

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ  
ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Studie realizace zdroje energie využívající malou vodní  
turbínu**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2015/2016

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Luděk FEDURCA**  
Osobní číslo: **E14B0051K**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Studie realizace zdroje energie využívající malou vodní tur**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

Proveďte teoretickou studii možnosti realizace zdroje pro ostrovní síť napětí 230V. Práce obsahovat tyto body:

1. Zrealizujte stručný úvod do řešného stavu - tj. definice vzorového příkladu z hlediska dostupného zdroje energie (malá vodní turbína) a i z hlediska požadavků na vytvoření sítě. Popište alternativní možnosti využití zdrojů dostupných na trhu.
2. Popište možnosti realizace generátoru (tj. porovnání verzí s asynchronním generátorem a synchronním generátorem atd.).
3. Popište možnosti použití polovodičového měniče (zejména pro účely zálohování sítě v případě poruchy generátoru).
4. Uveďte modelový příklad z hlediska spotřebičů připojených k této síti.
5. Popište možnosti použití nadřazeného řízení pro celý tento systém (tj. např. pro řešení poruch, diagnostiku atd.).

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Pittermann, Ph.D.


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce řeší modelový příklad realizace zdroje elektrické energie pomocí malé vodní turbíny. Rozebrány jsou zde především požadavky na elektrická soustrojí. Je zmíněn vhodný vodní motor (turbína), mechanický převod, generátor a řízení soustrojí, včetně použití polovodičového měniče. Výsledkem je požadovaný příkon pro napájení zátěže. Práce je zaměřena na ostrovní provoz 230V/50Hz.

## **Klíčová slova**

Příkon vodní turbíny, účinnost, jmenovitý průtok, užitný spád, synchronní generátor, asynchronní generátor, ostrovní systém měnič.

**Abstrakt**

The presented thesis addresses the model example of realization of the power source energy using small water turbine. It analyses primarily requirements of the whole electric system. Suitable water engine (turbine), mechanical transmission, generator and control sets, including the use of a semiconductor inverter are described. Aim of the thesis is to design off-grid 230V 50Hz power source.

## **Klíčová slova**

Power consumption, water turbine, efficiency nominal flow, net momentum, synchronous, generator, inverter off-grid.

## Prohlášení

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 10.6.2016

Jméno příjmení



## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Pittermannovi, Ph.D., za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

Úvod.....	11
<b>1. Modelový příklad realizace dostupného zdroje energie.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Schéma vodního zdroje energie.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 Popis činnosti jednotlivých zařízení .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 Výpočet pro jednu variantu .....</b>	<b>17</b>
<b>1.4 Zdroje dostupné na trhu .....</b>	<b>19</b>
<b>2. Realizace zdroje s asynchronním a synchronním generátorem .....</b>	<b>21</b>
2.1 Asynchronní generátor .....	21
2.2 Synchronní generátor s budicí soupravou .....	23
2.3 Synchronní generátor s magnety .....	27
2.4 Dynamo jako zdroj .....	29
<b>3. Varianty použití polovodičového měniče.....</b>	<b>31</b>
3.1 Měnič zdroj jalového výkonu pro AM.....	31
3.2 Kaskádní zapojení AM .....	32
3.3 Klasická budicí souprava pro SM.....	33
3.4 Dynamo rozstřídat zdroj baterka + měnič na 230 V .....	33
<b>4. Spotřebiče zapojené k síti 230 V.....</b>	<b>33</b>
4.1 Požadovaný celkový příkon .....	33
4.2 Požadavek na výstupní průběhy U, f, .....	35
<b>5. Nadřazené řízení pro celý systém vodního zdroje .....</b>	<b>36</b>
5.1 Varianta zapojení rozvaděče MVE.....	36
5.2 Varianta PLC hláška o poruše .....	37
<b>6. Závěr.....</b>	<b>39</b>

## Úvod

Předmětem práce je studie možností realizace zdroje elektrické energie pomocí malé vodní turbíny. Energetické zdroje země jsou základním faktorem, který má vliv na rozvoj společnosti a hospodářství ve všech jeho sférách. Význam této myšlenky je v současné době velice aktuální a roste s nárůstem spotřeby, ale i s praktickým poznáním nerovnoměrnosti rozdělení zásob a vyčerpatelnosti jejích zdrojů. Evropské státy produkují energii z vlastních zdrojů pouze ze 47 % své spotřeby, z toho 28% představuje jaderná energie, 19% energie z uhlí a stejné procento pochází z obnovitelných zdrojů energie, 19% z plynu, a 12% z ropy.

Energetická politika EU má definovány tři jasné priority: konkurenceschopnost, udržitelnost a bezpečnost dodávek energií. Malá vodní elektrárna (MVE) využívá dosud méně exploatované zdroje vodní energie, které patří mezi nejpřirozenější obnovitelné zdroje a svým provozem nezatěžuje okolní prostředí emisemi. Rovněž malá turbína je zcela v souladu s naplňováním všech výše uvedených dílčích cílů. Z uvedeného je zřejmé, že o MVE můžeme s jistotou tvrdit, že princip využití vodní energie na kterém stroj pracuje, je udržitelný a šetrný k životnímu prostředí.

*Motto: Udržitelný rozvoj lidského společenství je nadčasové téma, které úzce souvisí s problematikou výroby a spotřeby energií a jejím dopadem na životní prostředí.[2]*

Energii mechanickou. Energie z vodních toků je v podmínkách České republiky sice doplňkovým zdrojem výroby elektrické energie, ale zato velice důležitá, neboť je využitelná zejména při špičkových odběrech. Z velké řady provozovaných vodních elektráren mě nejvíce inspiruje VE Dlouhé Stráně, která si v době mimo špičku čerpá vodu do zásoby. Zajisté pak je významná i celá Vltavská kaskáda Slapy, Orlík, Lipno, které kromě zásoby vody plní úlohu regulace toku v řečišti a tím i částečně chrání před povodněmi.

Od elektrického zařízení MVE se očekává spolehlivost, s provozem převážně bez obsluhy a dnes i možnost nadřazeného řízení, vysoká účinnost a samozřejmě soulad

s národními a mezinárodními normami. Provozní systémy elektrického zařízení se obecně dělí na autonomní (ostrovní), integrované (s distribuční sítí) a smíšené. MVE se nejčastěji svými výkony omezují na síť vlastního objektu.

Vodní elektrárny lze Vodní energie je zařazena v lidské historii k nejdéle využívané formě energie v přírodě. Vodní dílo jako zdroj elektrické energie je neoddelitelně spjato se stupněm vývoje civilizace. Zcela jistě je vodní energie relativně dostupným zdrojem, čistým a především obnovitelným. Voda je nositelem energie chemické, tepelné a mechanické. Mechanickou energii vod můžeme rozdělit na: mechanickou energii vodních srážek, mechanickou energii ledovců, mechanickou energii moří a mechanickou energii vodních toků. Z hlediska technického využití je pro nás nejdůležitější energie vodních toků. Přesněji pak forma její potenciální energie (polohová a tlaková) a dále kinetická (rychlostní). V dnešní době jsou již strojně technologická zařízení na poměrně vysoké úrovni aplikovaná na vodních elektrárnách. Nezbytnou součástí každého vodního díla je vodní motor (turbína) ve které dochází k přeměně energie vodního toku tj. hydraulické energie na energii elektrickou.

MVE můžeme třídit i podle různých hledisek, které se vzájemně prolínají. Například rozdělení podle instalovaného výkonu má význam pro specifikaci pojmů malé vodní elektrárny a malé vodní turbíny (MVT) a to v souladu s ČSN 75 0128 se dělí na: velké, střední a malé. Text studie MVE je rozdělen do pěti částí.

První se zabývá alternativními možnostmi řešení malého zdroje elektrické energie. Pokud tedy uvažujeme pouze vodní zdroj, je třeba připomenout i rozmezí uvažovaných výkonů a tedy i požadované mechanické energie a z toho vyplývající skutečnost, že si můžeme vybrat a tedy stanovit základní model takového zdroje elektrické energie. Nabízejí se následující možnosti konkrétních a dostupných zdrojů energie vodního toku tj. zdrojů, které budou v závěru práce porovnány a specifikovány charakteristickými hledisky jako jsou životnost, nároky na údržbu, pořizovací náklady, ekologie a dále denní, měsíční a roční vyrobený výkon. Aktuálně se práce zajímá o vodní zdroj cca 0,2 m<sup>3</sup>/s v katastru obce Přední Kopanina a druhý zdroj cca 1 m<sup>3</sup>/s v katastru obce Třebívlice.

Z hlediska zadané provozní sítě tato práce řeší ostrovní provoz 230 V. Důležitým řešením MVT je právě dodržení požadovaných otáček, neboť se jedná o pomaloběžné turbíny a dále možnosti použitého typu generátoru proudu s jeho specifickými vlastnostmi pro regulaci otáček. Proto se dále zabývá i současnými dostupnými komponenty zařízení MVT na trhu. Zdroje dostupné na trhu jsou především generátory asynchronní a synchronní, v našem případě se budou zvažovat i čtyřpólové přesněji tedy čtyři pólpáry, neboť budeme pracovat na nižších otáčkách tj. asi 750 až 1500 ot. /min., dále zvažujeme varianty oběžných kol a turbín. Jako další možné řešení se jeví varianta použití polovodičového měniče, který bude napájen například z usměrňovače.

Druhá část se zabývá vlastnostmi dnes již klasiky tj. synchronního a asynchronního generátoru, nebo přesněji dimenzování pohonu ovlivňuje rozhodující měrou jednak pořizovací cenu, ale i provozní vlastnosti pohonu. Chybné dimenzování může vést i k situaci, že nedosáhneme požadovaných vlastností pohonu. Musíme tedy pro pohon najít správný elektromotor, s tím i zdroje s příslušenstvím, řídicí části a zařízení pro styk s obsluhou.

Asynchronní generátory jsou levné a jednoduché, Ve své podstatě však nemohou pracovat jako autonomní, neboť pro svůj provoz potřebují jalovou složku energie (výkonu), kterou odeberou ze sítě, a tato tzv. jalovina musí být vhodným způsobem kompenzována kondenzátory. K síti se připojují až po naběhnutí na nad synchronní otáčky. Při poklesu otáček pod  $n_s$  začne stroj automaticky pracovat jako asynchronní motor.

Synchronní generátory jsou dražší a náročnější na údržbu. Výhodou těchto generátorů je především to, že mohou pracovat samostatně (autonomně) a jejich účinnost se dá regulovat. Jako zajímavé se jeví zvážit i možnost motoru s více póly a eventuálně s možností přepínání počtu pólů s ohledem na požadovaný počet otáček.

Ve třetí části jsou uvedeny možnosti využití polovodičového měniče a jeho specifické vlastnosti. Zásadní zlom ve využití napájecích zdrojů nastal právě s nástupem bipolárních tranzistorů s izolovaným hradlem IGBT a tím i využití polovodičových měničů. Podstatnou změnu zaznamenal způsob komutace, kde

dochází k odstranění zejména jiskření jako silně nežádoucího vlivu, výhodou je pak značné zrychlení přepínacího režimu (tichá komutace). Tyto polovodičové součástky integrují výhodné vlastnosti bipolárních a unipolárních tranzistorů, kde proudová a napěťová zatížitelnost je určena bipolární částí, řízení pak unipolární částí. Spínání bipolárního tranzistoru je prováděno nevýkonovým napěťovým signálem.

Elektromagnetická kompatibilita (EMC) je obor, který se dle normy zabývá vlivy polovodičových měničů na síť i na motory v rámci moderního řízení elektrických pohonů. V této souvislosti je zapotřebí zmínit skutečnost, že polovodičové měniče jsou bohužel hlavními „znečišťovateli“ elektrické sítě.

Při volbě pohonu je třeba přihlížet na dvě základní hlediska to na technické a ekonomické. Pro technické hledisko je rozhodující druh motoru (generátoru), jeho požadavky na řízení, energetické požadavky (napětí, spouštění...), pracovní prostředí (vlhkost, výbušnost, hluk, teplota, vibrace...), konstrukční požadavky (celkové rozměry zařízení vzhledem ke konstrukčnímu a stavebnímu uspořádání, motor s převodovkou, chlazení atd.). Ekonomické hledisko pak zvažuje produktivitu poháněného zařízení, celkové pořizovací náklady, včetně servisu a záruky na celé zařízení. Řešena je rovněž možnost výpadku a s tím související náhradní zdroj elektrické energie.

## **1. Modelový příklad realizace dostupného zdroje energie**

### **1.1 Schéma vodního zdroje energie**

Vlastní turbína vyžaduje vhodné projekční začlenění do MVE. Vodní dílo, které využívá vodní energii, musí mít v dané lokalitě především dostatečnou měrnou energii pro turbínu (dříve tzv. užitný spád). Výkon vodního díla pak závisí na součinu spádu a průtoku. Obvykle se provádí uměle vytvořený spád a průtok vhodným vzdouvacím zařízením jako jsou jezy a přehradý. Základními parametry, tedy přesněji vstupy je v našem případě průtok  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  a dále kolmý spád 2 metry. Následuje proto jejich přesnější definice.

**Spád** je výškový rozdíl hladin vody v nádrži, nebo zdrži, nad vodní elektrárnou a v odpadu pod vodní elektrárnou. Udává se v metrech. [7]

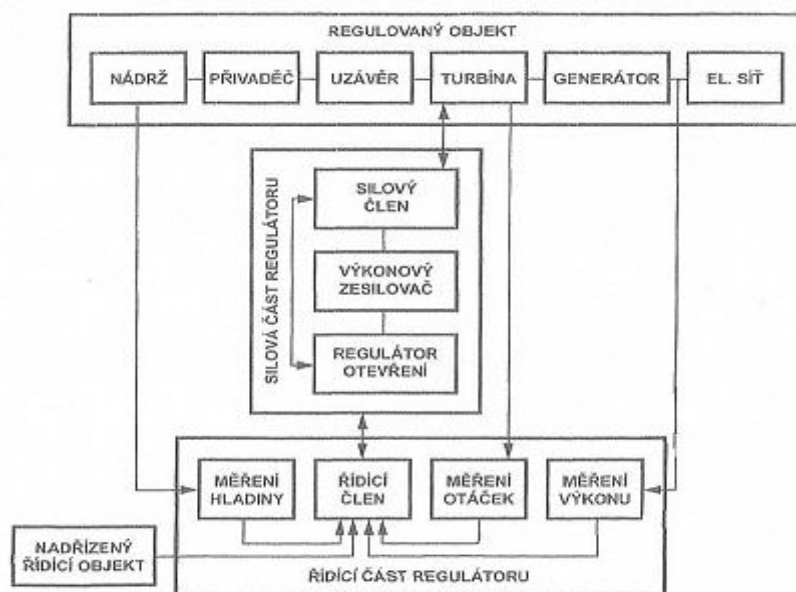
**Průtok**  $Q$  ( $m^3/s$ ) je množství vody protékající určitým profilem vodního toku za jednotku času.

**Kavitací**, která se vyskytuje jen u kapalin, je nazýván vznik parních bublin, jejichž růst i rychlá kondenzace je doprovázená tlakovým rázem. Vytváření dutin počíná obecně vždy na stěně lopatky a skříně. [6]

## 1.2 Popis činnosti jednotlivých zařízení

Obecné schéma elektrárny se skládá z následujících částí:

Jímací objekt s přepadem, turbína (vodní motor), převodové ústrojí, generátor s regulací, který obvykle bývá zakončen rozvaděčem a poslední je napájené zařízení (zátěž). Podle toho co požadujeme napájet, si vytvoříme požadavky na konstrukci napájecího zdroje.



Obr. 1.1 Blokové schéma řízení a regulace MVE převzato[4]

Z hlediska výpočtů jednotlivých částí MVE nás budou zajímat například následující části celého soustrojí, které můžeme rozdělit na vodní motor, převodové části, pokud není generátor a vodní motor na jedné společné hřídeli, a konečně generátor s jeho regulací.

Těleso turbíny

Zavzdušňovací ventil

Odpadní kanál

Regulační klapka

Pružiny nouzového uzavření klapky

Vtokový kus

Podrobnější popis vodního motoru včetně výpočtů průtoku za jednotku času je mimo rámec této práce. Zajímá nás především řešení elektrické části celého soustrojí, které jsou popsány v následujících kapitolách.

Generátor

Generátor je hlavní součástí MVE a proto jsou dále popsány varianty využití točivých strojů dodávajících elektrickou energii na základě přeměny energie mechanické.

Řízení a regulace

Pokud chceme a to musíme mít přehled o vyrobené elektrické energii musíme formulovat požadavky na výstupní veličiny s uvažováním jednak účinnosti jednotlivých částí MVE a tím tedy počítat i ztráty jednotlivých zařízení a ve finále nám vyjde výstupní výkon který bude k dispozici pro naše napájená zařízení a spotřebiče (zátěž).



### 1.3 Výpočet pro jednu variantu

Základní a související výpočtové rovnice:

V daném průtokovém průřezu je celková měrná energie kapaliny  $E_c$  určena součtem tlakové měrné energie  $E_p$ , polohové měrné energie  $E_h$  a kinetické měrné energie  $E_k$ . Nositelkou hydraulické energie pracovní kapalina, kterou je u vodních turbín voda. Hydraulická energie má v podstatě dvě modifikace:

1) potenciální energie

- tlaková

polohová

2) kinetická energie (rychlostní, pohybová).

Při proudění kapaliny existují ve všech bodech proudu obě formy současně a jsou vzájemně vázány.

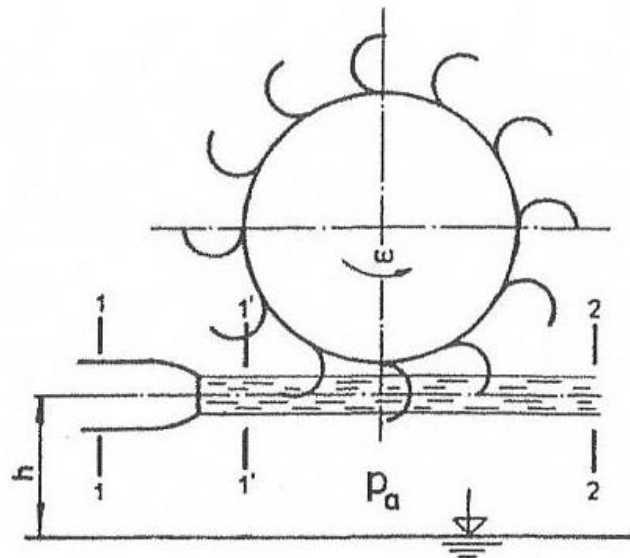
$$E_c = E_p + E_h + E_k \quad (1)$$

Celková měrná energie kapaliny  $E_1$  na vstupu do turbíny v průřezu 1-1 je určena vztahem:

$$E_1 = p_1 \cdot \rho^{-1} + g \cdot h + 0,5 \cdot c_1^2 \quad (2)$$

$$E_v = p_v \cdot \rho^{-1} + g \cdot h_v + 0,5 \cdot c_v^2 \quad (3)$$

$$E_2 = p_2 \cdot \rho^{-1} + g \cdot h_2 + 0,5 \cdot c_2^2 \quad (4)$$



Obr. 1.2 Určení měrné energie rovnotlaké turbíny, převzato.[7]

Pro časově ustálené proudění ideální, tj. nestlačitelné, nevazké kapaliny mezi body 1 a 2 platí pro celkové měrné energie (index  $c$  již neuvádějme) ze zákona zachování energie (podle Bernoulliho) k libovolné vztážené rovině 0-0:

$$E_1 = E_2 = \text{konstant} \quad (5)$$

$$p_1 \cdot \rho^{-1} + g \cdot h_1 + 0,5 \cdot c_1^2 = p_2 \cdot \rho^{-1} + g \cdot h_2 + 0,5 \cdot c_2^2 \quad (J \cdot kg^{-1}). \quad (6)$$

Je-li do potrubí osazen hydraulický stroj, pracující jako motor (turbína), jak je schematicky znázorněno na obr. 2. 7. b) je principiální vyjádření měrných energií kapaliny v bodech 1 a 2 stejné jako u případu bez motoru, avšak neplatí  $E_1 = E_2$ , ale  $E_1 > E_2$ . Příčinou nerovnosti je přeměna hydraulické energie v mechanickou.



Obr. 1.3 Lokalita s vodním zdrojem

## 2) Výkon turbíny 2kW

Elektrický výkon MVE při maximálním průtoku turbínou je dán vstahem :

$$P_{\max} = Q_{\max} \cdot g \cdot H \cdot \eta_{\text{celkové}} = 25.9,81 \cdot 2.0 \cdot 7 =$$

Výstupní parametry a požadavky na ostrovní provoz sítě 230 V

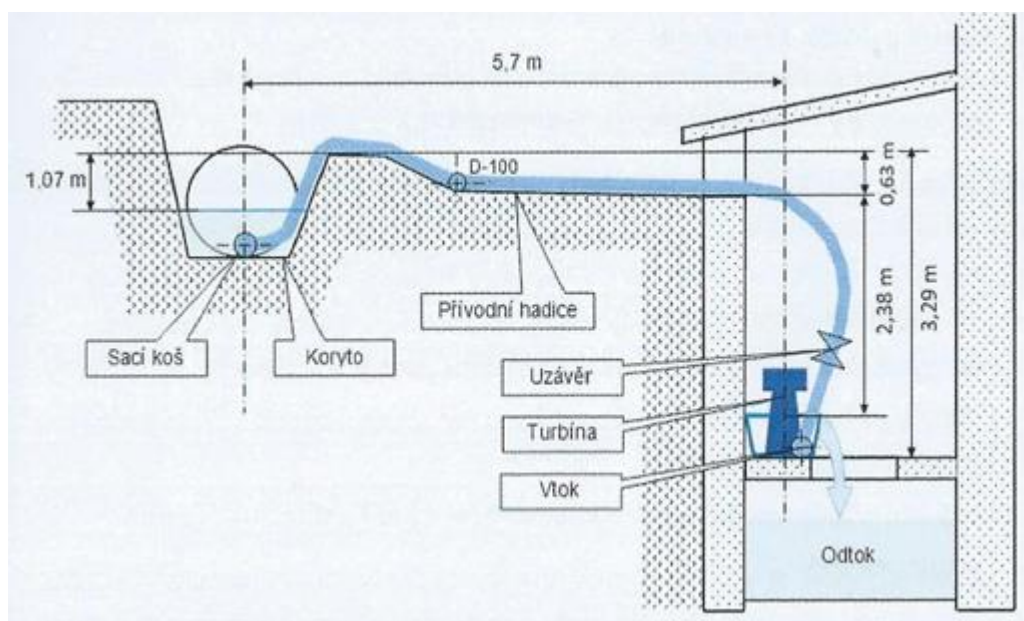
## 1.4 Zdroje dostupné na trhu

ČKD Turbo Technics, s.r.o. vyrábí několik typů a řadu rozměrů standardních malých vodních turbín od 10 kW do 5000 kW pro spády od 1,5 do 200 m.

Firma HYDROHROM, s. r. o. vyrábí například řadu vodních turbín typu Kaplan, Francis a Pelton, a realizuje kompletní dodávky technologického zařízení pro MVE.

Turbíny HYDROHROM jsou díky své plné konkurenceschopnosti úspěšně exportovány do mnoha zemí. Jejich výroby pokrývají velmi široké spektrum spádů i

průtoků (od 1,5 - 2 m až po 500 m). Firma HYDROHROM se specializuje na MVE do maximálního výkonu 10 MW.



Obr. 1.4 Schéma instalace DVE 120n, převzato[2]

Předmětem zkoumání trhu je synchronní motor vlastně generátor v rozmezí instalovaného příkonu od 600 W do 5 KW. Takovým požadavkům by mohl vyhovovat generátor z výrobní řady AL100M-8, 720 n/min. na následujícím obrázku. Výkon by musel být minimálně 2 kW.



Typová řada: AL100M-8  
Velikost (osová výška): 100  
Výkon: 0.75 kW  
Otáčky: 720 min-1  
Počet pólů: Osmipólový  
Napětí: 400 / 690V 50Hz  
Krytí: IP 55  
Pro teplotu okolí: od -20°C do + 40°C  
Třída izolace: F  
Pro nadmořskou výšku: do 1000 m  
Pro trvalé zatížení: S1

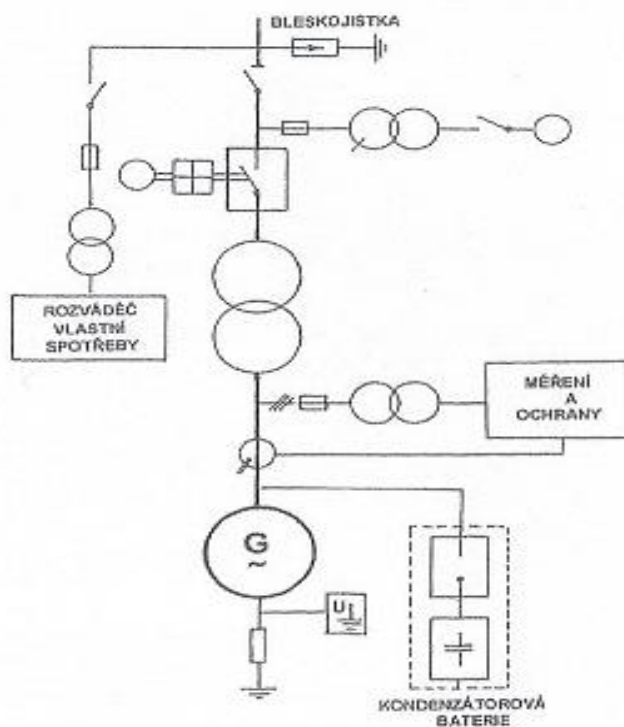
Obr. 1.5 Elektromotor 0,75kW AL100M-8, 720 ot.min-1, převzato[2]

## 2. Realizace zdroje s asynchronním a synchronním generátorem

### 2.1 Asynchronní generátor

Od elektrického stroje se očekává především velká spolehlivost a provoz převážně bez obsluhy. Dalším důležitým předpokladem je vysoká účinnost. Konstrukční provedení pak musí odpovídat souvisejícím předpisům. Rozlišujeme provoz autonomní, integrovaný s distribuční sítí a smíšený.

Asynchronní generátory jsou snadno dostupné, levné a pracují spolehlivě a mají minimální nároky na údržbu. Jejich nevýhodou je především nutná jalová složka energie pro magnetizaci při rozbíhání. Tuto takzvanou jalovinu odebírají ze sítě. S tím souvisí i nutná kompenzace účinníku například pomocí kondenzátorů a to buď individuální pro konkrétní stroj, skupinová pro více strojů, nebo pak v rámci centrální kompenzace. Na síť se připojují až při naběhnutí na synchronní otáčky generátoru



Obr:2.1 Jednopolové schéma synchronního generátoru převzato (4)

. Z tohoto důvodu se nehodí pro autonomní provoz. Rovněž i frekvence je problematictější jak u synchronního motoru, neboť AM pracuje se skluzem. Při poklesu otáček začne AG pracovat jako motor a energii ze sítě odebírá. To mu umožňuje držet se v blízkosti synchronních otáček. Nevýhodou AM je zejména stav, při přechodových jevech v síti, kdy dochází k přepětí a překompenzování jalovou složkou energie.

Asynchronní generátory malého výkonu jsou zpravidla vyráběny jako motory, u nichž je nutno upravit některé jeho charakteristické parametry, zejména otáčky, výkon, účinník, proud a účinnost stroje. Motory s vyššími synchronními otáčkami ( $n_{\max} = 3\,000 \text{ min}^{-1}$ ) jsou menší, levnější a lépe se chladí vlastním ventilátorem. Jejich velkou výhodou je možnost určitého přetížení, využitelného při časově omezeném zvětšení průtoku díla. Mezi turbínu a generátor však musí být vložen převod, v němž se část energie získaná turbínou disipuje. Při výpadku sítě by mohl odlehčený vysokootáčkový generátor dosáhnout nebezpečně vysokých otáček s nebezpečím destrukce. Proto se tyto vysokootáčkové motory nepoužívají. Kompromisním řešením je pro malé vodní elektrárny nejběžněji používaný typ generátoru čtyřpólový nebo se synchronními otáčkami  $n = (750 \text{ až } 1500) \text{ min}^{-1}$ . Je dostupnější a jeho cena přiměřená, chlazení dostatečně účinné a krátkodobě snese i průběžné otáčky odlehčené turbíny. Výkon generátoru je nutno volit ekonomicky s ohledem na jeho využitelnost v průběhu roku. Jako každý točivý stroj má optimální účinnost, jen když pracuje s jmenovitými parametry. Je-li generátor zatěžován pouze částečně, bude i jeho účinnost výrazně nižší oproti optimu. Navíc bude zatěžován teplem z nadměrných jalových proudů a magnetizačními ztrátami. Asynchronní generátory určené pro malé vodní elektrárny jsou zpravidla robustnější konstrukce, jejich rotor je uložen v ložiskách konstruovaných pro požadované zvýšení otáček při průběhu turbíny, často i s možností zachycení axiálního tahu rotoru turbíny. Jejich účinnost dosahuje obvykle hodnot  $\eta = (0,80 \text{ až } 0,85)$ . [4]

Při použití asynchronních generátorů se zjednodušuje ostatní elektrotechnické zařízení a tím i jeho hmotnost a cena, přičemž je dosahováno účinnosti o něco vyšší nežli při použití synchronních generátorů. Nevýhodou je složitější problematika samotného chodu, nižší účinnost při částečném výkonovém zatížení a odběr jalového proudu.[4]

Skuz asynchronního generátoru je to vlastně počet otáček pod otáčkami synchronními, který říká, o kolik musíme AM přetočit, abychom se dostali na synchronní otáčky.

Jako asynchronní generátor lze i bez úprav použít téměř každý asynchronní elektromotor s kotvou nakrátko. Elektromotor je-li použit jako asynchronní generátor, pracuje s otáčkami vyššími, než je hodnota synchronních otáček. Musí mít tedy vyšší otáčky, než je uvedeno na jeho štítku. O kolik je štítková hodnota otáček motoru nižší než příslušné synchronní otáčky, odpovídající počtu pólů a frekvenci v síti, o tolik bude potřeba motor přetočit, má-li fungovat jako generátor a dodávat jmenovitý výkon. Hodnoty přetáčení asynchronního generátoru je možné použít dle následující tab. 1. [4]

Otáčky motoru	[min <sup>-1</sup> ]	690 – 740	910 – 990	1 350 – 1490
Počet mag. pólů	[ks]	8	6	4
Synchronní otáčky	[min <sup>-1</sup> ]	750	1 000	1 500
Otáčky generátoru	[min <sup>-1</sup> ]	810 – 760	1 090 – 1 010	1 550 – 1 510

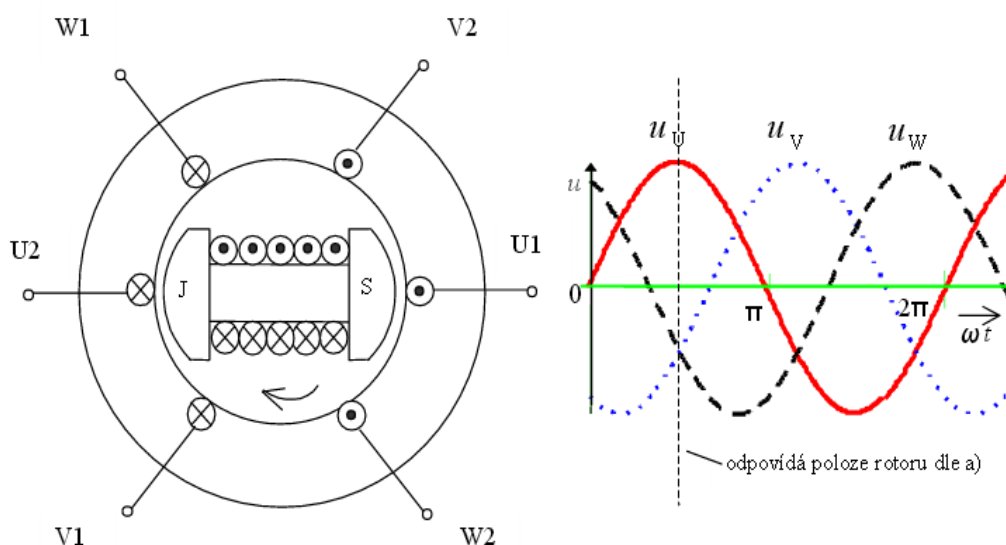
Tab. 1 Otáčky motoru a generátoru v závislosti na počtu pólů převzato.[4]

## 2.2 Synchronní generátor s budící soupravou

Princip trojfázového synchronního alternátoru plyne z obr. 7.1. Statorové vinutí tvoří tři fázové cívky, vzájemně prostorově natočené o 120°. Budící vinutí je na rotoru a napájí se stejnosměrným proudem ze stejnosměrné sítě, nebo z vlastního budiče, neseného na společné hřídeli přes sběrací kroužky. Při konstantní rychlosti otáčení nabuzeného rotoru se indukují v cívkách statoru střídavá napětí, úměrná okamžité hodnotě magnetické indukce. Statorové vinutí je tedy kotvou. Kmitočet indukovaných napětí je úměrný rychlosti rotoru a počtu pólpárů.

Synchronní generátory se uplatňují zejména u jednotek velkých výkonů, ale mají své využití i u malých vodních elektráren.

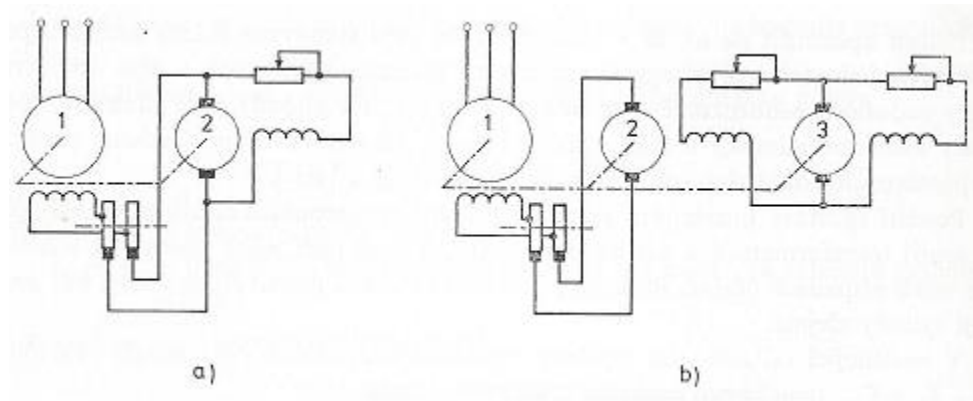




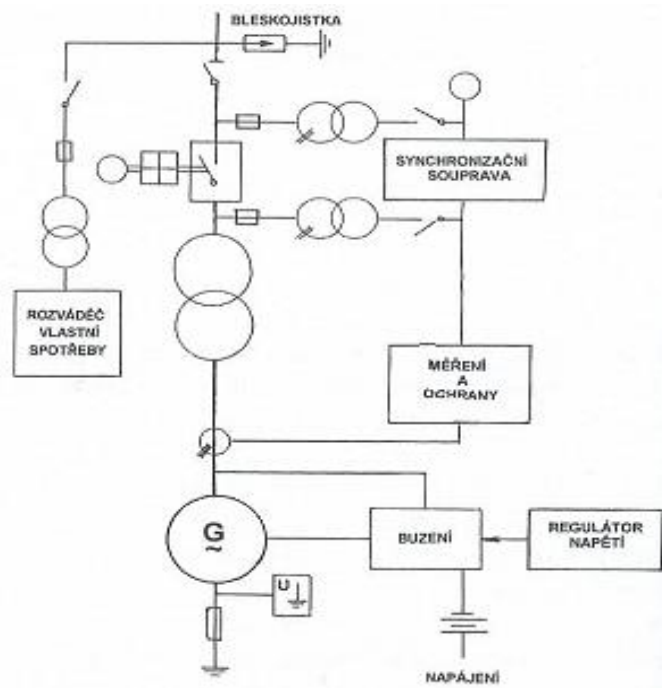
Obr.2.1 Princip trojfázového synchronního generátoru, převzato [13]

Stator synchronního generátoru má v drážkách statoru uložené trojfázové vinutí. Rotor je opatřen budícím vinutím, napájeným přes sběrací kroužky a kartáče stejnosměrným proudem. Používají se rotory s vyniklými póly, ale pro malé vodní elektrárny zpravidla hladké rotory pro řízení výkonu. Otáčením nabuzeného rotoru je v cívkách statoru indukováno střídavé napětí sinusového průběhu s časovým posunem v jednotlivých cívkách. Po připojení generátoru k síti, tedy jeho zatížením, prochází vinutím statoru střídavý třífázový proud a vzniká točivé magnetické pole. Jeho rychlost otáčení je shodná s rychlostí otáčení rotoru a jeho magnetické pole, tedy bez skluzu, neboť ten je nulový. Řízení umožňuje regulátor předsazený budiči rotoru. Magnetické pole rotoru může být vyvoláno indukcí, permanentními magnety nebo ve vinutí rotoru napájeného přímým proudem ze sběracích kroužků a kartáčků. Jednopolové zapojení synchronního generátoru je uvedeno na obr. 2.3. a) budič s paralelním buzením na společné hřídeli, b) budič s buzením z pomocného budiče, oba na společné hřídeli s hlavním strojem, 1- synchronní stroj, 2 – hlavní budič, 3 – pomocný budič, převzato[11]





Obr. 2.2 Buzení synchronního stroje z rotačního budiče;



Obr.2.3 Jednopolové zapojení synchronního generátoru, převzato [4]

SG je poněkud výhodnější než asynchronní generátor. V našem případě se jedná o hydroalternátor a tedy poháněný vodní turbínou. V tomto případě budou synchronní otáčky řízeny škrcením přívodu proudu vody. Hydroalternátory jsou zpravidla vícepólové stroje a tedy pomaloběžné.

Mezi nejužívanější budicí soustavy patří:

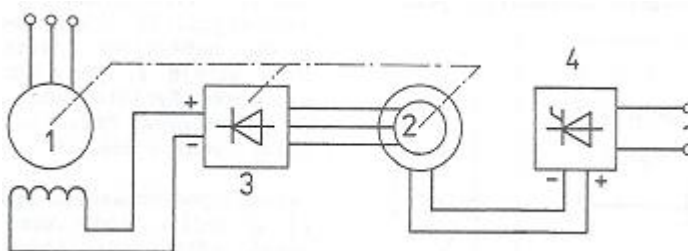
a) Budicí soustava s budičem na hřídeli- rotační budič je spojen se synchronním motorem hřídelí, reguluje se pomocí předřadného odporu v buzení dynamu.

b) Budicí souprava s diodovým usměřovačem. Potřebný transformátor s odbočkami se dnes již nepoužívá.

c) Budicí souprava s tyristorovým usměřovačem. Místo diod a transformátoru je použit řízený usměřovač, dnes vybavený regulátorem budicího proudu motoru.

d) Střídavý budič a rotující usměřovač viz. obr. 2.4. Jedná se o moderní způsob buzení, kdy ve speciálním budiči se do rotoru indukují střídavá napětí.

Synchronní stroj 1 pohání střídavý budič 2, který má své budicí vinutí na statoru a střídavé vinutí na rotoru. Střídavý budicí proud se usměřňuje v neřízeném usměřovači 3, který je umístěn na hřídeli střídavého budiče a otáčí se s ním. Stejnoseměrný budicí proud z usměřovače se pak přivádí přímo k budicímu vinutí synchronního stroje, sběrací kroužky a kartáče odpadají. Budicí proud synchronního stroje se řídí změnou budicího proudu střídavého budiče v usměřovači 4



Obr. 2.4 Buzení synchronního alternátoru nesenými ventily, převzato [11]

1- Synchronní alternátor, 3- rotující neřízený usměřovač

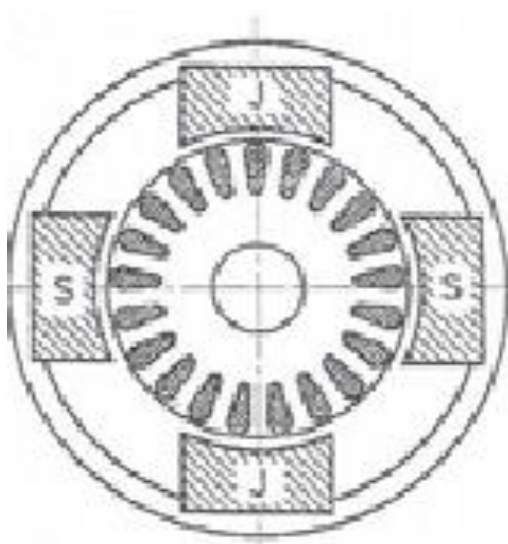
2- Střídavý budič

4- budicí usměřovač střídavého budiče

e) Rotační transformátor a diodový usměřovač – budicí výkon se přenáší transformací mezi stojícím primárním vinutím a rotujícím sekundárním vinutím. [3]

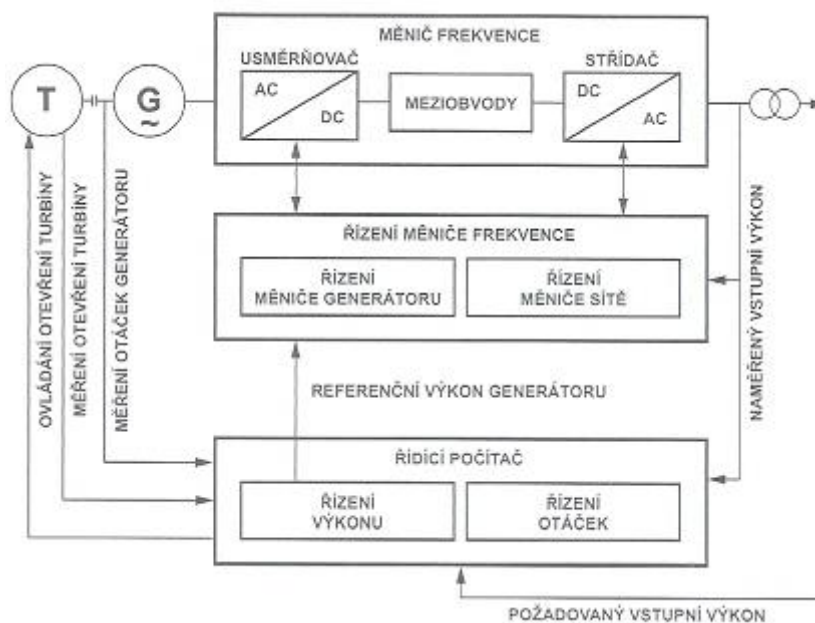
### 2.3 Synchronní generátor s magnety

Generátory s permanentními magnety jsou většinou motory menších výkonů, používané jako servomotory, u kterých není důležitá účinnost, ale poloha rotoru. Při použití permanentních magnetů místo budícího vinutí nepotřebujeme budící proud. Tyto motory mají poměrně široké upotřebení právě pro své specifické vlastnosti, mezi které patří velký poměr moment motoru k hmotnosti motoru, velký poměr výkon k hmotnosti motoru, velká momentová přetížitelnost, poměrně vysoká účinnost a možnost řízení momentu i při malém zatížení. Synchronní motory s permanentními magnety se pro různé jmenovité otáčky neliší počtem pólů a téměř stejného momentu, ale polohou navrženého bodu odbuzení, tj. kmitočtu při kterém dosahují pracovní jmenovité napětí. Mezi výhody patří konstantní magnetický tok, který budí permanentní magnety zabudované v rotoru stroje. Rovněž účinník je lepší jak u asynchronního motoru. [4]



Obr. 2.5. Schéma stroje s permanentními magnety na statoru [8]

## 2.4 Synchronní generátor s měničem



Obr. 2.6 Blokové schéma turbosoustrojí s měničem frekvence, převzato [4]

V řadě aplikací se u malých vodních elektráren doplňují generátory měničem frekvence, měnícím síťové napětí konstantní frekvence a amplitudy na napětí variabilní frekvence a amplitudy, čímž je umožněna plynulá regulace otáček elektrických točivých strojů. Dle blokového schématu na obr. 2.6 nepřímý měnič frekvence nejprve převáděný proud usměrní a z tohoto usměrněného zdroje je schopen vyrábět střídavý proud v širokém rozmezí frekvencí. Nejčastěji jsou to měniče frekvence s napětovým meziobvodem, s elektrolytickým kondenzátorem a brzdovým odporem, používaným k brzdění. Používá se vektorové řízení, které umožňuje nastavit nejen velikost magnetického toku, ale i jeho směr a tím i docílení nadsynchronních otáček. [4]

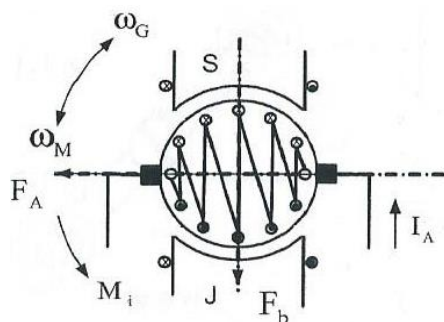
Kvalitní měnič frekvence vybavený komunikační elektronikou umožňuje optimalizovat provoz turbosoustrojí plynulou změnou otáček (včetně rozběhu a doběhu) a přizpůsobit otáčky aktuálním provozním potřebám. Řídicí systém

turbosoustrojí tak může udržovat provozní otáčky dle požadavku provozu s maximální účinností turbíny nebo dle požadavku udržování určité konstantní hodnoty průtoku. Odlehčuje síť snížením proudových rázů včetně záběrového proudu a přináší úspory energie při regulaci a snižuje provozní náklady zvýšením životnosti a úsporami na údržbě. [4]

## 2.5 Dynamo jako zdroj

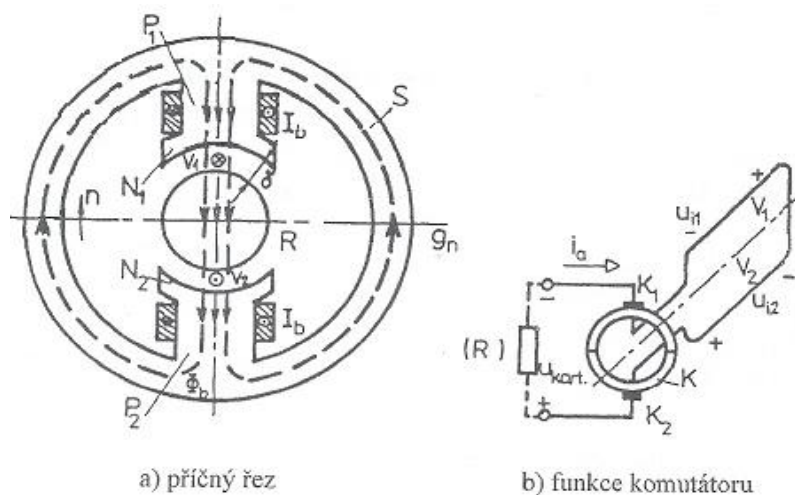
Jako zdroj stejnosměrného napětí lze použít i dynamo. V tomto případě se běžně využívají stejnosměrné motory s permanentními magnety a to pro výkony maximálně do řádově kW. Tyto magnety jsou umístěny na statoru. Komutátor je u těchto strojů základním prvkem, který plní funkci střídače u motorů a funkci usměrňovače u dynam zabezpečuje, aby úhel mezi magnetickým polem statoru a rotorem byl  $\pi/2$ . To má za následek, že magnetický moment je maximální.

$$M_i = k|F_a + F_b| = kF_a F_b \sin \beta = kF_a F_b \quad (7)$$



Obr.2.7 Orientace polí statoru a rotoru stejnosměrného stroje [9]

S rozvojem polovodičové techniky tj. řízenými usměrňovači došlo k jistému omezení používání stejnosměrných zdrojů elektrické energie. Jejich hlavní využití je jako motory. Využívá se především jejich některých výhodných vlastností. Stejnosměrné motory mají velmi dobré regulační vlastnosti a řídicí obvody se dají poměrně snadno vytvořit. Reálné výkony strojů se pohybují v rozmezí hodnot  $10^{-3}$  až do  $10^6$  W. Nejjednodušší uspořádání stejnosměrného stroje je naznačeno na obr 4.1a. Stator má tvar dutého válce a v něm jsou uloženy póly  $P_1$  a  $P_2$  zakončené pólovými nástavci  $N_1$  a  $N_2$ . Budící vinutí je z feromagnetického materiálu, napájené stejnosměrným budícím proudem  $I_b$ , vytváří magnetický tok  $\Phi_b$ . Rotor  $R$  je složen z plechů pro elektrotechniku vzájemně izolovaných a opatřen vinutím, které sestává v nejjednodušším případě ze dvou vodičů  $V_1$  a  $V_2$ , spojených do jednoho závitu. Rotorové vinutí se nazývá kotva. Je to vinutí, ve kterém se indukuje napětí.



Obr. 2.7 Princip stejnosměrného stroje [10]

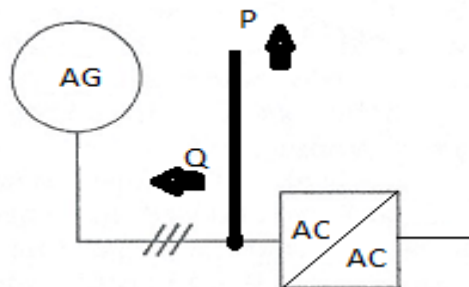
Vzduchová mezera  $\delta$  mezi státorem a rotorem se považuje za konstantní, takže pod pólovými nástavci  $N_1$  a  $N_2$  vzniká homogenní magnetické pole.

### 3. Varianty použití polovodičového měniče

#### 3.1 Měnič zdroj jalového výkonu pro AM

Měnič jako zdroj jaloviny se dá použít pro zapojení pro celou část zapojení dle obrázku 2.6 [5]

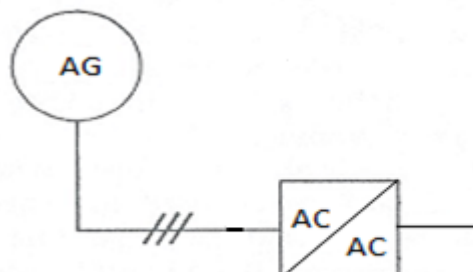
- Varianta měnič jako zdroj jalového výkonu pro asynchronní generátor.
- AG a střídač v režimu pulsního usměrňovače, který je schopen produkovat jalový výkon.
- AG v provedení s kompenzačním kondenzátorem, aby mohl pracovat s diodovým usměrňovačem. články.



Obr. 3.1 Použití měniče pro výrobu jalového výkonu pro ASM

Vlastní provedení zapojení závisí na provedení generátoru, tj. zda se jedná asynchronní, nebo synchronní generátor.

### 3.2 Kaskádní zapojení AM



Obr. 3.1 Princip asynchronní kaskády

U zapojení se využívá i režim napěťový střídač v režimu pulsního usměrňovače.

Asynchronní generátor je v praxi nejrozšířenějším motorem zejména pro průmyslové pohony pro jeho nízkou cenu a také vysokou spolehlivost. Na druhé straně je jeho hlavní nevýhodou jeho obtížnější regulace otáček v požadovaném rozsahu. Mechanická rychlost otáčení rotoru je dána vztahem

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60 f_1}{p}(1 - s) \quad (8)$$

Z rovnice (1) vyplývá, že rychlost otáčení rotoru lze ovlivnit třemi způsoby, tj. změnou napájecího kmitočtu  $f_1$ , změnou počtu pólových dvojic  $p$  a ovlivněním velikosti skluzu. Řízení otáčivé rychlosti kmitočtem vyžaduje napájení motoru ze zdroje proměnlivého kmitočtu. Dříve používané rotační měniče kmitočtu dnes nahradily polovodičové střídače napěťové, nebo proudové.



### 3.3 Klasická budicí souprava pro SM

SM viz. odkaz na kapitolu 2.2

### 3.4 Dynamo jako zdroj energie

Dynamo jako zdroj energie se dá rovněž použít. Je to nejstarší způsob napájení. Dá se zapojit buď přímo pokud je dimenzováno na napájenou soustavu, nebo přes snižovací měnič. Nevýhodou zůstává opět komutátor, jiskření, kontrola uhlíků a údržba komutátoru. Pokud ho budeme využívat pro napájení akumulátorů je možné stejnosměrný zdroj přes tlumivku připojit na vstup střídače.

Variant použití dynama jsou:

- Přímé zapojení
- Se snižovacím měničem
- Přímě na vstup střídače

## 4. Spotřebiče zapojené k síti 230 V

### 4.1 Požadovaný celkový příkon

Napájení elektronického zařízení a současně záložního akumulátoru 12V, 65Ah (konzervační proud do 100 mA, režim S2 )

Výpočtové zatížení vyplývá z tabulky spotřebičů. Při výpočtu požadovaného výkonu je třeba znát veškeré ztráty i na elektrických zařízeních. Každé zařízení, které pracuje s elektrickou energií jí také spotřebovává. Z těchto úbytků se nakonec musí vyjádřit celková účinnost zařízení, když třeba ve formě malého úbytku výkonu jako jsou třeba Joulovi ztráty. Mezi největší ztráty patří ztráty v rotoru generátoru, dále pak v měniči. V tabulce zahrnuto pod elektronikou. Pokud nejsou tyto údaje k dispozici zjistíme je měřením a podobně. Výsledkem je pak stanovení účinnosti elektrické soustavy a to je právě údaj, který ovlivní to, pro jaký generátor se rozhodneme.

Přehled elektrospotřebičů je zahrnut v následující tabulce č. 2. Z údajů je možné provést výpočet velikosti spotřeby.

Umístění spotřebiče	Druh	Příkon [W]	Provoz[h/den]	Spotřeba [Wh/den]
Vně objektu	Světla	25	4	100
Vně objektu	kamery	60	8	480
Rozvaděč MVE	elektronika	14	8	112
mobilní	notebook	60	1	60
celkem				752

Tab. 2 Přehled spotřebičů

Napájení elektronického zařízení a osvětlení a současně záložního akumulátoru 12V, 100Ah (konzervační proud do 100 mA, režim S2 )

Celková denní spotřeba (24 hodin) pokud odhadneme účinnost měniče na 85%

Potom musíme navýšit požadovanou energii o 1/0,85 krát.

Požadovaný celkový příkon je  $A_p = 752 \cdot (1,176) = 884 \text{ Wh}$ .

Dostaneme tak 884 Wh. Tuto hodnotu je nutné vydělit účinností akumulátoru (75%) a účinností regulátoru napětí (85%) .

Celková spotřeba energie za den (nabíječka + měnič)  $A = 884 \cdot (0,75 \cdot 0,85) = 1387$  Wh.

Pro pokrytí požadavku spotřeby je nezbytné, aby turbína měla průměrný výkon  $P_p$  za den:

$$P_p = A/24 = 58W$$

Z výpočtu plyne, že minimální potřebný výkon pro napájení kamerového systému je 150 W.

Výpočet kapacity akumulátoru 12V, 100 Ah:

$$C_{AKU} = Ad/U_b = 884/12 = 73 \text{ Ah} - \text{je základní kapacita akumulátoru.}$$

#### **4.2 Požadavek na výstupní průběhy U, f,**

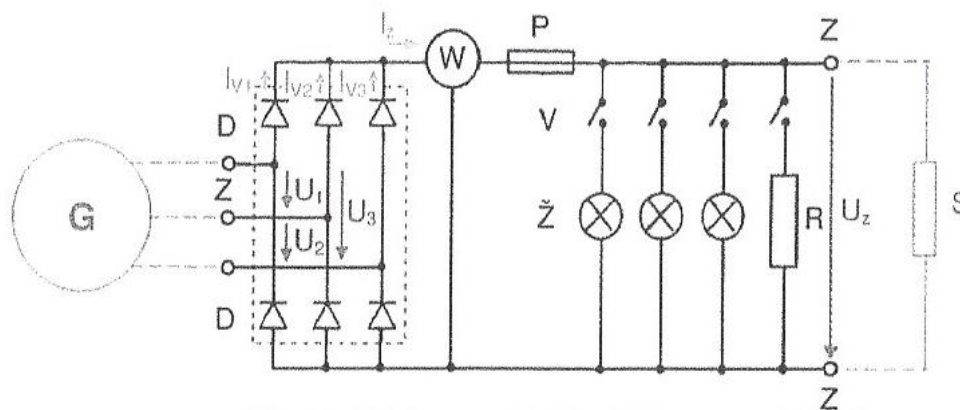
Z hlediska provozu je požadavek na výstupy následující:

- a) Napájení AKU – to znamená mezi usměrňovač a kondenzátor odbočka pro dobíjení 0, 1 z kapacity akumulátoru.
- b) Jednofázový sinusový průběh napětí ze střídače pro napájení elektroniky.

## 5. Nadřazené řízení pro celý systém vodního zdroje

### 5.1 Varianta zapojení rozvaděče MVE

Pro sledování chodu MVE postačí zkušební deska, která umožní měření elektrických hodnot, jako je napětí, proud a výkon generátoru. Následně se pak může vypočítat například množství vyrobené energie za den, měsíc a rok. Deska nebo skříňka obsahuje základní kontrolní a provozní přístroje, které mohou být umístěny například na DIN liště. Deska by měla obsahovat wattmetr, tavné pojistky, usměrňovací můstek třífázový, vypínač, zatěžovací odpor a spojovací materiál.



Obr.5.2 Varianta zapojení rozvaděče MVE



Obr.5.1 Kontrolní a řídicí deska s přístroji, převzato[11]

## 5.2 Varianta PLC hláška o poruše

K řešení řízení malé vodní elektrárny bude použit průmyslový automat PLC zn. Siemens LOGO 8, který bude mít konektivitu na standardní PC, připojené k internetu, nebo GSM modulu pro varovné SMS. Průmyslový automat k této činnosti bude využívat digitálních vstupů a výstupů pro spínání akčních částí a jednotku analogových vstupů na připojení termočlánku pro měření teploty. Průmyslové automaty typu PLC zajišťují stabilitu chodu programu a netečnost vůči EMG vyzařování vzniklém z točivých strojů. Tento modulární systém je možné připojit do rozvaděče na DIN lištu. Pořizovací cena je 16 390 Kč včetně DPH. Magnetické snímače reagují na vnější magnetické pole. Snímače rozdělujeme podle vnitřního zapojení na hallové a jazýčkové. Spínací vzdálenost ( $S_n$ ) určuje síla použitého magnetu. dostupné na [http://www.kotlin.cz/\(Magnet. Snímače s jazýčkem\)](http://www.kotlin.cz/(Magnet.Snímače%20s%20jazýčkem))



Obr.5.3 Dálková komunikace s modulem LOGO 8, převzato [14]

## 6. Závěr

Pořizovací náklady jsou automat PLC LOGO 8 základní sestava 3 500, kamerový systém 5000 Kč, čerpadlo 1500 Kč s přísl., světla stávající, je žárovky 400 Kč, synchronní generátor 5000 Kč, elektroinstalační a stavební materiál 20 000, Bánkiho turbína 50tis. Celkové náklady na stavbu MVE by nepřesáhly 100 tisíc Kč. Zapojení rozvaděče zařízení MVE nám v tom nejlevnějším provozu postačí deska jak je uvedeno výše na obr.5.1.

Příklad řešení jednu variantu výroby elektrické energie pro napájení kamerového systému s příkonem 60 W, o celkové denní spotřebě 480 W a 8 hodinovém provozu. Součástí rozvodné desky, nebo klasické PVC rozvodnice s DIN lištami mohou být i snímač teploty, nebo otáček apod. Varianty použití snímacích prvků se dají poměrně snadno vyrobit a s minimálními náklady.

.Pro výrobu elektrické energie je navržen synchronní generátor s výkonem 2 000 W. Tento výkon byl stanoven na základě přibližného výpočtu protékající vody korytem obdélníkového průřezu o rozměrech 20 x 50 centimetrů (výška x šířka) v rovině. Při počátečním plném průtoku byla naměřena délka 45 až 50 centimetrů, čemuž odpovídá podle jednoduchého výpočtu  $(0,2 \times 0,5) \times 0,5 - (0,1 \times 0,5) \times 0,5 =$  množství  $Q = 25$  až  $50 \text{ cm}^3$  vody. Podle tabulky pro podobný zdroj vychází minimální příkon se spádem 2 metry přibližně 1,88 KWh. Při takovém výkonu by byl generátor 2 KW vytížen na na 95 %. To znamená, že bychom mohli nainstalovat silnější synchronní generátor například 2,5 KW. Požadovaný příkon je asi 800W. Z uvedeného je zřejmé, že instalovaný generátor zátěž bezpečně zásobí elektrickou energií.

**Použitá literatura:**

- [1] Hydraulické a pneumatické stroje, část vodní turbíny, J. MELICHAR, ČVUT Praha, 2013, ISBN 978-80-01-05283-9
- [2] Bezlopatková miniturbína, M. POLÁK a kolektiv, ČVUT v r. 2013, ISBN 978-80-01-05233-4
- [3] Elektrické pohony a výkonová elektronika, V. KŮS, ZČU v Plzni, 2006, ISBN 80-7043-422-8
- [4] TURBÍNY (malé vodní elektrárny), J. BEDNÁŘ, Nakladatelství Marcela Bednářová, 2013, ISBN 978-80-905437-0-6
- [5] Rušivé vlivy měničů a jejich omezování, Výkonová elektronika, svazek IV, FEL/KAE ZČU v Plzni, V. KŮS, ISBN 80-7082-272-4
- [6] J. KAMINSKÝ a kolektiv, Obnovitelné zdroje energie, VŠB–TU Ostrava, 1999, ISBN 80-7078-445-8
- [7] J. MELICHAR, J. VOJTEK, J. BLÁHA, Malé vodní turbíny, Konstrukce a provoz, Vydav. ČVUT, 1998, ISBN 80-01-01808-0
- [8] G.N. PETROV, Elektrické stroje 2, Moskva 1963, překlad z ruského originálu: Elektrické mašiny 2. , STK v Praze , A12970/2j
- [9] BARTOŠ V. a spol..Elektrické stroje, Západočeská universita v Plzni, FEL, Plzeň, 2006. D403, ISBN 80-7043-444-9
- [10] P. VOŽENÍLEK, J. JANOUŠEK, Základy silnoproudé elektrotechniky, ČVUT v Praze, FEL, 2005, ISBN 80-01-03135-7, sign. F21235g
- [11] J.MĚŘIČKA a spol., Elektrické stroje, ČVUT v Praze, FEL,ISBN 80-01-02109-2,signS66967,D403
- [12] J.PAVELKA, Výkonová elektronika, Vydavatelství ČVUT Praha, 2000, ISBN 80-01-02094-0, sign. F20165e
- [13] dostupné z [http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske\\_FS/prednasky/sylab\\_synchronni%20stroje\\_bc%20FS.pdf](http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_synchronni%20stroje_bc%20FS.pdf)
- [14] volně dostupné z <http://www.kotlin>.