

## 2. Větrná energetika

Energie větru je člověkem využívána již několik století. První zmínky o větrném motoru s vodorovnou osou jsou ze 3. století před Kristem z Egypta. Na evropském kontinentu se začaly větrné mlýny využívat od 13. století. V této době byl v této oblasti zaznamenán velký rozmach především v Holandsku, které se ve 14. století dostalo na první pozici ve využívání větrné energie. Větrná energie byla v této době využívána především pro mletí obilí, čerpání vody a zpracování dřeva (obrázek 2.1). Pro Holandsko bylo velmi typické spojení větrného rotoru s Archimédovým šroubem, které se využívalo k odvodňování nebo zavlažování zemědělských pozemků (obrázek 2.2).

Začátkem 19. století dochází k dynamickému rozvoji využívání větrné energie v USA, kde bylo v této době postaveno více než 6 milionů malých mnoho lopatkových větrných motorů, které byly využívány především pro čerpání vody.



Obr. 2.1: Větrný mlýn – pila



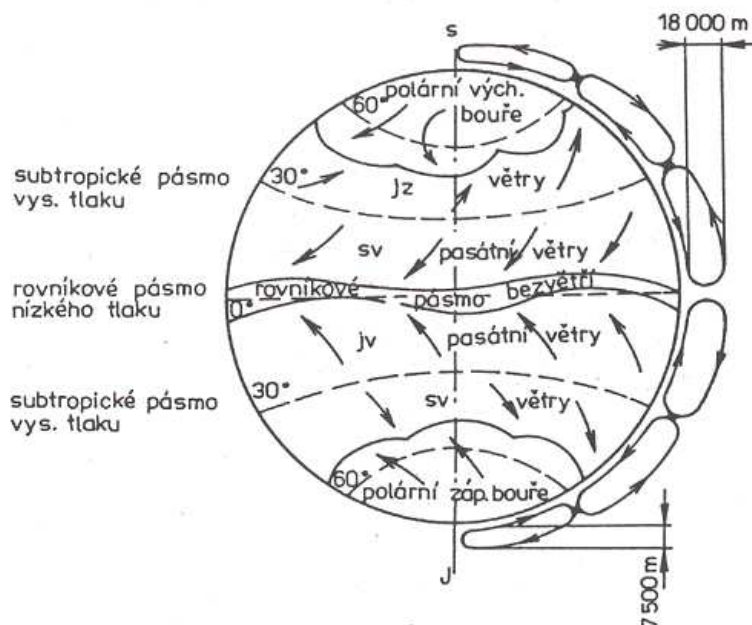
**Obr. 2.2: Archimédův šroub**

Na začátku 19. století byla realizována první aplikace využívající větrnou energii pro výrobu energie elektrické (Poul la Cour 1891). Avšak vzhledem k objevení a vývoji parního stroje došlo v závěru 19. století k útlumu rozvoje využívání větrné energie.

V současné době došlo k obnově zájmu o využívání větrné energie a to především pro výrobu elektrické energie. Tento „boom“ větrné energetiky souvisí se snahou omezení nepříznivých vlivů při využívání fosilních paliv pro výrobu energie a s tím související snaha o snížení emisí skleníkových plynů v atmosféře.

## 2.1. Vítr jako energetický zdroj

Vítr vzniká vlivem nerovnoměrného ohřevu zemského povrchu slunečním zářením. Od ohřátého povrchu se ohřívá přilehlá vrstva vzduchu a teplý vzduch má tendenci stoupat vzhůru. Celý děj je silně ovlivněn rotací Země a střídáním dne a noci, což má za důsledek vznik tlakových rozdílů v zemské atmosféře. Vyrovnaním tlakových rozdílů vzniká vítr, který vane vždy od tlakové výše k tlakové níži. Kolem tlakové níže na severní polokouli jde spinální pohyb proti směru hodinových ručiček, u tlakové výše ve směru hodinových ručiček. Na jižní polokouli je smysl rotace u tlakové výše a níže opačný (viz. obrázek 2.3). [1], [9]



Obr. 2.3: Princip vzniku větru [9]

Z hlediska využívání větrné energie je nejdůležitějším faktorem rychlost větru, která má majoritní vliv na celkový i využitelný výkon větru. Rychlost větru je ovlivňována členitostí zemského povrchu a platí, že směrem k němu klesá. V rovinném terénu pro rychlost větru platí

$$\frac{v^*}{v_0^*} = \left( \frac{h}{h_0} \right)^n \quad (2.1)$$

kde

$v^*$  .....průměrná rychlost větru ve výšce  $h$  nad zemským povrchem

$v_0^*$  .....průměrná rychlost větru ve výšce  $h_0$

$n$  .....drsnost povrchu ( viz tabulka 2.1)

Typ povrchu	$n$
$a$ – hladký povrch (vodní hladina, písek)	0,14
$b$ – louka s nízkým travním porostem, oranice	0,16
$c$ – vysoká tráva, nízké obilné porosty	0,18
$d$ – porosty vysokých kulturních plodin	0,21
$e$ – lesy	0,28
$f$ – vesnice a malá města	0,48

Tab. 2.1: Typy povrchů [9]

Pro snadnější výpočet rychlosti větru jsou výše uvedené exponenty poměrné hodnoty rychlosti větru vyjádřeny korekčním součinitelem  $k_h$  při odchylce údaje v referenční výšce 10 m nad povrchem, jak je uvedeno v tabulce 2.2. Pro rychlost větru pak můžeme napsat rovnici ve tvaru

$$v_h^* = k_h \cdot v_{10}^* \quad (2.2),$$

Druh povrchu	Výška $h$ (m)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
<i>a</i>	0,91	1,00	1,06	1,10	1,14	1,17	1,19	1,21	1,23	1,25
<i>b</i>	0,90	1,00	1,07	1,12	1,16	1,19	1,22	1,25	1,27	1,29
<i>c</i>	0,88	1,00	1,08	1,13	1,18	1,22	1,25	1,28	1,31	1,34
<i>d</i>	0,86	1,00	1,09	1,16	1,21	1,26	1,30	1,34	1,37	1,40
<i>e</i>	0,82	1,00	1,12	1,21	1,29	1,36	1,42	1,47	1,52	1,57
<i>f</i>	0,72	1,00	1,21	1,39	1,55	1,69	1,82	1,95	2,06	2,17

**Tab. 2.2: Hodnoty korekčního součinitele  $k_h$  [3]**

Dalším důležitým faktorem ovlivňujícím rychlost větru jsou různé uměle vytvořené překážky (budovy), za kterými rychlost větru klesá, mění se jeho směr a vytvářejí se větrné víry. Tyto turbulentní změny značně zvyšují namáhání větrných rotorů instalovaných v blízkosti těchto překážek. Platí, že prostor zasažený turbulentním prouděním se za překážkou zvedá až do její trojnásobné výšky. [3]

### 2.1.1 Energie a výkon větru

Energie pohybující se hmoty vzduchu je možno vyjádřit následující rovnicí (2.3), kde  $v$  představuje rychlost vzduchu a  $m$  hmotu.

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (2.3)$$

Pro hmotu  $m$  platí vztah

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot s \quad (2.4)$$

kde

$A$ ..... plocha, kterou daný objem vzduchu protéká

$s$  ..... dráha, kterou urazí pohybující se vzduch

Z výše uvedených vztahů je možno velmi jednoduše odvodit rovnici pro výkon větru protékajícího jednotkovou plochou. Z výsledné rovnice (2.7) vyplývá, že výkon větru protékající jednotkovou plochou je přímo úměrný hustotě vzduchu a třetí mocnině rychlosti větru. Závislost výkonu větru  $P_v$  protékajícího jednotkovou plochou 1 m<sup>2</sup> na rychlosti větru je vidět na obrázku 2.4.

$$P_v = \frac{E}{A \cdot t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{A \cdot s}{A \cdot t} \cdot v^2 \quad (2.5)$$

kde  $\frac{s}{t} = v$  (2.6)

Dosazením rovnice 2.6 do rovnice 2.5 získáme výslednou rovnici pro výkon větru.

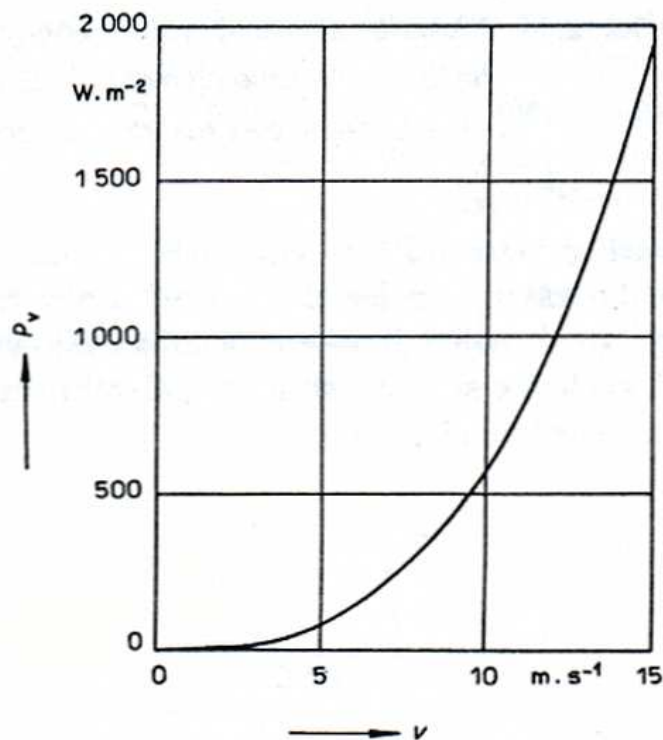
$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (2.7)$$

Rychlost větru i výkon větru jsou časově proměnné veličiny. S ohledem na tuto skutečnost můžeme pro energii větru protékajícího jednotkovou plochou za dané období napsat rovnici

$$E_v = \int_{t_0}^t P_v \cdot dt \quad (2.8)$$

V případě, že v daném časovém intervalu je teplota a hustota vzduchu konstantní, můžeme rovnici upravit do následujícího tvaru:

$$E_v = \frac{\rho}{2} \cdot \int_{t_0}^t v^3 \cdot dt \quad (2.9).$$



Obr. 2.4: Závislost výkonu větru protékajícího plochou 1 m<sup>2</sup> na jeho rychlosti [9]

## 2.2. Rozdělení větrných motorů

Větrné motory jsou zařízení, které se používají k přeměně kinetické energie větru na mechanickou energii. Ve větrných elektrárnách se nejprve kinetická energie větru přeměňuje v mechanickou energii, která je následně transformována v elektrickou energii. Rozdělení

větrných elektráren může být provedeno podle mnoha různých hledisek, ale základní dělení je provedeno podle aerodynamického principu funkce větrného motoru, a to na:

- motory odporové
- motory vztlakové

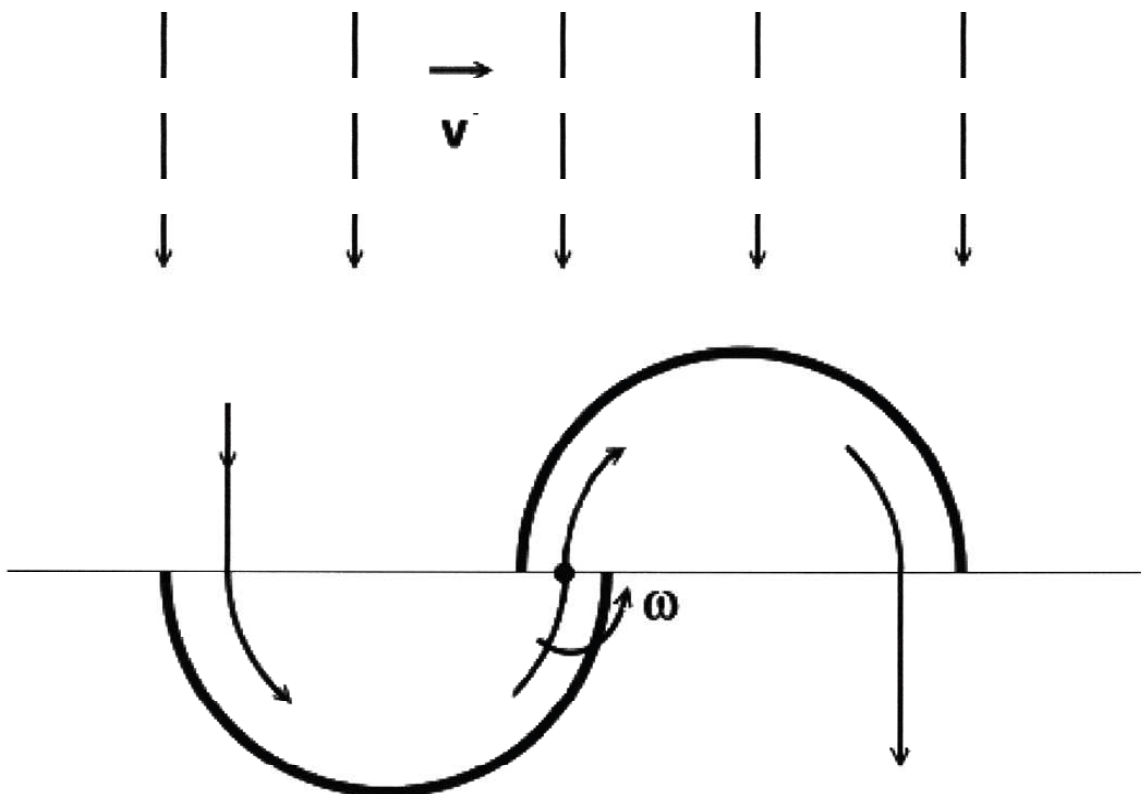
Další rozdělení větrných motorů může být provedeno podle uložení osy rotace (horizontální a vertikální), podle instalovaného výkonu a podle rychlostního součinitele ( $\lambda$ ) na pomaluběžné a rychloběžné.

### 2.2.1 Větrné motory odporové

Z hlediska využití patří odporové větrné motory mezi nejstarší. Podstatou těchto motorů je skutečnost, že plocha nastavená proti větru mu vytváří aerodynamický odpor. Tím se na této ploše vytváří síla, která se mechanicky přeměňuje na rotační pohyb. Aby mohl u tohoto typu větrného motoru vzniknout hnací kroučící moment, musí být obvodová rychlost vždy menší než rychlost větru. Bez odběru energie z hřídele jsou otáčky úměrné rychlosti větru a při zdvojnásobení rychlosti větru se i otáčky zvýší dvojnásobně.

Větrné motory pracující na odporovém principu pracují s účinností v rozmezí 15 – 23%, což je důvodem jejich nízkého výskytu v moderní energetické koncepci. Mezi klasické představitele tohoto typu větrného motoru patří například Savoniův motor (obrázek 2.5).

Savoniův motor je v základním provedení sestaven ze dvou svislých lopatek, které jsou uprostřed přibližně o 20% průměru rotoru přesazeny do protisměru. V této konfiguraci je část energie větru ze zadní strany „pasivní“ lopatky směřována na přední stranu „aktivní“ lopatky.



Obr. 2.5: Savoniův větrný motor [3]

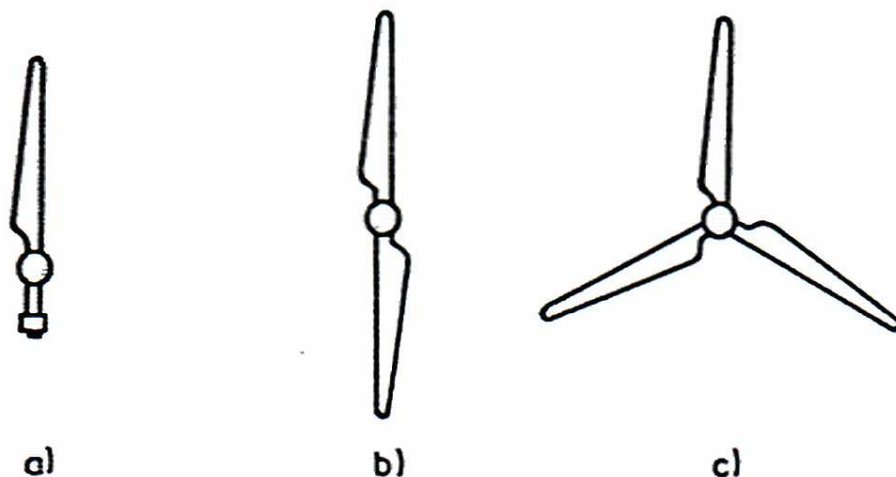
Výhody Savoniova motoru (a odporových motorů obecně) můžeme shrnout do několika bodů:

- jednoduchá konstrukce
- nezávislost na směru větru – není potřeba otáčení rotoru do směru větru
- přímý přenos krouticího momentu na hřídel
- využití širokého pásma síly větru – využitelná rychlost větru již od  $2 \text{ m.s}^{-1}$

Za hlavní nevýhody při využití větrných motorů na odporovém principu lze považovat malou rychloběžnost, nízké otáčky, vysoké hodnoty točivého momentu a nízký součinitel využití energie větru (malý dosažitelný elektrický výkon).

### 2.2.2 Větrné motory vztlakové

Mezi větrné motory pracující na vztlakovém principu patří rotory a větrná kola s vodorovnou osou otáčení, které jsou orientovány rovinou otáčení kolmo ke směru větru. Nejčastěji jsou vztlakové rychloběžné motory konstruovány jako dvou nebo třílisté, ale můžeme se setkat i s jednolistým nebo čtyřlístým provedením (obrázek 2.6). Příklady jednotlivých typů vztlakových motorů jsou znázorněny na obrázku 2.7a a 2.7b. Na vztlakovém principu pracují také větrné motory s vertikální osou. Příkladem takového motoru je motor Darrieus (obrázek 2.8), který může být v provedení dvoulistém, třílístém i čtyřlístém.

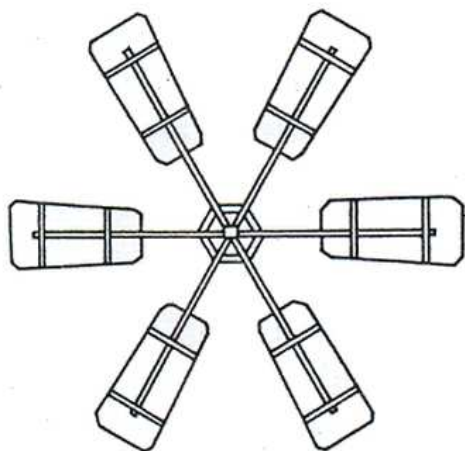


**Obr. 2.6: Vztlakové motory a) jednolisté provedení s protizávažím b) dvoulisté provedení c) třílísté provedení [9]**

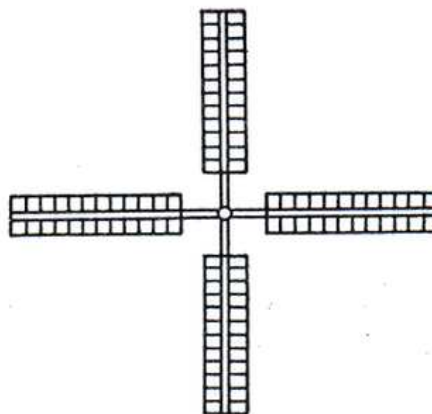
Rychloběžné axiální motory byli v posledních letech neustále zdokonalováni a jejich současná technická úroveň umožňuje dosažení vysokého součinitele využití (účinnost) a to přes 40%. Obvodová rychlost konců lopatek může u tohoto typu motoru dosahovat dvou až desetinásobku rychlosti větru.

Výhodou rychloběžných větrných motorů je jejich relativně nízká hmotnost. Naopak za určitou nevýhodu lze u tohoto typu provedení považovat zhoršený rozběh při nízkých

rychlostech větru. Obvyklá rozběhová rychlost větru je u těchto motorů kolem 5 m.s-1. Tyto motory jsou velmi vhodné pro výrobu elektrické energie.

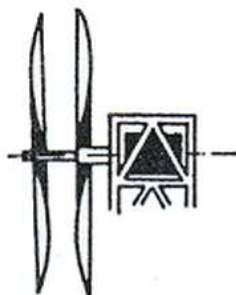


Rotor moderního větrného čerpadla se šesti plechovými lopatkami

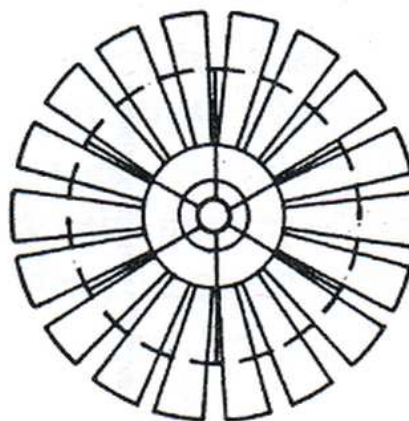


Jeden z typických rotorů větrného mlýna

**Obr. 2.7a: Příklad provedení vztlakových rotorů [9]**



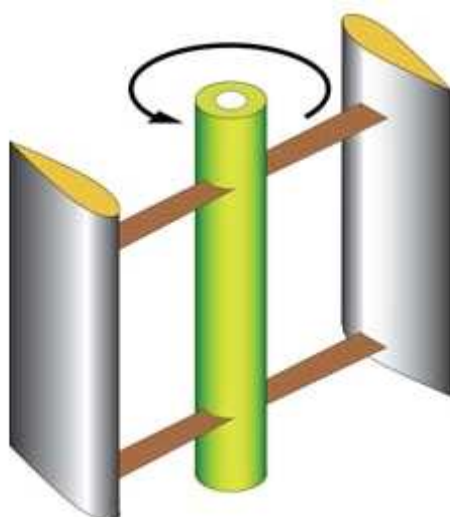
Uspořádání protiběžných rotorů větrné elektrárny



Větrné kolo tzv. amerického větrného motoru s větším počtem lopatek

**Obr. 2.7b: Příklad provedení vztlakových rotorů [9]**



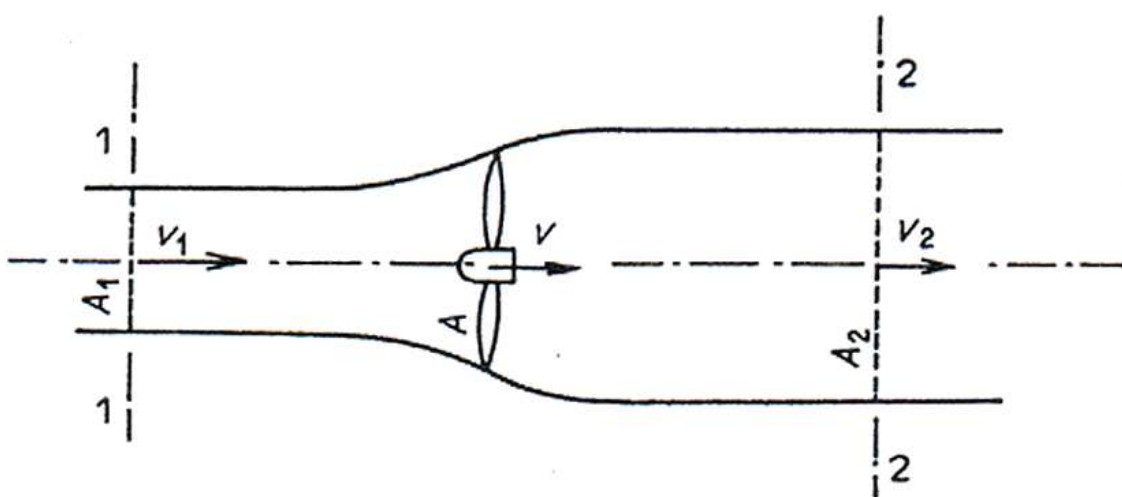


Obr. 2.8: Větrný motor typu Darrieus [12]

### Princip funkce vztlakových motorů

Princip funkce vztlakových motorů vychází z rovnice kontinuity. Jak již bylo uvedeno výše, větrné motory jsou využívány k přeměně kinetické energie větru na mechanickou práci – zpomalují proud vzduchu, který protéká jejich pracovní plochou a tím odnímají větru část jeho energie. Obecné schéma přeměny kinetické energie na výkon je na obrázku 2.9. V prostoru omezeném proudovými plochami, jak je naznačeno na obr. 2.9, se nepřenáší hmota ani energie a proto můžeme tento stav popsat rovnicí kontinuity:

$$v_1 \cdot A_1 = v \cdot A = v_2 \cdot A_2 \quad (2.10)$$



Obr. 2.9: Princip funkce vztlakového rotoru – rovnice kontinuity [9]

Ve zúženém místě prostoru omezeném proudovými plochami se při proudění vzduchu podle obr. 2.9, se musí snížit rychlost vzduchu, má-li být objemový tok stejný. Proto průřezem  $A_1$

poteče při rychlosti  $v_1$  objem  $v_1 \cdot A_1$ , průřezem  $A$  při rychlosti  $v$  objem  $v \cdot A$  a průřezem  $A_2$  při rychlosti  $v_2$ , objem  $v_2 \cdot A_2$ . Pro libovolný průřez  $A$  pak platí  $A \cdot v = konst.$

Ze zákona zachování hybnosti můžeme dále odvodit axiální sílu ( $F_a$ ) působící na listy větrného motoru. Pro axiální sílu platí rovnice:

$$F_a = \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad (2.11).$$

Výkon větru  $P$  je následně definován rovnicí 2.12 a výkon určený ze změny kinetické energie ( $\Delta E_k$ ) proudu protékého vzduchu za jednu sekundu kontrolní plochou je definován rovnicí 2.13.

$$P = F_a \cdot v = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \quad (2.12)$$

$$P = \frac{\Delta E_k}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.13)$$

Srovnáním rovnic 2.12 a 2.13 můžeme definovat vztah pro rychlost  $v$  ve tvaru:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2.14)$$

Po úpravách pak můžeme pro axiální sílu  $F_a$  působící na listy větrného motoru a pro výkon větru  $P$  napsat rovnice v následujících tvarech:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.15).$$

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2) \quad (2.16).$$

Ideální účinnost přeměny kinetické energie na mechanickou můžeme definovat jako poměr výkonu motoru k výkonu větru. Při uvažování ideálního větrného motoru s nekonečným počtem lopatek pracujících bez aerodynamického odporu můžeme pro účinnost napsat vztah

$$\eta_i = \frac{(v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2)}{2 \cdot v_1^3} \quad (2.17).$$

Výše uvedené rovnice popisují ideální stav – definují pouze výkon vzduchové hmoty. Pokud bychom chtěli definovat výkon větrného motoru protékaného touto hmotou, je potřeba rovnici výkonu větru vynásobit součinitelem výkonnosti  $c_p$ . Součinitel výkonnosti udává, kolik energie z proudícího vzduchu se využívá na turbíně. Jeho maximální hodnota může teoreticky podle Netzova pravidla dosahovat  $c_p = 0,59$ . Hodnota součinitele výkonnosti není konstantní a je funkcí rychlosti větru. Obecně lze říci, že hodnota součinitele výkonnosti je při nízkých rychlostech větru nízká, při středních rychlostech dosahuje maximálních hodnot a při vyšších rychlostech opět klesá. [4]

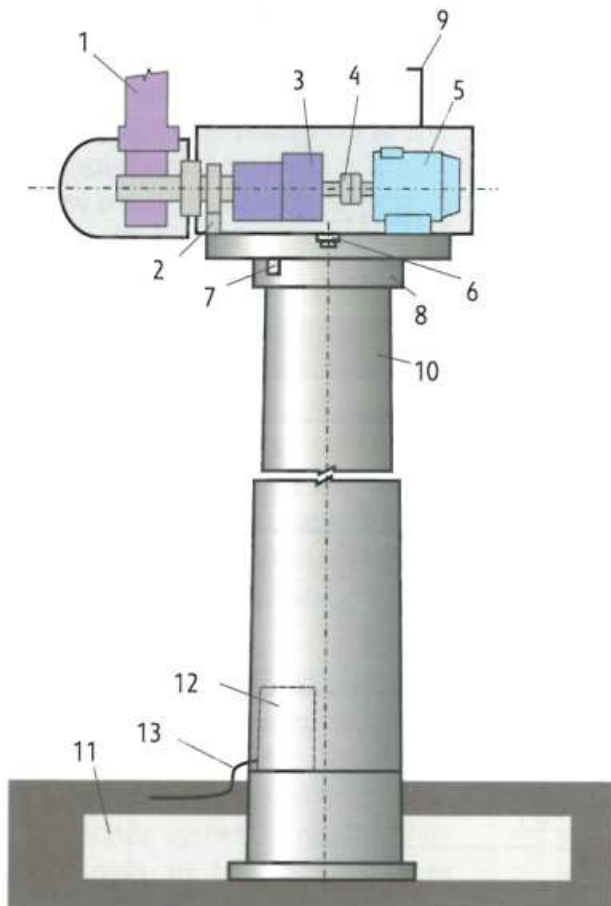
### 2.3. Elektrická zařízení větrných elektráren

Pro výrobu elektrické energie se ve větrných elektrárnách používají asynchronní a synchronní generátory.

Asynchronní generátor je v porovnání se synchronním jednodušší a finančně méně náročný a z hlediska provozu je spolehlivější. Nevýhodou asynchronního generátoru je malé rozpětí otáček. Naopak výhodou asynchronního generátoru je jeho jednoduchý rozběh, připojení na síť a regulace výkonu.

Synchronní generátor může být provozován pouze při synchronních otáčkách větrné turbíny. Aby bylo možné synchronní generátor provozovat v širším rozmezí otáček, je potřeba vyrobenou elektrickou energii usměrnit a následně opět s využitím střídače převést na frekvenci sítě.

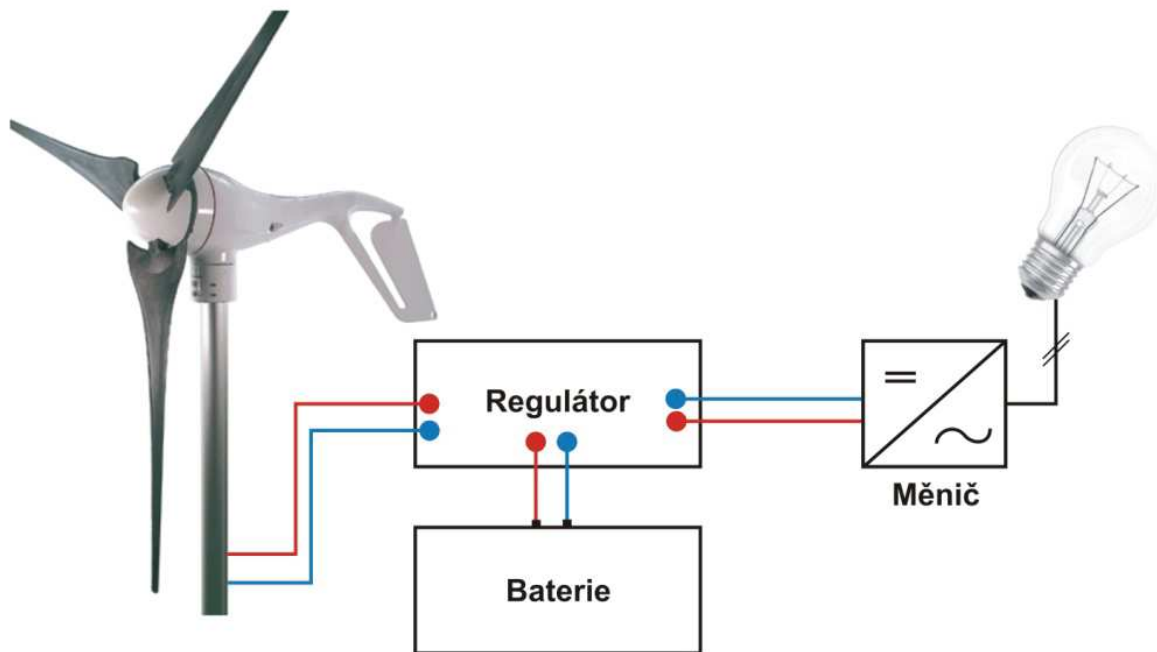
Typická konstrukce větrné elektrárny je zobrazena na obrázku 2.10. Větrná elektrárna se skládá z následujících základních částí: 1 – větrný motor s rotorovou hlavou, 2 – brzda rotoru, 3 – převodovka, 4 – spojka, 5 – generátor, 6 – servopohon pro natáčení strojovny, 7 – brzda strojovny, 8 – ložiska, 9 – senzor pro snímání rychlosti a směru větru, 10 – tubus elektrárny (stožár), 11 – betonový základ elektrárny, 12 – elektrorozvaděče silnoproudého zařízení a řídicího obvodu, 13 – elektrická přípojka.



Obr. 2.10: Větrná elektrárna – konstrukce [5]

### 2.3.1 Větrné elektrárny malých výkonů

U malých větrných elektráren s výkonem do 10 kW se pro výrobu elektrické energie využívají více pólové synchronní generátory s permanentními magnety. Běžnou součástí těchto malých větrných elektráren je usměrňovač pro napájení akumulátorové baterie nebo autonomní stejnosměrné sítě. Elektrárny mohou být doplněny střídačem, umožňujícím napájení malých jednofázových spotřebičů. Příklad energetického systému s malou větrnou elektrárnou je zobrazen na obrázku 2.11.



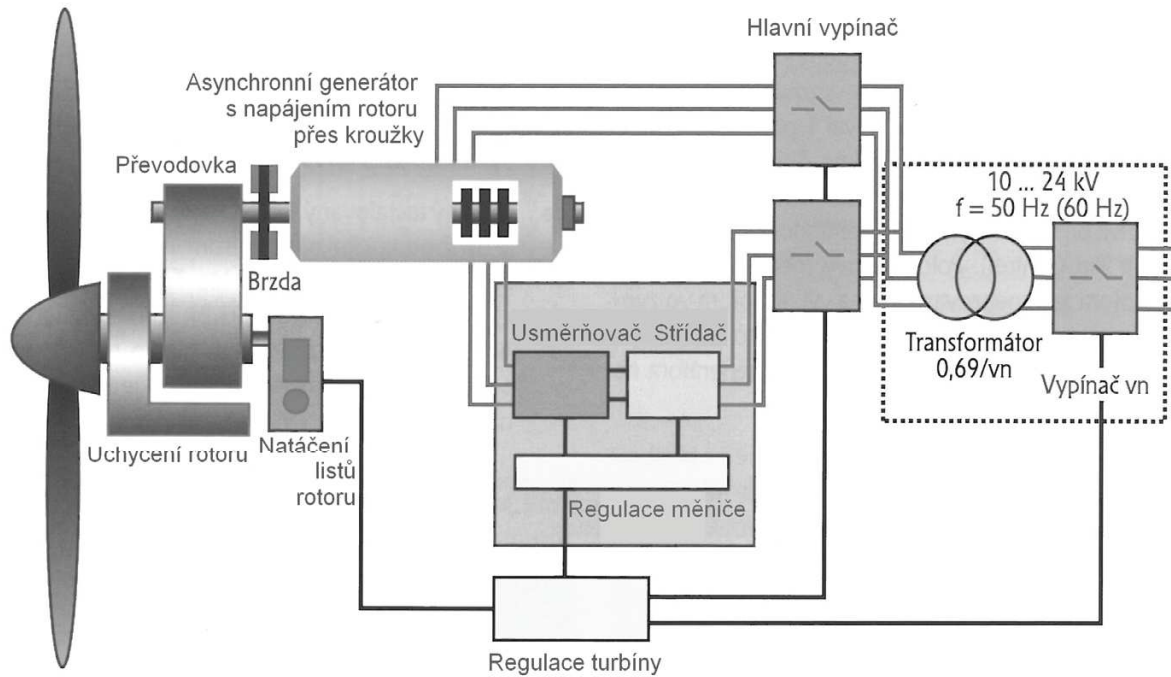
Obr. 2.11: Možnost zapojení malé větrné elektrárny

### 2.3.2 Větrné elektrárny středních a velkých výkonů

Ve větrných elektrárnách středních a velkých výkonů se pro výrobu elektrické energie využívají asynchronní motory s kotvou nakrátko pracující v generátorickém chodu. Jak již bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, výhodou asynchronních generátorů je jejich vysoká provozní spolehlivost, nenáročná údržba a nízké pořizovací náklady.

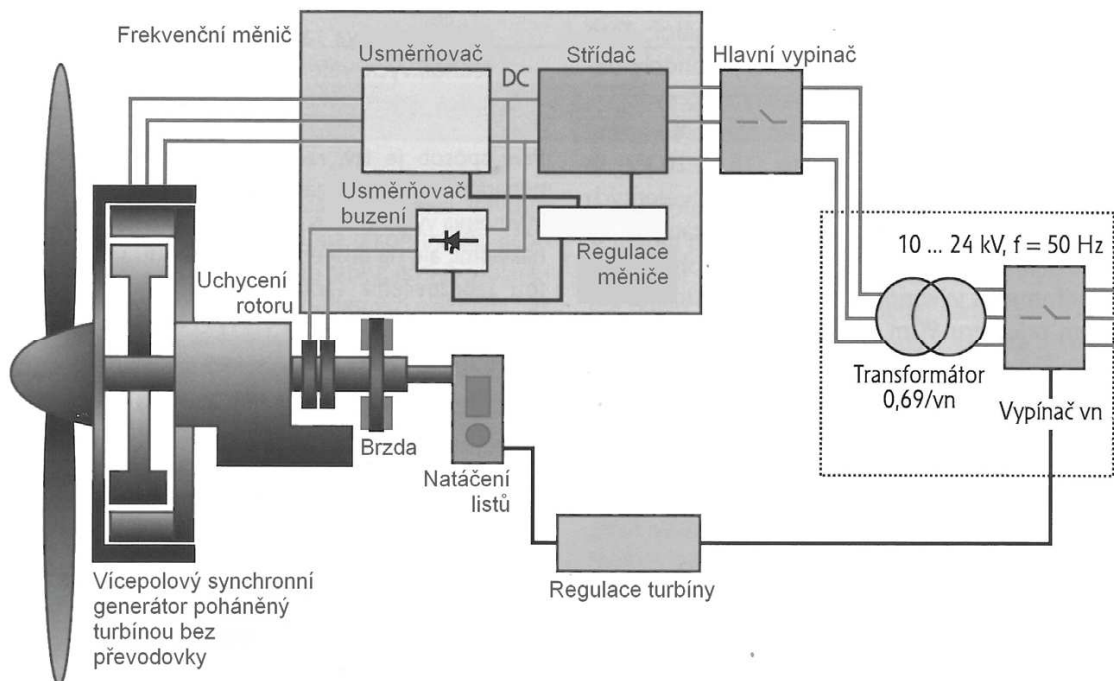
Nevýhodu při využití asynchronního generátoru, která plyne z malého regulačního rozpětí otáček generátoru, můžeme potlačit využitím asynchronního generátoru s napájeným rotorem (podsynchronní kaskáda), tzv. *double-fed induction generator*.

Toto zapojení se používá při vyšších instalovaných výkonech generátorů a umožňuje provoz generátorů i při nižších otáčkách turbíny – nízkých rychlostech větru. Příklad zapojení je na obrázku 2.12. Toto zapojení umožňuje provoz bez napájení rotoru v případě spojení rotorového vinutí nakrátko nebo v případě, že se do rotoru zapojí přídavné odpory, které umožní zvýšení rozsahu skluzu v generátorickém provozu sklonem momentové charakteristiky generátoru. [5]



**Obr. 2.12: Asynchronní generátor s napájeným rotorem [5]**

Synchronní generátory se využívají u větrných elektráren s velkým instalovaným výkonem nebo speciálního provedení. V současné době jsou poměrně velmi využívány synchronní generátory poháněné přímo turbínou bez převodovky. Konstrukčně jsou provedeny jako synchronní generátory s budícím vinutím na rotoru. Výhodou tohoto řešení je snížení hmotnosti gondoly větrné elektrárny, ale na druhou stranu se zvětší rozměry generátoru, ke kterému je dále připojen měnič frekvence s možností regulace celého jeho výkonu. Elektrárny v tomto provedení mohou pracovat v širokém rozpětí otáček turbíny. Příklad zapojení je na obrázku 2.13

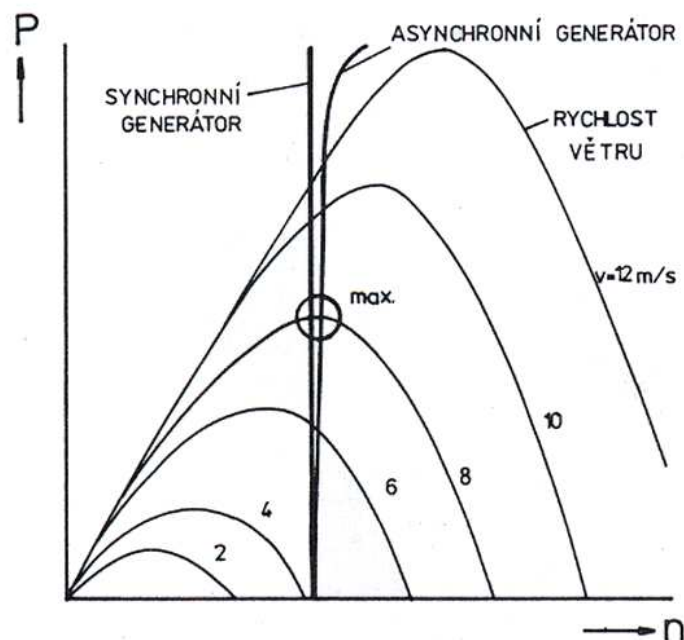


**Obr. 2.13: Synchronní generátor poháněný přímo turbínou [5]**

## 2.4. Regulace výkonu větrných elektráren

Větrné elektrárny jsou konstruovány tak, aby bylo možné při rychlostech větru kolem  $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $54 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) docílit maximálního energetického výnosu. Stavět zařízení s maximem produkce při vyšších rychlostech se nevyplácí, protože tak vysoké rychlosti větru se vyskytují jen zřídka. V případě velmi silného větru se musí výkon větrných elektráren snížit, aby se zabránilo škodám na zařízení. [6]

Můžeme tedy konstatovat, že větrné elektrárny pracující při konstantních nebo téměř konstantních otáčkách využívají maximálního výkonu větru pouze při jeho jedné rychlosti (viz. obrázek 2.14). Minimální rychlost větru pro výrobu elektrické energie ve větrných elektrárnách je v rozmezí  $3 - 5,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Jmenovitý výkon je obvykle dosahován při rychlostech větru  $13 - 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a při rychlostech převyšujících  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  jsou větrné elektrárny odstavovány.



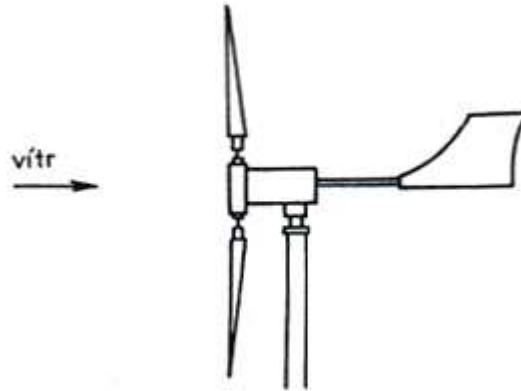
Obr. 2.14: Výkon a pracovní otáčky generátorů pro různé rychlosti větru [9]

Jak již bylo uvedeno, regulace výkonu je důležitá z hlediska ochrany proti překročení maximálních bezpečných otáček – omezují se otáčky i výkon pracovního stroje. Podle provedení větrných motorů existují dvě základní skupiny regulačních principů:

- pro větrné motory s pevnými lopatkami nebo listy
- pro větrné motory s natáčivými listy

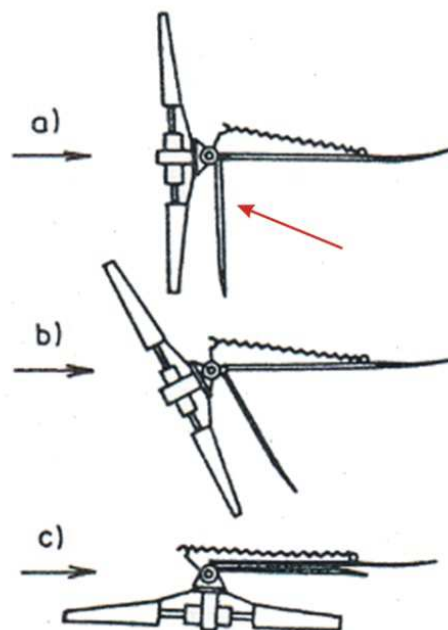
## 2.4.1 Regulace výkonu malých větrných elektráren

U malých větrných elektráren je maximální účinnosti transformace větrné energie dosahováno orientací rotoru do směru větru. Při nedodržení této podmínky dochází ke ztrátám výkonu. Jako natáčecí zařízení se u těchto elektráren používá směrové kormidlo (obrázek 2.15).



Obr. 2.15: Větrná elektrárna se směrovým kormidlem [9]

Pro regulaci otáček můžeme u malých větrných elektráren použít regulační kormidlo (obrázek 2.16a), které při určité rychlosti větru rotor natáčí. V případě mezních rychlostí větru dochází k úplnému odstavení a osa rotoru je kolmá ke směru větru (obrázek 2.16c). Tento způsob regulace je běžný u starších typů větrných elektráren, v dnešní době se i tyto malé jednotky konstruují jako rychloběžné, obvykle s výkonem do 1,5 kW. Jsou brzděny pomaloběžnými generátory s usměrňovačem a obvykle nejsou osazeny převodovkou.



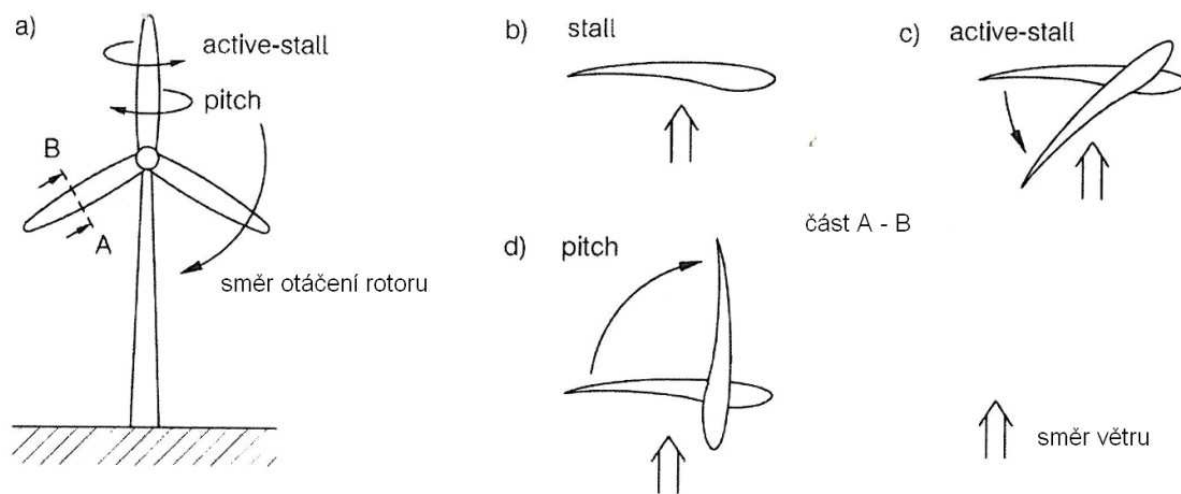
Obr. 2.16: Příklad regulace výkonu u malých větrných elektráren [9]

## 2.4.2 Regulace výkonu velkých větrných elektráren

Pro regulaci výkonu u velkých větrných elektráren se používají následující způsoby regulací:

- regulace STALL
- regulace PITCH
- regulace ACTIVE STALL
- regulace STALL-PITCH a PITCH-STALL

Obecně můžeme říci, že větrné elektrárny využívající regulaci STALL jsou konstrukčně jednodušší než elektrárny s regulací PITCH, protože nemají technický systém měnící nastavení listů rotoru. Princip jednotlivých regulací je naznačen na obrázku 2.17.



Obr. 2.17: Princip regulace STALL, PITCH a ACTIVE-STALL [7]

### Regulace STALL

U tohoto způsobu regulace jsou lopatky pevně kotveny k rotoru a regulace je dána proměnným tvarem lopatek. Při nárůstu rychlosti větru dochází k elastické změně geometrie konce lopatky. To způsobí zvyšování úhlu náběhu na konec lopatky a postupné odtržení proudu vzduchu od lopatky. Laminární proudění se postupně mění na turbulentní, což má za následek snížení vzlaku a pokles momentu na hřídeli.

Nevýhodou tohoto způsobu regulace je skutečnost, že výkon rotoru při vysokých rychlostech větru klesá a tím klesá i jeho účinnost. Další nevýhodou je neschopnost rotoru samostatného rozběhu, což je v praxi realizováno elektrickým motorem. Běžně se systém STALL využívá u elektráren s výkonem do 1000 kW.

### Regulace PITCH

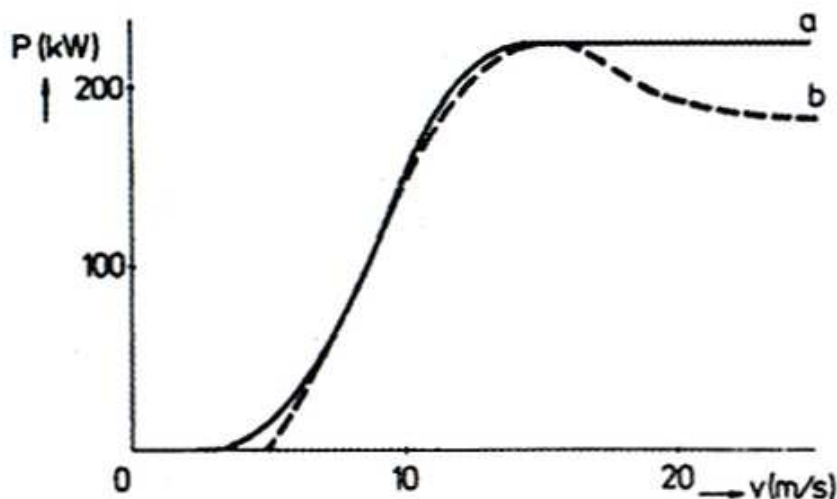
Jedná se o aktivní regulaci, která pracuje se vstupním signálem výkonu generátoru. V případě, že výkon překračuje bezpečné meze, elektrický signál uvede v činnost hydraulický systém, který provede vychýlení lopatek rotoru. Vychýlení lopatek způsobí snížení vzlaku,



větší radiální odpor lopatek a tedy snížení momentu na hřídeli. Poté, co se rychlost větru sníží, regulace zapůsobí opačným směrem a dojde k navýšení výkonu dle potřeby. Pro pohon hydraulického systému natačení se používá zpravidla krokových motorů. Na obrázku 2.18 je vidět průběh výkonu při využití regulace PITCH (a) a STALL (b). Konstrukce větrných turbín s touto regulací je náročnější, což má za následek i menší provozní spolehlivost. Regulaci PITCH lze využít pro regulaci rozběhu elektrárny, ale především k omezení výkonu při vyšších rychlostech větru, aniž by došlo k výraznému snížení výkonu. Rychlost regulace je poměrně pomalá a proto regulace na moment, při velkých výkyvech rychlostí větru v blízkosti maximálního výkonu není dostatečně rychlá, aby zabránila přetěžování generátoru. V současnosti se proto začíná využívat už kombinované regulace PITCH-STALL.

Výhody regulace PITCH můžeme shrnout do několika bodů:

- aktivní kontrola výkonu v celém rozsahu rychlosti větru
- vyšší produkce energie oproti regulaci STALL
- jednoduchý start elektrárny změnou nastavení úhlu náběhu
- nejsou potřeba silné brzdy pro okamžité zastavení rotoru
- snižuje zatížení listů rotoru
- nižší hmotnost rotorových listů



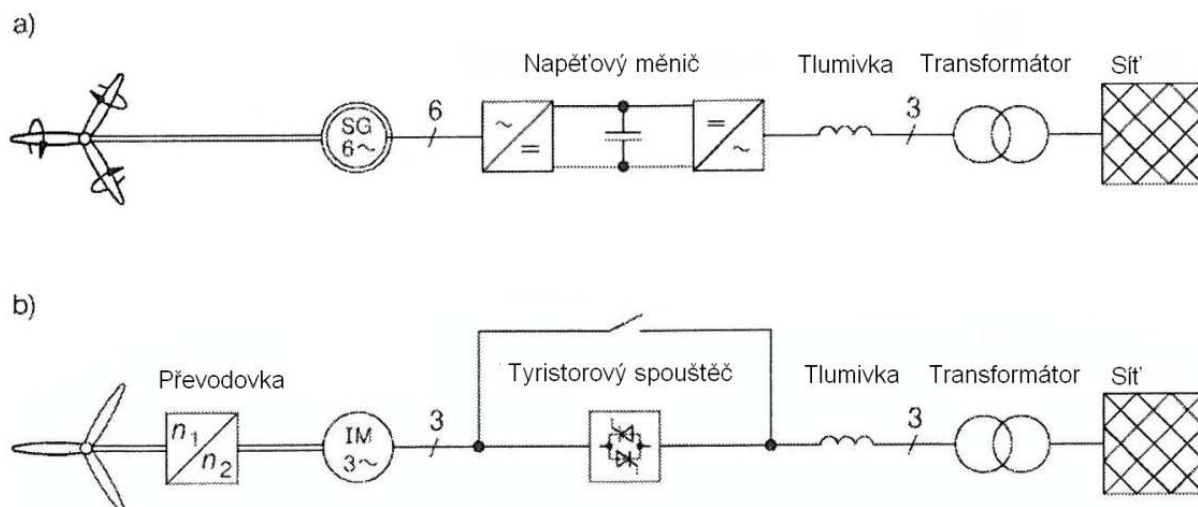
**Obr. 2.18: Výkonová charakteristika regulace PITCH (a) a STALL (b) [9]**

Blokové zapojení větrných elektráren využívajících regulaci PITCH a STALL je vidět na obrázku 2.19. Schéma a) představuje větrnou elektrárnu se synchronním generátorem využívající pro regulaci výkonu PITCH regulaci. Druhé blokové schéma představuje větrnou elektrárnu s asynchronním generátorem s výkonovou regulací STALL.

### **Regulace ACTIVE-STALL**

Při využití tohoto způsobu regulace je rozběh elektrárny a provoz při malých rychlostech větru stejný jako u regulace PITCH. Při dosažení limitních hodnot výkonu dojde k natočení lopatek v opačném směru než je tomu právě u regulace PITCH. To způsobí zvýšení úhlu náběhu větru, odtržení proudu vzduchu a pokles vztlaku. Úhel natočení nemusí být tak vysoký jak by tomu bylo při regulaci PITCH a proto je možné reagovat na náhlé nárůsty rychlosti větru rychleji a předcházet přetěžování generátoru. Výhodou této regulace

oproti regulaci PITCH je menší citlivost na znečištění povrchu na náběžných hranách listů (např. hmyz).



**Obr. 2.19: Zapojení větrných elektráren s různými typy regulací [7]**

### **Kombinovaná regulace STALL-PITCH**

Kombinovaná regulace STALL-PITCH vyžaduje vybavení turbíny jak natáčenými listy, tak konstrukcí listů na regulaci STALL. Rozběh turbíny a pohyb při nízkých rychlostech probíhá v systému regulace PITCH. Při dosažení vysokých rychlostí způsobí regulace PITCH zhoršení situace přetížení listů, které zafungují jak je tomu u regulace STALL a změnou geometrie lopatek omezí moment. Při vysokých rychlostech se natáčením lopatek plynule udržuje výkon v maximálních hodnotách. Snazší a stabilnější udržování výkonového maxima je hlavní výhodou této regulace. Negativním jevem je vyšší hlučnost a větší ohyb lopatek než u regulace PITCHSTALL.

### **Kombinovaná regulace PITCH-STALL**

Stejně jako u regulace STALL-PITCH je při nižších otáčkách využíváno PITCH regulace. Při dosažení vysokých otáček je dále omezován výkon natáčením lopatek a udržován požadovaný výkon. Při ještě vyšších rychlostech větru je pak postupně zapojována regulace STALL. Výhodou je pak nižší hlučnost a menší deformace lopatek. Požadavky na rychlost regulace jsou u této metody mnohem vyšší než u metody STALL-PITCH.

## **2.5. Vliv větrných elektráren na provoz elektrizační soustavy**

Využívání energie větru sebou přináší celou řadu problémů, souvisejících s jeho fyzikální podstatou. Nepravidelnost, nahodilost a špatná predikovatelnost (předpovědatelnost) síly a směru větru způsobují, že zařízení, určená k využívání jeho energie, jsou schopna pracovat pouze nevelkou část roku (v našich podmínkách cca 10 – 20%). Nedokonalé využívání vybudovaných kapacit vede jednak k ekonomickým ztrátám v samotné výrobě a jednak k problémům s regulací v elektrizační soustavě.

Zatímco ekonomické problémy (vysoké náklady na výrobu jednotky elektřiny z důvodů nízkého využití instalovaných zařízení) se řeší formou státní podpory obnovitelných zdrojů (provozovatelé distribučních soustav povinně vykupují takto vyrobenou elektřinu za stanovenou minimální cenu, ale tyto více náklady si započítávají do regulovaných nákladů za použití sítí), technické problémy s regulací soustavy v přítomnosti rychle fluktuujících větrných zdrojů musí řešit provozovatel přenosové soustavy systémem točivých rezerv, záložních a rychle startujících zdrojů. Jak distribuční soustavy, ke kterým jsou větrné elektrárny nejčastěji připojeny, tak i přenosová soustava musí řešit dopady, které sebou rozvoj větrné energeticky přináší.[8]

Jak bylo uvedeno v úvodu kapitoly 2.4, při rychlosti větru kolem  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  nejsou větrné elektrárny schopny vyrábět elektrickou energii a při rychlostech kolem  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  jsou větrné elektrárny odpojovány od sítě. Je tedy zřejmé, že je velmi obtížné zajistit konstantní dodávku elektrické energie do místa spotřeby a větrné elektrárny mohou mít, v případě chybné regulace výkonu, nepříznivý vliv na elektrizační soustavu. Vlivy větrných elektráren na elektrizační soustavu můžeme rozdělit do dvou kategorií:

- lokální,
- systémové.

### 2.5.1 Lokální vlivy větrných elektráren na provoz elektrizační

Prioritou pro provozovatele distribuční soustavy je maximální eliminace nežádoucích vlivů provozu větrných elektráren na distribuční soustavu. Tyto vlivy jsou dány především způsobem připojení generátoru větrné elektrárny k distribuční soustavě, parametry přípojného bodu distribuční soustavy (zkratový výkon) a volbou měřicího a řídicího zařízení. Způsob připojení k distribuční síti stanoví příslušný provozovatel distribuční soustavy na základě daných síťových poměrů, výkonu a způsobu provozu vlastní výroby. Každý zdroj, který je připojován do sítě ji v mnoha ohledech ovlivňuje. Tyto změny nesmí překročit dovolené meze, které jsou popsány v *Příloze 4 PPDS*. V případě připojení větrných elektráren velkých výkonů (nebo celých větrných parků) jsou lokální vlivy těchto výroben na elektrizační soustavu značné. Mezi základní sledované lokální vlivy patří:

- přetěžování sítí
  - prvním kritériem pro vyvedení výkonu větrných elektráren do sítě je dostatečně dimenzované místo připojení a související síť až k transformační stanici
- kolísání napětí
- zvýšení zkratových poměrů
  - větrná elektrárna se chová jako jakákoliv jiná elektrárna vyvedená
  - do jednoho bodu sítě, takže je potřeba počítat se změnou
  - zkratových poměrů v síti
- kvalita dodávky elektrické energie
  - výkonová elektronika, která je součástí větrných elektráren, může být rušivým zdrojem v síti
  - je nutno sledovat vyšší harmonické, dlouhodobý flicker a případné rušení HDO

U větrných elektráren s asynchronním generátorem s kotvou nakrátko a tyristorovým měničem může v případě vzniku náhlé změny momentu na hřídeli (změna rychlosti proudění větru) v okamžiku připojení elektrárny k distribuční soustavě dojít k deformaci průběhu proudu a napětí v místě připojení. V případě vyvedení výkonu větrné elektrárny do přípojného bodu distribuční soustavy kabelovým vedením, je deformace napětí i proudu ještě výraznější.

V případě využití asynchronního generátoru s kroužkovou kotvou a měničem frekvence odpovídá proudový ráz maximálně třetině jmenovitého proudu generátoru. U moderních větrných elektráren se pro omezení proudového rázu využívá přepínač Y/D. Rotorové vinutí je napájeno přes kroužky z rekuperačního měniče frekvence. Mezi měničem a rotorovým vinutím bývají umístěny tlumivka a sinusový filtr pro vyhlazení průběhu napětí a proudu.

Pro připojování větrných elektráren je definován tzv. *činitel proudového rázu*, který je definován jako poměr zapínacího rázu ku jmenovitému proudu generátoru. Obvykle nabývá hodnoty 4 pro asynchronní generátory připojované v rozmezí 95% - 105% synchronních otáček. Podrobnější informace k této problematice jsou uvedeny v kapitole 8.

## 2.5.2 Systémové vlivy větrných elektráren na provoz elektrizační soustavy

Systémové vlivy větrných elektráren se v elektrizační soustavě projevují při větším výskytu větrných elektráren v síti. Může docházet ke snížení přenosové schopnosti vedení na mezinárodních profilech. V tomto ohledu se v elektrizační soustavě České republiky v současné době projevuje především vliv větrných elektráren instalovaných v severní oblasti Německé republiky. Z hlediska systémových vlivů jsou sledovány především následující vlastnosti:

- začlenění větrných elektráren do pokrývání diagramu zatížení
  - dodávka z větrných elektráren je nestabilní a závislá na povětrnostních podmínkách
  - při vyšším počtu větrných elektráren v síti se nezvyšuje požadavek na velikost regulačního výkonu
- chování větrných elektráren při blízkých zkratech v přenosové soustavě a při velkých poruchách
  - hrozí nebezpečí plošných výpadků větrných elektráren připojených do přenosové soustavy
- dopad na stabilitu elektrizační soustavy
  - větrné parky mohou mít výrazný dopad na stabilitu chodu sítě v případě poruch a nárazových větrů

### 2.5.3 Požadavky na chování větrných elektráren v elektrizační soustavě

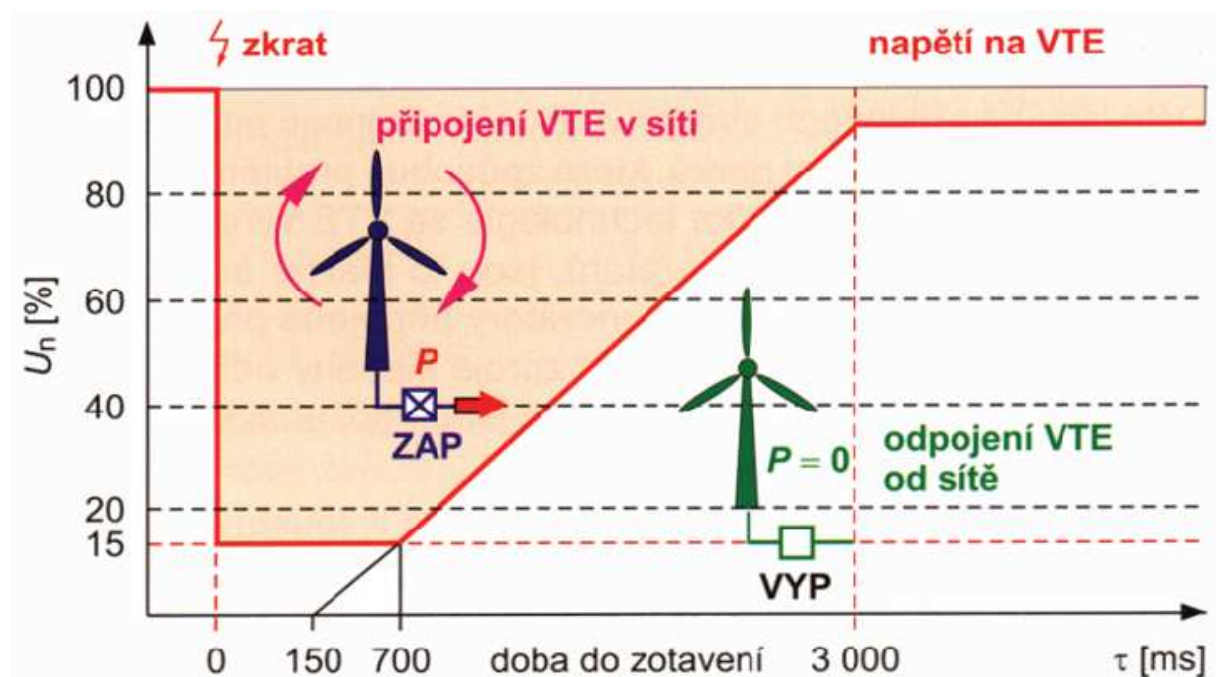
Základní pravidla pro provoz elektrických sítí jsou dány tzv. kodexem sítí. V současné době jsou kodexy rozšiřovány o požadavky na provoz větrných elektráren v elektrizační soustavě. Jsou definovány především požadavky na:

- chování větrných elektráren při zkratech
- chování větrných elektráren při změnách frekvence
- chování větrných elektráren při změnách účinníku

#### Požadavky na chování větrných elektráren při zkratech

Při připojování větrných elektráren do sítí vysokého napětí je požadavek na co jejich nejrychlejší odpojení v případě zkratu. Cílem je omezit zkratové poměry a tím zabránit poškození zařízení. Okamžité odpojení však není vhodné v případech vyššího zastoupení větrných elektráren v síti 100 kV a v přenosové síti z důvodu velkého odpadlého výkonu.

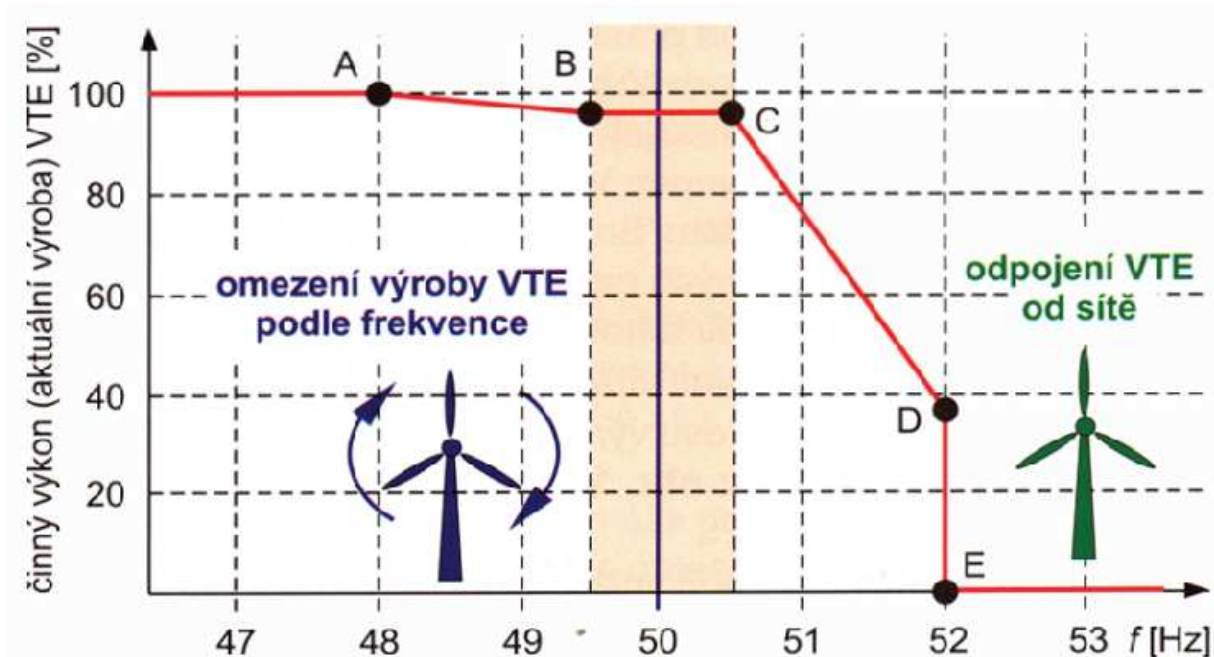
Na větrné elektrárny připojované do přenosové sítě je kladen požadavek odolnosti proti odpojení při vzdálených zkratech. Při poklesu napětí po zkratu v místě připojení větrné elektrárny do 15% jmenovitého napětí  $U_n$  a pro čas zotavení napětí  $t \leq 0,7$  s, nesmí být další větrné elektrárny odpojeny (viz. obrázek 2.20).



Obr. 2.20: Provoz větrných elektráren při zkratech [9]

## Požadavky na chování větrných elektráren při změnách frekvence

Z hlediska změny frekvence v síti je důležité, aby i při kolísající frekvenci zůstaly větrné elektrárny připojeny do soustavy a pomáhaly vyrovnávat bilanci výkonů. Při rozsahu frekvence 49,5 – 50,5 Hz se nepředpokládá změna výroby větrných elektráren. Při frekvencích vyšších než 52 Hz je definován požadavek na okamžité odpojení větrných elektráren. Při frekvenci nižší než 49,5 Hz je definován požadavek na zachování zapojení větrných elektráren do sítě při maximální možné okamžité výrobě. Výše uvedené požadavky jsou znázorněny na obrázku 2.21.



Obr. 2.21: Provoz větrných elektráren při změnách frekvence [9]

Pro integraci větrných elektráren do elektrizačních soustav byly organizací UCTE (Union for the Coordination of the Transmission of Electricity) definována následující doporučení:

- urychlení autorizačních procesů pro výstavbu nových síťových prvků v souvislosti s rozšiřováním obnovitelných zdrojů
- zabezpečení aktivních příspěvků výkonu větrných elektráren pro udržení stability provozu
- stanovení pravidel pro současné využívání klasických a obnovitelných zdrojů v elektrizační soustavě
- zabezpečení dostatečné výkonové bilance a rezerv zdrojů v elektrizační soustavě s vysokým využitím větrných elektráren
- analýza budoucích scénářů rozvoje větrných elektráren v Evropě a jejich vlivů
- podpora výzkumu a rozvoje nových technologií pro integraci větrných elektráren
- dosažení vyšší spolehlivosti provozu elektrizační soustavy s využitím řízení kapacit větrných elektráren

## 2.6. Literatura

- [1] Cenka, M., *Obnovitelné zdroje energie*, FCC Public, 2001, Praha, Česká republika, ISBN: 80-901985-8-9
- [2] Crome, H., *Technika využití energie větru*, vydalo nakladatelství HEL, 2002, ISBN 80-86167-19-4
- [3] Kaminský, J., Vrtek, M., *Obnovitelné a alternativní zdroje energie*, Interní učební texty – skriptum, 2002, VŠB Ostrava
- [4] Bartošík, T., *Metody simulace dodávky výkonu z větrných elektráren*, Diplomová práce, 2008, Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně
- [5] Janíček, F. a kolektiv autorů, *Obnovitelné zdroje energie 1 – Technologie pro udržitelnou budoucnost*, STU FEI Bratislava, 2007, ISBN: 978-80-969777-0-3
- [6] Webové stránky společnosti W.E.B Větrná energie, s.r.o. - [http://www.vetrnaenergie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie\\_9/systemy-regulace\\_27](http://www.vetrnaenergie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie_9/systemy-regulace_27), cit. 20.12.2011
- [7] Strzelecki, R., Benysek, G., *Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks*, Springer – Verlag London Limited, 2008, ISBN: 978-1-84800-317-0
- [8] Kolektiv autorů, *Vliv větrných elektráren na elektrizační soustavu ČR*, Struční studie VtE zpracováá EuroEnergy, s.r.o., 2004, [www.euroenergy.cz](http://www.euroenergy.cz)
- [9] Mastný, P., Studijní podklady předmětu Malé zdroje elektrické energie, 2011, Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně
- [10] Andrews, J., Jolley, N., *Energy Science – principles, technologies, and impacts*, Oxford 2007, ISBN: 978-0-19-928112-1
- [11] Collective authors, *Renewable Energy Focus Handbook*, Elsevier 2009, ISBN: 978-0-12-374705-1
- [12] Webové stránky Wikipedia - [http://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus\\_wind\\_turbine](http://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine), cit. 18.12.2011