VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2016 Matúš Felcan

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

SIMULACE MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY S ASYNCHRONNÍM GENERÁTOREM V OSTROVNÍ SÍTI
SIMULATION OF MICRO HYDRO POWER PLANT WITH INDUCTION GENERATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
Matúš Felcan

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

BRNO 2016

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Matúš Felcan
Ročník: 3

ID: 164263
Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Simulace malé vodní elektrárny s asynchronním generátorem v ostrovní síti

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte literární rešerši na danné téma.
2. Vytvořte model sestavy vodní turbína a asynchronní generátor.
3. Dle pokynů vedoucího proveďte serii simulaci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] I. Boldea, Variable speed generators. Boca Raton: CRC Press, 2006.
[2] V. HORNÍK, Problematika provozu asynchronních generátorů malých vodních elektráren v praxi a možnosti jejich využití pro napájení ostrovních sítí.Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 65s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
[3] I.Boldea, S. A. Nasar, , The induction machine handbook. CRC press 2010.

Termín zadání: 21. 9. 2015 ***Termín odevzdání:*** 31. 5. 2016

Vedoucí práce: Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.
Konzultanti bakalářské práce:

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav elektroenergetiky

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Hlavným zameraním práce je porozumenie problematike asynchrónnych strojov malých vodných elektrární. Ich princíp a využitie v praxi. Použitie asynchrónnych generátorov v pripojení na sieť a v ostrovnom režime. Vytvorená rešeršia na vodné elektrárne a dynamický model indukčného generátora. Vhodne zvolený program Matlab na simuláciu asynchrónneho generátora v pripojení na sieť a tiež v ostrovnom režime.

Kľúčové slova

asynchrónny generátor, synchrónny generátor, turbína

Abstract

The main focus of this work is understanding the importance of induction machines of small hydropower plants . Their principles and applications in practice. The use of asynchronous generators connected to the grid and in island mode. Created a literature search for hydropower plants and dynamic model of induction generator. Appropriately selected program Matlab to simulate asynchronous generators connected to the grid and also in the island mode.

Keywords

asynchronous generator, synchronous generator, turbine

Bibliografická citácia

FELCAN, M. *Simulace malé vodní elektrárny s asynchronním generátorem v ostrovní síti* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D..

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na téma „Simulácia malej vodnej elektrárne s asynchrónnym generátorom“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., a tiež možných trestnoprávnych dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa …… Podpis autora ……..

Poďakovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa …… Podpis autora ……..

OBSAH

1 ÚVOD **13**
1.1 MALÉ VODNÉ ELEKTRÁRNE **14**
2 LITERÁRNY ROZBOR **15**
2.1 VODNÉ ELEKTRÁRNE **15**
2.2 DYNAMICKÝ MODEL INDUKČNÉHO GENERÁTORA **19**
3 GENERÁTORY **21**
3.1 ASYNCHRÓNNE GENERÁTORY **21**
3.2 SYNCHRÓNNE GENERÁTORY **21**
3.3 PRINCÍP FUNKCIE ASYNCHRÓNNEHO MOTORA **22**
3.4 PRINCÍP FUNKCIE ASYNCHRÓNNEHO GENERÁTORU **25**
3.5 ASYNCHRÓNNY GENERÁTOR PRIPOJENÝ NA SIEŤ **29**
3.5.1 VHODNÝ VÝBER GENERÁTORA PRIPOJENÉHO NA SIEŤ 30
3.5.2 PREVÁDZKA GENERÁTORU PRIPOJENÉHO NA SIEŤ 30
3.6 ASYNCHRÓNNY GENERÁTOR V OSTROVNOM REŽIME **30**
3.7 BUDENIE AG KONDENZÁTORMI V ZAPOJENÍ HVIEZDY + ZÁŤAŽ **31**
4 MODEL TURBÍNY **34**
4.1 ZAPOJENIE MODELU S PRIPOJENÍM NA SIEŤ **37**
4.2 ZAPOJENIE VINUTIA ROTORU ALEBO KOTVY NAKRÁTKO ASYNCHRÓNNEHO STROJA **37**
5 SIMULAČNÝ PROGRAM **40**
5.1 MATLAB **40**
5.2 SIMULINK **40**
6 SIMULÁCIE **41**
6.1 SIMULÁCIA ASYNCHRÓNNEHO GENERÁTORA S PRIPOJENÍM NA SIEŤ **41**
6.2 SIMULÁCIA ASYNCHRÓNNEHO GENERÁTORA V OSTROVNOM REŽIME **43**
7 ZÁVER **46**
LITERATÚRA **47**

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 2.1 Svetová výroba elektrickej energie podľa typu zdroja [11] 15

Obr. 2.2 Technický potenciál vodnej energie vo svete [11] 16

Obr. 2.3 Účinnosti turbín pri rôznych prietokoch [11] 17

Obr. 2.4 Schéma jednofázového indukčného generátora [12] 19

Obr.3.1 Vodiče nachádzajúce sa v magnetickom poli [10] 23

Obr.3.2 Konštrukčné schéma indukčného motoru [10] 24

Obr.3.3 Zjednodušené obvodové schéma asynchrónneho motora [6] 25

Obr.3.4 Momentová charakteristika asynchrónneho motora [prevzaté zo 6 a upravené] 27

Obr.3.5 Zjednodušené pripojenie asynchrónneho generátora k sieti [8] 29

Obr.3.6 Budenie asynchrónneho generátoru kondenzátormi v zapojení do hviezdy (Y) [10] 32

Obr.3.7 Budenie asynchrónneho generátoru kondenzátormi v zapojení do trojuholníka (D) [10] 33

Obr. 4.1 Model turbíny v programe Simulink [16] 36

Obr.4.2 Zapojenie vinutia rotoru alebo kotvy nakrátko AS osi q [15] 37

Obr.4.3 Zapojenie vinutia rotoru alebo kotvy nakrátko AS osi d [15] 37

Obr.6.1.1 Model asynchrónneho generátora pripojeného na sieť 42

Obr.6.2.1 Model asynchrónneho generátora v ostrovnom režime 45

ZOZNAM TABULIEK

Tab.2.1: Hodnoty vodných a prečerpávacích vodných elektrární [13] 17

Tab.2.2: Hodnoty malých vodných elektrární [13] 18

Tab.6.1.1 a 6.1.2: Hodnoty pripojenia na sieť jedna záťaž/dve záťaže 41

Tab.6.2.1 a 6.2.2: Hodnoty kapacitnej batérie 345 μF (0%) plná záťaž / polovičná záťaž 43

Tab.6.2.3 a 6.2.4: Hodnoty kapacitnej batérie 310,5 μF (-10%) plná záťaž / polovičná záťaž 43

Tab.6.2.5 a 6.2.6: Hodnoty kapacitnej batérie 276 μF (-20%) plná záťaž / polovičná záťaž 43

Tab.6.2.7 a 6.2.8: Hodnoty kapacitnej batérie 379,5 μF (+10%) plná záťaž / polovičná záťaž 44

Tab.6.2.9 a 6.2.10: Hodnoty kapacitnej batérie 414 μF (+20%) plná záťaž / polovičná záťaž 44

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratka	Názov	Jednotka
B	Magnetická indukcia	[T]
C	Kapacita kondenzátora	[F]
C_{abc}	Kapacita kondenzátorovej batérie	[F]
dt	Časový úsek	[s]
D_t	Priemer obežného kolesa turbíny	[m]
dU	Zmena napätia	[V]
$d\psi'_{dr}$	Derivácia rotorového toku osi d	[Wb]
$d\psi'_{qr}$	Derivácia rotorového toku osi q	[Wb]
$d\psi_{ds}$	Derivácia statorového toku osi d	[Wb]
$d\psi_{qs}$	Derivácia statorového toku osi q	[Wb]
F	Sila pôsobiaca na vodič	[N]
f_1	Frekvencia siete	[Hz]
H	Spád na turbíne	[m]
H_d	Dynamická zmena spádu	[m]
H_g	Skutočný (geodetický) spád	[m]
H_{zk}	Strata spádu vzniknutá stratami na klapke	[m]
H_{zs}	Strata spádu vzniknutá na výstupnom profile sávky	[m]
I	Prúd pretekajúci vodičom	[A]
I_{ef}	Efektívny prúd	[A]
$\boldsymbol{I}$	Fázový prúd	[A]
i	Okamžitá hodnota prúdu	[A]
i'_{dr}	Rotorový prúd osi d	[A]
i'_{qr}	Rotorový prúd osi q	[A]
I_2	Fázový prúd, ktorý sa podieľa na tvorbe momentu	[A]
i_{ds}	Statorový prúd osi d	[A]
i_{qs}	Statorový prúd osi q	[A]
K_v	Prietokový súčiniteľ	[m^3/hod]
l	Dĺžka vodiča	[m]
l	Rozptylová indukčnosť	[H]

L'_{1r}	Rozptylová indukčnosť rotora	[H]
L'_r	Celková indukčnosť rotora	[H]
L_{1s}	Rozptylová indukčnosť statora	[H]
L_m	Magnetizačná indukčnosť	[H]
L_s	Celková indukčnosť statora	[H]
m	Počet fáz	[-]
M	Moment	[N.m]
M_{11}	Jednotkový moment	[N.m]
M_e	Elektromagnetický moment	[N/m]
M_m	Mechanický moment	[Nm]
M_{zv}	Moment zvratu	[Nm]
n	Otáčky rotoru	[ot/min]
n_1	Otáčky magnetického poľa	[ot/min]
n_{11}	Jednotkové otáčky	[ot/min]
p	Počet pólových dvojíc	[-]
P_{hyd}	Hydraulický príkon	[W]
P_m	Mechanický výkon	[W]
Q	Prietok turbínou	[m^3/s]
Q_{11}	Jednotkový prietok	[m^3/s]
R'_r	Odpor rotorového vinutia	[Ω]
R_1	Činný odpor statorového vinutia	[Ω]
R_2	Činný odpor rotorového vinutia	[Ω]
R_{Fe}	Odpor na ktorom vznikajú mechanické i činné straty v mag. obvode	[Ω]
R_s	Odpor statorového vinutia	[Ω]
s	Sklz	[-]
s_{zv}	Sklz zvratu	[-]
S_k	Plocha klapky	[m^2]
U	Fázové napätie	[V]
U_{ef}	Efektívne napätie	[V]
U'_{dr}	Rotorové napätie osi d	[V]
U'_{qr}	Rotorové napätie osi q	[V]

U_{ds}	Statorové napätie osi d	[V]
U_i	Indukované napätie	[V]
U_{qs}	Statorové napätie osi q	[V]
v	Rýchlosť pohybujúceho sa vodiča	[m/s]
v_k	Rýchlosť kvapaliny v klapke	[m/s]
X_c	Kapacitný odpor	[Ω]
X_m	Magnetizačná reaktancia	[Ω]
X_r	Rozptylová reaktancia	[Ω]
Y_{zk}	Merná energia predstavujúca tlakovú stratu na klapke	
ψ'_{dr}	Rotorový tok osi q	[Wb]
ψ'_{qr}	Rotorový tok osi d	[Wb]
ψ_{ds}	Statorový tok osi q	[Wb]
ψ_{qs}	Statorový tok osi d	[Wb]
ζk	Stratový súčiniteľ klapky	[-]
ω	Referenčná uhlová rýchlosť	[rad/s]
ω_r	elektrická uhlová rýchlosť	[rad/s]

1 Úvod

V dnešnom modernom svete, kedy si ľudia nevedia predstaviť život bez elektrickej energie, je stále veľký dopyt po tejto komodite. Vo svete je viacero výrobných možností. Medzi najrozšírenejšie typy elektrární patria tepelné, jadrové, fotovoltaické, veterné a vodné. Základný princíp všetkých strojov spočíva vo využití sily ukrytej vo vode a to v roztočení obežného kolesa. Tým sa vytvorí mechanická energia, ktorú je možné previesť pomocou vhodného generátora na elektrickú energiu.

Najviac sa využívajú v malých vodných elektrárňach asynchrónne generátory. Sú preferované z ekonomického hľadiska pre ich nízku kúpnu cenu, pretože sú to sériové výrobky a konštrukčne sú zhodné s asynchrónnymi motormi. Keďže vodné turbíny pracujú s konštantnými otáčkami, tak sa nemusia regulovať otáčky, preto sa neuplatňujú výkonové regulátory.

V prvej časti sa nachádza literárna rešeršia malých vodných elektrární vo svete v porovnaní v Českej republike. Literárny rozbor na tému dynamický model indukčného generátora. Rozoberá sa princíp asynchrónneho a synchrónneho generátora v pripojení na sieť a tiež aj v ostrovnom režime.

V druhej časti je rozoberaný princíp asynchrónneho generátora a vodnej turbíny pripojeného na sieť i na ostrovný režim. Boli vytvorené modely zostáv vodnej turbíny a asynchrónneho generátora, ktorý sa pripojil na sieť 400/50Hz a tiež v ostrovnom režime budený kondenzátorovou batériou.

V tretej časti sa previedli simulácie podľa pokynov vedúceho na modely v pripojení na sieť pri plnej a polovičnej záťaži. V ostrovnom režime sa previedli simulácie pri rôznych zmenách kapacity kondenzátorovej batérie a tiež pri plnej a polovičnej záťaži.

1.1 Malé vodné elektrárne

V súčasnej dobe sa vo svete i u nás obracia pozornosť na využívanie vlastných, ekologicky čistých a nevyčerpateľných primárnych zdrojov energie. Významné miesto zastupujú malé vodné elektrárne (MVE), ktoré s vysokou účinnosťou premieňajú hydroenergetický potenciál toku na elektrickú bez negatívneho dopadu na okolité prostredie.[1]

Efektívne využívanie vodnej energie je v Českej republike obmedzené, pretože veľká časť hydroenergetického potenciálu je rozptýlená v malých vodných tokoch. Z disponibilného doposiaľ nevyužitého hydroenergetického potenciálu ide len asi ¼ využiť v stredných a veľkých vodných elektrárňach, zatiaľ čo ¾ je treba využiť v malých vodných elektrárňach o výkonu do 10 MW. V týchto elektrárňach ide postupne získať viac než 550 MW výkonu a približne 2000 GWh elektrickej energie ročne.

Malé vodné elektrárne sa vyznačujú niekoľkonásobne dlhšou dobou ekonomickej životnosti, ako je doba návratnosti prostriedkov vynaložených na ich vybudovanie. Teda energia, ktorá je v nich vyrobená je najlacnejšia energia dodávaná do elektrizačnej sústavy. Predstavujú významný prínos pre krytie energetickej spotreby, schopnosť pružnej a hospodárnej regulácie a schopnosť akumulácie. Globálne zhodnotenie všetkých faktorov – ekologických, ekonomických a iných vedú k rovnakému záveru, že využitie vodnej energie je potreba dávať v národných energetických programoch na prvé miesto. [2]

Výber spôsobu rekonštrukcie generátoru malej vodnej elektrárne je ovplyvňované hlavne:

- Aktuálnym stavom technológie.
- Požadovaným spôsobom prevádzky.
- Požiadavkou na možnosť zvýšenia účinnosti výroby elektrickej energie.
- Ekonomickou dostupnosťou pre investora.

Hore uvedené skutočnosti naznačujú, že spôsob rekonštrukcie generátora bude rozdielna pre jednotlivé elektrárne.

Podľa rekonštrukcie generátoru sú zaujímavé synchrónne stroje o menovitých otáčkach nižších ako je 750. S požiadavkami na ostrovný režim a s možnosťou štartu do tmy. Týmto požiadavkám sa dá vyhovieť s použitím moderných synchrónnych generátorov alebo tiež pri použití v určitých podmienkach i asynchrónne generátory. Vážna komplikácia nastáva v prípadoch nízkych prevádzkových otáčok. Vtedy je nutné doplniť agregáty prevodom a tak je vyššia účinnosť generátoru obvykle degradovaný účinnosťou prevodovky.

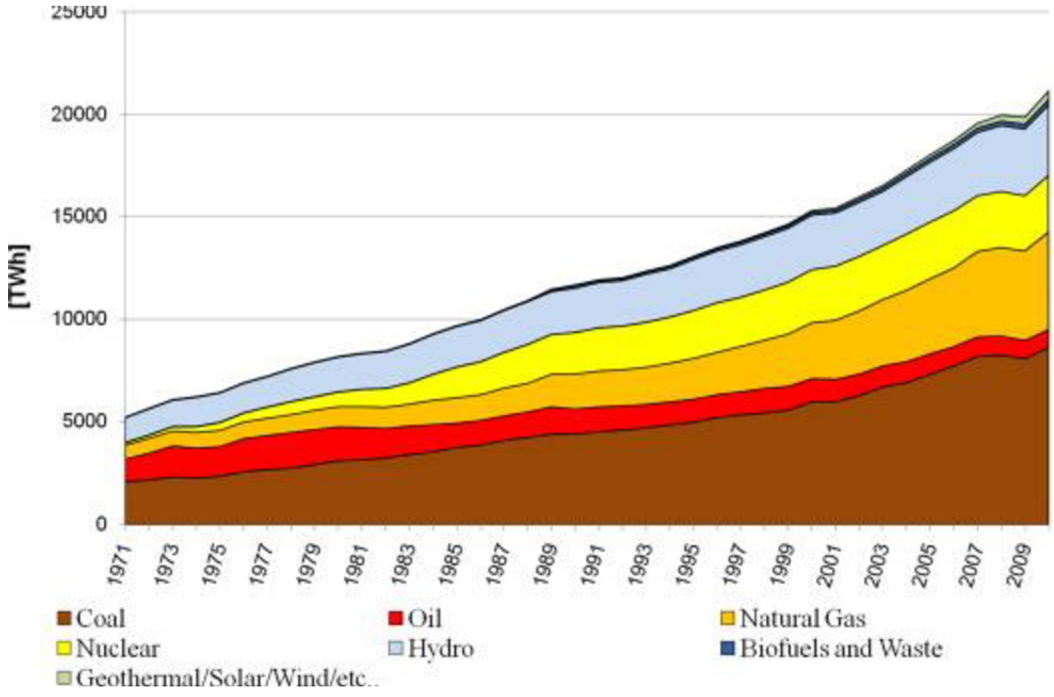
Kvôli moderným technológiám ide i asynchrónne motory využívať v generátorovej prevádzke v ostrovných sieťach obdobne ako i synchrónne generátory. Podmienkou využitia asynchrónneho generátoru je použiť budenie.

2 LITERÁRNY ROZBOR

2.1 Vodné elektrárne

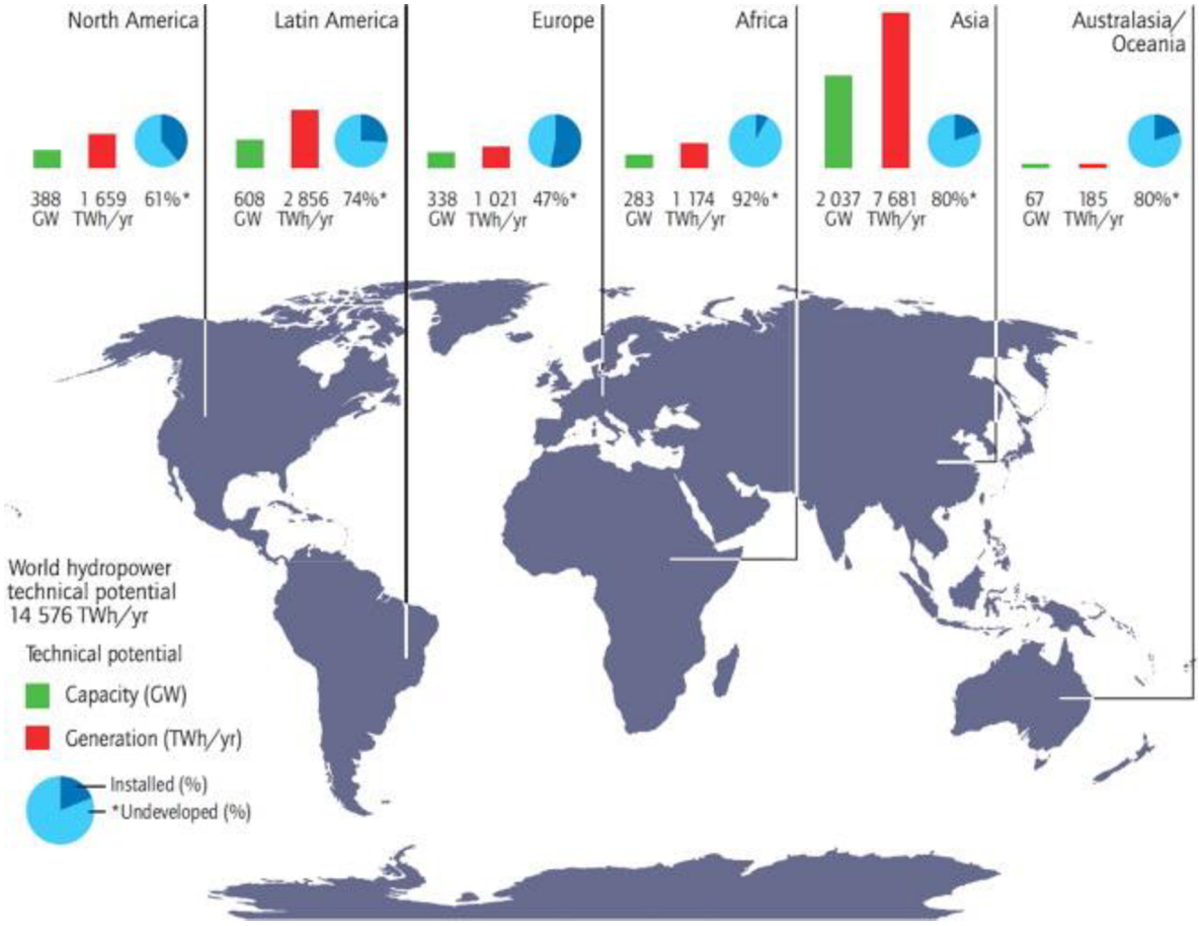
V posledných desaťročiach sa svetová spotreba elektrickej energie výrazne zvýšila. V roku 2010 dosiahla 17,7% a predpokladá sa, že do roku 2025 sa táto hodnota zdvojnásobí.

Rast obnoviteľných zdrojov energie spôsobí, že sa zníži závislosť na fosílnych palivách. Jedným z najviac vyspelých technológií na výrobu elektrickej energie sa nachádza vo vodnom odvetví. V roku 2010 to bolo 3500 TWh (16,3% svetovej elektriny), najviac u obnoviteľných zdrojov energie, ale stále oveľa menšie ako u elektrární na fosílne palivá (67,2%).



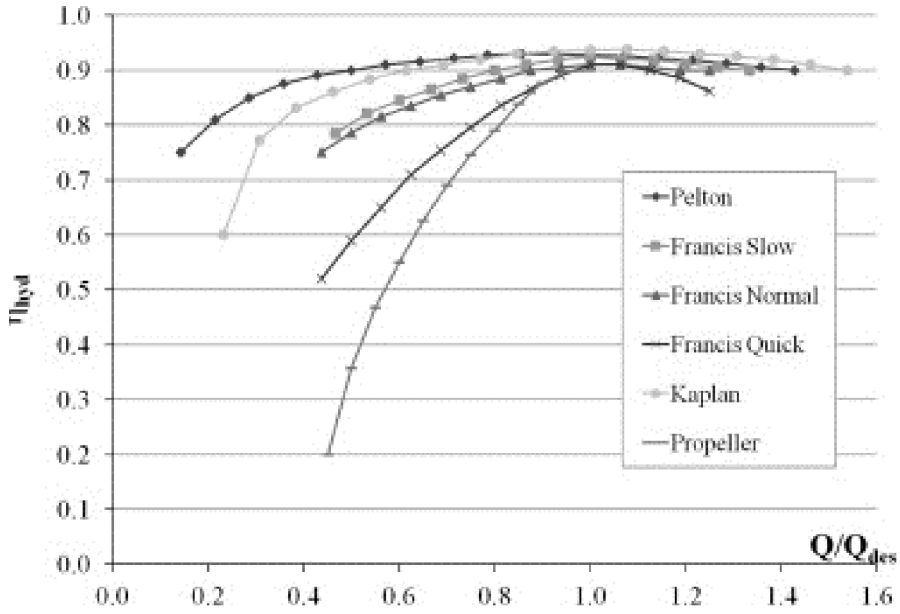
Obr. 2.1 Svetová výroba elektrickej energie podľa typu zdroja [11]

Potenciál zdrojov z vodných elektrární je veľmi vysoký až 14,576 TWh / rok. Najvyšší nezastavený potenciál sa nachádza v Afrike (92%), nasleduje Ázia (80%), Oceánia (80%) a Latinská Amerika (74%). Vodné elektrárne predstavujú významné výhody: podporujú cenovú stabilitu na rozdiel od paliva a zemného plynu, znižuje zraniteľnosť prostredia voči povodniam, prispieva ku skladovaniu pitnej vody a zavlažovaniu. Vodné projekty sú dlhodobé investície s priemernou životnosťou 50-100 rokov. Na druhej strane tieto zmeny v prírode negatívne pôsobia na: voľne žijúce živočíchy, biodiverzitu, zdravie a kvalitu vody. Vodné elektrárne priaznivo pôsobia na elektrizačnú sústavu, stabilitu siete, spoľahlivosť a účinnosť.



Obr. 2.2 Technický potenciál vodnej energie vo svete [11]

U malých vodných elektrární sa energia pohybuje od 2,5 do 30 MW. Najrozšírenejšou hodnotou je 10 MW. Malé vodné elektrárne sú veľmi efektívne a nízko - nákladové. Majú predvídateľné energetické vlastnosti, dlhodobú spoľahlivosť, znížený vplyv na životné prostredie. Postaviť sa môžu len na špecifických miestach. Vzhľadom na prietok, rýchlosť toku, na zvolenej rýchlosti generátor sa vyberajú rôzne typy turbín. Ako predstavuje nasledujúci obrázok (2.3).



Obr. 2.3 Účinnosti turbín pri rôznych prietokoch [11]

Z hlavných cieľov energetickej politiky Európskej únie je dosiahnuť 20% podiel energie z obnoviteľných zdrojov na celkovej spotrebe energie v EÚ do roku 2020. S možnosťou zvýšenia tohto podielu až do výšky 100% do roku 2050.

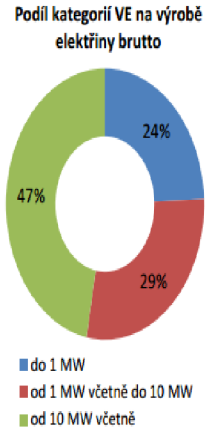
V tomto kontexte vyplýva, že vodná energia má skrytý potenciál do budúcnosti, ktorý bude nesmierne dôležité využiť. Avšak bude veľmi dôležité znížiť dopad na životné prostredie, modernizáciu starých elektrární, zapojiť menšie elektrárne do siete a optimalizovať dimenzovanie a vedenie. [11]

	Celkový instalovaný výkon [MW$_e$]	Výroba elektřiny brutto [MWh]	Technologická vlastní spotřeba elektřiny na výrobu elektřiny [MWh]	Výroba elektřiny netto [MWh]	Dodávka elektřiny do ES [MWh]
VE celkem	**1 080,4**	**1 909 222,5**	**16 901,2**	**1 892 321,2**	**1 810 702,8**
do 1 MW	150,3	465 481,9	5 157,4	460 324,5	425 339,8
od 1 MW včetně do 10 MW	177,2	546 191,6	7 592,5	538 599,2	518 150,9
od 10 MW včetně	752,8	897 548,9	4 151,3	893 397,5	867 212,1

zdroj dat: výkaz ERÚ-1 (nad 10 MW), OTE, a.s.(do 10 MW)

	Celkový instalovaný výkon [MW$_e$]	Výroba elektřiny brutto [MWh]	Spotřeba elektřiny na přečerpávání [MWh]	Výroba elektřiny netto [MWh]	Dodávka elektřiny do ES [MWh]
Přečerpávací VE	**1 171,5**	**1 051 526,2**	**1 349 489,0**	**1 035 453,4**	**1 031 400,7**

zdroj dat: výkaz ERÚ-1



Tab.2.1: Hodnoty vodných a prečerpávacích vodných elektrární [13]

	Datum uvedení výrobny do provozu		Celkový instalovaný výkon	Výroba elektřiny brutto	Technologická vlastní spotřeba elektřiny na výrobu elektřiny	Výroba elektřiny netto	Dodávka elektřiny do ES
	od (včetně)	do (včetně)	[MW_e]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[MWh]
Podporované VE celkem *)			**337,6**	**1 058 832,7**	**13 427,7**	**1 045 405,0**	**989 972,1**
Malá vodní elektrárna	-	31.12.2004	60,5	166 277,2	2 389,6	163 887,6	173 202,2
	1.1.2005	31.12.2013	48,6	158 475,0	1 422,8	157 052,2	149 466,0
	1.1.2014	31.12.2014	11,1	14 843,5	57,8	14 785,7	12 627,5
Rekonstruovaná malá vodní elektrárna	-	31.12.2013	164,8	501 922,5	6 331,1	495 591,5	441 666,4
	1.1.2014	31.12.2014	0,1	85,6	0,1	85,5	77,4
Malá vodní elektrárna v nových lokalitách	1.1.2006	31.12.2007	8,7	35 814,5	379,1	35 435,4	34 655,9
	1.1.2008	31.12.2009	8,6	29 534,5	469,8	29 064,7	28 850,2
	1.1.2010	31.12.2010	7,6	35 970,4	598,7	35 371,6	35 126,9
	1.1.2011	31.12.2011	0,7	2 316,2	63,5	2 252,7	2 242,0
	1.1.2012	31.12.2012	14,2	56 747,3	782,8	55 964,6	54 479,9
	1.1.2013	31.12.2013	11,0	53 300,6	911,5	52 389,1	54 499,1
	1.1.2014	31.12.2014	1,6	3 545,3	20,9	3 524,4	3 078,7

Tab.2.2: Hodnoty malých vodných elektrární [13]

Podľa priložených tabuliek vyplýva, že celková dodávka elektrickej energie vodných elektrární do elektrizačnej sústavy predstavuje 1 810 702,8 MWh. *[Tab.2.1]* Z toho viac ako polovica predstavujú malé vodné elektrárne. Z *[Tab.2.2]* je vidieť, že malé vodné elektrárne predstavujú 989 972,1 MWh dodanej elektrickej energie do elektrizačnej sústavy. V rámci celosvetovej dodávky elektrickej energie do elektrizačnej sústavy majú vodné elektrárne veľký potenciál. V rámci sveta je Česká republika vzhľadom na dodávku elektrickej energie do elektrizačnej sústavy malým dodávateľom. V rámci vnútroštátnej ekonomiky pokryje celoročnú spotrebu elektrickej energie a ešte aj predáva do zahraničia.

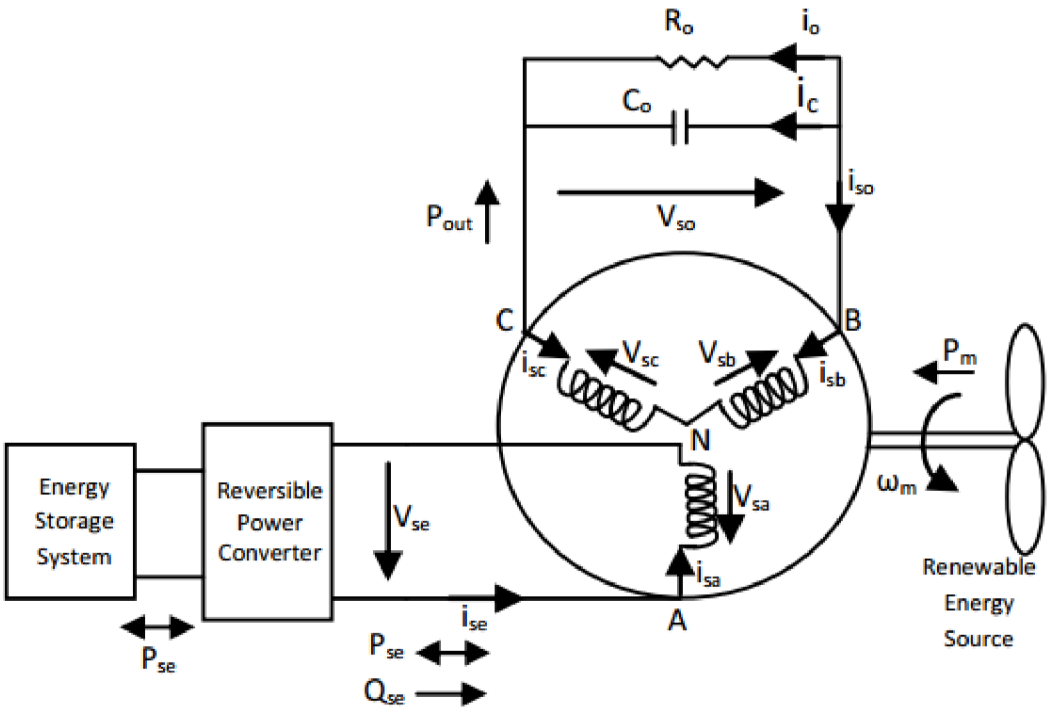
2.2 Dynamický model indukčného generátora

Nedávna štúdia sa zamerala na zlepšenie dynamického modelu jednofázového indukčného generátora na základe trojfázovej klietky rotoru asynchrónneho stroja.

Trojfázové indukčné generátor s konštantnými otáčkami sú extrakcie maximálnej energie z obnoviteľných zdrojov energie, ako to funguje u konštantnej rýchlosti.

Magnetizačné charakteristiky zariadenia sú veľmi dôležité pri analýze asynchrónneho generátora. V nenasýtenej oblasti je magnetizačná reaktancia pomer medzi vzduchovou medzerou napätia a magnetizačného prúdu, ktorý je skoro konštantný. V nasýtenej oblasti tento pomer klesá s rastúcim magnetizačným prúdom.

Experimentálne výsledky vykonané v laboratóriách a výsledky simulácie poukazujú na zvýšenú presnosť a zlepšenie dynamického modelu.



Obr. 2.4 Schéma jednofázového indukčného generátora [12]

Generátor je zostavený z troch vinutí trojfázového asynchrónneho generátora. Jedno vinutie je použité ako radiace (budiace). Ostatné dve vinutia sú zapojené do série a použité ako výstupné vinutie. Radiace (budiace) vinutie je pripojené k systému na uchovanie energie (ESS) prostredníctvom výkonového meniča. K záťaži spotrebiteľa (R_0) je pripojené výstupné vinutie. Hriadeľ rotora je spojený so zdrojom obnoviteľnej energie ako u veternej alebo vodnej turbíny.

Počas procesu budenia radiácie vinutie dodáva väčšinu požiadaviek jalovému výkonu stroja. Pevný kondenzátor, ktorý je zapojený paralelne so záťažou spotrebiteľa dodáva časť požadovanej jalovej energie, aby kontrolovalo budenie prúdu v rámci menovitého stavu. Radiace (budiace) vinutie slúži na napájanie alebo absorpciu činného výkonu. Keď dopyt zaťaženia spotrebiteľov je vyššia ako výroba energie z obnoviteľných zdrojov, tak systém na uchovanie energie (ESS) dodáva energiu prostredníctvom budiaceho vinutia. Ak systém na uchovanie energie (ESS) absorbuje energiu, tak je požiadavka záťaže menšia ako obnoviteľná.

Za prevádzkové parametre sú požadované: zaťažovací odpor, pevná kapacita, rýchlosť rotora a radiace (budiace) napätie. Zo systému generátora sú považované premenné parametre: radiačný prúd budenia, výstup vinutia prúdu a napätia.

Experimentálne a teoretické výsledky získané z modelu sú dobré s menej ako 5% chybou. V najhoršom prípade je chyba medzi experimentálnymi a teoretickými výsledkami je 20%. Model poskytuje významné zlepšenie presnosti z ovládania budiaceho vinutia. Porovnanie experimentálnych a výsledky simulácie potvrdzujú zlepšenie dynamického modelu v presnosti.

3 GENERÁTORY

3.1 Asynchrónne generátory

Väčšie nasadenie asynchrónnych generátorov v oblasti malých vodných elektrární umožnilo až vybudovanie spoľahlivo tvrdej elektrickej siete, s ktorou tieto stroje pracujú výhradne v paralelnej prevádzke. Aj keď budenie asynchrónneho generátora bolo popísané už v roku 1935 [3], ale až vývojom výkonových polovodičových prvkov v posledných rokoch a radiacich systémov je možné prevádzkovať asynchrónne generátore aj v ostrovnom režime.

Obvykle sa v rámci rekonštrukcie vodných elektrární používajú asynchrónne generátory do výkonu asi 200 kW a menovitých 750 ot/min. Synchrónne otáčky generátoru sú dané počtom pólových dvojíc statorového vinutia. Výnimočne sú používané viacpólové asynchrónne generátory. Problematika ohľadom prispôsobenia otáčok generátora a turbíny je vo viacerých prípadoch riešená pomocou mechanického prevodu. Asynchrónny generátor potrebuje pre svoju činnosť jalový výkon, preto je jeho veľkosť daná výkonom generátoru a jeho konštrukciou. Z toho dôvodu je dôležité, aby elektrárne boli vybavené kompenzačným zariadením.

Asynchrónne generátory uvedených výkonov sú z ekonomického hľadiska preferované vďaka nízke cene, pretože sú to sériové výrobky zhodné konštrukčne s asynchrónnymi motormi. Vodné turbíny pracujú s konštantnými otáčkami. Nie je potrebné regulovať otáčky, preto sa v tejto oblasti energetiky neuplatnili elektronické výkonové regulátory. U veterných elektrárňach je rozdielna situácia , pretože môžu pracovať s rôznymi otáčkami a do siete elektrickej energie je nutné dodávať konštantné parametre. Parametre dodávané energiu do distribučnej siete sú obsiahnuté v dokumente : „Pravidlá prevádzkovateľov distribučných sústav“ [4] a v ČSN EN 50160. Asynchrónne generátory o výkonoch jednotiek MW sú používané pre konštrukciu veterných elektrární.

3.2 Synchrónne generátory

Oproti asynchrónnym generátorom majú veľa výhod, ktoré sú ale na druhej strane vykompenzované vyššou výrobnou cenou. Synchrónny generátor môže pracovať ako v ostrovnom režime, tak aj paralelne s distribučnou sieťou. Vďaka riadenému budeniu umožňujú synchrónne generátory udržiavať konštantný fázový uhol medzi napätím a prúdom pri paralelnej práci so sieťou a konštantné výstupné napätie pri práci do samostatnej záťaže. Pripájanie synchrónneho generátora na sieť prebieha v okamžiku, kedy má sieť i generátor zhodné efektívne hodnoty napätia, zhodný kmitočet, rovnaký sled vo fázach a rovnaké okamžité hodnoty napätia.

Ak sú dodržané tieto podmienky pripojenia generátoru k sieti, tak nedochádza k žiadnym významným prechodovým dejom, ktoré by negatívne ovplyvňovali sieť. Naproti tomu asynchrónny generátor v momente pripojenia minimálne zaťaží sieť magnetizačnými prúdmi.

Pre výrobu elektrickej energie pracujúcich vo výrobniach do samostatnej siete a výrobniach väčších výkonov sa skoro vždy používajú práve synchrónne generátory. V poslednej dobe sa konštruujú pre malé výkony i generátory s permanentnými magnetmi.

V oblasti výroby elektrickej energie vodnými elektrárňami sú využívané práve pomalorýchle synchrónne generátory konštruované špeciálne na dané miesta. Synchrónne generátory sú v súčasnosti stroje vyrobené začiatkom 20. storočia. Náhrada stále funkčného generátoru je nesmierne nákladná investícia do opravy. Tu sa ponúka úspornejšia možnosť, ktorou je rekonštrukcia generátoru alebo výmena generátorom asynchrónnym.

Použitie asynchrónneho generátora za predpokladu splnenia určitých podmienok ide zachovať také vlastnosti technológie, akoby bol použitý synchrónny generátor.

3.3 Princíp funkcie asynchrónneho motora

Asynchrónny motor je točivý elektrický stroj, ktorý pracuje na striedavý prúd. Tok energie medzi hlavnými časťami motoru (rotor a stator) je výhradne realizovaný pomocou elektromagnetickej indukcie. Tento motor sa aj preto označuje ako indukčný motor. Vynález asynchrónneho motora je spojený s objavom vytvorenia magnetického poľa pomocou napájania striedavého prúdu dve cievky s fázovým posunom 90°. Objav bol uskutočnený vynálezcom Nikola Tesla (1856 – 1943). V roku 1888 vystúpil pred americký inštitút elektrotechnikov a tým odstránil poslednú prekážku v rozvoji viacfázového striedavého prúdu distribučných sietí. Týmto postupne vytlačil pôvodné rozvody jednosmerného prúdu. [5]

Funkciu asynchrónneho motoru objasňuje základnými poznatkami po roku 1820 Michael Faraday (1791 – 1867). Táto skutočnosť bola objavená experimentálne. Keď na vodiči pohybujúci sa v magnetickom poli vzniká elektrické napätie. Veľkosť indukovaného napätia je priamo úmerná dĺžke vodiča „*l*“, magnetickej indukcii „*B*“ a rýchlosti „*v*“, ktorou sa vodič pohybuje. Závislosť bola matematicky popísaná až v roku 1845 teoretikom F.E. Neumannom (1798 – 1895) a ďalej zaradená J.C. Maxwellom (1831 – 1879) v maxwellových sústavách hlavných rovníc elektromagnetického poľa. [3]

Vzťah z hore uvedených veličín ide pre prípad kolmého pohybu vodiča k vektoru magnetickej indukcie zapísať pomocou vzorca indukovaného napätia *(3.1)*:

$$U_i = B \cdot l \cdot v \qquad [V] \tag{3.1}$$

,kde: U_i je indukované napätie, B je magnetická indukcia, l je dĺžka vodiča a v je rýchlosť.

Ak do elektrického obvodu zapojíme pohybujúci sa vodič tak, aby indukované napätie vyvolalo tok prúdu, na vodič začne pôsobiť sila F. Jej veľkosť je daná vzťahom (*3.2*)

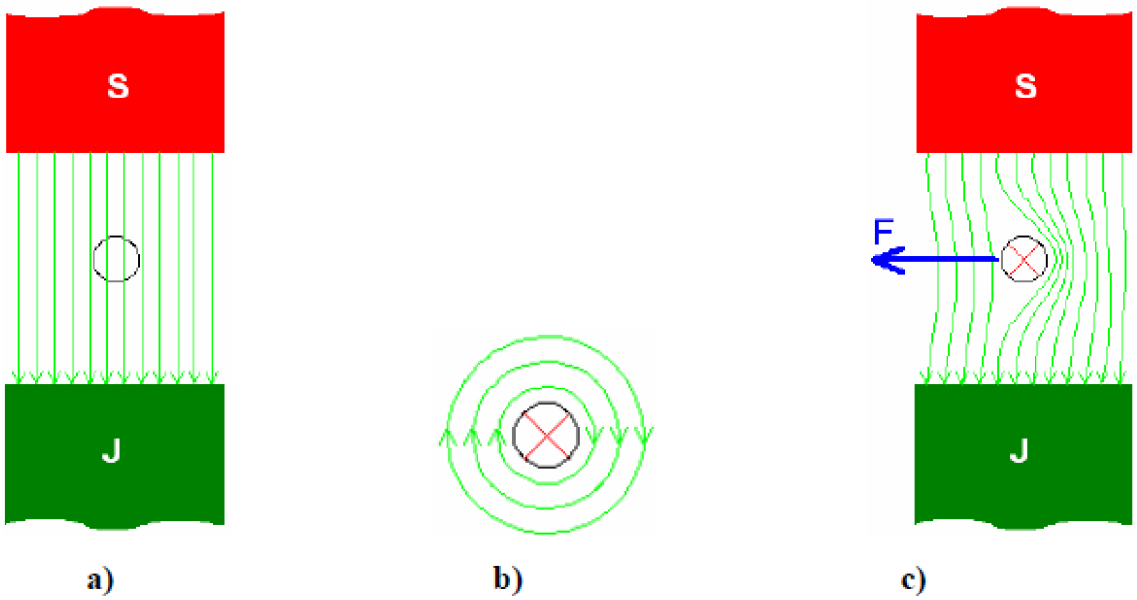
$$F = B \cdot l \cdot I \qquad [N] \tag{3.2}$$

,kde: *B* je magnetická indukcia, *l* je dĺžka vodiča a *I* je tok prúdu.

V praxi sa uplatňuje tento poznatok pri konštrukcii magnetického tlmenia mechanického ústrojenstva meracích prístrojov. Obecne dobrým príkladom je mechanický elektromer, kde sa nemagnetický hliníkový kotúč, ktorý predstavuje vodič nakrátko pohybuje v magnetickom poli permanentného magnetu. [6]

Vyššie fyzikálny jav popisuje Lenzov zákon (fyzik Heinrich Lenz, 1804 - 1865). Podľa Lenzovho pravidla sa indukovaný elektrický prúd má taký smer v uzavretom obvode, že pôsobí svojím magnetickým poľom, proti zmene magnetického indukčného toku, ktorá ho vyvolala. [7]

Pre lepšiu predstavu vzájomného pôsobenia elektromagnetických a magnetických polí, z ktorých vychádzajú vyššie uvedené vzťahy (*3.1*) a (*3.2*), je popis uvedený pomocou Ampérovho a Flemingovho pravidla:



Obr.3.1 Vodiče nachádzajúce sa v magnetickom poli [10]

Na **Obr. 3.1 a)** sa nachádza vodič, ktorý je umiestnený v magnetickom poli permanentného magnetu. Vodič sa nepohybuje, preto nepôsobia na tento vodič žiadne sily.

Na **Obr. 3.1 b)** je znázornený vodič s pretekajúcim prúdom v smere od pozorovateľa. Pomocou Ampérovho pravidla pravej ruky zistíme orientáciu magnetických indukčných čiar:

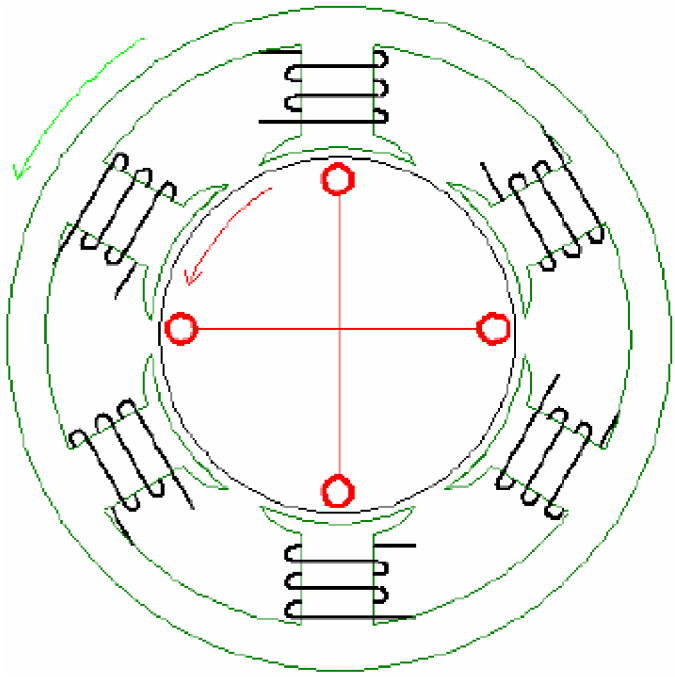
„Keď palec pravej ruky ukazuje smer elektrického prúdu vo vodiči, potom zohnuté prsty ukazujú orientáciu magnetických indukčných čiar.“

Obr. 3.1 c) Ak vložíme vodič s pretekajúcim prúdom do magnetického poľa, tak bude na vodič pôsobiť sila. V takom smere, ktorý určíme podľa Flemingovho pravidla ľavej ruky:

„Keď položíme otvorenú ľavú ruku na vodič tak, že budú magnetické indukčné čiary vstupovať do dlane a prsty budú ukazovať smer prúdu, vodič sa vtedy vychýli na stranu palca."

Na základe vyššie uvedených poznatkov, ak vodič (nakrátko) je umiestnený v pohybujúcom magnetickom poli, tak sa dá povedať, že bude pôsobiť na vodič v smere pohybu magnetického poľa.

Najčastejšie sa využíva na vytvorenie točivého magnetického poľa trojfázová sieť harmonického napätia. Buď 50 alebo 60 Hz a jednotlivé fázy sú posunuté o uhol 120°.



Obr.3.2 Konštrukčné schéma indukčného motoru [10]

Rotor indukčného motoru sa skladá z niekoľkých závitov, ktoré sú spojené nakrátko. Vložené sú do točivého magnetického poľa. Veľkosť magnetického toku, ktorý prechádza plochou stojaceho závitu indukuje napätie. Pretlačuje ním veľký prúd. Tento veľký prúd vybudí magnetické pole. Spolu s točivým polom statoru vytvorí točivý moment a tým roztočí rotor. Ak pouvažujeme nad ideálnym indukčným motorom bez strát, tak sa jeho rotor roztočí na synchrónne otáčky a bude sa otáčať súhlasne s točivým magnetickým polom. Vodiče nepretínajú žiadne indukčné čiary a neindikuje sa v nich žiadne napätie. Točivý moment bude nulový. Ak sa mechanicky zaťaží rotor, tak sa musí spomaliť a indukčné čiary začnú pretínať vodiče, v ktorých sa indukuje napätie. Toto napätie vyvolá prúd pre vznik sily. [6]

S rastúcim zaťažením sa otáčky indukčného motoru zmenšujú. Zníženie otáčok rotoru *n* vzhľadom k otáčkam točivého magnetického poľa n_1 sa volá sklz (*3.3*)

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \qquad [-] \tag{3.3}$$

,kde: n_1 sú otáčky točivého magnetického poľa a *n* sú otáčky rotoru.

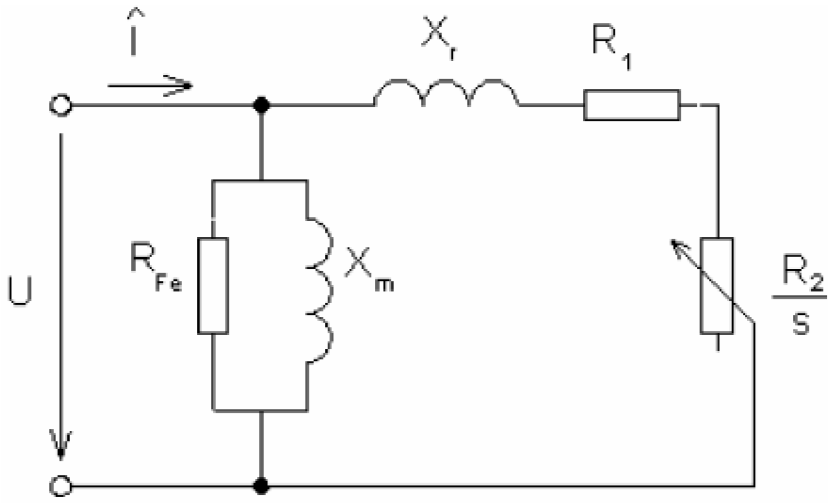
Keďže sa rotor indukčného motora neotáča synchrónnymi otáčkami, preto sa aj volá asynchrónny motor. [7]

3.4 Princíp funkcie asynchrónneho generátoru

Asynchrónny generátor je konštrukčne zhodný s asynchrónnym motorom. Nie je však jednoduché si predstaviť princíp funkcie asynchrónneho generátoru. Obecne sa vie, že asynchrónne generátory sú využívané pre výrobu elektrickej energie len v paralelnom spojení s tvrdou distribučnou sieťou. Ich ďalšie využitie je veľmi diskutované vo svete.

Ak si napíšeme príklad z učebnice o momentovej charakteristiky asynchrónneho motoru zistíme, že asynchrónny motor prejde do generátorovej prevádzky len zmenou orientácie momentu na hriadeli.

Funkciu asynchrónneho stroja uvedieme pre názornú ukážku jeho zjednodušený matematický popis. [6]



Obr.3.3 Zjednodušené obvodové schéma asynchrónneho motora [6]

U - Fázové napätie [V]

$\boldsymbol{I}$ - Fázový prúd [A]

R_{Fe} - Odpor na ktorom vznikajú mechanické i činné straty v magnetickom obvode [Ω]

X_m - Magnetizačná reaktancia [Ω]

X_r - Rozptylová reaktancia [Ω]

R_1 - Činný odpor statorového vinutia [Ω]

R_2 - Činný odpor rotorového vinutia [Ω]

s - Sklz [-]

s_{zv} - Sklz zvratu [-]

M_m - Mechanický moment [Nm]

M_{zv} - Moment zvratu [Nm]

I_2 - Fázový prúd, ktorý sa podieľa na tvorbe momentu [A]

m - Počet fáz [-]

p - Počet pólových dvojíc [-]

f_1 - Frekvencia siete [Hz]

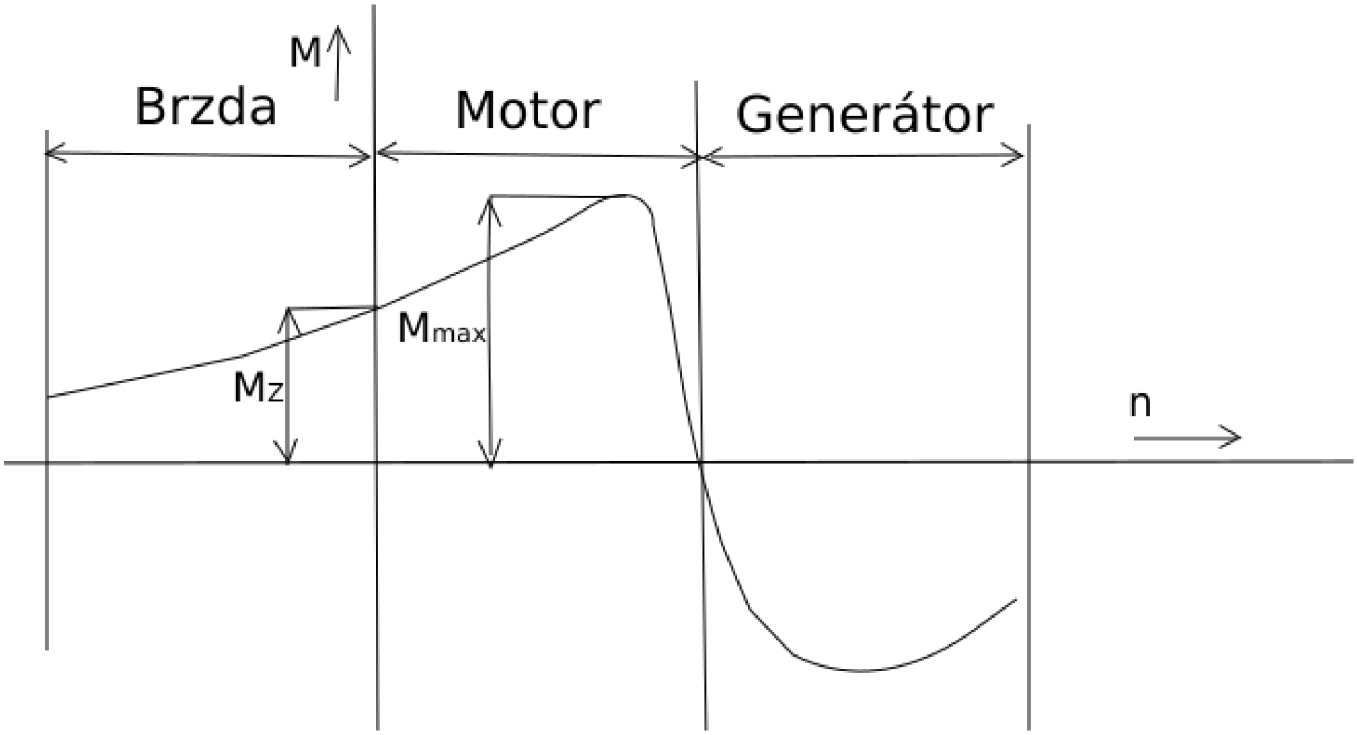
P_m - Mechanický výkon [W]

Rovnica (*3.4*) vyjadruje mechanický moment motoru.

$$M_m = \frac{m \cdot p \cdot U^2 \cdot R_2}{s \cdot 2\pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_r^2\right]} \qquad [N/m] \tag{3.4}$$

,kde: m je počet fáz, p je počet pólových dvojíc, U je fázové napätie, R_2 je činný odpor rotorového vinutia, s je sklz, f_1 je frekvencia siete, R_1 je činný odpor statorového vinutia a X_r je rozptylová reaktancia.

Táto rovnica vyjadruje závislosť M = f (s) alebo M = f (n) graficky vynesená predstavuje momentovú charakteristiku asynchrónneho stroja.



Obr.3.4 Momentová charakteristika asynchrónneho motora [prevzaté zo 6 a upravené]

Pri menovitom zaťažení vytvára motor mechanický moment M_n pri sklze s_n a jemu odpovedajúcim otáčkam n_n.

Motor vyvíja pri určitých otáčkach maximálny moment, ktorý určíme vypočítaním maxima momentovej charakteristiky. Tiež si zároveň určíme s_{zv} (*3.6*), odpovedajúci maximálnemu momentu M_{zv}(*3.5*).

$$M_{zv} = \frac{m \cdot p \cdot U^2}{4\pi \cdot f_1 \cdot \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_r^2}\right)} \qquad [N/m] \tag{3.5}$$

,kde: *m* je počet fáz, *p* je počet pólových dvojíc, *U* je fázové napätie, f_1 je frekvencia siete, R_1 je činný odpor statorového vinutia, X_r je rozptylová reaktancia.

$$s_{zv} = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + X_r^2}} \qquad [-] \tag{3.6}$$

,kde: s_{zv} je sklz zvratu, R_2 je činný odpor rotorového vinutia, R_1 je činný odpor statorového vinutia a X_r je rozptylová reaktancia.

Zo vzťahu (*3.6*) môžeme vidieť, že maximálny moment môžeme posúvať do oblasti väčších sklzov (menších otáčok) zmenou odporu fázy rotoru R_2. Moment M_{zv} sa aj nazýva moment zvratu. Ak prekročíme záťaž motoru hodnotu M_{zv}, motor sa zastaví. Charakteristika vľavo od maximálneho momentu je nestabilná. Charakteristika vpravo od maximálneho momentu je stabilná. Momentová preťažiteľnosť je aj označovaná ako pomer $M_{zv}/\ M_n$. Hodnota normálnych motorov je v rozmedzí 1,75 až 2,5.

Účinník motoru cos φ je pri chode naprázdno veľmi malý. Asynchrónny motor, ktorý je nezaťažený odoberá zo siete jalový výkon nutný pre vytvorenie magnetického poľa a tiež malý činný výkon na krytie strát naprázdno. Zaťažením účinníku sa výrazne zlepší, preto je dôležité, aby asynchrónne motory pracovali naprázdno len krátku dobu. Vzorec na výpočet mechanického výkonu (*3.7*). [6]

$$P_m = m \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} \cdot (1 - s) \qquad [W] \tag{3.7}$$

,kde: P_m je mechanický výkon, m je počet fáz, I_2 je fázový prúd, ktorý sa podieľa na tvorbe momentu, R_2 je činný odpor rotorového vinutia a s je sklz.

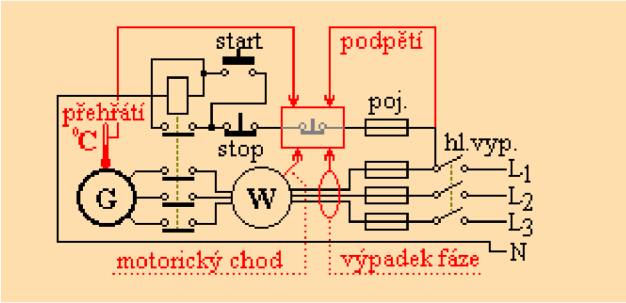
3.5 Asynchrónny generátor pripojený na sieť

Asynchrónny generátor je najčastejším zdrojom prúdu v súčasných malých vodných elektrárňach. Asynchrónny generátor je možné použiť skoro každý asynchrónny elektromotor s kotvou nakrátko .

Základné vlastnosti asynchrónneho generátora pripojeného na sieť:

- Elektromotor vo funkcii asynchrónneho generátora môže dodávať prúd do trojfázové rozvodnej siete.
- Za normálnych okolností nie je možné použiť v miestach, kde nie je táto sieť. Nemôže pracovať ako núdzový zdroj pri jej výpadku alebo ako jediný zdroj v neelektrifikovaných lokalitách.
- Nie je nutné zložité fázovanie generátoru k sieti.
- Generátor nevyžaduje žiadnu reguláciu napätia a frekvencie.
- Vodný motor poháňajúci tento generátor nepotrebuje regulátor otáčok. Generátor si sám turbínu pribrzdí na zodpovedajúce otáčky. Vhodný prevodový pomer zabezpečí, aby v ten okamih pracovala turbína v optimálnom režime.

Ak nie je vyžadovaná žiadna automatizácia a ak bude vodný motor obsluhovaný ručne, tak je pripojenie asynchrónneho generátora k sieti jednoduché:



Obr.3.5 Zjednodušené pripojenie asynchrónneho generátora k sieti [8]

Asynchrónny generátor "G" má jednotlivé fázy "L1"; "L2"; "L3"; pripojené k sieti tak, aby cez prevod sa otáčala turbína v rovnakom zmysle, keď ňou bude prechádzať voda. Červenou sú označené ochranné obvody. Chrániace generátor pred preťažením a inými vedľajšími stavmi. Wattmeter "W" prípadne elektromer ukazuje dodávku. Stýkač zaisťuje trvalé odpojenie generátora od siete pri jej výpadku. Pri výpadku elektriny by malo dôjsť aj k odstaveniu vodného motora. Väčšinou sa to rieši závažím, mechanickým náhonom od turbíny alebo hydraulicky z akumulátora.

3.5.1 Vhodný výber generátora pripojeného na sieť

Bolo by celkom logické použiť taký generátor, ktorého otáčky by boli čo najnižšie (400 až 740 ot./min.). To preto, aby sa ušetrilo na prevode. Nízkootáčkové stroje sú však veľké, drahé a zle sa chladia. Motory s vyššími otáčkami (2800 ot./min.) sú najmenšie, najlacnejšie a veľmi dobre sa chladia vlastným ventilátorom. Môžu sa použiť ako generátor, vtedy je ich možné za veľkej vody preťažiť. Pri výpadku siete by mohol odľahčený generátor dosiahnuť nebezpečne vysokých otáčok a mohol by sa roztrhnúť. Nepoužívajú sa teda vysokootáčkové motory vo funkcii asynchrónnych generátorov. Kompromisným riešením pre malé elektrárne je najbežnejšie používaný typ štvorpólový alebo šesťpólový. Na trhu je najdostupnejší a jeho cena primeraná. Má dostatočne účinné chladenie a krátkodobo vydrží aj otáčky odľahčenej turbíny. Ak elektrický stroj, ktorý pracuje s menovitými parametrami je väčšiu časť roka zaťažený len na 50%. S jeho účinnosťou to tiež nebude moc dobré. Zbytočne vzniká teplo nadmernými jalovým prúdmi a magnetizačnými stratami.

3.5.2 Prevádzka generátoru pripojeného na sieť

Veľmi jednoduchá je obsluha ako aj automatizácia. Vodný motor je zo začiatku uzavretý. K sieti sa pripojí generátor. Pracuje ako elektromotor a dosiahne asynchrónnych otáčok. Potom obsluha alebo automatika pozvoľna otvorí prívod vody do vodného motora. Vodný motor bude generátor zrýchľovať dokým ho roztočí na nadsynchrónne otáčky. Potom začnú agregáty dodávať energiu do siete. Tým dôjde k mechanickému zaťaženiu a agregáty sa na týchto otáčkach ustália. Agregáty sa odporúča zastavovať obráteným postupom. [8]

3.6 Asynchrónny generátor v ostrovnom režime

Asynchrónny generátor nie je schopný samostatnej výroby elektrickej energie ale obdobne ako synchrónny generátor pre svoju funkciu potrebuje budenie. Asynchrónny generátor pre svoju funkciu potrebuje jalovú energiu.

Ak si predstavíme asynchrónny motor a pripustíme možnosť výskytu končiaceho magnetizmu v jeho rotore, môžeme predpokladať, že sa bude po jeho roztočení na svorkách statorového vinutia indukovať " malé napätie ".

Pre nabudenie už roztočeného motora potrebujeme magnetizačný prúd. Máme k dispozícii " malé napätie " harmonického priebehu, môžeme ich využiť pre vytvorenie budiaceho (magnetizačného) prúdu . Naším záujmom je , aby vytvorenie tohto magnetizačného prúdu bolo bezstratové . Tieto naše požiadavky spĺňa svojimi vlastnosťami kondenzátor. Jeho závislosť prúdu na napätí je napísaná vzťahom (3.8)

$$i = C \cdot \frac{dU}{dt} \qquad [A] \tag{3.8}$$

,kde: i je okamžitá hodnota prúdu, C je kapacita kondenzátora, dU je zmena napätia a dt je časový úsek.

Okamžitá hodnota prúdu tečúca kondenzátorom je úmerná zmene napätia v čase, kde je kapacita kondenzátora konštantou úmernosti. Ak pripojíme tento kondenzátor k svorkám statora, začne ním pretekať prúd. Tým sa bude podieľať na vytvorenie magnetického indukčného toku rotora.

3.7 Budenie AG kondenzátormi v zapojení hviezdy + záťaž

Pre stanovenie vhodnej kapacity kondenzátorov potrebujeme poznať veľkosť magnetizačného prúdu. Maximálnu hodnotu fázového prúdu *35,35A* a napätie *325V* sme určili experimentálne podľa daného zapojenia. Pre prípadné praktické využitie a prehľadnosť budeme počítať s ich efektívnou hodnotou :

$$I_{ef} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \qquad [A] \tag{3.9}$$

$$I_{ef} = \frac{35{,}35}{\sqrt{2}} = 25A$$

$$U_{ef} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \qquad [V] \tag{3.10}$$

$$U_{ef} = \frac{325}{\sqrt{2}} = 230V$$

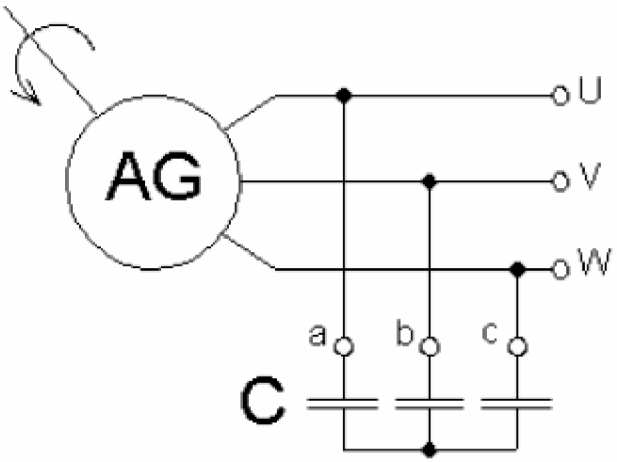
Aby sme pri napätí *230V* dosiahli statorového prúdu *25A* je potrebné, aby navrhnutý kondenzátor vykazoval „kapacitný odpor“ X_c príslušnej hodnoty.

$$X_c = \frac{U_{ef}}{I_{ef}} \tag{3.11}$$

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \tag{3.12}$$

$$\frac{U_{ef}}{I_{ef}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \tag{3.13}$$

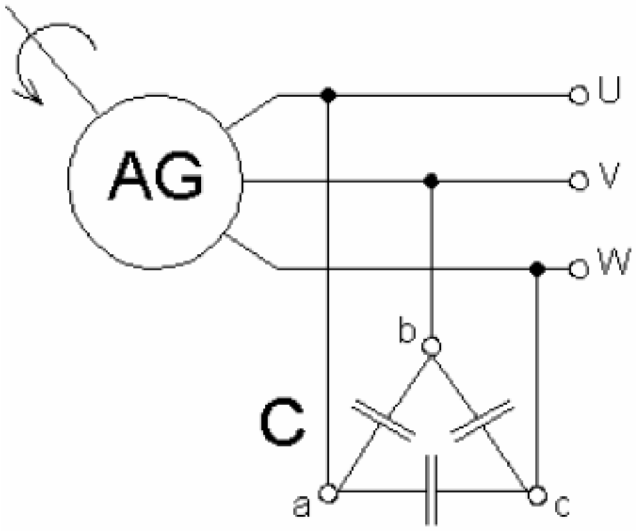
$$C = \frac{I_{ef}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_{ef}} \; ; \qquad C = \frac{25}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 230} = 345 \cdot 10^{-6}\, F \tag{3.14}$$



Obr.3.6 Budenie asynchrónneho generátoru kondenzátormi v zapojení do hviezdy (Y) [10]

Poznáme vzťah na výpočet kapacity kondenzátoru potrebného na nabudenie asynchrónneho generátora. Kondenzátor vypočítanej kapacity je potrebné pripojiť ku všetkým trom fázam generátora. V praxi sa používajú kondenzátorové batérie zapojené do trojuholníka. Prevedieme transfiguráciu z hviezdy (Y) na trojuholník (D). V prípade všetkých rovnakých kondenzátorov platí (3.15) :

$$C_{abc} = \frac{C}{3} \tag{3.15}$$



Obr.3.7 Budenie asynchrónneho generátoru kondenzátormi v zapojení do trojuholníka (D) [10]

Výpočet kapacity kondenzátorovej batérie (3.18) :

$$C_D = \frac{I_{ef}}{3 \cdot \omega \cdot U_{ef}} \tag{3.16}$$

kde

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \tag{3.17}$$

potom

$$C_{abc} = \frac{C}{3} = \frac{345 \cdot 10^{-6}}{3} = 115 \cdot 10^{-6}\ F \tag{3.18}$$

4 MODEL TURBÍNY

Otáčky a jednotkové prietoky sa dajú prepočítať na otáčky pre daný spád H a priemer obežného kolesa D_t podľa rovníc (4.1) a (4.2).

$$n_{11} = \frac{D_t \cdot n}{\sqrt{H}} \qquad [ot/min] \tag{4.1}$$

$$Q_{11} = \frac{Q}{D_t^2 \cdot \sqrt{H}} \qquad [m^3/s] \tag{4.2}$$

kde n_{11} sú jednotkové otáčky, n sú skutočné otáčky, H je spád, D_t je priemer obežného kolesa, Q_{11} je jednotkový prietok a Q je skutočný prietok turbínou.

Ďalší vstup do simulácie môže byť mechanický moment generátoru. Skutočný moment môže byť obdobne prepočítaný ako prietok a otáčky na jednotkový moment M_{11}(4.3).

$$M_{11} = \frac{M}{H \cdot D_t^3} \qquad [N.m] \tag{4.3}$$

Musíme určiť kvôli simulácii vzťah pre veľkosť mernej energie, ktorá predstavuje tlakové straty. Veľkosť mernej energie sa dá spočítať podľa vzťahu (4.4).

$$Y_{zk} = \frac{1}{2} \cdot v_k^2 \cdot \zeta k = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{Q}{S_k}\right)^2 \cdot \zeta k \qquad [-] \tag{4.4}$$

kde v_k je rýchlosť kvapaliny v klapke, ζk je stratový súčiniteľ klapky, Q je prietok a S_k je plocha klapky. Pre vyjadrenie stratového súčinitela je vhodné použiť prietokový súčiniteľ K_v (4.5).

$$\zeta k = 2 \cdot \left(\frac{S_k}{K_v \cdot N}\right)^2 \qquad [-] \tag{4.5}$$

kde N je konštanta s hodnotou 1/36000. Pre simuláciu je uvažovaná klapka, ktorá má plochu S_k = 0,1 m^2. Bude použitá závislosť prietokového súčinitela na otvorenie klapky z podľa (4.5), kde z má hodnotu 1 pre naplno otvorenú klapku a hodnotu 0 pre plne uzatvorenú klapku.

Z mernej energie Y_{zk} sa pomocou vzťahu (4.6) dá určiť veľkosť spádu, ktorý predstavuje straty na klapke H_{zk}.

$$H_{zk} = \frac{Y_{zk}}{g} \qquad [m] \tag{4.6}$$

Celkový spád H (4.7) na turbíne sa dá určiť ako rozdiel skutočného spádu H_g, straty spádu H_{zs} predstavujúce straty na výstupnom profile, straty spádu H_{zk} predstavujúce straty na klapke a dynamické zmeny spádu spôsobené zmenou prietoku H_d.

$$H = H_g - H_{zs} - H_{zk} - H_d \qquad [m] \tag{4.7}$$

Hodnota derivácie dynamickej zmeny spádu sa dá obecne napísať ako (4.8) :

$$\frac{dH_d}{dl} = \frac{1}{S \cdot g} \cdot \frac{dQ}{dt} \tag{4.8}$$

$$H_d = \frac{l}{S \cdot g} \cdot \frac{dQ}{dt} \qquad [m] \tag{4.9}$$

kde S je plocha potrubia príslušnej časti vodnej elektrárne, l je dĺžka potrubia príslušnej časti. Plochy budú rozdelené na dve časti kvôli simulácii. Zmena na privádzači a zmena na sacom otvore. Pre zjednodušenie sa bude predpokladať, že plocha privádzača je rovnaká ako klapky a plocha privádzača a sacieho otvoru je po celej dĺžke konštantná. Celkový okamžitý spád sa dá vyjadriť ako

$$H = H_g - H_{zs} - H_{zk} - \frac{l_p}{S_k \cdot g} \cdot \frac{dQ}{dt} - \frac{l_s}{S_{str} \cdot g} \cdot \frac{dQ}{dt} \qquad [m] \tag{4.10}$$

kde l_p je dĺžka privádzača, l_s je dĺžka sacieho otvoru a S_{str} stredná plocha sacieho otvoru.

Prevádzkové veličiny je nutné používať pri hodnote celkového spádu pri prepočte z jednotkových veličín. Turbína sa nikdy neroztočí do takých priebežných otáčok pri čiastočne otvorenej klapke ako by sa roztočila pri plnom otvorení klapky.

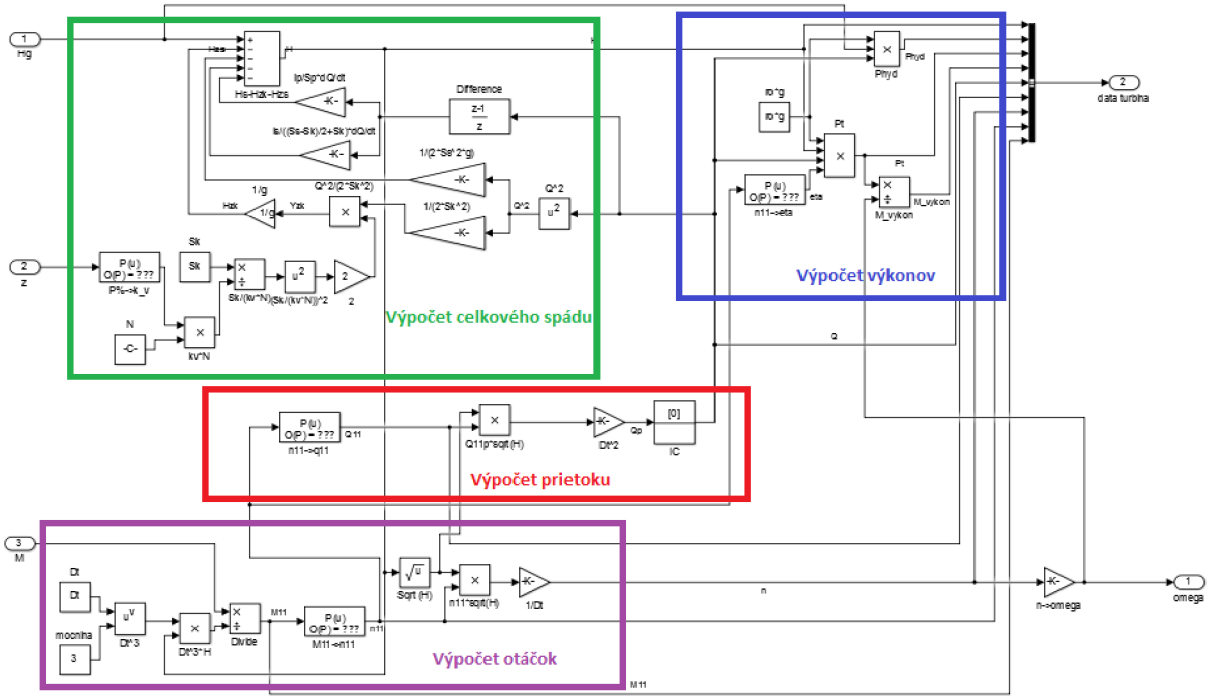
Pri známom celkovom spáde určuje mechanický moment generátora skutočné otáčky stroja. Tie potom určujú prietok, ktoré môže klapka obmedziť ako tiež účinnosť.

Pri známom prietoku môže byť spočítaný výkon turbíny ako tiež hydraulický príkon vodnej elektrárne. Hydraulický príkon sa dá vypočítať zo vzťahu (4.11).

$$P_{hyd} = Q \cdot H_g \cdot \rho \cdot g \qquad [W] \tag{4.11}$$

Model sa skladá z dvoch častí. V prvej časti sa nachádza simulovaný model turbíny, druhou časťou je model asynchrónneho generátoru s pripojením na sieť alebo asynchrónny generátor v ostrovnom režime. Na *obr.4.1* je možné vidieť simulovaný model turbíny vytvorený v programe Simulink, ktorý je farebne rozdelený na jednotlivé časti výpočtu: celkového spádu turbíny, výkonov, prietoku a otáčok.

Na výstupe turbíny je možné vidieť priebehy turbín. Jednotlivé ustálené hodnoty výkonu vodného toku, ako aj výkon samotnej turbíny. Ďalej sa prepočítava uhlová rýchlosť, ktorá sa prevádza na otáčky.



Obr. 4.1 Model turbíny v programe Simulink [16]

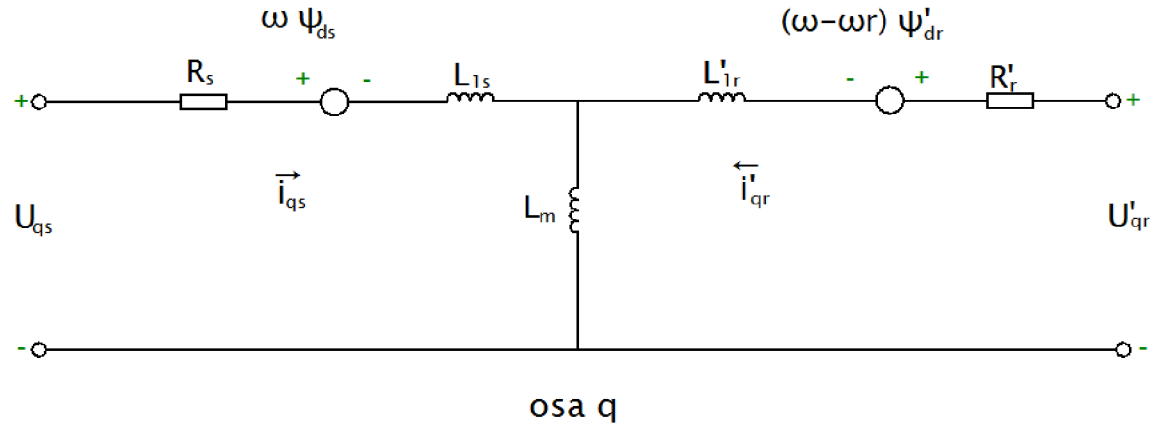
4.1 Zapojenie modelu s pripojením na sieť

Vinutý rotor je druh indukčného motora, kde sú vinutia rotora pripojeného cez krúžky na vonkajšie odpory. Nastavenie odporu umožňuje riadenie otáčok / momentu charakteristiky motora.

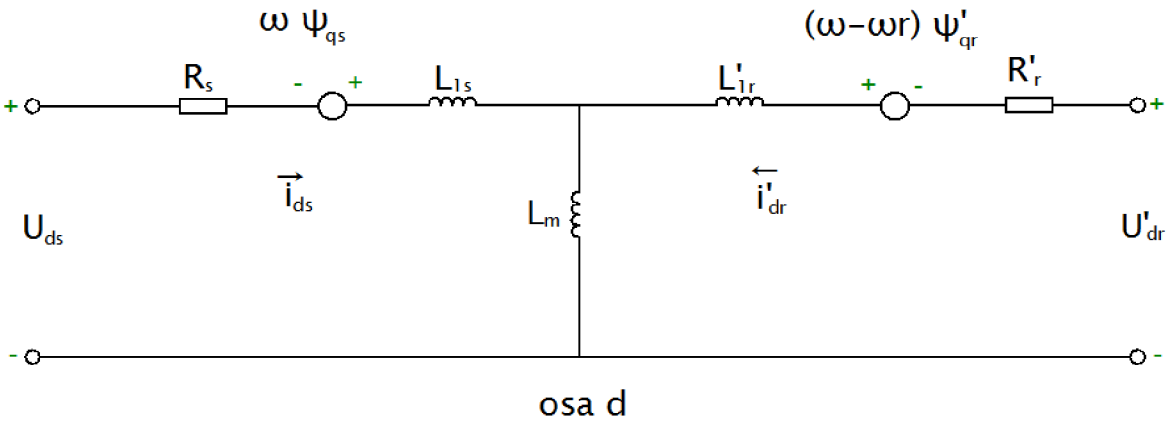
V porovnaní s kotvou nakrátko, rotor zberacích krúžkov motora má viac závitov vinutia. Indukované napätie je potom vyššie, prúd nižší, ako u kotvy nakrátko. Počas štartu typický rotor má 3 póly pripojené ku krúžkom. Každý pól je zapojený v sérii s premenným napájacím odporom. Dôležitou výhodou oproti motorom s kotvou nakrátko je vyšší rozbehový moment.

Vinutie rotora môže byť použité v rôznych formách nastavenia – s otáčkami. Určité typy pohonov s premennými otáčkami berie energiu z obvodu rotora a vracia ju späť do dodávky, čo umožňuje široký rozsah otáčok s vysokou energetickou účinnosťou. Dvojnásobne kŕmené elektrické stroje používajú zberné krúžky dodávané externé napájanie do obvodu rotora, čo umožňuje reguláciu otáčok v širokom rozsahu. V súčasnej dobe regulácia rýchlosti pri použití krúžkového motora je väčšinou nahradená asynchrónnym motorom s premennou frekvenciou. [14]

4.2 Zapojenie vinutia rotoru alebo kotvy nakrátko asynchrónneho stroja



Obr.4.2 Zapojenie vinutia rotoru alebo kotvy nakrátko AS osi q [15]



Obr.4.3 Zapojenie vinutia rotoru alebo kotvy nakrátko AS osi d [15]

Výpočet statorového napätia osi q (4.12) :

$$U_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + d\psi_{qs} \cdot ldt + \omega \cdot \psi_{ds} \qquad [V] \qquad (4.12)$$

,kde: R_s je odpor statorového vinutia, i_{qs} je statorový prúd osi q, $d\psi_{qs}$ je derivácia statorového toku osi q, l je rozptylová indukčnosť, dt je časový úsek, ω je referenčná uhlová rýchlosť a ψ_{ds} je statorový tok osi q.

Výpočet statorového napätia osi d (4.13) :

$$U_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + d\psi_{ds} \cdot ldt - \omega \cdot \psi_{qs} \qquad [V] \qquad (4.13)$$

,kde: R_s je odpor statorového vinutia, i_{ds} je statorový prúd osi d, $d\psi_{ds}$ je derivácia statorového toku osi d, l je rozptylová indukčnosť, dt je časový úsek, ω je referenčná uhlová rýchlosť a ψ_{qs} je statorový tok osi d.

Výpočet rotorového napätia osi q (4.14) :

$$U'_{qr} = R'_r \cdot i'_{qr} + d\psi'_{qr} \cdot ldt + (\omega - \omega_r) \cdot \psi'_{dr} \qquad [V] \qquad (4.14)$$

,kde: R'_r je odpor rotorového vinutia, i'_{qr} je rotorový prúd osi q, $d\psi'_{qr}$ je derivácia rotorového toku osi q, l je rozptylová indukčnosť, dt je časový úsek, ω je referenčná uhlová rýchlosť, ω_r je elektrická uhlová rýchlosť a ψ'_{dr} je rotorový tok osi q.

Výpočet rotorového napätia osi d (4.15) :

$$U'_{dr} = R'_r \cdot i'_{dr} + d\psi'_{dr} \cdot ldt - (\omega - \omega_r) \cdot \psi'_{qr} \qquad [V] \qquad (4.15)$$

,kde: R'_r je odpor rotorového vinutia, i'_{dr} je rotorový prúd osi d, $d\psi'_{dr}$ je derivácia rotorového toku osi d, l je rozptylová indukčnosť, dt je časový úsek, ω je referenčná uhlová rýchlosť, ω_r je elektrická uhlová rýchlosť a ψ'_{qr} je rotorový tok osi d.

Výpočet elektromagnetického momentu (4.16) :

$$M_e = 1.5p \cdot \left(\psi_{ds} \cdot i_{qs} - \psi_{qs} \cdot i_{ds}\right) \qquad [N/m] \qquad (4.16)$$

,kde: p je počet pólových dvojíc, i_{qs} je statorový prúd osi q, ψ_{ds} je statorový tok osi q, ψ_{qs} je statorový tok osi d a i_{ds} je statorový prúd osi d.

Výpočet statorového toku osi d (4.17) a výpočet statorového toku osi q (4.18) :

$$\psi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i'_{qr} \qquad [Wb] \tag{4.17}$$

$$\psi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i'_{dr} \qquad [Wb] \tag{4.18}$$

,kde: L_s je celková indukčnosť statora, i_{qs} je statorový prúd osi q, L_m je magnetizačná indukčnosť, i'_{qr} je rotorový prúd osi q, i_{ds} je statorový prúd osi d a i'_{dr} je rotorový prúd osi d.

Výpočet rotorového toku osi d (4.19) a výpočet rotorového toku osi q (4.20) :

$$\psi'_{qr} = L'_r \cdot i'_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \qquad [Wb] \tag{4.19}$$

$$\psi'_{dr} = L'_r \cdot i'_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \qquad [Wb] \tag{4.20}$$

,kde: L'_r je celková indukčnosť rotora, i'_{qr} je rotorový prúd osi q, L_m je magnetizačná indukčnosť, i_{qs} je statorový prúd osi q, i'_{dr} je rotorový prúd osi d a i_{ds} je statorový prúd osi d.

Výpočet celkovej indukčnosti statora (4.21) a výpočet celkovej indukčnosti rotora (4.22) :

$$L_s = L_{1s} + L_m \qquad [H] \tag{4.21}$$

$$L'_r = L'_{1r} + L_m \qquad [H] \tag{4.22}$$

,kde: L_{1s} je rozptylová indukčnosť statora, L_m je magnetizačná indukčnosť, L'_{1r} je rozptylová indukčnosť rotora.

5 SIMULAČNÝ PROGRAM

5.1 Matlab

Matlab je interaktívny systém pre vedecké a technické výpočty. Umožňuje riešiť veľkú oblasť numerických problémov, bez toho aby ste museli programovať vlastný program.

Pôvodne Matlab vznikol ako interaktívna nadstavba pre uľahčenie práce s maticami. Základným typom boli matice, ktoré na rozdiel od väčšiny iných systémov a jazykov nevyžadovali nastavovanie dimenzií.

Súčasný Matlab je omnoho väčší než len nadstavbou maticovej knižnici. Systém obsahuje vlastný súbor jazykov Matlab, v ktorom ide pripraviť tak aj definovať i nové funkcie.

V prostrediach, kde je možný grafický výstup, je k dispozícii veľmi silná podpora pre tvorbu v uživateľskom prostredí a vizualizácii dát. Základná funkcia umožňuje vizualizáciu 2D a 3D dát v grafoch s množstvom voliteľných parametrov, ktoré ide po doplnení legendou a popisu os ľahko vytlačiť.

Najdôležitejšou časťou Matlabu sú "knižnice" funkcie ,ktoré sú nazývané i “toolboxy“. Toolboxy obsahujú vždy uceleným spôsobom dokumentácie, ktorým možno spracovať obor numerickej matematiky, analytickej matematiky, štatistiky, systémového prístupu k reguláciám a ďalším oborom, v ktorých nachádza Matlab uplatnenie.

Po výpočte základných vlastností systému Matlab je možné si predstaviť uplatnenie systému v typických oblastiach pre jeho použitie:

- Matematické výpočty
- Vývoj algoritmov
- Modelovanie a simulácie
- Analýza dát a vizualizácia
- Vedecká a inžinierska grafika
- Vývoj aplikácií ako aj uživateľského „interface“

5.2 Simulink

Simulink postupne prerástol z knižnice funkcií určených k simulácii jednoduchých lineárnych spojitých a diskrétnych systémov v samostatný subsystém s dokonalým uživateľským rozhraním. Základom prídavku simulink sú bloky, ktoré reprezentujú elementárne dynamické systémy. Interaktívny spôsob tvorby a simulácie modelov sa spúšťajú z príkazových riadkov systému Matlab príkazom simulink. Po spustení je vytvorené okno pre tvorbu nového modelu a okno obsahujúce základnú ponuku otvorených knižníc - zdrojov signálov, základných spojitých, diskrétnych a nelineárnych blokov a blokov pre zobrazovanie a ukladanie signálov. Ďalšia vrstva funkcií umožňuje už komfortnejší neinteraktívna tvorba modelových systémov. Pre obvyklého uživateľa však nie je nutné o implementácii a programovaní modelov premýšľať. [9]

6 SIMULÁCIE

6.1 Simulácia asynchrónneho generátora s pripojením na sieť

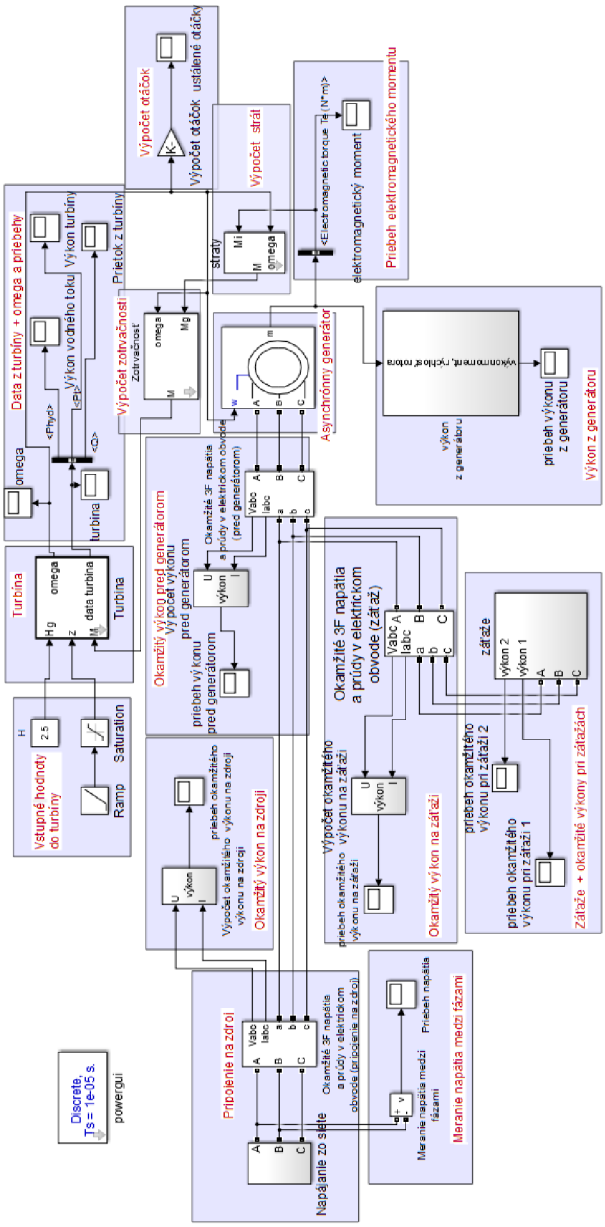
Pripojenie napájame zo siete *400V/50Hz* čím roztočíme asynchrónny generátor a ďalej turbínu v malej vodnej elektrárni. Počas zapnutia je pripojená jedna záťaž a po ustálení sa pripojí druhá záťaž, čím sa zvýši o dvojnásobok prúdu vo vedení a tým aj výkon na zdroji a na záťaži. Hodnoty turbíny a generátoru sa nezmenia viz. tab.6.1.1 a 6.1.2 Spôsobené je to tým, že si sieť udržiava stálu frekvenciu 50Hz a elektromagnetický moment.

Pripojenie na sieť jedna záťaž			
n [ot/min]	P_{tur} [W]	P_{toku} [W]	Q_{tur} [m3/s]
1505	2411	2843,5	0,115
Hodnoty pri zdroji			
I [A]	U [V]	P [W]	
22,5	325	7675	
Hodnoty zo záťaží			
I [A]	U [V]	P [W]	
20,5	325	9960	
Pred generátorom			
I [A]	U [V]	P [W]	
16,5	325	2285	
Pred záťažou		**Generátor**	
$P_{záťaž1}$ [W]	$P_{záťaž2}$ [W]	M [Nm]	P [W]
9960	0	15,1	2384

Pripojenie na sieť dve záťaže			
n [ot/min]	P_{tur} [W]	P_{toku} [W]	Q_{tur} [m3/s]
1505	2411	2843,5	0,115
Hodnoty pri zdroji			
I [A]	U [V]	P [W]	
40	325	17600	
Hodnoty zo záťaží			
I [A]	U [V]	P [W]	
40,5	325	19900	
Pred generátorom			
I [A]	U [V]	P [W]	
16,5	325	2300	
Pred záťažou		**Generátor**	
$P_{záťaž1}$ [W]	$P_{záťaž2}$ [W]	M [Nm]	P [W]
9950	9950	15,1	2384

Tab.6.1.1 a 6.1.2: Hodnoty pripojenia na sieť jedna záťaž/dve záťaže

Z tabuliek vyplýva, že otáčky ostávajú konštantné, keďže sa nemení záťaž z generátoru čo môžeme sledovať pomocou jeho výkonu. Mení sa len výkon zo siete.



Obr.6.1.1 Model asynchrónneho generátora pripojeného na sieť

6.2 Simulácia asynchrónneho generátora v ostrovnom režime

Zapojenie v ostrovnom režime budíme generátor pomocou kondenzátorovej batérie. Veľkosť batérie sme určili vyššie (3.18). Túto hodnotu batérie sme vybrali ako východiskovú. Z nej sme vybrali rôzne hodnoty batérie : -10%; -20%; +10%; +20% a spravili sériu simulácii pri rôznych záťažiach viz. tabuľky nižšie. Predpokladáme idealizovanú batériu, preto sa pred ňou objavuje len jalový výkon.

Plná záťaž				
Ostrovný režim kapacita batérie 345 µF (0%)				
n [ot/min]	Ptur [W]	Ptoku [W]	Qtur [m3/s]	M [Nm]
1484,5	2405,7	2836,6	0,115	15,3
Pred batériou		Pred generátorom		
I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	P [W]
17	155	20	155	2312,5
Pred záťažou				
I [A]	U [V]	P [W]	f [Hz]	
10	155	2312,5	50,5	

Polovičná záťaž				
Ostrovný režim kapacita batérie 345 µF (0%)				
n [ot/min]	Ptur [W]	Ptoku [W]	Qtur [m3/s]	M [Nm]
1465,3	2400	2830	0,115	15,45
Pred batériou		Pred generátorom		
I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	P [W]
22,5	220	23	220	2278
Pred záťažou				
I [A]	U [V]	P [W]	f [Hz]	
7	220	2278	48,6	

Tab.6.2.1 a 6.2.2: Hodnoty kapacitnej batérie 345 µF (0%) plná záťaž / polovičná záťaž

Plná záťaž				
Ostrovný režim kapacita batérie 310,5 µF (-10%)				
n [ot/min]	Ptur [W]	Ptoku [W]	Qtur [m3/s]	M [Nm]
1567,2	2424	2865	0,117	14,6
Pred batériou		Pred generátorom		
I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	P [W]
17	155	17,5	155	2333
Pred záťažou				
I [A]	U [V]	P [W]	f [Hz]	
10	155	2333	52	

Polovičná záťaž				
Ostrovný režim kapacita batérie 310,5 µF (-10%)				
n [ot/min]	Ptur [W]	Ptoku [W]	Qtur [m3/s]	M [Nm]
1545,5	2421	2857	0,116	14,8
Pred batériou		Pred generátorom		
I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	P [W]
22	220	22	220	2307
Pred záťažou				
I [A]	U [V]	P [W]	f [Hz]	
7	220	2307	51	

Tab.6.2.3 a 6.2.4: Hodnoty kapacitnej batérie 310,5 µF (-10%) plná záťaž / polovičná záťaž

Plná záťaž				
Ostrovný režim kapacita batérie 276 µF (-20%)				
n [ot/min]	Ptur [W]	Ptoku [W]	Qtur [m3/s]	M [Nm]
1665	2427	2901	0,118	13,75
Pred batériou		Pred generátorom		
I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	P [W]
15	155	17,5	155	2338
Pred záťažou				
I [A]	U [V]	P [W]	f [Hz]	
10	155	2338	55	

Polovičná záťaž				
Ostrovný režim kapacita batérie 276 µF (-20%)				
n [ot/min]	Ptur [W]	Ptoku [W]	Qtur [m3/s]	M [Nm]
1640,5	2428	2892	0,118	13,95
Pred batériou		Pred generátorom		
I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	P [W]
21	220	22	220	2320
Pred záťažou				
I [A]	U [V]	P [W]	f [Hz]	
7	220	2320	54,8	

Tab.6.2.5 a 6.2.6: Hodnoty kapacitnej batérie 276 µF (-20%) plná záťaž / polovičná záťaž

Plná záťaž				
Ostrovný režim kapacita batérie 379,5 µF (+10%)				
n [ot/min]	Ptur [W]	Ptoku [W]	Qtur [m3/s]	M [Nm]
1413,7	2377	2815	0,115	15,88
Pred batériou		Pred generátorom		
I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	P [W]
17	155	20	155	2281
Pred záťažou				
I [A]	U [V]	P [W]	f [Hz]	
10	155	2281	46,7	

Polovičná záťaž				
Ostrovný režim kapacita batérie 379,5 µF (+10%)				
n [ot/min]	Ptur [W]	Ptoku [W]	Qtur [m3/s]	M [Nm]
1396,5	2369	2810	0,114	16
Pred batériou		Pred generátorom		
I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	P [W]
23,5	220	24	220	2242
Pred záťažou				
I [A]	U [V]	P [W]	f [Hz]	
7	220	2242	46,5	

Tab.6.2.7 a 6.2.8: Hodnoty kapacitnej batérie 379,5 µF (+10%) plná záťaž / polovičná záťaž

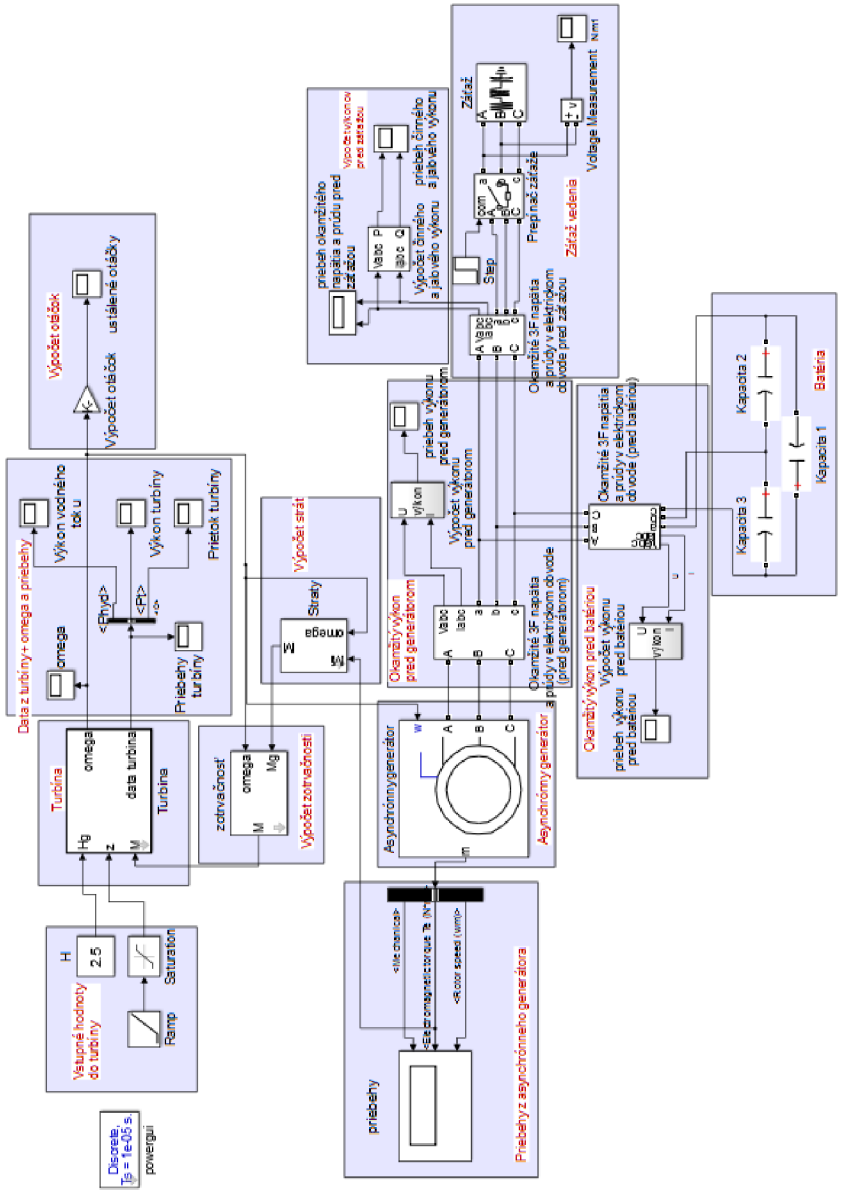
Plná záťaž				
Ostrovný režim kapacita batérie 414 µF (+20%)				
n [ot/min]	Ptur [W]	Ptoku [W]	Qtur [m3/s]	M [Nm]
1352,2	2344	2799	0,114	16,36
Pred batériou		Pred generátorom		
I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	P [W]
17	155	20,5	155	2245
Pred záťažou				
I [A]	U [V]	P [W]	f [Hz]	
10	155	2245	45	

Polovičná záťaž				
Ostrovný režim kapacita batérie 414 µF (+20%)				
n [ot/min]	Ptur [W]	Ptoku [W]	Qtur [m3/s]	M [Nm]
1336	2334	2795	0,114	16,5
Pred batériou		Pred generátorom		
I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	P [W]
23,5	220	25	220	2202
Pred záťažou				
I [A]	U [V]	P [W]	f [Hz]	
7	220	2202	44,4	

Tab.6.2.9 a 6.2.10: Hodnoty kapacitnej batérie 414 µF (+20%) plná záťaž / polovičná záťaž

Z tabuliek pre zníženie kapacity 6.2.3, 6.2.4 a Tab.6.2.5 , 6.2.6 vyplýva, že sa zvyšovaním prietoku turbíny zväčšujú otáčky v systéme ako aj výkon turbíny, vodného toku a generátoru. Pri zväčšení otáčok vyplýva, že sa zvýši aj frekvencia. Pri väčšom prietoku turbíny sa nám zmenšuje elektromagnetický moment. Pri polovičnej záťaži sa nám zväčší napätie a tým aj prúd v systéme, ale zníži sa prúd pri záťaži.

Z tabuliek pre zväčšenie kapacity 6.2.7, 6.2.8 a Tab.6.2.9 , 6.2.10 vyplývajú opačné výsledky ako v tabuľkách pre zníženie kapacít. Teda pri zmene prietoku vplyvom zmeny momentu musí vplyvom obmedzenia strát na klapke a výstupnom sacom otvore dôjsť ku zvýšeniu spádu na turbíne. Vplyvom prechodového deja pri zmene prietoku dôjde k navýšeniu spádu na turbíne. Kvôli tomu, že sa voda snaží udržať v rámci dynamických dejov rovnaký prietok. Vplyvom menšieho prietoku sa nám znížia otáčky na turbíne. Pri polovičnej záťaži sa snaží systém vykompenzovať túto stratu zvýšením napätia a prúdu v okolí generátoru a batérie, ale zmenšením prúdu pri záťaži.



Obr.6.2.1 Model asynchrónneho generátora v ostrovnom režime

7 ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo zoznámiť sa s možnosťami využitia asynchrónneho stroja ako generátor. Poukázali sme na asynchrónne a synchrónne generátory. Ich vlastnosti v pripojení do siete a v ostrovnom režime. Vyhodnotili sme, že sa viac používajú asynchrónne generátory v malých vodných elektrárňach a to z dôvodu nízkej výrobnej ceny, pretože sú to sériové výrobky a konštrukčne zhodné s asynchrónnymi motormi. Pracujú s konštantnými otáčkami, preto sa neuplatňujú výkonové regulátory.

V druhej časti práce sme vytvorili model vodnej turbíny v programe Simulink a vysvetlili jeho princíp výpočtu celkového spádu, otáčok, výkonov a prietoku. Potom sme pripojili vodnú turbínu k asynchrónnemu generátoru v pripojení na sieť 400V/50Hz. K modelu sú pripojené 2 záťaže. Najprv je pripojená jedna záťaž. Po ustálenom čase sa pripojí skokovo druhá záťaž, ktorá bola dovtedy vypnutá. V druhom modeli sme pripojili vodnú turbínu s asynchrónnym generátorom v ostrovnom režime. Generátor sme budili s vypočítanou kapacitnou batériou o veľkosti 345 μF, ktorú sme zapojili do trojuholníku ako sa najčastejšie používa v praxi. Po nabehnutí asynchrónneho generátora sa priamo skokovo pripojí záťaž.

V poslednej časti práce sme previedli sériu simulácií na modeloch v pripojení na sieť a v ostrovnom režime. V pripojení na sieť sme rozbiehali asynchrónny generátor zo zdroja 400V/50Hz a mali pripojenú jednu záťaž. Pri pripojení druhej záťaže (rovnakej veľkosti) a ustálení hodnôt sme zistili, že sa nám hodnoty prúdov pri zdroji a záťaži zdvojnásobili. To isté platí pre okamžité výkony pri záťaži sa nám zdvojnásobili. Čo sa týka turbíny a generátora hodnoty otáčok, výkonov a elektromagnetického momentu ostali nezmenené. Otáčky zostávajú konštantné, keďže sa nemení záťaž z generátoru (výkon). Mení sa len výkon zo siete. V modeli asynchrónneho generátora pripojeného v ostrovnom režime sme si určili výpočtom referenčnú kapacitu batériu o veľkosti 345 μF (0%) od ktorej sme spravili sériu simulácii: -10%; -20%; +10%; +20%. Z ktorej vyplýva, že pri zmene prietoku vplyvom zmeny momentu musí vplyvom obmedzenia strát na klapke a výstupnom sacom otvore dôjsť ku zvýšeniu spádu na turbíne. Vplyvom prechodového deja pri zmene prietoku dôjde k navýšeniu spádu na turbíne. Kvôli tomu, že sa voda snaží udržať v rámci dynamických dejov rovnaký prietok. Z toho vyplýva, že čím väčší otvorený prietok, tým väčšie otáčky na turbíne. Podľa otáčok sa nám mení aj frekvencia, teda čím väčšie otáčky tým väčšia frekvencia. Z toho vyplýva aj čím väčšie otáčky, tým aj väčší výkon v systéme. Pri polovičnej záťaži sa snaží systém vykompenzovať túto stratu zvýšením napätia a prúdu v okolí generátoru a batérie, ale zmenšením prúdu pri záťaži. Vznikajú väčšie straty v systéme a teda aj menšie výkony v porovnaní s plnou záťažou.

LITERATÚRA

[1] ŠTOLL, Čestmír, Stanislav KRATOCHVÍL a Miroslav HOLATA. *Využití vodní energie: [vysokošk. učebnice : určeno pro posl. staveb. fak. vodohosp. směru*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1977, 612 p.

[2] GABRIEL, Pavel, Petr KALANDRA a František ČIHÁK. *Malé vodní elektrárny*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1998, 321 s. ISBN 8001018121.

[3] E.D.Basset, F.M. Potter, *Capacitive Excitation of Induction Generators*, Electrical Engineering, vol.54, 1935, pp.540-545

[4] PPDS 2014 – pravidla provozování distribuční soustavy (PPDS). *Http://www.eon-distribuce.cz/* [online]. 2014 [cit. 2015-10-21]. Dostupné z: http://www.eon-distribuce.cz/dokumenty-ke-stazeni/elektrina-2/predpisy/pravidla-provozovani-distribucni-soustavy/ppds-2014-pravidla-provozovani-distribucni-soustavy-ppds/PPDS_2014.pdf

[5] [online]. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: http://www.teslasociety.com/hall_of_fame.htm

[6] *ONDRŮŠEK, Č., Elektrické stroje* [online]. [cit. 2015-11-02]. Dostupné z: http://www.uvee.feec.vutbr.cz/Predmety/BESB/Skripta/elektricke_stroje.pdf

[7] VOŽENÍLEK, Petr a Josef JANOUŠEK. *Základy silnoproudé elektrotechniky*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 139 s. ISBN 8001031357.

[8] *Asynchronní generátor* [online]. [cit. 2015-11-08]. Dostupné z: http://mve.energetika.cz/sikovneruce/asynchronni-generator.htm

[9] *Matlab* [online]. [cit. 2015-11-08]. Dostupné z: http://www.352.vsb.cz/uc_texty/AutoRizMatlab/kap1.html

[10] HORNÍK, Vincenc. *Problematika provozu asynchronních generátorů malých vodních elektráren v praxi a možnosti jejich využití pro napájení ostrovních sítí*. 2013, 65 l.

[11] *A new generation of small hydro and pumped-hydro power plants: Advances and future challenges* [online]. 2014 [cit. 2015-11-25]. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113008575

[12] *An Improved Dynamic Model for a SinglePhase Generator based on Three-Phase Cage Rotor Induction Machine*[online]. 2015 [cit. 2015-12-04]. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=

[13] *Roční zpráva o provozu ES ČR pro rok 2014* [online]. 2014 [cit. 2015-12-08]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2014.pdf/933fc41a-ad79-4282-8d0f-01eb25a63812

[14] *Wound Rotor Induction Motors* [online]. [cit. 2015-12-08]. Dostupné z: http://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-13/wound-rotor-induction-motors/

[15] MATLAB R2014b [program],2014 [cit. 2015-12-08].

[16] HUZLÍK, R. Motor-generátor pro vírovou turbínu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 100 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.