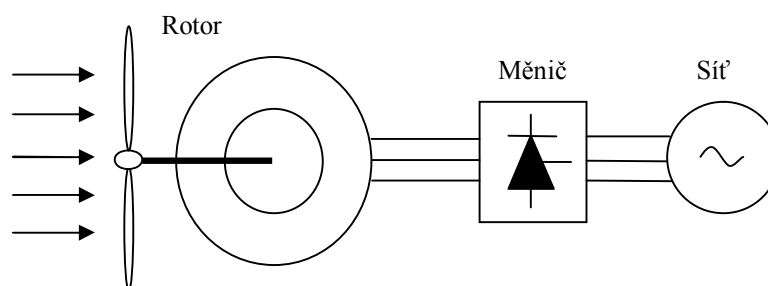
Jako první se používaly zejména generátory asynchronní s klecovým vinutím, jejichž popularita vycházela z široké dostupnosti, bohatých zkušeností s jejich praktickým použitím a v neposlední řadě i v nižší ceně oproti synchronním generátorům. Charakteristickou vlastností asynchronních generátorů je, že vyžadují vysoké provozní rychlosti, a proto je nutné doplňovat soustrojí VtE převodovým ústrojím. Dnes se využívá varianta asynchronního (indukčního) generátoru s dvojitým napájením. Generátor využívá výkonovou elektroniku pro injektování proudu do rotorového vinutí generátoru. Frekvence rotorového proudu je měněna

tak, aby frekvence satorového proudu byla shodná se sítíovou, ke které je generátor přímo připojen. Schéma zapojení indukčního generátoru s dvojitým vinutím je na Obr. 1-7.



Obr. 1-7 VtE - zapojení s indukčním generátorem s dvojitým vinutím

Druhou v dnešní době hojně využívanou technologií je varianta se synchronním generátorem s permanentními magnety. Pro synchronní generátory s přímým pohonem mluví zejména to, že se vývoj za poslední léta ubírá směrem k robustním nízkorychlostním zařízením. Přímopoháněný synchronní generátor nemá převodovku (Obr. 1-8). Odstranění převodovky zjednodušuje provedení větrné turbíny, ale na druhou stranu vyžaduje speciální nízkorychlostní generátor o mnohem větším průměru, z důvodu vysokého počtu magnetických pólů. Generátor a síť jsou plně odděleny pomocí výkonové elektroniky. Synchronní generátory s permanentními magnety se ukazují jako vhodná varianta také vzhledem k stále rostoucím požadavkům na připojení k rozvodné síti.

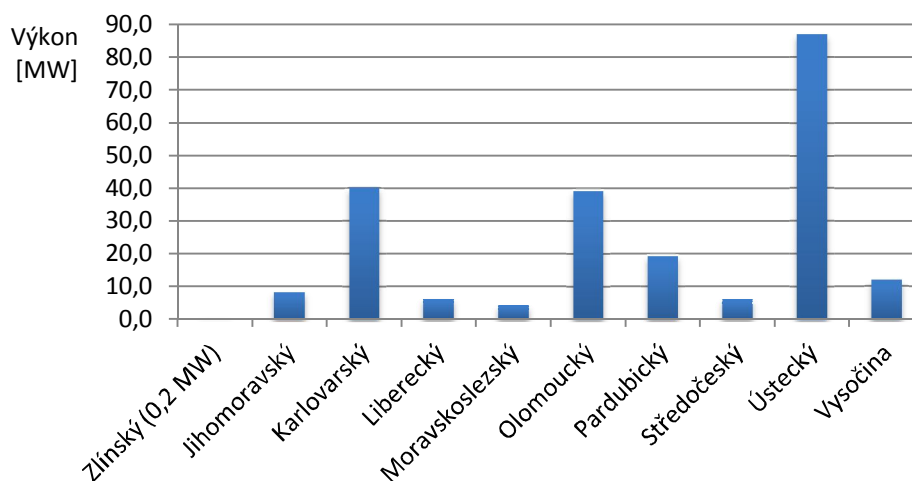
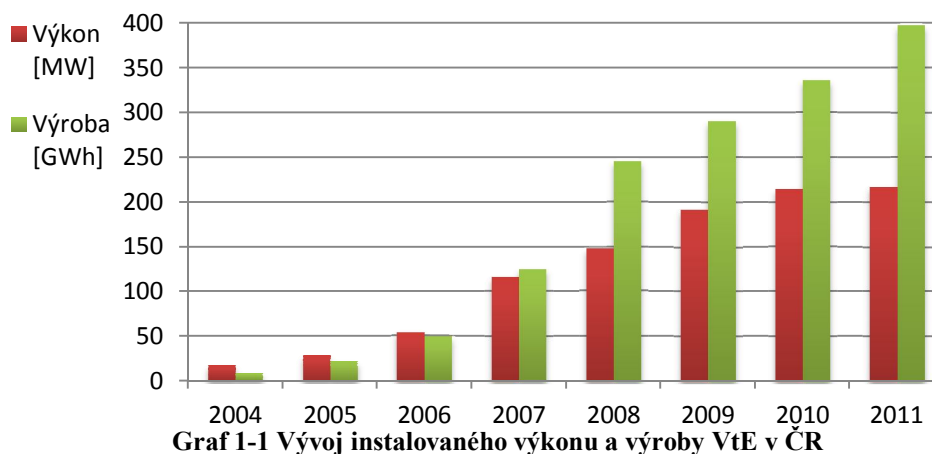


Obr. 1-8 VtE - zapojení s přímo poháněným synchronním generátorem

1.3.5 Stav větrných elektráren v ČR

V ČR se s výstavbou moderních větrných elektráren začalo kolem roku 2000, největší boom nastal od roku 2004, kdy se během následujících šesti let instalovaný výkon zvýšil takřka třináctkrát. Podrobný vývoj znázorňuje Graf 1-1. Po roce 2009 se nárůst VtE pozastavil zejména vlivem ekonomické krize. V současné době je celkový instalovaný výkon

větrných elektráren v ČR 217 MW a jejich výroba činí 397 GWh (Graf 1-1). Podle různých studií by se využitelný energetický potenciál větru v ČR mohl pohybovat od 900 do 1200 MW. Zastoupení jednotlivých krajů podílejících se na využívání větrné energie pro výrobu elektrické energie uvádí Graf 1-2.



Graf 1-2 Instalace VtE podle krajů ČR

1.3.6 Výhody a nevýhody větrných elektráren

Výhody

- **obnovitelný zdroj energie**
- **nezatěžují životní prostředí**
 - neprodukují škodlivé emise a odpad

Nevýhody

- **kolísání výkonu**
 - výkyvy v dodávce el. energie vzhledem k aktuálnímu stavu počasí
- **lokalita**
 - účinnost VtE závisí na výběru vhodné lokality s dostatečným prouděním vzduchu (pro velké VtE se požaduje průměrná rychlost větru okolo 6 m/s)

1.4 Fotovoltaické elektrárny

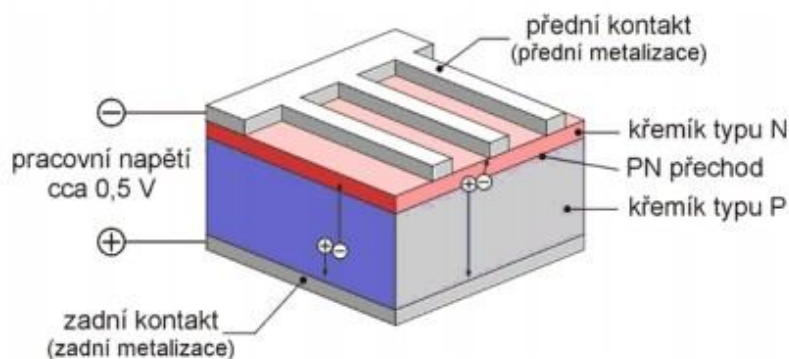
Využití energie slunečního záření patří z hlediska ochrany životního prostředí k nejčistším a nejšetrnějším způsobům výroby elektřiny. Sluneční záření představuje obrovský potenciál, avšak množství energie, které prozatím získáváme z celkové energie slunečního záření, je zanedbatelné. Současný podíl fotovoltaiky na celosvětové produkci elektrické energie představuje zhruba 0,01%. Nicméně se stále jedná o mladou technologii procházející dynamickým rozvojem a vyspělé státy s ní, jako s jednou z alternativ pro získávání elektrické energie, do budoucna počítají.

Elektřinu lze získat ze sluneční energie přímo nebo nepřímo. Přímá přeměna využívá fotovoltaického jevu, při kterém se ve vhodném materiálu působením světla uvolňují elektrony. Zástupcem této technologie jsou solární články. Nepřímá přeměna je založena na absorpci tepla a jeho následném využití pro výrobu elektrické energie. Tento princip se uplatňuje například u termočlánků nebo solárních věží, které však ještě nejsou do komerční praxe nasazovány.

Nedílnou součástí fotovoltaických systémů představuje střídač, přes který je elektrická energie z FVE dodávána do sítě. Střídač je zařízení, které pomocí polovodičových prvků převádí stejnosměrné napětí ze solárních panelů na střídavé napětí elektrické sítě.

1.4.1 Základní princip přímé přeměny

Fotovoltaika využívá vlastností polovodičové struktury. Jejím základním stavebním prvkem je solární článek (velkoplošná dioda), využívající fotovoltaického jevu (Obr. 1-9).



Obr. 1-9 Řez struktury solárního článku

Při tomto jevu dochází vlivem dopadajícího záření k vytváření elektrické energie v polovodičovém materiálu. Jakmile foton dopadne na solární článek, může tímto článkem buď projít skrz, může být odražen nebo pohlcen, což způsobí uvolnění elektronů. Tyto elektrony se hromadí ve vrstvě N a díry ve vrstvě P. Elektrony a díry jsou oddělovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu. Nahromadění nosičů v obou vrstvách má za

následek napěťový rozdíl mezi „předním“ (-) a „zadním“ (+) kontaktem solárního článku, tím se vytváří elektrické napětí asi 0,5-0,6 V na jeden článek. Velikost tohoto napětí závisí na ozáření článku. Pospojováním jednotlivých článků se vytvářejí panely s požadovaným napětím a proudem, dalším pospojováním panelů pak fotovoltaický systém (FVE).

1.4.2 Technologie výroby solárních článků

Z technologického hlediska se mohou články FVP dělit na články vyrobené:

- a) klasickou technologií
 - monokrystalické panely
 - polykrystalické panely
- b) tenkovrstvou technologií - amorfni panely

Monokrystalické panely

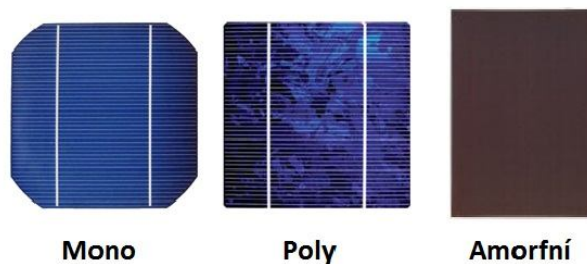
Solární články se skládají z jediného krystalu. Krystaly křemíku mají obvykle rozměry do 200×200 mm a vyrábí se na bázi chemického procesu (tažením roztaveného křemíku ve formě tyčí). Ty se poté rozřežou na tenké plátky o tloušťce 0,2-0,3 mm. Účinnost těchto článků se pohybuje v rozmezí 13 až 17%. Monokrystalické panely jsou nejčastěji používanou variantou.

Polykrystalické panely

Základem je, stejně jako u monokrystalických panelů, křemíková podložka. Rozdíl je v tom, že solární články se skládají z většího počtu menších polykrystalů. Účinnost polykrystalických článků se pohybuje od 12 do 14%. Jejich výroba je ale v porovnání s monokrystalickými panely jednodušší, tedy i levnější a rychlejší.

Amorfni panely

Tenkovrstvé sluneční panely se vyrábějí nanášením slabé vrstvy amorfniho křemíku na podklad ze skla, ocelového plechu nebo fólie. Účinnost těchto článků je poněkud nižší, pohybuje se v rozmezí 7 až 9%. Pro dosažení daného výkonu je navíc potřeba asi dvojnásobné plochy, než kolik by bylo zapotřebí při použití mono nebo polykrystalických panelů.



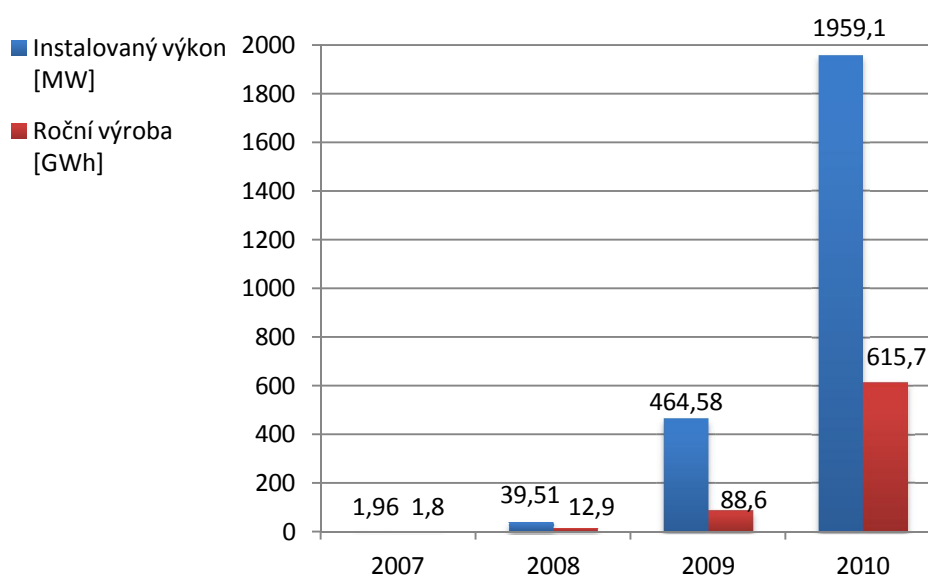
Obr. 1-10 Typy solárních článků [39]

1.4.3 Situace fotovoltaiky v ČR

Na území České republiky dopadá sluneční záření s průměrnou intenzitou okolo 800 W/m² v závislosti na dané lokalitě. Za celý rok se hodnota dopadající energie pohybuje zhruba v rozmezí 1000-1250 kWh/m². Z praktického hlediska je v našich podmínkách fotovoltaický systém s instalovaným výkonem 1 kW schopen vyrobit 900-1000 kWh el. energie za rok. Vzhledem k intenzitě a nestálosti slunečního záření byla v ČR fotovoltaika do roku 2005 využívána pouze sporadicky. Jednalo se zejména o systémy pro osobní využití, sloužící jako decentralizované zdroje energie. Po roce 2005 ovšem došlo k obrovskému nárůstu instalovaných FVE. Tento fakt měl tři hlavní příčiny, a to:

- přijetí tzv. Energetického zákona z roku 2001
- přijetí Zákona č. 180/2005 Sb. o podpoře výroby elektřiny z OZE
- stanovení pevných výkupních cen ze strany ERÚ pro rok 2006, které činily více než dvojnásobek původní hodnoty pro povinné výkupy elektřiny z fotovoltaiky

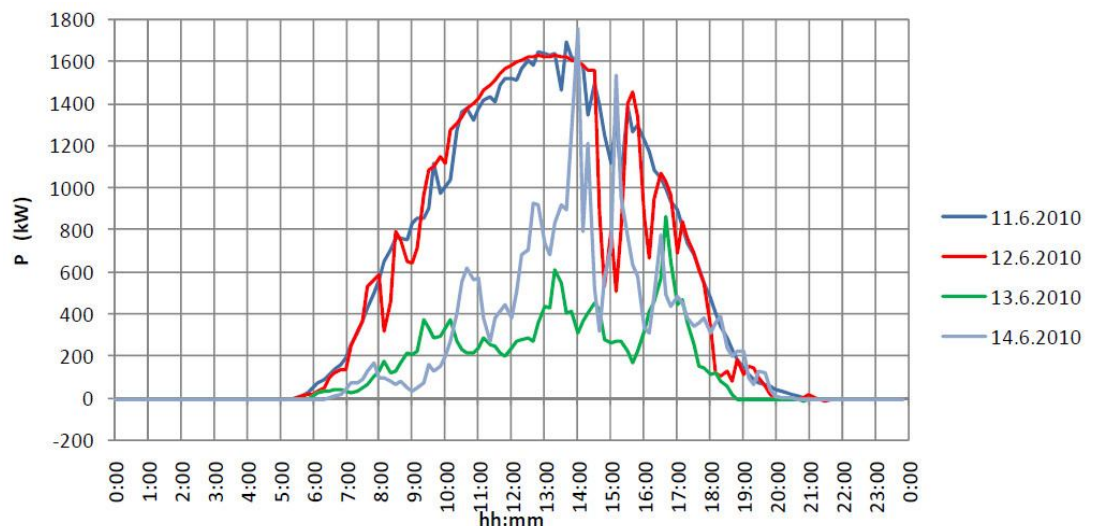
Z fotovoltaiky se tak stal více než výnosný byznys, který vedl k prakticky neřízené výstavbě obrovského množství FVE (Graf 1-3). Tento vývoj zastavil až tzv. stop-stav, kterým bylo na doporučení společnosti ČEPS pozastaveno schvalování nových žádostí o připojení FVE a VtE do distribučních sítí. Toto rozhodnutí bylo vystaveno vzhledem k obavám z ohrožení bezpečnosti a spolehlivosti elektrizační soustavy. Od roku 2012 došlo ke zrušení stop-stavu a distribuční společnosti začali opět s povolováním nových žádostí, mělo by se však jednat spíše o malé a střední zdroje. Společnost ČEPS pro rok 2012 celkově uvolnila kapacitu 65 MW pro připojování OZE.



Graf 1-3 Výkon a výroba FVE v jednotlivých letech

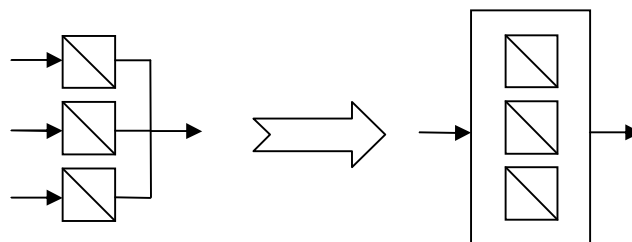
1.4.4 Problematika spojená s fotovoltaickými elektrárnami

Dalo by se říci, že většina problémů spojených s využíváním FVE, jako zdrojů elektrické energie, je jejich závislost na aktuálním stavu počasí. Jelikož výkon fotovoltaického systému ovlivňuje každé přerušení dodávky světelného toku (mraky na obloze apod.), je zřejmé, že v podmínkách ČR se nelze vyhnout značnému kolísání ve výkonu (Obr. 1-11). Tento fakt ještě umocňuje skutečnost, že maximálního výkonu je solární článek schopen dosáhnout pouze za vychladlého stavu. Jakmile se totiž článek začne zahřívat, jeho účinnost klesá (zhruba o 0,5% za °C). I proto při přechodné oblačnosti, kdy články při chvilkovém zastínění mraky vychladají, dochází k tak výrazným změnám ve výkonu. Například u FVE s výkonem 800 kW se může kolísání pohybovat v rozmezí přibližně 20 až 80 kW/s v závislosti na stavu počasí.



Obr. 1-11 Příklad kolísání dodávky činného výkonu FVE [18]

Dalším problémem je, že při začátku provozu (úsvit) pracují měniče na jednotkách procent svého výkonu, a tak nejsou schopny dodávat požadované výstupní parametry a navíc může docházet k harmonickému zkreslení. U fotovoltaických systémů, které využívají více měničů se dá tento problém zmírnit společným zapojením, kdy při malém výkonu bude pracovat menší počet měničů než při plném provozu (Obr. 1-12).



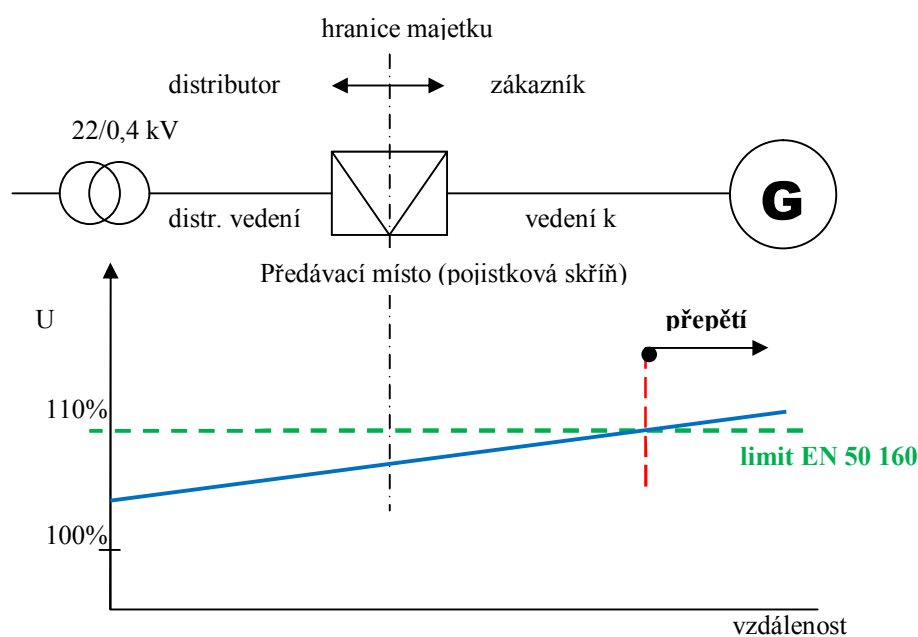
Obr. 1-12 Využití společného zapojení měničů

Jako každá výrobní elektrická energie musí i FVE udržovat povolenou hodnotu účinníku $\cos\varphi$, který je v ideálním případě roven jedné. Řízení účinníku se u FVE provádí přídatnými kompenzačními zařízeními. Jednou z variant pro kompenzaci jalového výkonu je použití tlumivky, která má ztráty do 1%. Další možností je elektronická kompenzace pomocí měniče, který umožňuje přeměnu kapacitního jalového charakteru na induktivní. Výhodou elektronické kompenzace je plynulé ladění a odbourání přechodových jevů. Mezi nevýhody patří především vyšší ztráty, okolo 4%.

V současnosti je již v ČR legislativou dáno, že provozovatel FVE musí zajistit dispečerské řízení účinníku tak, aby dispečink distributora mohl dálkově řídit účinník provozovny v rozmezí 0,95 až 1,00.

Vypadávání střídače

Vypadávání střídačů je dalším problémem, se kterým se provozovatelé FVE setkávají. Tento nežádoucí jev má často souvislost s nastavením ochran střídačů. Nastavení horní meze ochran udávají PPDS – Příloha č.4 [13], tyto hodnoty napětí však mohou kolidovat s dovolenou odchylkou napětí dle ČSN EN 50 160. Vypadávání střídačů je tak často zapříčiněno skutečností, že distributor elektřiny garantuje odchylky napětí v tzv. předávacím místě. FVE se ovšem většinou umísťují na střechu objektu, tedy i několik desítek metrů od předávacího místa (často nevhodně dimenzovaným vedením). Na vedení vzniká nenulový úbytek napětí, který se přičítá k hodnotě napětí v předávacím místě. Střídač FVE pak může vypadávat vlivem přepětí, nikoliv však přepětím v předávacím místě, ale přepětím vzniklým na vedení od předávacího místa k FVE. Situaci demonstruje Obr. 1-13.[19]



Obr. 1-13 Znárodnění vzniku přepětí na vedení odběratele od předávacího místa k FVE

1.4.5 Výhody a nevýhody fotovoltaických elektráren

Výhody

- nulové emise
- Slunce je nejsilnějším přírodním zdrojem energie
- velký potenciál pro další výzkum
- nízké provozní náklady oproti klasickým elektrárnám
- jednoduchá konstrukce fotovoltaických systémů = nízká poruchovost

Nevýhody

- kolísání výkonu v závislosti na počasí
- nízká účinnost solárních článků
- v ČR chybí instalace akumulčních prvků

1.5 Přehled instalovaného výkonu v ČR a podílů výroby jednotlivých zdrojů

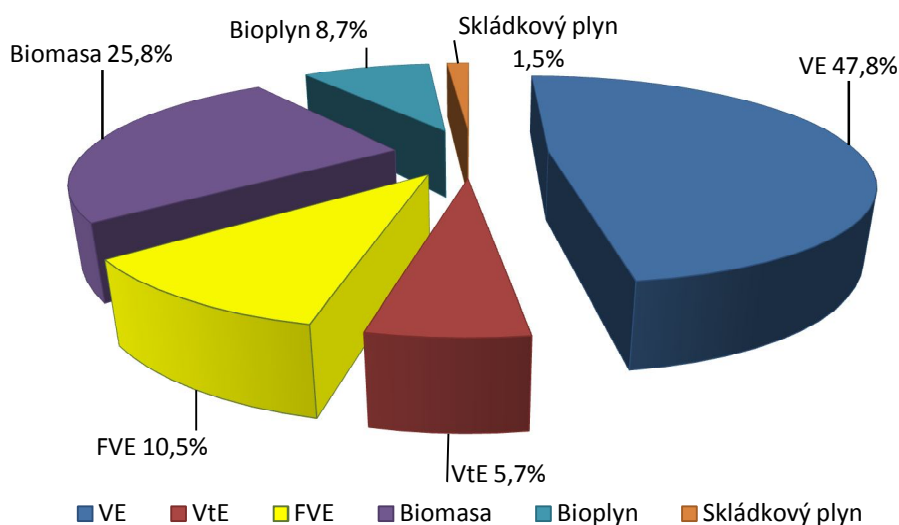
Podíl OZE na spotřebě elektřiny brutto

| | [GWh] | [%] |
|----------------|--------|-------|
| VE (bez PVE) | 2789,4 | 47,8 |
| VTE | 335,5 | 5,7 |
| FVE | 615,7 | 10,5 |
| Biomasa | 1511,9 | 25,8 |
| Bioplyn | 508,9 | 8,7 |
| Skládkový plyn | 89,3 | 1,5 |
| Celkem | 5850,7 | 100,0 |

Tabulka 1-6 Podíl OZE na spotřebě energie

Tuzemská spotřeba elektřiny brutto ČR v roce 2010 = 70 961,7 GWh

Podíl OZE na tuzemské spotřebě brutto = 8,24 %

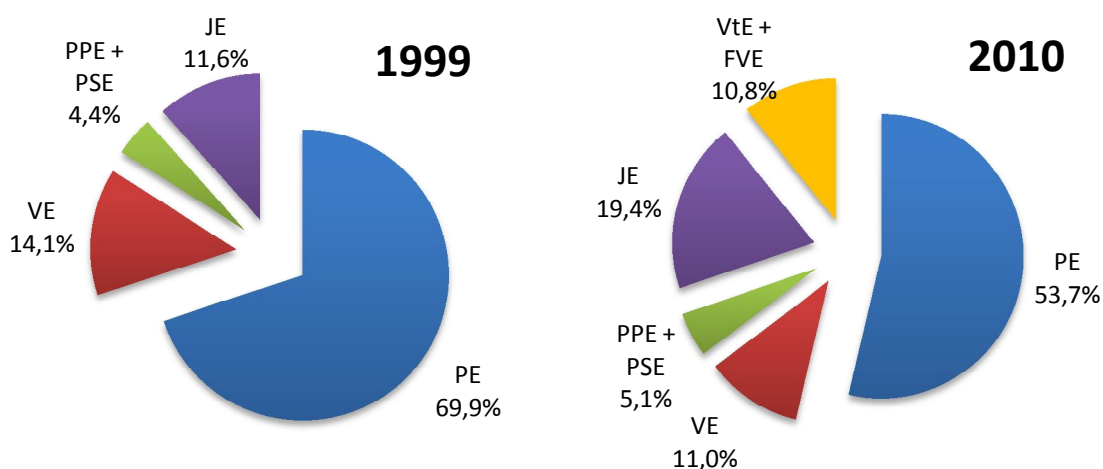


Graf 1-4 Výroba elektřiny z OZE za rok 2010

1.5.1 Struktura instalovaného výkonu v ČR [%]

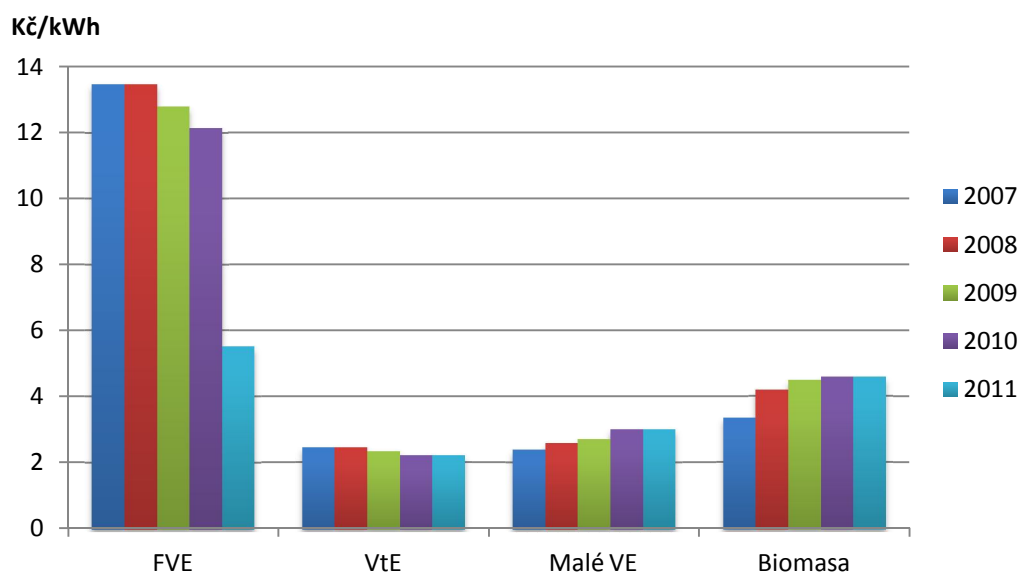
| | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| PE (Parní) | 69,9 | 70,5 | 70,2 | 65,3 | 61,4 | 61,4 | 61,2 | 61,1 | 60,6 | 60,3 | 58,5 | 53,7 |
| PPE + PSE (Paroplynové, Plynové a spalovací) | 4,4 | 4,3 | 4,5 | 4,7 | 4,5 | 4,5 | 4,6 | 4,6 | 4,6 | 5,1 | 5,1 | 5,1 |
| VE (Vodní) | 14,1 | 13,7 | 13,9 | 13,1 | 12,4 | 12,4 | 12,4 | 12,4 | 12,4 | 12,3 | 11,9 | 11,0 |
| JE (Jaderné) | 11,6 | 11,5 | 11,4 | 16,9 | 21,7 | 21,6 | 21,6 | 21,5 | 21,4 | 21,2 | 20,9 | 19,4 |
| VtE + FVE (Větrné, Fotovoltaické) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 1,0 | 1,1 | 3,6 | 10,8 |
| Instalovaný výkon [GW] | 15,2 | 15,3 | 15,4 | 16,3 | 17,3 | 17,4 | 17,4 | 17,5 | 17,5 | 17,7 | 18,3 | 20,1 |

Tabulka 1-7 Struktura instalovaného výkonu v ČR



Graf 1-5 Vývoj struktury instalovaného výkonu v ČR

1.5.2 Přehled výkupních cen za elektřinu z OZE v ČR



Graf 1-6 Vývoj výkupních cen elektrické energie z OZE v ČR

2 Energetická legislativa České republiky

Česká republika se jako členský stát Evropské unie musí řídit jejími směrnicemi. Základní kámen pro podporu výroby elektrické energie z OZ položil Evropský parlament v roce 2001 vydáním směrnice č. 2001/77/ES. Tato směrnice zavazuje členské státy k přijetí opatření a programů podpor, které povedou ke zvyšování výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů. Konkrétní formy opatření závisí na rozhodnutí jednotlivých států. Dále definuje indikativní cíle pro jednotlivé členské státy a celkový cíl pro Evropské společenství ve výši 21% v roce 2010. Indikativní cíle podílu OZE jsou definovány jako procentuální podíly výroby elektřiny na hrubé domácí spotřebě elektřiny.

Česká republika se při vstupu do EU v roce 2004 zavázala ke splnění indikativního cíle ve výši 8% podílu elektřiny z OZE na hrubé domácí spotřebě v ČR v roce 2010. Po projednání v Poslanecké sněmovně ČR byl pro dosažení tohoto cíle přijat zákon č. 180/2005 Sb.[9] o podpoře výroby elektřiny z OZE. Účelem tohoto zákona je podpořit využití obnovitelných zdrojů energie a vytvořit stabilní podmínky pro podnikání. Zákon se zabývá např. právy a povinnostmi subjektů na trhu s elektřinou z OZE, podmínkami podpory a výkupu elektřiny z OZE, financováním podpory, poskytováním dotací, výší zelených bonusů apod. Tento zákon prošel v roce 2010 novelou, a to zejména kvůli enormnímu nárůstu fotovoltaických elektráren a výraznému snížení cen fotovoltaických panelů. Hlavní změnou v zákoně bylo určení limitu státního rozpočtu pro poskytnutí dotace.

V roce 2009 byla vydána nová směrnice EU 2009/28/EC o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů a o změně a následném zrušení směrnice 2001/77/ES. Dle této směrnice jsou pro ČR závazné pouze celkové cíle vztažené k roku 2020. Jedná se o závazný cíl podílu elektrické energie z obnovitelných zdrojů na hrubé konečné spotřebě elektrické energie v ČR ve výši 13 %. V ČR byl Národní akční plán pro energii z obnovitelných zdrojů schválen Usnesením vlády ČR č. 603 dne 25. srpna 2010. V rámci tohoto dokumentu si ČR stanovila indikativní cíl pro rok 2020 13,5 %, což je ještě o 0,5 % více než původní požadavek.[10]

3 Začleňování rozptýlených zdrojů elektrické energie do DS

Problematika týkající se začleňování RZ do distribučních sítí se začala ve větší míře řešit až s masivním nárůstem instalovaného výkonu FVE a VtE, které se vyznačují proměnlivostí dodávaného výkonu v závislosti na intenzitě slunečního záření a rychlosti větru. Pokud totiž jejich podíl ve skladbě zdrojů přesáhne určitou mez, mohou nastat problémy s udržení výkonové rovnováhy. Tím by byla ohrožena spolehlivost soustavy, která je definována dvěma složkami – bezpečností a adekvátností provozu.

Bezpečnost provozu je definována schopností soustavy odolávat poruchám typu zkratů a výpadkům zařízení. Adekvátnost je dána schopností soustavy zajistit dodávku výkonu odběratelům, neboli udržovat výkonovou rovnováhu v každém časovém okamžiku.

Právě adekvátnost může být zvýšeným podílem FVE a VtE ohrožena v případě, kdy ostatní zdroje nestačí svým výkonem kompenzovat jejich proměnlivou výrobu. Podle standardů provozu propojené ES musí být nepřetržitě udržována v každé regulační oblasti výkonová rovnováha – tzn., že výkon zdrojů musí pokrývat spotřebu, ztráty v sítích a plánovanou výměnu (export / import) s ostatními regulačními oblastmi.

Podmínky pro připojování a provozování výroben el. energie v DS jsou sepsány v dokumentu „Pravidla provozování distribuční soustavy“ (PPDS), detailně jsou tyto podmínky uvedeny v Příloze č.4 [13] – „Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítěmi nízkého nebo vysokého napětí provozovatele distribuční soustavy“. Dokument je vydáván českými energetickými distribučními soustavami a schvalován ERÚ. Tato pravidla prošla v posledních letech značnými rozšířeními, zejména vlivem již výše uvedeného nárůstu FVE a VtE. Níže jsou uvedena základní kritéria z tohoto dokumentu [13], jež musí každý nově instalovaný zdroj do sítě provozovatele distribuční soustavy splňovat.

3.1 Připojitelnost výroby

Studie připojitelnosti výroby musí obsahovat technické posouzení možného připojení výroby s ohledem na:

- napěťové poměry ve všech posuzovaných uzlech sítě
- zatížitelnost jednotlivých prvků sítě
- dodržení parametrů zpětných vlivů na DS – zejména změny napětí vyvolané trvalým provozem výroby, změny napětí při spínání, útlumu signálu HDO, flikru, harmonických a dalších kritérií daných PPDS (dle charakteru výroby).

3.2 Připojení k síti

Nově připojované zdroje do DS musí být připraveny pro instalaci dálkového ovládání, tzn. ovládací obvod a komunikační cestu mezi elektroměrovým rozvaděčem a novým zdrojem. Připojení k síti PDS se děje v předávacím místě s oddělovací funkcí, přístupným kdykoliv personálu PDS. Tento požadavek je u jednofázových zdrojů do 4,6 kVA a trojfázových do 30 kVA splněn, jsou-li tyto zdroje vybaveny zařízením pro sledování stavu sítě s přiřazeným spínacím prvkem. U zdrojů s instalovaným výkonem 100 kVA a více musí být spínač s oddělovací funkcí vybaven dálkovým ovládním a signalizací stavu.

Vlastní výrobní, popř. zařízení odběratelů s vlastními výrobny, které mají být provozovány paralelně se sítí PDS, je zapotřebí připojit k síti ve vhodném předávacím místě. Způsob a místo připojení na síť stanoví PDS s přihlédnutím k daným síťovým poměrům, výkonu a způsobu provozu vlastní výrobní, stejně jako k oprávněným zájmům výrobce. Tím má být zajištěno, že vlastní výrobní bude provozována bez rušivých účinků, neohrozí napájení dalších odběratelů nebo dodávky ostatních výrobců. Posouzení možností připojení z hlediska zpětných vlivů na síť vychází z impedance sítě ve společném napájecím bodě (zkratového výkonu), připojovaného výkonu, stejně jako druhu a způsobu provozu vlastní výrobní a údajích o souvisejících výrobních.[13]

Některé příklady připojení jsou uvedeny v Přílohách.

3.3 Spínací zařízení

Pro spojení vlastní výrobní se sítí PDS musí být použito spínací zařízení (vazební spínač) minimálně se schopností vypínání zátěže (např. vypínač, odpínač s pojistkami, úsekový odpínač), kterému je předřazena zkratová ochrana. Tento vazební spínač může být jak na straně nn, tak i na straně vn nebo 110 kV. Pokud se nepředpokládá ostrovní provoz, lze k tomuto účelu použít spínací zařízení generátoru. Spínací zařízení musí zajišťovat galvanické oddělení ve všech fázích. Výrobce musí prokázat zkratovou odolnost celého zařízení. K tomu mu PDS udá velikost příspěvku zkratového ekvivalentního oteplovacího proudu a velikost nárazového zkratového proudu ze sítě.[13]

3.4 Ochrany

K ochraně vlastního zařízení a zařízení jiných odběratelů jsou potřebná další opatření využívající ochran (např. zkratová ochrana, ochrana proti přetížení, ochrana před nebezpečným dotykem), které při odchylkách napětí a frekvence vybaví příslušná spínací zařízení. U zařízení schopných ostrovního provozu je třeba zajistit chránění i při ostrovním provozu. Filosofie okamžitého odpojení výroben při poruchách v síti není při jejich rostoucím

podílu v DS udržitelná. Proto mohou poklesy napětí při poruchách v síti vyvolat odpojení od sítě pouze ve výjimečných případech.

Okamžité odpojení zajišťují ochrany pro tzv. neselektivně vypínané jednotky (Tabulka 3-1). Při připojení výroben k síti PDS provozované s OZ, které mohou tyto výrobní ohrozit, je zpoždění vypínání přípustné jen tehdy, když je pro nezpožděné odpojení výrobní při OZ k dispozici zvláštní ochrana. Pro zdroje vybavené funkcí podpory sítě, tj. se schopností udržení se v provozu při krátkodobých poklesech napětí v síti, je zapotřebí volit ochrany pro selektivně vypínané výrobní jednotky.[13]

| Funkce | Rozsah nastavení | Standardní nastavení | Časové zpoždění | Standardní nastavení |
|-----------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| Podpětí 1.stupeň $U<$ | 0.70 U_n až 1.0 U_n | 90 % U_n | $t_{U<}$ | 0,5 s |
| Podpětí 2.stupeň $U<<$ | 0.70 U_n až 1.0 U_n | 80 % U_n | $t_{U<<}$ | 0,1 s |
| Nadpětí 1.stupeň $U>$ | 1.0 U_n až 1.2 U_n | 110 % U_n | $t_{U>}$ | 0,5 s |
| Nadpětí 2.stupeň $U>>$ | 1.0 U_n až 1.2 U_n | 120 % U_n | $t_{U>>}$ | 0,1 s |
| Podfrekvence 1.stupeň $f<$ | 48 Hz až 50 Hz | 48 Hz | $t_{f<}$ | 0,5 s |
| Podfrekvence 2.stupeň $f<<$ | 48 Hz až 50 Hz | 47,5 Hz | $t_{f<<}$ | 0,1 s |
| Nadfrekvence $f>$ | 50 Hz až 52 Hz. | 50,2 Hz | $t_{f>}$ | 0,5 s |

Tabulka 3-1 Nastavení ochran

Po dohodě s PDS lze upustit od 2. stupně uvedených ochran.

3.5 Podmínky pro připojení

K zabránění zavlečení zpětného napětí do sítí PDS je zapotřebí zajistit technickými opatřeními, aby připojení vlastní výrobní k síti PDS bylo možné pouze tehdy, když jsou všechny fáze sítě pod napětím.

K připojení může být použit jak spínač, který spojuje celé zařízení odběratele se sítí, tak i spínač, který spojuje generátor popř. více paralelních generátorů se zbylým zařízením odběratele. Zapnutí tohoto vazebního spínače musí být blokováno do té doby, dokud není na každé fázi napětí minimálně nad rozběhovou hodnotou podpěťové ochrany. K ochraně vlastní výrobní se doporučuje časové zpoždění mezi obnovením napětí v síti a připojením výrobní v rozsahu minut.[13]

3.5.1 Zvýšení napětí

Zvýšení napětí vyvolané provozem připojených výroben nesmí v nejnepříznivějším případě (přípojním bodu) překročit 2 % pro výrobní s přípojním místem v síti vn a 110 kV ve srovnání s napětím bez jejich připojení.

$$\Delta u_{vn,110} \leq 2\%, \quad (3-1)$$

pro výrobní s přípojním místem v síti nn nesmí překročit 3 %.

Pokud je v síti nn a vn jen jedno přípojné místo, je možné tuto podmínku posoudit jednoduše pomocí zkratového poměru výkonů

$$k_{k1} = \frac{S_{kV}}{\sum S_{Amax}}, \quad (3-2)$$

kde S_{kV} je zkratový výkon v přípojném bodu a $\sum S_{Amax}$ součet maximálních zdánlivých výkonů všech připojených/plánovaných výroben. K vyšetření S_{Amax} u větrných elektráren je zapotřebí vycházet z maximálních zdánlivých výkonů jednotlivého zařízení S_{Emax} :

$$S_{Emax} = S_{Emax10min} = S_{nG} \cdot p_{10min} = \frac{P_{nG}}{\lambda} \cdot p_{10min}, \quad (3-3)$$

přičemž hodnotu p_{10min} (maximální střední výkon v intervalu 10 minut) je zapotřebí převzít ze zkušebního protokolu. Podmínka zkratového poměru výkonu je dodržena za předpokladu, je-li větší než 50 pro síť vn a větší jak 33 pro síť nn.

V mnoha případech se v praxi udává maximální připojitelný výkon S_{Amax} , pro který je pak zapotřebí určit zvýšení napětí v přípojném bodu. K tomu se používá následující vztah:

$$\Delta u_{AV} = \frac{S_{Amax} \cdot \cos(\psi_{kV} - \varphi)}{S_{kV}}. \quad (3-4)$$

3.5.2 Změny napětí při spínání

Změny napětí ve společném napájecím bodě, způsobené připojováním a odpojováním jednotlivých generátorů nebo zařízení, nevyvolávají nepřipustné zpětné vlivy, pokud největší změna napětí nepřekročí limity:

Pro výrobní s předávacím místem v síti nn

$$u_{max\ nn} \leq 3 \%. \quad (3-5)$$

Pro výrobní s předávacím místem v síti vn

$$u_{max\ vn} \leq 2\%. \quad (3-6)$$

Toto platí, pokud spínání není častější než jednou za 1,5 minuty.

Pro výrobní v síti 110 kV platí pro omezení změny napětí vyvolané spínáním:

a) Normální provoz:

Spínání jedné výrobní jednotky (např. jednoho generátoru větrné turbíny)

$$u_{max} \leq 0,5 \%. \quad (3-7)$$

Spínání celého zařízení (např. větrného parku)

$$u_{max} \leq 2\%. \quad (3-8)$$

b) Poruchový provoz

Pro změnu napětí při spínání celého zařízení platí

$$u_{max} \leq 5 \%. \quad (3-9)$$

V závislosti na zkratovém výkonu S_{kV} v síti PDS a jmenovitém zdánlivém výkonu S_{nE} jednotlivé výrobní lze odhadnout změnu napětí

$$\Delta u_{max} = k_{imax} \cdot \frac{S_{nE}}{S_{kV}} = \frac{I_a}{I_{nG}} \cdot \frac{S_{nE}}{S_{kV}}. \quad (3-10)$$

Činitel k_{imax} se označuje jako „největší spínací ráz“ a udává poměr největšího proudu, který se vyskytuje v průběhu spínacího pochodu (např. zapínací ráz I_a) ke jmenovitému proudu generátoru nebo zařízení.

Pro větrné elektrárny platí speciální „činitel spínání závislý na síti“, respektující nejen výši ale i časový průběh proudu při spínání. Udává se jako funkce úhlu impedance sítě ψ pro každé zařízení ve zkušebním protokolu. Jeho pomocí lze vypočítat fiktivní „náhradní změnu napětí“

$$\Delta u_{ers} = k_{i\psi} \cdot \frac{S_{nE}}{S_{kV}}, \quad (3-11)$$

kteřá rovněž (jako Δu_{max}) nesmí překročit hodnoty výše uvedených vztahů.

3.5.3 Připojování synchronních generátorů

U synchronních generátorů je nutné takové synchronizační zařízení, se kterým mohou být dodrženy následující podmínky pro synchronizaci:

- rozdíl napětí $\Delta U < \pm 10 \% U_n$
- rozdíl frekvence $\Delta f < \pm 0.5 \text{ Hz}$
- rozdíl fáze $< \pm 10^\circ$
- stejný sled fází

3.5.4 Připojování asynchronních generátorů

Asynchronní generátory rozbíhané pohonem musí být připojeny bez napětí při otáčkách v mezích 95 % až 105 % synchronních otáček. U asynchronních generátorů schopných ostrovního provozu, které nejsou připojovány bez napětí, je zapotřebí dodržet podmínky spínání jako pro synchronní generátory.

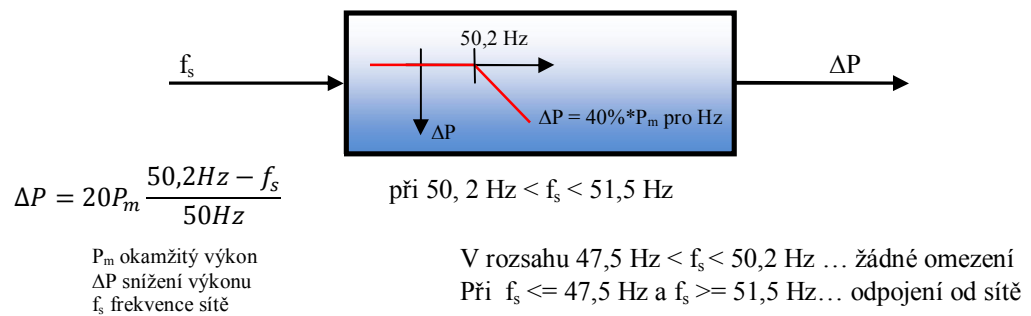
3.5.5 Připojování výroben se střídači, ev. měniči kmitočtu

Střídače smějí být spínány pouze tehdy, když je jejich střídavá strana bez napětí. U vlastních výroben se střídači, schopných ostrovního provozu, které nejsou spínány bez napětí, je zapotřebí dodržet podmínky zapnutí platné pro synchronní generátory.

3.5.6 Zvláštní požadavky na výroby s OZE s výkonem nad 15 MW připojované do sítí 110 kV

Cílem těchto požadavků je nejen zamezit výpadku zdrojů při napěťových poklesech, ale naopak napětí určitým způsobem podporovat. Dalším cílem je reagovat na nárůst frekvence snížením dodávaného činného výkonu ještě předtím, než by došlo k jejich odpojení při nadfrekvenci.

Jmenovitý výkon výroby se určí ze součtu jednotlivých výrobních jednotek v jednom přípojném bodě sítě. Podle toho se např. u větrných elektráren pohlíží na instalovaný výkon celého parku jako na jmenovitý výkon. Činný výkon výrobních jednotek s OZE musí být říditelný podle pokynů provozovatele PS a DS, aby mohl působit proti ohrožení nebo poruše rovnováhy v systému. Všechny výroby z obnovitelných zdrojů musí za provozu při frekvenci vyšší než 50,2 Hz snížit okamžitý činný výkon s gradientem 40 %/Hz ze současně dostupného výkonu generátoru (Obr. 3-1).



Obr. 3-1 Snížení činného výkonu OZE při nadfrekvenci

Všechny výroby s obnovitelnými zdroji se musí při výměně jalového výkonu chovat tak, aby dodávky jalového výkonu po několika minutách odpovídali hodnotě zadané provozovatelem sítě. Pracovní bod pro výměnu jalového výkonu v ustáleném stavu se stanovuje podle požadavků sítě. Hodnota jalového výkonu se zadává jedním ze tří způsobů:

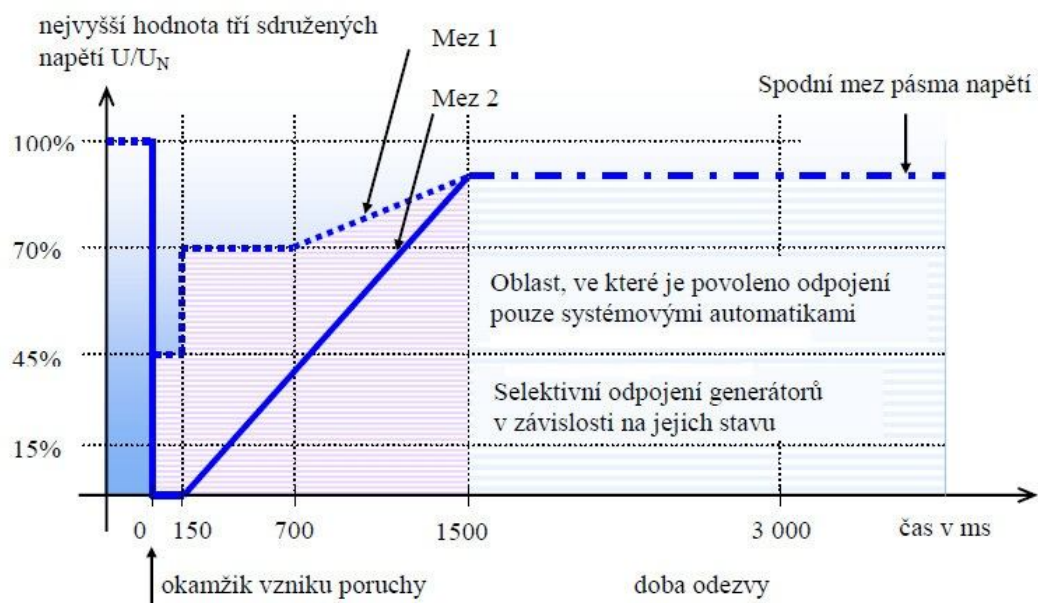
- účinník ($\cos\varphi$)
- hodnota jalového výkonu (Q v MVar)
- hodnota napětí (U v kV), případně s tolerančním pásmem

Zadání může být dané sjednanou hodnotou, charakteristikou v závislosti na pracovním bodu výroby nebo online zadávanou požadovanou hodnotou.

Chování při poruchách v síti

Provozovatel výroby musí sám přijmout opatření k zamezení škodám na jeho vlastním výrobním zařízení při automatickém OZ v síti provozovatele DS. Při poklesu napětí

v přípojném bodě pod 85 % vztažného napětí a jeho setrvání při současném odběru jalového výkonu ze sítě v přípojném bodě (podbuzený provoz) musí být výrobná odpojena od sítě s časovým zpožděním 0.5 s. Při poklesu a setrvání napětí na nižší napěťové straně každého transformátoru zdroje na a pod hodnotu 80 % spodní meze pásma napětí musí být vždy jedna čtvrtina generátorů odpojena od sítě za 1.5 s, další za 1.8 s, za 2.1 s a 2.4 s. Při vzrůstu a setrvání napětí na straně nižšího napětí transformátoru zdroje na a nad 120 % horní meze napěťového pásma musí být příslušný generátor odpojen od sítě s časovým zpožděním 100 ms. Hodnota napětí se vztahuje k největšímu ze tří sdružených napětí. Při frekvenci mezi 47.5 Hz a 51.5 Hz je automatické odpojení od sítě z důvodu odchylky frekvence od 50 Hz nepřipustné. Při poklesu frekvence pod 47.5 Hz musí dojít k nezpožděnému odpojení, resp. při vzrůstu nad 51,5 Hz smí dojít k automatickému odpojení od sítě.



Obr. 3-2 Meze průběhu napětí v přípojovacím bodě pro výrobní jednotku typu 2¹ při poruše v síti

Třípólové zkraty nebo symetrické poklesy napětí při poruchách nesmí nad mezí 1 v Obr. 3-2 vést k nestabilitě nebo odpojení výrobní jednotky od sítě. Uvnitř šrafovované oblasti a nad mezí 2 platí, že všechny výrobní jednotky musí poruchu překonat - projet bez odpojení od sítě. Pokud nějaká výrobní jednotka nemůže vzhledem ke koncepci připojení (zařízení včetně generátorů) k síti splnit tuto podmínku bez odpojení od sítě, je dovoleno po dohodě s provozovatelem sítě posunutí této meze. Pokud při projetí poruchy dojde k nestabilitě nějakého generátoru nebo náběhu nějaké ochrany generátoru, je dovoleno po dohodě s provozovatelem sítě krátkodobé odpojení výrobní jednotky (KOV) od sítě. Pod mezí 2 je KOV od sítě vždy dovoleno.[13]

¹ Výrobní jednotka typu 1 má synchronní generátor přímo připojený k síti. Není-li tato podmínka splněna, jde o výrobní jednotku typu 2.

4 Hlediska provozu rozptýlených zdrojů elektrické energie v DS

Chování výroben v síti posuzujeme jednak z hlediska podporování funkčnosti sítě a přizpůsobení se provozním podmínkám, a za druhé z hlediska zpětných vlivů na napájecí síť.

V provozu platí pro výrobce povinnost neustále udržovat zařízení potřebná pro paralelní provoz vlastní výroby se sítí PDS v bezvadném technickém stavu. Spínače, ochrany a ostatní vybavení pro dálkové řízení musí být v pravidelných lhůtách (minimálně jednou za čtyři roky) funkčně přezkoušeny.[13]

4.1 Zásady podpory sítě

Výrobní zařízení musí být schopna se při dodávce do sítě podílet na udržování napětí. Přitom se rozlišuje mezi statickou a dynamickou podporou sítě. Požadované hodnoty a charakteristiky pro podporu sítě udává PDS. Dodržování zadaných hodnot zajišťuje automatické řízení ve výrobě.

Statické udržování napětí v síti představuje udržování napětí ve smluvně stanovených mezích za normálního provozu v síti při pomalých změnách napětí.

Dynamickou podporou sítě se rozumí udržování napětí při poklesech napětí v síti vvn, zamezující nežádoucímu odpojení výkonů napájejících sítě vn a rozpadu sítě. Proto se musí i výroby v sítích vn a 110 kV podílet na dynamické podpoře sítě. To znamená, že musí být technicky schopné zůstat připojené i při poruchách v síti. Při dynamické podpoře je zapotřebí dodržet následující meze:

- Při poklesu napětí mezi 100 % a 70 % dohodnutého napájecího napětí U_n v přípojném bodě s trváním do 0,7 s musí výroba zůstat připojená v síti.
- Při poklesu napětí pod 30 % s trváním do 150 ms musí výroba zůstat připojená k síti. Pokud to není technicky možné, může v dohodě s PDS dojít k nezpožděnému odpojení.

4.2 Přizpůsobení činného výkonu

Všechny výroby připojené do DS musí být schopné snižovat činný výkon automaticky v závislosti na kmitočtu v síti a podle poměrů v síti i podle povelů z řídicího dispečinku PDS nebo se automaticky odpojit od DS. Všechny výroby připojené do DS, které se automaticky neodpojí, musí být schopné při kmitočtu nad 50,2 Hz snižovat okamžitý činný výkon gradientem 40 % na Hz (Obr. 3-1).

4.2.1 Řízení činného výkonu v závislosti na provozních podmínkách

Výrobná musí být provozovatelná se sníženým činným výkonem. PDS je oprávněn ke změně činného výkonu v následujících stavech sítě:

- potenciální ohrožení bezpečného provozu systému
- nutné provozní práce, popř. nebezpečí přetížení v síti PDS
- nebezpečí vzniku ostrovního provozu
- ohrožení statické nebo dynamické stability
- vzrůst frekvence ohrožující systém

V těchto případech má PDS právo vyžadovat automaticky působící přechodné omezení dodávaného činného výkonu nebo odpojení zařízení. Snížení dodávaného výkonu na hodnotu požadovanou PDS v přípojném bodě musí být neprodlené, maximálně v průběhu jedné minuty. Přitom musí být technicky možné snížení až na hodnotu 0 % bez automatického odpojení výrobní od sítě.

4.3 Řízení jalového výkonu v závislosti na provozních podmínkách

Způsob řízení jalového výkonu závisí vždy na konkrétním místě distribuční soustavy a určuje ho PDS po konzultaci s výrobcem. U zdrojů do 16 A/fázi musí být účinník zdroje za normálních ustálených provozních podmínek při dovoleném rozsahu tolerancí jmenovitého napětí mezi 0,95 kapacitní a 0,95 induktivní za předpokladu, že činná složka výkonu se pohybuje nad 20% jmenovitého výkonu zdroje. U FVE do výkonu 4.6 kVA/fázi se kompenzace účinníku nepožaduje. Výrobní s instalovaným výkonem od 100 kVA musí mít jalový výkon říditelný.

Při silně kolísajícím výkonu pohonu (např. u některých VtE) musí být kompenzace jalového výkonu automaticky a dostatečně rychle regulována. Kompenzační kondenzátory nesmějí být připínány před zapnutím generátoru. Při vypínání generátoru musí být odpojeny současně. Provoz zdrojů může vyžadovat opatření k omezení napětí harmonických a pro zamezení nepřijatelného zpětného ovlivnění HDO. S PDS je proto zapotřebí odsouhlasit výkon, zapojení a způsob regulace kompenzačního zařízení, případně i hrazení harmonických nebo frekvence HDO vhodnými indukčnostmi.[13]

4.4 Zpětné vlivy na napájecí síť

Aby nebyla rušena zařízení dalších odběratelů a provozovaná zařízení PDS, je zapotřebí omezit zpětné vlivy místních výroben. Zpětné vlivy na DS se u vlastních výroben projevují především jako změny napětí a harmonické.

Bezprostředně pozorovatelné účinky jsou:

- kolísání jasu (flickr) žárovek a zářivek
- ovlivnění zařízení dálkové signalizace a ovládání, zařízení výpočetní techniky, ochranných a měřících zařízení, elektroakustických přístrojů a televizorů
- kývání momentu u strojů
- přídavné oteplení kondenzátorů, motorů, filtračních obvodů, hradících tlumivek, transformátorů
- vadná činnost přijímačů HDO a elektronického řízení.

Zpětné vlivy na DS se mohou projevovat následujícím způsobem:

- zhoršením účinníku
- zvýšením přenosových ztrát
- ovlivněním zhášení zemních spojení.

Pro individuální posouzení připojení jedné nebo více vlastních výroben v jednom společném napájecím bodu je třeba vycházet z mezních podmínek (viz níže).[13]

4.4.1 Změna napětí

Změna napětí $\Delta U \leq 3 \% U_n$ (pro společný napájecí bod v síti nn)

$\Delta U \leq 2 \% U_n$ (pro společný napájecí bod v síti vn a 110 kV).

Pozn.: Hlavními příčinami kolísání napětí (flickru) jsou časově proměnné zátěže, v praxi je představují zejména velké obloukové pece, katry apod.

Dlouhodobý flickr

Pro posouzení jedné nebo více výroben v jednom předávacím místě je zapotřebí se zřetelem na kolísání napětí vyvolávající flickr dodržet ve společném napájecím bodě nn a vn mezní hodnotu

$$P_{lt} \leq 0,46, \quad (4-1)$$

ve společném napájecím bodě 110 kV mezní hodnotu

$$P_{lt} \leq 0,37. \quad (4-2)$$

Dlouhodobá míra flikru P_{lt} jednoho zdroje může být určena pomocí činitele flikru c jako

$$P_{lt} \leq c * \frac{S_{nE}}{S_{kV}}, \quad (4-3)$$

S_{nE} je jmenovitý výkon zařízení (pro větrné elektrárny je to hodnota S_{nG}). S_{kV} je zkratový výkon sítě. **Činitel flikru zařízení c** charakterizuje spolu s fázovým úhlem i specifické schopnosti příslušného zařízení produkovat flikr. Obě hodnoty udává buď výrobce zařízení nebo nezávislý institut a mají význam především u větrných elektráren.

Pokud je hodnota vypočtená podle předchozí rovnice větší než 0,46, je možné do výpočtu zahrnout fázové úhly a počítat podle následujícího vztahu

$$P_{lt} = c * \frac{S_{nE}}{S_{kV}} |\cos(\psi_{kV} + \varphi_i)|. \quad (4-4)$$

U zařízení s n stejnými jednotkami je výsledný činitel pro flikr

$$P_{ltres} = \sqrt{n} * P_{lt} = \sqrt{n} * c * \frac{S_{nE}}{S_{kV}}. \quad (4-5)$$

4.4.2 Proud harmonických

Harmonické vznikají především u zařízení se střídači nebo měniči frekvence. Harmonické proudy emitované těmito zařízeními udává výrobce.

Výrobní v síti nn

Pokud výrobny splňují požadavky na velikosti emise harmonických proudů (I_v) podle norem „Elektromagnetická kompatibilita“, lze považovat vliv emitovaných harmonických proudů na síť DS za přípustný. Pokud nejsou meze v těchto normách dodrženy, je možné pro posouzení připojitelnosti bez přídatných opatření použít následující kritérium:

$$\text{Přípustný proud } I_{vnn} = \text{vztažný proud}^2 i_v \frac{S_{kV}}{\sin \psi_{kV}}. \quad (4-6)$$

Výrobní v síti vn

Pro pouze jediné předávací místo v síti vn lze určit celkové v tomto bodě přípustné harmonické proudy ze vztažných proudů $i_{v\text{ př}}$, násobených zkratovým výkonem ve společném napájecím bodu

$$I_{v\text{ př}} = i_{v\text{ př}} \cdot S_{kV}. \quad (4-7)$$

² Tabulky přípustných vztažných proudů pro jednotlivé harmonické je uvedeny v Přílohách.

Pokud je ve společném napájecím bodu připojeno několik zařízení, pak se určí harmonické proudy přípustné pro jednotlivá zařízení násobením poměru zdánlivého výkonu zařízení S_A k celkovému připojitelnému nebo plánovanému výkonu S_{AV} ve společném napájecím bodu

$$I_{v\text{ př}} = i_{v\text{ př}} \cdot S_{KV} \cdot \frac{S_A}{S_{AV}} \quad (4-8)$$

Pouze tehdy, když vypočtená napětí harmonických překročí výše uvedené meze, přicházejí mj. v úvahu následující opatření:

- zabudování filtrů harmonických
- připojení v místě s nižší impedancí sítě (vyšším zkratovým výkonem).

4.4.3 Ovlivnění zařízení HDO

Zařízení hromadného dálkového ovládání (HDO) jsou obvykle provozována s frekvencemi v rozmezí 183,3 až 283,3 Hz. Místně použitou frekvenci HDO je zapotřebí zjistit u PDS. Vysílací úroveň je obvykle 1,6 % až 2,5 % U_n . Ovlivnění zařízení HDO způsobují převážně výroby a zařízení pro kompenzaci účinníku (KZ). Výroby případně KZ ovlivňují přidavným zatížením vysílač HDO:

- vlastním zařízením výroby
- zvýšeným zatížením sítě, které je v důsledku výroby k síti připojeno.

Výroby připojované k síti mimo přípojnic, do níž se vysílá signál HDO, smí způsobit snížení úrovně signálu HDO maximálně o 5%. Pro frekvence 183 – 283,3 Hz platí následující minimální úrovně signálu HDO:

$$n_n 150\% U_f; v_n 190\% U_f; 110 \text{ kV } 200\% U_f,$$

kde U_f je náběhové napětí přijímače, které obvykle bývá v rozmezí 0,8 – 0,9 % U_n .

Žádost o připojení musí z hlediska HDO obsahovat:

- výpočet vlivu na vysílač event. na signál HDO,
- výsledky týdenního měření úrovně signálu HDO v přípojném bodě,
- úrovně rušivých napětí emitovaných do sítě na frekvenci HDO, nebo v její blízkosti.

Nepřípustným změnám hladiny signálu HDO v přípojném bodu, je obecně potřeba zamezit odpovídajícími technickými opatřeními, zpravidla hradícími členy.

Při poklesech hladiny signálu HDO je zapotřebí uvažovat následující hlediska:

- Zdroje připojené k síti statickými střídači bez filtrů zpravidla nezpůsobují významné snížení hladiny signálu HDO. Pokud jsou vybaveny filtry nebo kompenzačními kondenzátory, je zapotřebí přezkoušet sériovou rezonanci s reaktancí nakrátko transformátoru výroby.
- Zdroje, jejichž synchronní nebo asynchronní generátory jsou připojeny do sítě přes transformátor, vyvolávají pokles signálu HDO, který závisí na reaktanci generátoru a transformátoru, frekvenci HDO a zkratovém výkonu sítě.

Kromě omezení poklesu hladiny signálu HDO nesmí být též produkována nežádoucí rušivá napětí. Obecně platí:

- výrobnou vyvolané rušivé napětí, jehož frekvence odpovídá místně použité frekvenci HDO nebo leží v její bezprostřední blízkosti, nesmí překročit 0.1 % U_n .
- v předchozím uvedená napětí, jejichž frekvence je o 100 Hz pod nebo nad místně použitou frekvenci HDO, nesmějí v přípojném bodu překročit 0.3 % U_n . [13]

Výše uvedené hodnoty 0.1% U_n resp. 0.3% U_n vycházejí z předpokladu, že v síti nn nejsou připojeny více než dvě vlastní výroby. Jinak jsou zapotřebí zvláštní výpočty. Pokud vlastní výroba nepřipustně ovlivňuje provoz zařízení HDO, musí její provozovatel učinit opatření potřebná k jeho odstranění a to i když je ovlivnění zjištěno v pozdějším čase.

Bez posouzení je možné připojit k síti výroby, nepřesáhne-li jejich výkon v přípojném bodu a výkon v celé síťové oblasti (včetně výroben již připojených) hodnoty uvedené v Tabulka 4-1.

| Napěťová úroveň [kV] | Celkový výkon výrobních zařízení | |
|-------------------------|----------------------------------|------------------|
| | V přípojném bodu | V síťové oblasti |
| 0,4 | 5 kVA | 10 kVA |
| | FVE 20kVA ³ | FVE 40 kVA |
| VN | 500kVA | 1MVA |
| 110 | 5 MVA | 10 MVA |

Tabulka 4-1 Umožnění připojitelnosti výroby k síti bez posouzení ovlivnění HDO

Výrobní zařízení, která mají z hlediska impedancí na frekvenci HDO charakter točivých strojů (větrné výroby, kogenerace, turbogenerátory) připojované k sítím vn PDS, musí být od instalovaného výkonu 1MW vybavena hradicím členem.

³ Pro FVE platí zvýšené hodnoty výkonů vzhledem k tomu, že jsou připojeny k síti přes střídače a HDO zpravidla podstatnou měrou neovlivňují.

5 Vliv rozptýlené výroby na regulaci napětí a jalových výkonů v DS

VE a výrobní využívající biomasu se vzhledem k ES chovají prakticky jako klasické tepelné elektrárny, proto se následující část práce zaměřuje na FVE a VtE, které svým charakterem přinášejí specifické problémy do oblasti regulace napětí a jalových výkonů v DS.

5.1 Regulace napětí a jalového výkonu v ČR

Napětí a jalový výkon jsou na sobě v elektrizačních sítích silně závislé veličiny, jejichž regulace je jednou z poskytovaných podpůrných a systémových služeb společnosti ČEPS. Zatímco toky činných výkonů a frekvence jsou parametry regulující se celosystémově, napětí a jalový výkon jsou veličiny regulované lokálně. V rámci přenosové soustavy České republiky se pro regulaci využívá metody pilotních uzlů (PU). PU jsou důležité uzly, kde má změna parametrů vliv na regulovanou oblast. Zpravidla to bývají uzly, kde jsou vyvedené velké výkony. Regulace probíhá na principu injektování jalových výkonů do těchto uzlů. Zdrojem injektovaných jalových výkonů jsou synchronní generátory, regulační transformátory, statická a dynamická kompenzační zařízení.

5.1.1 Primární regulace

Primární regulace představuje základní regulační službu, přispívající k udržování rovnováhy mezi spotřebou a výrobou. Udržuje zadané svorkové napětí generátoru pomocí změny buzení stroje.

5.1.2 Sekundární regulace

Sekundární regulace koordinuje funkci jednotlivých regulačních prvků v dané lokalitě podle požadavků terciární regulace. Úkolem sekundární regulace je udržovat zadané velikosti napětí ve vybraných uzlech soustavy. Dělí se na:

- automatické regulátory napětí – reagují na odchylku napětí v pilotním uzlu a určují potřebný jalový výkon pro její vyrovnání,
- automatické regulátory odboček síťových transformátorů.

5.1.3 Terciární regulace

Terciární regulace je centralizovaná služba, která reguluje zadané napětí v pilotních uzlech pro plynulý, ekonomický a bezpečný provoz ES. K důležité funkci terciární regulace patří udržování dostatečné točivé rezervy jalového výkonu pro zajištění stability systému, a to jak pro aktuální provozní stav, tak pro náhlé změny v systému (např. výpadek velkého bloku, prudký nárůst zatížení).[40]

5.2 Problematika regulace u FVE

FVE se při optimálních podmínkách v letních měsících (květen, červen) podílejí na celkové výrobě elektřiny max. 4,5%. Průměrně pak podíl na výrobě během roku činí přibližně 1,4% z celkové výroby. Pokud se ovšem zaměříme na hodnoty okamžité výroby, situace bývá značně odlišná. Např. v uvedených měsících dosahuje v poledních hodinách maximální spotřeba v ES ČR asi 8000 MW, v tu chvíli může v případě optimálního slunečního svitu dosahovat výroba z FVE téměř 20% okamžité spotřeby a to zcela náhodně, prozatím bohužel bez možnosti jakýmkoliv způsobem tuto výrobu regulovat.

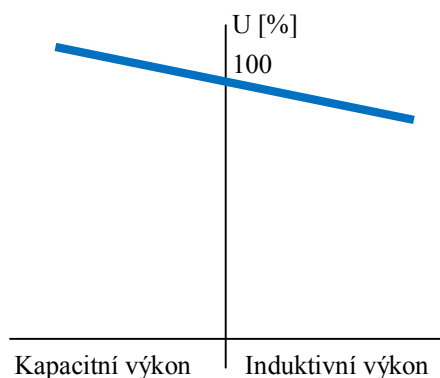
Elektrizační soustava a její regulace byla původně navržena pro klasickou výrobu, přenos a distribuci elektrické energie od definovaných zdrojů ke spotřebičům. Pro udržení stability elektrizační soustavy je nutno sledovat a regulovat jeden z hlavních parametrů, a to napětí. Vzhledem k velké státní podpoře OZE došlo v posledních letech k masivnímu nárůstu připojení rozptýlených zdrojů elektrické energie do distribuční sítě. Tyto ve větší míře obtížně predikovatelné zdroje mají ovšem vliv na regulační systém napětí v soustavě. Vzhledem k tomu, že jednou z možností regulace napětí v uzlech sítě je regulace toků jalového výkonu, je nutno rozptýlené zdroje v soustavě doplnit o regulaci jalového výkonu. RZ je také potřeba vybavit regulací činného výkonu, která by se použila v případě dosažení fyzikálních limitů původní regulace napětí. Předpokládá se, že veškerá regulace jalového a činného výkonu bude prováděna na základě dispečerského řízení provozovatelem distribuční soustavy, jehož zavedení je dáno novelou energetického zákona č. 211/2011 Sb.[9] platnou od 18. srpna 2011.

5.2.1 Kompenzace a dekompenzace

Kompenzace jalového výkonu se většinou provádí pomocí připínání výkonových kondenzátorů. V průmyslových sítích se můžeme v menším měřítku také setkat s pojmem dekompenzace, kde se naopak kompenzuje jalový proud kapacitního charakteru za pomoci tlumivek nebo měničů. V obou případech je hlavním úkolem snížit celkový efektivní proud v síti a zároveň dodržet neutrální hodnotu účinníku neboli $\cos \varphi$ v připojovacím bodě do distribuční sítě. Dodržení povolených tolerancí $\cos \varphi$, resp. poměru činné a jalové složky proudu ze sítě má význam pro regulaci napětí v DS.

Pokud zanedbáme vlastnosti kabelové přípojky, transformátoru, chodu měničů naprázdno a filtračních obvodů, tak z principu pracuje FVE s nulovou složkou jalového proudu, tedy generuje do sítě pouze činný výkon. Jak již bylo uvedeno, napětí v uzlech soustavy může být regulováno jalovým výkonem, proto je potřeba tyto rozptýlené zdroje vybavit regulátory jalové výkonu, aby byly schopny při určitém činném výkonu dodávat i výkon jalový, nebo

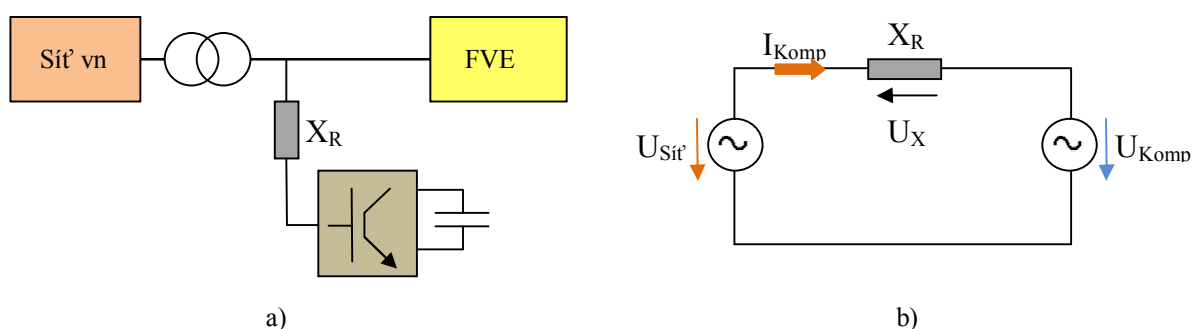
aby byly schopny dodávat pouze výkon jalový. Tento regulátor jalového výkonu pak bude implementován do dispečerského řízení provozovatele DS. Na Obr. 5-1 je znázorněn vliv kapacitního a induktivního výkonu na velikost napětí.



Obr. 5-1 Vliv kapacitního a induktivního charakteru výkonu na velikosti napětí

5.2.2 Princip elektronické (de)kompenzace

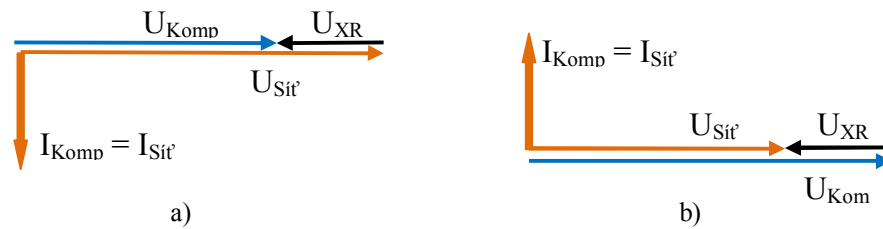
Kompenzátor je vlastně proudový zdroj dodávající do sítě takovou velikost jalového proudu, aby byl docílen požadovaný účinník. Generování proudu je v principu zajištěno řízením napěťového zdroje připojeného přes indukčnost do sítě. Kompenzátor je standardně třífázový, v případě potřeby ho lze modifikovat i na jednofázové provedení. Obr. 5-2 ukazuje příklad připojení kompenzátoru k FVE s vlastním distribučním transformátorem včetně jeho zjednodušeného schéma. Kompenzátor je tvořen měničem, trojfázovým napěťovým střídačem z IGBT tranzistorů, kondenzátorem (akumulátor energie) a tlumivkou X_R , tvořící filtr pro zajištění potřebného sinusového proudu.



Obr. 5-2 a) Připojení kompenzátoru k síti, b) Schéma kompenzátoru

Na Obr. 5-3 jsou vektorové diagramy znázorňující princip funkce kompenzátoru, kdy se jalový výkon řídí změnou amplitudy napětí kompenzátoru U_{Komp} . Pokud dosahuje toto napětí vyšší hodnoty než napětí sítě, vznikne na reaktanci X_R úbytek napětí se stejnou fází jako má napětí kompenzátoru a do sítě teče kapacitní proud, kompenzátor se chová jako kondenzátor.

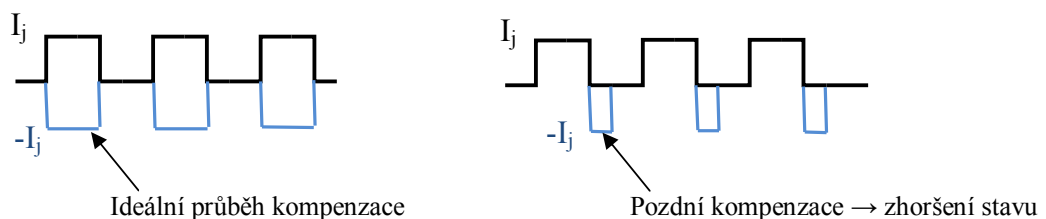
Při napětí kompenzátoru nižším než je napětí sítě, je úbytek na reaktanci v opačném směru a také protékající proud má obrácený směr a tedy induktivní charakter.[16]



Obr. 5-3 - Vektorový diagram v režimu a) induktivního proudu, b) kapacitního proudu

5.2.3 Dynamika kompenzace

Dynamika regulačních prvků má pro přesnost dodržování požadovaného účinníku zásadní vliv. Pokud má být požadovaný účinník dodržen, je nutné v případě kolísání výkonu FVE (oblačnost) regulovat rychle a často. Právě rychlost kompenzace představuje důležitý faktor. Pokud by totiž kompenzace účinníku nebyla dostatečně rychlá a nestíhala včas zareagovat na rychlé skokové změny, docházelo by paradoxně ke zhoršení dané situace. A to z důvodu, že kompenzační prvek by vlivem pomalé reakce začal kompenzovat až po odeznění nežádoucího stavu (Obr. 5-4). Tím by se ještě zvýšilo kolísání jalového výkonu a nežádoucího napěťového flikru.



Obr. 5-4 Ideální a pozdní průběh kompenzace

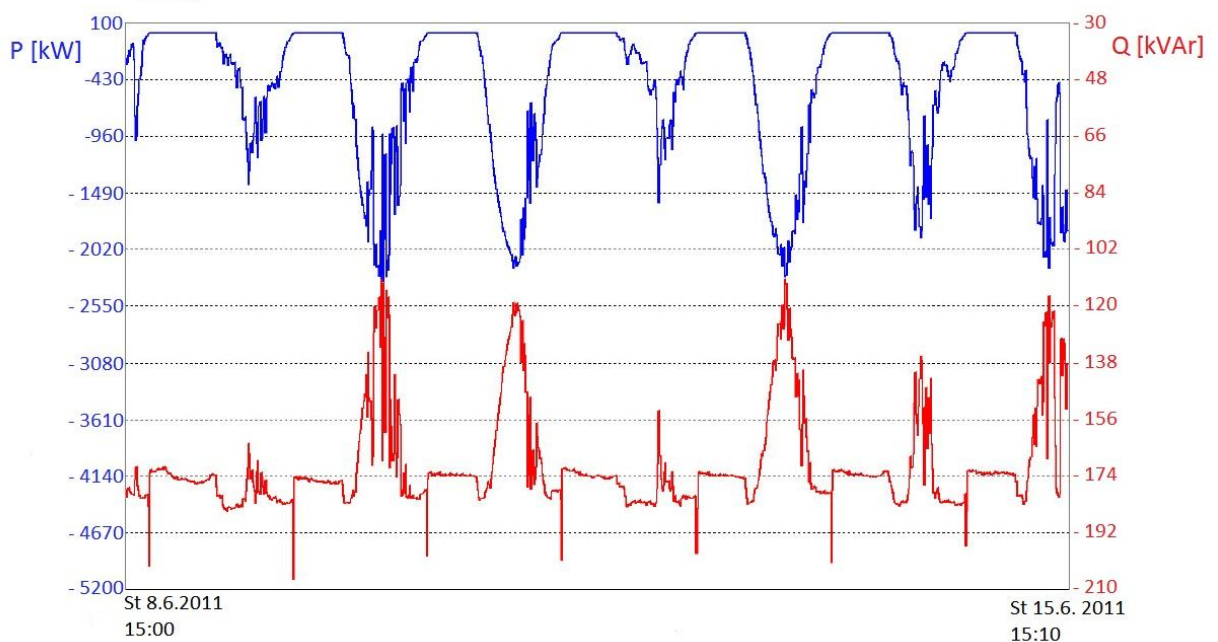
Pro rychlost a plynulost regulace jalového výkonu jsou vhodné měniče umožňující řízení jalového výkonu, oproti pasivním prvkům kompenzace mají ovšem vyšší ztráty. Pokud měniče tuto schopnost nemají, využívá se pasivních prvků, tedy kompenzačních kondenzátorů a dekompenzačních tlumivek. Při použití těchto prvků se používá stupňovitá regulace, u které je ale důležité vhodně zvolit velikost jednotlivých stupňů, aby se dosáhlo dostatečné přesnosti regulace. Důraz se klade také na dosažení minimálního počtu spínání. Při uvážení všech faktorů se jako ideální řešení regulace jalového výkonu jeví kombinace stupňovité a plynulé regulace (hybridní regulace).

5.2.4 Rizika při nesprávně navržené regulaci

Vzhledem k tlaku na provozovatele FVE, který vyvolala novela energetického zákona týkající se vybavení provozoven s výkonem nad 2 MW zařízením umožňujícím dispečerské řízení účinníku, jsou níže uvedena některá rizika, která by mohla vzniknout nesprávně navrženou regulací.

- Časté spínání velkých kondenzátorových baterií a tlumivek za transformátorem 22/6 kV, který bude mít jen minimální činné zatížení, bude zdrojem přepětí, které může poškodit vinutí transformátoru.
- Zatížení transformátoru velkým kapacitním výkonem může vést, spolu se zvýšeným napětím v síti DS, k jeho přesycení.
- Vznik rezonančního obvodu vzhledem ke kombinaci indukčností a kondenzátorů. Ten může v náhodné konfiguraci rezonovat na některé harmonické napětí nebo na kmitočtu signálu HDO v síti DS. To by mělo za následek tzv. odsávání signálu HDO.[19]

5.2.5 Bilance výkonů reálné FVE



Obr. 5-5 Průběh závislosti jalového výkonu na činném výkonu FVE - 2400 kW, záporně je dodávka do sítě [19]

Z Obr. 5-5 je zřejmé, že FVE dodává do sítě jalový výkon (Q). Velikost dodávaného Q je vyšší během noci, kdy výroba nedodává činný výkon a naopak nižší během dne, při dodávce činného výkonu. Průběhy jsou individuální pro každou výrobu, avšak princip zůstává stejný. Rozdíl je v tom, že u některých výroben dochází během dne při dodávce činného výkonu nejen ke snížení dodávky Q, ale FVE může Q ze sítě i odebírat.

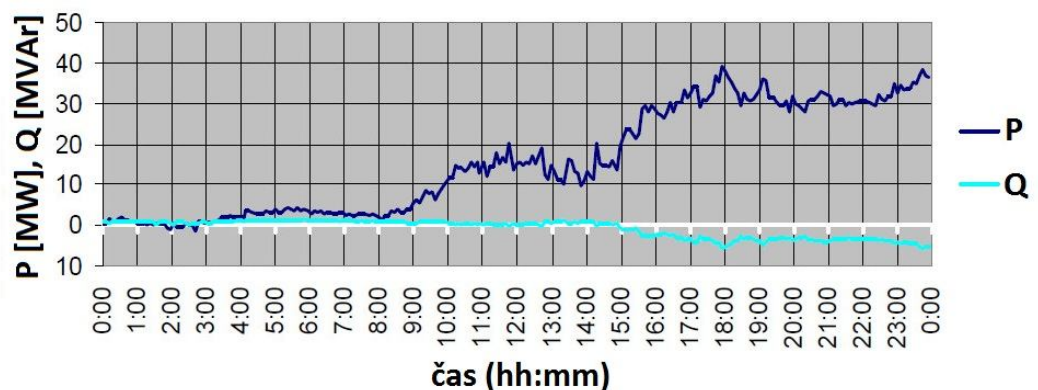
5.3 Ovlivňování U v předávacím místě a změny účinníku při provozu farmy VtE

Pro další ukázkou vlivu rozptýlené výroby na distribuční síť jsem zvolil naši největší větrnou farmu Kryštofovy Hamry. Při hodnocení jsem vycházel z výsledků měření publikovaných na konferenci CIRED v roce 2009. Větrná farma Kryštofovy Hamry je složena z 21 strojů ENERCON 82. Farma se skládá ze tří skupiny strojů – Podmíleská výšina (8 VtE), Dolina (4 VtE) a Rusová (9 VtE). Každý stroj má instalovaný výkon 2 MW a celkový instalovaný výkon farmy činí 42 MW. Předávacím místem farmy VtE Kryštofovy Hamry je přípojnice 110 kV transformovny VtE Měděnec. Schéma zapojení farmy do soustavy 110 kV je uvedeno v části Přílohy.

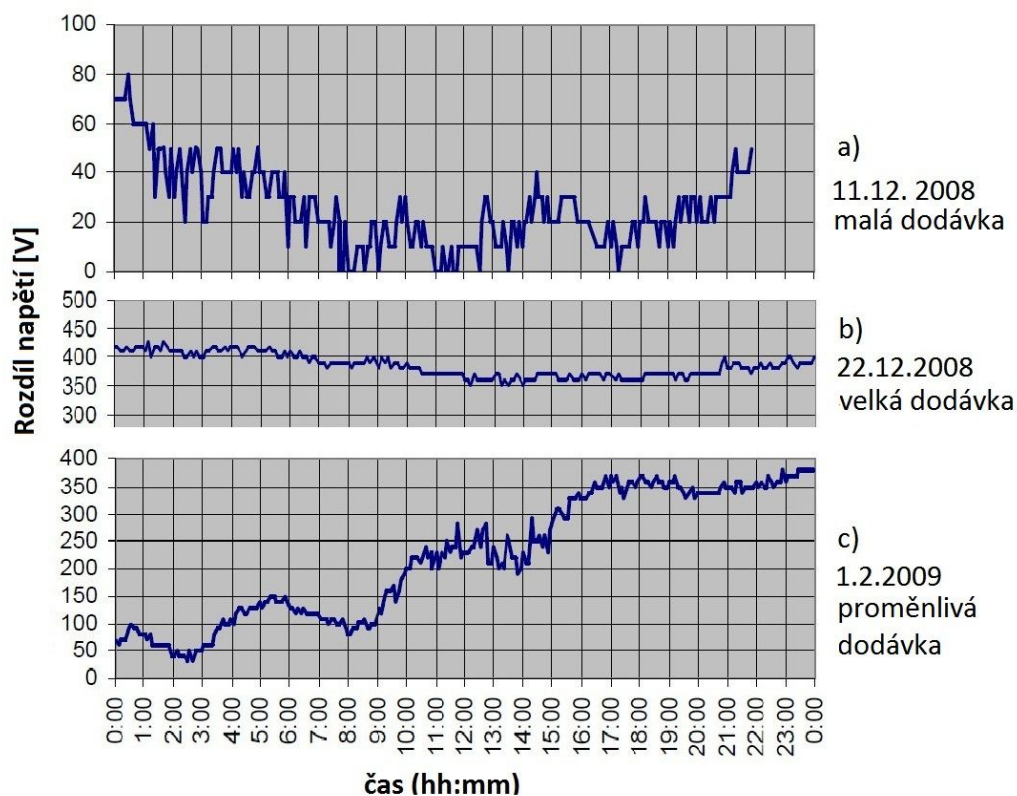
5.3.1 Bilance rozdílu napětí při různých provozních stavech

Pro názornost jsou posuzovány tři odlišné stavy provozu farmy.

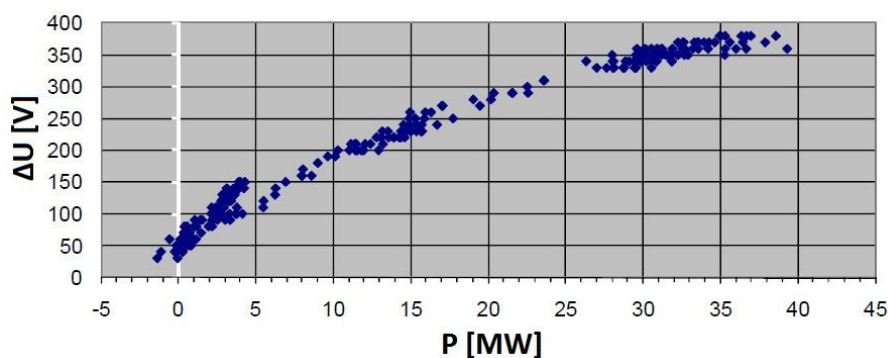
- Den s malou výrobou (11.12.2008) – výroba farmy nepřesáhla 1,8 MW, celý den se navíc činná dodávka střídala s odběrem ze sítě, který byl až 1,6 MW
- Den s velkou výrobou (22.12.2008) – výroba farmy se pohybovala během celého dne v rozmezí 33 - 42 MW
- Den s proměnlivou výrobou (1.2.2009) – průběh výroby farmy zobrazuje Obr. 5-6. Na tomto průběhu je dobře patrné, že v okolí nulové výroby farma odebírá ze sítě činný výkon pro vlastní spotřebu. A naopak, při velkých výkonech farmy rostou jalové ztráty, které vlastní výroba nestačí pokrývat a farma odebírá jalový výkon ze sítě.



Obr. 5-6 Průběh dodávky VtE na straně 110 kV [14]

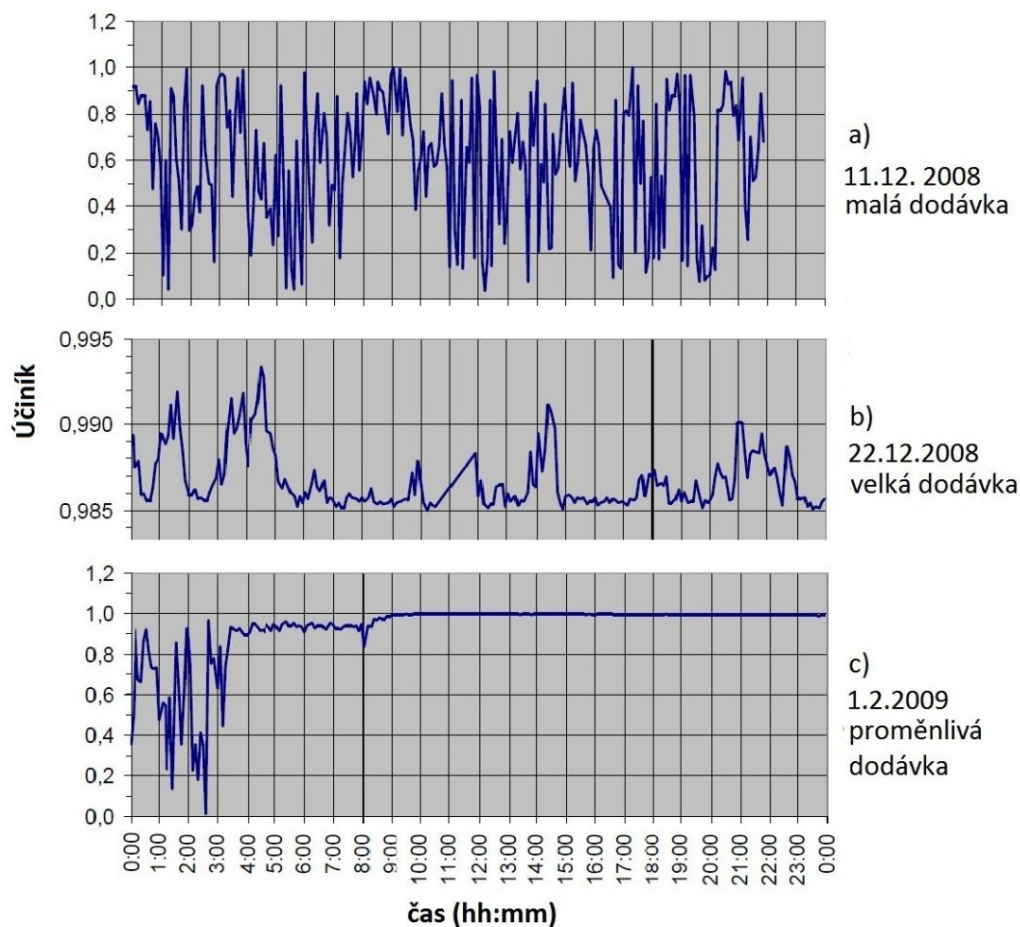
Obr. 5-7 Průběhy ΔU při různých stavech dodávky P [14]

Obr. 5-7 znázorňuje průběhy rozdílu napětí (ΔU) v předávacím místě při jednotlivých stavech výroby VtE farmy. Z těchto průběhů je patrné, že při malé dodávce činného výkonu se napětí 110 kV mění nejvýše o 80 V, což je zanedbatelná hodnota a farma při této výrobě napětí prakticky neovlivní. Při proměnlivé výrobě se ΔU pohybuje od 40 do 380 V. K největšímu ΔU dochází při plné výrobě farmy a činí až 430 V. Maximální rozdíl napětí v předávacím místě, tedy v žádném provozním stavu, nepřesáhl 430 V. Tato hodnota vzhledem k síti 110 kV představuje změnu jen o 0,39 %. Podle PPDS se povoluje míra ΔU pro společný napájecí bod v síti vn a 110 kV 2 %. Z výše uvedeného plyne, že VtE farma Kryštofovy Hamry napětí v síti 110 kV nijak nedovoleně neovlivňuje. Na Obr. 5-8 je pro úplnost uvedena závislost průběhu ΔU na výkonu farmy během dne s proměnlivou výrobou.

Obr. 5-8 Průběh ΔU v závislosti na dodávaném výkonu [14]

5.3.2 Bilance účinníku při různých provozních stavech

Opět jsou posuzovány tři provozní stavy, stejné jako při hodnocení ΔU v předchozím bodě.

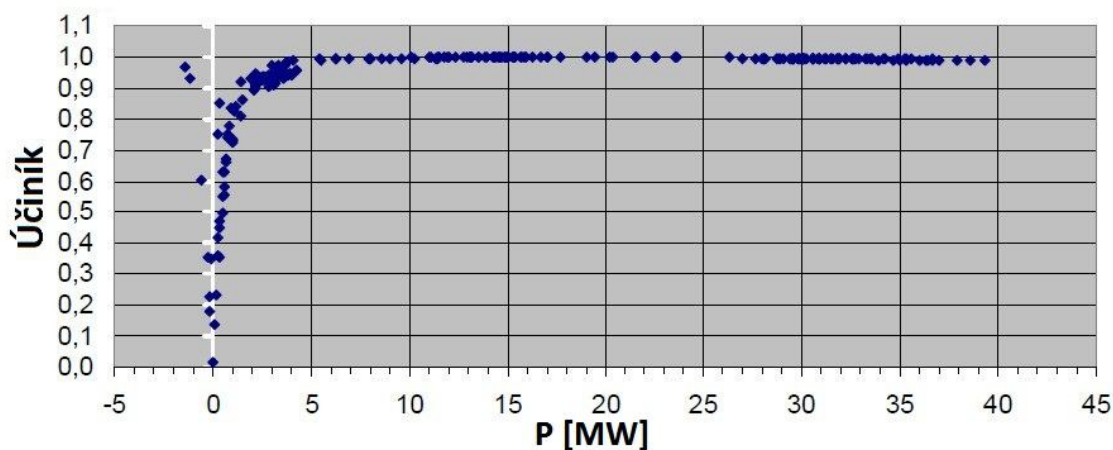


Obr. 5-9 Průběhy účinníku při různých provozních stavech [14]

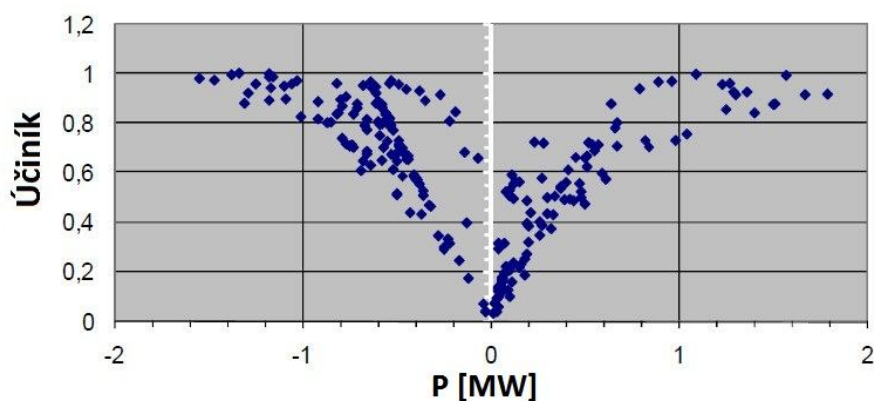
Na Obr. 5-9 jsou zobrazeny naměřené hodnoty účinníku při jednotlivých stavech výroby. Při malé výrobě je vidět, že se účinník nepravidelně pohybuje v celé šíři pásma od 0 do 1. V den, kdy farma dodávala velký činný výkon se účinník po celou dobu pohyboval v rozmezí 0,985 – 0,995 a jak již bylo řečeno výše, při velké výrobě farma zároveň odebírá induktivní výkon ze sítě. Při proměnlivé dodávce se hodnota účinníku pohybuje od 0 do 1 v závislosti na velikosti dodávky. Změny účinníku vhodně vykresluje Obr. 5-10, který znázorňuje průběh účinníku v závislosti na dodávaném činném výkonu při proměnlivé dodávce.

Podle Obr. 5-10 je zřejmé, že nejhorší stav nastává při velmi malých výkonech farmy. V rozmezí od 0 – 2 MW účinník kolísá v celém rozsahu a je prakticky nedefinovatelný. Tento stav je dobře viditelný na Obr. 5-11, který detailně zobrazuje průběh účinníku při malém výkonu VtE farmy. Při dodávce od 2 do 5 MW se účinník zlepšuje, ale stále je mimo dovolené meze. Do tohoto výkonu by tak mohla mít farma určitý vliv na kolísání napětí v předávacím místě.

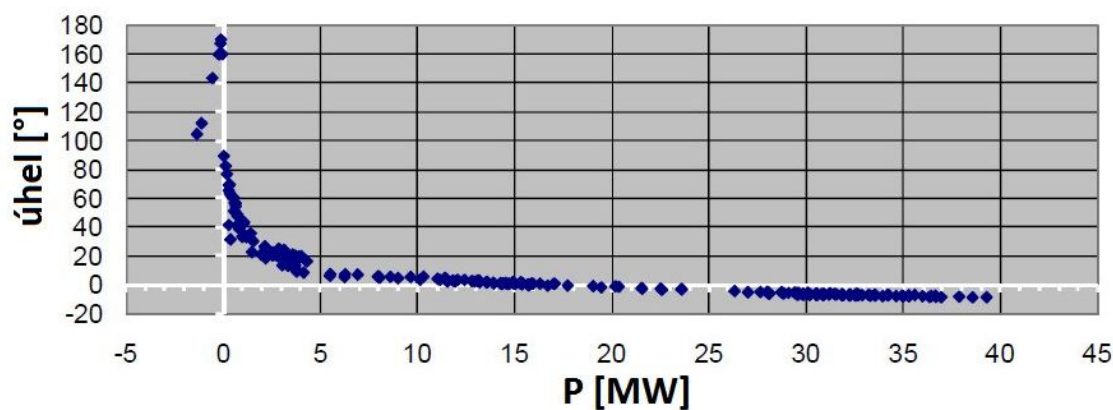
Od 5 – 20 MW je již účinník v sjednaných mezích. Při dodávce nad 20 MW se účinník pohybuje sice stále v rozmezí 1 – 0,98, ale jak je vidět z Obr. 5-12 má již kapacitní charakter (farma odebírá jalový výkon ze sítě). Nicméně by se dalo říci, že jde o žádoucí stav, protože se tím kompenzuje další nežádoucí zvyšování napětí v předávacím místě.



Obr. 5-10 Závislost účinníku na činném výkonu [14]



Obr. 5-11 Závislost účinníku na činném výkonu při malé dodávce [14]



Obr. 5-12 Úhel vektoru zdánlivého výkonu v závislosti na P [14]

5.4 Soudobost výroby

Pokud posuzujeme vliv rozptýlené výroby na regulaci napětí, jalových výkonů a vůbec zatěžování ES obecně, je důležité brát v potaz také soudobost výroby. Soudobostí výroby rozumíme to, jak velká je dodávka elektrické energie v daný okamžik pro určitou lokalitu. Nicméně se může stát, že např. rozsáhlá oblačnost bude ovlivňovat soudobost výroby FVE na celém území ČR. Soudobost výroby je nutné zohledňovat zejména v lokalitách s vysokou koncentrací zdrojů s proměnlivou výrobou. To se týká například severního Německa, kde je velká koncentrace VtE, a při silně větrném počasí může docházet k přetokům energie, které mohou nepříznivě ovlivňovat i českou přenosovou soustavu.

5.5 Rozvoj ES

Vzhledem ke stále narůstajícím nárokům na dodávku elektrické energie je nezbytné pracovat na rozvoji ES. Pro maximální využitelnost energie je nezbytný rozvoj všech oblastí energetiky od výroby, přenosu, distribuce až po spotřebu elektrické energie. V následující části práce jsou stručně popsány nejpravděpodobnější oblasti budoucího rozvoje ES.

5.5.1 Zásobníky elektrické energie

Pro budoucí rozvoj ES má možnost akumulace elektrické energie zásadní význam. Potřeba akumulace elektrické energie vychází z jednoduché úvahy a to, že ne vždy jsme schopni právě vyrobenou elektrickou energii spotřebovat. Ano, je pravda, že prakticky veškerou výrobu elektrické energie jsme dnes schopni regulovat. Ovšem regulace bývá často spojená se zbytečnými ztrátami (energetickými i ekonomickými) a dalo by se tak v jistém slova smyslu hovořit přímo o plýtvání. Akumulace elektrické energie s sebou přináší celou řadu možných využití:

- získání výkonové rezervy pro zajištění podpůrných a z nich vytvářených systémových služeb
- umožnění výroby i v obdobích, kdy není dostatečná poptávka
- protiváha z různých důvodů problematicky regulovatelných zdrojů
- doplnění zdroje nebo skupiny zdrojů s nepravidelnou výrobou
- překrytí přechodových stavů – výpadek napájení z nadřazení sítě či výpadek lokálního zdroje či zdrojů a následné spuštění jiných
- krátkodobé a střednědobé vyrovnání diagramu výroby
- krátkodobé a střednědobé vyrovnání výkonové bilance oblasti
- zajištění zdroje pro funkci napájení v krizových situacích

Zásobníky elektrické energie rozdělujeme podle způsobu ukládání energie na:

- Přímé - ukládá se přímo elektrická případně elektromagnetická energie
- Nepřímé - elektrická energie je transformována do jiné formy energie

Zásobníky se dále dělí podle kapacity (malé, střední, velké) a doby uchování akumulované energie (od sekund po dny). Další rozdíl se nachází ve způsobu udržení akumulované energie.

Podle tohoto kritéria rozdělujeme akumulátory na:

- pasivní - pro udržení úrovně akumulované energie není třeba žádné další energie, prakticky nedochází k degradaci úrovně akumulované energie v čase,
- aktivní - pro udržení úrovně akumulované energie je třeba spotřebovat další energii (vlastní či externí).

Formy ukládání energie

Tepelná energie

- klasické či přírodní materiály – pevné materiály, slané roztoky
- moderní materiály a technologie – roztavená sůl, eutektické systémy

Mechanická energie

- kinetická – setrvačníky
- potenciální – přečerpávací vodní elektrárny
- tlaková – akumulace stlačeného vzduchu

Elektrická energie

- kondenzátory
- supravodivé technologie

Elektromechanická energie

- klasické akumulátory – různý systém elektrolytů a elektrod
- elektrochemické palivové články – akumulace s „tekoucím“ elektrolytem
- palivové články

Chemická energie

- vodík
- biopaliva

Využití akumulačních prvků je v současné době limitováno zejména prozatím vysokou ekonomickou náročností. [20]

5.5.2 Smart Grids

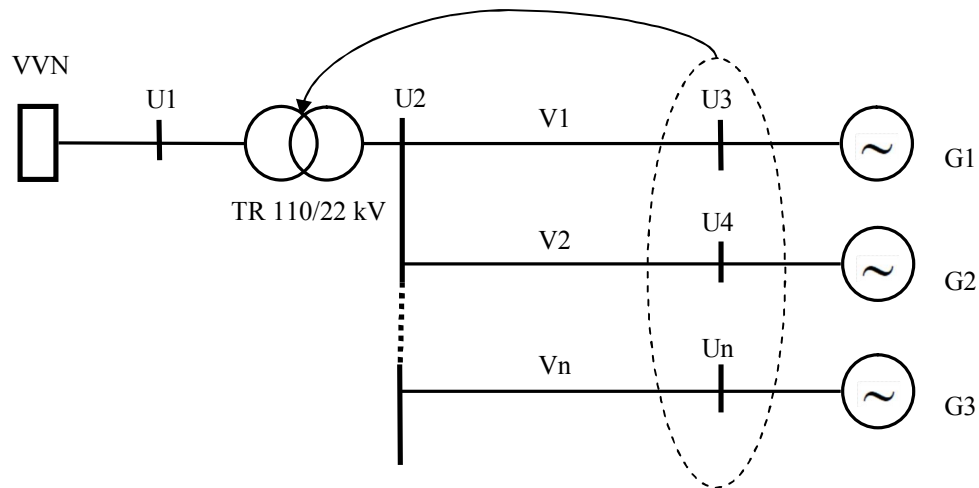
Smart Grids (SG) představuje spojení dvou anglických slov. Smart znamená v překladu chytrý (důmyslný) a Grid se překládá jako označení pro síť nebo obecně pro systém sloužící k distribuci elektrické energie. Proto se v ČR vžilo používání termínu „chytré sítě“. Koncept SG zahrnuje všechny oblasti energetiky – výrobu, distribuci i spotřebu. Na SG můžeme pohlížet jako na spojení komunikačních a elektrických sítí, které umožňují řídit a regulovat elektrickou energii v reálném čase tak, aby byla zajištěna efektivní, ekonomická a bezpečná dodávka elektrické energie. Jejím principem je interaktivní obousměrná komunikace mezi výrobními zdroji a spotřebiteli o aktuálních možnostech výroby a spotřeby energie. Koncepce SG zahrnuje digitální kontrolní a řídicí systém, integrované senzory monitorující chování sítě a automatické obnovování provozu po poruše. K důležitým prvkům patří i dostupnost informací v reálném čase o zatížení sítě, kvalitě dodávky, přerušení apod.

Hlavní body konceptu Smart Grids

- efektivní přenos elektrické energie na dlouhé vzdálenosti
- zlepšení integrace OZE
- integrace zásobníků elektrické energie
- využívání elektromobilů
- zvýšení spolehlivosti sítě
- efektivní řízení toků v ES

Využití chytrých sítí pro řízení napětí

V sítích vn se doposud měří napětí pouze v rozvodně (na výstupu transformátoru 110/22kV nebo na vývodu 22 kV z rozvodny), napětí na konci vn vývodů se neměří. S nasazováním rozptýlené výroby do DS bývá však napětí na koncích vedení vn vyšší než v rozvodně. Regulace na hodnotu napětí na výstupu z transformátoru 110/22kV proto začíná být nedostatečná, a tak se při využití konceptu SG nabízí možnost využití dat z výroben instalovaných v průběhu nebo na koncích vn vývodů (případně doplnit síť vn chytrými elektroměry „smart meter“ s dálkový přenosem do rozvodny 22kV a využít je při regulaci napětí na výstupu z transformátoru 110/22kV). Koncept tohoto řízení naznačuje Obr. 5-13, kde je zřejmé, že se nereguluje dle hodnoty na výstupu transformátoru v uzlu U2, ale dle hodnot v uzlech U3, U4 až Un. Obdobně je tento princip využitelný v sítích nn. [19]



Obr. 5-13 Princip využití Smart Grids pro regulaci napětí v síti vn

6 Metody modelování provozních stavů rozptýlených zdrojů energie v DS

Začátek této kapitoly je věnován charakteristice a významu modelování v oblasti elektroenergetiky. Poté jsou zde uvedeny různé provozní stavy v ES, které se mohou za pomoci modelování soustavy řešit. Další část popisuje princip matematického modelování spolu se základními modelovacími metodami. Pro získání věrohodných výsledků na výstupu modelovacích procesů je nezbytná kvalita vstupních dat, proto je zde věnována pozornost i oblasti měření. V závěru jsou pak uvedeny nejčastěji používané modelovací programy pro potřeby elektroenergetiky.

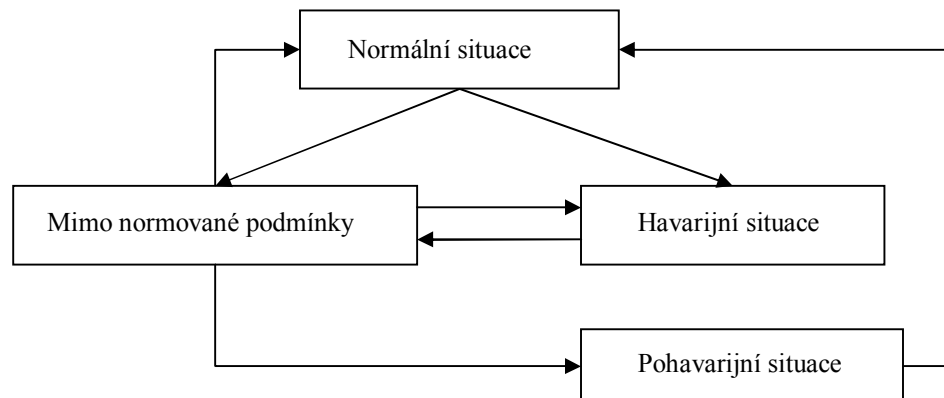
6.1 Charakteristika modelování

Obecně lze modelování chápat jako snaha o popsání určitého reálného prvku nebo systému pomocí matematicko-fyzikální analýzy. Základem každého modelování je dokonalá znalost vlastností reálného systému, který se chystáme modelovat. Cílem modelování je snaha o dosažení co největší shody mezi výstupem z reálného systému a výstupem z modelu. Modelování se využívá ve všech odvětvích lidské činnosti. K jeho hlavním výhodám patří možnost posuzovat a predikovat průběh procesu bez nutnosti provozních experimentů.

Pro oblast energetiky má modelování vzhledem k narůstajícímu počtu připojovaných zařízení do ES zcela zásadní význam. V dnešní době by provozování ES bez schopnosti modelovat chování sítě při různých stavech ani nebylo možné. Při rozsáhlosti ES a vědomí toho, že se jednotlivé prvky v soustavě vzájemně ovlivňují, je složitost výpočtového řešení stavu soustavy taková, že je využití modelování naprostou nezbytností.

6.2 Provozní stavy v ES

Provozní stavy popisují aktuální stav, ve kterém se elektrizační soustava nachází. Rozeznáváme čtyři základní kategorie provozních stavů, které jsou uvedeny na Obr. 6-1.



Obr. 6-1 Kategorie provozních stavů v ES

1. Normální stav – běžný provozní stav nevybočující ze jmenovitých hodnot. Frekvence, systémová odchylka, zkratová odolnost i zatížení linek jsou v dovolených mezích. Při monitorování odchylek od provozních hodnot se reaguje aktivací podpůrných služeb.
2. Výstražný stav (Mimo normované podmínky) – parametry soustavy se dostávají mimo toleranční pásma (f , U), přijímá se opatření provozního charakteru s cílem obnovy normálního stavu.
3. Havarijní stav (stav nouze) – hrozí rozpad soustavy. Používají se speciální postupy pro navrácení soustavy do normálního stavu v co možná nejkratší době. Tyto postupy zahrnují omezení spotřeby, omezení mezinárodních dodávek/odběrů, start ze tmy elektrárenských bloků a re-synchronizaci částí soustavy v ostrovním provozu.

Výše uvedené kategorie představují obecný popis možných provozních stavů, které mohou nastat v ES. Provozní stavy však můžeme dále detailněji popisovat. Tyto stavy zahrnují např. rozběhy motorů, rekonfigurace sítě, připínání zátěží, spínání a odpínání spínacích prvků, ostrovní provozy, kolísání výroby apod. Výpočty zohledňující uvedené situace primárně rozdělujeme na výpočty statického charakteru a výpočty dynamického charakteru. Důvodem provádění těchto výpočtů je zajištění bezpečného provozu ES.

Výpočty statického charakteru

Výpočty napěťových a proudových poměrů sítě v ustáleném stavu. Například se jedná o následující výpočty:

- zkratové poměry

- připojitelnost zátěže
- amplitudy a úhly napětí v uzlech
- proudy a výkony ve větvích
- flickr
- zkratová impedance
- úbytky a změny napětí

Výpočty dynamického charakteru

Dynamické výpočty se používají pro zjišťování časových průběhů přechodových dějů. Mezi takovéto výpočty se řadí:

- výpočty elektromagnetických jevů
- výpočty elektromechanických přechodných jevů
- výpočty střednědobé a dlouhodobé dynamiky

6.3 Matematické modelování

Matematickým modelem procesu nebo zařízení rozumíme matematické vztahy mezi veličinami, jež proces popisují. Matematickými vztahy jsou lineární rovnice, nelineární rovnice, diferenciální rovnice nebo jejich soustavy. Matematické modely dělíme podle způsobu vytváření na:

- modely získané fyzikální analýzou procesu – deduktivní,
- modely získané zpracováním experimentu – induktivní.

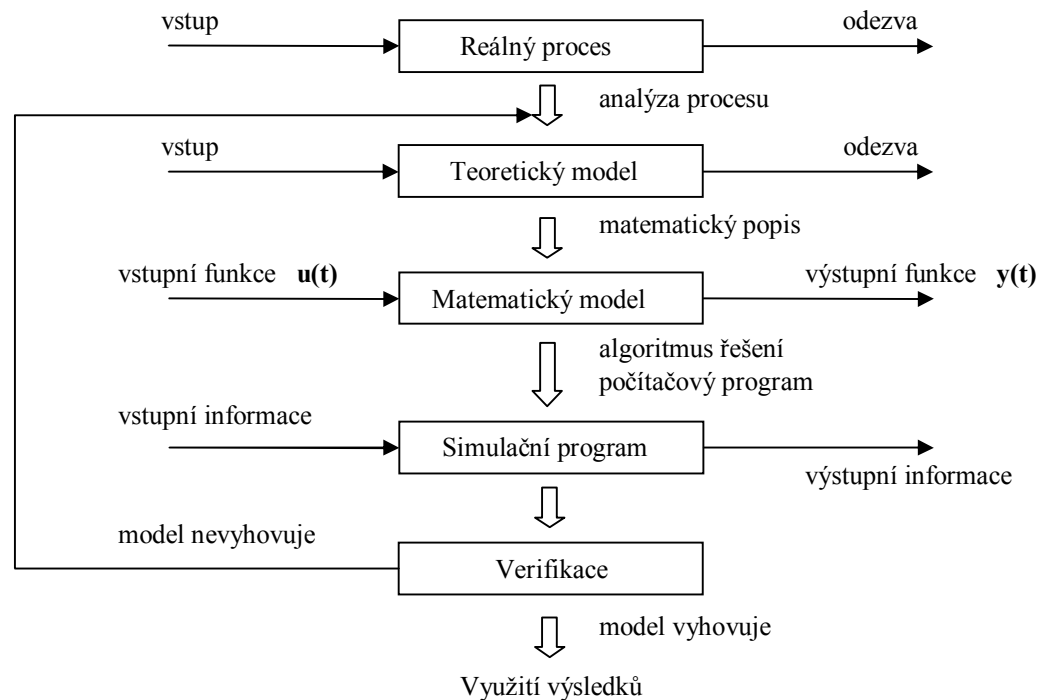
Induktivní modely předpokládají, že chování modelovaného systému je popsáno určitými předem vybranými matematickými vztahy, které obsahují parametry neznámých hodnot. Výhodou těchto modelů je jednodušší tvorba, nicméně je jejich použití omezeno pouze na oblasti pokryté experimentálními daty, na jejichž základě byly vytvořeny.

Deduktivní modely jsou odvozovány fyzikální a fyzikálně-chemickou analýzou podstaty děje a z ní vycházejícího matematického popisu. Použitelnost takového modelu je omezována pouze oblastí platnosti použitých zákonů. [17]

6.3.1 Postup vytváření deduktivních matematických modelů

Při tomto přístupu se vychází ze skutečnosti, že systém, který chceme matematicky popsat, se řídí dle určitých zákonů, které mají své matematické vyjádření. Úplný popis systému bývá často nerealizovatelný, protože vlivy na něj působící do všech podrobností

neznáme. Model se tak obvykle snaží především vystihnout podstatné vlastnosti a chování systému. Výsledná použitelnost modelu vychází především z posouzení jeho souhlasu s realitou. Obecný postup vytváření deduktivního modelu je na Obr. 6-2.



Obr. 6-2 Obecný postup vytváření deduktivního matematického modelu

První fází při vytváření deduktivního modelu je analýza reálného procesu, která zahrnuje následující úkony:

- specifikace dějů probíhajících v procesu
- vymezení vlivů, které na proces působí
- určení veličin
- výběr dílčích podstatných dějů a vlivů

Výsledkem tohoto postupu je zjednodušená představa o reálném procesu – teoretický model. V teoretickém modelu se doporučuje provést zjednodušení některých vztahů. Na jeho základě následně sestavujeme matematický popis procesu. K tomu je zapotřebí několik dalších kroků:

- výběr matematického popisu fyzikálních a fyzikálně-chemických zákonitostí použitých v teoretickém modelu,
- vytvoření modelových rovnic,
- určení podmínek řešení (počáteční, okrajové podmínky pro řešení diferenciálních rovnic).

Třetí fází je vytvoření simulačního programu, proto je potřeba provést následující kroky:

- volba metody řešení modelových rovnic,
- zpracování modelových rovnic (nalezení vhodného algoritmu řešení),
- sestavení výpočetního programu.

Poslední krok představuje tzv. verifikace modelu (ověření), tento krok zpravidla probíhá otestováním modelu na konkrétním příkladu s následným posouzením přesnosti a vhodnosti modelu pro daný účel.

6.3.2 Bilanční matematické modely

S bilančními rovnicemi jsou spojeny zejména procesy, jejichž podstatou je transport hmoty nebo energie, popřípadě jejich přeměna. Při vytváření matematického modelu je nutné si uvědomit, že vstupem se rozumí přítok energie a výstupem odtok energie ze systému. Bilancovaným systémem se rozumí určitá oblast s definovanými hranicemi (rozhraním) s okolím. Důležitým pojmem je bilanční časový interval, tedy časový úsek, po který bilancované veličiny sledujeme. Základní bilanční rovnice má tvar:

$$\text{Akumulace} = \text{Vstup} - \text{Výstup} + \text{Zdroj}. \quad (6-1)$$

Vstup – množství bilancované veličiny, které za bilanční časový interval vstoupí do systému.

Výstup – množství bilancované veličiny, které za bilanční časový interval vystoupí ze systému.

Zdroj – množství bilancované veličiny, která za bilanční časový interval uvnitř systému vznikne. Rozumí se tím jiné, nebilancované veličiny (vznik např. při chemické reakci, skupenské přeměně).

Akumulace – změna množství bilancované veličiny uvnitř systému, ke které dojde za bilanční časový úsek.

6.4 Modelovací metody

Při posuzování různých provozních stavů RZ a jejich možných zpětných vlivů na DS používáme zpravidla dvě základní metody modelování. První z nich je tzv. **metoda výpočtová**. Tato metoda vychází z matematického popsání sítě s charakteristickými vstupy, mezi něž patří např. délka vedení, jeho měrný odpor, reaktance, zkratový výkon sítě, transformátory zahrnující zkratový výkon, výkony v uzlech apod. Výstupními hodnotami pak mohou být maximální možný připojitelný výkon, k němu vztažené změny napětí, proudy harmonických atd. Mezi nejznámější numerické metody pro řešení chodu soustavy patří Gauss-Seidlova a Newton-Rapsonova metoda. Jedná se o iterační výpočtové metody, které umožňují řešení soustav lineárních rovnic pomocí postupného přibližování k řešení. Pro řešení výpočtů v jednoduché síti si lze vytvořit výpočetní algoritmus například i za použití

jednoduchého tabulkového editoru jako je MS Excel. Už takto vytvořený model složený z rovnic, kdy výsledek jedné je vstupem pro další, se dá považovat za triviální simulaci. Simulací (pro účely matematického modelování) rozumíme řešení rovnic matematického modelu, přičemž měníme podle potřeby hodnoty vstupních veličin a sledujeme jejich vliv na hodnoty výstupních veličin. Takovéto řešení je však realizovatelné jen pro opravdu jednoduché konfigurace sítě s omezeným počtem zdrojů, navíc úpravy v již takto sestaveném modelu jsou velice problematické a náročné vzhledem k nepřehlednosti jednotlivých vazeb.

Tímto se dostáváme k pokročilejší metodě modelování, kterou je modelování sítí za pomoci **simulačních programů**. Simulační programy vycházejí z výpočtových metod, nicméně představují daleko sofistikovanější nástroj pro řešení komplikovaných struktur ES, bez něhož se při řešení provozních stavů v DS není možné obejít. Simulační programy jsou schopny svými výpočty pokrýt velkou variabilitu provozních stavů i vysoké počty zdrojů, dále tyto programy umožňují rychlou a snadnou přeparametrizaci nebo rekonfiguraci řešené soustavy. Simulační programy bývají vybaveny grafickými editory, díky nimž bývá snadné vytvořit model řešené sítě se všemi jejími prvky. Specializované simulační programy již také mají implementovány různé výpočetní algoritmy, stejně tak jako obsahují modely základních prvků používaných v ES. Tyto modely jsou v programu vytvořeny opět pomocí matematického popisu náhradních schémat jednotlivých prvků (transformátory, generátory, vedení). Některé simulační programy umožňují pomocí matematických rovnic vytvářet vlastní modely, ze kterých je pak možné sestavovat řešenou soustavu. Takovéto vytváření vlastních modelů je sice velice náročné, nicméně se tím uživateli nabízí možnost simulace prakticky jakéhokoliv stavu systému při zohlednění požadovaných faktorů. Záleží tak jen na schopnostech uživatele, jak tyto možnosti dokáže využít. [17]

6.1 Sběr dat pro potřeby modelování

Smysluplné využívání modelování při posuzování provozních stavů v DS je podmíněno kvalitním přísunem dat. Těmito daty se nemyslí jen parametry vedení, transformátorů a dalších prvků ES. Dalšími potřebnými daty pro simulace provozních stavů jsou naměřené hodnoty z reálného provozu ES. Měření jsou v současnosti prováděna zejména v rozvodnách a důležitých uzlech soustavy za pomoci elektroměrů, měřících transformátorů napětí a měřících transformátorů proudu. Naměřená data z rozvoen se přenáší po optických sítích do řídicího centra. Kvalitní monitoring celého systému je nutnou podmínkou pro zajištění bezpečnosti a spolehlivosti provozu ES. Pokud se bavíme o využití naměřených hodnot pro účely simulací, které jsou prováděny v dispečerském řídicím systému, musíme zmínit důležitý

pojem stavové estimace. Stavovou estimací chápeme aplikaci zajišťující odhad stavu soustavy. Na základě vstupních údajů získaných sběrem dat (naměřené toky výkonů, napětí, proudy) se určí nejpravděpodobnější hodnoty veličin a stavy prvků v soustavě. Takto estimované hodnoty se pak používají jako vstupní údaje pro simulační nebo kontrolní výpočty v dispečerském řídicím systému.

Vzhledem k plánovanému budování chytrých sítí bude nutné v budoucnu rozšířit infrastrukturu monitorovacích zařízení v ES, a to z důvodu, že koncepce chytrých sítí je založena především na vzájemné komunikaci jednotlivých složek ES. V distribučních sítích bude nutné dovybavit distribuční transformovny zařízením pro dálkové monitorování, řízení a indikací poruchových stavů. Do distribučních trafostanic ale často nejsou přivedeny žádné komunikační kanály. Proto se už dnes některé společnosti zaměřily na vývoj jednotek s funkcí měření proudů a napětí, umožňující dálkový přenos dat do dispečinku s využitím sítě mobilního operátora. Jednou z nich je například firma Elvac IPC, která uvedla na trh řadu jednotek RTU. Tyto jednotky jsou primárně vyvinuty k řízení distribuční sítě a regulaci toků výkonu. Již dnes se uplatňují zejména v úlohách dispečerského řízení obnovitelných zdrojů energie.

Problematika měření v ES je však sama o sobě dosti rozsáhlá a není předmětem této diplomové práce. Nicméně vzhledem k potřebě vstupních dat pro modelování elektrických sítí jsem považoval za nutnost tuto oblast elektroenergetiky alespoň zmínit.

6.2 Simulační programy využívané v elektroenergetice

Níže jsou uvedeny a stručně popsány simulační programy, které umožňující modelování různých provozních stavů rozptýlené výroby v DS.

E-Vlivy

Program E-Vlivy je určen pro modelování vlivu připojovaných zařízení na úroveň a změnu sledovaných parametrů kvality elektrické energie v sítích nn a vn. Pro výpočet chodu sítě v ustáleném stavu se v programu používá implementovaných metod uzlových napětí, Newtonova iterační metoda a Gauss-Seidelova iterační metoda. Program E-Vlivy umožňuje modelovat rozsáhlé, zauzlené a paralelně provozované sítě. Program se používá převážně pro následující výpočty:

- chod sítě
- připojitelnost zátěže
- zkratové poměry

- rozložení napětí před a po připojení posuzované zátěže
- ztráty v síti
- flickr pro uzly sítě

[33]

ATP-EMTP

ATP-EMTP představuje univerzální systém pro simulaci přechodových dějů se zaměřením na elektromagnetické a elektromechanické děje. Program se používá především k simulaci spínacích a přepět'ových procesů, modelování elektrických ochran a k posuzování kvality elektrické energie. Pomocí ATP-EMTP lze řešit komplikované a rozsáhlé elektrické sítě. Důležitým rozšiřujícím nástrojem pro ATP-EMTP je program ATP Draw, což je grafické rozhraní vytvářející interaktivní nadstavbu původně textového rozhraní. Díky této nadstavbě je z modelů vytvořených v grafickém rozhraní výsledný zdrojový kód pro výpočet generován automaticky.[34]

Simulink

Simulink je nadstavba výpočetního programu Matlab. Simulink je program pro simulaci a modelování dynamických systémů, který využívá algoritmy Matlabu pro numerické řešení nelineárních diferenciálních rovnic. Díky rozsáhlým knihovnám a grafickému rozhraní lze snadno vytvářet modely dynamických soustav. Velkou výhodou programu je možnost vytváření vlastních modelů na základě jeho popisu diferenciálními rovnicemi. Pro modelování vlastních prvků je však nezbytné ovládat proceduru matematicko-fyzikální analýzy pro převod chování dynamiky systémů do zmiňovaných diferenciálních rovnic. Speciálně pro potřeby energetiky je k dispozici ještě nadstavba s názvem SimPowerSystems, která umožňuje modelovat výrobu, přenos, distribuci a spotřebu elektrické energie. Knihovny SimPowerSystems obsahují řadu prvků běžně užívaných v energetických soustavách, jako jsou třífázové stroje, elektrické pohony nebo prvky větrných elektráren.

Dynast

Simulační program Dynast, vyvíjený od konce sedmdesátých let na ČVUT Praha, reprezentuje modelovaný objekt pomocí kombinace matematických algebrodiferenciálních vztahů. Program pracuje se schémata řídicích bloků podobně jako systému SIMULINK. To dává kreativě uživatele vysokou volnost v přístupu k problematice a vytváří podmínky pro využití v mnoha oborech. Multipólová schémata, která jsou základní technologií modelování, zcela kopírují principiální charakter reálného systému. Sestavení modelu je tedy možné bez

pracného vytváření diferenciálních matematických vztahů. Schémata těchto prvků lze pro zvýšení přehlednosti kombinovat do hierarchické struktury a vytvářet jejich knihovny. [34]

Modes

Historie programu Modes sahá do počátku 80. let a stejně jako program Dynast byl vyvíjen na ČVUT Prahu. Tento program je určen pro výpočet přechodových dějů (dynamickou simulaci) v elektrizační soustavě. S jeho pomocí je možné modelovat:

- krátkodobou dynamiku generátorů při poruchách typu zkratu,
- střednědobou dynamiku související s činností primární regulace,
- dlouhodobou dynamiku související s činností sekundární regulace,
- dynamiku asynchronních motorů při spouštění a samonajíždění,
- statickou stabilitu – jako odezvu soustavy na malé změny stavových veličin. [35]

Neplan

Program Neplan se používá k plánování, optimalizaci a řízení energetických sítí. Je v něm možné řešit veškeré napěťové soustavy s jakýmkoliv počtem uzlů, které mohou být rychle a interaktivně vkládány, přepočítány a vyhodnoceny. Vytvoření databází prvků je možné prostřednictvím grafického rozhraní nebo tabulkami. Jednopolová schémata se vytvářejí v uživatelsky příjemném prostředí CAD systémů. Program navíc podporuje technologii OLE (Object Linking and Embedding), jež umožňuje použití dat a grafiky z a od jiných systémů (např. MS Excel a Word). Program nachází uplatnění v celé řadě případů, jako např.:

- analýza toků výkonů
- analýza zkratů
- modelování dynamické stability
- analýza napěťové nestability
- analýza harmonických
- optimalizace sítě
- optimalizace toku výkonu
- výpočty pro aplikace s větrnými elektrárnami

[36]

Závěr

V první řadě bych chtěl říci, že tuto diplomovou práci jsem si vybral z důvodu zájmu o oblast rozptýlených zdrojů energie. Především jsem chtěl využít možnosti podrobného prostudování problematiky týkající se začleňování a provozování rozptýlených zdrojů energie v distribuční soustavě k vytvoření vlastního názoru na často diskutovaná témata jako je např. stabilita elektrizační soustavy.

Úvodní kapitolu diplomové práce jsem věnoval vypracování uceleného přehledu obnovitelných zdrojů energie provozovaných v České republice, možnostem jejich využití a fyzikálním principům přeměn energie. Dále jsem na základě dohledaných dat uvedl vývoj instalovaného výkonu v České republice se zohledněním podílu na výrobě jednotlivých druhů výroben.

V dalších kapitolách práce jsem po prostudování dokumentu „Pravidla provozování distribuční soustavy – Příloha č.4“ vyhodnotil a zpracoval základní podmínky začleňování rozptýlených zdrojů elektrické energie do distribučních sítí, spolu s hledisky jejich provozu.

Velkou část práce jsem poté věnoval diskutování problému zpětných vlivů rozptýlené výroby na distribuční síť, konkrétně jsem se zaměřil na regulaci napětí a jalových výkonů v distribuční síti. Důkladným prozkoumáním dané problematiky v odborných člancích z energetických konferencí a dalších pramenů, nevyjímaje měření, jsem popsal hlavní rizika spojená s rozptýlenou výrobou a pokusil se navrhnout některá řešení pro jejich minimalizaci.

V poslední kapitole jsem posoudil význam modelování provozu rozptýlených zdrojů energie v distribuční síti. Vysvětlil jsem principy vytváření modelovacích metod a uvedl data nezbytná pro simulační procesy. Dále jsem v závěru této kapitoly zpracoval přehled simulačních programů využívaných v elektroenergetice.

Na základě poznatků, získaných z odborných materiálů použitých při zpracování této práce a z nich vyvozených faktů v jednotlivých kapitolách usuzuji, že v současné době, i vzhledem k nově nastoleným požadavkům pro dispečerské řízení obnovitelných zdrojů energie, není stabilita elektrizační soustavy České republiky ohrožena působením rozptýlené výroby provozované na území České republiky. Jinou kapitolu tvoří přetoky elektrické energie přes přenosovou soustavu České republiky způsobené zahraniční výrobou z obnovitelných zdrojů energie. Přestože se domnívám, že i v budoucnu budou hrát hlavní roli pro pokrývání spotřeby elektrické energie České republiky tepelné a jaderná elektrárny, je pro mě rozptýlená výroba zajímavou oblastí, která prochází dynamickým rozvojem, a skýtá velký potenciál jak v oblasti výzkumu samotných výroben, tak v oblastech s ní spojené (viz chytré sítě). I proto bych se rád ve své budoucí kariéře touto problematikou dále zabýval.

Použitá literatura

Knihy, odborné články a ostatní

- [1] Kolektiv autorů: Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice, vydal ČEZ, Praha 2007
- [2] Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č.7/2011
- [3] Ing. Jaroslav Lukáš: Roční zpráva o provozu ES ČR 2010, ERÚ 2011
- [4] Frank J. Bartos, P.E.: Nový vítr pro výrobu energie a řízení, časopis Control Engineering, 2009
- [8] Ing. František Žák: Provoz fotovoltaických elektráren připojených do distribuční sítě, přednáška na ZČU, 2011
- [9] Zákon č. 180/2005 Sb.
- [10] Zpráva o plnění indikativního cíle výroby elektřiny z OZE za rok 2010, Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2011
- [11] Mgr. Jiří Přikryl, Mgr. Pavla Cinková: Vývoj větrné energetiky ke konci roku 2010, článek z časopisu Energie 21., 2011
- [12] Fred Wien: Rozptýlená výroba a obnovitelné zdroje – Větrná energie, KEMA Nederland B.V., 2006 (autoři překladu: Josef Gavlas, Pavel Santarius, Petr Krejčí, FEI Technická univerzita Ostrava, 2007)
- [13] PPDS 2011, Příloha č. 4 – Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy
- [14] Vladimír Velek: Farma Kryštofovy Hamry – Ovlivňování napětí v předávacím místě a změny účinníku při provozu farmy; Konference ČK CIRED 2009
- [15] Jaroslav Doležal, Karel Winter; Regulace napětí a jalového výkonu – současnost a trendy; Konference Elektroenergetika 2000
- [16] Ing. Vladimír Korenc, Dr. Ing. Tomáš Bůbela; Problematika regulace jalového výkonu u fotovoltaických elektráren; Odborný článek firmy ELCOM, a.s., 2012
- [17] doc. Ing. Miloš Kmínek, CSc.: Matematické modelování technologických procesů a jeho využití k řízení; magazín Automatizace; 2007
- [18] Ing. Vladimír Velek: Zdroje se stochastickým charakterem výroby a jejich vliv na podpůrné a systémové služby; Konference ČK CIRED 2010
- [19] Ing. Martin Kašpírek, Ph.D.: Dopad OZE na provoz distribučních nn sítí; Konference ČK CIRED 2011
- [20] Ing. Jiří Roubal: Zásobníky elektrické energie; Konference ČK CIRED 2010

Webové zdroje

- [21] <http://aplikace.mvcr.cz/archiv2008/sbirka/1992/sb004-92.pdf>, Sbírka zákonů
- [22] <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/spoluspalovani-biomasy-v-kotlich-elektrarny-kladno>
- [23] <http://www.alternativni-zdroje.cz/vyroba-energie-biomasa.htm>
- [24] <http://www.energetickyporadce.cz/obnovitelne-zdroje/energie-biomasy.html>
- [25] <http://www.cez.cz>
- [26] <http://www.vodniturbiny.cz>
- [27] <http://www.csve.cz>
- [28] http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=38355
- [29] <http://www.alternativni-zdroje.cz/slunecni-solarni-elektrarny.htm>
- [30] <http://ekolist.cz/cz/publicistika/nazory-a-komentare/miroslav-zajicek-fotovoltacko-boom-v-cr-rokem-2010-ve-stavajicim-rozsahu-konci-ovsem-se-stovkami-miliard-budoucich-nakladu>
- [31] <http://www.solartechnika.sk>
- [32] <http://www.elcom.cz>
- [33] <http://www.egc-cb.cz>
- [34] <http://www.ceskaenergetika.cz>
- [35] <http://www.modesinfo.com>
- [36] <http://www02.abb.com>
- [37] <http://www.eru.cz>
- [38] <http://www.ge-energy.com>
- [39] <http://www.pvsolarchina.com>
- [40] <http://www.ceps.cz>

Přílohy

Seznam příloh

Příloha A – Principiální schémata vodních turbín

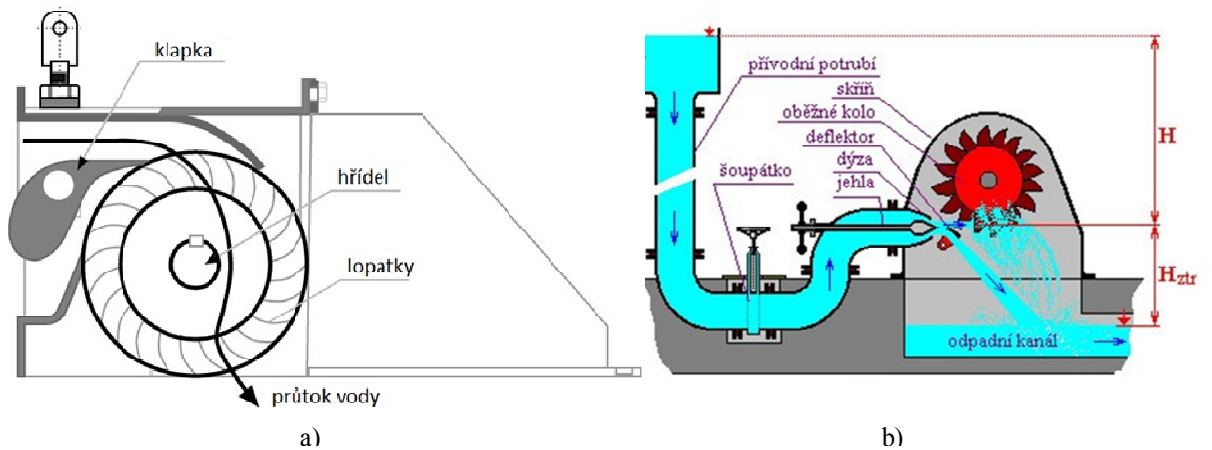
Příloha B – Oblasti použití vodních turbín

Příloha C – Tabulky přípustných vztažných proudů pro sítě nn a vn

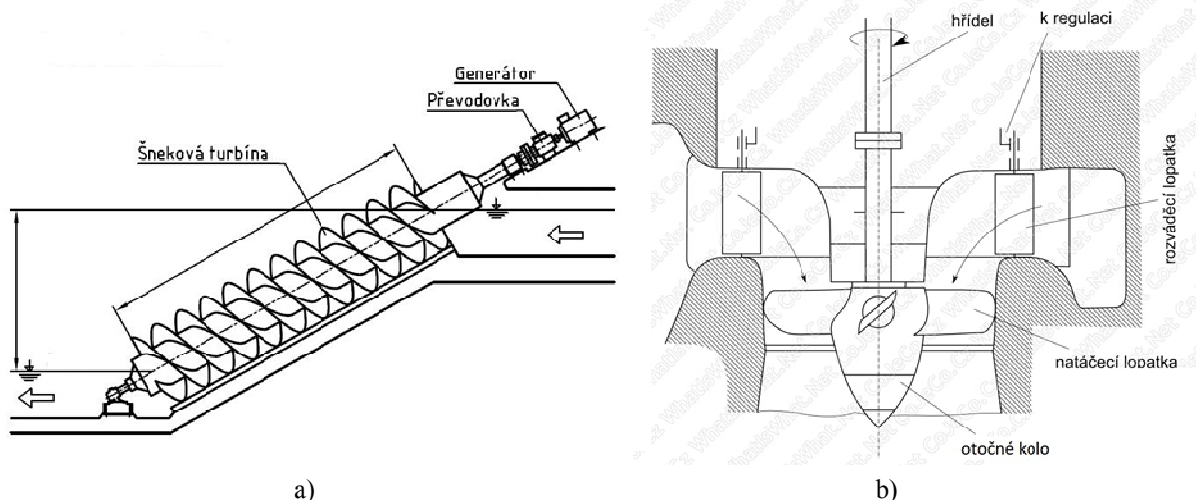
Příloha D – Příklady připojení výroben

Příloha E – Schéma zapojení VtE farmy Kryštofovy Hamry do soustavy 110 kV

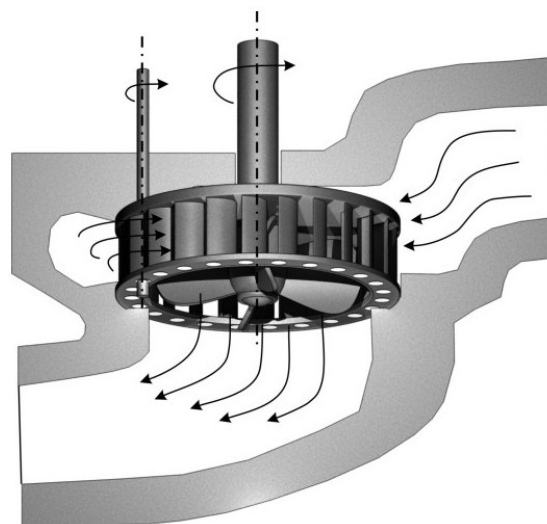
Příloha A



Obrázek 1 a) Bánkiho turbína (zdroj cs.wikipedia.org), b) Peltonova turbína (zdroj www.mve.energetika.cz)

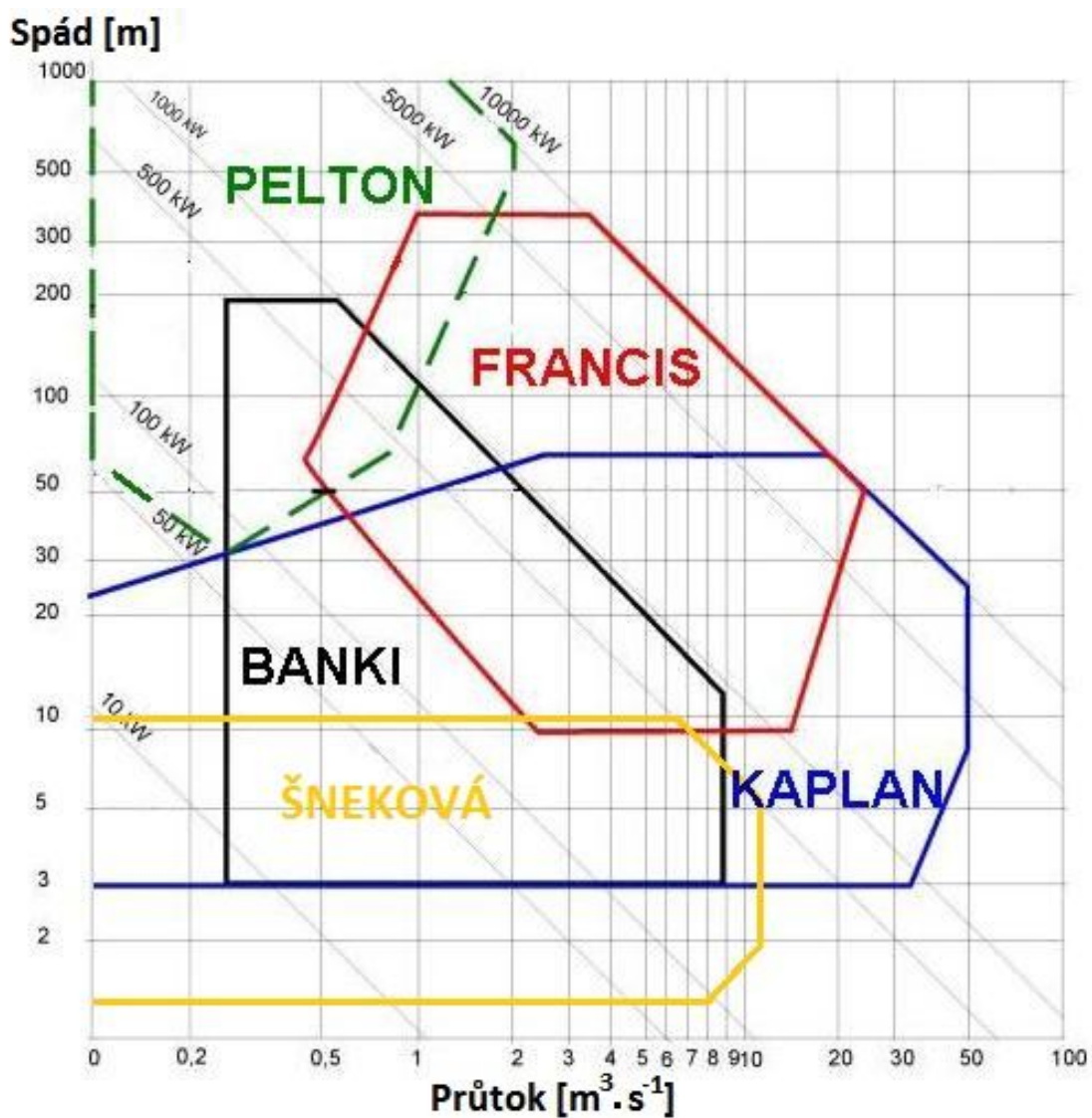


Obrázek 2 a) Šneková turbína (zdroj www.vodni-elektrárny.cz), b) Kaplanova turbína (zdroj www.cojeco.cz)



Obrázek 3 Francisova turbína (zdroj www.zielonaenergia.eco.pl)

Příloha B

Obrázek 4 Oblasti použití vodních turbín (zdroj www.inforse.org)

Příloha C

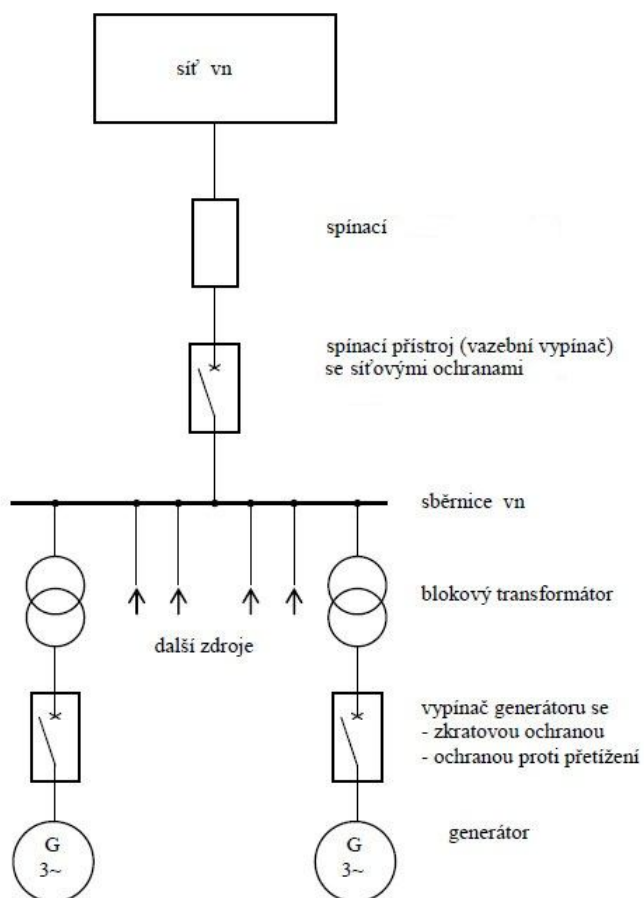
| Řád harmonických v, μ | Přípustný vztažný proud $i_{v,\mu}$ [A/MVA] |
|---|---|
| 3 | 3 |
| 5 | 1,5 |
| 7 | 1 |
| 9 | 0,7 |
| 11 | 0,5 |
| 13 | 0,4 |
| 17 | 0,3 |
| 19 | 0,25 |
| 23 | 0,2 |
| 25 | 0,15 |
| $25 < v < 40$ | $0,15 * 25/v$ |
| $\mu < 40^a$ | $0,15 * 25/v$ |
| sudé | $1,5/v$ |
| $\mu < 40$ | $1,5/v$ |
| $42 < \mu, v < 178^b$ | $4,5/v$ |
| a - liché | |
| b - celočíselné a neceločíselné v pásmu šířky 200 Hz od střední frekvence | |

Tab. 1 Přípustné vztažné proudy v sítích nn

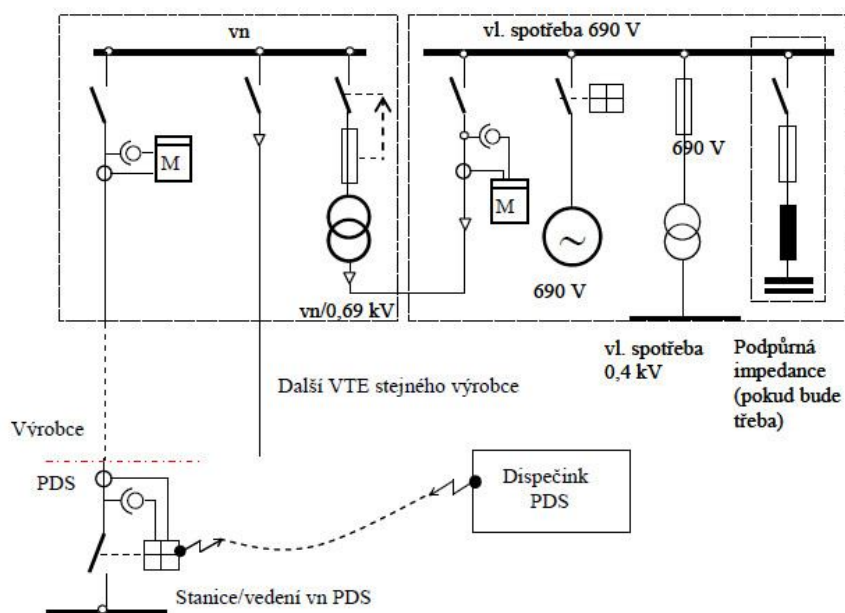
| Řád harmonické μ, v | Přípustný vztažný proud $i_{u, v \text{ př}}$ [A/MVA] | | |
|----------------------------|---|------------|-------------|
| | síť 10 kV | 22 kV | 35 kV |
| 5 | 0,115 | 0,058 | 0,033 |
| 7 | 0,082 | 0,041 | 0,023 |
| 11 | 0,052 | 0,026 | 0,015 |
| 13 | 0,038 | 0,019 | 0,011 |
| 17 | 0,022 | 0,011 | 0,006 |
| 19 | 0,016 | 0,009 | 0,005 |
| 23 | 0,012 | 0,006 | 0,003 |
| 25 | 0,01 | 0,005 | 0,003 |
| >25 nebo sudé | $0,06/v$ | $0,03/v$ | $0,017/v$ |
| $\mu < 40$ | $0,06/\mu$ | $0,03/\mu$ | $0,017/\mu$ |
| $\mu > 40$ | $0,16/\mu$ | $0,09/\mu$ | $0,046/\mu$ |

Tab. 2 Přípustné vztažné proudy v sítích vn

Příloha D

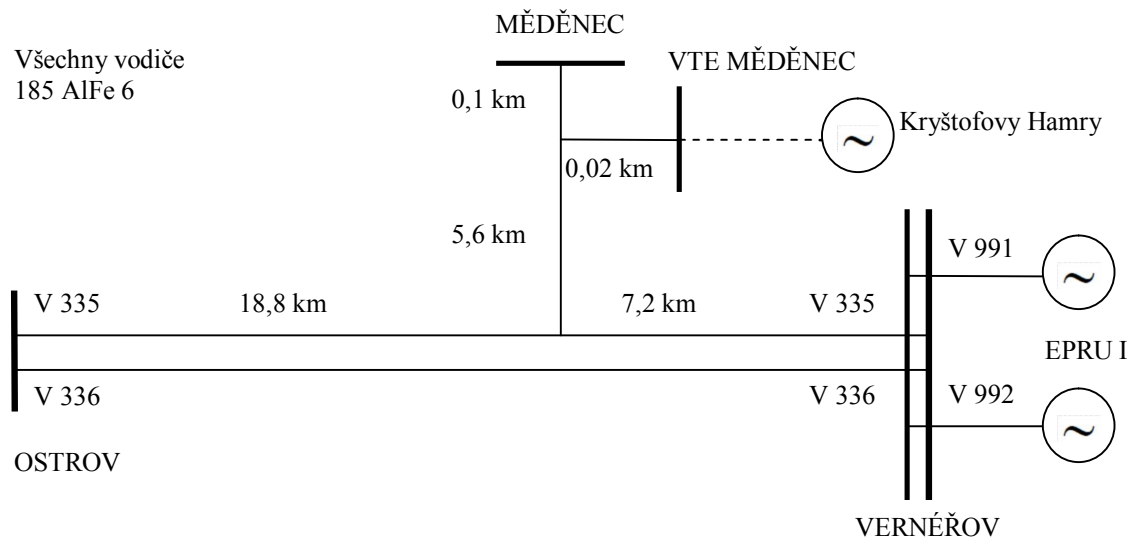


Obrázek 5 Výrobna s více generátory v paralelním provozu se sítí bez možnosti ostrovního provozu, se sběrnicí vn a centrálním vypínačem s ochranami



Obrázek 6 Připojení farmy VTE do sítě vn, dálkově ovládaný úsečník, vypínač generátoru ve stanici VTE

Příloha E



Obrázek 7 Schéma zapojení VtE farmy Kryštofovy Hamry do sítě 110 kV