

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Řízení laboratorního modelu malé vodní elektrárny
Control of Laboratory Model of Small Hydropower Plants

2015

Bc. Radek Caga

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Radek Caga**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612T015 Elektronika
Téma: **Řízení laboratorního modelu malé vodní elektrárny**
Control of Laboratory Model of Small Hydropower Plants

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši dostupných poznatků o koncepcích malých vodních elektráren a způsobech jejich řízení.
2. Analyzujte možnosti momentového a otáčkového řízení malých vodních elektráren.
3. Pro laboratorní model navrhnete způsoby řízení malé vodní elektrárny.
4. Navržené způsoby aplikujte na fyzikálním modelu, proveďte měření a vyhodnoťte vlastnosti soustavy.

Seznam doporučené odborné literatury:

Quaschning, V.: Obnovitelné zdroje energií, GRADA, 2010, ISBN 978-80-247-3250-3

Hodák, T., Dušička, P.: Malé vodné elektrárne, Jaga, 1998

Vondrášek, F.: Výkonová elektronika-měniče s vlastní komutací a bez komutace, svazek 3, Plzeň 2003, ISBN 80-7082-980-X

Další literatura dle pokynů vedoucího diplomové práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 23. dubna 2015



podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu prof. Ing. Petru Chlebišovi CSc., za odbornou pomoc, vedení a cenné rady, které mi pomohly ke zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Václavu Sládečkovi Ph.D. za odbornou výpomoc v oblasti polovodičových měničů.

Abstrakt

Malé vodní elektrárny představují v současnosti zajímavou oblast obnovitelných zdrojů elektrické energie. Tato diplomová práce se zabývá řízením malé vodní elektrárny. Je zde provedená analýza laboratorního modelu malé vodní elektrárny a měření provozních stavů této elektrárny. Hlavním cílem této diplomové práce je získání vzájemných závislostí mezi hydrodynamickými, mechanickými a elektrickými veličinami.

Klíčová slova

Malá vodní elektrárna, vodní turbína, asynchronní generátor, řízení elektrického pohonu, koncepce malé vodní elektrárny, zdroj elektrické energie, laboratorní model malé vodní elektrárny.

Abstract

The small hydropower plants represent interesting part of renewable resources of electrical energy in present time. This thesis deal with control of small hydropower plant. There is analysis of laboratory model of small hydropower plant and measuring operating conditions of this plant. The principal aim of this thesis is focused on the measuring interdependencies of hydrodynamical, mechanical and electrical physical quantities.

Key Words

Small hydropower plant, water turbine, asynchronous generator, control of electrical machines, conception of small hydropower plants, source of electrical energy, laboratory model of small hydropower plants.

Seznam použitých symbolů

C_o [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Střední rychlost kapaliny před vstupní hranou oběžné lopatky turbíny
H [m]	Čistý spád
H_b [m]	Hrubý spád
H_v [m]	Využitelný (užitný) spád
I_{Ix} [A]	Tokotvorná složka proudu asynchronního motoru
I_{Iy} [A]	Momentotvorná složka proudu asynchronního motoru
I_m [A]	Magnetizační proud asynchronního motoru
M_b [$\text{N}\cdot\text{m}$]	Moment zvratu asynchronního stroje
M_m [$\text{N}\cdot\text{m}$]	Maximální moment asynchronního stroje
M_N [$\text{N}\cdot\text{m}$]	Jmenovitý moment asynchronního stroje
n [min^{-1}]	Jmenovité provozní otáčky vodí turbíny
n [min^{-1}]	Jmenovité otáčky asynchronního stroje
n_s [min^{-1}]	Specifické otáčky vodní turbíny
n_{max} [-]	Průběžné otáčky vodní turbíny, udávané jako násobící koeficient
p_{atm} [Pa]	Atmosférický tlak
P_{kap} [W]	Hydrodynamický výkon kapaliny
P_N [W]	Jmenovitý výkon asynchronního stroje
P_S [W]	Výkon soustrojí (vodní elektrárny)
P_T [W]	Výkon turbíny
P_{VE} [W]	Výkon vodní elektrárny
Q_a [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	Průměrný roční průtok
Q_{nMVE} [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	Průtok malou vodní elektrárnou
Q_{nVE} [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	Průtok vodní elektrárnou
Q_t [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	Průtok turbínou
s [-]	Skluž
Y [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$]	Měrná energie vody
η_G [-]	Účinnost generátoru
η_h [-]	Hydraulická účinnost
η_m [-]	Mechanická účinnost
η_M [-]	Účinnost měniče kmitočtu
η_P [-]	Účinnost převodu mezi hřídelí turbíny a hřídelí generátoru

η_{SI} [-]	Synchronní otáčky asynchronního stroje
η_T [-]	Celková účinnost turbíny
η_{TR} [-]	Účinnost transformátoru
η_v [-]	Objemová účinnost
η_Σ [-]	Celková účinnost malé vodní elektrárny
λ [-]	Stupeň reaktivnosti vodní turbíny
φ [-]	Ztráty při proudění vody kanálem
ω_m [rad·s ⁻¹]	Mechanická úhlová rychlost

Seznam použitých zkratk

AM	Asynchronní motor
MVE	Malá vodní elektrárna
BSD	Blok vyhodnocení sektoru
BSFC	Blok výpočtu statorového toku
BSP	Blok spínacích pulzů
BSPS	Blok výběru spínací kombinace
BTC	Blok výpočtu momentu
BVN	Blok vektorového natočení
BVR	Blok rekonstrukce napětí
BZV	Blok zrušení vzájemné vazby
HD	Hydrodynamický
HW	Hardware (hardwarová část)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MRAS	Model Reference Adaptive Systems
PWM	Pulzně šířková modulace
SW	Software (softwarová část)
TMF	Měnič kmitočtu
VA	Vektorový analyzátor

Seznam obrázků

- Obr. 1.1 Grafický náčrt velikosti čistého a hrubého spádu
- Obr. 1.2 Křivky překročení spádu a průtoku v závislosti na počtu dní v roce
- Obr. 1.3 Schéma pro odvození a výpočet průtokové rovnice
- Obr. 1.4 a) schéma radiálního stroje b) rychlostní poměry v čerpadle
- Obr. 1.5 Schéma rychlostních poměrů v turbíně
- Obr. 2.1 Momentová charakteristika asynchronního stroje
- Obr. 2.2 Momentové charakteristiky skalárního řízení U/f
- Obr. 2.3 Frekvenční napěťové řízení otáček v otevřené regulační smyčce
- Obr. 2.4 Frekvenční napěťové řízení otáček s kompenzací skluzu
- Obr. 2.5 Regulační struktura bezsensorového vektorového řízení AM
- Obr. 2.6 Principiální zapojení vinutí AM k nepřímému měnič kmitočtu
- Obr. 2.7 Schématické znázornění spínacích vektorů
- Obr. 2.8 Trajektorie statorového toku pro Takahashiho metodu
- Obr. 2.9 Regulační struktura přímého řízení momentu a toku pro Takahashiho metodu
- Obr. 3.1 Hydrodynamické schéma laboratorního modelu MVE
- Obr. 3.2 3D schéma laboratorního modelu MVE
- Obr. 3.3 Principiální blokové zapojení laboratorního modelu MVE
- Obr. 3.4 Nepřímý měnič kmitočtu s pulzním usměrňovačem
- Obr. 4.1 Blokové schéma zapojení pro měření vlastností turbíny
- Obr. 4.2 Výkonové charakteristiky turbíny
- Obr. 4.3 Příkonové charakteristiky turbíny
- Obr. 4.4 Účinnosti turbíny
- Obr. 4.5 Závislost momentu na průtoku
- Obr. 4.6 Závislost účinníku na průtoku
- Obr. 4.7 Výkon turbíny v závislosti na otáčkách generátoru
- Obr. 4.8 Závislost momentu na otáčkách generátoru
- Obr. 4.9 Blokové schéma zapojení pro měření výkonu vodní elektrárny
- Obr. 4.10 Výkon malé vodní elektrárny
- Obr. 4.11 Účinník malé vodní elektrárny
- Obr. 4.12 Celková účinnost malé vodní elektrárny
- Obr. 4.13 Blokové schéma zapojení měření s přímým připojením generátoru k síti
- Obr. 4.14 Výkonová charakteristika turbíny přímým připojením generátoru k napájecí síti
- Obr. 4.15 Výkonová charakteristika MVE přímým připojením generátoru k napájecí síti
- Obr. 4.16 Účinník MVE přímým připojením generátoru k napájecí síti
- Obr. 4.17 Celková účinnost MVE přímým připojením generátoru k napájecí síti

Obsah

Úvod.....	9
1. Koncepce malých vodních elektráren	10
1.1 Spád malých vodních elektráren	10
1.2 Průtok malou vodní elektrárnou.....	12
1.3 Výkon turbíny a malé vodní elektrárny.....	13
1.4 Otáčky turbíny a soustrojí malé vodní elektrárny	13
1.5 Turbíny.....	14
1.5.1 Rozdělení vodních turbín podle přenosu energie vody.....	15
1.5.2 Teorie reakčních vodních turbín	15
1.5.3 Geometrická a hydraulická podobnost vodních turbín.....	20
1.5.4 Účinnost vodních turbín	21
2. Řízení elektrických pohonů malých vodních elektráren	22
2.1. Asynchronní motor.....	22
2.2. Možnosti řízení otáček asynchronních motorů	24
2.2.1. Frekvenční napěťové řízení asynchronního motoru bez snímače otáček.....	24
2.2.2. Vektorové řízení motoru bez snímače otáček	26
2.3. Přímé řízení momentu a magnetického toku asynchronního motoru.....	27
2.3.1. Takahashiho metoda přímého řízení momentu a magnetického toku	29
3. Koncepce a řízení laboratorního modelu MVE.....	31
3.1. Základní popis a zapojení laboratorního modelu MVE	31
3.2. Spuštění a řízení laboratorního modelu MVE.....	33
4. Měření vlastností soustavy MVE.....	34
4.1. Analýza vodní turbíny.....	34
4.2. Analýza výkonu a účinníku vodní elektrárny	39
4.3. Analýza vlastností vodní elektrárny přímým připojením k síti.....	42
Závěr	45

Úvod

Energetický potenciál velkých vodních toků je v ČR již vyčerpán. Pro další využití obnovitelných zdrojů je potřeba hledat metody pro využití zdrojů vodních toků, které byly pomocí standardních koncepcí neperspektivní. Z tohoto hlediska se jeví jako perspektivní právě malé vodní elektrárny, což jsou elektrárny s instalovaným výkonem do 10 MW. Z hlediska optimalizace řízení je důležité využívat potenciál MVE co nejefektivněji.

Klíčovou oblastí této problematiky je řízení těchto elektráren tak, aby elektrárna byla produktivní v co největším časovém úseku v roce. Tato diplomová práce je zaměřena na řízení malých vodních elektráren, což je provedeno na laboratorním modelu MVE. Tento laboratorní model obsahuje dva asynchronní motory, kdy první z nich pracuje v motorickém a druhý v generátorickém režimu. Oba stroje jsou řízeny moderními polovodičovými měniči, které jsou schopné monitorovat celou řadu důležitých veličin pro analýzu celé soustavy tohoto modelu. Rovněž je tento model MVE vybavený průtokoměrem a několika tlakoměry pro snímání neelektrických veličin. Pro problematiku řízení MVE je důležité znát souvislosti mezi hydrodynamickými, mechanickými a elektrickými veličinami. Tyto sítě charakteristik a provozních režimů jsou zde uvedeny na základě měření a patří mezi hlavní oblasti této diplomové práce. V návaznosti na tyto praktické aplikace jsou zde stručně popsány parametry spadající do koncepce malých vodních elektráren obecně a řízení elektrických pohonů.

1. Koncepce malých vodních elektráren

Jedna z hlavních rovnic určující vlastnosti malé vodní elektrárny je rovnice udávající výkon hydroenergetického zdroje:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_c \quad [W; kg \cdot m^{-3}, m \cdot s^{-2}, m^3 \cdot s^{-1}, m, -] \quad (1.1)$$

V této rovnici představuje: ρ – hustotu kapaliny, g – tíhové zrychlení, P - výkon hydroenergetického zdroje, Q - průtok vodním strojem, H – čistý spád a η_c – celkovou účinnost zařízení. Z uvedeného vztahu vyplývá, že celkový výkon hydroenergetického zdroje je úměrný především na průtoku a čistém spádu. Součin tíhového zrychlení g s čistým spádem H bývá v literatuře označován jako tzv. měrná energie vody Y .

$$Y = H \cdot g \quad [J \cdot kg^{-1}; m, m \cdot s^{-2}] \quad (1.2)$$

1.1 Spád malých vodních elektráren

Spád je jeden ze základních faktorů ovlivňující celkový výkon vodních elektráren. V souvislosti s problematikou vodních elektráren rozlišujeme dva základní spády: hrubý spád H_b a čistý spád H . Z rovnice 1.1 vyplývá, že čím vyšší spád, tím je výkon elektrárny vyšší, proto by spád měl být v rámci možností co nejvyšší. V praxi se toho obvykle docílí výstavbou jezu (popř. přehrady) nebo tzv. derivací průtoku řeky.

Hrubý spád H_b je definován jako výškový rozdíl horní a spodní hladiny. Pro tento spád tedy bude platit rovnice (vychází z obrázku 1.1) :

$$H_b = H_0 - H_2 \quad [m; m, m] \quad (1.3)$$

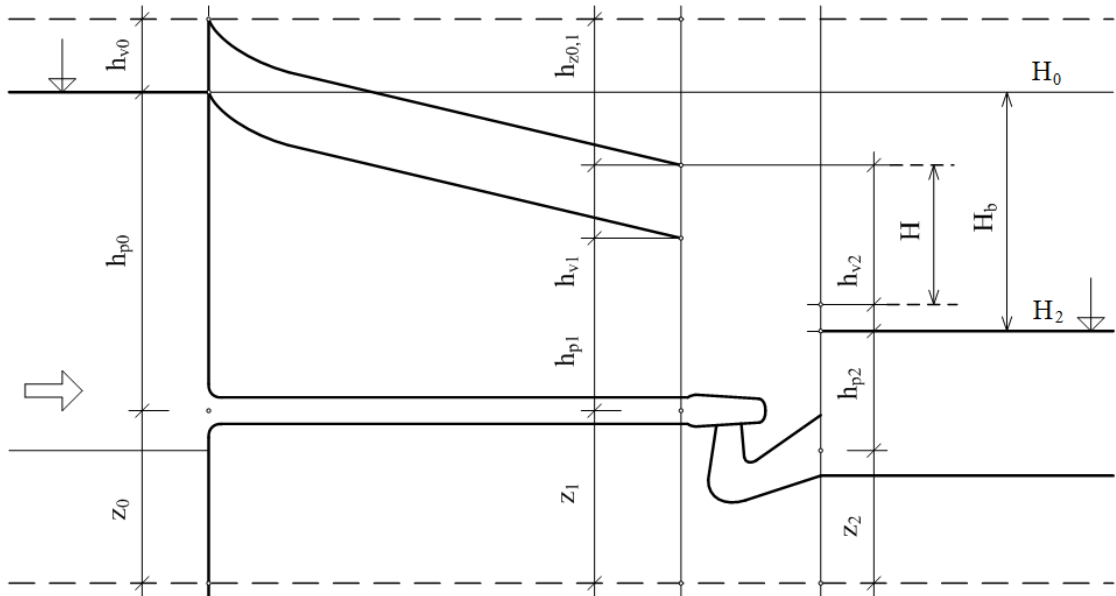
Celkový využitelný spád vodní elektrárny H_v je

$$H_v = H_b + h_{v0} - h_{v2} = H_b + \frac{a_1 v_1^2 - a_2 v_2^2}{2g} \quad [m; m; m, -, m \cdot s^{-1}, m \cdot s^{-2}], \quad (1.4)$$

kde druhý člen této rovnice představuje tzv. kinetický spád. Koeficienty a_1 a a_2 jsou tzv. Coriolisovy koeficienty, které udávají míru nerovnoměrného rozložení rychlosti v profilu.

Čistý spád vodní elektrárny H je dán rozdílem využitelného spádu H_v a součtu všech hydraulických spádových ztrát h_{zi} , vznikající na vodních cestách tlakových přivaděčů na vstupu $h_{z0,1}$, v savce a v odpadním výstupním kanálu. Největší spádové ztráty vznikají na vodních cestách tlakových přivaděčů $h_{z0,1}$, takže součet všech hydraulických spádových ztrát h_{zi} je blízký právě této hodnotě.

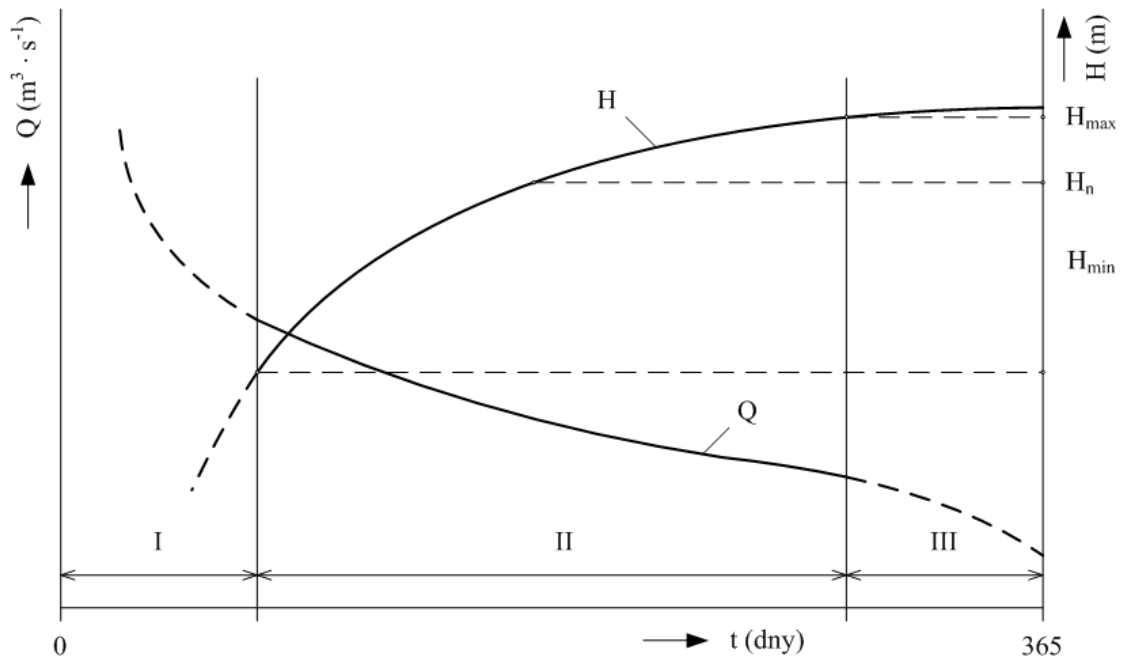
$$H = H_v - \sum h_{zi} = H_b + \frac{a_1 v_1^2 - a_2 v_2^2}{2g} - \sum h_{zi} \quad [m] \quad (1.5)$$



Obr. 1.1 – Grafický náčrt velikosti čistého a hrubého spádu [5]

Obrázek 1.1 zobrazuje určení hrubého a čistého spádu, ovšem tyto veličiny nejsou v přírodě v průběhu roku konstantní. Proto je při návrhu MVE velmi důležité uzpůsobit návrh tak, aby byl optimální vůči těmto vlivům. Období, která v průběhu roku nastávají, se dělí na:

- Období nedostatku spádů a přebytku průtoků,
- Období dostatku spádu i průtoků,
- Období velkých spádů a nedostatku průtoků.



Obr. 1.2 – Křivky překročení spádu a průtoku v závislosti na počtu dní v roce [5]

Časová závislost období, které vznikají v průběhu roku na vodních tocích, je zobrazena na obrázku 1.2. Křivka Q značí průtok a křivka H značí čistý spád. Časová osa symbolizuje počet dní v roce a je rozdělena na tři sektory, které odpovídají výše uvedeným obdobím. Před výstavbou MVE je důležité mít tyto průběhy k dispozici, aby předem bylo jasné, do jaké míry bude elektrárna schopná efektivního provozu.

První období (I.) je stav nedostatku spádů a přebytku průtoků vodní elektrárnou. V tomto období poklesne čistý spád pod mezní hodnotu H_{min} , při které soustrojí není schopné efektivně pracovat, protože tlak v potrubí není dostatečně velký. Toto období je tzv. neproduktivní, kdy je nutné elektrárnu odstavit. Jelikož je toto období neproduktivní, je z ekonomických důvodů důležité, aby trvalo co nejkratší dobu. Pro zkrácení tohoto období se v praktických aplikacích používají Kaplanovy nebo Bánkiho turbíny. Další možností zkrácení tohoto období je mírné zvýšení spádu přepadem vody přes jezová pole. Období naznačené v sektoru II je tzv. období produkce, které by mělo být co nejdelší. Délka tohoto období je závislá především na schopnosti turbín při práci s proměnným čistým spádem. Oblast produkce se dá prodloužit také zařazením většího počtu strojů s menším výkonem a efektivním řízením pohonů soustrojí. Poslední časový úsek je tzv. období velkých spádů a nedostatku průtoků. Toto období je závislé na velikosti nejmenšího stroje v elektrárně. Osvědčené řešení využívající dva stroje je takové, kdy větší stroj přebírá 2/3 průtoků a menší stroj 1/3 průtoků, což umožňuje jisté zkrácení tohoto období [4], [5].

1.2 Průtok malou vodní elektrárnou

Před stanovením průtoků turbínou je nejprve nutné stanovit průtok celé vodní elektrárny Q_{nVE} . Průtok turbínou Q_T je pak odvozen z průtoků vodní elektrárny. Stanovit průtok Q_{nVE} není jednoduché, protože průtok není v průběhu roku konstantní (viz. kapitola 1.1) a není konstantní ani napříč jednotlivými roky. Nejdůležitějším požadavkem při návrhu průtoků je takový, aby provoz vodní elektrárny byl v co možná nejdelším časovém období. Tomuto kritériu musí také odpovídat investiční a provozní náklady.

V případech projektování malých vodních elektráren je návrh průtoků v porovnání s nízkotlakými vodními elektrárnami vyšších výkonů složitější. Při samotném návrhu průtoků je potřeba zahrnout mnoho individuálních kritérií, takže při porovnání několika různých MVE je průtok značně odlišný. Navrhovaný průtok vychází obecně z křivky průtoků a značí při kolika dnech v roce je elektrárna schopna efektivního provozu (obr. 1.2 – sektor II), takže např. pro 65 dní v roce odpovídá na křivce Q průtok s označením Q_{65d} . V praktických projektech se tedy navrhovaný průtok realizuje od $Q_{nMVE} = Q_{65d}$ až po $Q_{nMVE} = (0,5 \text{ až } 0,75) \cdot Q_a$, kde Q_a je roční průměrný průtok. Obvykle se návrh průtoků pohybuje v rozmezí $Q_{nMVE} = Q_{90d}$ až Q_{120d} . Při určování křivek průtoků je velmi dobré využít křivky pořízené profesionální institucí, kterou je český hydrometeorologický ústav. V případech, kdy nejsou tyto hydrologické podklady k dispozici, je potřeba provést měření. Měření je nutné provádět alespoň v průběhu jednoho roku a provádět ho tak, aby veškeré kombinace průtoků byly zaznamenány, včetně povodňových stavů. Problematikou průtoků a spádů při projektování a provozu MVE se velmi podrobně zabývá literatura [3], [4] a [5].

1.3 Výkon turbíny a malé vodní elektrárny

Vztah pro výpočet výkonu turbíny P_T je obdobný jako vztah pro výkon hydroenergetického zdroje (1.1) [5].

$$P_T = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_T \quad [W; kg \cdot m^{-3}, m \cdot s^{-2}, m^3 \cdot s^{-1}, m, -] \quad (1.6)$$

Při uvažování hustoty kapaliny $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (hustota vody) lze vztah (1.6) upravit do zjednodušeného tvaru:

$$P_T = g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_T \quad [kW; m \cdot s^{-2}, m^3 \cdot s^{-1}, m, -] \quad (1.7)$$

V těchto rovnicích jednotlivé symboly značí: ρ – hustota kapaliny, g – tíhové zrychlení, P_T – výkon na hřídeli turbíny, Q – průtok turbínou, H – čistý spád turbíny a η_T – celkovou účinnost turbíny.

Vztahy (1.6) a (1.7) jsou pro výpočet výkonu na hřídeli turbíny. Pro výpočet výkonu soustrojí je potřeba zahrnout účinnosti mezi přeměnou mechanické energie na energii elektrickou. Pro stanovení výkonu soustrojí P_S použijeme rovnici

$$P_S = g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_T \cdot \eta_P \cdot \eta_G \quad [kW; m \cdot s^{-2}, m^3 \cdot s^{-1}, m, -, -, -], \quad (1.8)$$

kde η_T značí účinnost turbíny, která se pro MVE pohybuje v rozmezí od 0,6 – 0,9. Účinnost pro převod momentu z hřídele turbíny na hřídel generátoru je označována značkou η_P a nabývá hodnot $\eta_P = 0,94 – 0,97$ pro ozubené převody a $\eta_P = 0,92 – 0,98$ pro převody řemenem. Účinnost generátoru je značena η_G a pro výkony do 40 kW nabývá hodnot $\eta_G = 0,84 – 0,93$.

Pro výpočet celkového výkonu vodní elektrárny P_{VE} je potřeba zahrnout navíc účinnost transformátoru η_{TR} a polovodičového měniče η_M . Výsledná rovnice pro celkový výkon MVE je pak součin výkonu soustrojí a účinnosti transformátoru, což se dá rozepsat na tvar:

$$P_{VE} = g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_T \cdot \eta_P \cdot \eta_G \cdot \eta_{TR} \cdot \eta_M \quad [kW; m \cdot s^{-2}, m^3 \cdot s^{-1}, m, -, -, -, -, -] \quad (1.9)$$

1.4 Otáčky turbíny a soustrojí malé vodní elektrárny

Určení vhodných jmenovitých otáček pro turbíny je poměrně složité, neboť se požaduje, aby otáčky byly minimálně proměnlivé (v ideálním případě konstantní). Otáčky, při kterých dochází k vysoce účinným přeměnám, se liší podle použitého typu turbíny. Nevýhodná vlastnost nízkých otáček (50 min^{-1}) je nutnost převodu „do rychla“. V případě vysokých otáček (1500 min^{-1}) hrozí nebezpečí při výpadku generátoru, kdy se může turbína rozběhnout na několikanásobně vyšší otáčky. Pro návrh jmenovitých provozních otáček turbíny n lze využít vztah

$$n = \frac{n_s H \sqrt[4]{H}}{\sqrt{P_T}} \cdot 1,166 \quad [\text{min}^{-1}; \text{min}^{-1}, m, m, kW], \quad (1.10)$$

kde n_s jsou tzv. specifické otáčky geometricky podobné turbíny (viz. tabulka 1.1). Specifické otáčky je veličina, která je definována proto, aby bylo možné jednotlivé typy turbín vzájemně porovnávat. Tyto otáčky jsou definovány tak, kdy výkon turbíny je jedna koňská síla (736 W)

při čistém spádu $H = 1\text{ m}$. Symbolem P_T je označen výkon na hřídeli turbíny (vztah 1.7), který se dosazuje v jednotkách kW.

Tab. 1.1 – Specifické otáčky nejpoužívanějších turbín [5]

Typ turbíny	n_s (min^{-1})
Peltonova	4 - 32
Bánkiho	70 - 150
Francisova pomaloběžná	50 - 150
Francisova normální	150 - 250
Francisova rychloběžná	250 - 450
Kaplanova a vrtulová	300 - 1000

V souvislosti s otáčkami turbín vzniká nepříznivý jev zvaný kavitace. Kavítace je z lat. Cavitas, což znamená dutina, jde v podstatě o vznik dutin v kapalině, které vznikají při lokálním poklesu tlaku při vysokých otáčkách. Tento jev vzniká na lopatkách turbín, čerpadel apod., způsobuje hluk, snižuje účinnost strojů a v limitních hodnotách může mít i destruktivní účinky na okolní materiál. Kromě ochranných vrstev na lopatkách se doporučuje volit použité turbíny i v závislosti na velikosti spádu. Pro jednotlivé turbíny resp. pro jejich specifické otáčky jsou definované tzv. mezní spády H_{max} , které jsou zobrazeny v tabulce 1.2. Mezní spád by se neměl pro dané specifické otáčky překročit.

Tab. 1.2 – Mezní spády v závislosti na specifických otáčkách turbín [5]

n_s (min^{-1})	70	110	150	200	300	400	500	600	700	800
H_{max} (m)	260	181	111	75	41	26	17	13	10	8

Posledním důležitým údajem pro návrh turbíny jsou tzv. průběžné otáčky. Odpojíme-li generátor od sítě, pak energii vody brzdí pouze roztočení turbíny, hydraulické odpory a ztráty, takže otáčky narůstají právě na hodnotu průběžných otáček. V tabulce 1.3 je zobrazena závislost průběžných otáček na specifických otáčkách tak, že n_{max} je násobící koeficient, kterým se násobí specifické otáčky n_s [5].

Tab. 1.3 – Závislost průběžných otáček na otáčkách specifických [5]

n_s (min^{-1})	50	300	400	800	1000
n_{max}	1,6	1,8	1,9	2,4	2,6 - 3

1.5 Turbíny

Turbína je mechanický rotační stroj, který se skládá z hřídele a několika lopatkových kol umístěných na ní. Mezi lopatkovými koly prochází kapalina, která hřídel otáčí. Dochází tedy k přeměně kinetické energie kapaliny na mechanickou energii rotující hřídele turbíny. Mezi nejpoužívanější vodní turbíny patří: Francisova, Peltonova, Kaplanova, Thomanova a Bánkiho turbína. Výběr vhodné turbíny podstatně závisí na jejích vlastnostech, které jsou v této kapitole dále uvedeny.

1.5.1 Rozdělení vodních turbín podle přenosu energie vody

Vodní turbíny se dají rozdělit do několika skupin podle různých kritérií. Mezi základní rozdělení patří dělení podle způsobu přenosu energie vody. Podle tohoto způsobu se dají turbíny rozdělit na rovnotlaké tzv. akční a přetlakové tzv. reakční. Veličina označovaná jako tzv. stupeň reaktivnosti turbíny λ rozhoduje právě o tom, jestli je turbína akční nebo reakční. Pro stupeň reaktivnosti turbíny λ platí vztah

$$\lambda = 1 - \frac{a \cdot c_0^2}{2g} \cdot \frac{1}{H_v} \quad [-; -, m \cdot s^{-1}, m \cdot s^{-2}, m], \quad (1.11)$$

kde C_0 je střední rychlost kapaliny před vstupní hranou oběžné lopatky turbíny, koeficient a je Coriolisův koeficient, který udává míru nerovnoměrného rozložení rychlosti v profilu. H_v značí užitečný spád a g tíhové zrychlení. Je-li $\lambda < 0,5$ je turbína akční, protože je využívána větší část kinetické energie vody. Je-li $\lambda \geq 0,5$ turbína je naopak reakční, protože je využívána větší část tlakové energie vody. Nejpoužívanější akční turbíny jsou Peltonovy turbíny, naopak reakční turbíny jsou: Francisovy, Kaplanovy a Thomanovy. Příčné protékané Bankiho turbíny jsou zvláštní případ, protože ty mohou být použity jako akční, ale také jako reakční. Podrobnější popis teorie turbín je uvedený v literatuře [4], [5], [8].

1.5.2 Teorie reakčních vodních turbín

Teorie vodních turbín se zabývá především energetickou přeměnou mezi kinetickou energií kapaliny na mechanickou energii rotující hřídele turbíny. Tato teorie je odlišná jak pro akční turbíny, tak i pro reakční. Vzhledem k zaměření této diplomové práce zde bude podrobně popsána pouze teorie reakčních turbín.

Reakční turbíny mají stupeň reaktivnosti $\lambda \geq 0,5$ (viz. kapitola 1.5.1), což tedy znamená, že turbína využívá především tlakovou energii vody. Tato koncepce vyžaduje působení tlaku vody na lopatky tak, aby prostor mezi lopatkami byl zcela vyplněný vodou. Účinek proudu vody na lopatky je závislý na množství vody, které proteče skrze turbínu za jednotku času. Pro tento průtok je potřeba provést tzv. objemový výpočet. Z objemového výpočtu se vypočte střední rychlost průtoku vody kanálem a průřez potrubí popř. počet lopatek turbíny. Kromě objemového výpočtu je dále nutné provést tzv. energetický výpočet. Tento výpočet definuje tvar a zakřivení lopatek turbíny v závislosti na ideální přeměně mechanické energie vody na rotační energii hřídele turbíny.

Objemový výpočet:

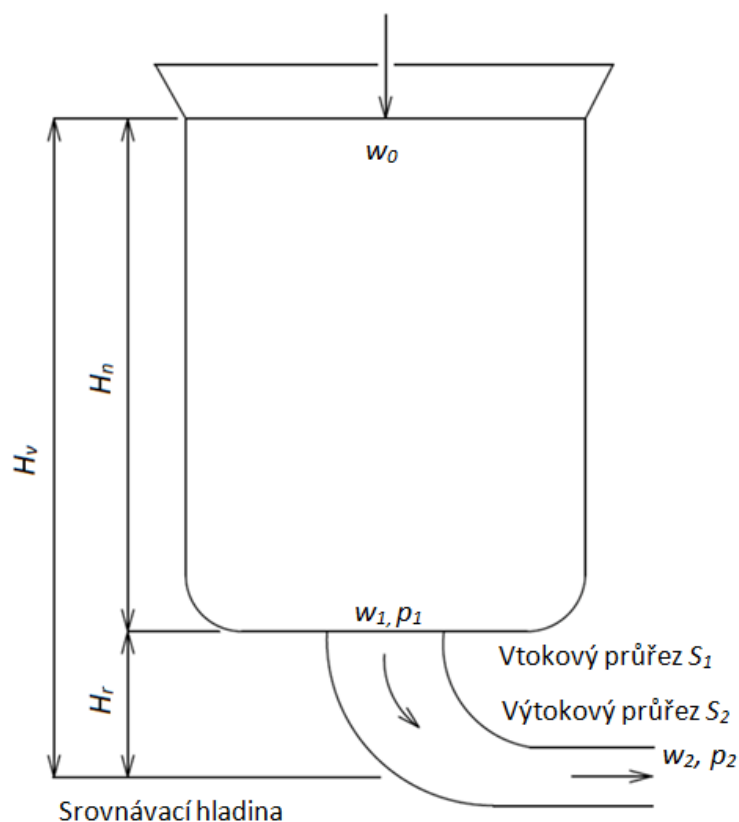
Pro objemový výpočet je potřeba počítat s několika předpoklady, které jsou pro výpočty nezbytné:

- Konstantní úroveň hladiny,
- Připojení zakřiveného kanálu těsně k nádobě,
- Průřez na výstupu S_2 je menší než průřez na vstupu S_1 (viz. obr. 1.3),
- Tlak v profilu na výstupu p_2 bude menší než tlak na vstupu p_1 ($p_2 < p_1$).

Přijetím těchto předpokladů lze pak napsat rovnici (Bernoulliho rovnice):

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} + H_r = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g} + h_z \quad [Pa, kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-2}, m \cdot s^{-1}, m \cdot s^{-2}, m] \quad (1.12)$$

Tomuto výpočtu pak odpovídá schéma pro výpočet průtokové rovnice:



Obr. 1.3 – Schéma pro odvození a výpočet průtokové rovnice [4]

Veličiny z rovnice (1.12) jsou zobrazeny na obrázku 1.3. Pro hydraulickou ztrátu v kanálu h_z (z rovnice 1.12) platí tato rovnice

$$h_z = \varphi \frac{w_2^2}{2g} \quad [m; -, m \cdot s^{-1}, m \cdot s^{-2}], \quad (1.13)$$

kde činitel φ značí ztráty při proudění vody kanálem. Pro správně navržené kanály tento činitel nabývá hodnot 0,06 až 1,0. Symbolem γ z rovnice (1.12) je značen součin tíhového zrychlení a hustoty kapaliny, tedy:

$$\gamma = \rho g \quad [kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-2}; kg \cdot m^{-3}, m \cdot s^{-2}] \quad (1.14)$$

Dosazením rovnice (1.13) do rovnice (1.12) a následnou úpravou dostaneme průtokovou rovnici ve tvaru:

$$(1 + \varphi) \frac{w_2^2}{2g} = H_r + \frac{w_1^2}{2g} + \frac{p_1 - p_2}{\gamma} \quad (1.15)$$

Rovnici (1.15) později použijeme pro stanovení ploch kanálů S_1 a S_2 , ovšem nejprve je potřeba sestavit Bernoulliho energetickou rovnici, kterou pak dále upravíme.

$$\frac{p_{atm}}{\gamma} + H_n = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} + \varphi_1 \frac{w_1^2}{2g} \quad (1.16)$$

Sestavením rovnice (1.16) předpokládáme, že rychlost w_0 je zanedbatelná, takže i kinetická energie v tomto profilu je téměř nulová. Atmosférický tlak z rovnice (1.16) je značen p_{atm} a tzv. součinitel místní ztráty u vtoku do kanálu je značen φ_1 a nabývá hodnot 0,01 až 0,06. Z rovnice (1.16) získáme pomocí několika úprav [4] výslednou rovnici:

$$\left(1 + \varphi + \varphi_1 \frac{S_2^2}{S_1^2}\right) \frac{w_2^2}{2g} = H_r + H_n + \frac{p_{atm} - p_2}{\gamma}. \quad (1.17)$$

Pokud atmosférický tlak je stejný jako tlak p_2 , poslední člen z rovnice (1.17) je roven nule. Součet $H_r + H_n$ je dle obrázku 1.3 roven užitému spádu H_v . Pak můžeme rovnici zjednodušit do známého tvaru

$$H_v = \left(1 + \varphi + \varphi_1 \frac{S_2^2}{S_1^2}\right) \frac{w_2^2}{2g}. \quad (1.18)$$

Známe-li užité spád H_v a poměr S_2/S_1 , je možné z rovnice (1.18) vypočítat výstupní rychlost w_2 . Za použití výpočtu rychlosti w_2 a se známým průtokem Q je pak možné vypočítat plochu $S_2 = Q / w_2$. S použitím rovnice kontinuity lze pak spočítat i ostatní plochy resp. průřezy kanálem [4].

Energetický výpočet:

Pro maximální využití energie vody, která vstupuje do turbíny, je důležité provést právě energetický výpočet. Energetickým výpočtem se stanoví tvar lopatek apod. Tímto výpočtem je potřeba určit silové působení vodního proudu na kanál turbíny. Pro odvození síly působící na nepohyblivý kanál se vychází z Newtonova zákona o působení síly a hybnosti tělesa:

$$dF = dm \cdot a = dm \frac{dw}{dt} [N; kg, m \cdot s^{-2}; kg, m \cdot s^{-1}, s] \quad (1.19)$$

Dále platí rovnice [4]:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{Q \cdot \gamma}{g} [kg, s; m^3 \cdot s^{-1}, kg \cdot s^{-2} \cdot m^{-2}, m \cdot s^{-2}] \quad (1.20)$$

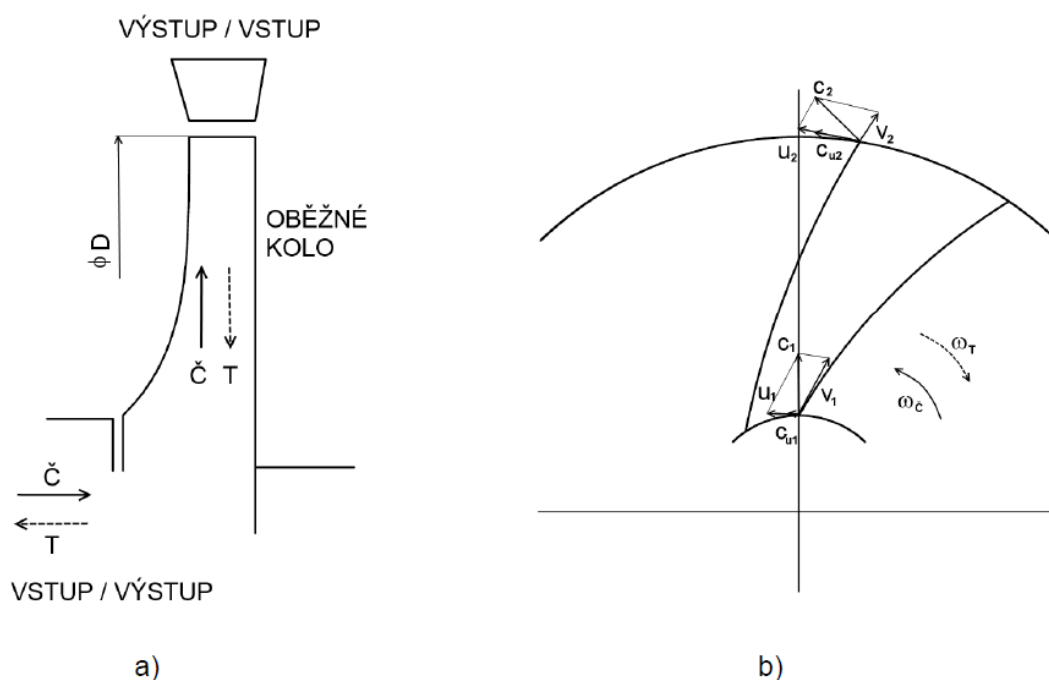
Na základě znalostí rovnic (1.19) a (1.20) lze sestavit výslednou rovnici pro celkovou sílu. Touto silou působí kanál na vodní proud při změně rychlosti a dráhy proudu.

$$F = \frac{Q \cdot \gamma}{g} (w_{u2} F_2 - w_{u1} F_1) \quad (1.21)$$

Výsledný moment síly, kterým voda působí na nepohyblivý kanál, je odvozen z rovnice (1.21) v literatuře [4]. Výsledný moment je pak

$$M_{1,2} = \frac{Q \cdot \gamma}{g} (w_{u1} r_1 - w_{u2} r_2), \quad (1.22)$$

kde složky vektoru \mathbf{w} (w_{u1} a w_{u2}) jsou složky vektoru rychlosti kolmé k ramenům momentu.



Obr. 1.4 – a) schéma radiálního stroje b) rychlostní poměry v čerpadle [9]

Pro další analýzu je potřeba definovat následující tři druhy rychlosti, aby další výpočty byly snadno proveditelné.

1. Relativní rychlost v
2. Absolutní rychlost c
3. Unášecí rychlost u

Uvedené rychlosti a jejich vzájemné vztahy jsou naznačeny na obrázku 1.4 b (pozn: Naznačené směry vektorů jsou pro čerpadlový režim, takže pro turbínový režim budou mít opačnou orientaci.). Symbolu Č z obr. 1.4 odpovídá čerpadlový režim, symbolu T odpovídá turbínový režim. Relativní rychlost v je rychlost vzhledem k turbínovému kanálu. Unášecí rychlostí u se kanál pohybuje v nehybném prostoru.

Výpočet momentu, kterým voda působí na pohybující se kanál, vychází z rovnice momentu pro nepohyblivý kanál (1.22). Do této rovnice se dosadí akorát příslušné vektory absolutní rychlosti:

$$M = \frac{Q \cdot \gamma}{g} (c_{u1} r_1 - c_{u2} r_2) \quad (1.23)$$

Pro další výpočty budeme uvažovat tzv. jednotkovou průtokovou tíhu vody, tj. $Q \cdot \gamma = 1$, pak rovnice (1.23) se zjednoduší a po přenásobení úhlovou rychlostí ω získáme rovnici (1.24).

$$\omega \cdot M = \frac{1}{g}(c_{u1}r_1 - c_{u2}r_2) \cdot \omega \quad (1.24)$$

Po roznásobení závorky z rovnice (1.24) se vyjádří součin ramene a úhlové rychlosti jako unášecí rychlost, protože $\omega \cdot r = u$.

$$\omega \cdot M = \frac{1}{g}(c_{u1}u_1 - c_{u2}u_2) \quad (1.25)$$

Aplikací zákona o zachování energie na rovnici (1.25) lze tuto rovnici upravit do tvaru, který je známý pod názvem Eulerova energetická rovnice.

$$\omega \cdot M = \frac{1}{g}(c_{u1}u_1 - c_{u2}u_2) = H \cdot \eta_h \quad (1.26)$$

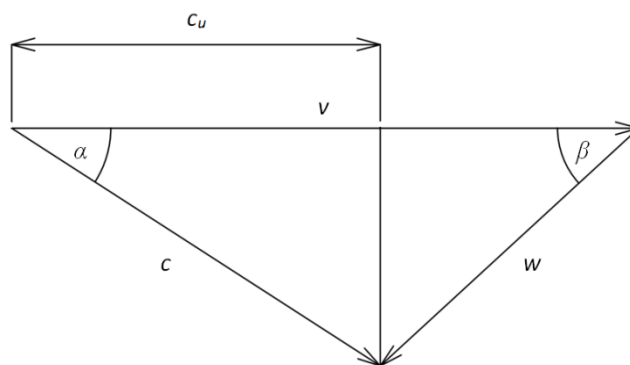
Kde η_h je tzv. součinitel hydraulické účinnosti, ve kterém jsou zahrnuty:

- Hydraulické ztráty (třením, změnou průtočných profilů a zakřivením proudu).
- Ztráta kinetické energie vody „na výstupu“ oběžného kola.
- Hydraulické ztráty vzniklé u nevhodného přívodu vody do oběžného kola (u správně navrženého přívodu jsou tyto ztráty zanedbatelné).

Eulerova energetická rovnice (1.26) a celé její odvození platí pro turbínový režim. V případě čerpadlového režimu se akorát vymění členy v závorce za předpokladu zachování značení indexů pro vstup a výstup. Eulerova energetická rovnice pro čerpadlový režim má tedy tvar [9]:

$$(c_{u2}u_2 - c_{u1}u_1) = Y \cdot \eta_h \quad (1.27)$$

Kromě Eulerovy energetické rovnice se v praxi používá také tzv. průtoková rovnice. Odvození průtokové rovnice pro turbínový režim vychází z Eulerovy energetické rovnice (1.25). Princip odvození průtokové rovnice spočívá ve vyjádření součinů $c_{u1}u_1$ a $c_{u2}u_2$ pomocí Kosinovy věty. Odvození vychází z rychlostních poměrů v turbíně (obr. 1.4 a 1.5).



Obr. 1.5 – Schéma rychlostních poměrů v turbíně [4]

$$v_1^2 = c_1^2 + u_1^2 - 2u_1c_1 \cdot \cos(\alpha_1) = c_1^2 + u_1^2 - 2u_1c_{u1} \quad (1.28)$$

$$v_2^2 = c_2^2 + u_2^2 - 2u_2c_2 \cdot \cos(\alpha_2) = c_2^2 + u_2^2 - 2u_2c_{u2} \quad (1.29)$$

Pomocí matematických úprav, které jsou popsány v literatuře [4] lze odvodit výsledný vztah (1.30), kde podíl p/g udává tzv. přetlak oběžného kola turbíny:

$$\frac{p}{g} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g}. \quad (1.30)$$

1.5.3 Geometrická a hydraulická podobnost vodních turbín

Je-li turbína tzv. geometricky podobná s jinou turbínou, tak musí platit, že rozměry ve všech osách jsou u nich ve stejném poměru a veškeré jejich úhly jsou shodné. Ovšem turbíny s geometrickou podobností ještě navíc vykazují tzv. hydraulickou podobnost, jejíž popis je značně složitější. Hydraulická podobnost se zabývá vzájemnými poměry fyzikálních veličin (čistý spád - H , průtok - Q , otáčky - n , výkon - P a účinnost - η), které jsou závislé na velikosti turbíny. Pro vzájemné fyzikální poměry mezi různými (geometricky podobnými) turbínami byly odvozeny tzv. přepočtové rovnice. Na základě přepočtových vztahů můžeme provádět analýzu dvou turbín při měnících se parametrech, nebo také vyhodnotit chování jedné turbíny při změně jejích parametrů. V následujících rovnicích bude mít menší tzv. modelová turbína index M (veličiny s indexem M odpovídají právě této turbíně) a větší turbína má veličiny značeny bez indexu. Pak těmto geometricky podobným turbínám odpovídají tyto vztahy [9]:

$$\frac{H}{H_M} = \frac{Y}{Y_M} = \left(\frac{n}{n_M}\right)^2 \cdot \lambda^2 \quad (1.31)$$

$$\frac{Q}{Q_M} = \frac{n}{n_M} \cdot \lambda^3 \quad (1.32)$$

$$\frac{P}{P_M} = \frac{\rho}{\rho_M} \left(\frac{n}{n_M}\right)^3 \cdot \lambda^5 \quad (1.33)$$

kde λ je tzv. délkové měřítko. Toto měřítko se dá vyjádřit poměrem výstupního průměru oběžného kola:

$$\lambda = \frac{D}{D_M} \quad (1.34)$$

V případech, kdy potřebujeme porovnávat parametry jedné turbíny při změně jejích otáček, je jasné, že délkové měřítko $\lambda = 1$ a dále také poměr $\rho/\rho_M = 1$. Využitím těchto jednoduchých úvah pak můžeme rovnice (1.31) až (1.33) zjednodušit:

$$\frac{H}{H_M} = \frac{Y}{Y_M} = \left(\frac{n}{n_M}\right)^2 \quad (1.35)$$

$$\frac{Q}{Q_M} = \frac{n}{n_M} \quad (1.36)$$

$$\frac{P}{P_M} = \left(\frac{n}{n_M}\right)^3 \quad (1.37)$$

Výše uvedené vztahy jsou použitelné tehdy, zanedbáváme-li mechanickou η_h a hydraulickou η_m účinnost. Pokud pro výpočty potřebujeme tyto účinnosti zahrnout, pak se tyto vztahy musí rozšířit na tvary, které účinnosti nezanedbávají [9]:

$$\frac{H}{H_M} = \frac{Y}{Y_M} = \left(\frac{n}{n_M}\right)^2 \cdot \lambda^2 \cdot \frac{\eta_h}{\eta_{hM}} \quad (1.38)$$

$$\frac{Q}{Q_M} = \frac{n}{n_M} \cdot \lambda^3 \cdot \frac{\eta_{vh}}{\eta_{vM}} \quad (1.39)$$

$$\frac{P}{P_M} = \frac{\rho}{\rho_M} \left(\frac{n}{n_M}\right)^3 \cdot \lambda^5 \cdot \frac{\eta_m}{\eta_{mM}} \quad (1.40)$$

1.5.4 Účinnost vodních turbín

Účinnost vodních turbín se skládá ze součinů hydraulické, objemové a mechanické účinnosti:

$$\eta_t = \eta_m \cdot \eta_h \cdot \eta_v [-; -, -, -] \quad (1.41)$$

Účinnost přeměny mechanické energie vody na mechanickou energii rotující hřídele turbíny udává tzv. **Mechanická účinnost** η_m . Tato účinnost v sobě zahrnuje ztráty, které vznikají zejména třením v ložiscích a třením lopatek turbíny o vodu.

Hydraulická účinnost η_h je způsobena ztrátami, které vznikají překonáním veškerých průtokových odporů v kanálu. Průtokové odpory vznikají ohybem vodního proudu v kanálu, vířením vody a hlavně třením vody v kanálu. Důsledky těchto ztrát jsou takové, že potenciál využitelného spádu h_v není plně využitý.

Objemová účinnost η_v v sobě zahrnuje ztráty, které vznikají při průtoku vody skrze turbínu. V podstatě se jedná o to, že 100% přiváděného objemu vody na vstup nevykoná práci, protože velmi malá část vody proteče mezerami mezi oběžným kolem a prstencem odsávací trubky apod.

U malých vodních elektráren se celková účinnost turbíny η_t zpravidla pohybuje v rozmezí od $\eta_t = 0,75$ do $\eta_t = 0,90$. Celková účinnost vodní turbíny je závislá především na typu konstrukce, materiálech, rozměrech a výkonu turbíny. Zpravidla platí, že čím je vyšší výkon elektrárny a tedy i její rozměry, tím je účinnost turbíny vyšší. Maximální dosažitelnou účinnost turbíny v závislosti na výkonu turbíny znázorňuje tabulka 1.4 [5].

Tab. 1.4 – Maximální dosažitelná účinnost turbíny v závislosti na jejím výkonu [5]

P_T (kW)	30	60	100	200	300	600	1000
η_T (%)	82	83	84	85	86	87	88
P_T (MW)	2	3	6	10	20	30	60
η_T (%)	89	90	91	92	93	94	95

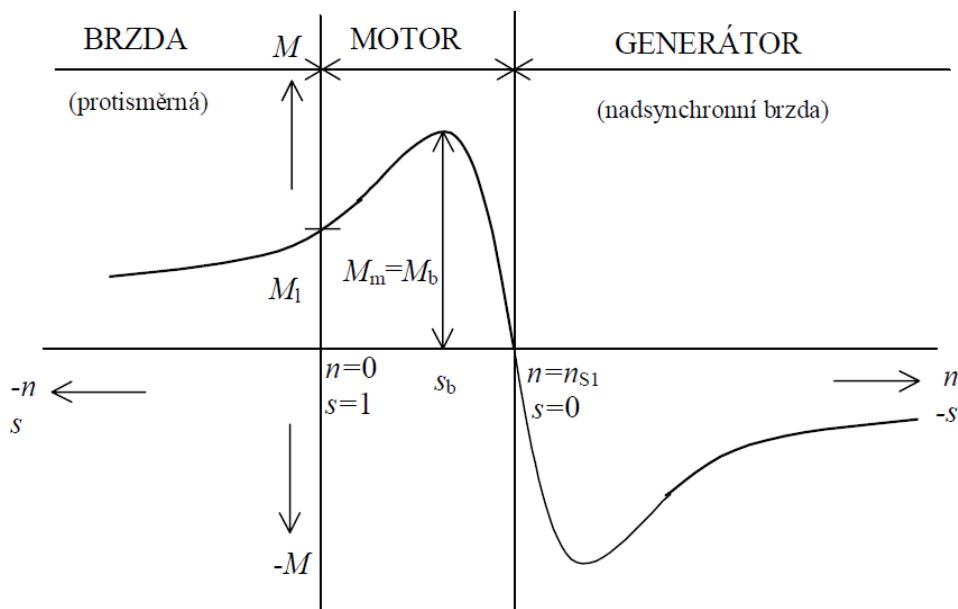
2. Řízení elektrických pohonů malých vodních elektráren

Malé vodní elektrárny používají pro výrobu elektrické energie synchronní nebo asynchronní generátory. Laboratorní model MVE v laboratoři obsahuje asynchronní generátor. Tlakové podmínky a průtok vytváří čerpadlo s frekvenčně řízeným asynchronním motorem.

2.1. Asynchronní motor

V této kapitole jsou popsány základní vlastnosti asynchronního motoru potřebné pro rozbor a řízení MVE.

Asynchronní motor je točivý elektrický stroj, který patří v oblasti elektrických pohonů k nejrozšířenějším. Princip činnosti tohoto motoru je založen na elektromagnetické indukci napětí a proudů v rotoru. Točivé magnetické pole asynchronního motoru je vytvořeno ve statoru. Statorové vinutí je nejčastěji trojfázové, kdy jednotlivé fáze jsou vzájemně posunuty o 120° . Asynchronní motor je schopný pracovat ve třech režimech, jak naznačuje momentová charakteristika AM na obrázku 2.1.



Obr. 2.1 - Momentová charakteristika asynchronního stroje [6]

V motorickém režimu pracuje AM od nulových otáček $n = 0$ až po otáčky synchronní $n = n_{s1}$. Asynchronní stroj dosáhne téměř synchronních otáček tehdy, není-li zatížen. Tomuto stavu dle momentové charakteristiky odpovídá „nulový“ moment. V tomto stavu je motor zatížen tzv. momentem naprázdno, který vytváří hřídel motoru. V důsledku toho není kluz nulový, ale k nule se velmi blíží. Pro synchronní otáčky n_{s1} platí vztah:

$$n_{s1} = \frac{60 \cdot f_1}{p} [\text{min}^{-1}; \text{Hz}, -], \quad (2.1)$$

kde frekvence f_1 je frekvence napájecího napětí a p je počet pólových dvojic. Rozdíl mezi synchronními otáčkami a otáčkami rotoru definuje skluz s , který je definován:

$$s = \frac{n_{s1} - n}{n_{s1}} [-; \text{min}^{-1}, \text{min}^{-1}, \text{min}^{-1}], \quad (2.2)$$

kde otáčky rotoru jsou značeny symbolem n . Moment M_m je maximální moment asynchronního stroje, kterému odpovídá moment zvratu M_b . Skluz při momentu zvratu je označován symbolem S_b . Pro výpočet momentu motoru je možné využít tzv. zjednodušený Klossův vztah:

$$M = \frac{2 \cdot M_m}{\frac{s}{S_b} + \frac{S_b}{s}} [N \cdot m] \quad (2.3)$$

Z rovnice (2.2) pak lze odvodit vztah pro otáčky rotoru stroje:

$$n = n_{s1}(1 - s) [\text{min}^{-1}; \text{min}^{-1}, -] \quad (2.4)$$

Točivé magnetické pole v rotoru vytváří indukované proudy v rotoru. Toto magnetické pole se vůči rotoru otáčí otáčkami n_2 :

$$n_2 = n_{s1} - n = \frac{f_2}{p} [\text{min}^{-1}; \text{min}^{-1}, \text{min}^{-1}; s^{-1}, -]. \quad (2.5)$$

Pro frekvenci napětí a proudů ve vinutí rotoru (f_2) platí vztah:

$$f_2 = n_2 \cdot p = (n_{s1} - n) \frac{f_1}{n_{s1}} = s \cdot f_1 [s^{-1}]. \quad (2.6)$$

Vztah udávající závislost jmenovitého točivého momentu stroje M_N na jmenovitém výkonu stroje P_N a otáčkách n_N , udává vztah:

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{P_N}{\frac{2\pi \cdot n_N}{60}} = [N \cdot m; W; \text{rad} \cdot s^{-1}; W, \text{min}^{-1}]. \quad (2.7)$$

Do generátorického režimu se asynchronní motor dostane tehdy, překročí li motor synchronní otáčky. V této oblasti momentové charakteristiky má motor záporný skluz ($s < 0$). Tento režim asynchronního motoru je označován jako generátorické (rekuperační) brzdění. Pokud využijeme moderní způsoby řízení AM polovodičovými měniči, které umožňují snížení napájecí frekvence motoru, pak může motor přejít do režimu rekuperace při podstatně nižších otáčkách. Z hlediska řízení MVE je tato možnost velice důležitá, protože efektivita provozu této elektrárny se zvyšuje. Tyto způsoby řízení jsou pro řízení elektrárny výhodné, protože se dají lépe kompenzovat vysoké výkyvy průtoků MVE pomocí frekvenčních měničů. Výsledky laboratorního měření těchto charakteristik jsou pak uvedeny v kapitole 4, kde je mimo jiné uvedeno, jakou vzájemnou závislost má výkon generátoru na průtoku MVE v různých pracovních bodech.

Reverzační otáček AM dosáhneme stavu tzv. brzdění protiproudem (obr. 2.1). V tomto režimu je skluz $s > 1$. Pro praktické dosažení tohoto stavu je zapotřebí přehodit dvě fáze motoru (motor reverzovat), aby se smysl točivého magnetického pole obrátil. Při dosažení nulových

otáček je pak zapotřebí motor odpojit od sítě. Moderní polovodičové měniče umožňují snadnou realizaci těchto stavů.

Podrobný popis asynchronních strojů a jejich přechodových dějů je uveden v literatuře [6].

2.2. Možnosti řízení otáček asynchronních motorů

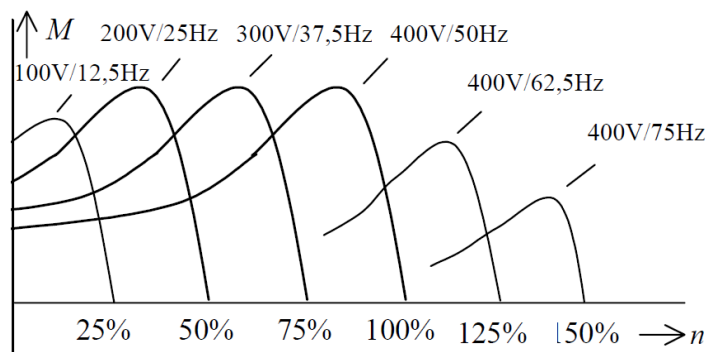
Způsobů otáčkového řízení asynchronních motorů je v této problematice několik. Mezi základní metody pro řízení otáček AM patří:

- Řízení otáček změnou skluzu nebo počtu pólových dvojic
- Řízení otáček změnou napájecího napětí
- Řízení otáček změnou napájecí frekvence
- Frekvenční napěťové řízení otáček AM (tzv. U / f řízení)
 - s otevřenou regulační smyčkou (s nebo bez kompenzace skluzu)
 - s uzavřenou regulační smyčkou
- Frekvenční proudové řízení otáček AM
- Vektorové řízení otáček AM
- Bezsenzorové řízení otáček AM

Pro řízení vodních elektráren se uplatňují takové metody řízení, které nevyžadují použití snímače otáček. Tyto metody vykazují pro řízení MVE dostatečnou dynamiku a přesnost. Jelikož tyto metody neobsahují snímač otáček, tak je jejich struktura o poznání jednodušší a je tedy možné je relativně snadno aplikovat na řízení těchto elektráren. V následujících kapitolách je uvedeno řízení AM právě bez použití snímače otáček.

2.2.1. Frekvenční napěťové řízení asynchronního motoru bez snímače otáček

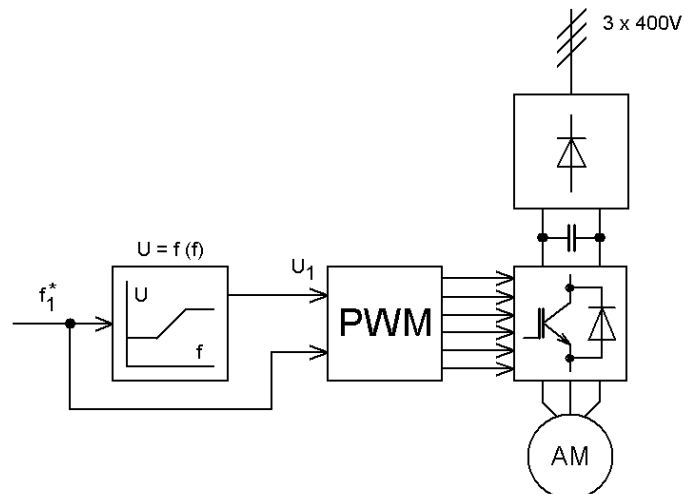
Skalární U/f řízení je v principu založeno na udržování tohoto poměru na konstantní hodnotě. Tedy s rostoucím napětím musí růst i frekvence a naopak. Toto řízení vede k udržování konstantního magnetického toku ϕ_m a konstantního momentu na hřídeli M . V důsledku toho se pak momentová charakteristika posune, ovšem její tvar se nijak nepříznivě nezmění v rámci určitého rozsahu otáček. Momentové charakteristiky pro různé kombinace U/f znázorňuje obrázek 2.2.



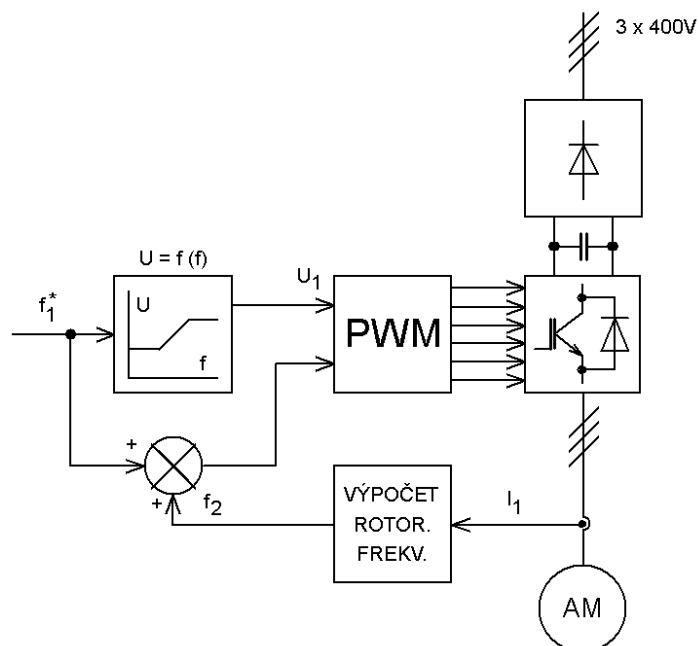
Obr. 2.2 - Momentové charakteristiky skalárního řízení U/f [6]

Z obrázku 2.2 je patrné, že moment se nemění v relativně velkém kmitočtovém rozsahu. Při nízkých kmitočtech je moment nižší, protože zde se nepříznivě uplatňuje úbytek napětí na statorovém odporu AM. Naopak pro frekvence vyšší než 50Hz již není možné zvyšovat napětí, takže moment je zde také nižší.

Základní způsoby U/f řízení jsou: v otevřené regulační smyčce, v otevřené regulační smyčce s kompenzací skluzu a v uzavřené regulační smyčce.



Obr. 2.3 – Frekvenční napětíové řízení otáček v otevřené regulační smyčce [7]



Obr. 2.4 – U/f řízení otáček v otevřené regulační smyčce s kompenzací skluzu [7]

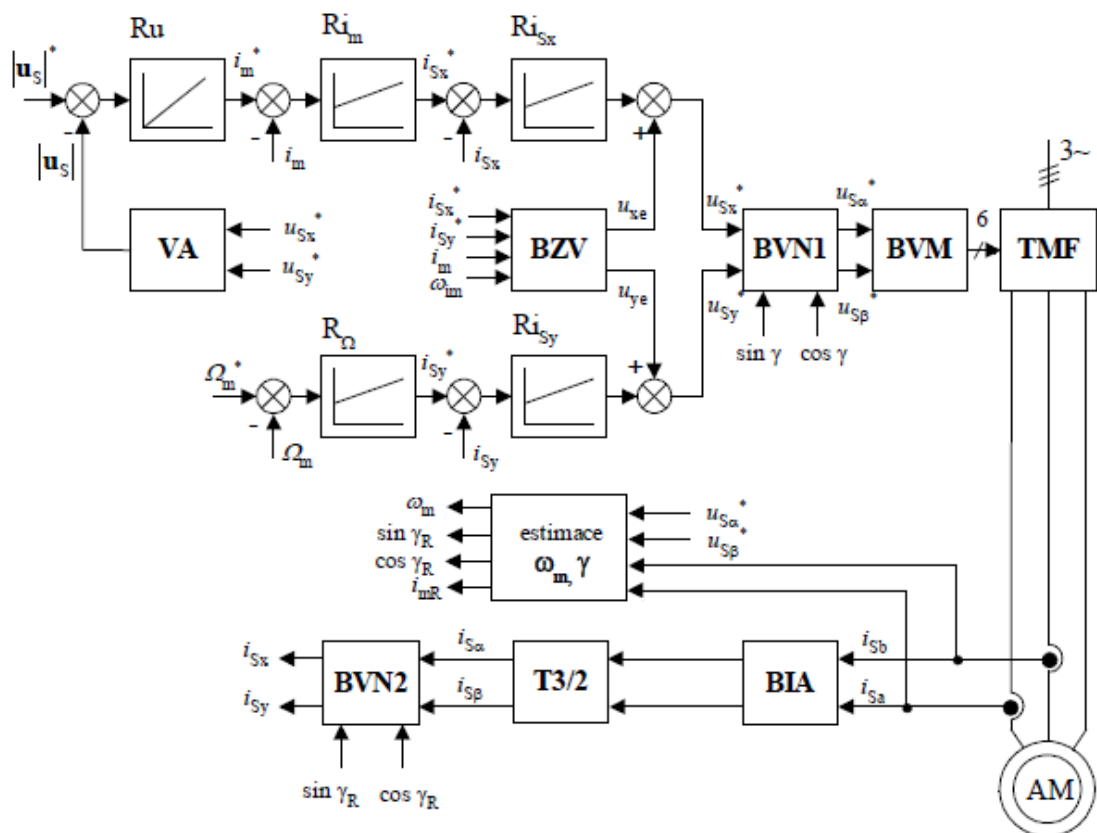
Na obrázku 2.3 je znázorněna struktura frekvenčně napětíového řízení otáček v otevřené regulační smyčce. Výkonová část obsahuje neřízený usměrňovač, napětíový meziobvod, napětíový střídač a asynchronní stroj. Řídicí část pak obsahuje blok $U = f(f)$, který zajišťuje

konstantní poměr napětí a frekvence. Do tohoto bloku vstupuje žádaná frekvence f^* a vystupuje napětí v závislosti na této frekvenci. Do bloku PWM pak vstupuje toto napětí a žádaná frekvence. Výstupy z PWM pak řídí výkonové IGBT tranzistory v napěťovém střídači. Nevýhoda tohoto řízení je taková, že skutečné otáčky motoru budou nižší než žádané (viz. rovnice 2.4), protože toto řízení nepracuje se zpětnou vazbou.

Obrázek 2.4 značí frekvenčně napěťové řízení otáček v otevřené regulační smyčce s kompenzací skluzu. Regulační struktura je velmi obdobná jako na obrázku 2.3. Blok výpočtu rotorové frekvence f_2 vypočítá tuto frekvenci z naměřeného statorového proudu I_l . Výsledná frekvence se přičte k frekvenci žádané a tento součet pak vstupuje do bloku PWM. Tímto způsobem je zaručena jistá kompenzace skluzu, protože frekvence vstupující do PWM je vyšší o frekvenci f_2 ve vinutí rotoru.

2.2.2. Vektorové řízení motoru bez snímače otáček

Metody řízení otáček motorů, které nepoužívají ve svých regulačních strukturách snímač otáček, jsou označovány jako metody bezsensorového řízení. Principem bezsensorového řízení je určit polohu rotoru na základě estimace. Tyto metody využívá řada moderních polovodičových měničů, které pracují většinou s estimací polohy na základě matematického modelu motoru. Existuje řada estimátorů, které pracují buď s matematickým modelem motoru nebo bez modelu motoru. Mezi často používané estimátory patří tzv. MRAS (Model Reference Adaptive System), Luenbergův pozorovatel a Kalmanův pozorovatel.



Obr. 2.5 – Regulační struktura bezsensorového vektorového řízení AM [1]

Regulační struktura bezsenzorového vektorového řízení je zobrazena na obrázku 2.5. Princip regulace je pro všechny metody bezsenzorového řízení v podstatě stejný, akorát s tím rozdílem, že způsob vyhodnocení mechanické úhlové rychlosti ω_m se liší na základě použité estimační metody. Struktura vektorového řízení využívá rozkladu vektoru proudu ve statoru na dvě složky. Složka i_{lx} je složka tokotvorná, která ovlivňuje magnetický tok stroje a tím i jalový výkon. Složka i_{ly} je momentotvorná, tím pádem ovlivňuje moment stroje a činný výkon. Obě tyto složky jsou vzájemně kolmé a musí být regulovány tak, aby se vzájemně neovlivňovaly.

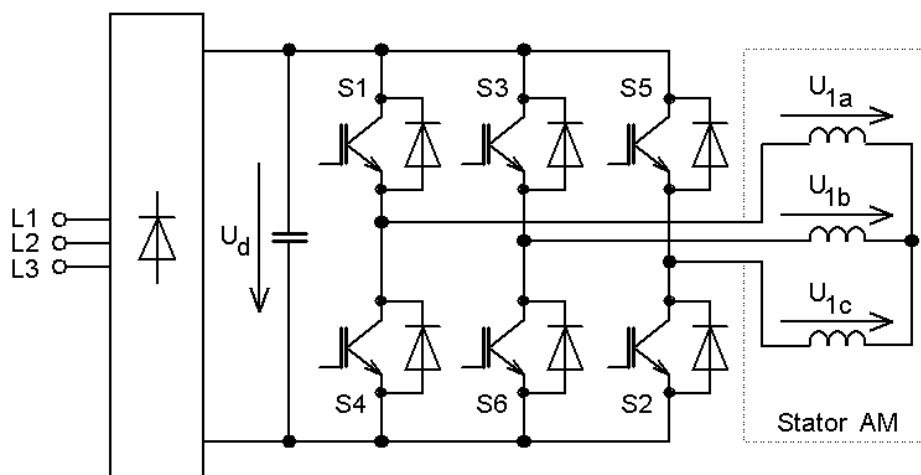
Snímači proudu jsou měřené hodnoty statorových proudů i_{sa} a i_{sb} . V bloku tzv. transformace 3/2 jsou tyto proudy převedeny na pevný statorový systém souřadnic $[\alpha, \beta]$, tedy na proudy s označením $i_{s\alpha}$ a $i_{s\beta}$. V bloku vektorového natočení BVN2 jsou z proudů $i_{s\alpha}$ a $i_{s\beta}$ vypočteny proudy i_{sx} a i_{sy} , které jsou natočeny do systému orientovaných souřadnic $[x, y]$ o úhel γ . Informace o $\sin \gamma$ a $\cos \gamma$ jsou získány z bloku estimace. Natočené veličiny proudů i_{lx} a i_{ly} jsou pak odečítány od žádaných hodnot i_{sx}^* a i_{sy}^* a vedeny do proudových regulátorů R_{isx} a R_{isy} . Jelikož vazby mezi složkami proudu je potřeba „oddělit“, tak je nutné využít blok zrušení vazby BZV, který k výstupům regulátorů proudů přičte napětí u_{xe} a u_{ye} , čímž je zaručeno zrušení vzájemné vazby. Do bloku vektorového natočení BVN1 vstupují žádané hodnoty napětí u_{sx}^* a u_{sy}^* , které jsou transformovány do souřadného systému $[\alpha, \beta]$. Do bloku vektorové modulace BVM pak vstupují složky $U_{s\alpha}$ a $U_{s\beta}$, které jsou přetransformovány na třífázovou soustavu U_{sa} , U_{sb} a U_{sc} . Na základě těchto údajů pak blok PWM generuje signály pro řízení spínačů nepřímého měniče kmitočtu TMF. Regulace magnetického toku (resp. magnetizačního proudu) je prováděno v regulátoru R_{im} . Do tohoto regulátoru vstupuje rozdíl žádané a skutečné hodnoty magnetizačního proudu. Skutečná hodnota magnetizačního proudu je získána z bloku estimace. Do bloku vektorového analyzátoru VA vstupují napětí u_{sx}^* a u_{sy}^* . Výstup bloku VA tvoří modul vektoru statorového napětí, který je odečítán od žádané hodnoty tohoto vektoru napětí. Rozdíl je pak veden do integračního regulátoru napětí R_u . Do regulátoru rychlosti R_Ω je přivedena regulační odchylka rychlosti, tedy rozdíl žádané Ω_m^* a skutečné rychlosti Ω_m , získané estimačními metodami [1].

2.3. Přímé řízení momentu a magnetického toku asynchronního motoru

Metoda přímého řízení momentu asynchronních motorů je v porovnání s vektorovým řízením znatelně jednodušší. Mezi další výhody patří dynamické vlastnosti a možnosti dosažení vysokých spínacích frekvencí (běžně nad 10 kHz). Pro řízení elektrických pohonů se zpravidla používá nepřímý měnič kmitočtu s napěťovým meziobvodem, jehož spínací prvky tvoří IGBT tranzistory (pro nižší výkony). Principiální schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 2.6.

Tab. 2.1 – velikosti napětí na fázích statoru pro různé kombinace sepnutí spínačů S1 až S6 [1]

Vektor napětí	u_0	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7
Sepnuté spínače	S4,S6,S2	S1,S6,S2	S1,S3,S2	S4,S3,S2	S4,S3,S5	S4,S6,S5	S1,S6,S5	S1,S3,S5
Kombinace sp.	000	100	110	010	011	001	101	111
u_a	0	$2/3 U_d$	$1/3 U_d$	$-1/3 U_d$	$-2/3 U_d$	$-1/3 U_d$	$1/3 U_d$	0
u_b	0	$-1/3 U_d$	$1/3 U_d$	$2/3 U_d$	$1/3 U_d$	$-1/3 U_d$	$-2/3 U_d$	0
u_c	0	$-1/3 U_d$	$-2/3 U_d$	$-1/3 U_d$	$1/3 U_d$	$2/3 U_d$	$1/3 U_d$	0



Obr. 2.6 – Principiální zapojení vinutí AM k nepřímému měniči kmitočtu [1]

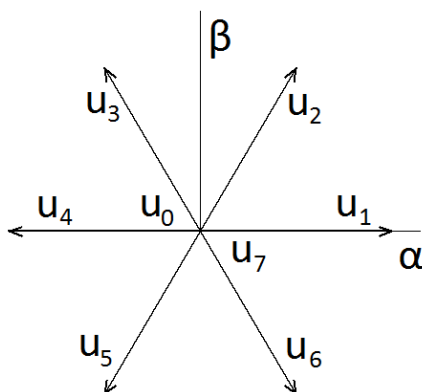
Dle spínací kombinace spínacích prvků S1 až S6 se na statorovém vinutí motoru objevuje různé napětí. Velikosti těchto napětí jsou uvedeny v tabulce 2.1. Kombinacím sepnutých spínačů odpovídají vektory \underline{u}_0 až \underline{u}_7 , jak je znázorněno v tabulce 2.1 a na obrázku 2.7.

Pro stanovení spráženého magnetického toku platí vztahy:

$$\psi_{1\alpha} = \int (U_{1\alpha} - R_S i_{1\alpha}) dt \quad (2.8)$$

$$\psi_{1\beta} = \int (U_{1\beta} - R_S i_{1\beta}) dt \quad (2.9)$$

Odvození těchto vztahů vychází z napěťové rovnice statoru a z rozložení vektorů napětí, proudů a spráženého magnetického toku v souřadné soustavě $[\alpha, \beta]$, symbolem R_S je pak značen statorový odpor.



Obr. 2.7 – Schématické znázornění spínacích vektorů [1]

Podstatou přímého řízení momentu AM je vytvoření točivého magnetického pole ve statoru motoru. Točivé magnetické pole se vytváří spínacími kombinacemi spínači S1 až S6. Velikost momentu je úměrná rychlosti otáčení magnetického pole ve statoru. V praktických

aplikacích existují 2 způsoby spínání. První způsob je spínání vektorů \underline{u}_0 až \underline{u}_7 tzn. včetně spínání nulových vektorů. Sepnutím vektorů \underline{u}_0 nebo \underline{u}_7 moment motoru klesá, protože rychlost magnetického pole je nulová. Druhý způsob přímého řízení momentu je spínání vektorů \underline{u}_1 až \underline{u}_6 tzn. bez nulových vektorů. U této metody se pokles momentu realizuje sepnutím opačného vektoru toku. Pro řízení momentu motoru se v regulační struktuře využívá dvupolohový regulátor. Výstupem z tohoto regulátoru je rozdíl žádaného m_z a skutečného momentu m . Dvupolohový regulátor udržuje moment v hysterezním pásmu a má vyšší prioritu než regulátor toku.

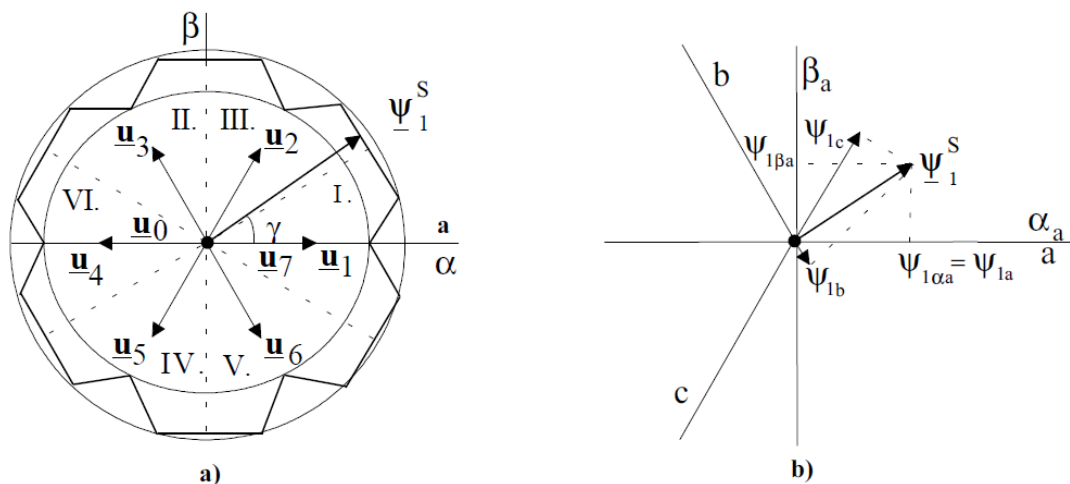
$$m = \frac{3}{2} p_p (\psi_{1\alpha} i_{1\beta} - \psi_{1\beta} i_{1\alpha}) \quad (2.10)$$

Pro řízení magnetického toku existuje řada metod, jako např. Depenbrockova, Takahashiho nebo „nová“ (vyvinuta na VŠB-TUO) metoda řízení magnetického toku. Každá metoda využívá jiné algoritmy řízení, nicméně zde bude uvedena pouze metoda Takahashiho. Podrobnější popis těchto algoritmů uvádí literatura [1].

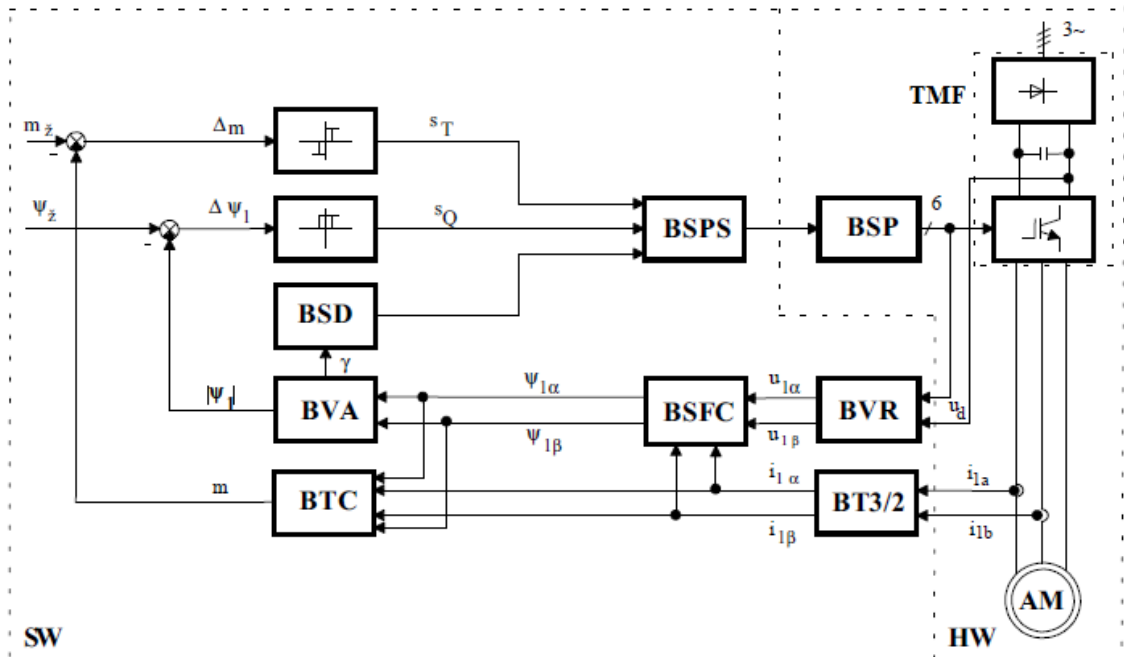
2.3.1. Takahashiho metoda přímého řízení momentu a magnetického toku

Základním principem Takahashiho metody je pohyb vektoru statorového toku (resp. jeho koncový bod) v mezikruží. Oblast mezikruží je relativně úzká, takže trajektorie tohoto bodu je v podstatě kružnice. Na obrázku 2.8 je principiálně znázorněna trajektorie statorového toku v případě Takahashiho metody. Oblast je rozdělena na 6 sektorů po 60°. Principem je udržet koncový bod statorového toku v oblasti mezikruží spínáním těch vektorů, které jsou rovnoběžné s trajektorií pohybu koncového bodu statorového toku. Pro realizaci přepínání vektorů se využívá dvupolohový regulátor.

Regulační struktura pro obecné přímé řízení momentu AM bývá pro mnohé metody obdobná, v podstatě se liší pouze algoritmizací pro určení vektoru statorového toku. Na obrázku 2.9 je znázorněna regulační struktura přímého řízení momentu a toku dle Takahashiho metody.



Obr. 2.8 – Trajektorie statorového toku pro Takahashiho metodu [1]



Obr. 2.9 – Regulační struktura přímého řízení momentu a toku pro Takahashiho metodu [1]

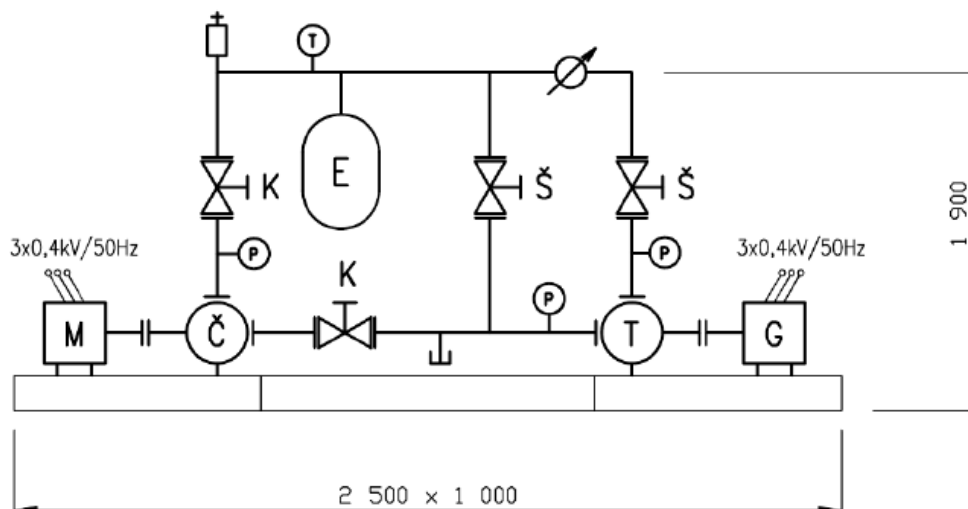
Snímané statorové proudy i_{1a} a i_{1b} jsou přivedeny do bloku transformace ze soustavy $[a,b,c]$ do soustavy $[\alpha, \beta]$ tj. tzv. transformace 3/2. Do bloku rekonstrukce napětí BVR je přivedena hodnota napětí z meziobvodu U_d a informace o spínací kombinaci spínačů S1 až S6. Výstupem z tohoto bloku je pak statorové napětí $U_{1\alpha}$ a $U_{1\beta}$ v pevné statorové soustavě $[\alpha, \beta]$. V bloku výpočtu statorového toku BSFC se vypočítává sprážený tok $\psi_{1\alpha}$ a $\psi_{1\beta}$ na základě rovnic (2.8) a (2.9). V bloku BTC je vypočítáván skutečný moment na základě údajů $\psi_{1\alpha}$, $\psi_{1\beta}$, $i_{1\alpha}$ a $i_{1\beta}$. Na základě výstupů z dvupolohových regulátorů toku a bloku pro vyhodnocení sektoru BSD je blokem BSFS vybrána patřičná spínací kombinace spínačů S1 až S6. Blok spínacích pulzů je označený BSP, ze kterého vedou PWM signály pro řízení spínačů střídače [1].

3. Koncepce a řízení laboratorního modelu MVE

V laboratoři elektrických pohonů byl nainstalován laboratorní model malé vodní elektrárny. Katedra elektroniky bude tento laboratorní model využívat pro účely moderního řízení pohonů MVE a pro inovace technologií v této oblasti. Jedním z hlavních cílů této diplomové práce je získání co nejvíce věrohodných charakteristik popisující vzájemné poměry mezi hydrodynamickými, mechanickými a elektrickými parametry. S těmito údaji bude katedra elektroniky později pracovat v oblasti vývoje moderních technologií řízení.

3.1. Základní popis a zapojení laboratorního modelu MVE

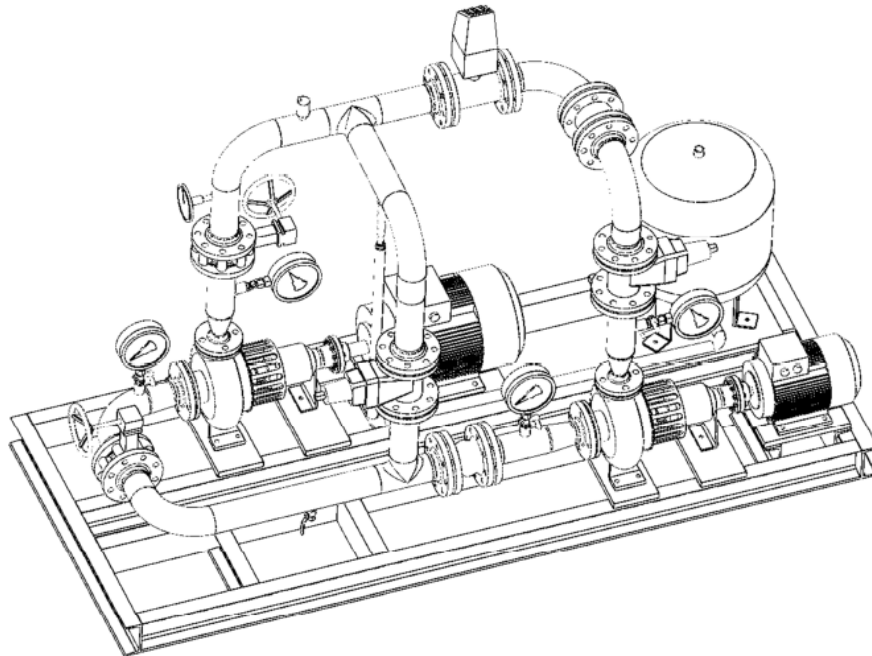
Laboratorní model MVE je určen pro měření a vývoj optimálního řízení vodní elektrárny. Tento model obsahuje dva asynchronní motory. Motor s příkonem 11 kW je mechanicky spojený s čerpadlem, které vytváří průtok v uzavřeném potrubí. Tento průtok je zapotřebí k pohánění vodní turbíny, která otáčí s druhým asynchronním strojem pracující v generátorickém režimu. Asynchronní motor pracující v generátorickém režimu má příkon 4 kW. Princip tohoto modelu tedy spočívá v tom, že „velkým“ motorem je vytvořený průtok celým modelem, takže je tímto uměle simulován spád, který jiným způsobem nelze v laboratoři vytvořit. Tento asynchronní motor je řízený nepřímým měničem kmitočtu s napěťovým meziobvodem, takže umožňuje libovolné nastavení otáček motoru a tedy průtok laboratorním modelem je možné poměrně přesně řídit. Generátor je také připojený na nepřímý měnič kmitočtu, který je navíc schopný pracovat v rekuperačním režimu. Hydrodynamické schéma tohoto modelu je znázorněno na obrázku 3.1. Na obrázku 3.2 je pak 3D náčrt tohoto modelu.



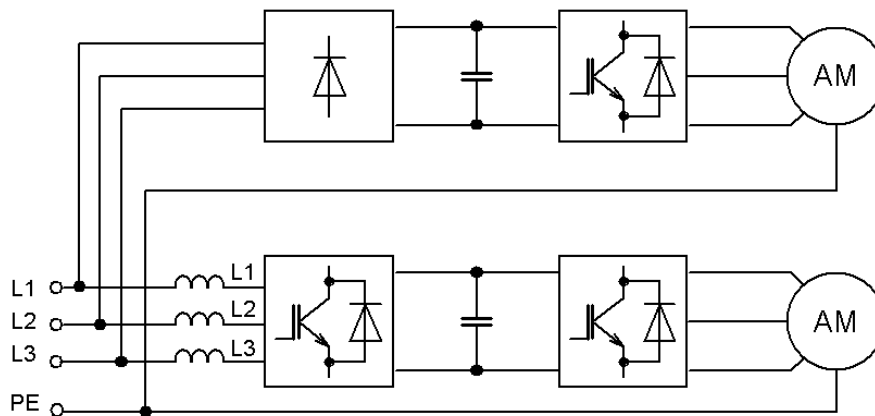
Obr. 3.1 – Hydrodynamické schéma laboratorního modelu MVE [9]

Čerpadlem Č se vhání voda potrubím, která cirkuluje v uzavřeném okruhu. Voda svým prouděním vykonává rotační pohyb turbínou. Klapkami K je možné řídit velikost průtoku, nicméně to lze také provádět polovodičovými měniči, takže při řízení měničovou technikou jsou obě klapky plně otevřené. Šoupátka Š lze řídit míru průtoku turbínou a obtoku. Pro řízení tohoto laboratorního modelu je šoupátko obtoku plně uzavřené a šoupátko nad turbínou plně otevřené.

Expanzní nádoba E je natlakována na tlak 0,7 MPa proto, aby v důsledku kavitace nevznikal podtlak za turbínou. V důsledku kavitace by měření bylo nevěrohodné. Tato soustava dále obsahuje automatický odvzdušňovací ventil a měřidla neelektrických veličin: tlakoměry, umístěny před a za turbínou a čerpadlem; průtokoměr a teploměr. Každý tlakoměr má navíc svůj vlastní odvzdušňovací mechanický ventil.



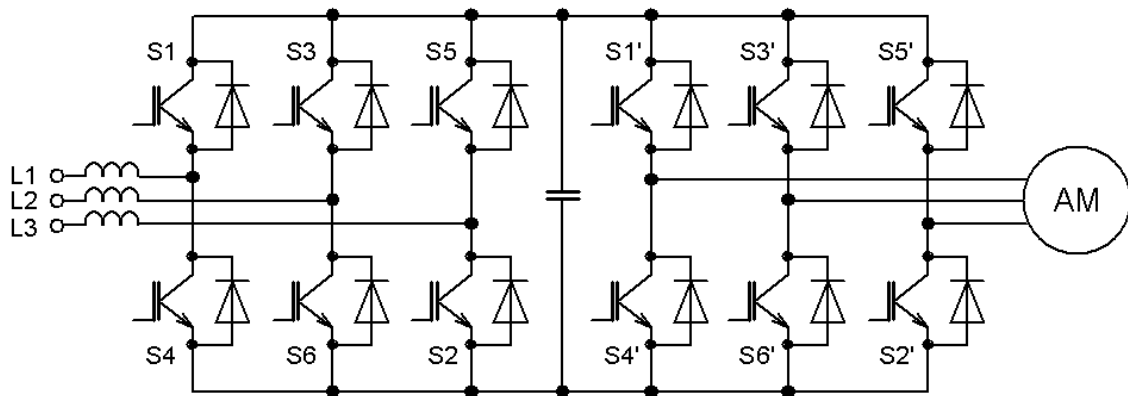
Obr. 3.2 – 3D schéma laboratorního modelu MVE [9]



Obr. 3.3 – Principiální blokové zapojení laboratorního modelu MVE

Blokové schéma zapojení laboratorního modelu MVE je zobrazeno na obrázku 3.3. V horní části obrázku je zapojení motoru (11 kW) na nepřímý měnič kmitočtu značky Siemens Simovert Masterdrivers. Ve spodní části obrázku je zapojení generátoru (4 kW) k nepřímému měniči kmitočtu Siemens Sinamics S120. Tento měnič má ve své konfiguraci rekuperační jednotku, která obsahuje IGBT tranzistory i na straně usměrňovače, takže měnič je schopen dodávat elektrickou energii do sítě. Výkonová konfigurace nepřímého měniče kmitočtu

s možností rekuperace je zobrazena na obrázku 3.4. Konfigurace je v podstatě „klasický“ nepřímý měnič kmitočtu s tím rozdílem, že v případě rekuperace energie tvoří IGBT spínače S1 až S6 střídač a stejnosměrné napětí z meziobvodu rozstřídávají do elektrické sítě.



Obr. 3.4 – Nepřímý měnič kmitočtu s pulzním usměrňovačem

Podrobnější popis, vlastnosti a parametry měničů Sinamics S120 je možné dohledat v textu [2] nebo také na oficiálních webových stránkách výrobce [12].

3.2. Spuštění a řízení laboratorního modelu MVE

Před spuštěním tohoto zařízení při měničovém řízení je potřeba obě klapky naplno otevřít, dále plně otevřít šoupátko nad turbínou a plně uzavřít šoupátko obtoku. Dále je nutné provést komunikaci mezi rekuperačním měničem a generátorem (4 kW) pomocí měniče Sinamics S120 přes sběrnici RS 232. Pro parametrizaci měniče bylo použito vektorové řízení bez snímače otáček, které pracuje na základě nastavení matematického modelu asynchronního motoru (viz. kapitola 2.2.2). Byť regulace nepracuje se snímačem otáček, přesto je pro tyto účely přesnost a dynamika dostatečná. Motor (11 kW) je řízený skalárním U/f řízením měničem Simovert (viz. kapitola 2.2.1). Jelikož veškerá měření jsou prováděna na straně generátoru a turbíny, proto je skalární řízení tohoto motoru v této aplikaci vyhovující. Pohon čerpadla v podstatě jen simuluje spád skutečné elektrárny a veličiny na výstupu z generátoru jsou vztaženy k průtoku. Horší přesnost a dynamika skalárního řízení neovlivní přesnost měření na straně generátoru.

Samotné spuštění soustrojí začíná roztočením generátoru (v motorickém režimu) na žádané otáčky. Následně se zvyšuje průtok zvyšováním otáček druhého motoru (11kW). Při dosažení určitých otáček tohoto motoru je pak průtok nulový (průtoky vody od obou motorů mají stejnou velikost, ale opačný smysl). Při dosažení vyšších otáček (11 kW motoru) je pak smysl průtoku vodní elektrárnou opačný. Dosažením tohoto stavu generátor začíná vyrábět elektrickou energii, protože průtok simulovaný 11 kW motorem je vyšší, než průtok, který vytvářel samotný generátor (4 kW) při spuštění v motorickém režimu. V těchto stavech tedy elektrárna vyrábí elektrickou energii, která je závislá především na průtoku elektrárnou a na rozdílu tlaků na turbíně. Hydrodynamické závislosti a vztahy mezi reálnými elektrárnami a tímto modelem jsou pak dále názorněji popsány v kapitole 4.

4. Měření vlastností soustavy MVE

V této kapitole jsou podrobně měřeny a analyzovány důležité charakteristiky provozních stavů MVE. Měření bylo zaměřeno na měření charakteristik vodní tzv. čerpadlové turbíny. Jsou zde uvedeny závislosti spádu na průtoku, činného výkonu na průtoku, účinnosti, účinníku a závislosti momentu na otáčkách generátoru. Tyto veličiny v praktických aplikacích mezi sebou souvisí a z hlediska řízení MVE jsou velmi důležité.

4.1. Analýza vodní turbíny

Jak již bylo popsáno v kapitole 3.1, součástí laboratorního modelu MVE je asynchronní motor, který regulací průtoku laboratorním modelem simuluje spád reálné vodní elektrárny. Pro provedení měření a analýzy laboratorního modelu je nejprve potřeba přepočítat veličiny laboratorního modelu na veličiny „skutečné“ vodní elektrárny, jejíž koncepce je popsána v kapitole 1. Pro laboratorní model je zapotřebí určit vztah pro výpočet čistého spádu H . Výkon kapaliny P_{kap} je dán vztahem [9]:

$$P_{kap} = Q \cdot (p_2 - p_1) [W; m^3 \cdot s^{-1}, Pa], \quad (4.1)$$

kde rozdíl tlaků v závorce odpovídá rozdílu tlaku před (p_2) a za (p_1) turbínou. Z rovnice (4.1) je pak možné odvodit rovnici (4.2), ve které tlaky p_2 a p_1 budou přepočítány na jednotku výšky, tedy spádu.

$$P_{kap} = Q \cdot (\rho \cdot g \cdot H_2 - \rho \cdot g \cdot H_1) = Q \cdot \rho \cdot g \cdot (H_2 - H_1) \quad (4.2)$$

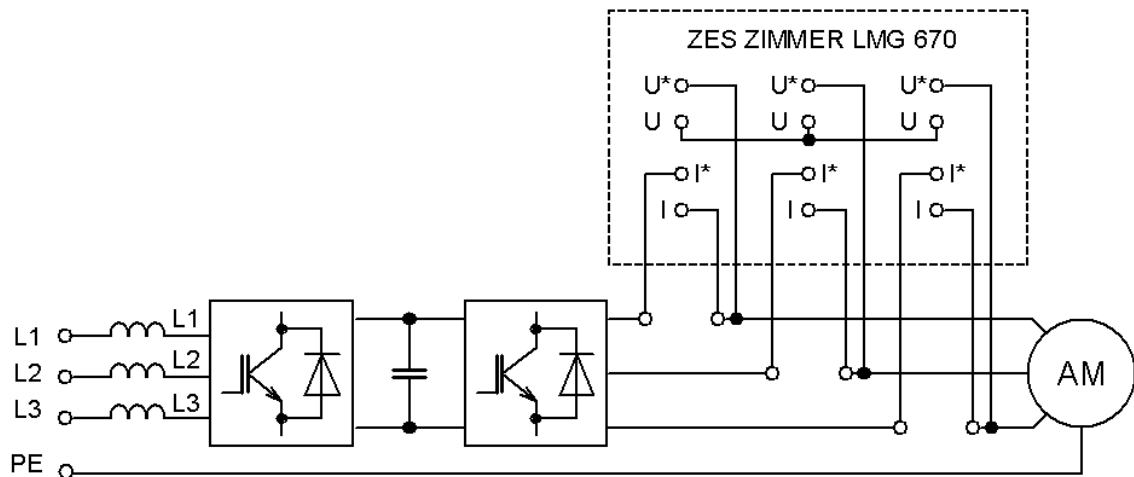
Rovnice (4.2) předpokládá, že hustota kapaliny před a za čerpadlem bude neměnná. Tohoto stavu lze dosáhnout tehdy, pokud na lopatkách turbíny nevzniká kavitace. Tlak v potrubí laboratorního modelu je dostatečně vysoký, takže na lopatkách turbíny nevzniká kavitace v celém rozsahu řízení. Z rovnice (4.2) lze pak jednoduše odvodit vztah pro určení spádu.

$$H = \frac{P_{kap}}{Q \cdot \rho \cdot g} [m; W, m^3 \cdot s^{-1}, kg \cdot m^{-3}, m \cdot s^{-2}] \quad (4.3)$$

V návaznosti na kapitolu 1.3 pak určíme účinnost soustrojí (tj. celková účinnost turbíny, mechanického převodu a generátoru). Tato účinnost je dána podílem naměřeného výkonu za generátorem a hydrodynamickým výkonu kapaliny.

$$\eta_{HD} = \eta_T \cdot \eta_P \cdot \eta_G = \frac{P_S}{P_{kap}} [-; W, W] \quad (4.4)$$

Na obrázku 4.1 je znázorněno blokové elektrické schéma zapojení pro měření vlastností turbíny. Pro přesné měření výkonů je zde použitý výkonový analyzátor ZES Zimmer LMG 670. Jak je z obrázku patrné, tak přístroj je zapojený mezi měnič a generátor. Fázové vodiče generátoru jsou připojeny sériově s proudovými svorkami přístroje a napěťové svorky jsou připojeny na jednotlivé fáze paralelně.



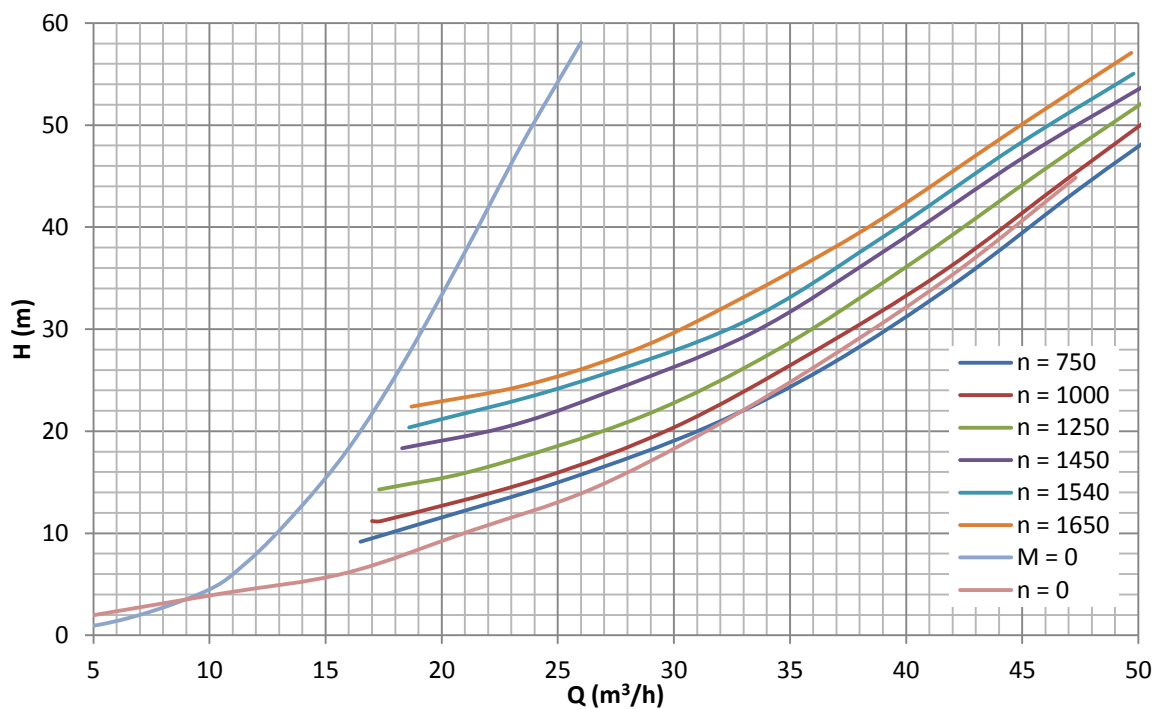
Obr. 4.1 – Blokové schéma zapojení pro měření vlastností turbíny

Seznam použitých měřicích přístrojů:

Výkonový analyzátor: ZES ZIMMER LMG 670; vč. 00431471

Průtokoměr: FLONET FN2014.1; vč. 44824/14

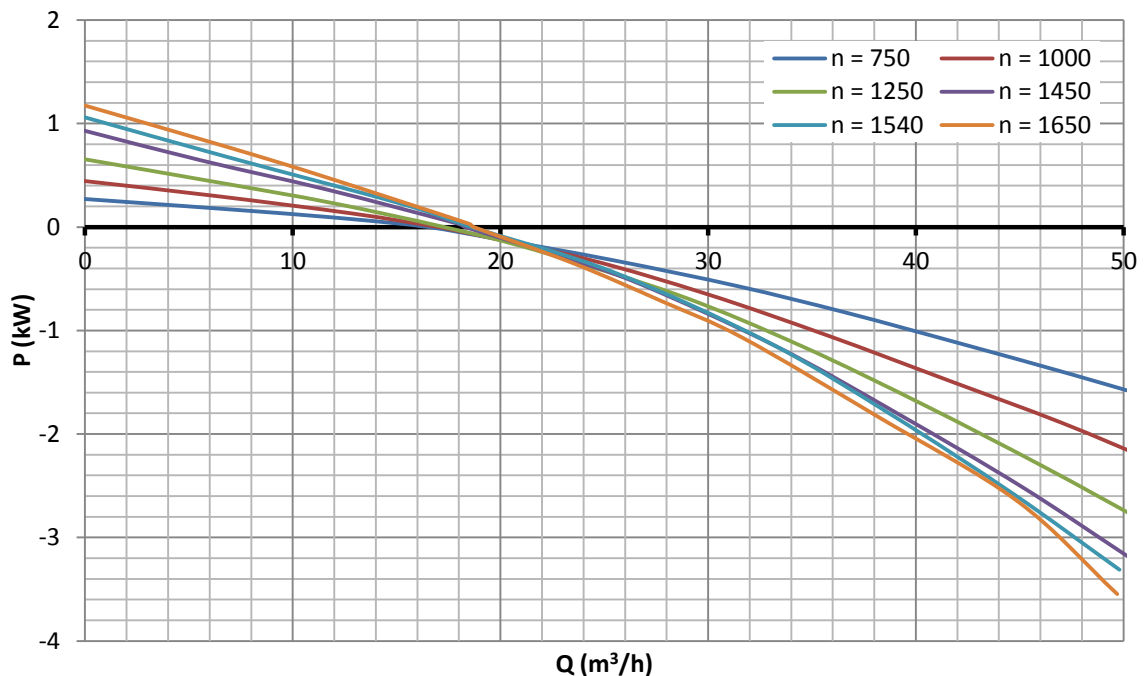
Tlakoměry: WIKA 7456259 (2 ks)



Obr. 4.2 – Výkonové charakteristiky turbíny

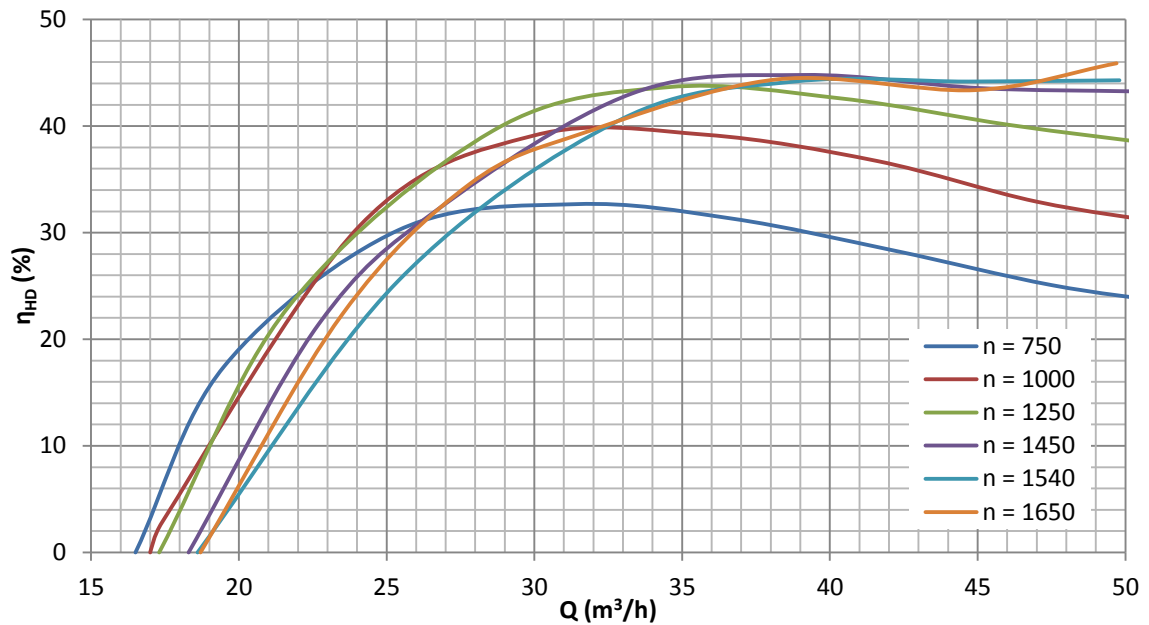
Měření výkonových charakteristik turbíny (obr. 4.2) probíhalo tak, že byly zaznamenávány hodnoty tlaků před (p_2) a za (p_1) turbínou a průtok touto soustavou Q . Z těchto veličin byl vypočten hydrodynamický výkon kapaliny P_{kap} z rovnice (4.1). Při uvažování tíhového zrychlení $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ a hustoty vody $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$ byl určen spád H pro všechny pracovní body a naměřené hodnoty (viz. rovnice 4.3).

Křivky $M = 0$ a $n = 0$ z obrázku 4.2 určují pracovní oblast turbíny, protože výkon hydrodynamického stroje je dán součinem momentu a úhlové rychlosti. To v praxi znamená, že je-li moment nulový nebo otáčky nulové, tak výkon v těchto stavech je také nulový. Křivka nulového momentu $M = 0$ byla naměřena tak, že generátor nebyl připojen k měniči. V důsledku toho nebyl generátor brzděn, takže křivka má poměrně strmou charakteristiku. Pro změření křivky nulových otáček $n = 0$ bylo zapotřebí turbínu mechanicky zabrzdít. Ostatní křivky na obrázku jsou výkonové křivky turbíny, které byly naměřeny pro různé pracovní body, kdy parametrem byly otáčky generátoru. Každá křivka je tedy měřena pro konstantní otáčky generátoru a určuje spád H v závislosti na průtoku Q elektrárnou potažmo turbínou. Počáteční body těchto křivek by v ideálním případě měly začínat na křivce $M = 0$, ovšem tyto body byly určeny při nulovém výstupním výkonu z motoru ($P_s = 0$). Tyto menší „odchytky“ od ideálního počátečního stavu nejspíš způsobily ztráty v generátoru. S tímto jevem je potřeba počítat, úplné odstranění by se dalo provést přesným měřením otáček přímo na hřídeli turbíny, což zde nebylo provedeno z technických důvodů.



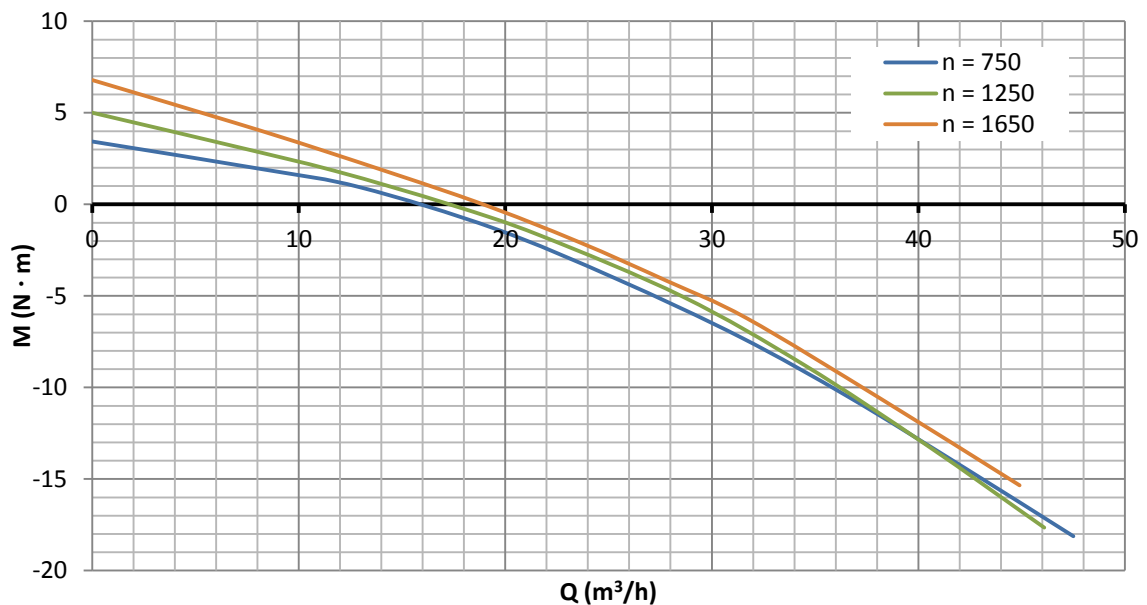
Obr. 4.3 – Příkonové charakteristiky turbíny

Pro měření tzv. příkonových charakteristik turbíny (obr. 4.3) byl použitý výkonový analyzátor LMG 670, který byl připojen mezi měnič a generátor, jak je zobrazeno na obrázku 4.1. Jelikož měření výkonu bylo prováděno za generátorem, je zřejmé, že v uvedených charakteristikách se do jisté míry projevila účinnost generátoru. Jelikož účinnost asynchronních motorů bývá relativně vysoká (v porovnání s účinnostmi turbín), lze s určitou (malou) nepřesností považovat tyto charakteristiky za charakteristiky turbíny. Na uvedených charakteristikách je přesně patrný přechod z motorického režimu do generátorického režimu. Těmto stavům odpovídá průtok v rozmezí $Q = 15 \div 20 m^3 \cdot h^{-1}$, což je také patrné z obrázku 4.2, kde navíc je možné vidět poměrně vysoké rozdíly spádů v těchto pracovních bodech.



Obr. 4.4 – Účinnosti turbíny

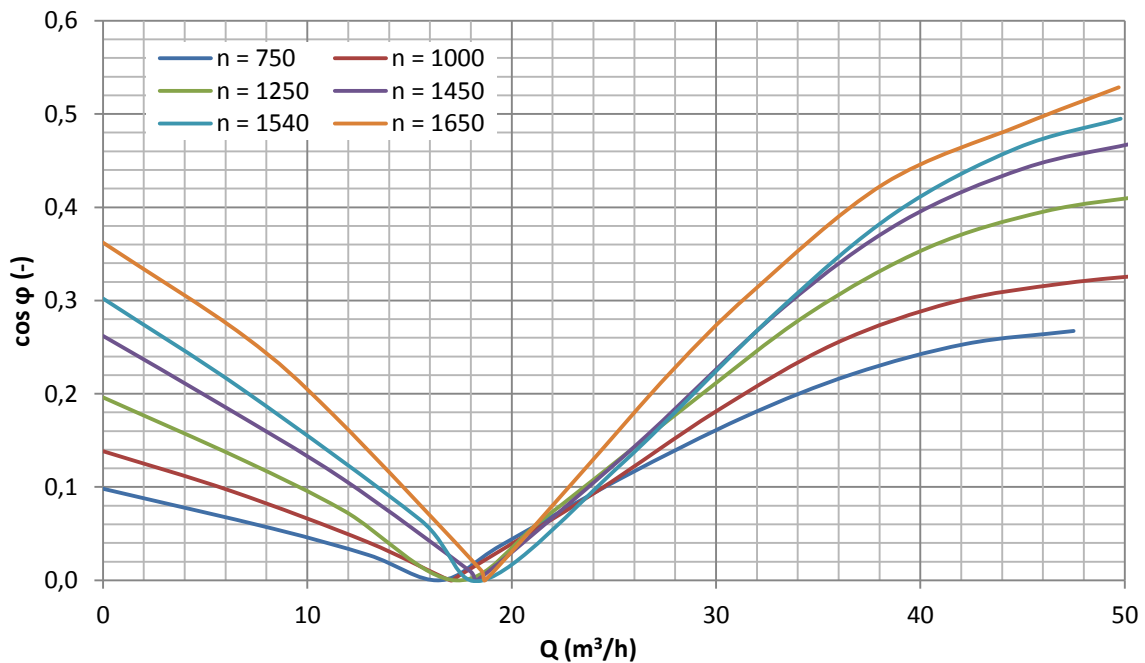
Na obrázku 4.4 jsou znázorněny účinnosti turbíny ve stejných pracovních bodech jako v předchozích případech. Samotná účinnost turbíny je dána podílem výkonu na hřídeli a výkonu kapaliny. Jak již bylo uvedeno výše, měření výkonu bylo prováděno za generátorem, takže uvedené účinnosti jsou menší o účinnost generátoru. Jelikož účinnost generátoru je podstatně vyšší než účinnost turbíny, lze opět tyto charakteristiky více méně považovat za charakteristiky celkové účinnosti turbíny. Účinnost v jednotlivých pracovních bodech je tedy určena na základě rovnice (4.4), ve které je naměřený výkon P_s a výkon kapaliny P_{kap} (rovnice 4.1). Dále je z těchto charakteristik patrné, že nejvyšší účinnost je dosahována při velkých průtocích a velkých otáčkách turbíny.



Obr. 4.5 – Závislost momentu na průtoku

Závislost momentu na průtoku (obr. 4.5) byla určena z hodnoty žádaných otáček generátoru a naměřeného výkonu za generátorem (viz. rovnice 4.5), takže opět ztráty v motoru mají na průběh této charakteristiky malý vliv. Nicméně přesto lze z grafu vidět, jaká je závislost momentu na průtoku. Pro přehlednost jsou zde uvedeny charakteristiky pro vybrané pracovní body, protože jinak by sít' charakteristik byla nepřehledná.

$$M = \frac{P_S}{\omega_r} = \frac{P_S}{\frac{2\pi \cdot n}{60}} [Nm; W; min^{-1}] \quad (4.5)$$



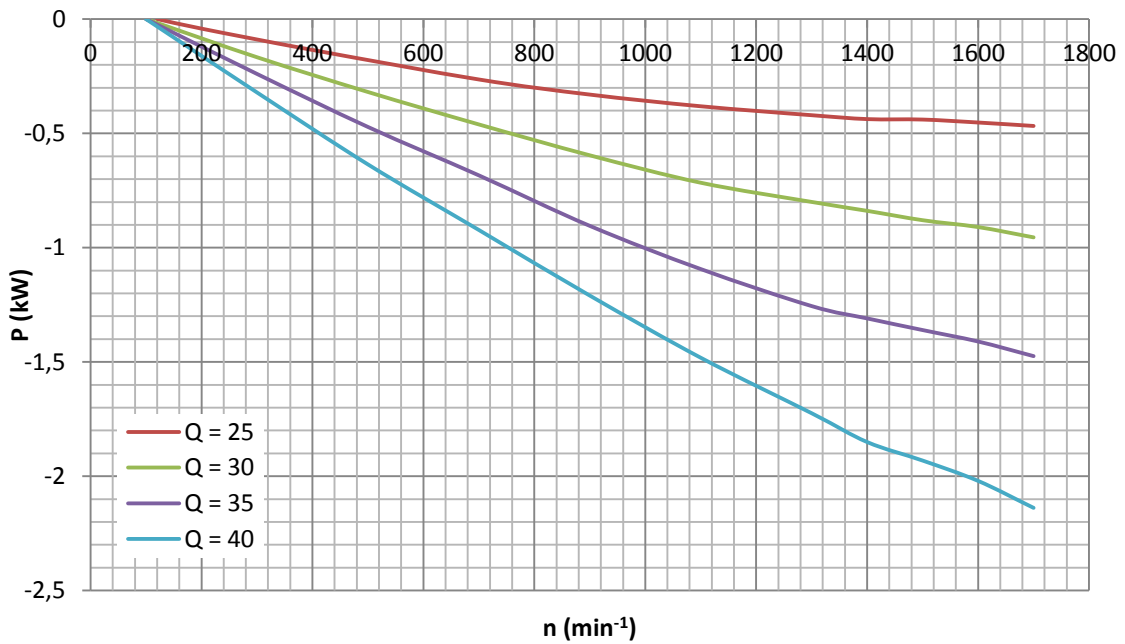
Obr. 4.6 - Závislost účinníku na průtoku

Pro stanovení křivky účinníku bylo provedeno měření jak činného P_S , tak i zdánlivého S výkonu a z těchto hodnot byl účinník dopočítán dle vztahu (4.6).

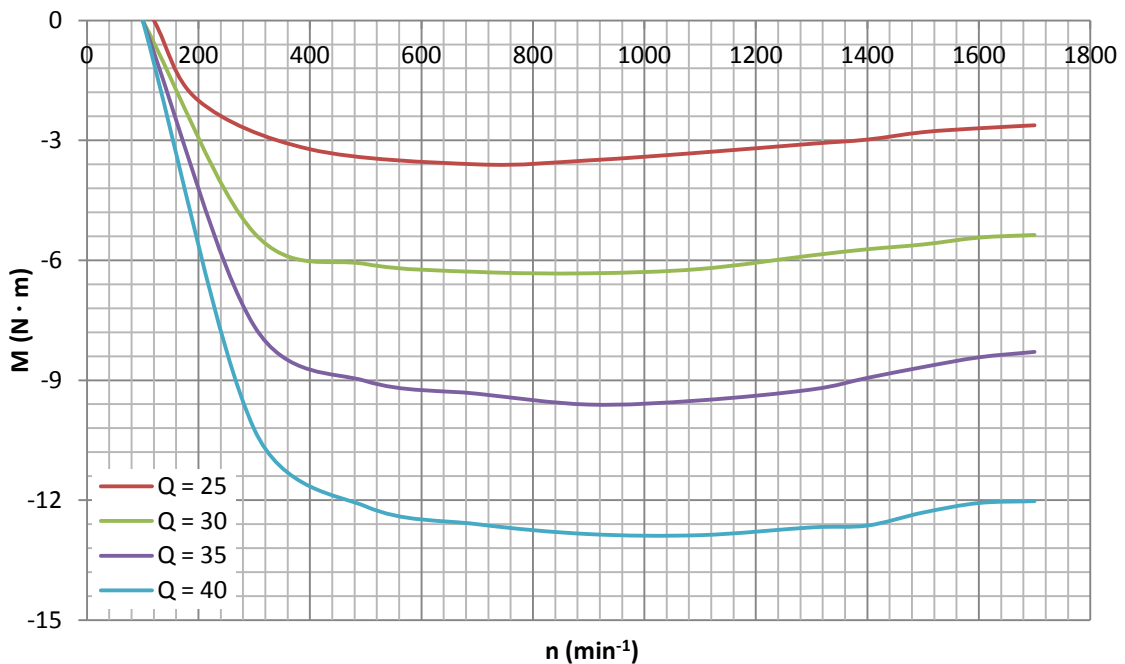
$$\cos \varphi = \frac{|P_S|}{S} [-; W; VA] \quad (4.6)$$

Tyto průběhy značí účinník mezi měničem a generátorem. Z grafů je patrné, že hodnoty účinníku jsou poměrně hodně malé, nicméně jak je dále možné vidět na obrázku 4.11, hodnoty účinníků na straně sítě jsou podstatně vyšší (viz. popis níže).

Všechny průběhy zobrazeny na obrázcích 4.2 až 4.6 mají společné to, že jsou vztaženy na průtok při parametrizaci otáček generátoru n . Pro důkladnější analýzu bylo provedeno další měření, které ovšem nebylo vztaženo na průtok Q , ale na otáčky generátoru n s parametry konstantního průtoku Q ($m^3 \cdot h^{-1}$). Následující charakteristiky (obr. 4.7 a 4.8) znázorňují výkon a moment v závislosti právě na otáčkách generátoru. Oběma charakteristikám odpovídá stejné blokové schéma zapojení výkonového analyzátoru (obr. 4.1) jako v předchozích případech, tím pádem je nutné počítat s tím, že hodnoty v grafech jsou nižší o účinnost generátoru.



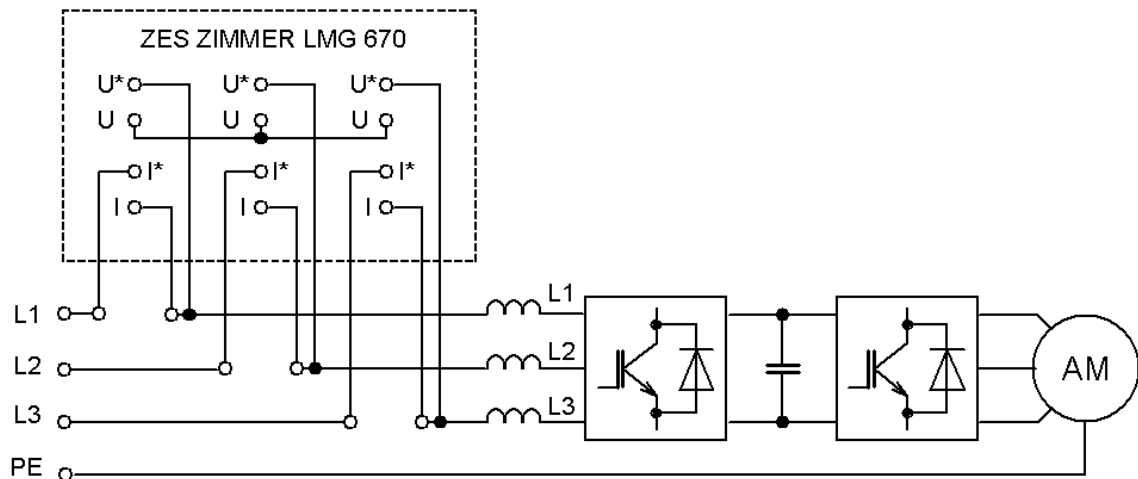
Obr. 4.7 – Výkon turbíny v závislosti na otáčkách generátoru



Obr. 4.8 – Závislost momentu na otáčkách generátoru

4.2. Analýza výkonu a účinníku vodní elektrárny

Veškerá měření z kapitoly 4.1 byla prováděna na straně mezi měničem a motorem. Jelikož měnič má ztrátový výkon okolo 160 W, bylo zapotřebí pro analýzu výkonu, který elektrárna dodává do elektrické sítě, provést měření mezi sítí a měničem. Blokové schéma konfigurace měření je zobrazeno na obrázku 4.9. Na základě tohoto měření je tedy možné určit celkový výkon dodávaný do elektrické sítě, celkový účinník a celkovou účinnost elektrárny.



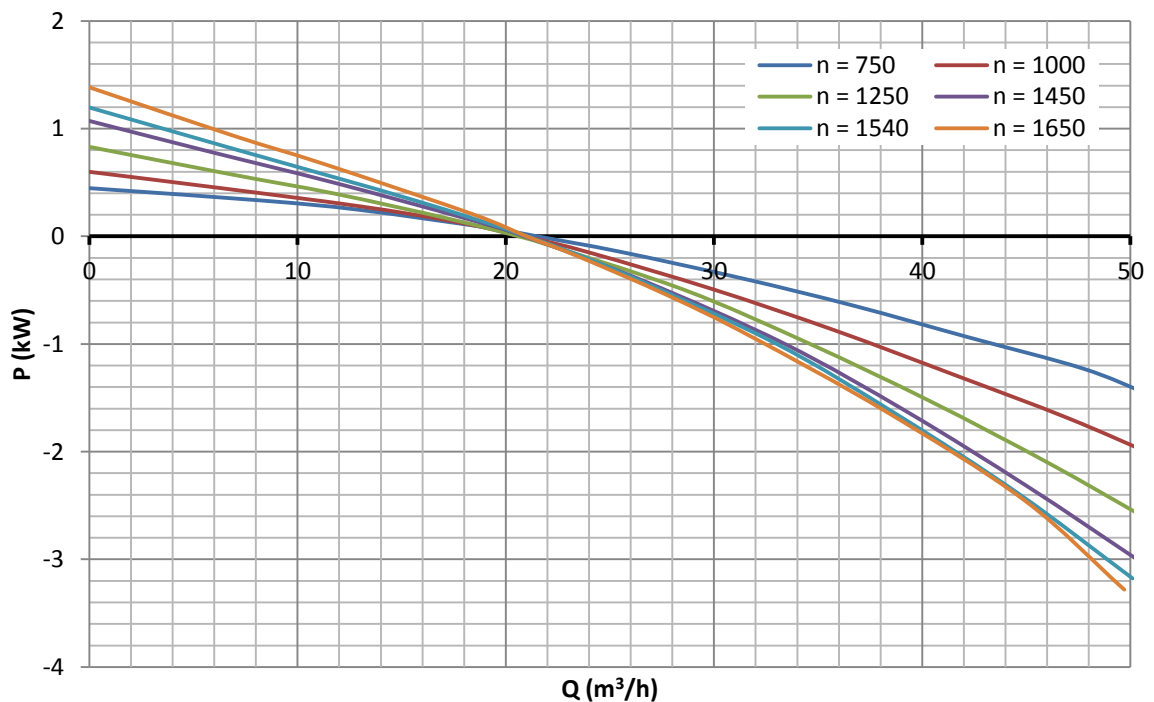
Obr. 4.9 – Blokové schéma zapojení pro měření výkonu vodní elektrárny

Seznam použitých měřících přístrojů:

Výkonový analyzátor: ZES ZIMMER LMG 670; vč. 00431471

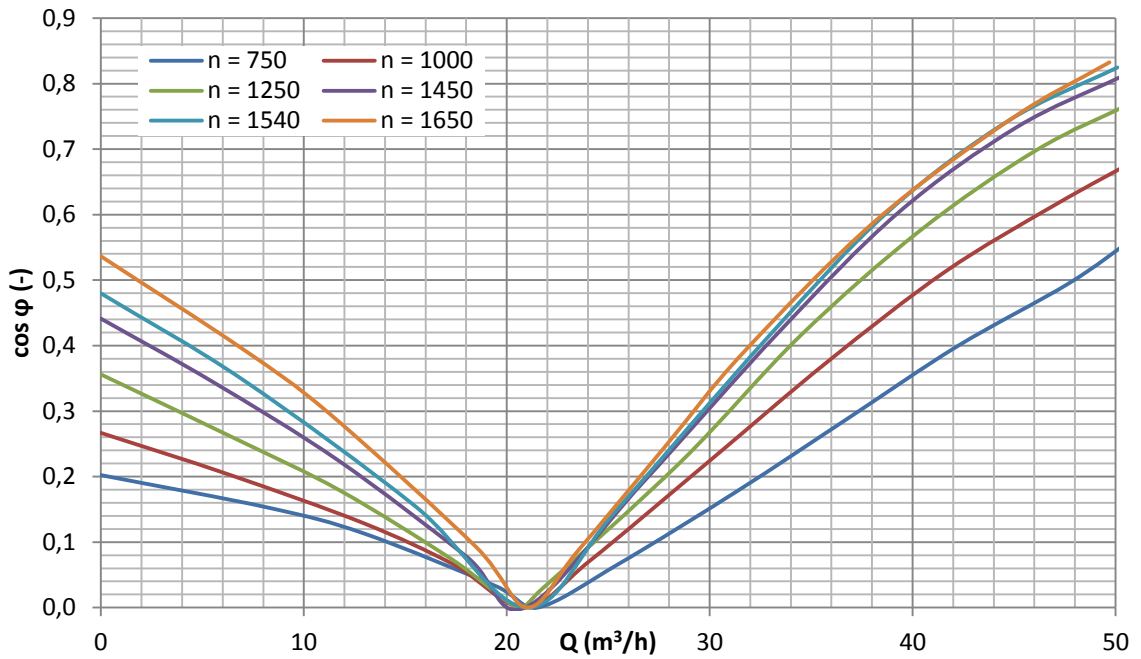
Průtokoměr: FLONET FN2014.1; vč. 44824/14

Tlakoměry: WIKA 7456259 (2 ks)



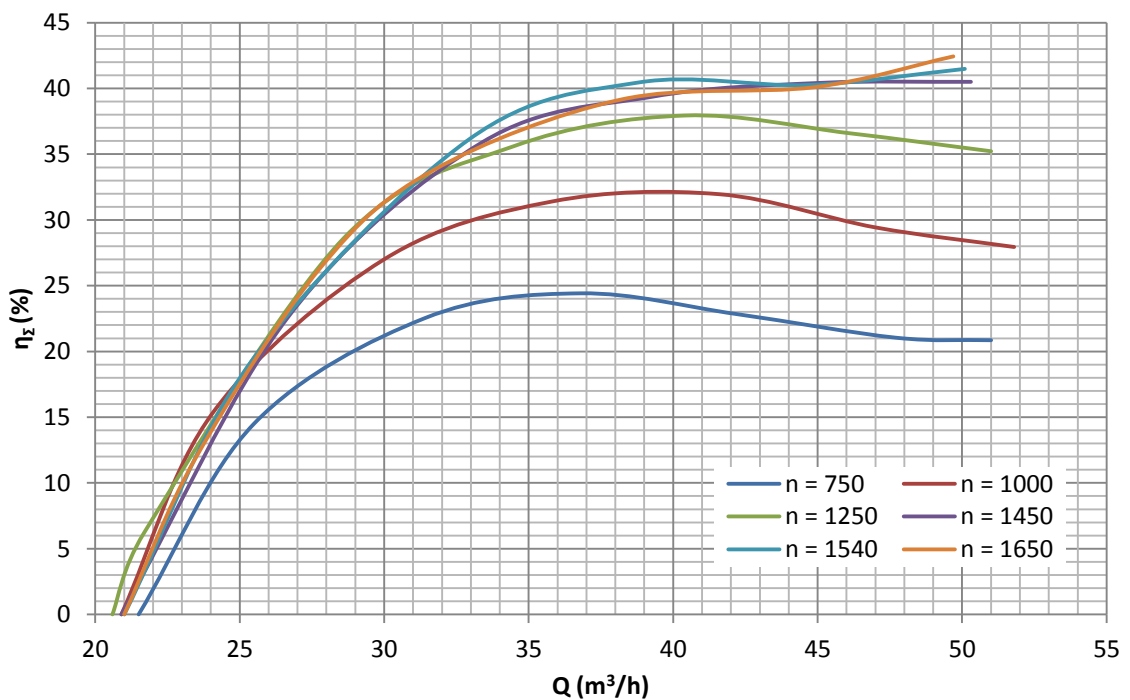
Obr. 4.10 – Výkon malé vodní elektrárny

Na obrázku 4.10 jsou znázorněny křivky výkonu celé vodní elektrárny, takže tento výkon je výstupní výkon elektrárny při započtení veškerých ztrát, jak již bylo popsáno v kapitole 1.3. Měření bylo provedeno ve stejných pracovních bodech (pro stejné parametry otáček generátoru apod.) jako v kapitole 4.1. Na ose průtoku se v bodě $Q = 21 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ všechny křivky protínají. V důsledku toho je jasné, že přechod z motorického režimu do generátorického režimu nastává při konstantním průtoku ($Q = 21 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) pro všechny pracovní body.



Obr. 4.11 – Účinek malé vodní elektrárny

Křivky účinku jsou při měření mezi elektrickou sítí a měničem podstatně lepší než mezi měničem a motorem. Při maximálním průtoku a otáčkách $n = 1650$ bylo dosaženo účinku $\cos\varphi = 0,83$. Z charakteristik je opět patrné, že se zvyšujícím průtokem roste účinek. V pracovních bodech s vyššími otáčkami generátoru je „strmost“ těchto charakteristik vyšší a vyšší jsou také maximální hodnoty. K získání těchto charakteristik byl měřen činný a zdánlivý výkon a účinek byl z těchto hodnot pak dopočítán.

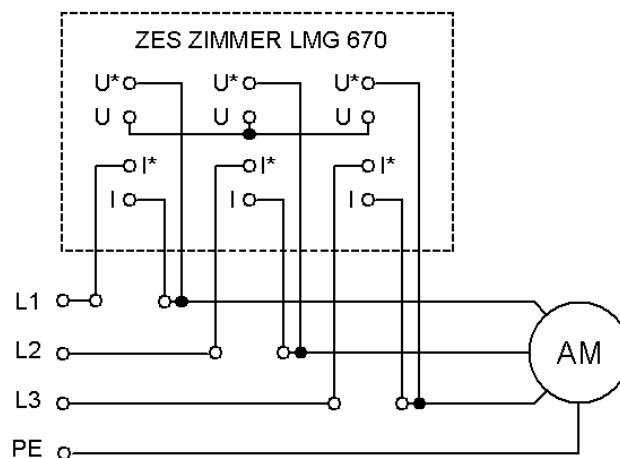


Obr. 4.12 – Celková účinnost malé vodní elektrárny

Z křivek účinnosti celé vodní elektrárny je patrné, že optimální provoz z hlediska účinnosti nastává v blízkosti jmenovitých otáček. Řízení v oblasti nižších otáček není výhodné v žádném uváděném případě. Shrnutím uvedených poznatků je tedy zřejmé, že ve všech ohledech (výstupní výkon, účinník a účinnost celé vodní elektrárny) je dobré provozovat elektrárnu v co možná nejvyšších otáčkách.

4.3. Analýza vlastností vodní elektrárny přímým připojením k síti

V kapitolách 4.1 a 4.2 zde byly uvedeny vlastnosti MVE s použitím polovodičového měniče. V tomto měření byl generátor připojený přímo na síť a veškeré měření v této kapitole bylo tedy provedeno za této konfigurace. Blokové schéma zapojení měření je zobrazeno na obrázku 4.13.



Obr. 4.13 – Blokové schéma zapojení měření s přímým připojením generátoru k síti

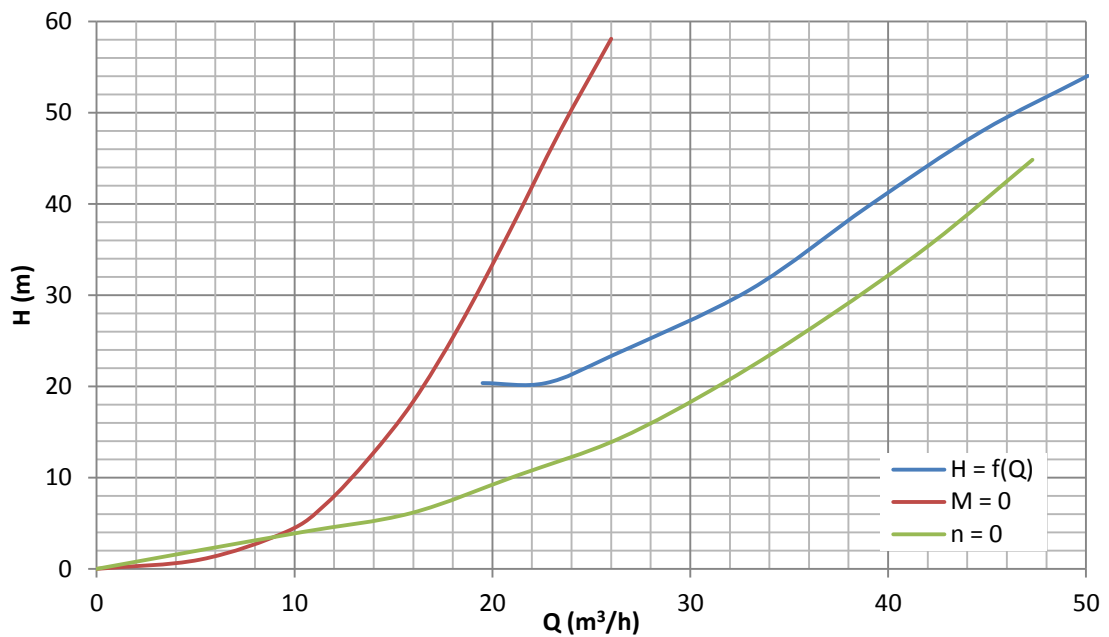
Seznam použitých měřicích přístrojů:

Výkonový analyzátor: ZES ZIMMER LMG 670; vč. 00431471

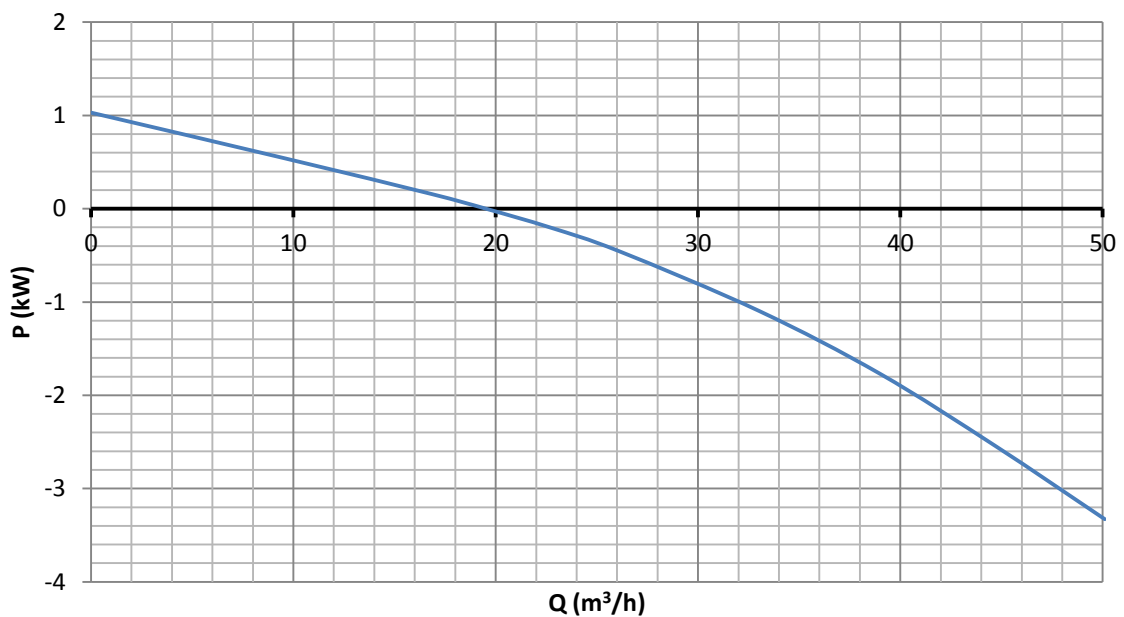
Průtokoměr: FLONET FN2014.1; vč. 44824/14

Tlakoměry: WIKA 7456259 (2 ks)

Měření bylo prováděno přímým připojením generátoru k síti (přes stykač). Postup měření spočíval v uvedení motoru do chodu v motorickém režimu s následným zvyšováním průtoku druhým motorem. Opět je potřeba počítat s tím, že v důsledku konfigurace měření zde nejsou zahrnuty ztráty v motoru, takže výkonová charakteristika turbíny z obr. 4.14 je charakteristika turbíny včetně ztrát generátoru. Tato výkonová charakteristika turbíny je v podstatě stejný typ charakteristiky jako na obrázku 4.2. Ovšem důležitý je rozdíl mezi těmito křivkami, který je dán způsobem zapojení resp. řízení. V případě připojení na měnič (obr. 4.2) byl generátor řízen vektorově, takže žádané otáčky byly přesně definované. V tomto případě (obr. 4.14) je rychlost otáčení vztažena k napájecí síti a velikosti skluzu. Křivky nulového momentu a nulových otáček definující pracovní oblast turbíny jsou stejné jako v kapitole 4.1. Výkonová charakteristika turbíny (modrá křivka) má počáteční bod při velikosti spádu asi 20 metrů. Při vektorovém řízení otáček (kapitola 4.1) pro nízké otáčky byl počáteční bod charakteristik při spádu cca 10 metrů. Z uvedeného plyne závěr, že způsob připojení elektrárny přímo k napájecí síti neumožňuje řízení v relativně velkém rozsahu spádu.

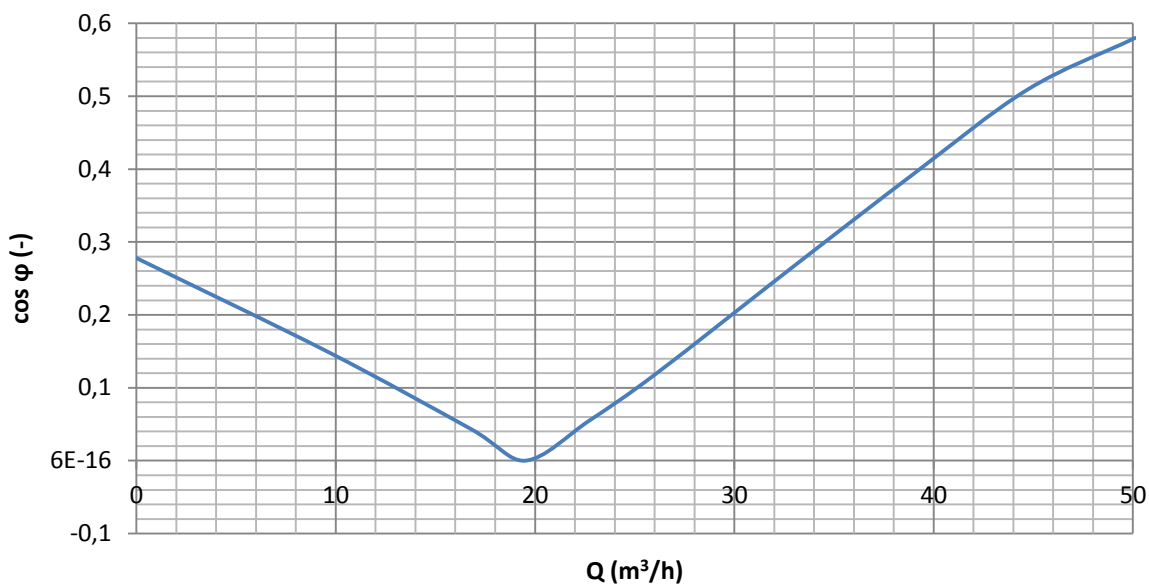


Obr. 4.14 – Výkonová charakteristika turbíny přímým připojením generátoru k napájecí síti

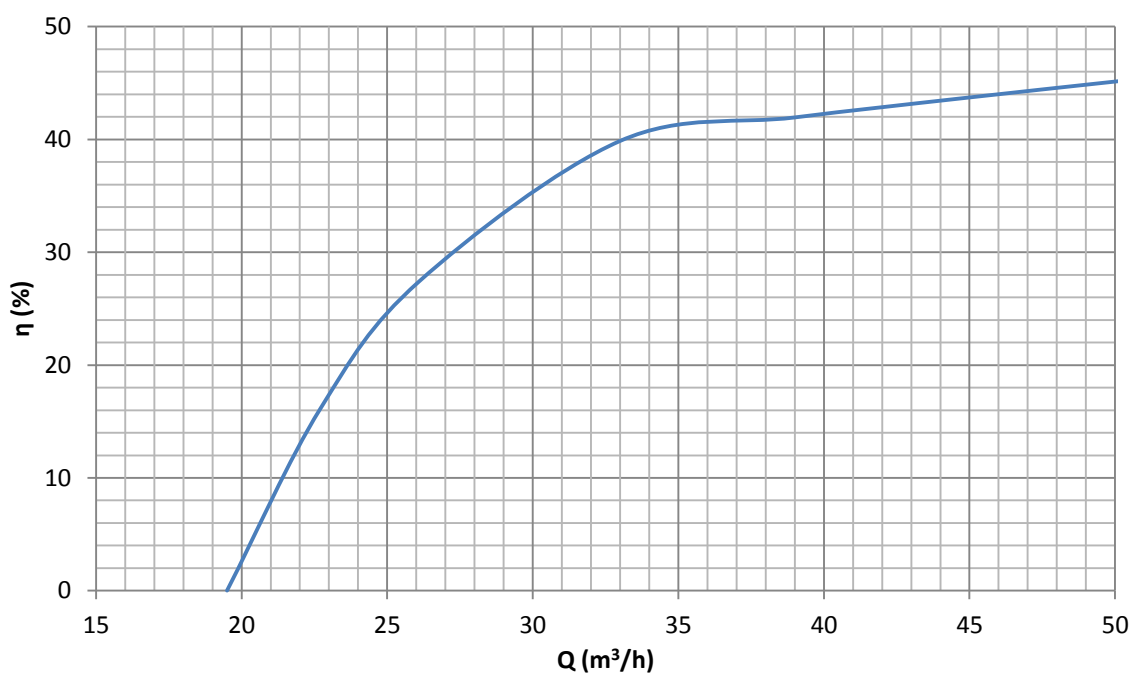


Obr. 4.15 – Výkonová charakteristika MVE přímým připojením generátoru k napájecí síti

Výkonová charakteristika MVE přímým připojením generátoru k napájecí síti je obdobná jako v předchozích případech. Maximální výkon byl naměřen o něco málo vyšší (vyšší o desítky Watt) než v případě vektorového řízení. Tato v podstatě zanedbatelná odchylka byla způsobena tím, že v této konfiguraci nebyl zapojený měnič kmitočtu, ve kterém vznikaly tyto nepatrné ztráty. Ovšem charakteristika, ve které rozdíly nejsou rozhodně zanedbatelné, je charakteristika účinníku na obrázku 4.16. Jak je z grafu patrné, tak účinník nedosáhl hodnoty ani 0,6, což je v praktických aplikacích nemyslitelné. V porovnání s účinníkem za měničem (z kapitoly 4.2) je tento pokles poměrně značný.



Obr. 4.16 – Účinek MVE přímým připojením generátoru k napájecí síti



Obr. 4.17 – Celková účinnost MVE přímým připojením generátoru k napájecí síti

Křivka účinnosti (obr. 4.17) byla určena výpočtem na základě poměru naměřeného výkonu na generátoru a vypočteného hydrodynamického výkonu kapaliny. Průběh je obdobný jako v předchozím případě (kapitola 4.2), kdy generátor byl řízen měničem.

Závěr

Malé vodní elektrárny v současnosti představují zajímavý obnovitelný zdroj elektrické energie. Důvodem, proč tomu tak je, jsou relativně nízké pořizovací náklady a poměrně snadná instalace. Z těchto důvodů bude důležité řídit tyto elektrárny co nejefektivněji, zkrátka tak, aby jejich období produkce bylo co nejdelší. K tomu je zapotřebí jednak správné dimenzování a projektování všech komponentů, ale také správné způsoby řízení pohonů tohoto zařízení.

Hlavním cílem této diplomové práce byla analýza provozních parametrů a měření vzájemných závislostí mechanických, hydrodynamických a elektrických veličin. Měření bylo prováděno jednak s připojením generátoru na nepřímý měnič kmitočtu, ale také připojením generátoru přímo k elektrické síti. Z celé této analýzy vyplývá, že optimálního řízení této elektrárny je dosahováno při velmi vysokých otáčkách v případě vektorového řízení generátoru. Toto řízení je výhodné z hlediska dodávaného výkonu do sítě, kdy je výkon v tomto pracovním bodě maximální. Další výhodná vlastnost při těchto otáčkách je účinník, který je opět pro tento pracovní bod nejvyšší a nejvyšší je také účinnost celé vodní elektrárny. To jsou tři hlavní výhody provozu elektrárny v těchto otáčkách. Menší nevýhoda je ta, že musí být dostatečně velký spád vodního díla. Problematika nekonstantního spádu v průběhu roku je zde uvedena v první kapitole této práce. Při tzv. nedostatku spádu bylo naměřeno, že provoz elektrárny by byl možný i při nižších otáčkách, což ovšem také má své nevýhody. Mezi nevýhody tohoto řešení je relativně nízký dodávaný výkon, nízká účinnost a nízký účinník. Poměrně zajímavé koncepční řešení, které zde bylo provedeno, se ukázalo přímé připojení generátoru do elektrické sítě. Při aplikaci tohoto zapojení se ukázalo, že křivky výkonu turbíny, výkonu elektrárny a účinnosti elektrárny jsou tvarově velmi podobné těm, které byly měřeny při připojení na měnič. Nevýhody tohoto řešení jsou jednak nízký účinník, ale také „nemožnost“ regulace žádaných otáček, z čehož vyplývá jistá náročnost na poměrně vysoký spád. Z uvedeného vyplývá, že při tzv. nedostatku spádu by elektrárna nebyla schopná provozu.

Jako perspektivní možnost řízení MVE se jeví vektorové řízení, které díky možnosti regulace otáček splňuje podmínky pro řízení MVE i v období částečného nedostatku spádu.

Seznam použité literatury a citací

- [1] Brandštetter, P.: *Elektrické regulované pohony III*. Ostrava, 2012. Učební texty pro kombinované a distanční studium na fakultě elektrotechniky a informatiky VŠB-TUO.
- [2] Dolníček, T.: *Modernizace laboratorních úloh s měničem frekvence Sinamics S120*. Ostrava, 2007. Diplomová práce na fakultě elektrotechniky a informatiky VŠB-TUO.
- [3] Dušička, P. – Gabriel, P. – Hodák, T. – Čihák, F. – Šulek P.: *Malé vodní elektrárny*. 1. vyd. Bratislava: Jaga group, v.o.s., 2003. ISBN 80-88905-45-1.
- [4] Gabriel, P. – Čihák, F. – Kalandra, P.: *Malé vodní elektrárny*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01812-1.
- [5] Holata, M.: *Malé vodní elektrárny: projektování a provoz*. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-0828-4.
- [6] Kocman, S.: *Asynchronní stroje*. Ostrava, 2002. Skriptum na fakultě elektrotechniky a informatiky VŠB-TUO.
- [7] Kubín, J.: *Řízení asynchronních motorů*. Studijní materiál na fakultě mechatroniky, informatiky a mezioborových studií TUL.
- [8] Nechleba, M.: *Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1962.
- [9] Šoukal, J.: *Řízení pohonu čerpadel*. Olomouc, 2014. Podkladová studie hydraulické části pro fakultu elektrotechniky a informatiky VŠB-TUO.
- [10] Vondrášek, F.: *Výkonová elektroniky: měniče s vlastní komutací a bez komutace*. Plzeň, 2003. ISBN 80-7082-980-X.
- [11] Skupina ČEZ. URL < www.cez.cz/ > [cit. 2015-02-02]
- [12] Siemens.
URL < <http://w3.siemens.com/mcms/mc-solutions/en/converters/low-voltage-converters/sinamics-s/motion-control-drives/pages/sinamics-s120.aspx> > [cit. 2015-02-30]