

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

# POUŽITÍ ASYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ DVOJITĚ NAPÁJENÝCH PRO PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNU

USING ASYNCHRONOUS DOUBLY FED GENERATORS FOR HYDROELECTRIC PLANT

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Cudrák

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

BRNO 2020

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Martin Cudrák

**ID:** 195293

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Použití asynchronních generátorů dvojité napájených pro přečerpávací vodní elektrárnu**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Úvod do problematiky asynchronních motorů s napájeným rotorem
2. Studium využití jednotek v zahraničí - rešerše
3. Popis vhodnosti či nevhodnosti použití DFIG u současných i plánovaných PVE v ČR
4. Zhodnocení dosažených výsledků

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 10.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá použitím dvojitě napájeného asynchronního generátoru u přečerpávacích vodních elektráren. Nejprve je v práci rozebrán princip a výhody tohoto generátoru a jeho výhodné vlastnosti při použití u PVE. Následně je provedena rešerše použití DFIG u PVE ve světě a zjištění parametrů těchto PVE a výhod plynoucích z použití DFIG. Dále je popsána problematika použití těchto generátorů u současných a plánovaných PVE v ČR. V této souvislosti jsou v práci zmíněny plánované lokality pro novou výstavbu PVE v ČR. A následně na konkrétním příkladu ze zahraničí je popsáno, s jakými okolnostmi je nutné počítat při rekonstrukci stávajících PVE.

## Klíčová slova

dvojitě napájený asynchronní generátor, přečerpávací vodní elektrárna, použití DFIG ve světě, použití DFIG u českých PVE, rekonstrukce stávajících PVE

## Abstract

This bachelor's thesis deals with the use of a double fed induction machine for pumped storage power plants. Firstly, the thesis describes principles and advantages of this generator and its beneficial properties when used with PSP. Subsequently, the use of DFIG in PVE in the world is researched and the parameters of these PSP and benefits of using DFIG are identified. Furthermore, the issue of using these generators in current and planned PSP in the Czech Republic is described. It is further assessed. In this context, planned sites for the new construction of PSP in the Czech Republic are mentioned in the bachelor's work. And then, on the specific example from abroad, it is described which circumstances must be taken into account when reconstructing of existing PSP.

## Key words

Doubly fed induction generator, pumped storage power plant, use of DFIG in the world, use of DFIG in Czech PVE, reconstruction of existing PVE

Bibliografická citace:

CUDRÁK, Martin. *Použití asynchronních generátorů dvojitě napájených pro přečerpávací vodní elektrárny*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125710>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Lukáš Radil.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsou bakalářskou prací na téma „Použití asynchronních generátorů dvojitě napájených pro přečerpávací vodní elektrárnu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků a porušení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Radilovi, Ph.D. za odborné vedení, podporu, konzultace a odbornou pomoc při zpracování mé bakalářské práce.

Brno .....

.....

podpis autora

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>3</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>5</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>6</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>7</b>
<b>2 DVOJITĚ NAPÁJENÝ ASYNCHRONNÍ GENERÁTOR.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 DŮVODY POUŽITÍ DFIG U PVE.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 ZÁKLADNÍ POPIS .....</b>	<b>9</b>
<b>2.3 HISTORIE DFIG .....</b>	<b>10</b>
<b>2.4 KONSTRUKCE DFIG .....</b>	<b>10</b>
<b>2.5 PRINCIP FUNKCE DFIG .....</b>	<b>12</b>
<b>2.6 TOK VÝKONU VE STROJI.....</b>	<b>14</b>
2.6.1 NAD-SYNCHRONNÍ REŽIM .....	14
2.6.2 POD-SYNCHRONNÍ REŽIM.....	15
<b>2.7 FREKVENČNÍ MĚNIČE U DFIG .....</b>	<b>16</b>
2.7.1 PŘÍMÝ FREKVENČNÍ MĚNIČ– CYKLOKONVERTOR .....	16
2.7.2 NEPŘÍMÝ MĚNIČ FREKVENCE S NAPĚŤOVÝM MEZIOBVODEM .....	17
<b>2.8 VÝHODY A NEVÝHODY POUŽITÍ DFIG U PVE.....</b>	<b>18</b>
2.8.1 RYCHLEJŠÍ ODEZVA NA ZMĚNU VÝKONU DLE POŽADAVKŮ ELEKTRICKÉ SÍTĚ.....	18
2.8.2 ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI A PROVOZNIHO ROZSAHU PVE.....	19
2.8.3 ZLEPŠENÍ ÚČINNOSTI PRO ČERPADLOVÝ A TURBÍNOVÝ REŽIM .....	19
2.8.4 ZVÝŠENÍ OPERAČNÍHO ROZSAHU ČERPADLOVÉHO REŽIMU .....	21
2.8.5 EFEKTIVNĚJŠÍ NAKLÁDÁNÍ S VODOU V ČERPADLOVÉM REŽIMU .....	22
2.8.6 POUŽITÍ DFIG K VÝROBĚ ELEKTRICKÉHO NAPĚTÍ/ENERGIE S PEVNOU FREKVENCÍ .....	23
2.8.7 SNÍŽENÍ VIBRACÍ A OPOTŘEBENÍ SOUSTROJÍ.....	24
<b>3 SYNCHRONNÍ GENERÁTOR S FREKVENČNÍM MĚNIČEM .....</b>	<b>25</b>
<b>4 REŠERŠE POUŽITÍ DFIG VE SVĚTĚ .....</b>	<b>26</b>
<b>4.1 PVE NARUDE – JAPONSKO.....</b>	<b>26</b>
<b>4.2 PVE YAGISAWA – JAPONSKO .....</b>	<b>26</b>
4.2.1 SYSTÉMOVÁ KONFIGURACE PVE YAGISAWA .....	26
4.2.2 TECHNICKÉ PARAMETRY PVE YAGISAWA .....	27
<b>4.3 PVE OKAWACHI – JAPONSKO.....</b>	<b>27</b>
<b>4.4 PVE OMARUGAWA – JAPONSKO.....</b>	<b>29</b>
<b>4.5 PVE OKUTATARAGI – JAPONSKO.....</b>	<b>29</b>
<b>4.6 PVE KYOGOKU – JAPONSKO .....</b>	<b>30</b>
<b>4.7 PVE KAZUNOGAWA – JAPONSKO .....</b>	<b>30</b>
<b>4.8 PVE NANT DE DRANCE – ŠVÝCARSKO .....</b>	<b>31</b>
<b>4.9 PVE LINTHAL – LIMMERN – ŠVÝCARSKO .....</b>	<b>31</b>
<b>4.10 PVE GOLDISTHAL – NĚMECKO .....</b>	<b>32</b>

---

<b>4.11 PVE LEY CHEYLAS – FRANCIE</b> .....	<b>34</b>
<b>4.12 PVE AVČE – SLOVINSKO</b> .....	<b>34</b>
<b>4.13 PVE FRADES II – PORTUGALSKO</b> .....	<b>35</b>
<b>4.14 SHRnutí PVE VE SVĚTĚ</b> .....	<b>36</b>
<b>5 VÝSTAVBA PVE V ČR</b> .....	<b>39</b>
<b>5.1 SOUČASNÉ PVE V ČESKÉ REPUBLICE</b> .....	<b>39</b>
5.1.1 VYUŽITÍ SOUČASNÝCH PVE V ČR.....	40
<b>5.2 STANOVENÍ VHODNÝCH LOKALIT PRO VÝSTAVBU PVE V ČESKÉ REPUBLICE</b> .....	<b>42</b>
5.2.1 STANOVENÍ INVESTIČNÍCH NÁKLADŮ PVE PODLE LOKALIT.....	42
5.2.2 EKONOMICKÁ ANALÝZA PODLE JEDNOTLIVÝCH LOKALIT.....	43
5.2.3 ENVIROMENTÁLNÍ PODMÍNKY DLE JEDNOTLIVÝCH LOKALIT.....	45
<b>6 VÝHODY POUŽITÍ DFIG U PŘEČERPÁVACÍCH VODNÍCH ELEKTRÁREN V ČR</b> .....	<b>46</b>
<b>6.1 POUŽITÍ DFIG U STÁVAJÍCÍCH PVE V ČR</b> .....	<b>46</b>
6.1.1 PŘÍKLAD KONKRÉTNÍ MODERNIZACE VE SVĚTĚ – PVE OKUTATARAGI.....	48
<b>6.2 POUŽITÍ DFIG U PLÁNOVANÝCH PVE V ČR</b> .....	<b>51</b>
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>52</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>53</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Příklad konfigurace DFIG [4].....</i>	<i>9</i>
<i>Obr. 2 Struktura rotoru DFIG motor – generátoru [7] .....</i>	<i>11</i>
<i>Obr. 3 Obecné porovnání velikosti generátorů [1].....</i>	<i>11</i>
<i>Obr. 4 Interakce mezi rychlostí rotoru a frekvencí rotujícího magnetického pole vytvářeného v rotorovém vinutí DFIG [44].....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 5 Nad-synchronní režim DFIG [2] .....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 6 Pod-synchronní režim DFIG [2] .....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 7 DFIG s přímým frekvenčním měničem (cyklokonvertorem) [32].....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 8 DFIG s nepřímým frekvenčním měničem (s napětiovým meziobvodem) [32].....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 9 DFIG s cyklokonvertorem – principiální schéma [40].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 10 DFIG s nepřímým frekvenčním měničem – principiální schéma [40].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 11 Odezva konvenční PVE – vlevo, odezva PVE s DFIG – vpravo [15].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 12 Účinnost a provozní rozsah v generátorovém/turbínovém režimu [16] .....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 13 Porovnání účinnosti v čerpadlovém/turbínovém režimu při použití synchronního generátoru [5; 17].....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 14 Porovnání účinnosti v čerpadlovém/turbínovém režimu při použití DFIG [5; 17].....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 15 Provozní rozsah čerpadlového režimu PVE s DFIG [18] .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 16 Spotřeba elektrické energie v čerpadlovém režimu PVE s DFIG [19].....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 17 Čerpadlový provoz PVE [17].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 18 Srovnání velikosti tlakové pulzace a vibrací v PVE Yagisava při použití synchronního generátoru a DFIG [5].....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 19 Blokové schéma zapojení synchronního generátoru s frekvenčním měničem [46] .....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 20 Čerpadlový provozní rozsah bloku č.4 v PVE Okawachi [5].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 21 Turbínový provozní rozsah PVE Okawachi [5].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 22 Schéma zapojení PVE Avče [42] .....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 23 Instalovaný výkon PVE ve světě [43].....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 24 Čerpadlový provoz českých PVE v letech 2005–2015 [45].....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 25 Turbínový provoz českých PVE v letech 2005-2015 [45] .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 26 Vývoj NETTO výroby v českých PVE v letech 2003–2019 [41].....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 27 Oblast renovace soustrojí PVE Okutataragi [25] .....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 28 Operační rozsah DFIG s novým oběžným kolem turbíny [24].....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 29 Operační rozsah DFIG se stávajícím oběžným kolem turbíny [24] .....</i>	<i>49</i>

---

<i>Obr. 30 Porovnání účinnosti v turbínovém režimu před a po renovaci rozváděcího kola turbíny [24].....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 31 Porovnání účinnosti v turbínovém režimu pro různá oběžná kola turbíny [24].....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 32 Porovnání účinnosti v čerpadlovém režimu pro různá oběžná kola turbíny [24] .....</i>	<i>51</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 2.1 Operační režimy DFIG [9] .....</i>	<i>14</i>
<i>Tabulka 4.1 Technické parametry DFIG v PVE Narude [5; 16].....</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 4.2 Technické parametry DFIG v PVE Yagisawa [5; 16; 23] .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 4.3 Provozní hodiny PVE Yagisawa od uvedení do provozu do května 1992 [23].....</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 4.4 Technické parametry DFIG v PVE Okawachi [DFIG 39,41] [5; 16] .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 4.5 Technické parametry DFIG v PVE Omarugawa [5; 16].....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 4.6 Technické parametry DFIG v PVE Okutataragi [25; 26] .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 4.7 Technické parametry DFIG v PVE Kyogoku [5; 16].....</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 4.8 Technické parametry DFIG v PVE Kazunogawa [5; 16] .....</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 4.9 Technické parametry DFIG v PVE Nant de Drance [5; 16; 18].....</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 4.10 Technické parametry DFIG v PVE Linthal – Limmern [5; 16; 18].....</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 4.11 Technické parametry DFIG v PVE Goldisthal [5; 16] .....</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 4.12 Technické parametry DFIG v PVE Le Chylas [28] .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 4.13 Technické parametry DFIG v PVE Avče [5; 16] .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 4.14 Technické parametry DFIG v PVE Frades II [29] .....</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 4.15 Záznam provozu/nasazování generátorů u Japonských PVE [7] .....</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 4.16 Zajímavosti ve světě v souvislosti s použitím DFIG u PVE [33] .....</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 4.17 Souhrn použití DFIG u PVE.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 5.1 Parametry přečerpávacích vodních elektráren v ČR [34].....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 5.2 Výsledky ekonomického, enviromentálního posouzení plánovaných PVE v ČR [38] 44</i>	

**SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$DC$	stejnoseměrný proud	A
$AC$	střídavý proud	A
$s$	skluz generátoru	-
$p$	počet magnetických pólových dvojic generátoru	-
$f_{Stator}$	frekvence střídavého napětí indukovaného ve statorového vinutí	Hz
$f_{Rotor}$	frekvence střídavého budícího proudu v rotoru generátoru	Hz
$f_{sítě}$	frekvence střídavé elektrické rozvodné sítě	Hz
$n_s$	synchronní rychlost generátoru	ot/min
$n_{Rotor}$	rychlost otáčení rotoru	ot/min
$n_{\Phi, stator}$	rychlost otáčení magnetického pole statoru	ot/min
$n_{\Phi, rotor}$	rychlost otáčení magnetického pole rotoru	ot/min
$P_{mech}$	mechanický výkon na hřídeli generátoru	W
$P_r$	výkon procházející rotorovým obvodem	W
$P_s$	jmenovitý výkon generátoru	W
$P_{grid}$	výkon dodávaný do elektrické sítě	W
PVE	přečerpávací vodní elektrárna	
DFIG	dvojitě napájený asynchronní generátor (Doubly Fed Induction Machine)	
CFIG	synchronní generátor s frekvenčním měničem (Converter Fed Synchronous Generator)	
ES	elektrická síť	

# 1 ÚVOD

Dvojitě napájený asynchronní generátor je poměrně nový typ elektrického generátoru schopný regulovat svoje otáčky určitým rozmezí okolo své synchronní rychlosti. Vzhledem k těmto vlastnostem je hodně využíván zejména u větrných elektráren. Kde má opodstatnění zejména díky schopnosti generovat napětí s konstantní frekvencí i při proměnném zatížení (kolísání větru). Ovšem jeho vlastností se dá využít i například u přečerpávacích vodních elektráren. Které při použití DFIG vykazují lepší provozní vlastnosti. Ať už se jedná o účinnost, tak zlepšení flexibility provozu apod.

Jelikož přečerpávací vodní elektrárny plní v elektrické přenosové soustavě velmi důležitou roli. Ať už jako velké „baterie“ pro poskytování energie v denních špičkách, tak jako velmi rychlý zdroj regulace elektrické sítě. Naopak velkou nevýhodou PVE je jejich velká mohutnost a dlouhý čas výstavby. Proto se častěji přistupuje spíše k modernizaci stávajících PVE než výstavbě úplně nového vodního díla. A právě při modernizaci stávajících PVE se naskytuje možnost využít nového DFIG a tím celkově zlepšit provozní vlastnosti PVE.

Právě problematice použití DFIG u přečerpávací vodní elektrárny, jejich vhodnosti/nevhodnosti použití u stávajících či plánovaných PVE, se věnuji v této bakalářské práci.

## 2 DVOJITĚ NAPÁJENÝ ASYNCHRONNÍ GENERÁTOR

S velkým růstem výroby a spotřeby elektrické energie roste zároveň množství systému na ukládání elektrické energie. S tímto rozšiřováním jsou spojeny větší nároky a problémy s kontrolováním a regulováním stability elektrické rozvodné sítě. Jedním z efektivních systému na uložení elektrické energie a regulaci výkonu v elektrické sítě je využití přečerpávacích vodních elektráren (PVE). Výroby elektřiny v těchto elektrárnách je realizována především dvěma způsoby využívající rozdílné topologie generátorů [1].

- generátory se synchronní rychlostí
- generátory s regulovatelnou rychlostí
  - o s frekvenčním měničem na plný výkon generátoru – CFIG
  - o s frekvenčním měničem na částečný výkon generátoru – DFIG

Použitím generátorů s možností regulací otáček lze dosáhnout mnoha výhod, a především zvýšení efektivity provozu celé PVE [2].

V bakalářské práci se věnuji využití dvojitě napájeného asynchronního generátoru (DFIG). Využitého zejména v aplikacích pro PVE. DFIG spadá do skupiny generátorů s regulovatelnou rychlostí využívající frekvenční měnič pouze na částečný výkon generátoru.

### 2.1 Důvody použití DFIG u PVE

Přestože většina PVE ve světě využívá stále synchronních generátorů mají tyto generátory jednu zásadní nevýhodu. Jak již plyne z názvu „synchronní generátor“ může pracovat pouze na jedné provozní (synchronní) rychlosti, na kterou je stroj navržený. Neumožňuje tedy žádnou otáčkovou regulaci v turbínovém ani čerpadlovém režimu. V tomto ohledu je DFIG, díky své otáčkové regulovatelnosti, mnohem flexibilnější typ generátoru, který se začíná u PVE ve světě používat.

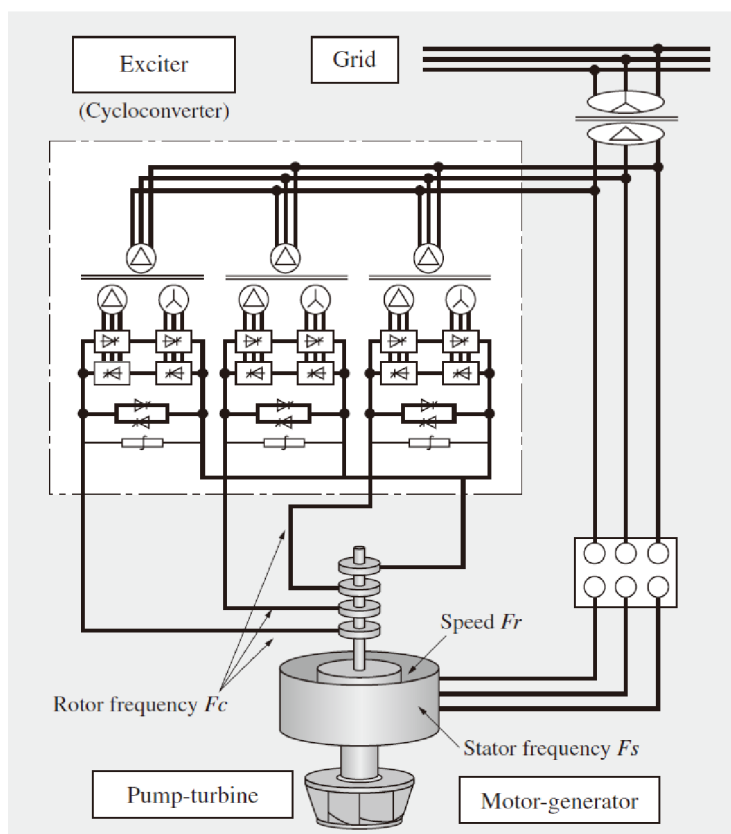
Základní důvody použití jsou:

- Zvýšení flexibility, účinnosti a provozního rozsahu v turbínovém režimu (menší tzv. „zakázané pásmo“).
- Menší minimální výkon v turbínovém režimu (může být 30 % jmenovitého výkonu nebo menší).
- Zvýšená účinnost turbíny při částečném zatížení přizpůsobením otáček optimální rychlosti, přispívající také k delší životnosti soustrojí.
- Schopnost regulovat výkon v čerpadlovém režimu (např. odchylka 10 % od synchronní rychlost obvykle umožňuje, aby se čerpací výkon pohyboval od 70 % do 100 % plného čerpadlového výkonu).
- Možnost regulace frekvence v čerpadlovém režimu.
- Pružnější podpora elektrické sítě v důsledku elektronicky oddělené kontroly činného a jalového výkonu.
- Lepší kompenzace výkyvů výkonu v síti (např. vlivem obnovitelných zdrojů energie).

Konkrétní výhody a nevýhody použití DFIG u PVE jsou podrobněji popsány v kapitole: 2.8

## 2.2 Základní popis

Dvojitě napájený asynchronní generátor se skládá jako všechny točivé elektrické stroje ze statoru a rotoru. Kde stator je realizován identicky jako u klasického synchronního generátoru. Rotor se skládá z třífázového vinutí uloženého v drážkách. Připojeného na konci rotoru na kluzné kroužky (sběrací). Tyto stroje jsou běžně používány jako motory pro aplikace vyžadující vysoký spouštěcí točivý moment. Při aplikacích DFIG u PVE je stator generátoru přímo připojen k elektrické síti, zatímco rotor je připojen k elektrické síti pomocí obousměrného frekvenčního měniče (Obr. 1). Který je schopný měnit frekvenci a velikost napětí buzení rotoru. Změnou frekvence v rotoru a tím pádem i skluzu stroje, může být generátor provozován při různých rychlostech. Obvykle je tato konfigurace realizována pro regulaci  $\pm 10\%$  rychlosti od synchronní rychlosti stroje. Limitujícím faktorem je velikost frekvenčního měniče. Se zvyšujícím se skluzem stroje roste zároveň jmenovitý výkon měniče. Nejčastěji se používá frekvenční měnič dimenzovaný na 30 % jmenovitého výkonu generátoru. Výhodou této konfigurace je, že obvod rotoru může dodávat činný výkon do sítě, když stroj pracuje vyšší rychlostí, než je synchronní rychlost. Tím se zvýší možný maximální činný výkon bez zvětšení jmenovitého výkonu statoru. Tento generátor bude tedy menší a levnější. Avšak nevýhodou jsou použité sběrací kroužky, které budou vyžadovat více údržby [3].



Obr. 1 Příklad konfigurace DFIG [4]

## 2.3 Historie DFIG

Na rozdíl od konvenčních PVE využívajících především synchronních generátorů, které byli schopny pracovat pouze na synchronních otáčkách. Tak systém regulovatelných otáček přečerpávací vodní elektrárny využívající DFIG nemá tak dlouhou historii. Systém využívající DFIG byl poprvé teoreticky popsán a zhodnocen v roce 1970. První aplikací technologie regulovatelných otáček byl pilotní projekt v PVE Narude v Japonsku. Kde v roce 1987 společnost Hitachi instalovala v elektrárně patřící společnosti Kansai Electric Power Company (KEPCO) generátor o výkonu 22 MVA s říditelnými otáčkami (DFIG). Součástí instalace byl třífázový rotor, cyklokonvertor (přímý frekvenční měnič) a ovládání elektroniky. Jednotka byla zpočátku provozována v generátorovém režimu, aby se prokázala proveditelnost a výhody technologie pro použití u PVE. Pilotní projekt elektrárny Narude byl průkopnickým úspěchem a vedl k vývoji velkých rychlostně regulovatelných přečerpávacích elektráren využívajících technologii DFIG [1; 5]

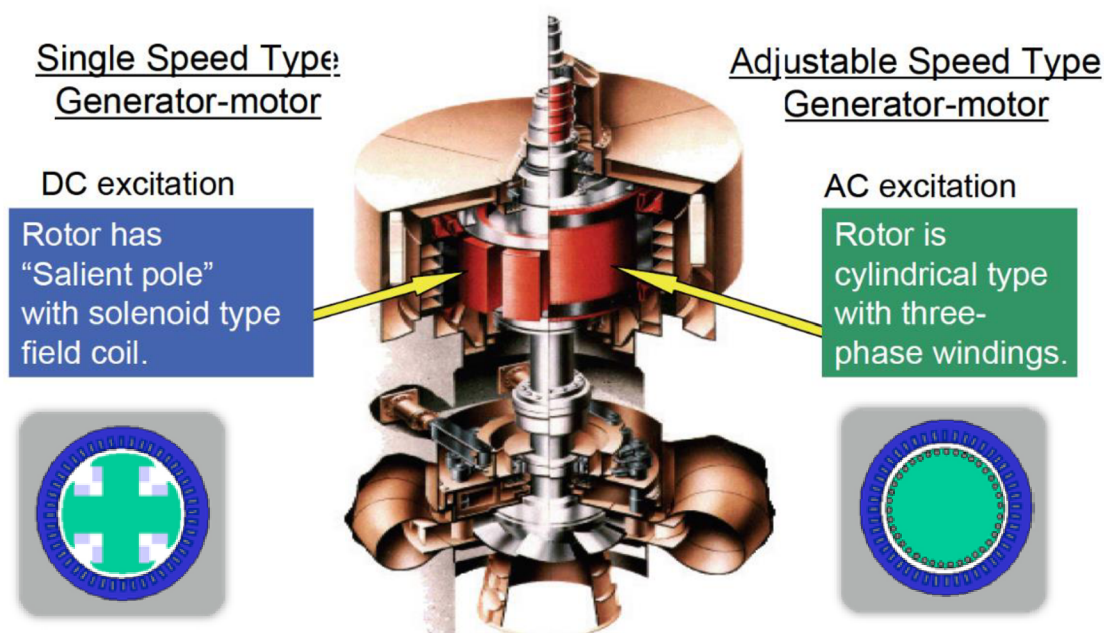
## 2.4 Konstrukce DFIG

Co se týče konstrukce statoru stroje, tak je realizován stejně jako u všech konvenčních synchronních generátorů. Ovšem v rotoru se tyto stroje velmi liší (Obr. 2) Zatímco u synchronních generátorů je rotor realizován jako rotor s vyniklými póly. U DFIG je použit hladký rotor, který se skládá z transformátorových plechů. V plechách jsou vybroušené drážky, kde je uloženo izolované třífázové vinutí rotoru. Obdobně jak je to realizováno u statoru [6].

Při konstrukci rotoru se musí brát v úvahu velká odstředivá síla působící na rotor a jeho vinutí. Proto je velmi důležité ochránit především konce vinutí rotoru [6]. Pro tento účel se konce rotorového vinutí zpevňují. Například se omotávají páskou pro zpevnění. Páska je vyrobena nejčastěji z nerezové oceli nebo vysokopevnostních tkaniny [4].

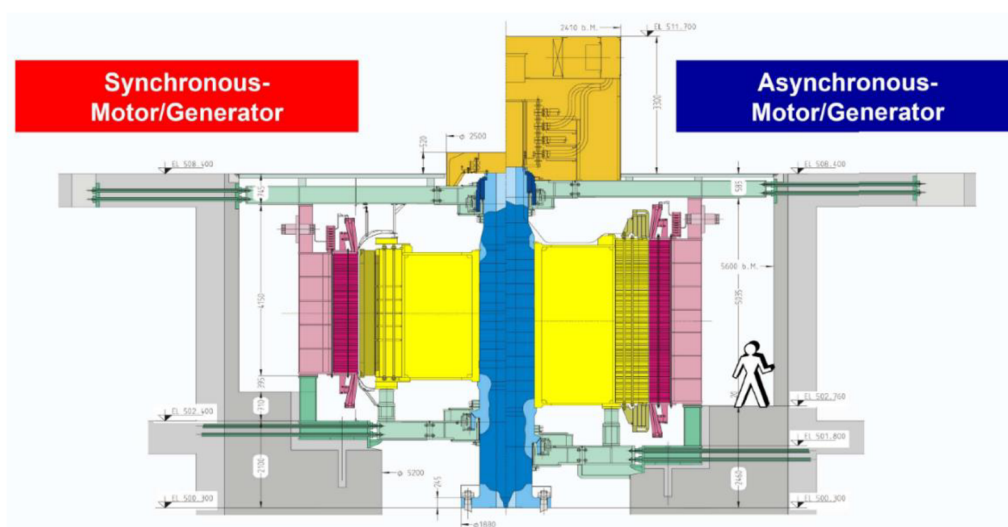
Z důvodu použití třífázového budícího proudu pro buzení magnetického pole rotoru. Je u DFIG použit i větší počet tzv. sběracích kartáčů/kroužků. Které zajišťují vodivé spojení mezi otáčejícím se rotorem a statickým přívodem budícího proudu. S tím souvisí i umístění chlazení (větráků) tak, aby docházelo ke chlazení kartáčů a odvádění uhlíkového prachu vznikajícím při opotřebovávání kartáčů [7].





Obr. 2 Struktura rotoru DFIG motor – generátoru [7]

Vzhledem k tomu, že použití motor-generátoru využívající DFIG technologii vyžaduje oproti synchronnímu stroji instalaci kluzných kroužků. Vzroste nutně tedy i objem celého soustrojí a je nutné s tím počítat ve strojovně elektrárny. Hlavně pokud se uvažuje nad výměnou synchronního stroje za DFIG. Navíc je třeba dodatečné místo pro buzení rotorového obvodu pomocí frekvenčního měniče. Výsledné přibližné porovnání velikosti generátorů je znázorněno na Obr. 3 [8].



Obr. 3 Obecné porovnání velikosti generátorů [1]

## 2.5 Princip funkce DFIG

V konvenčním třífázovém synchronním generátoru externí zdroj mechanické energie (tj. otáčející se hřídel) tvoří rotor generátoru. Statické magnetické pole vytvořené stejnosměrným proudem (DC) v rotorovém vinutí, nebo pomocí permanentních magnetu, se otáčí stejnou rychlostí ( $n_{Rotor}$ ) jako rotor. Výsledkem je, že neustálá změna magnetického toku procházející skrze statorové vinutí indukuje ve statorovém vinutí elektrickou energii. Mechanická energie je tedy pomocí otáčejícího se rotoru přeměněna na elektrickou energii indukovanou v cívkách statoru.

V konvenčním synchronním generátoru je vztah mezi frekvencí magnetického pole statoru  $f_{Stator}$  a rychlostí rotoru  $n_{Rotor}$  vyjádřen pomocí rovnice (2.1).

$$f_{Stator} = \frac{n_{Rotor} \cdot p}{60} \quad (2.1)$$

Kde:  $f_{Stator}$  je frekvence střídavého napětí indukované v cívkách statorového vinutí, vyjádřená v hertz (Hz).  
 $n_{Rotor}$  je rychlost rotoru generátoru vyjádřená v otáčkách za minutu (ot/min).  
 $p$  je počet pólových dvojic DFIG (-)

Použití předchozí rovnice lze použít pouze, pokud je rychlost otáčení rotoru  $n_{Rotor}$  generátorů stejná, jako synchronní rychlost generátoru  $n_s$ . A frekvence střídavého napětí vyvolané ve statoru je rovné frekvenci sítě. Pouze tedy pokud se stroj chová jako synchronní generátor.

Stejně provozní zásady platí pro DFIG stejně jako v konvenčním synchronním generátoru. Jediný rozdíl je v tom, že magnetické pole vytvořené v rotoru není statické (protože je vytvořeno střídavým elektrickým proudem (AC) místo DC proudu) ale otáčí se rychlostí  $n_{\phi,rotor}$  úměrné frekvenci budícího proudu dodávaného do rotorového vinutí. To znamená, že rotující magnetické pole prochází skrze statorové vinutí ne jenom díky otáčení rotoru generátoru, ale i v důsledku rotujícího magnetického pole vytvořené v rotorovém vinutí pomocí střídavého proudu. Proto v DFIG rychlost otáčení rotoru  $n_{Rotor}$  a frekvence AC proudu dodávaného do vinutí rotoru  $f_{Rotor}$  určují rychlost točivého magnetického pole procházející statorovým vinutím  $n_{\phi,stator}$  a tím i frekvenci střídavého napětí indukovaného ve vinutí statoru  $f_{stator}$ .

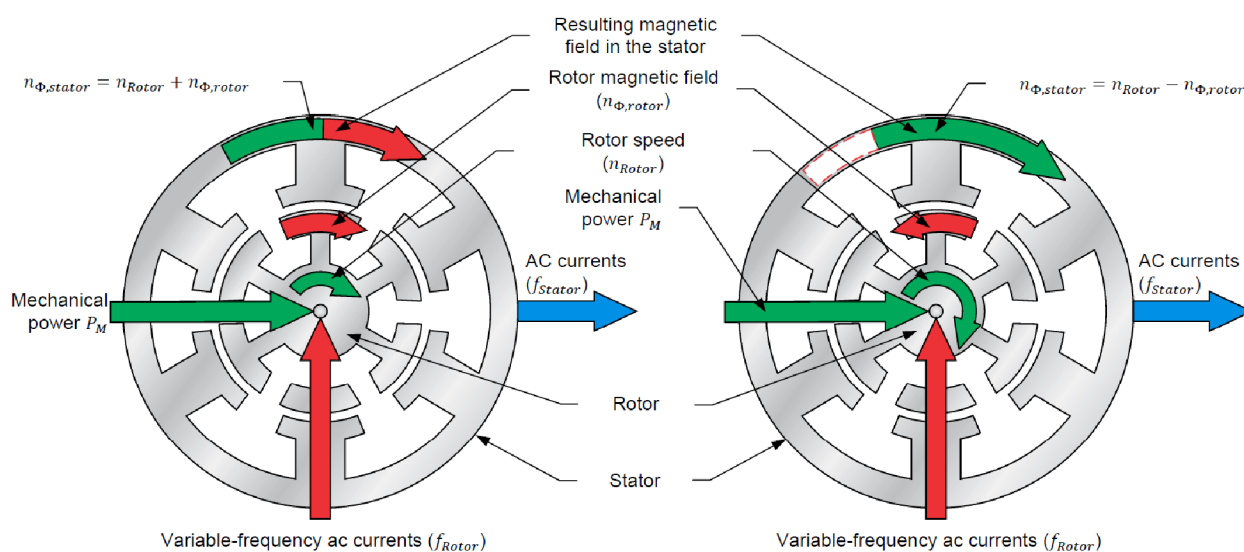
Pokud vezmeme v potaz základní princip DFIG, lze stanovit, že pokud se magnetické pole rotoru otáčí ve stejném směru jako rotor generátoru, tak rychlost rotoru  $n_{Rotor}$  a rychlost otáčení magnetického pole rotoru  $n_{\phi,rotor}$  (úměrně k frekvenci rotoru  $f_{Rotor}$ ) se sečtou (Obr. 4-a). Výsledná frekvence indukovaného napětí ve vinutí statoru  $f_{Stator}$  lze tedy vypočítat pomocí rovnice (2.2).

$$f_{Stator} = \frac{n_{Rotor} \cdot p}{60} + f_{Rotor} \quad (2.2)$$

kde:  $f_{Rotor}$  je frekvence střídavého budícího proudu dodávaného do vinutí rotoru (Hz)

Naopak, když se magnetické pole rotoru otáčí ve směru opačném než rotor generátoru. Tak se rychlost otáčení rotoru  $n_{Rotor}$  a rychlost magnetického pole rotoru  $n_{\Phi,rotor}$  od sebe vzájemně odečtou (Obr. 4-b). Výsledná frekvence střídavého napětí indukovaného ve vinutí statoru  $f_{Stator}$  lze vypočítat pomocí rovnice (2.3).

$$f_{Stator} = \frac{n_{Rotor} \cdot p}{60} - f_{Rotor} \quad (2.3)$$



a) Magnetické pole statoru a rotoru se otáčí ve stejném směru

b) Magnetické pole statoru a rotoru se otáčí v opačném směru

Obr. 4 Interakce mezi rychlostí rotoru a frekvencí rotujícího magnetického pole vytvářeného v rotorovém vinutí DFIG [45]

Jinými slovy, frekvence střídavého napětí ve vinutí statoru  $f_{Stator}$  je úměrná rychlosti otáčení magnetického pole ve statoru  $n_{\Phi, stator}$ . Samotná rychlost otáčení magnetického pole ve statoru  $n_{\Phi, stator}$  závisí na rychlosti otáčení rotoru  $n_{Rotor}$  (vyplývá z mechanického výkonu na hřídeli rotoru) a frekvence střídavého budicího  $f_{Rotor}$  proudu dodávaného do stroje. Výsledná rychlost otáčení magnetického pole ve statoru lze vypočítat z rovnice (2.4) [9; 10].

$$n_{\Phi, stator} = n_{Rotor} \pm n_{\Phi, rotor} \quad (2.4)$$

Pro vyjádření relativního rozdílu mezi rychlostí rotoru  $n_{Rotor}$  a rychlostí magnetického pole statoru  $n_{\Phi, stator}$  se velmi často užívá termín: „skluz stroje“ který můžeme určit podle vztahu (2.5) [11]:

$$s = \frac{n_{\Phi, stator} - n_{Rotor}}{n_{\Phi, stator}} \quad (2.5)$$

## 2.6 Tok výkonu ve stroji

Výměna energie mezi obvodem rotoru a elektrickou sítí se nazývá „skluzové“ napájení a množství tohoto výkonu závisí na velikosti skluzu stroje (relativní rychlost mezi statorovým magnetickým polem a rotorem). Takže generátor může být menší, než je jmenovitý výkon turbíny. O velikost výkonu, který je zpracován obvodem rotoru [2].

U DFIG můžeme definovat, stejně jako u synchronního generátoru, dva základní provozní režimy – motorický a generátorický. Ovšem díky schopnosti regulace otáček nad a pod synchronní rychlost nám vzniknou pro tyto dva základní provozní režimy další dva režimy [9]:

- Motorický režim
  - Pod-synchronní
  - Nad-synchronní
- Generátorický režim
  - Pod-synchronní
  - Nad-synchronní

Tabulka 2.1 Operační režimy DFIG [9]

Operační režim	Rychlost	Směr proudu ve statoru	Směr proudu v rotoru	Frekvence ve statoru
Pod-synchronní Motor	$n_s > n_{Rotor}$	Kladný	Záporný	$f_s = \frac{n_r \cdot p}{60} + f_r$
Nad-synchronní Motor	$n_s < n_{Rotor}$	Kladný	Kladný	$f_s = \frac{n_r \cdot p}{60} - f_r$
Pod-synchronní Generátor	$n_s > n_{Rotor}$	Záporný	Kladný	$f_s = \frac{n_r \cdot p}{60} + f_r$
Nad-synchronní Generátor	$n_s < n_{Rotor}$	Záporný	Záporný	$f_s = \frac{n_r \cdot p}{60} - f_r$

Kladný – výkon proudí ze sítě do stroje  
 Záporný – výkon proudí ze stroje do sítě  
 $f_s$  – frekvence proudu ve statoru  
 $f_r$  – frekvence proudu v rotoru

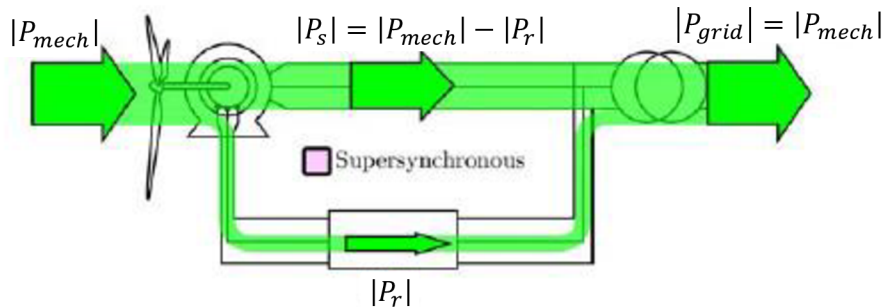
$n_s$  – synchronní otáčky  
 $n_{Rotor}$  – otáčky rotoru  
 $p$  – je počet pólových dvojic DFIG

### 2.6.1 Nad-synchronní režim

V tomto operačním režimu se rotor generátoru otáčí rychleji, než je synchronní rychlost generátoru ( $n_{Rotor} > n_s$ ). Skluz stroje je tedy záporný ( $s < 0$ ).

Frekvence budícího proudu ( $f_{Rotor}$ ) se zvýší v souladu se skluzem stroje ( $s$ ). Frekvence budícího proudu má stejně jako skluz stroje zápornou polaritu. Čímž vytváří magnetické pole rotoru, které se otáčí proti směru otáčení rotoru. Výsledné magnetické pole vzniklé ve statoru stroje je dáno rozdílem magnetického pole tvořené otáčením rotoru a polem tvořeným budícím proudem ve vinutí rotoru. Výsledná frekvence indukovaného napětí ve statoru lze vypočítat z rovnice (2.2).

Do generátoru je dodáván mechanický výkon, který odpovídá většímu výkonu než jmenovitý výkon generátoru ( $P_{mech} > P_s$ ). Státorem prochází pouze výkon odpovídající jmenovitému výkonu statoru generátoru ( $P_s$ ) a zbylý přebytečný výkon proudí do elektrické sítě skrze rotorový obvod ( $P_r$ ). Výkon dodávaný do elektrické sítě tedy odpovídá celkovému mechanickému výkonu přiváděnému do generátoru ( $P_{grid} = P_{mech}$ ) pokud nebudeme uvažovat ztráty vzniklé mezi generátorem a elektrickou sítí (Obr. 5) [2].



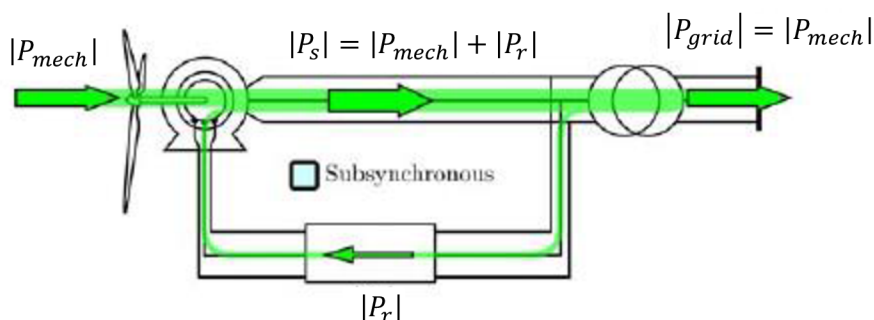
Obr. 5 Nad-synchronní režim DFIG [2]

### 2.6.2 Pod-synchronní režim

Naopak v pod-synchronním režimu se rotor generátoru otáčí pomaleji, než je synchronní rychlost generátoru ( $n_{Rotor} < n_s$ ). Skluz stroje je tedy kladný ( $s > 0$ ).

Frekvence budícího proudu ( $f_{Rotor}$ ) se zvýší v souladu se skluzem stroje ( $s$ ). Ovšem v tomto případě má, stejně jako skluz stroje, kladnou polaritu. Čímž vytváří magnetické pole rotoru, které se otáčí ve směru otáčení rotoru. Výsledné magnetické pole vzniklé ve statoru stroje je dáno součtem magnetického pole tvořené otáčením rotoru a polem tvořeným budícím proudem ve vinutí rotoru. Výsledná frekvence indukovaného napětí ve statoru lze vypočítat z rovnice (2.3).

Do generátoru je dodáván mechanický výkon, který naopak odpovídá menšímu výkonu, než je jmenovitý výkon generátoru ( $P_{mech} < P_s$ ). Celkový výkon dodávaný do statoru je tedy rovný součtu mechanického výkonu přiváděného hřídelí a také výkonem (skluzový) dodávaným z rotorového obvodu (Obr. 6) [2].



Obr. 6 Pod-synchronní režim DFIG [2]

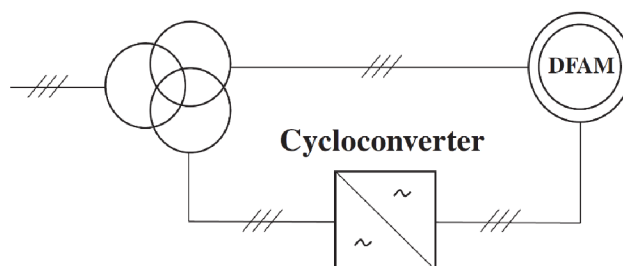
## 2.7 Frekvenční měniče u DFIG

Frekvenční měniče jsou obecně elektrické střídavé obvody sloužící k přeměně střídavé energie jednoho kmitočtu na střídavou energii jiného kmitočtu. Velmi často umožňují současnou změnu frekvence a amplitudy signálu. Takový měnič se označuje jako střídavý měnič frekvence a napětí. Využití v praxi je u těchto měničů velmi rozsáhlé především jako součást regulovaných pohonů jak asynchronních, tak synchronních. Kde umožňují rozběh motoru bez proudového nárazu a řízení jejich otáček v požadovaném provozním rozsahu.

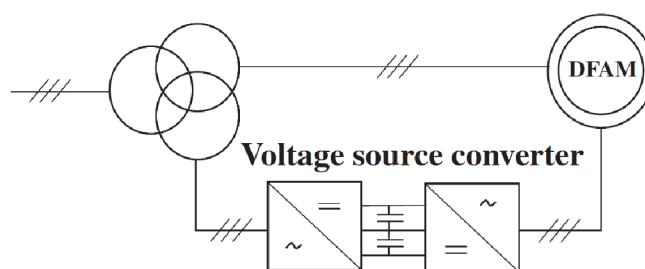
Frekvenční měniče se taktéž používají pro řízení budícího proudu v rotorovém obvodu DFIG. Jak je patrné z (Obr. 1), frekvenční měnič je zapojen v rotorovém obvodu mezi rotorem stroje a elektrickou sítí. Budící proud je odebírán z elektrické sítě a je tedy nutné upravit jeho vlastnosti. Zejména frekvenci a velikost proudu [12; 13].

Pro tento typ generátoru se používají zejména dva typy frekvenčních měničů. A to:

- přímý frekvenční měnič (tzv. cyklokonvertor) – Obr. 7
- nepřímý frekvenční měnič s napěťovým meziobvodem – Obr. 8



Obr. 7 DFIG s přímým frekvenčním měničem (cyklokonvertorem) [33]



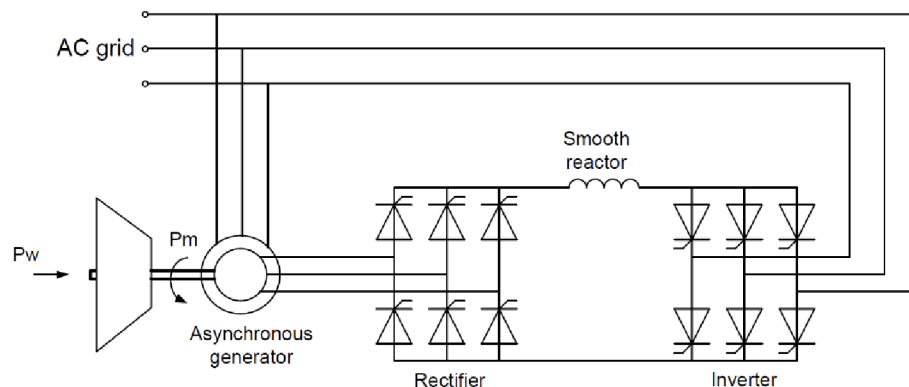
Obr. 8 DFIG s nepřímým frekvenčním měničem (s napěťovým meziobvodem) [33]

### 2.7.1 Přímý frekvenční měnič– cyklokonvertor

Přímý měnič frekvence umožňuje přímo (bez stejnosměrného meziobvodu) měnit vstupní frekvenci signálu (obvykle konstantní) na výstupní signál s říditelnou frekvencí [4].

Při tomto typu měniče se výstupní signál získává pomocí skládání z úseků vícefázové soustavy vstupních veličin s konstantní vstupní frekvencí. V tomto případě měniče není potřebná dvojitá přeměna elektrické energie jako u nepřímých měničů frekvence. Cyklokonvertor se řadí mezi přímé frekvenční měniče se síťovou komutací. Tento typ měniče umožňuje pouze snižování vstupní frekvence [12; 13].

Jedná se o velmi často používaný frekvenční měnič v rotorovém obvodu DFIG (Obr. 9). Princip cyklokonvertoru je založen na použití polovodičových součástek – tyristorů. Obecně je cyklokonvertor jednoduchý a kompaktní, protože dokáže přeměnit frekvenci zdroje přímo na velmi nízkou frekvenci potřebnou pro buzení rotorového obvodu [7].

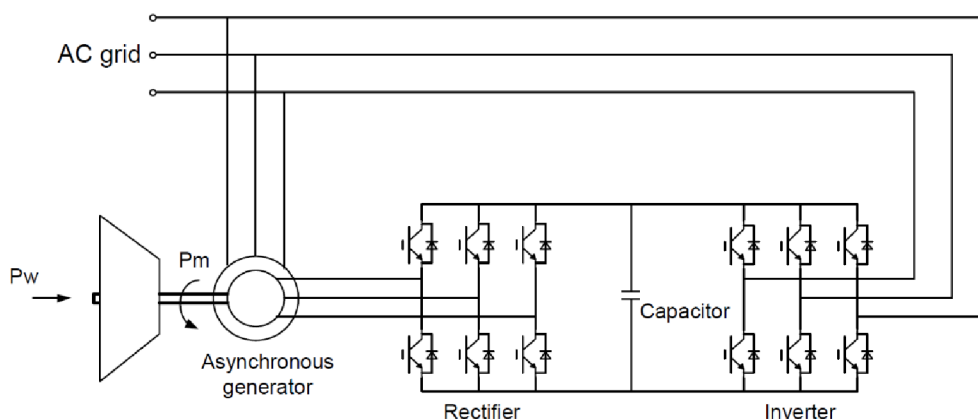


Obr. 9 DFIG s cyklokonverorem – principiální schéma [41]

### 2.7.2 Nepřímý měnič frekvence s napěťovým meziobvodem

Nepřímý měnič frekvence, též nazývaný jako měnič frekvence s vyjádřeným stejnosměrným obvodem. Využívají, na rozdíl od přímých měničů frekvence, dvoustupňovou přeměnu elektrické energie. Nepřímý měnič frekvence se skládá ze vstupního usměrňovače a výstupního střídače. Tyto dva dílčí měniče jsou od sebe odděleny stejnosměrnou vazbou, která impedančně odděluje oba dílčí měniče. Stejnosměrný meziobvod představuje filtr, který má za úlohu vyfiltrovat (vyhladit) impulzní průběh usměrněného napětí anebo proudu z usměrňovače. Výsledný usměrněný signál je dále převeden zpět na střídavý signál jiné frekvence pomocí střídače [12; 13].

Nepřímý měnič frekvence je realizován pomocí polovodičových součástek jako: GTO (Gate Turn Off thyristor), GCT (Gate Commutated Turn off thyristor) tyristorů. Pro nové projekty se plánuje využít technologie IEGT tranzistory (Injection Enhanced Gate Transistor) [14].



Obr. 10 DFIG s nepřímým frekvenčním měničem – principiální schéma [41]

## 2.8 Výhody a nevýhody použití DFIG u PVE

Použití DFIG u PVE namísto konvenčních synchronních generátorů má řadu výhod. Nejdůležitější výhody jsou podrobněji popsány v níže uvedených podkapitolách.

Mezi nevýhody DFIG lze uvést zejména:

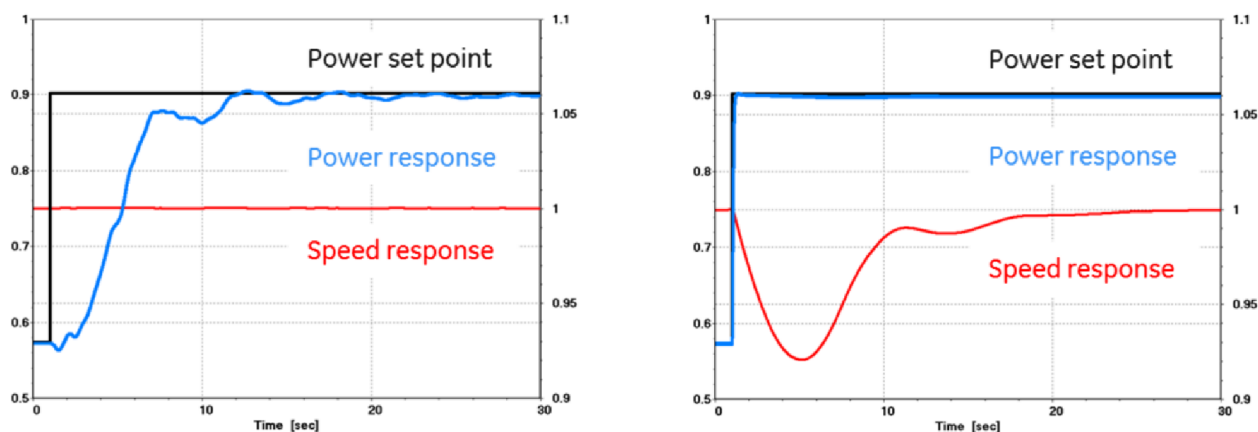
- Vyšší cena generátoru
- Složitější systém řízení
- Náročnější údržba
- Větší nároky na prostor strojovny

### 2.8.1 Rychlejší odezva na změnu výkonu dle požadavků elektrické sítě

Pokud je od konvenční PVE vyžadováno skokové zvýšení výkonu dojde k zapnutí řízení turbíny. Je vydán požadavek na rychlé zvýšení průtoku vody a s tím spojené následné zvýšení výkonu. Počáteční odezva stroje vyvolaná zvětšením průtoku vody (otevření tlakového přivaděče) a setrvačností vody je opačná, než očekávaná změna výkonu (v prvotním okamžiku dojde k poklesu výkonu). Během několika sekund se začne zvyšovat výkon a je regulován na požadovanou úroveň. Vzhledem k použití synchronního generátoru se rychlost rotoru nemění.

Pokud je vyžadováno skokové zvýšení výkonu od PVE s DFIG, odezva je téměř okamžitá. Kinetická energie rotoru je přeměněna na elektrickou energii a je dodaná do sítě. Rotor zpomalí, mezitím naskočí řízení turbíny a během několika vteřin rotor znovu zrychlí. Výkonová odezva je velmi rychlá.

Pro představu, jaký je rozdíl mezi výkonovou odezvou standardní PVE se synchronním generátorem a PVE s DFIG. Je zobrazeno na jednoduchém modelu představující výkonový skok a následnou odezvu synchronního stroje s pevnými otáčkami a DFIG (Obr. 11) [15].



Obr. 11 Odezva konvenční PVE – vlevo, odezva PVE s DFIG – vpravo [15]



### 2.8.2 Zvýšení účinnosti a provozního rozsahu PVE

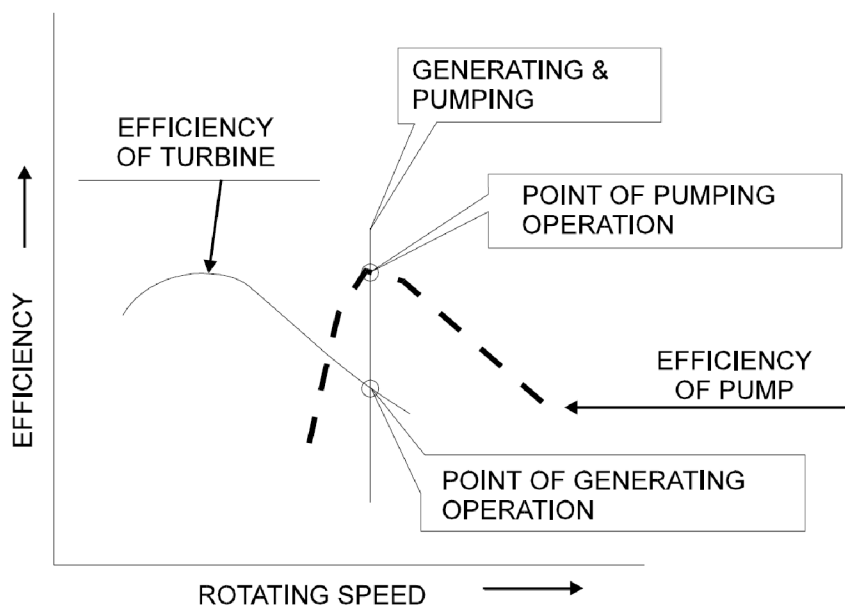
V porovnání s konvenčními synchronními generátory má technologie DFIG zvýšený operační rozsah, jak v generátorovém, tak v čerpadlovém režimu. Navíc mají lepší účinnost, schopnost pracovat na nižších úrovních výkonu a menší zakázané pásmo provozu („Rough Zone“). Což je část rozmezí mezi minimálním a maximálním výkonem, kterému je třeba se vyhnout z důvodu zhoršujících se dopadů na soustrojí elektrárny, například z důvodu vibrací, kavitací apod. jak je vidět na Obr. 12 [16].



Obr. 12 Účinnost a provozní rozsah v generátorovém/turbínovém režimu [16]

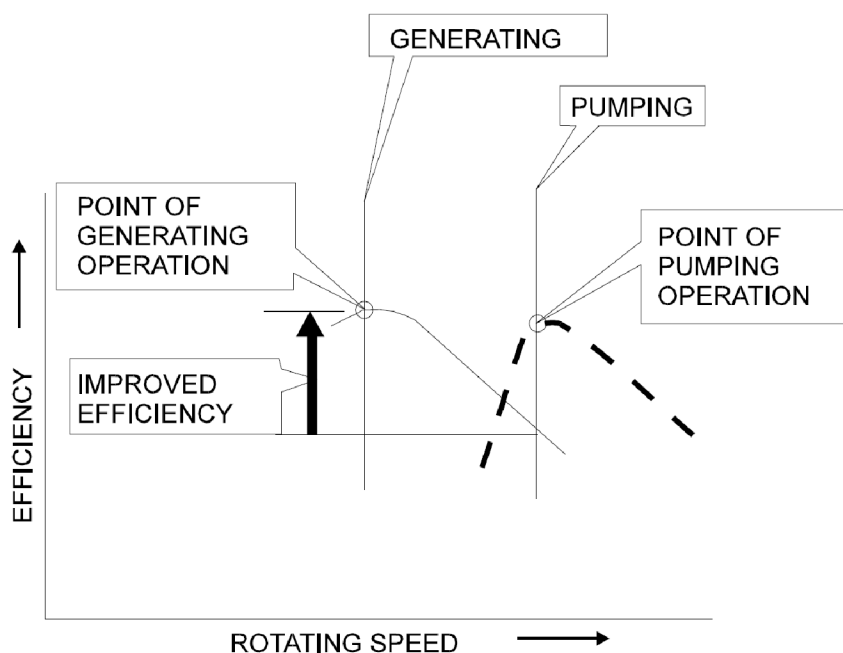
### 2.8.3 Zlepšení účinnosti pro čerpadlový a turbínový režim

Pro konvenční PVE realizované pomocí synchronních generátorů nelze dosáhnout optimální účinnosti pro čerpadlový i turbínový režim PVE. Jelikož každý z těchto módů elektrárny má svoji nejvyšší účinnost při jiné rychlosti. V tomto případě může být soustrojí PVE navrženo tak, aby dosahoval maximální účinnosti pouze v jednom z těchto dvou režimů. Pokud je například PVE navržena s reverzibilní vodní turbínou (spojení funkce turbíny a čerpadla) tak, aby dosahovala maximální účinnosti v režimu čerpání, pak není možné dosáhnout zároveň nejlepší účinnosti pro generátorový režim. Maximální účinnosti v generátorovém režimu PVE dosahuje u jiných rychlostí, než při čerpadlovém režimu (Obr. 13) [5].



Obr. 13 Porovnání účinnosti v čerpadlovém/turbínovém režimu při použití synchronního generátoru [5; 17]

Vzhledem k tomu, že konvenční PVE využívající synchronních generátorů mohou pracovat pouze s maximální účinností v čerpadlovém, nebo turbínovém režimu. V případě použití DFIG lze dosáhnout nejlepší účinnosti v čerpadlovém i turbínovém režimu. Jelikož tento typ generátorů umožňuje regulaci otáček, lze v každém z provozních režimů přizpůsobit rychlost DFIG nejlepší účinnosti (Obr. 14). Schopnost pracovat na nejlepších účinnosti v turbínovém i čerpadlovém režimu vede k efektivnějšímu nakládání s vodou a zvýšení výroby elektrické energie [5].

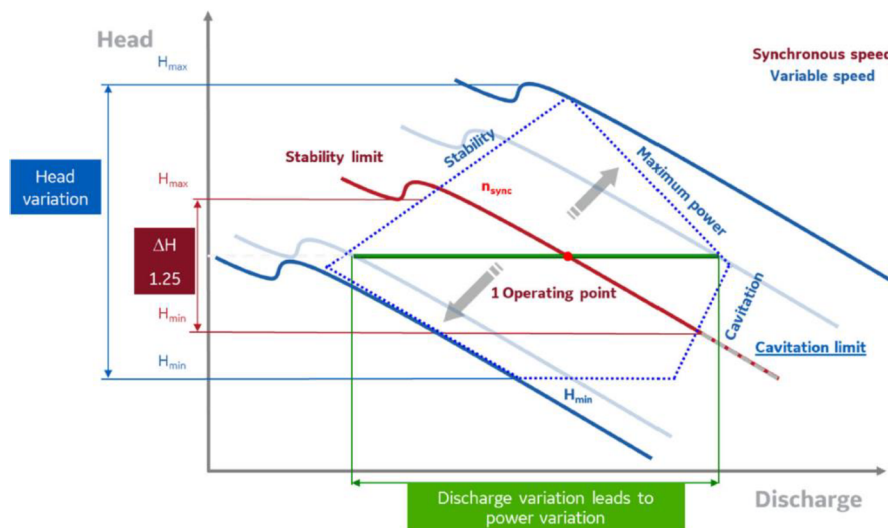


Obr. 14 Porovnání účinnosti v čerpadlovém/turbínovém režimu při použití DFIG [5; 17]

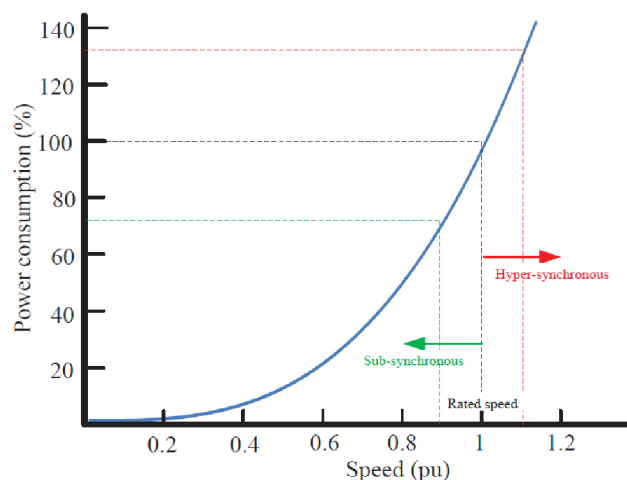
### 2.8.4 Zvýšení operačního rozsahu čerpadlového režimu

Provozní rozsah jedno rychlostních generátorů v čerpadlovém režimu je definován jedinou křivkou (závislost průtoku na spádu), jelikož nelze regulovat otáčky stroje. Jedno rychlostní jednotka je schopna pracovat pouze jen na bodech této křivky (Obr. 15). Naopak rychlostně nastavitelné jednotky jsou schopny pracovat v celém rozsahu definovaným minimální (pod-synchronní) a maximální (nad-synchronní) rychlostí čerpadla, maximálním výkonem čerpadla, limity stability a kavitačními limity [17; 18].

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.8.3 díky regulování otáček generátoru je PVE schopna pracovat v čerpadlovém režimu s nejlepší možnou účinností. Zároveň ale díky regulaci otáček a schopnosti stroje pracovat v nad/pod – synchronním režimu se zvýší zásadním způsobem provozní rozsah v čerpadlovém režimu. PVE je schopna pracovat v čerpadlovém režimu při větším rozmezí spádu a průtoku vody než konvenční jedno rychlostní PVE (Obr. 15). Díky tomu dochází k efektivnějšímu „zachytávání“ přebytečného výkonu v elektrické síti vznikající především díky obnovitelným zdrojům elektrické energie (podrobněji popsáno v kapitole 2.8.5). Spotřeba elektrické energie v čerpadlovém režimu souvisí s pracovním režimem stroje (nad/pod-synchronní) a je závislá na třetí mocnině otáček čerpadla (Obr. 16) [19].



Obr. 15 Provozní rozsah čerpadlového režimu PVE s DFIG [18]



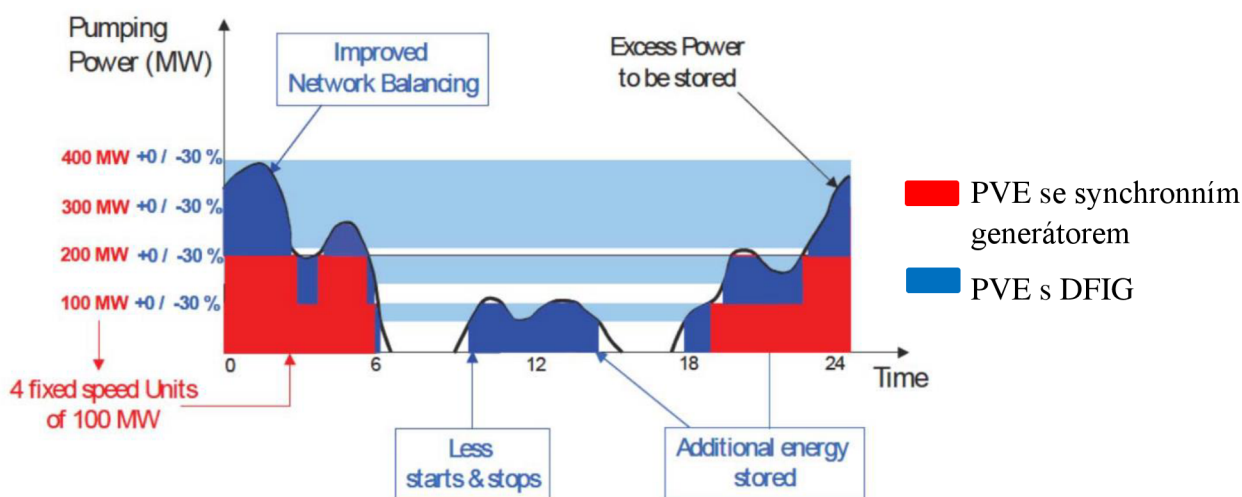
Obr. 16 Spotřeba elektrické energie v čerpadlovém režimu PVE s DFIG [19]

### 2.8.5 Efektivnější nakládání s vodou v čerpadlovém režimu

Velkou výhodou použití rychlostně regulovatelného generátoru (DFIG) je možnost regulování výkonu v režimu čerpání a tím přispívat k regulaci frekvence v ES. PVE je tedy schopna pracovat i při částečném zatížení. Díky regulaci otáček je možno zachycovat i nízké hladiny přebytku výkonu v elektrické síti (ES) [17; 18; 20].

Tento aspekt rychlostně nastavitelných generátorů je činní atraktivní pro použití ve spojení s obnovitelnými zdroji energie. Kde je možné pomocí rychlostně regulovatelné PVE kompenzovat výrobu a výkyvy těchto zdrojů elektrické energie a zlepšit jejich integraci do ES [20; 21].

U PVE, které nevyužívají regulovatelné generátory, nelze výkon elektrárny v čerpadlovém režimu regulovat. Pro zvýšení flexibility a regulace se dá využít použití většího množství čerpadel. Které lze podle potřeby vypínat/zapínat do provozu. Řešení využívající rychlostně regulovatelný generátor má však výrazné výhody oproti řešení s více čerpadly. Regulovatelné otáčky umožňují plynulé regulování výkonu dle požadavků elektrické sítě. Čímž se omezí potřeba častých start/stop sekvencí čerpadel. Dochází k efektivnějšímu uskladnění přebytku energie v podobě hydraulické akumulace energie (vody), než při použití synchronních generátorů. Na obrázku (Obr. 17) jsou graficky znázorněny výhody použití rychlostně nastavitelných PVE [17; 18; 20].



Obr. 17 Čerpadlový provoz PVE [17]

### 2.8.6 Použití DFIG k výrobě elektrického napětí/energie s pevnou frekvencí

Dalším z důvodů použití DFIG je obecně snaha generovat třífázové napětí, jehož výstupní frekvence  $f_{Stator}$  je konstantní a zároveň je rovna frekvenci sítě  $f_{Sítě}$  ke které je generátor zapojen. I přes kolísání mechanické energie přiváděné do generátoru pomocí rotoru (např. rotor větrných turbín, rotor vodních turbín apod.). K dosažení tohoto účelu, musí být průběžně regulována frekvence budícího proudu  $f_{Rotor}$  přiváděného do rotoru DFIG, aby generátor dokázal vyrovnávat kolísání rychlosti rotoru  $n_{Rotor}$ .

Frekvence budícího proudu  $f_{Rotor}$ , který je třeba přivádět do rotorového vinutí pro udržení konstantní frekvence na výstupu z generátoru  $f_{Stator}$  (stejnou jako frekvence sítě  $f_{Sítě}$ ) závisí na rychlosti otáčení rotoru generátoru  $n_{Rotor}$  a může být vypočten z následující rovnice (2.5).

$$f_{Rotor} = f_{Sítě} - \frac{n_{Rotor} \cdot p}{60} \quad (2.5)$$

kde:  $f_{Rotor}$  je frekvence střídavého budícího proudu který je nutno dodávat do rotoru DFIG aby výstupní frekvence generátoru se rovnala frekvenci sítě ke které je generátor připojen  $f_{Stator} = f_{Sítě}$  (Hz).

$f_{Sítě}$  je frekvence střídavé elektrické sítě, ke které je generátor připojen (Hz)

$p$  je počet pólových dvojic DFIG (-)

Použitím rovnice (2.5), je možné vypočítat, že pokud se generátor otáčí v nominálních (synchronních) otáčkách  $n_s$ , frekvence budícího proudu  $f_{Rotor}$  dodávaného do rotoru se rovná 0 Hz (tj. stejnosměrný proud). Generátor se pak celkově chová jako klasický synchronní třífázový generátor.

Když rychlost rotoru generátoru  $n_{Rotor}$  klesne pod nominální synchronní rychlost  $n_s$ , frekvence budícího proudu  $f_{Rotor}$  který je třeba dodat do vinutí rotoru generátoru se odpovídajícím způsobem zvýší a bude mít kladnou polaritu. Kladná polarita frekvence budícího proudu  $f_{Rotor}$  označuje, že magnetické pole vytvořené budícím proudem, který musí být přiváděn do rotoru, se otáčí ve stejném směru jako rotor generátoru, jak je znázorněno na Obr. 4-a.

Obdobně platí, že když se rychlost rotoru generátoru  $n_{Rotor}$  zvětší nad nominální synchronní rychlost  $n_s$ , frekvence budícího proudu  $f_{Rotor}$ , který je třeba dodat do vinutí rotoru generátoru se odpovídajícím způsobem zvýší a má zápornou polaritu. Ta záporná polarita kmitočtu  $f_{Rotor}$  značí, že magnetické pole, vytvářené budícím proudem v rotoru, se otáčí ve směru opačném než rotor generátoru. Toto je znázorněno na Obr. 4-b.

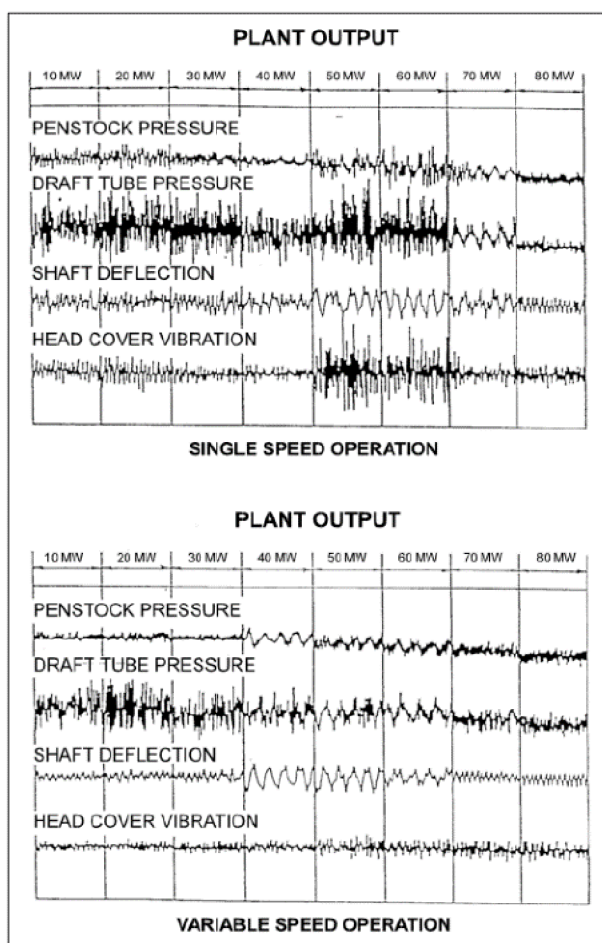
Je-li k výrobě střídavého proudu použit DFIG pro zajištění konstantní frekvence sítě  $f_{Sítě}$ , jakákoliv odchylka rychlosti rotoru  $n_{Rotor}$  od synchronní rychlosti generátoru  $n_s$ , je kompenzována nastavením frekvence budícího proudu  $f_{Rotor}$  dodávaného do rotorového vinutí tak, aby výstupní frekvence generátoru  $f_{Stator}$  zůstávala stejná jako frekvence sítě  $f_{Sítě}$  ke které je generátor připojen.

Jinými slovy, frekvence budícího proudu  $f_{Rotor}$  je upravena tak, aby rychlost magnetického pole procházející státorem  $n_{\phi, stator}$  zůstávala konstantní [9; 10].

### 2.8.7 Snížení vibrací a opotřebení soustrojí

Vibrace hydraulického soustrojí PVE jsou vážné doprovodné jevy, zejména u soustrojí pracující synchronní rychlostí. Určité nastavení rozváděcích lopatek může vyvolat nežádoucí vztah mezi úhlem proudu vody opouštějící rozváděcí lopatky turbíny a vstupním úhlem lopatek turbíny, což má za následek vibrace a kavitace na náběžné hraně. Navíc Francisovi turbíny jsou nechvalně proslulé svými rázy v savce turbíny při částečném zatížení (přibližně mezi 35 % až 60 % otevření rozváděcích lopatek). Tyto rázy v savce mohou být natolik intenzivní, že mohou způsobit vypnutí celého soustrojí, pokud je v turbíně nainstalováno zařízení pro monitorování vibrací. Dále pokud je turbína provozována delší dobu za těchto nevhodných podmínek může dojít k vážnému poškození a snížení životnosti turbíny.

Na základě zkušeností z měření v PVE Yagisawa lze usoudit, že tyto problémy lze částečně eliminovat použitím DFIG. Jelikož použití DFIG vykazuje menší vibrace soustrojí Francisovi turbíny, než při použití synchronního generátoru (Obr. 18) [5].



Obr. 18 Srovnání velikosti tlakové pulzace a vibrací v PVE Yagisawa při použití synchronního generátoru a DFIG [5]

*Penstock pressure* – tlak v přivaděči

*Draft tube pressure* – tlak v savce turbíny

*Shaft deflection* – vibrace hřídele

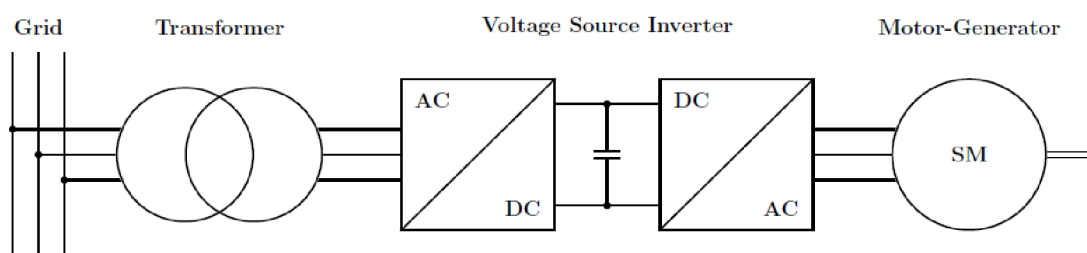
*Head cover* – vibrace vika turbíny

### 3 SYNCHRONNÍ GENERÁTOR S FREKVENČNÍM MĚNIČEM

Jak již bylo zmíněno na začátku bakalářské práce, u PVE se dá dosáhnout řízení otáček generátoru dvěma způsoby, a to použitím generátoru:

- s frekvenčním měničem na plný výkon generátoru – CFIG
- s frekvenčním měničem na částečný výkon generátoru – DFIG

V případě použití synchronního generátoru s frekvenčním měničem na plný výkon generátoru (CFIG) je generátor připojen k elektrické síti právě přes tento měnič (Obr. 19). Díky tomuto zapojení, kde není generátor spojen přímo se sítí, je možné, aby generátor pracoval na rozdílných frekvencích než elektrická síť. Díky tomu je možné frekvenčním měničem měnit plynule otáčky generátoru ve velkém rozsahu.



Obr. 19 Blokové schéma zapojení synchronního generátoru s frekvenčním měničem [47]

Velkou výhodou CFIG je obdobně jako u DFIG možnost regulovat otáčky generátoru a tím dosahovat lepších parametrů celé elektrárny obdobně, jak bylo popsáno u DFIG v předchozí kapitole. Ovšem použití CFIG má oproti DFIG dodatečné výhody, jako:

- regulace otáček je možná v rozmezí 0–100 %
- rychlejší najetí generátoru
- možnost startu při zaplavení turbíny vodou vzhledem k významnému točivému momentu při nulových otáčkách CFIG
- jednodušší použití u stávajících PVE využívajících synchronní generátory
- možnost přemostit měnič a využívat oba režimy:
  - Synchronní režim – bez frekvenčního měniče (přemostěný)
  - Rychlostně nastavitelný režim – s frekvenčním měničem

Naopak obrovskou nevýhodou použití této technologie je velmi vysoká cena frekvenčního měniče, který musí být dimenzován na maximální výkon generátoru. Dalším problémem je zvýšení celkových ztrát a nulová přetížitelnost. Zkratový příspěvek do sítě je dán maximálním jmenovitým výkonem měniče. Z těchto důvodů se technologie CFIG, i přes svoje výhody, používá zejména u menších vodních děl (do 100 MW), kde nejsou tak vysoké pořizovací náklady na měnič. U PVE dosahujících vyšších výkonů jak 100 MW, je tedy mnohem výhodnější použití technologie DFIG. Která sice nedosahuje takových výhod jako technologie CFIG, ale nároky na frekvenční měnič jsou mnohem menší (nejčastěji 30 % jmenovitého výkonu generátor) [20; 22].

## 4 REŠERŠE POUŽITÍ DFIG VE SVĚTĚ

V následující kapitole je provedena zahraniční rešerše o použití DFIG u PVE. Jedná se o rešerši pouze zahraničních dat, jelikož na území České republiky v současné době, ani v minulosti, nebyla technologie DFIG u PVE použita.

Vzhledem k problematickému dohledávání dat konkrétních PVE. Jsou některé PVE zmíněny pouze v závěrečném shrnutí (Tabulka 4.17).

### 4.1 PVE Narude – Japonsko

V PVE Narude se uskutečnil pilotní projekt technologie PVE s využitím DFIG (blok č.2). Projekt byl uveden do provozu roku 1987. Výrobu a instalaci generátoru zajišťovala firma Hitachi. Provozovatelem elektrárny byla společnost Kansai Electric Power Company (KEPCO). Elektrárna byla zpočátku provozována zejména v generátorovém režimu, aby se prokázala proveditelnost technologie DFIG u PVE. Pilotní projekt PVE Narude byl průkopnickým úspěchem a vedl k rozvoji velkých PVE využívající technologie DFIG [5; 16].

Tabulka 4.1 Technické parametry DFIG v PVE Narude [5; 16]

Blok	Uvedení do provozu	Čerpadlo (MW)	Generátor (MVA)	Rychlostní rozsah (ot/min)	Synchronní rychlost (ot/min)	Frekvence (Hz)	Rychlostní rozsah (%)	Typ měniče
č. 2	1987	18,5	22	190-210	200	60	+/- 5	Cyklokonvertor

### 4.2 PVE Yagisawa – Japonsko

Světově první komerční použití asynchronního generátoru s dvojitým napájením bylo realizováno u PVE Yagisawa [7; 5]. Konkrétně u generátorového bloku č. 2. Tento blok byl uveden do provozu v 15. prosince roku 1990 v Tokiu. K ovládání a řízení systému elektrárny Yagisawa bylo využíváno vektorového řízení motor – generátoru. Použitím DFIG bylo možné regulovat výkon v čerpadlovém režimu. Čehož se u konvekčních PVE využívajících synchronní generátory nedalo dosáhnout. Tento systém rychlostně regulovatelného generátoru byl úspěšně provozován přes dva roky. Při tomto provozu, jelikož se jedná o první komerční provoz na světě, bylo prováděno mnoho měření a simulací s ohledem na zjištění výhodnosti použití tohoto typu generátoru v širším využití u PVE [23].

Vlastníkem a provozovatelem PVE Yagisawa je společnost Tokyo Electric Power Company (TEPCO). Výrobu DFIG pro elektrárnu zajišťovala firma Toshiba [5; 10].

#### 4.2.1 Systémová konfigurace PVE Yagisawa

Základ systému PVE Yagisawa tvořila reverzní turbína, motor – generátor a přímý měnič frekvence (cyklokonvertor) a další řídicí systémy. Pro buzení rotorového vinutí byl konkrétně použit 12-ti pulzní cyklokonvertor. Jeho výkon dosahoval 25,8 MVA a jednalo se v té době o největší cyklokonvertor na světě [23].



### 4.2.2 Technické parametry PVE Yagisawa

V Tabulka 4.2 jsou shrnuty základní technické parametry PVE Yagisawa, konkrétně bloku elektrárny realizovaného pomocí DFIG.

Tabulka 4.2 Technické parametry DFIG v PVE Yagisawa [5; 16; 23]

Blok	Uvedení do provozu	Čerpadlo (MW)	Generátor (MVA)	Rychlostní rozsah (ot/min)	Synchronní rychlost (ot/min)	Frekvence (Hz)	Rychlostní rozsah (%)	Typ měniče
č. 2	1990	53-82	85	130-156	150	50	+ 4/- 13	Cyklokonvertor

Použití DFIG u PVE Yagisawa přispěl ke zlepšení regulace frekvence v elektrické rozvodné síti. Systém od svého uvedení do provozu (15. prosince 1990) do května roku 1992 byl v provozu celkem 3960 hodin. Z toho 2120 v generátorovém režimu a 1840 v čerpadlovém režimu. Což je výrazně více jak ostatní bloky elektrárny využívající synchronní generátory (Tabulka 4.3). Hlavní důvody, proč je provozní doba bloku využívající DFIG (blok č.2) delší než u jednotek využívající konvenční synchronní generátory (blok č.1 a č.3) jsou zlepšení účinnosti v generátorovém režimu a možnost regulace frekvence v čerpadlovém režimu.

Tabulka 4.3 Provozní hodiny PVE Yagisava od uvedení do provozu do května 1992 [23]

Režim \ Blok	DFIG	Bloky s konstantní rychlostí	
	blok č.2	blok č. 1	blok č. 3
Generátorový	2120 h	1350 h	1690 h
Čerpadlový	1840 h	1030 h	490 h
Celkově	3960 h	2380 h	2180 h

### 4.3 PVE Okawachi – Japonsko

PVE Okawachi je první PVE navrhnutá primárně pro použití rychlostně regulovatelné technologie využívající DFIG. V elektrárně jsou instalovány celkem 4 bloky. První dva (blok č.1 a č.2) využívají konvenčních synchronních generátorů. Bloky č. 3 a č.4 jsou realizovány použitím DFIG [5]. První z nich byl spuštěn do provozu v lednu roku 1993. Jednalo se o nejvýkonnější DFIG použitý u PVE (údaj z roku 1996). Tyto výkonné generátory představují výsledek výzkumných a vývojových projektů za 13 let. Základní parametry použitých DFIG je uvedeno v Tabulka 4.4 [24].

Provozovatelem elektrárny je společnost Kansai Electric Power Company (KEPCO). Výrobu DFIG pro elektrárnu zajišťovala firma Hitachi [10].

Tabulka 4.4 Technické parametry DFIG v PVE Okawachi [DFIG 39,41] [5; 16]

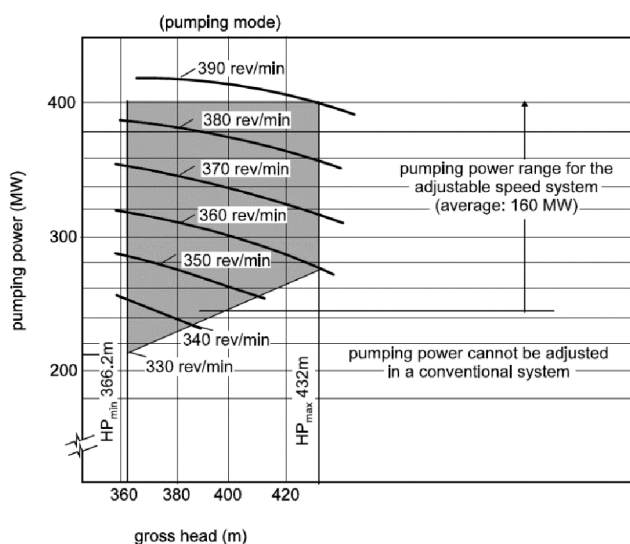
Blok	Uvedení do provozu	Čerpadlo (MW)	Generátor (MVA)	Rychlostní rozsah (ot/min)	Synchronní rychlost (ot/min)	Frekvence (Hz)	Rychlostní rozsah (%)	Typ měniče
č. 3	1993	331-392	395	330-390	360	60	+/- 8	Cyklokonvertor
č. 4	1995	240-392	395	330-390	360	60	+/- 8	Cyklokonvertor

### Operační rozsah v čerpadlovém režimu

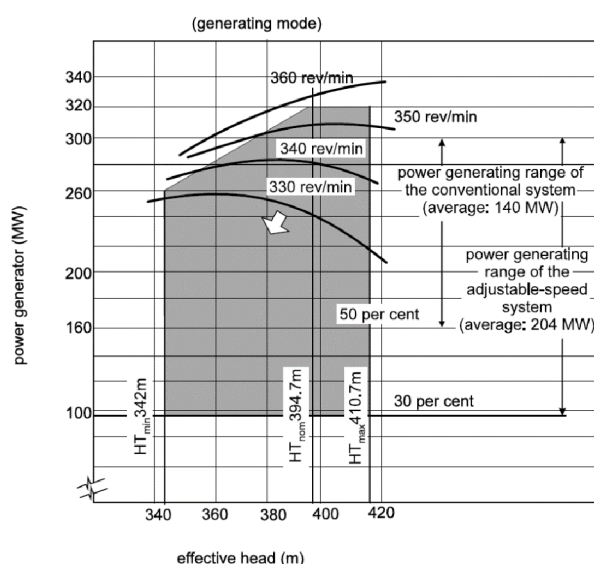
Na Obr. 20 je zobrazen čerpadlový provozní rozsah bloku č. 4 PVE Okawachi který je realizován pomocí DFIG. Tento blok elektrárny je schopen v čerpadlovém provozu pracovat od 240 do 392 MW. Rychlost jednotky může být regulovaná v rozsahu 330 až 390 ot/min. což odpovídá regulaci +/- 8% od synchronní rychlosti 360 ot/min [5].

### Operační rozsah v generátorovém režimu

Na Obr. 21 je zobrazen turbínový provozní rozsah DFIG jednotky u PVE Okawachi. Pro synchronní generátor s instalovaným výkonem 395 MVA (320 MW pro účinník 81 %) je generátor schopen pracovat v rozsahu od 160 MW do 320 MW. Při použití DFIG je pracovní rozsah od 90 MW do 320 MW, provozní rozsah DFIG je tedy o 70 MW větší než při použití synchronního generátoru. Rychlost generátoru může být regulována v rozsahu 330 až 390 ot/min. což odpovídá regulaci +/- 8 % od synchronní rychlosti 360 ot/min [5].



Obr. 20 Čerpadlový provozní rozsah bloku č.4 v PVE Okawachi [5]



Obr. 21 Turbinový provozní rozsah PVE Okawachi [5]

## 4.4 PVE Omarugawa – Japonsko

PVE Omarugaewa je Japonská PVE nacházející se v prefektuře Miyazaki. Výstavba elektrárny započala roku 1997. Elektrárna disponuje čtyřmi soustrojími turbína – generátor (reverzibilní Francisovi turbíny). Všechny tyto generátory jsou realizované jako DFIG. První komerční spuštění prvního bloku elektrárny proběhlo v roce 2007. V následujících letech byly dostavěny a uvedeny do provozu další tři bloky elektrárny. Poslední blok byl uveden do provozu roku 2011. Konkrétní parametry každého bloku elektrárny včetně typů měniče a uvedení do provozu je uvedeno v Tabulka 4.5 [7].

Provozovatelem elektrárny je společnost Kyushu Electric Power Company (Kyushu EPco). Výrobu DFIG č. 1 a č. 4 zajišťovala společnost Hitachi. Bloky č. 2 a č.3 zajišťovala společnost Mitsubishi [10].

Tabulka 4.5 Technické parametry DFIG v PVE Omarugawa [5; 16]

Blok	Uvedení do provozu	Čerpadlo (MW)	Generátor (MVA)	Rychlostní rozsah (ot/min)	Synchronní rychlost (ot/min)	Frekvence (Hz)	Rychlostní rozsah (%)	Typ měniče
č. 1	2010	330	350	576-624	600	60	+/- 4	GCT inv
č. 2	2011	330	345	576-624	600	60	+/- 4	Cyklokonvertor
č. 3	2008	330	345	576-624	600	60	+/- 4	GCT inv
č. 4	2007	310	340	576-624	600	60	+/- 4	Cyklokonvertor

GCT – Gate Commutated Turn off thyristor inverter

## 4.5 PVE Okutataragi – Japonsko

Provoz PVE Okutataragi začal v červenci roku 1975 s maximálním výkonem 1 212 MW (4x303 MW). Vzhledem ke zvýšení nároků na zlepšení spolehlivosti PVE byli zavedeny dvě nové jednotky o výkon 2x360 MW. Elektrárny tedy dosahovala maximálního výkonu 1932 MW a řadila se mezi největší PVE v Japonsku. Pro zlepšení regulace elektrické sítě a zlepšení ekonomické efektivity byli jednotky č. 1 a č. 2 modernizovány. Synchronní generátory nahradili rychlostně říditelné generátory – DFIG. Jejich parametry jsou uvedeny v Tabulka 4.6. Výrobu generátorů zajišťovala firma Hitachi [25; 26].

Tabulka 4.6 Technické parametry DFIG v PVE Okutataragi [25; 26]

Blok	Uvedení do provozu	Čerpadlo (MW)	Generátor (MVA)	Rychlostní rozsah (ot/min)	Synchronní rychlost (ot/min)	Frekvence (Hz)	Rychlostní rozsah (%)	Typ měniče
č.1	2018	320	350	285-315	300	60	+/- 5	Cyklokonvertor
č. 2	2019	320	350	285-315	300	60	+/- 5	Cyklokonvertor

## 4.6 PVE Kyogoku – Japonsko

PVE Koygoku leží na nejsevernějším ostrovu Japonska. Hokkaido je ostrovní systém s významnou produkcí solárních a větrných elektráren. V tomto důsledku dochází k nepředvídatelným výkyvům výkonů v elektrizační soustavě v důsledku rychle se měnícího větru a mraků. Z tohoto důvodu bylo nutno zlepšit požadavky na regulaci sítě. Zlepšení regulačních schopností bylo dosaženo použitím DFIG u jednoho soustrojí v PVE Kyogoku [25].

V elektrárně jsou instalovány celkem tři soustrojí turbína – generátor. Jedno soustrojí je realizováno jako DFIG (Tabulka 4.7) a další dvě jednotky jsou konvekčního typu (pomocí synchronní generátor). Celkový výkon elektrárny je 600 MW [7].

Provozovatelem elektrárny je Hokkaido Electric Power Company (Hokkaido EPCo) v Hokkaido Koygoku-cho. Výrobu DFIG realizovala firma Toshiba [10].

Tabulka 4.7 Technické parametry DFIG v PVE Kyogoku [5; 16]

Blok	Uvedení do provozu	Čerpadlo (MW)	Generátor (MVA)	Rychlostní rozsah (ot/min)	Synchronní rychlost (ot/min)	Frekvence (Hz)	Rychlostní rozsah (%)	Typ měniče
č. 1	2015	230	230	475-525	500	50	+/-5	IEGT inv.

IEGT inv. = Gate Turb-off Thyristor inverter

## 4.7 PVE Kazunogawa – Japonsko

PVE Kazunogawa se řadí mezi elektrárny s největším spádem na světě (782 m) a zároveň mezi nejvýkonnější PVE na světě. Jedná se o Japonskou PVE ležící v prefektuře Yamanashi. Výstavba elektrárny byla zahájena roku 1991. Elektrárna disponuje celkově čtyřmi bloky. Kde bloky č. 1 a 2. jsou realizovány konvekčním synchronním generátorem. Jejich stavba byla dokončena roku 1999 a 2000. Bloky č. 3 a 4. byly navrženy jako DFIG. Finální kapacita elektrárny je 1600 MW pro čtyři bloky. Pro všechny bloky byla použita reverzibilní Francisova turbína. Konkrétní parametry bloků elektrárny využívající technologii DFIG jsou uvedeny v Tabulka 4.8 [7].

Provozovatelem elektrárny je Tokyo Electric Power Company (TEPCO). Výrobu DFIG realizovala firma Toshiba [10].

Tabulka 4.8 Technické parametry DFIG v PVE Kazunogawa [5; 16]

Blok	Uvedení do provozu	Čerpadlo (MW)	Generátor (MVA)	Rychlostní rozsah (ot/min)	Synchronní rychlost (ot/min)	Frekvence (Hz)	Rychlostní rozsah (%)	Typ měniče
č. 3	2014	460	475	475-525	500	50	+/-5	GTO inv.
č. 4	2015	460	475	475-525	500	50	+/-5	GTO inv.

GTO inv. = Gate Turb-off Thyristor inverter

## 4.8 PVE Nant de Drance – Švýcarsko

Nant de Drance je PVE využívající dvou přírodních akumulčních nádrží, jezera Emmosson a Vieux-Emmosson. Stavba elektrárny byla zahájena roku 2008. V elektrárně je instalováno celkem 6 soustrojí turbína – generátor využívajících reverzibilních Francisových turbín. Všechna 6 soustrojí je realizováno pomocí DFIG (Tabulka 4.9). Celkový výkon elektrárny je 900 MW (6 x 150 MW). Výrobu a montáž všech šesti DFIG zajišťovala firma ALSTOM [18].

Elektrárna je majetkem společnosti Nant de Drance SA, konsorcia společnosti Alpiq (39%), SBB (36%), Industrielle Werke Basel (IWB) (15%) a Forces Motrices Valaisannes (FMV) (10%) [18].

Tabulka 4.9 Technické parametry DFIG v PVE Nant de Drance [5; 16; 18]

Blok	Uvedení do provozu	Čerpadlo (MW)	Generátor (MVA)	Rychlostní rozsah (ot/min)	Synchronní rychlost (ot/min)	Frekvence (Hz)	Rychlostní rozsah (%)	Typ měniče
č. 1-6	2016	154,7	170	399-459	428,6	50	+/- 7	IGBT VSI

IGBT VSI – Insulated Gate Bipolar Transistor Voltage Source Inverters

## 4.9 PVE Linthal – Limmern – Švýcarsko

Elektrárny patřící společnosti Linthal – Limmern AG jsou systém vodních elektráren vybudovaný v letech 1957 až 1968 umístěných jižně od Linthal v kantonu Glarus ve Švýcarsku. Systém využívá pět nádrží a čtyři elektrárny v různých variacích nadmořské výšky.

V letech 2015-2016 proběhla modernizace jedné ze čtyř elektráren komplexu, konkrétně PVE Limmern. Jednalo se o nainstalování 4 nových soustrojí turbína – generátor realizovaných pomocí reverzibilních turbín (Francisovi) a DFIG. Čímž se celkový výkon PVE Limmern zvýšil o 1000 MW (4x 250 MW). Konkrétní popis parametrů použitých DFIG je uveden v Tabulka 4.10. Výrobu a instalaci všech 4 DFIG zajišťovala firma ALSTOM [18].

Tabulka 4.10 Technické parametry DFIG v PVE Linthal – Limmern [5; 16; 18]

Blok	Uvedení do provozu	Čerpadlo (MW)	Generátor (MVA)	Rychlostní rozsah (ot/min)	Synchronní rychlost (ot/min)	Frekvence (Hz)	Rychlostní rozsah (%)	Typ měniče
č. 1-4	2015-2016	250	280	470-530	500	50	+/- 6	IGBT VSI

IGBT VSI – Insulated Gate Bipolar Transistor Voltage Source Inverters

## 4.10 PVE Goldisthal – Německo

PVE Goldisthal ležící na řece Schwarza je se svým celkovým výkonem 1 060 MW (4 x 265 MW) největší PVE v Německu, zároveň se jedná o nejmodernější PVE v Evropě. Výstavba elektrárny byla zahájena v září roku 1997, komerční provoz zahájila v říjnu roku 2004. Projekt Goldisthal je jedinečný v tom, že se jedná o první PVE v Evropě vybavenou technologií DFIG. Elektrárna disponuje celkem čtyřmi soustrojími turbína – generátor. Přičemž dva bloky (blok č. 1 a č. 4) jsou realizovány pomocí DFIG (Tabulka 4.11). Zbylé dva bloky (č. 2 a č. 3) jsou realizovány konvenčními synchronními generátory. Návrh, realizaci a montáž všech čtyř generátorů instalovaných v elektrárně zajistila firma Andritz VA Tech Hydro. Provozovatelem elektrárny je společnost Vereinigte Energiewerke AG (VEAG) předchůdce Vattenfall Europe [27].

Tabulka 4.11 Technické parametry DFIG v PVE Goldisthal [5; 16]

Blok	Uvedení do provozu	Čerpadlo (MW)	Generátor (MVA)	Rychlostní rozsah (ot/min)	Synchronní rychlost (ot/min)	Frekvence (Hz)	Rychlostní rozsah (%)	Typ měniče
č. 1	2004	190-290	351	300-346,6	333	50	+4/- 10	Cyklokonvertor
č. 4	2004	190-290	351	300-346,6	333	50	+4/- 10	Cyklokonvertor

### Použití DFIG poskytuje PVE Goldisthal několik výhod:

- Možnost regulace výkonu během čerpání
- Zlepšení účinnosti při provozu s částečným zatížením
- Vyšší dynamické řízení dodávané energie pro stabilizaci elektrické sítě

### Rozšíření regulačního rozsahu:

Jak již bylo zmíněno, v PVE Goldisthal jsou instalovány celkem 4 soustrojí a dvě z nich jsou realizované pomocí synchronních generátorů a dvě pomocí DFIG. Konkrétně DFIG s možností regulace otáček rotoru od 90 % do 104 % synchronní rychlosti.

#### **Turbínový režim:**

Klasické synchronní generátory umožňují v turbínovém režimu regulaci od 100 MW do 265 MW DFIG umožňují regulaci od 40 MW do 265 MW, poskytují tedy o 60 MW víc regulace v turbínovém režimu. To umožňuje PVE využít nižší základní výkon 40 MW. Což šetří vodu pro pozdější výrobu.

#### **Čerpadlový režim:**

Naproti tomu v čerpadlovém režimu synchronní generátory neposkytují žádnou regulaci – jsou schopny pracovat pouze na jmenovitém výkonu. Oproti tomu DFIG umožňují regulaci od 190 MW do 290 MW čímž nám vznikne regulační pásmo 100 MW.

**Výběr generátorů:**

I přes jasné výhody použití DFIG místo konvenční synchronní generátoru provedla společnost VAEG značná šetření, aby zjistila, kolik jednotek s proměnou rychlostí bude nutné nainstalovat. Nakonec se společnost rozhodla nainstalovat dvě soustrojí s DFIG a dvě s konvenčním synchronním generátorem.

Toto rozhodnutí bylo založeno na mnoha důvodech:

1. Nejprve výpočty naznačili, že společnost potřebuje v čerpadlovém provozu regulaci asi 200 MW, který jsou schopné poskytnou dvě soustrojí s DFIG.
2. Nadále se vzalo v úvahu, že DFIG nejsou schopny restartovat systém během výpadku napájení (start ze tmy), jelikož potřebují podporu ze sítě. V důsledku toho byli nainstalovány dvě soustrojí s konvenčními synchronními generátory pro případ výpadku proudu.
3. A v neposlední řadě k výběru generátorů přispělo to, že se jednalo o první použití DFIG u PVE v Evropě. Čili žádná společnost v Evropě neměla zkušenosti s provozováním DFIG velkého výkonu u PVE, proto společnost VEAG považovala instalaci všech čtyř soustrojí s DFIG jako příliš riskantní.

Konkrétní uspořádání generátorů v PVE Goldisthalu je rozděleno zrcadlově na dvě poloviny. Přičemž každá část obsahuje jeden synchronní generátor a jeden DFIG. To umožňuje operátorům kdykoliv odpojit polovinu zařízení z provozu za účelem údržby, zatímco druhá polovina pokračuje v provozu.

**Zkušenosti za dobu provozu:**

- Od roku uvedení do provozu (2004) stroje s proměnou rychlostí (DFIG) pracují v primární i sekundární regulaci ES v průměru 19 hodin denně. Navíc při provozu s částečným zatížením dosahují tyto jednotky účinnost až o 10 % vyšší než konvenční synchronní generátory.
- DFIG lze navíc rychleji spustit (přifázovat k síti), protože k jejich synchronizaci není nutné dosáhnout pevné rychlosti otáčení. Již od 95% plné synchronní rychlosti frekvenční měnič reguluje své parametry na aktuální rychlost a uvolňuje jednotku k synchronizaci/přifázování.
- Každý den se v průměru využívá asi 70 % pracovního schopnosti elektrárny [27].

## 4.11 PVE Ley Cheylas – Francie

Le Cheylas je první PVE na světě, kde došlo k modernizaci synchronního generátoru na DFIG. Elektrárna se nachází poblíž Grenoble ve Francouzských Alpách. Svůj provoz začala roku 1979. Jako většina PVE využívala konvenčních synchronní generátorů, konkrétně dvou bloků o celkovém výkonu 480 MW (2x 240 MW). V roce 2016 byl jeden blok elektrárny odstaven, přičemž došlo k modernizaci synchronního generátoru na DFIG (Tabulka 4.12). Po dokončení modernizace je elektrárna schopna regulovat svůj výkon v čerpadlovém režimu v rozsahu 70 MW. Modernizace také zlepšila celkovou provozní účinnost elektrárny a zvýšila tak celkový vyrobený výkon v průměru o 45 GWh ročně [16].

Modernizací PVE Le Cheylas se ukázalo, že modernizace existujícího synchronního generátoru na DFIG může být velmi účelným a ekonomicky efektivním řešením, jak zvýšit účinnost a regulaci PVE [28]. Výrobu generátorů zajišťovala firma ALSTOM. Vlastníkem a provozovatelem elektrárny je společnost Électricité de France (EDF) [16].

Tabulka 4.12 Technické parametry DFIG v PVE Le Chylas [28]

Blok	Uvedení do provozu	Čerpadlo (MW)	Generátor (MVA)	Rychlostní rozsah (ot/min)	Synchronní rychlost (ot/min)	Frekvence (Hz)	Rychlostní rozsah (%)	Typ měniče
č. 1	2017	250	-	279–321	300	50	+/- 7 %	-

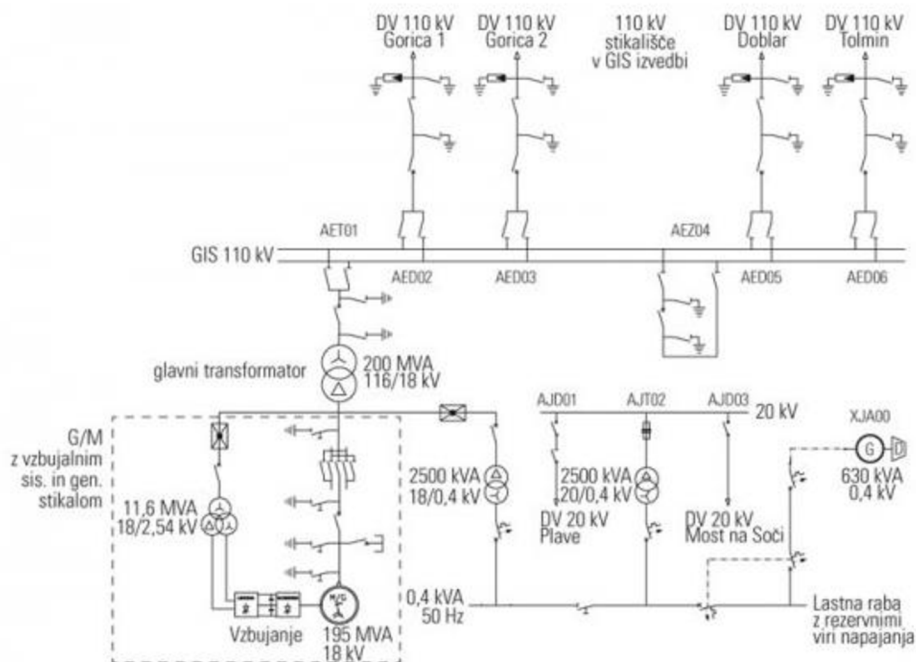
## 4.12 PVE Avče – Slovinsko

Po rozdělení bývalé Jugoslávie Slovinsko nemělo na svém území žádnou PVE. Až roku 2010 uvedla společnost Soške Elektranne Nova Gorica (SENG) do provozu PVE Avče. Elektrárna disponovala pouze jedním soustrojím turbína – generátor realizovaným pomocí DFIG (Tabulka 4.13). Komerční provoz elektrárny začal 1. dubna roku 2010. Výrobu generátorů zajišťovala firma Mitsubishi [10].

Tabulka 4.13 Technické parametry DFIG v PVE Avče [5; 16]

Blok	Uvedení do provozu	Čerpadlo (MW)	Generátor (MVA)	Rychlostní rozsah (ot/min)	Synchronní rychlost (ot/min)	Frekvence (Hz)	Rychlostní rozsah (%)	Typ měniče
č. 1	2012	125-180	195	576-636	600	50	+6/-4 %	GCT inv





Obr. 22 Schéma zapojení PVE Avče [43]

### 4.13 PVE Frades II – Portugalsko

PVE Frades II se nachází přibližně 40 km severovýchodně od Braga, na severu Portugalska. Elektrárna nebyla navržena pro samostatnou činnost, ale jako součást kaskádního systému Cávado-Rabagão-Homem. PVE Frades II disponuje dvěma DFIG (Tabulka 4.14) Jedná se o první použití DFIG technologie u PVE v Portugalsku a zároveň se jedná o nejvýkonnější DFIG použité v Evropě. Výrobce generátorů je firma Voith a provozovatelem elektrárny je společnost Energias de Portugal (EDP).

Začátkem roku 2015 byla elektrárna uvedena do provozu. Fungovala hlavně jako flexibilní rezerva v kombinaci s proměnlivým výkonem větrných elektráren. Jelikož v Portugalsku je velká část elektrické energie získávána z obnovitelných zdrojů energie – větru. V roce 2016 byl instalovaný výkon větrných elektráren v Portugalsku větší než 5 000 MW. Výrobce generátorů je firma Voith [29; 30; 31].

Tabulka 4.14 Technické parametry DFIG v PVE Frades II [29]

Blok	Uvedení do provozu	Čerpadlo (MW)	Generátor (MVA)	Rychlostní rozsah (ot/min)	Synchronní rychlost (ot/min)	Frekvence (Hz)	Rychlostní rozsah (%)	Typ měniče
č.1,2	2015	383	419,5	-	364	50	-	VSI

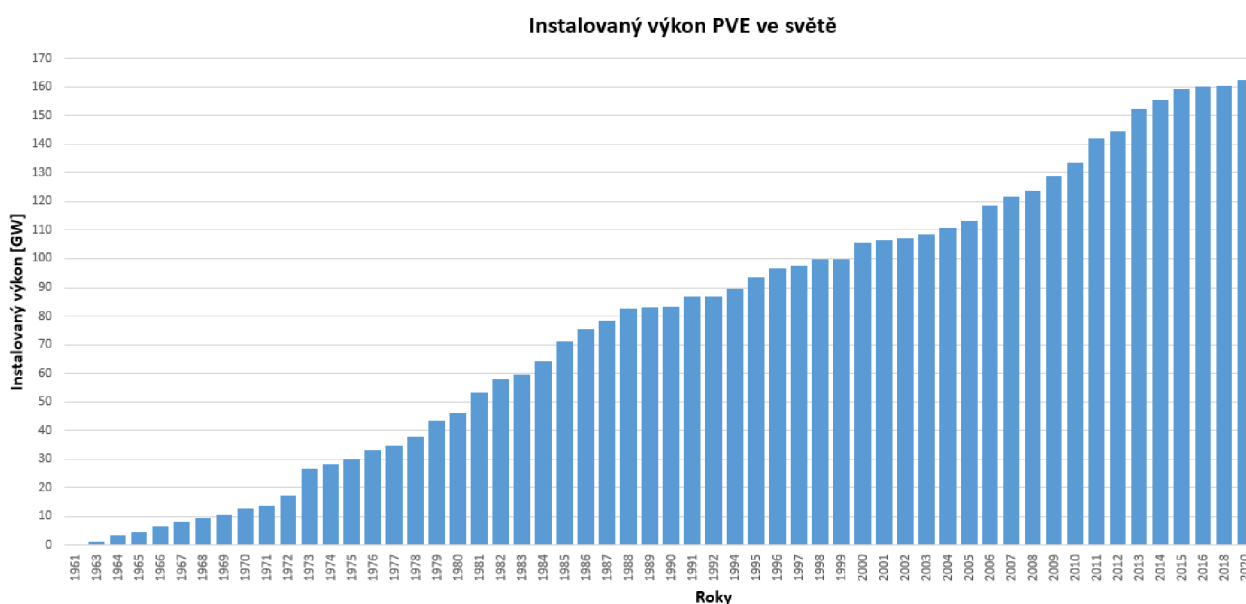
VSI – Voltage Source Inverter

## 4.14 Shrnutí PVE ve světě

Celosvětově je v provozu nebo ve výstavbě přes 290 PVE. To představuje celkový instalovaný výkon přes 160 GW. Z těchto 290 PVE je 36 PVE realizováno pomocí generátorů se schopností regulovat svoje otáčky. Jak již vyplývá z provedené zahraniční rešerše (kapitola 4) je drtivá většina rychlostně regulovatelných PVE provozována na území Japonska, Indie a Evropy. Technologie DFIG byla vyvinuta, testována a poprvé uvedena do provozu v Japonsku, kde je tento typ generátorů již hojně využíván díky čemuž Japonsko drží suverénně první místo v počtu použitých DFIG u PVE ve světě.

I přestože existují významné výhodu u PVE s proměnnými otáčkami, většina PVE vyvíjených po celém světě je i nadále realizována pomocí synchronních generátorů. K tomu existují různé důvody, včetně dodatečných nákladů na vybavení strojovny a pořízení dražšího DFIG [32].

Vzhledem k stále rostoucímu instalovanému výkonu PVE ve světě (Obr. 23) lze předpokládat, že bude docházet i v nadcházejících letech k výstavbě nových PVE. Dále se dá očekávat, že v řadě těchto nových PVE budou instalovány soustrojí využívající DFIG zejména díky jejich výhodám.



Obr. 23 Instalovaný výkon PVE ve světě [44]

### Přední světoví výrobci a dodavatelé technologie DFIG

Mezi přední světové výrobce, kteří se věnují problematice použití DFIG u PVE. Zejména výrobu a instalaci soustrojí čerpadlo/turbína, motor/generátor, budícího a řídicího systému pro rychlostně regulovatelné PVE patří zejména firmy [5]:

- Toshiba
- Hitachi
- Mitsubishi
- Andritz
- Alstom
- Converteam/GE
- ABB
- Voith

**Využití PVE s DFIG:**

Z japonských PVE a jejich záznamů provozu je patrné, že nasazování DFIG je zejména v čerpadlovém režimu (Tabulka 4.15). Vzhledem k jejich možnosti regulace výkonu v čerpadlovém režimu a schopnosti pracovat na nižším výkonu (efektivnější ukládání disponibilního objemu vody, jak je popsáno v kapitole 2.8.5). A naopak bloky se synchronním generátorem jsou využívány především pro generátorový režim. A to hlavně proto, aby se vyvážila celková provozní doba každého bloku PVE [7].

Tabulka 4.15 Záznam provozu/nasazování generátorů u Japonských PVE [7]

PVE	č. bloku	DFIG nebo SG	Čerpadlový provoz (h)	Generátorový provoz (h)	Počet startů čerpání	Počet startů generování
Yagisawa*	1	SG	0,6	1034	1	293
	2	DFIG	15	740	4	238
	3	SG	0,3	1084	1	259
Takami*	1	SG	56	2311	25	648
	2	DFIG	493	1470	155	490
Okawachi	1	SG	89	1384	34	259
	2	SG	83	1579	32	342
	3	DFIG	2450	1262	346	260
	4	DFIG	2372	1311	334	275
Shiobara	1	SG	210	997	57	238
	2	SG	250	864	65	251
	3	DFIG	1467	310	234	84
Okokiyotsu č.2	1	SG	282	1652	73	406
	2	DFIG	1832	773	304	191
Yanbaru	1	DFIG	1240	1200	226	343

\* PVE Yagisawa a Takami jsou PVE s vodním přítokem do horní nádrže pomocí řeky. Čímž je horní nádrž zásobována stálým přítokem a velmi významným přítokem v období dešťů. Díky tomu je u těchto PVE mnohem delší turbínový režim oproti čerpadlovému.

**Zajímavosti ze světa v souvislosti s DFIG:**

Tabulka 4.16 Zajímavosti ve světě v souvislosti s použitím DFIG u PVE [33]

PVE	Rok uvedení do provozu	Země	Zajímavost
Yagisawa	1990	Japonsko	První komerční použití DFIG
Goldisthal	2004	Německo	Největší cyklokonvertor ve světě
Okawachi	1993	Japonsko	Nejvýkonnější DFIG ve světě
Tehri	2015	Indie	PVE s největším spádem ve světě

Tabulka 4.17 Souhrn použití DFIG

Elektrárna	Země	Provozovatel elektrárny/ majitel	Výrobce generátoru	Blok	Uvedení do provozu	Čerpadlo (MW)	Generátor (MVA)	Rychlostní rozsah (ot/min)	Synchronní rychlost (ot/min)	Frekvence (Hz)	Rychlostní rozsah (%)	Typ měniče
Narude	Japonsko	KEPCO	Hitachi	č.2	1987	18,5	22	190-210	200	60	+/- 5	Cyklo-c
Yagisawa	Japonsko	TEPCO	Toshiba	č. 2	1990	53-82	85	130-156	150	50	+ 4/- 13	Cyklo-c
Takami	Japonsko	Hokkaido EPCo		č.2	1993	44-140	103	200-254	230,8	50	+/- 10	Cyklo-c
Okawachi	Japonsko	KEPCO	Hitachi	č. 3	1993	331-392	395	330-390	360	60	+/- 8	Cyklo-c
				č. 4	1995	240-400	395	330-390	360	60	+/- 8	Cyklo-c
Shiobara	Japonsko	KEPCO	-	č.3	1995	200-330	360	356-394	375	50	+/- 8	Cyklo-c
Okukiyotsu	Japonsko	EPDC	-	č.2	1996	212-240	345	407-450	428,6	50	+/- 5	GTO inv
Goldisthal	Německo	VEAG	Andritz	č. 1,4	2004	190-290	351	300-346,6	333	50	+4/- 10	Cyklo-c
Omarugawa	Japonsko	Kyushu EPco	Mitsubishi	č. 4	2007	310	340	576-624	600	60	+/- 4	Cyklo-c
				č. 3	2008	330	345	576-624	600	60	+/- 4	GCT inv
				č. 1	2010	330	350	576-624	600	60	+/- 4	GCT inv
				č. 2	2011	330	345	576-624	600	60	+/- 4	Cyklo-c
Avce	Slovinsko	SENG	Mitsubishi	č. 1	2012	125-180	195	576-636	600	50	+6/- 4	GCT inv
Kazunogawa	Japonsko	TEPCO	Toshiba	č. 3	2014	460	475	475-525	500	50	+/-5	GTO inv.
				č. 4	2015	460	475	475-525	500	50	+/-5	GTO inv.
Kyogoku	Japonsko	Hokkaido EPCo	Toshiba	č. 1	2015	230	230	475-525	500	50	+/-5	IEGT inv.
Linthal – Limmern	Švýcarsko	Linthal – Limmern AG	ALSTOM	č. 1-4	2015-2016	250	280	470-530	500	50	+/- 6	IGBT VSI
Frades II	Portugalsko	EDP	Voith	č.1,2	2015	383	419,5	-	364	50	-	VSI
Nant de Drance	Švýcarsko	Nant de Drance SA	ALSTOM	č. 1-6	2016	154,7	170	399-459	428,6	50	+/- 7	IGBT VSI
Tehri	Indie	THDC	ALSTOM	-	2015	250	259	214-250	230,8	50	+/- 8,3	-
Ley Cheylas	Francie	EDF	ALSTOM	č. 1	2017	250	-	279-321	300	50	+/- 7	-

## 5 VÝSTAVBA PVE V ČR

Jedním z největších úskalí výstavby nových PVE je jejich mohutnost a s tím spojené vysoké náklady na výstavbu a také citelný zásah do krajiny. I z tohoto hlediska se v České republice spíše investuje do již postavených PVE instalací výkonnějších a modernějších soustrojí [34].

### 5.1 Současné PVE v České republice

V současné době jsou v České republice v provozu tři PVE:

**Dlouhé Stráně** – Výstavba elektrárny byla zahájena v květnu roku 1978 a finální uvedení do provozu proběhlo roku 1996. Jedná se unikátní technologickou stavbu nejen v ČR ale i v Evropě. Elektrárna je držitelem třech „nej“. Je vybavena největší reverzní turbínou v Evropě (325 MW), zároveň je elektrárnou s největším spádem v ČR (510,7 m) a v neposlední řadě se jedná o největší přečerpávací vodní elektrárnu na území ČR o celkovém výkonu 650 MW (2x325 MW). Z čehož vyplývá že v elektrizační soustavě České republiky plní roli významného špičkového zdroje elektrické energie. Zároveň plní významnou funkci výkonové rezervy systému a v neposlední řadě slouží jako zdroj regulace výkonu a frekvence v elektrické soustavě [35].

**Dalešice** – PVE Dalešice byla vybudována na řece Jihlavě v letech 1970-1978 v souvislosti s výstavbou blízké jaderné elektrárny Dukovany, které zajišťuje dodávku tzv. technologické vody pro provoz. Dalešice jsou druhou největší (ze tří) přečerpávací vodní elektrárnou v ČR. Vzhledem k velmi rychlému najezení elektrárny na plný výkon (do 60 s) plní významnou úlohu při regulaci výkonu celostátního energetického systému a zároveň slouží jako okamžitá výkonová rezerva. V dnešní době je již elektrárna plně automatizovaná a ovládána z [36; 37]:

- Výrobního dispečinku elektrárenské společnosti ČEZ, a. s.,
- Nebo z dispečinku provozovatele přenosové soustavy ČEPS, a. s.

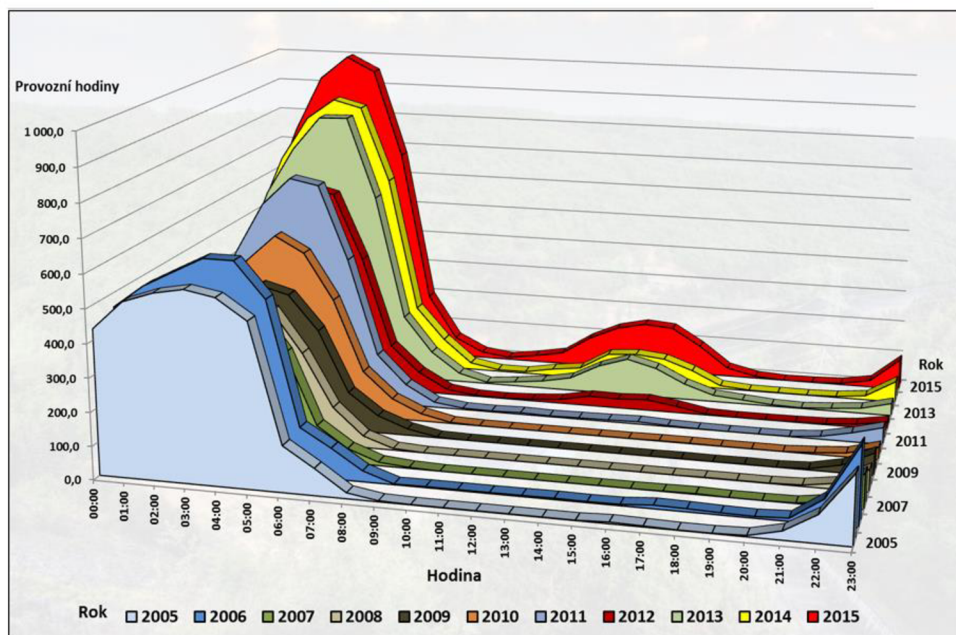
**Štěchovice II** – Elektrárna byla vybudována v letech 1941-1947 jako druhý článek vltavské kaskády. Vzhledem k zastaralosti elektrárny byla v roce 1991 odstavena a v letech 1991-1996 byla vystavěna nová a moderní PVE. Původní dvě soustrojí elektrárny nahradilo soustrojí jedno s reverzní Francisovou turbínou a motorgenerátorem o výkonu 45 MW [38].

Tabulka 5.1 Parametry přečerpávacích vodních elektráren v ČR [34]

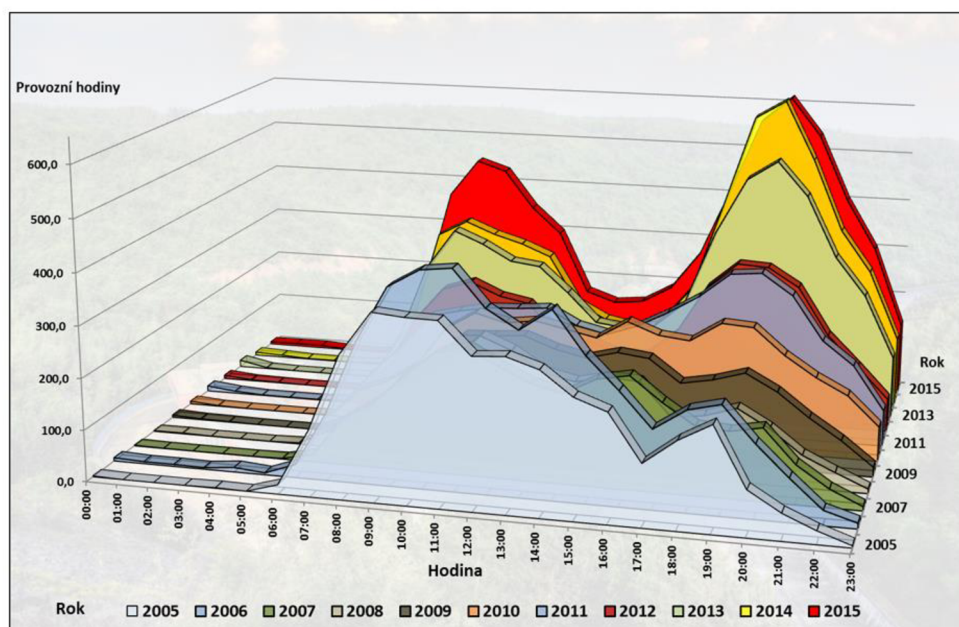
Elektrárna	Štěchovice II	Dalešice	Dlouhé Stráně
Uvedení do provozu	1947 1996 - rekonstrukce	1979 2007 – rekonstrukce	1996
Výkon [MW]	45	480 (4x120)	650 (2x325)
Počet soustrojí	1	4	2
Typ turbín	Francis reverzní FR 180	Francis reverzní	Francis reverzní FR 100
Turbínový spád [m]	209,8 – 219,5	60,5 – 90,7	534,3
Průtok turbínou [m <sup>3</sup> /s]	24 (výroba) 21 (čerpání)	150 (výroba) 137,5 (čerpání)	68,6 (výroba) 54,5 (čerpání)
Otáčky [ot./min]	600	136,4	428,6

### 5.1.1 Využití současných PVE v ČR

PVE v České republice se využívají už historicky k akumulaci přebytečné energie (čerpání) v době, kdy je elektrické energie v ES nadbytek a její cena je v průběhu dne nejnižší (zejména v noci) a naopak k výrobě elektrické energie v denních špičkách, kdy je elektřiny v ES nedostatek a její cena dosahuje denního maxima. Tyto průběhy jsou patrné i z grafů zatížení PVE (Obr. 24, Obr. 25). PVE tedy fungují jako obrovské „baterie“ ES s rychlou dobou najeť a velmi dlouhou životností (desítky let).



Obr. 24 Čerpadlový provoz českých PVE v letech 2005–2015 [46]



Obr. 25 Turbinový provoz českých PVE v letech 2005-2015 [46]

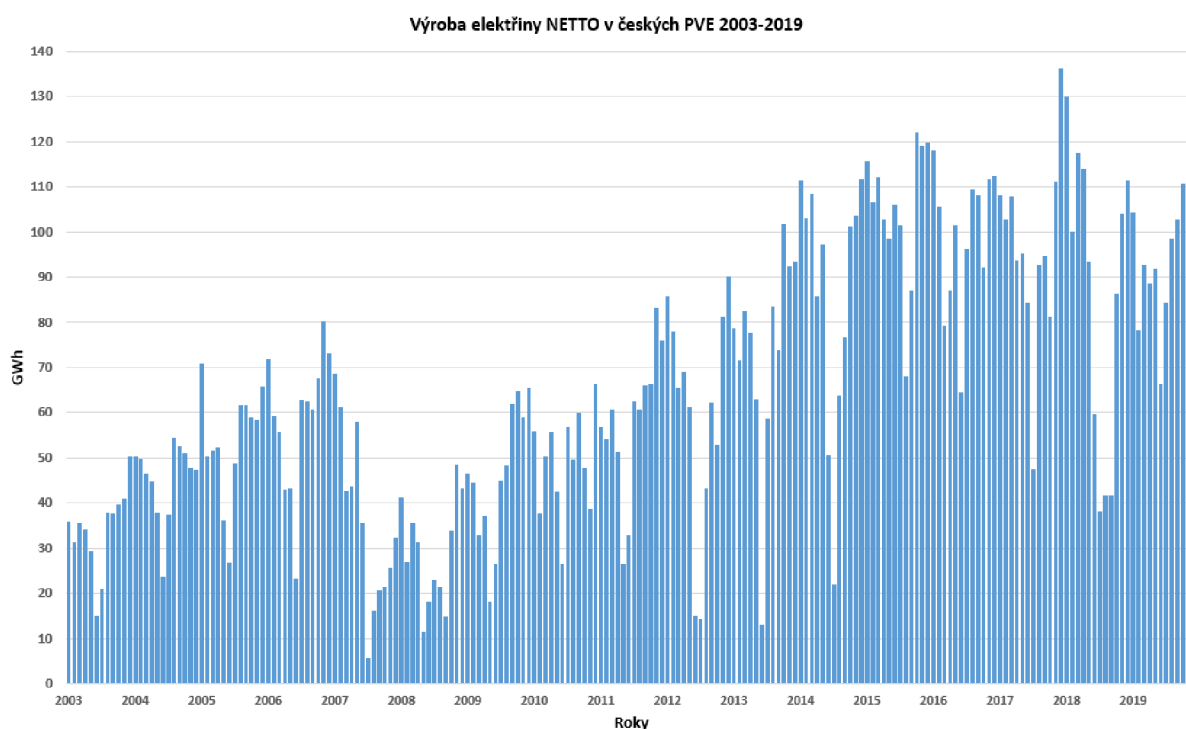
Jak je patrné z grafu zatížení v čerpadlovém provozu (Obr. 24) od roku 2013 dochází k čerpání i v době od 10:00 až 16:00, což je způsobeno zejména větším využitím disponibilního objemu vody a v neposlední řadě obchodováním s elektrickou energií na denním trhu s elektrickou energií. Kde PVE mohou obchodovat s dodávkami i odebíráním (ukládáním) elektrické energie podle uskutečněných obchodu na trhu.

V neposlední řadě PVE plní poskytování následujících podpůrných služeb pro ČEPS:

- Rychle startující rezerva – MZ<sub>5</sub>
- Ostrovní provoz
- Start ze tmy – Black start
- Regulace napětí a jalového výkonu
- Čerpání při přebytku činného výkonu – tzv. redispečink

### Vývoj výroby PVE v ČR

Jak je patrné z dat z let 2003 – 2019 (Obr. 26) výroba elektřiny v českých PVE má rostoucí tendenci. Pravidelné poklesy výroby v grafu jsou způsobené zejména plánovanými odstávkami PVE v letních měsících.



Obr. 26 Vývoj NETTO výroby v českých PVE v letech 2003–2019 [42]

Příčinou většího využití jsou zejména:

- Kratší plánované standardní odstávky PVE – 42 – 28 – 18 dní
- Vykrytí výpadků zdrojů ČEZ (vysoká odlišnost mezi denním plánem a skutečností)
- Operativní obchodování na trhu s elektrickou energií
- Pokrytí neuskutečněné plánované výroby z OZE (FVE)
- Čerpání i v denní době (větší využití disponibilního objemu vody)

## 5.2 Stanovení vhodných lokalit pro výstavbu PVE v České republice

V roce 2010 proběhla v České republice, firmou ENERGETIS, s.r.o., rozsáhlá vyhledávací studie o možných místech výstavby PVE na území ČR.

*„Vyhledávací studie vhodných lokalit pro možnou realizaci přečerpávacích vodní elektráren z hlediska jejich technického, enviromentálního, případně ekonomického vyhodnocení a regulační funkce ve vztahu k elektrizační soustavě“*

Na počátku této studie bylo vyčleněno nejprve 55 potencionálních lokalit, jejichž geomorfologie skýtala energetické využití, pro možnou výstavbu nových PVE.

Omezující faktory, které vedly k zúžení seznamu vhodných lokalit

- existence chráněných území (národní parky, rezervace, chráněné krajinné oblasti),
- nemožnost lokalizovat dolní či horní nádrž v území z hlediska geomorfologického,
- prostor dolní nádrže by vedl k zatopení důležitého území se existencí dopravní a technické infrastruktury (masivní osídlení, silnice, železnice, vedení apod.),
- za současného stavu s přihlédnutím k blízké budoucnosti nebude možné uvažovanou PVE připojit k elektrizační síti (vhodná rozvodna 400 kV se nachází ve velké vzdálenosti od lokality PVE),
- nemožnost připojit uvažovanou PVE do existující rozvodny v důsledku přebytku výkonu v dané lokalitě,
- nízký spád lokality, kde jako dolní hranice byla určena hodnota cca 200 m,
- případné další technické omezení (např. boční hráze),

Na základě těchto omezujících faktorů byl předešlý seznam 55 lokalit postupně zúžen na 21 lokalit. Tyto lokality byly následně ověřeny z technických, ekonomických, majetkoprávních a enviromentálních hledisek [39].

### 5.2.1 Stanovení investičních nákladů PVE podle lokalit

Pořizovací náklady každé PVE jsou rozděleny zpravidla na tři dílčí skupiny. První tvoří náklady stavební části, druhou náklady technologické části a třetí tzv. ostatní doprovodné náklady stavby. Z těchto dílčích nákladů se stanovují celkové investiční náklady PVE.

#### Stavební část

Náklady na stavební část jsou určeny zejména pro základní objekty:

- |                      |                                 |
|----------------------|---------------------------------|
| - horní nádrž        | - trafokaverna                  |
| - dolní nádrž        | - vyrovnávací komory            |
| - přivaděče          | - vtokový objekt horní nádrže   |
| - odpadní tunely     | - objekt uzávěrů u horní nádrže |
| - podzemní strojovna | - sdružený objekt dolní nádrže  |

Do nákladů stavby jsou dále zahrnuty další související objekty. Jako např. další tunely, štoly, správní budova, komunikace apod. V neposlední řadě se berou v úvahu náklady spojené s vybudováním elektrického vedení 400kV, skrze které je PVE připojena k příslušné rozvodně. Dále se zahrnují i náklady na případně dozbrojení dané rozvodny [39].



### **Technologická část**

Technologická část nákladů zahrnuje náklad na část strojní a elektro. Náklady jsou uvedeny včetně montáží daných zařízení, podle konkrétní orientační cenové kalkulace dodavatele, který v tuzemsku připadá v úvahu.

### **Doprovodné náklady**

Ostatní doprovodné náklady představují povětšinou odhadnuté procento ze stavební a technologické části. Navíc obsahují mj. tyto náklady:

- průzkumy, projekty, zaměření,
- související investice,
- výkupy pozemků,
- zařízení staveniště,
- náklady související s ochranou životního prostředí,
- technická pomoc,
- inženýrské činnosti,
- poplatky, náhrady, rekultivace,
- minimální rezerva,

Konkrétní sumarizace investiční nákladů stanovených ve vyhledávací studii pro jednotlivé PVE jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulka 5.2).

## **5.2.2 Ekonomická analýza podle jednotlivých lokalit**

Ekonomická analýza jednotlivých lokalit vychází z celkových investičních nákladů, nutných pro vybudování nové PVE v příslušné lokalitě. V ekonomické analýze byly zhodnoceny tyto parametry:

### **Vstupní veličiny ekonomické analýzy:**

- Struktura tržeb
  - výnosy z prodeje elektřiny vyrobené v PVE,
  - výnosy z poskytování regulační zálohy  $MZ_5$ ,
  - tržby plynoucí z pomoci PVE při řešení povodňových situací,
  - tržby ze služby změny zatížení,
  - tržby ze schopnosti startu ze tmy.
- Provozní náklady PVE
  - náklady na dokupovanou elektřinu pro vlastní spotřebu, čerpání,
  - mzdové a osobní náklady na zaměstnance,
  - náklady na opravu a údržbu,
  - správní režie,
  - spotřeba materiálu,
  - náklady na revize a měření,
  - pojištění majetku,
  - ostatní náklady,
  - odpisy hmotného majetku,

### **Výstupní veličiny ekonomické analýzy:**

- vnitřní výnosové procento (IRR) v %,
- doba návratnosti vložených investičních prostředků z CF v letech,
- měrné investiční náklady v Kč/kW

Výsledné veličiny ekonomické analýzy jsou uvedeny v Tabulka 5.2

Tabulka 5.2 Výsledky ekonomického, enviromentálního posouzení plánovaných PVE v ČR [39]

Název PVE	Celkový výkon	Max. spád	Náklady				IRR	Doba návratnosti z CF	Měrný náklad	Vliv na ŽP
			Stavební část	Technologická část	Ostatní náklady	Celkové náklady				
	[MW]	[m]	tis. Kč	tis. Kč	tis. Kč	tis. Kč	%	let	Kč/kW	
Slavíč	1 124	444	14 727 291	11 826 300	2 445 125	28 998 716	13,61	7,10	25 800	1
Stodůlky	1 228	484	17 045 922	13 338 700	3 552 100	33 936 722	12,57	7,60	27 600	3
Šumný důl	880	380	14 185 258	10 605 800	2 329 030	27 120 088	10,99	8,40	30 800	2
Spálená	888	638	14 468 406	10 817 500	2 314 653	27 600 560	10,88	8,40	31 100	2
Stříbrná	732	323	11 879 925	8 949 500	2 332 513	23 161 938	10,63	8,60	31 600	3
Smědavský vrch	620	476	11 024 478	8 242 600	1 928 391	21 195 469	9,59	9,20	34 200	2
Velká Morava	536	587	9 559 303	7 562 500	1 519 365	18 641 167	9,35	9,40	34 800	2
Červená Jáma	674	388	12 271 284	9 012 400	2 276 216	23 559 900	9,30	9,40	35 000	2
Žárový vrch	592	425	10 819 840	8 089 600	1 720 502	20 629 942	9,33	9,40	34 800	2
Hřebeny	640	249	12 575 968	8 165 200	2 290 225	23 031 393	8,93	9,60	36 000	1
Hoštejn	544	221	9 971 651	7 398 400	2 252 307	19 622 358	8,89	9,70	36 100	2
Kamenný vrch	616	236	11 773 290	8 510 600	2 536 174	22 820 064	8,56	9,90	37 000	1
Jelení hřbet	600	237	12 054 085	8 480 600	1 912 612	23 031 393	8,44	10,00	36 000	2
Spálov	600	234	13 294 115	7 846 300	2 485 929	23 626 344	7,81	10,40	39 400	2
Nové Heřminovy	262	251	5 226 026	4 196 600	963 959	10 386 585	7,68	10,50	39 600	2
Sendraž	456	250	9 430 980	7 051 200	1 647 266	18 129 446	7,68	10,50	39 800	2
Vinice	440	249	9 544 634	6 570 800	1 688 947	17 804 381	7,47	10,70	40 500	1
Kratušín	428	350	9 384 168	7 016 200	1 650 309	18 050 677	6,98	11,10	42 200	2
Lipno	412	218	9 018 793	7 190 300	1 733 081	17 942 174	6,61	11,40	43 500	2
Lenora	468	299	10 909 246	7 575 600	2 295 783	20 780 629	6,40	11,60	44 400	3
Slezská Harta	224	199	5 504 331	3 983 700	999 165	10 487 196	5,75	12,20	46 800	1

V tabulce jsou zobrazeny všechny lokality seřazené dle ekonomické výhodnosti (doby návratnosti). Z dat v tabulce vyplývá, že všechny lokality mají z ekonomického hlediska poměrně dobré ekonomické výsledky. Přičemž nejlépe se jeví lokalita Slavič s dobou návratnosti pouze 7,1 let. Naopak nejhůře, ze sledovaných lokalit, je na tom lokalita Slezská Harta a činí 12,2 let od data uvedení do provozu.

### 5.2.3 Enviromentální podmínky dle jednotlivých lokalit

Součástí posouzení enviromentálních podmínek v jednotlivých lokalitách navržených k výstavbě PVE je zmapování stávajícího stavu životního prostředí. Navržené zájmové lokality k výstavbě PVE byly posuzovány z pohledu ochrany životního prostředí, a to zejména v následujících oblastech:

- a) rozsah vlivů vzhledem k zasaženému území a populaci;
- b) vliv na půdu;
- c) vliv na krajinný ráz;
- d) vliv na faunu, flóru a chráněná území;

Míra, respektive velikost jednotlivého vlivu na posuzovanou oblast byly ohodnoceny v rámci tří bodové stupnice (Tabulka 5.2):

- žádný (1) – realizací nevznikne žádné ovlivnění životního prostředí
- střední (2) – mírné až střední ovlivnění životního prostředí v posuzované lokalitě
- významný (3) – výskyt významného ovlivnění životního prostředí

Vzhledem k významnému vlivu na životní prostředí u lokalit: Stodůlky, Stříbrná, Lenora. Byly tyto lokality z celkových vhodných lokalit vyřazeny. I přes to, že zejména lokalita Stodůlky a Stříbrná se jeví z ekonomického hlediska velmi výhodně a jedná se zároveň o lokalitu s největším možným celkovým výkonem a jednou z nejkratších dob návratnosti [39].

## 6 VÝHODY POUŽITÍ DFIG U PŘEČERPÁVACÍCH VODNÍCH ELEKTRÁREN V ČR

Vzhledem k stále se zvyšujícímu využití a výroby elektrické energie z přečerpávacích vodních elektráren uvedených v kapitole: 5.1.1. Můžeme usoudit, že bude i nadále docházet k většímu využívání PVE. Vzhledem k tomu se dá předpokládat, že elektrárny v budoucnu dosáhnou svého maximálního vytižení a nebude již možné zvyšovat jejich využití. Tento problém lze řešit několika variantami.

- Vybudovat novou PVE
- Modernizace stávajících PVE

Ať už by byla upřednostněna jakákoliv z těchto variant, nastává zde prostor pro využití dvojité napájeného generátoru, který vykazuje zásadní výhody oproti konvenčním synchronním generátorům používaných u současných českých PVE.

### 6.1 Použití DFIG u stávajících PVE v ČR

Vzhledem k tomu, že vývoj a výstavba nové PVE vyžaduje vyhledání odpovídající vhodné lokality, značné počáteční investice a časovou náročnost samotné výstavby. Jeví se jako účelnější, rychlejší a ekonomicky efektivnější přestavba/modernizace/výměna stávajících synchronních generátorů u PVE za DFIG.

I když je velmi efektivní variantou výměna synchronních generátorů za DFIG pro zajištění lepších parametrů PVE jako lepší management s vodou, rychlejší a flexibilnější podpora ES a v neposlední řadě zlepšená účinnost. Vyžadují tyto změny generátorů další doprovodné náklady a je nutno vypracovat studie proveditelnosti [40].

V případě výměny stávajících synchronních generátorů u PVE v ČR za DFIG je nutné vzít v úvahu zejména následující okolnosti:

#### Úprava hydraulického soustrojí (turbíny):

Aby byl umožněn maximální rozsah regulace výkonu v čerpadlovém režimu, musí být hydraulické soustrojí realizováno tak, aby umožňovalo provozovat turbínu při proměnných otáčkách a s tím související změnou průtoku vody turbínou. V případě turbíny používané v kombinaci se synchronním generátorem se dá předpokládat, že je turbína navržena tak, aby pracovala s největší účinností na synchronní rychlosti generátoru a s největší pravděpodobností nebude schopna efektivně pracovat v provozních podmínkách, které umožňuje DFIG. V takovémto případě je nutná modernizace/výměna soustrojí, aby byl zaručen co největší užitek z použití DFIG.

Obecně platí, že úpravy by měli být omezeny na díly, které lze snadno vyměnit a není nutné vyměnit celé hydraulické soustrojí. Nejčastěji je nutné nainstalovat nové oběžné kolo turbíny.

Pro maximalizaci přínosu z modernizace hydraulického soustrojí by měla modernizace zajistit zejména:

- Zvýšení účinnosti čerpadla – turbíny (až o několik procent) v důsledku zlepšeného konstrukčního stavu a přizpůsobení rychlosti v turbínovém režimu.
- Regulaci výkonu v čerpadlovém režimu.
- Schopnost pracovat ve větším rozsahu spádu.
- Zvýšený pracovní rozsah (zvýšené limity kavitace)

**Výměna rotoru:**

Jelikož rotor DFIG má zhruba o 30 % větší hmotnost, a větší rozměry než rotor synchronního generátoru (stejného jmenovitého výkonu). Může v řadě PVE vzniknout problém s výměnou rotoru. Především díky nedostatečné nosnosti jeřábu a nedostatečnému prostoru pro instalaci nového rotoru.

**Větší nároky na prostor strojovny:**

Nejvíce prostoru zabírá buzení rotoru (frekvenční měnič + transformátor). Frekvenční měnič o výkonu 30 MW vyžaduje zhruba 150 m<sup>2</sup> pozemního prostoru. Což u některých PVE může být velký problém realizovat. Zejména u PVE vybudovaných ve skále/podzemí by tento dodatečný prostor vyžadoval s největší pravděpodobností rozšíření podzemních prostor.

**Chlazení:**

Ztráty v měniči a filtrační systém kluzných kontaktů (sběracích kroužků) ovlivňují požadavky na chlazení. A to jak pro dimenzování, tak pro vedení systému vodního chlazení. Zvláštní pozornost musí být věnována rychlosti vody ve stávajících zabudovaných trubkách.

**Dovybavení strojovny:**

Jelikož buzení DFIG je realizováno pomocí AC proudu a ovládání generátoru je realizováno pomocí frekvenčního měniče v rotorovém obvodu, je nutné tyto prvky v PVE nainstalovat. Většina nového zařízení je potřebná zejména pro buzení DFIG. Jako například:

- Reaktory omezující zkratový proud
- Výkonový vypínač
- Speciální transformátor pro frekvenční měnič
- Harmonické filtry
- Frekvenční měnič
- Přepěťová a nadproudová ochrana
- Speciální proudové a napětové transformátory pro měření proudu a napětí v rotorovém obvodu umožňující měřit na velmi nízké frekvenci

V neposlední řadě je nutno zkontrolovat, zda není třeba vyměnit hlavní výkonový transformátor PVE vzhledem k použití nového generátoru a frekvenčního měniče.

**Mechanické zatížení:**

Výměnou rotoru může vzniknout problém ohledně mechanického zatížení celého soustrojí. Je nutné ověřit, zdali základna statoru (podstavce) jsou dostatečně dimenzovány na novou zvýšenou hmotnost. Nadále je nutné ověřit zejména axiální ložiska na nové podmínky mechanického namáhání [40].

### 6.1.1 Příklad konkrétní modernizace ve světě – PVE Okutataragi

#### Důvody renovace/modernizace:

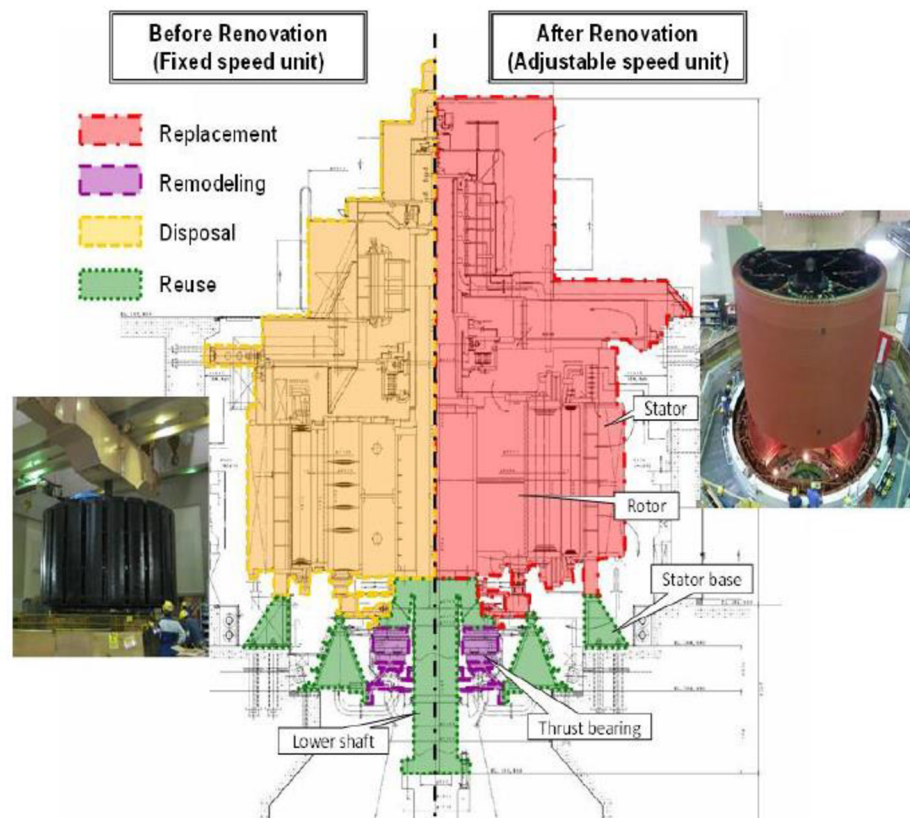
Hlavním důvodem použití DFIG bylo dosažení dvou zásadních výhod – možnost regulace v čerpadlovém režimu a celkové zlepšení účinnosti čerpadla-turbín zejména při provozu s částečným zatížením. Navíc se použitím DFIG u PVE Okutataragi očekávalo snížení nákladů na použití fosilních paliv u elektráren na tuhá paliva určených pro regulaci elektrické sítě. Jelikož díky DFIG bude schopna PVE Okutataragi vykonávat efektivnější regulaci ES a tím pádem bude schopna nahradit tyto zdroje [25; 26].

Cílem renovace bylo využít co nejvíce původního vybavení PVE k provozu s DFIG, aby se co nejvíce minimalizovali celkové náklady na modernizaci.

#### Detaily renovace:

Na Obr. 27 jsou patrné části soustrojí, které bylo nutno vyměnit, nebo modernizovat. Celková modernizace zahrnovala kompletní výměnu motor-generátoru, instalaci AC buzení pro DFIG a instalaci nového oběžného kola turbíny. Naopak statorová základna a hřídel generátoru zůstala zachována v původním provedení a axiální ložiska bylo nutno modernizovat.

Právě u PVE Okutataragi se při modernizaci narazilo na problém, že nainstalovaný jeřáb v PVE neměl dostatečnou nosnost na nový typ rotoru. Proto musel být rotor speciálně upraven, aby se snížila jeho hmotnost na požadovanou úroveň a zároveň zůstali zachovány parametry generátoru. V projektu bylo navíc plánováno použití původního hlavního transformátoru, výkonového vypínače apod. [25; 26].

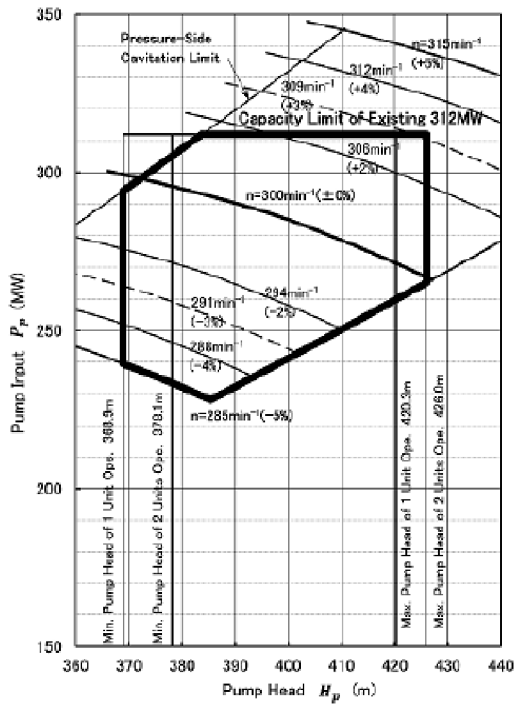


Obr. 27 Oblast renovace soustrojí PVE Okutataragi [26]

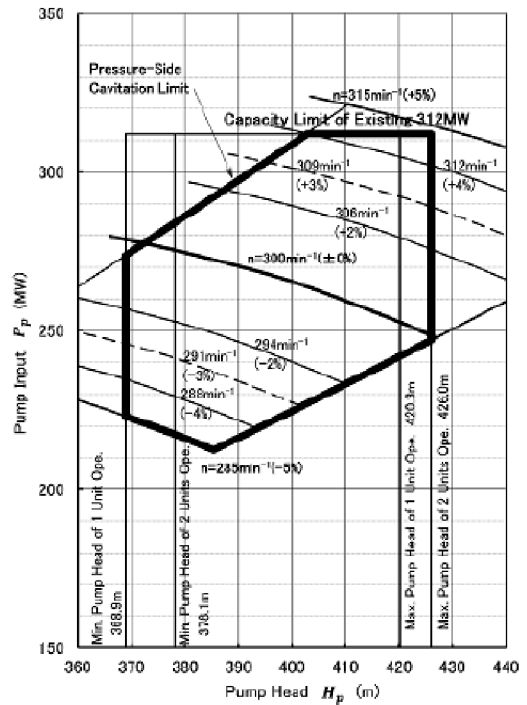
**Zvolení provozního rozsahu soustrojí**

Maximální příkon v čerpadlovém režimu je omezen maximálním výkonem blokového transformátoru (312 MW). Jak je patrné z OBRÁZKU, pokud je zvoleno stávající nastavení generátoru, je operační rozsah omezen shora právě na 312 MW i při použití DFIG, což odpovídá zvýšení max. o 12 MW (Obr. 29). Naopak výkon lze snížit mnohem více. Vzhledem k tomuto nesouměrnému využití pracovního rozsahu v okolí jmenovité hodnoty bylo přistoupeno ke snížení jmenovitému výkonu jednotky na 280 MW při jmenovitých otáčkách 300 ot/min. (Obr. 28). Čímž je dosaženo většího operačního rozsahu, a navíc je dosaženo souměrné regulace výkonu nad i pod jmenovitou hodnotu.

Za účelem snížení příkonu čerpadla z 300 MW na 280 MW při jmenovitých otáčkách je nutné snížit i průtok turbínou. Není však možné měnit maximální průměr a výšku oběžného kola turbíny. Proto došlo k modernizaci oběžného kola zejména v počtu a profilu oběžných a rozváděcích lopatek [25; 26].



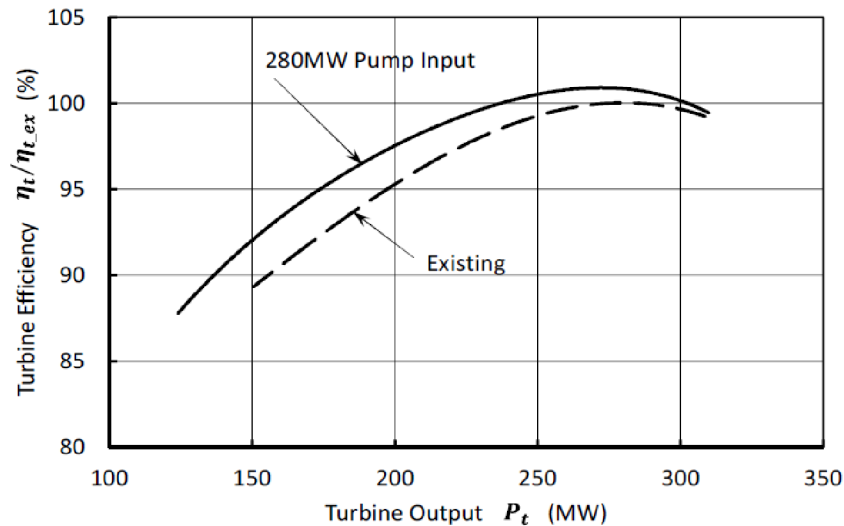
Obr. 29 Operační rozsah DFIG se stávajícím oběžným kolem turbíny [25]



Obr. 28 Operační rozsah DFIG s novým oběžným kolem turbíny [25]

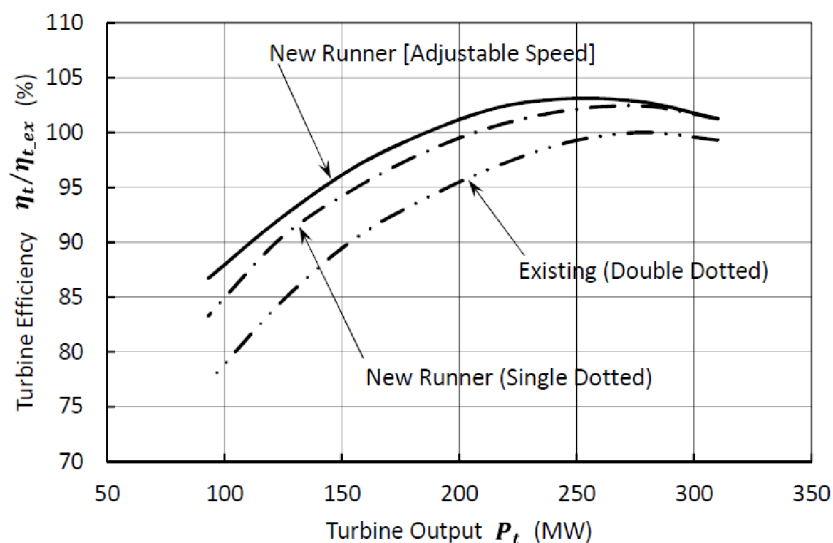
### Výsledky renovace

Vzhledem k hlavnímu účelu renovace PVE Okutataragi – zvýšení účinnosti v částečném zatížení. Bylo nutné zajistit, aby soustrojí vykazovalo nejméně stejnou účinnost na maximálním výkonu jako původní soustrojí. Jak je patrné z Obr. 30 i přes snížení jmenovitého výkonu z 300 MW na 280 MW vykazuje nové soustrojí s novým rozváděcím kolem (280 MW) lepší účinnost, než původní (300 MW) v provozu s částečným zatížením [25; 26].



Obr. 30 Porovnání účinnosti v turbínovém režimu před a po renovaci rozváděcího kola turbíny [25]

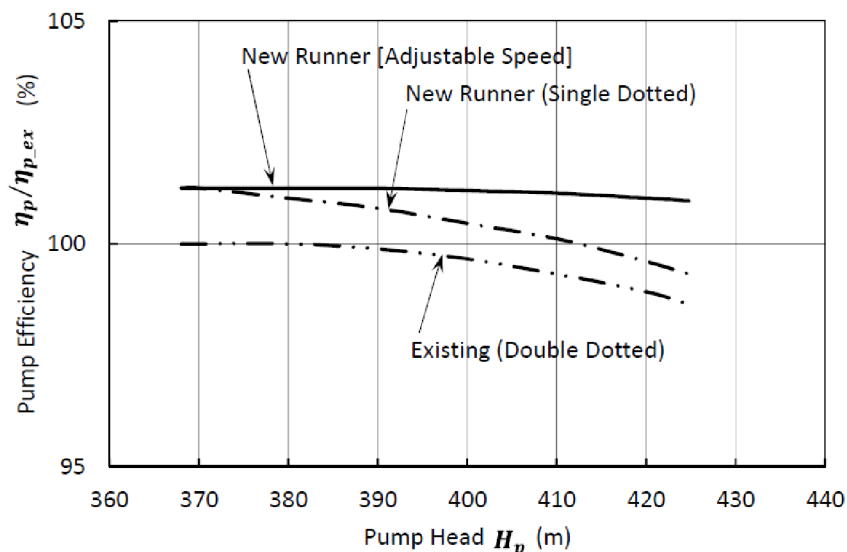
Nové oběžné kolo zároveň vykazuje vyšší účinnost pro všechny provozní stavy soustrojí v turbínovém režimu Obr. 31. Účinnost se konkrétně zlepšila zhruba o 2 % při maximálním zatížení a nejméně o 7 % při zatížení na 40 % jmenovitého výkonu (124 MW) [25; 26].



Obr. 31 Porovnání účinnosti v turbínovém režimu pro různá oběžná kola turbíny [25]



Stejně jak došlo ke zlepšení účinnosti v turbínovém režimu, tak došlo ke zlepšení parametrů v čerpadlovém režimu. Zlepšení díky novému rozváděcímu kolu dosahuje zhruba 2 % na maximálním spádu Obr. 32 [25; 26].



Obr. 32 Porovnání účinnosti v čerpadlovém režimu pro různá oběžná kola turbíny [25]

Díky použití DFIG v PVE Okutataragi a následnému přizpůsobení hydraulického soustrojí elektrárny podmínkám, které sebou přináší právě použití DFIG – regulace otáček soustrojí. Vykazuje elektrárna, jak bylo uvedeno, vyšší účinnosti v turbínovém a čerpadlovém režimu. A zároveň je elektrárna schopna pracovat na širším provozním rozsahu.

## 6.2 Použití DFIG u plánovaných PVE v ČR

V případě použití DFIG u nových výstaveb PVE je situace o mnoho jednodušší než při rekonstrukci stávající PVE. Není nutno řešit, zdali momentální vybavení a prostory PVE budou stačit pro nový typ generátoru, nebo nikoliv. Jelikož se jedná maximálně o návrh.

Ovšem je nutné počítat s navýšením investičních nákladů celé stavby. Ať už se jedná o náklady na samotný generátor, turbínu a vybavení strojovny. Tak dodatečné náklady v podobě nutnosti většího prostoru ve strojovně. Vybavení PVE jeřábem o dostatečné nosnosti apod. Je tedy nutné již od počátku návrhu PVE vzít v úvahu, že bude použit DFIG a této skutečnosti celkový návrh celé PVE podřídít.

Na druhou stranu díky použití DFIG se zlepši celková účinnost PVE, zároveň bude PVE schopna rychleji a flexibilněji reagovat na požadavky z ES a v neposlední řadě bude PVE schopna efektivněji obchodovat na denním trhu s energií. Bude schopna například dodávat a odebírat elektřinu na menších hladinách výkonu, než byla schopna před modernizací.

Ve výsledku se tedy investiční náklady na PVE zvednou, ale doba návratnosti se o tolik zvýšit nemusí, nebo může naopak paradoxně klesnout, díky celkově lepším parametrům a využití PVE.

Konkrétní údaje by vyžadovali velmi podrobnou a rozsáhlou studii konkrétní PVE o konkrétním výkonu a parametrech.

## ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo uvést možnosti použití DFIG u PVE. V první části bakalářské práce je rozebrán princip funkce tohoto generátoru a jeho výhodné vlastnosti pro použití u PVE. Jako zásadní výhoda se jeví zejména jeho otáčková přizpůsobitelnost a s tím související možnost provozovat PVE v režimu čerpání při částečném zatížení. Čehož nebylo možné u konvenčních PVE se synchronními generátory dosáhnout. Toto otáčkové přizpůsobení má za následek zlepšení účinnosti, zejména v režimu částečného zatížení, celé PVE. V neposlední řadě se zlepší vlastnosti PVE směrem k elektrické síti – možnost většího regulačního pásma, efektivnější kompenzace elektrické sítě.

V další části práce je provedena rešerše použití DFIG u PVE. Jelikož vývoj a první použití tohoto generátoru se odehrálo roku 1987 v Japonsku, není tak překvapující, že právě Japonsko je zemí s největším počtem PVE využívajících technologii PVE. Od roku 2014 došlo i k řadě instalací DFIG u PVE v Evropě, a to zejména u nových výstaveb PVE (Goldisthal – Německo, Frades II – Portugalsko, Nant de Drance – Švýcarsko apod.). V Evropě se tedy jedná o poměrně novou technologii. Dle dat zjištěných v rešerši je patrné, že díky použití DFIG se zvýšila účinnost PVE a její dynamické vlastnosti lépe reagovat na výkyvy v elektrické síti způsobené např. kolísáním výkonu u větrných elektráren (Frades II) apod. Navíc u PVE, které mají nainstalované jak DFIG, tak synchronní generátory je patrné, že díky možnosti regulovat výkon v režimu čerpání jsou DFIG nejvíce nasazovány hlavně při čerpání, a naopak synchronní generátory při turbínovém režimu, aby se zajistilo vyvážené využití generátorů a jejich rovnoměrné opotřebení.

V poslední části práce jsem se zaměřil na použití DFIG konkrétně u českých PVE. Pokud jde o novou výstavbu, tak je použití tohoto generátoru z hlediska vlastností velmi výhodné, jelikož jeho jedinými nevýhodami jsou vyšší pořizovací náklady a náročnější systém řízení a údržby. Pokud ovšem jde o rekonstrukci stávající PVE je zde řada problému, se kterými se musí počítat jako například: větší nároky na prostor strojovny (buzení, větší rotor apod.), větší požadavky na nosnost jeřábu v PVE a celkově manipulace/doprava DFIG do stávající PVE apod. Dále je nutno, ze zkušenosti ze zahraničí – PVE Okutataragi, věnovat svoji pozornost i vodní turbíně, oběžnému kolu apod. Které s největší pravděpodobností byli navrženy pro optimální účinnost a parametry pro práci na synchronních otáčkách, které zajišťuje synchronní generátor a nebudou tedy s největší pravděpodobností vyhovovat provozním podmínkám, které umožňuje DFIG.

Z bakalářské práce vyplývá, že pokud se v České republice bude uvažovat o výstavbě nové PVE, bylo by velmi vhodné uvažovat nad použitím DFIG. V případě rekonstrukce stávající PVE bude nutné provést rozsáhlou studii, jestli je to v konkrétní PVE vůbec realizovatelné a pokud se to vzhledem ke všem nákladům s tím spojeným vyplatí.

**POUŽITÁ LITERATURA**

- [1] JOHAR, Mahdi, Ahmad RADAN, Mohammad MIVEH a Sohrab MIRSAEIDI. Comparison of DFIG and Synchronous Machine for Hydro-Power Generation. *International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology (IJPAST)*. 2011, 7(1), 48-58. ISSN 2229 - 6107.
- [2] SYED, Rizwan. *Doubly-Fed Induction Machine for use in Mini-Hydro Power Plants* [online]. NO-7491, Norway, 2016, 2015 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/4f13/8002990be92442d548ac3d1859f7174af8f3.pdf>. Technical Assessment. Norwegian University of Science and Technology Department of Electric Power Engineering. Vedoucí práce Trond Toftevaag, ELKRAFT.
- [3] IVERSEN, Brage. *Doubly-Fed Induction Machine for use in Mini-Hydro Power Plants*. Trondheim, NO-7491, Norway, 2016. Dostupné z: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2440580>. Master thesis. Norwegian University of Science and Technology Department of Electric Power Engineering. Vedoucí práce Trond Toftevaag, ELKRAFT.
- [4] NAGURA, Osamu, Mikisuke HIGUCHI, Kiyohito TANI, Takashi ENG a OYAKE. Hitachi's Adjustable-speed Pumped-storage System Contributing to Prevention of Global Warming. *Hitachi Review*. 2010, 59(3), 99-105.
- [5] KORITAROV, Vladimir, Thomas VESELKA, John GASPER et al. *Modeling and Analysis of Value of Advanced Pumped Storage Hydropower in the United States*. United States: -, 2014. DOI: 10.2172/1165600. OSTI 1165600. Dostupné z: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1165600>
- [6] SCHERER, K. VARIABLE SPEED UNITS FOR PUMPED STORAGE POWER PLANTS. *Seminar on Hydropower Plants* [online]. Vídeň: Institute for Waterpower and Pumps, 2004, 13, 1-9 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <http://nevadahydro.com/wp-content/uploads/2017/10/Variable-Speed-Units-for-Pumped-Storage-Scherer-2004.pdf>
- [7] AGURO, K., M. KATO, F. KISHITA, T. MACHINO, K. MUKAI, O. NAGURA, S. SEKIGUCHI a T. SHIOZAKI. *Rich operation experiences and new technologies on adjustable speed pumped storage systems in Japan* [online]. Japonsko: Cigre, 2008, , 1-8, 8 s. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: [https://e-cigre.org/publication/A1-101\\_2008-rich-operation-experiences-and-new-technologies-on-adjustable-speed-pumped-storage-systems-in-japan](https://e-cigre.org/publication/A1-101_2008-rich-operation-experiences-and-new-technologies-on-adjustable-speed-pumped-storage-systems-in-japan)
- [8] KOUTNÍK, Jiří, Klaus ENGELS a Larl MEIER. *A Comparison of Advanced Pumped Storage Equipment Drivers in the US and Europe* [online]. In: . s. 1-31 [cit. 2020-03-27]. DOI: 10.13140/2.1.1082.4967. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/265907090>

- [9] JOSEPH, A. a T. CHELLIAH. A Review of Power Electronic Converters for Variable Speed Pumped Storage Plants: Configurations, Operational Challenges, and Future Scopes: Configurations, Operational Challenges, and Future Scopes. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2018, **6**(1), 103-119. DOI: 10.1109/JESTPE.2017.2707397. ISSN 2168-6785.
- [10] *Final Report on Feasibility Study on Adjustable Speed Pumped Storage Generation Technology*. 1. Japan International Cooperation Agency : Tokyo Electric Power co. : Tokyo Electric Power Services, 2012. Dostupné z: [https://openjicareport.jica.go.jp/643/643/643\\_000\\_12044822.html](https://openjicareport.jica.go.jp/643/643/643_000_12044822.html)
- [11] HAMON, CAMILLE. *Doubly-fed Induction Generator Modeling and Control in DigSilent Power Factory* [online]. SE-100 44 Stockholm Sweden, 2010 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:611644/FULLTEXT01.pdf>. Master's Thesis. KTH School of Electrical Engineering.
- [12] PAVELKA, Jiří a Zdeněk ČEŘOVSKÝ. *VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA*. ČVUT, 2000.
- [13] OETTER, Juraj. *Výkonová elektronika pre elektrické pohony: celoštátna vysokoškolská učebnica pre elektrotechnické fakulty vysokých škôl*. 1. Bratislava: Alfa, SNTJ, 1988, 408 s. Edícia elektrotechnickej literatúry (Alfa).
- [14] VALAVI, M. a A. NYSVEEN. Variable-speed operation of hydropower plants: Past, present, and future: Past, present, and future. In: *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Lausanne, Switzerland: IEEE, 2016, s. 640-646. DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732593. ISBN 978-1-5090-2538-1. ISSN 16444349.
- [15] NOBILE, E., G. SARI a A. SCHWERY. Variable Speed Hydro Pumped Storage as Flexible Enabler of Intermittent Renewable Penetration. In: *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. Portland, OR, USA: IEEE, 2018, s. 1-5. DOI: 10.1109/PESGM.2018.8586238. ISBN 978-1-5386-7703-2. ISSN 1944-9933.
- [16] BOTTERUD, Audun, Todd LEVIN a Vladimir KORITAROV. *Pumped Storage Hydropower: Benefits for Grid Reliability and Integration of Variable Renewable Energy: Benefits for Grid Reliability and Integration of Variable Renewable Energy*. United States: -, 2014. DOI: 10.2172/1165460. OSTI 1165460. Dostupné z: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1165460>
- [17] ANTAL, Brandi. *Pumped Storage Hydropower: A Technical Review* [online]. CU Denver, North Classroom, 1200 Larimer Street, 2014 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <http://www.ucdenver.edu/faculty-staff/dmays/3414/Documents/Antal-MS-2014.pdf>. A Master Report. B.S., University of Colorado – Boulder, Department of Civil Engineering.
- [18] CIOCAN, Gabriel, Olivier TELLER a F CZERWINSKI. Variable speed pump-turbines technology. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2012, **74**(1), 33-42. ISSN 1454-2358.

- [19] KUMAR, N., T. CELLIAH a S. SRIVASTAVA. Analysis of Doubly-Fed Induction Machine operating at motoring mode subjected to symmetrical voltage sag. In: *10th International Conference on Advances in Power System Control, Operation & Management (APSCOM 2015)*. Hong Kong, China: IEEE, 2015, s. 1-6. DOI: 10.1049/ic.2015.0296. ISBN 978-1-78561-192-6. INSPEC 15934056.
- [20] VALAVI, M. a A. NYSVEEN. Variable-Speed Operation of Hydropower Plants: A Look at the Past, Present, and Future: A Look at the Past, Present, and Future. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2018, **24**(5), 18-27. DOI: 10.1109/MIAS.2017.2740467. ISSN 1558-0598. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8387741>
- [21] Challenges and Opportunities For New Pumped Storage Development. *NHA - National Hydropower Association* [online]. New Jersey ( Washington, D.C.): NHA - Pumped Storage Development Council, 2017 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: [https://www.hydro.org/wp-content/uploads/2017/08/NHA\\_PumpedStorage\\_071212b1.pdf](https://www.hydro.org/wp-content/uploads/2017/08/NHA_PumpedStorage_071212b1.pdf)
- [22] CORÀ, Emiliano. Hydropower Technologies: the state-of-the-art. *Hydropower Europe* [online]. Public, 2019, s. 1-73 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: [https://consultation.hydropower-europe.eu/assets/consultations/2019.08.13%20HydropowerTechnology\\_State%20of%20the%20Art%20FINAL.pdf](https://consultation.hydropower-europe.eu/assets/consultations/2019.08.13%20HydropowerTechnology_State%20of%20the%20Art%20FINAL.pdf)
- [23] FURUYA, S., T. TAGUCHI, K. KUSUNOKI, T. YANAGISAWA, T. KAGEYAMA a T. KANAI. Successful achievement in a variable speed pumped storage power system at Yagisawa power plant. In: *Conference Record of the Power Conversion Conference - Yokohama 1993*. Yokohama, Japan, Japan: IEEE, 1993, s. 603-608. DOI: 10.1109/PCCON.1993.264187. ISBN 0-7803-0471-3. INSPEC 4558743. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/264187>
- [24] KUWABARA, T., A. SHIBUYA, H. FURUTA, E. KITA a K. MITSUHASHI. Design and dynamic response characteristics of 400 MW adjustable speed pumped storage unit for Ohkawachi Power Station. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. IEEE, 1996, **11**(2), 376-384. DOI: 10.1109/60.507649. ISSN 1558-0059. INSPEC 5313542.
- [25] IWADACHI, A., K. TANI a K. AGURO. The design of adjustable-speed pump-turbine modified from existing constant-speed on Okutataragi Power Station. In: *2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Chiba, Japan: IEEE, 2016, s. 1-4. ISBN 978-4-88686-098-9. INSPEC 16639759.
- [26] YOKOYAMA, Yuya, Kazuo YAMAMOTO a Kiyohito TANI. Renovation of the pumped-storage system from fixed speed to adjustable speed at Okutataragi power station. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2019, **240**, 082004. DOI: 10.1088/1755-1315/240/8/082004. ISSN 1755-1315. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/240/8/082004>
- [27] BEYER, Thomas. Goldisthal Pumped-Storage Plant: More than Power Production. *Hydro Review* [online]. Hydro Review, 2007 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.hydroreview.com/2007/03/01/goldisthal-pumped-storage-plant-more-than-power-production/#gref>

- [28] ANTHEAUME, Sylvain, Geoffrey DARONA, Jean-Bernard HOUDELIN, Yves LABRECQUE a Patrick LAURIER. Upgrading Two Pumped Storage Plants to Variable Speed. *Hydro Review* [online]. Hydro Review, 2015 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.hydroreview.com/2015/02/17/upgrading-two-pumped-storage-plants-to-variable-speed/#gref>
- [29] Project Report Frades II. *Voith* [online]. Německo: Voith Hydro GmbH & Co. KG [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: [https://voith.com/br/2012-10-12\\_Project\\_Report\\_Frades\\_II.pdf](https://voith.com/br/2012-10-12_Project_Report_Frades_II.pdf)
- [30] Frades II, Portugal: Europe's most advanced pumped-storage plant. *Voith* [online]. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <http://voith.com/corp-en/industry-solutions/hydropower/pumped-storage-plants/frades-ii-portugal.html>
- [31] HARVEY, Abby. A milestone for hydropower: Successful startup of Frades II, the largest variable speed pumped storage plant in Europe. *POWER Magazine* [online]. 2017 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.powermag.com/press-releases/a-milestone-for-hydropower-successful-startup-of-frades-ii-the-largest-variable-speed-pumped-storage-plant-in-europe/>
- [32] Variable Speed Pumped Hydroelectric Tech | Energy Storage Association. *Energy Storage Association Homepage | ESA* [online]. Washington D.C.: Energy Storage Association, 2020 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/variable-speed-pumped-hydroelectric-storage/>
- [33] SIVAKUMAR, N., Devadutta DAS a N.P. PADHY. Variable speed operation of reversible pump-turbines at Kadamparai pumped storage plant – A case study. *Energy Conversion and Management*. 2014, **78**, 96–104. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.10.048.
- [34] OBOŘIL, David. Přecherňavací vodní elektrárny v České republice. *OEnergetice* [online]. Kpt. Nálepky 620/7, Nové Dvory, 674 01 Třebíč: David Vobořil, 2017 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrany-cr/precerpavaci-vodni-elektrany-v-ceske-republice>
- [35] Přecherňavací elektrárna Dlouhé stráně: Vodní elektrárny ČEZ. *Svět Energie* [online]. Praha: ČEZ, a. s., 2016 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrany/vodni-elektrany/vodni-elektrany-cez/precerpavaci-elektrarna-dlouhe-strane>
- [36] Přecherňavací elektrárna Dalešice: Vodní elektrárny ČEZ. *Svět Energie* [online]. Praha: ČEZ, a. s., 2016 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrany/vodni-elektrany/vodni-elektrany-cez/precerpavaci-elektrarna-dalesice>
- [37] Přecherňavací vodní elektrárna Dalešice je v provozu již 40 let. *OEnergetice* [online]. Kpt. Nálepky 620/7, Nové Dvory, 674 01 Třebíč: ČTK, 2018 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrany-cr/precerpavaci-vodni-elektrarna-dalesice-je-v-provozu-jiz-40-let>
- [38] Přecherňavací vodní elektrárna Štěchovice II. *Svět Energie* [online]. Praha: ČEZ, 2016 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrany/vodni-elektrany/vodni-elektrany-cez/precerpavaci-vodni-elektrarna-stechovice-2>

- [39] ENERGETIS, . *Vyhledávací studie vhodných lokalit pro možnou realizaci přečerpávacích vodních elektráren z hlediska jejich technického, enviromentálního, případně ekonomického vyhodnocení a regulační funkce ve vztahu k elektrizační soustavě*. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2010.
- [40] Converting to Variable Speed at a Pumped-Storage Plant. *Hydro Review* [online]. Hydro Review, 2013 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.hydroreview.com/2013/09/01/converting-to-variable-speed-at-a-pumped-storage-plant/#gref>
- [41] YANG, Xiaobo, Chao YANG, Chengyan YUE, Dawei YAO a Chunming YUAN. *Optimized Operation of Hydropower Plant with VSC HVDC Unit Connection*. Cigré AORC Technical Meeting 2014 in Tokyo, Japan: AORC Technical meeting 2014, 2014. Dostupné z: [https://pdfs.semanticscholar.org/e03a/f6bfe2e3be11bdb252d29bd01fcc106a36ac.pdf?\\_ga=2.105375296.278284081.1585320932-505675466.1579281544](https://pdfs.semanticscholar.org/e03a/f6bfe2e3be11bdb252d29bd01fcc106a36ac.pdf?_ga=2.105375296.278284081.1585320932-505675466.1579281544)
- [42] Zprávy o provozu elektrizační soustavy. *ERÚ* [online]. Masarykovo náměstí 5 586 01 Jihlava: ERÚ, c2014-2019 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/cs/zpravy-o-provozu-elektrizacni-soustavy>
- [43] CHP Avče. *Wayback Machine* [online]. Nova Gorica (Slovinsko): SENG, 2017 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: [https://web.archive.org/web/20170329052247/http://www.seng.si:80/che\\_avce/](https://web.archive.org/web/20170329052247/http://www.seng.si:80/che_avce/)
- [44] DOE Global Energy Storage Database. *Energystorageexchange* [online]. 2020 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.sandia.gov/ess-ssl/global-energy-storage-database-home/>
- [45] Generation Electricity from Wind Energy Using Double Fed Induction Generator. *EIProCus* [online]. Hyderabad (India): EIProCus, ©2013-2020 [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/using-double-fed-induction-generator/>
- [46] *Interní materiály ČEZ*. b.r.
- [47] SCHMIDT, E., J. ERTL, A. PREISS, R. ZENSCH, R. SCHÜRHubER a J. HELL. Studies about the low voltage ride through capabilities of variable-speed motor-generators of pumped storage hydro power plants. In: *AUPEC 2011*. 2011, s. 1-6.