

4 Chránění generátorů elektráren malých výkonů

4.1 Nastavení základních číslicových ochran pro chránění generátorů elektráren malých výkonů

Větrné a malé vodní elektrárny jsou řazeny z hlediska výkonu mezi malé zdroje elektrické energie rozptýlené do různých lokalit. Při úvahách o realizaci takových elektráren je nutné zvažovat aspekty ekonomické a technické. Takto vyrobená elektrická energie může být použita k vlastní spotřebě výrobce - např. k osvětlení, vytápění objektů, k ohřevu vody. U větších zařízení je také možné dodávat vyrobenou elektrickou energii do veřejné rozvodné sítě na základě smluvního vztahu s distribuční společností. Výhodné je použití malých větrných elektráren pro výrobu elektrické energie v místech bez přípojky elektrického energie z rozvodné sítě (např. rekreační zařízení).

Pro tyto elektrárny mohou být použity asynchronní nebo synchronní generátory, méně často dynamo a v poslední době i generátory reluktanční. Pro lepší časové využití se mezi asynchronní či synchronní generátor a síť vkládá statický frekvenční měnič. U takovéto soustavy se napětí nejdříve usměrní a pak upraví na požadovanou frekvenci.

Jak bylo uvedeno v těchto elektrárnách jsou velmi často používány asynchronní generátory. Asynchronní stroje podobně jako většina strojů malého výkonu jsou vyráběny jako motory. Pro chod v generátorickém režimu je nutno upravit některé jeho charakteristické veličiny. Jde zejména o otáčky, výkon, účinník, proud a účinnost stroje. Některé ochrany se užívají bez rozdílu toho o jaký druh generátoru jde. Některé jsou však specifické pro ten který druh použitého generátoru. Podle „Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy“, příloha 4, listopad 2004 je zapotřebí zajistit ochrany s následujícími funkcemi viz tabulka 4.1.

Po dohodě s energetickými závody lze upustit od 2. stupně uvedených ochran. Dále musí obsahovat ochrany nadproudové, zkratové a proti zemnímu zkratu. V některých případech může být s ohledem na síťové poměry třeba jiné nastavení ochran. Proto je jejich nastavení vždy nutné odsouhlasit s provozovatelem rozvodné sítě. Vhodným podkladem pro tato nastavení jsou studie dynamického chování zdrojů v dané síti.

Pokud je generátor na nízké napětí a má být připojen do distribuční sítě na př. 22 kV, je nutné pamatovat na jištění ze strany této sítě. V případě, kdy generátor nepracuje odebírá ze sítě jalovou energii. V tomto případě je proud asi 30-40 % proudu jmenovitého. Při poruše např. vinutí transformátoru může dojít k přetížení a proto je nutné nadproudové jištění.

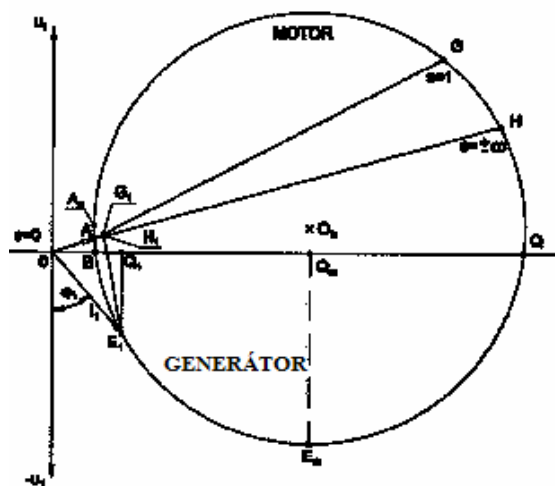
Tab. 4.1 Nastavení základních číslicových ochran generátorů elektráren malých výkonů.

Funkce	rozsah nastavení	Příklad nastavení	Časové zpoždění	Příklad nastavení
Podpětí 1.stupeň $U<$	$0,70 U_n$ až $1,0 U_n$	$90 \% U_n$	$t_{u<}$	0,5 s
Podpětí 2.stupeň $U<<$	$0,70 U_n$ až $1,0 U_n$	$80 \% U_n$	$t_{u<<}$	0,1 s
Přepětí 1 .stupeň $U>$	$1,0 U_n$ až $1,2 U_n$	$110\% U_n$	$t_{u>}$	0,5 s
Přepětí 2. stupeň $U>>$	$1,0 U_n$ až $1,2 U_n$	$120 \% U_n$	$t_{u>>}$	0,1 s
Podfrekvence 1 .stupeň $f<$	48 Hz až 50 Hz	49,8 Hz	$t_{f<}$	0,5 s
Podfrekvence 2.stupeň $f<<$	48 Hz až 50 Hz	49,5 Hz	$t_{f<<}$	0,1 s
Nadfrekvence $f>$	50 Hz až 52 Hz.	50,2 Hz	$t_{f>}$	0,5 s

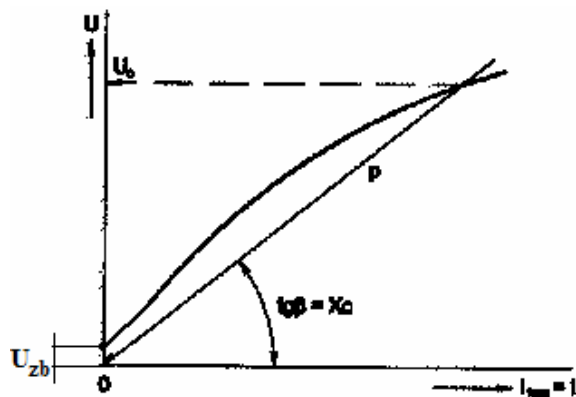
4.2 Asynchronní generátory jako zdroje elektrické energie větrných elektráren

4.2.1 Asynchronní stroj pracující jako generátor

Asynchronní generátor je často volen pro svoji jednoduchou konstrukci, nenáročnost na údržbu a tedy i méně nákladné investiční a provozní náklady. Na obr. 4.1 je kruhový diagram asynchronního generátoru z něhož mohou být určeny veškeré potřebné parametry stroje.



Obr. 4.1 Kruhový diagram AG



Obr. 4.2 Budicí charakteristika AG

Aby asynchronní stroj mohl pracovat jako generátor, musí být splněny minimálně tyto podmínky:

- jeho otáčky musí být nadsynchronní
- musí mít k dispozici zdroj jalové energie.

Jalový výkon generátoru určíme z následujícího vztahu

$$Q = m_1 X_{1\sigma} I_1^2 + m_1 U_i I_0 \cos \vartheta + m_1 U_i I_2 \sin \psi_2 \quad (4.1)$$

kde je jalový příkon

$m_1 X_{1\sigma} I_1^2$	na rozptylové magnetické pole statoru
$m_1 U_i I_0 \cos \vartheta$	na zmagnetování magnetického obvodu stroje
$m_1 U_i I_2 \sin \psi_2$	na rozptylové pole rotoru.

Jalový příkon může být generátoru dodáván

- z distribuční sítě s níž paralelně spolupracuje
- z paralelně připojených kondenzátorů.

Minimální hodnotu kapacity kondenzátorové baterie lze určit z měření naprázdno. Protože účinnost stroje při chodu naprázdno dosahuje velmi nízkých hodnot a svitkové kondenzátory vysokých výkonů se vyrábí s tolerancemi $\pm 20\%$, lze proud naprázdno považovat za magnetizační. Potom se celé měření může zjednodušit. Asynchronní stroj bude připojen k síti a sledovanou veličinou bude pouze proud naprázdno. Stroj musí být odpojen od pohonu. Dále se vychází z předpokladu rovnosti reaktance stroje a rovnosti reaktance kondenzátoru.

$$x_C = x_L \quad (4.2)$$

Protože podle výše popsaného zjednodušení se může považovat proud I_0 za magnetizační, velikost požadované kapacitní reaktance bude

$$x_C = \frac{U_{1f}}{I_0} \quad (4.3)$$

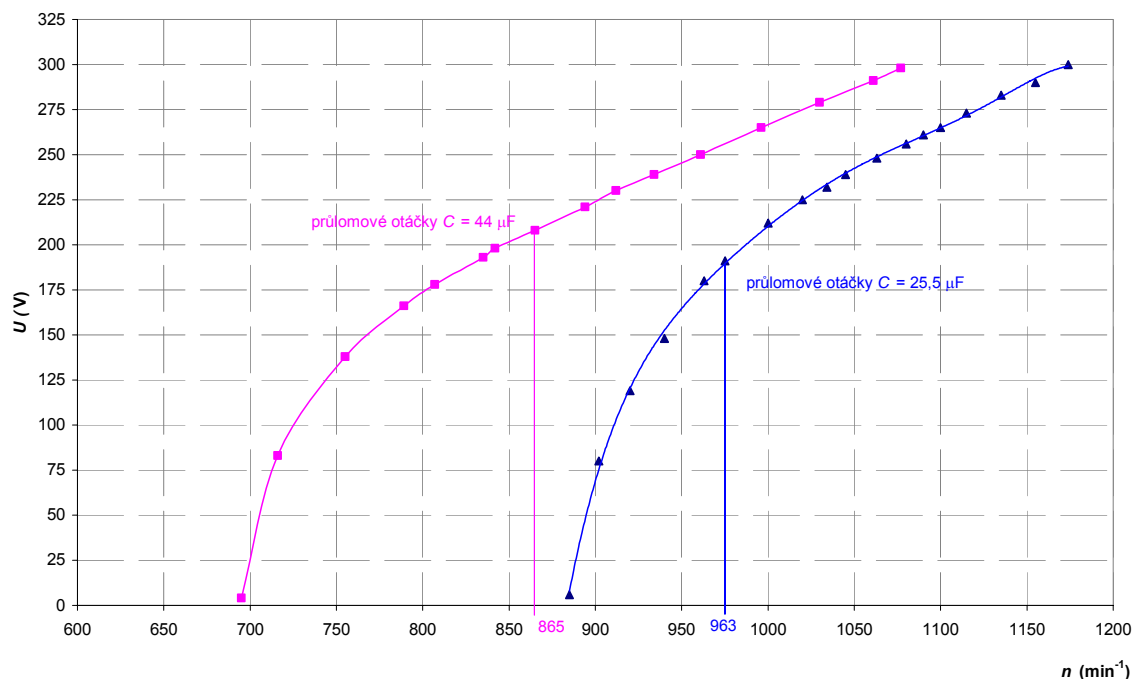
kde U_{1f} je fázové napětí generátoru, a hodnota hledané kapacity bude potom

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} \quad (4.4)$$

Připojí-li se ke generátoru kondenzátorová baterie této kapacity, potom svorkové napětí při otáčkách blízcích se synchronním (otáčky naprázdno) bude U_{1f} , při frekvenci f .

Rozběh nabuzeného generátoru

Je-li ke generátoru připojena kondenzátorová baterie, potom napětí roste s otáčkami úměrně, jak je zřejmé z naměřené budící charakteristiky generátoru malého výkonu na obr. 4.3.



$$C = 25 \mu\text{F}, C = 44 \mu\text{F}$$

Obr. 4.3 Budící charakteristika asynchronního generátoru.

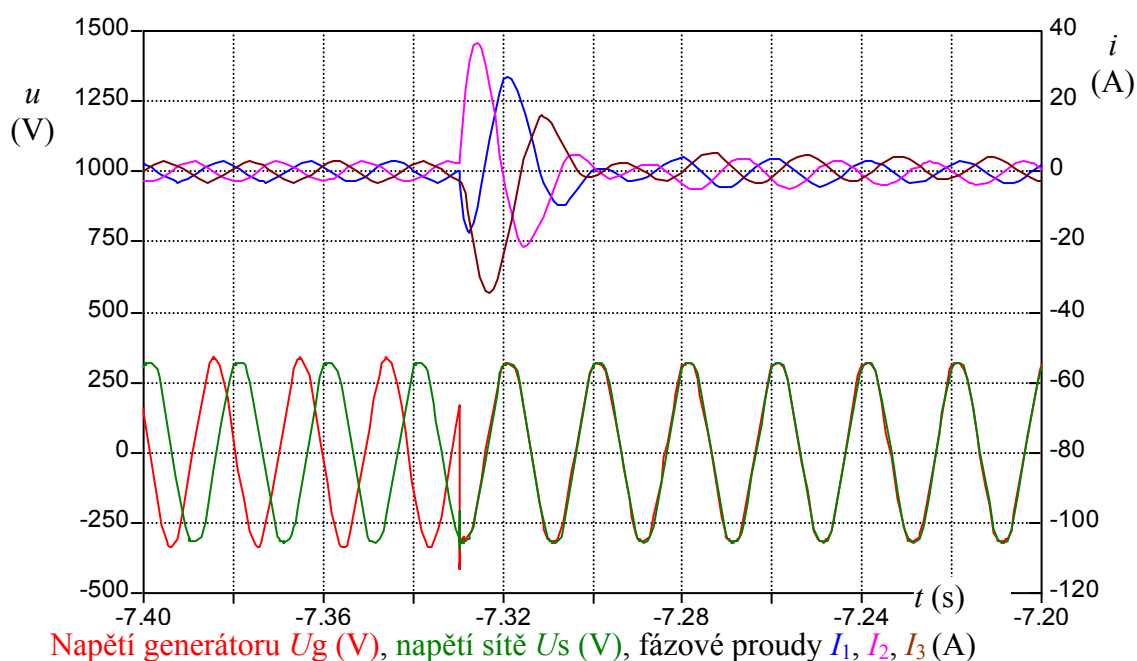
Po roztočení generátoru (při nízkých otáčkách) se na svorkách objeví napětí dané remanentním magnetizmem. Jde o remanentní napětí kolísající v rozmezí 5 až 10 V. Zvyšováním otáček dojde při jejich určité hodnotě (průlomové otáčky-viz. obr. 4.3) ke

skokovému nárůstu napětí. Toto napětí se ustálí na hodnotě U_0 . Napětí U_0 a otáčky nabuzení, jsou dány kapacitou kondenzátorů a reaktancemi stroje. Velikost napětí v závislosti na otáčkách stroje při parametru kapacity kondenzátorové baterie je vykreslena na obr. 4.3. Proud protékající kondenzátory a statorovým vinutím stroje je posunutý za napětím o 90° , jde tedy o jalový proud zajišťující tvorbu magnetického pole stroje.

Nabuzený generátor je zatěžován ztrátami naprázdno a ztrátami v kondenzátorech. Tato zátěž způsobí skluz (naměřily jsme u 6ti pólového stroje výkonu 1,1kW asi 2%, tzn. že při 1020 min^{-1} byla pro vypočtenou kapacitu kondenzátorové baterie frekvence generátoru 50 Hz) a při těchto otáčkách bude tedy nabuzené napětí odpovídat jmenovitému napětí sítě.

Připojování asynchronního generátoru paralelně k distribuční síti

Samotné připojování k síti je v případě neshody okamžitých hodnot napětí, frekvence a fázového posuvu sítě a generátoru doprovázeno proudovým rázem o velikosti více než 10ti násobku jmenovitého proudu a přepětovou špičkou velké strmosti a amplitudy (viz. obr. 4.4).

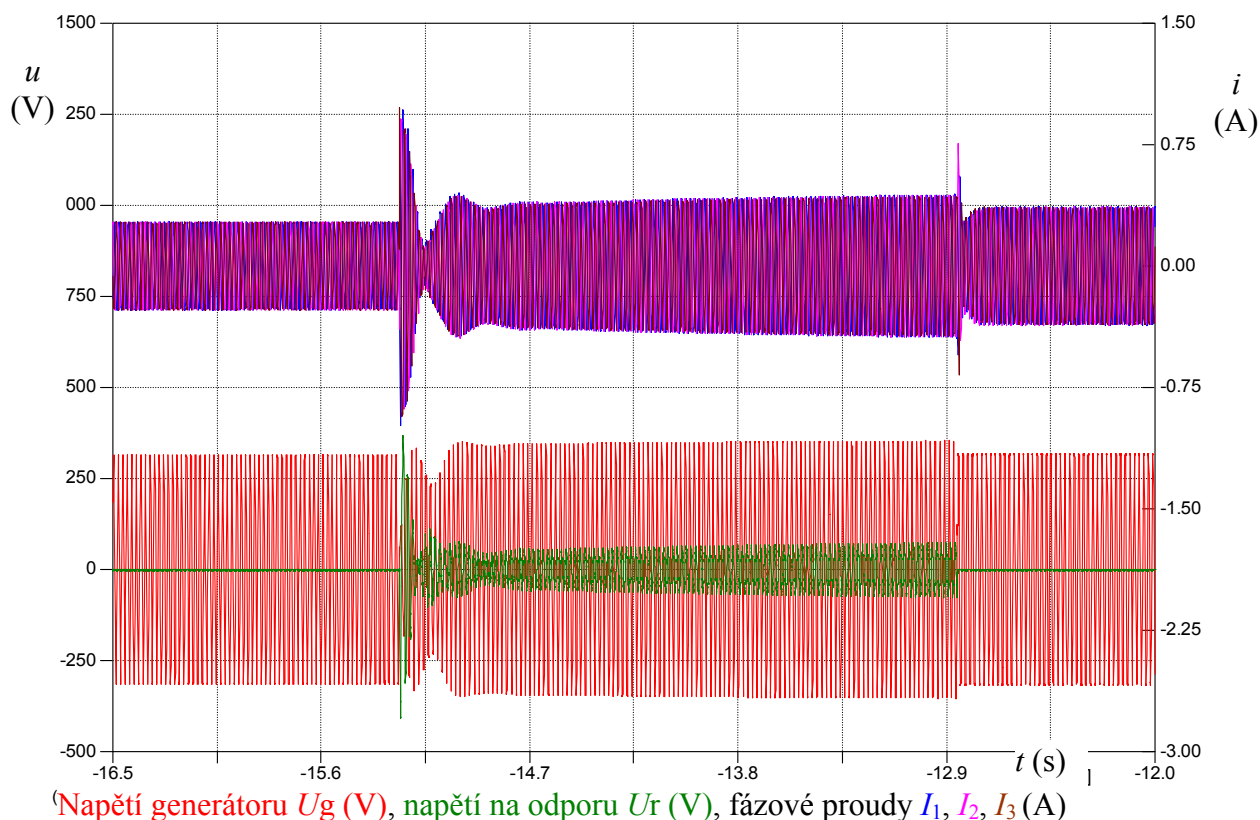


Obr. 4.4 Průběh napětí při připojování AG k síti.

Tento proudový ráz se dá snížit připojením AG k síti přes odpory zapojenými do série k vinutí generátoru. Po definované časové prodlevě se tyto odpory překlenou (vyřadí). V tomto případě tedy vzniknou dva menší proudové rázy. Bylo změřeno, že při optimální hodnotě odporu amplitudy proudových rázů nedosahují ani poloviční hodnoty jmenovitého proudu.

Připojování AG k síti přes odpory je uvedeno na obr. 4.5. Optimální hodnota odporu byla pro AG ($P_n = 1,1 \text{ kW}$, $U_n = 400 \text{ V}$, $I_n = 3 \text{ A}$, $\cos\varphi = 0,75$) určena měřením, a to 50Ω při otáčkách 1022 min^{-1} . Před připojením protékal vinutím magnetizační proud z kondenzátorové baterie. Připojení proběhlo v okamžiku, kdy napětí generátoru bylo v protifázi s napětím sítě.

Připojením k síti přes odpory došlo k proudovému rázu velikosti 0,23 násobku jmenovitého proudu stroje. Napětí generátoru bylo ve fázovém závěsu za napětím sítě. Po cca 2 s došlo k vyřazení odporu jejich překlenutím, tedy poklesu napětí na odporu k nule. Napětí na generátoru se přizpůsobilo napětí sítě. Vznikl proudový ráz velikosti 0,18 násobku jmenovitého proudu. Obdobně se dá omezit proudový ráz použitím softstartu.



Obr. 4.5 Optimalní připojování AG k síti přes odpory 50Ω .

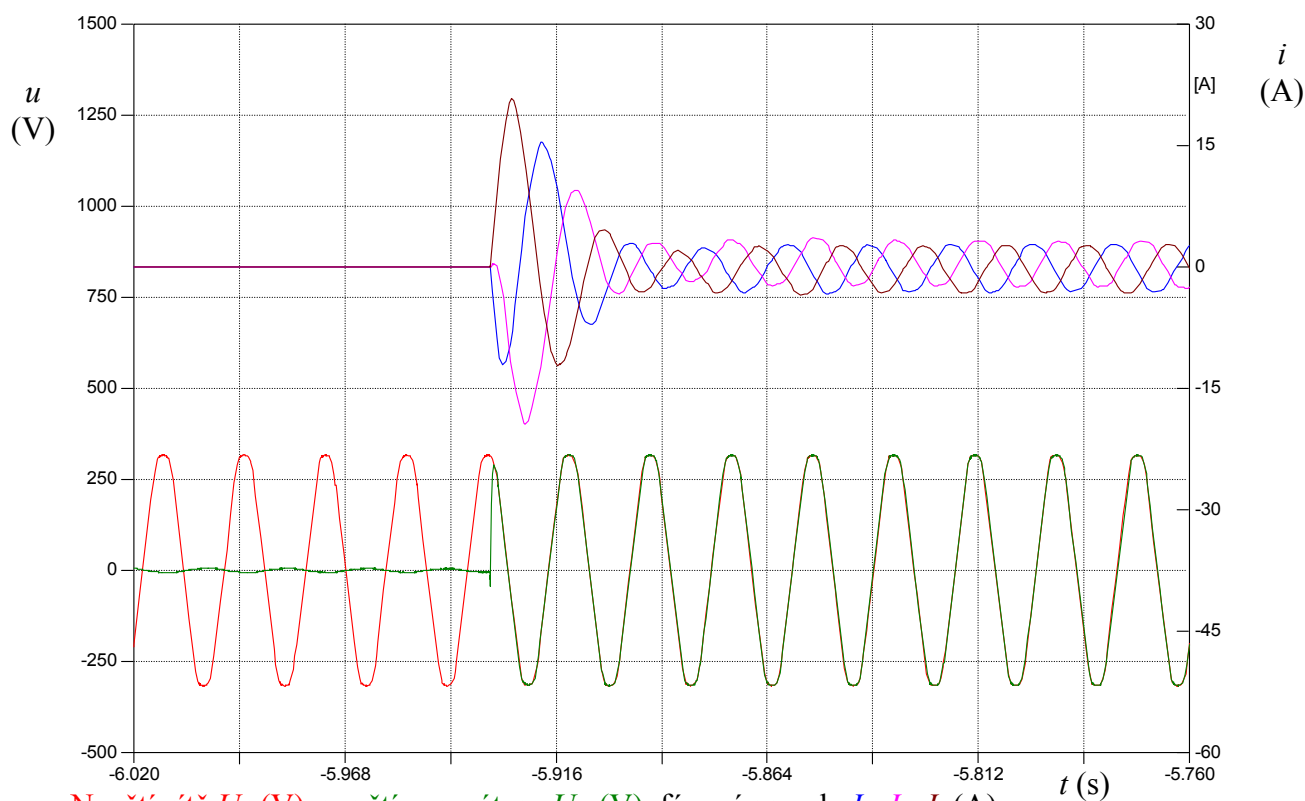
Připojení nenabuzeného generátoru k síti

Připojení nenabuzeného generátoru k síti je také provázeno přechodným dějem. Amplituda proudového rázu je však menší než v případě nabuzeného generátoru. Je to dáno tím, že nejhorší případ pro tento způsob připojení generátoru k síti může nastat v okamžiku, kdy napětí na generátoru je nulové a napětí sítě v maximu (viz. obr. 4.6).

V případě generátoru nabuzeného je proudový ráz největší, jestliže napětí na generátoru je v protifázi.

Obdobně jako v předchozím případě lze proudový ráz omezit vhodně zvoleným odporem. V případě nenabuzeného generátoru k síti přes odpory dosahovaly proudové rázy 0,4 až 0,55 násobku jmenovitého proudu stroje při otáčkách 1022 min^{-1} .

V případech připojování generátoru k síti přes odpory zapojenými do série k jeho vinutí nebyl zaznamenán vznik přepětí.



Napětí sítě U_s (V), napětí generátoru U_g (V), fázové proudy I_1, I_2, I_3 (A)

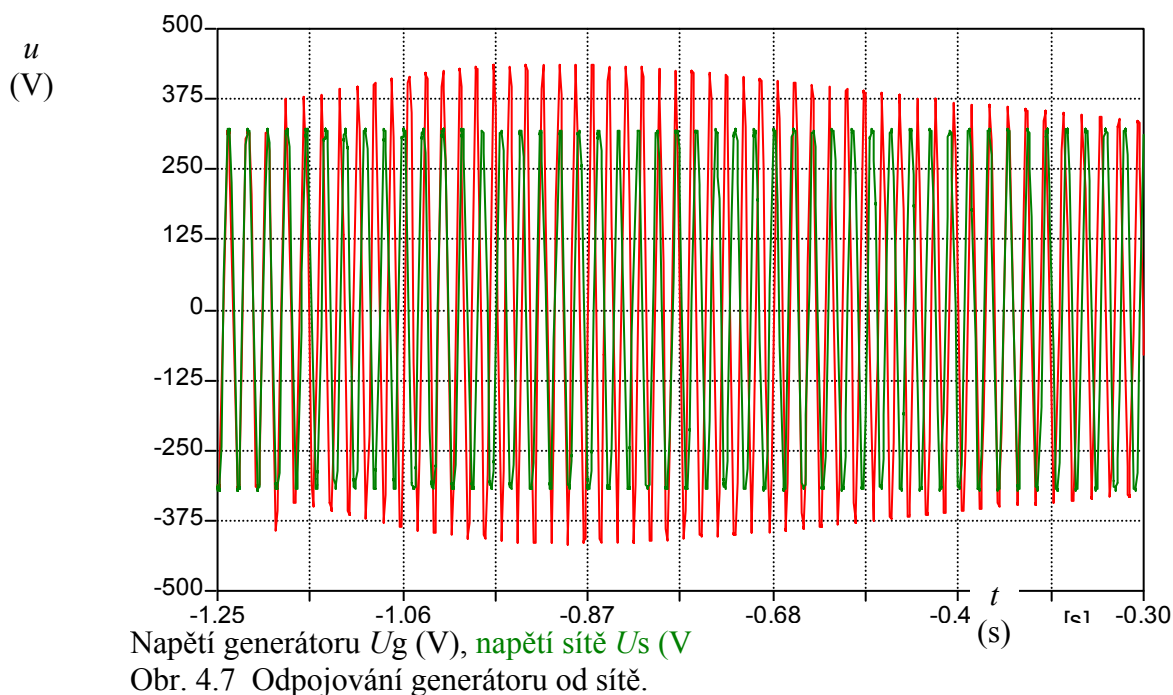
Obr. 4.6 Připojování nenabuzeného generátoru k síti.

Náhlé odpojení generátoru od sítě

Náhlé odpojení od sítě je spojeno s vlnou přepětí, která vznikne vlivem náhlé změny účinníku generátoru. Veškerý proud se stane magnetizačním a celková energie generátoru hradí pouze své ztráty naprázdno a ztráty kondenzátorové baterie. Dojde ke snížení momentu generátoru a při konstantním výkonu pohonného zařízení dojde ke zvyšování otáček.

Se zvyšujícími se otáčkami roste svorkové napětí nezátíženého generátoru (viz. obr. 4.7) podle budící charakteristiky (viz. obr. 4.3). Je tedy nutné při odpojení generátoru zajistit omezení mechanické energie na rotoru, aby nedošlo k poškození izolace stroje.

Velikost přepětí je úměrná velikosti otáček. V případě, že generátor je odpojen v okamžiku, kdy není buzen z kondenzátorové baterie (není připojena v obvodu), ale ze sítě, potom žádné přepětí nevznikne a proud generátoru zanikne v několika málo periodách.

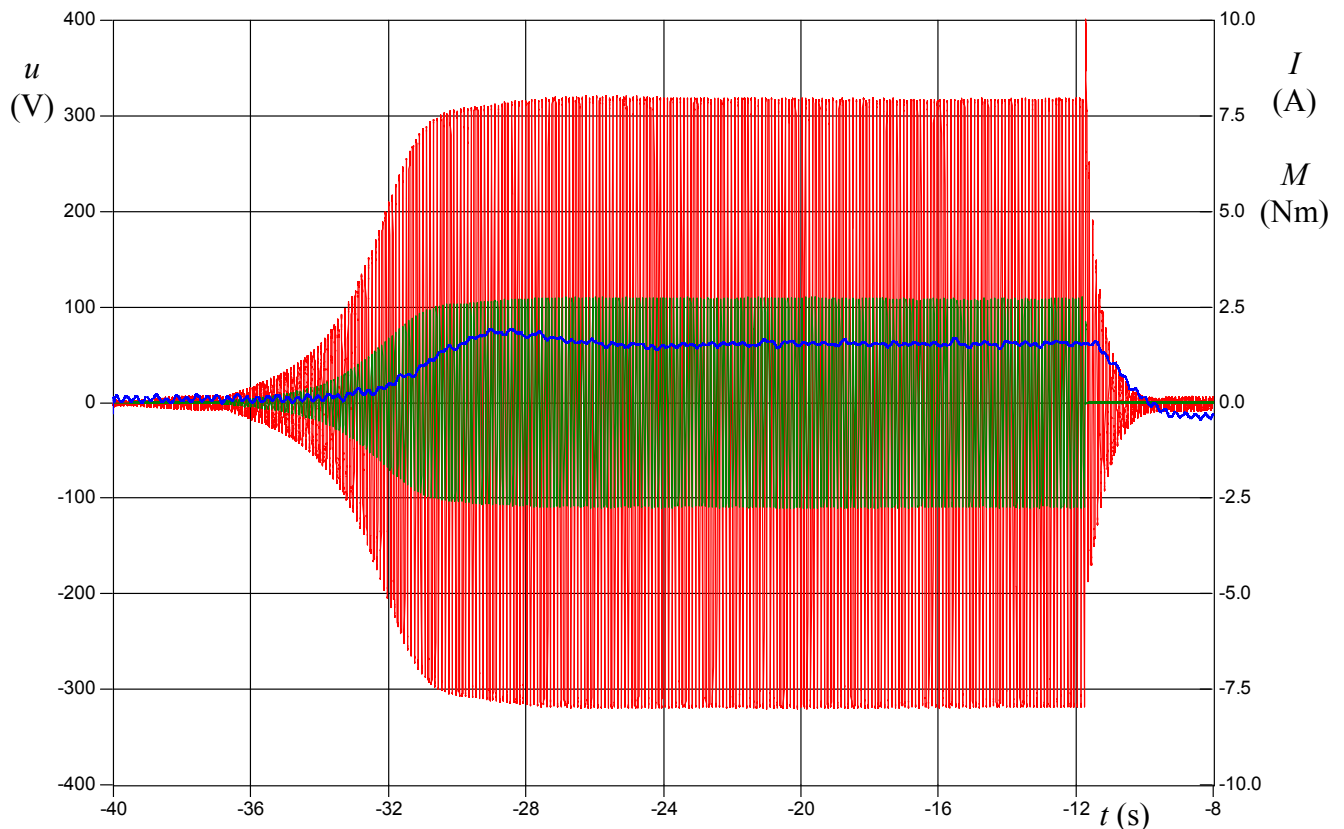


Připojení kondenzátorů k rozběhnutému generátoru

V okamžiku připojení kondenzátorové baterie k rozběhnutému asynchronnímu generátoru dojde proudem kondenzátorové baterie k nabuzení generátoru. Ustálené hodnoty naměřených elektrických veličin jsou uvedeny v tabulce 4.2 a průběh připojování kondenzátorové baterie k rozběhnutému AG je uveden na obr.4. 8.

Tab. 4.2 Ustálené hodnoty elektrických veličin při připojení kondenzátorové baterie k rozběhnutému AG

Kapacita	n (min^{-1})	I_0 (A)	U_0 (V)	f (Hz)	M (Nm)	P_0 (W)
D 44 μ F	1000	3,27	268,7	47,94	3,9	408
Y 25 μ F	1000	1,43	181,6	48,26	1,1	115
D 44 μ F	1022	3,77	292	50,55	4,5	482
Y 25 μ F	1022	1,87	223	50,87	1,5	160
D 44 μ F	1058	4,04	304,3	52,09	5,7	631
Y 25 μ F	1058	2,07	239,32	52,57	1,8	199

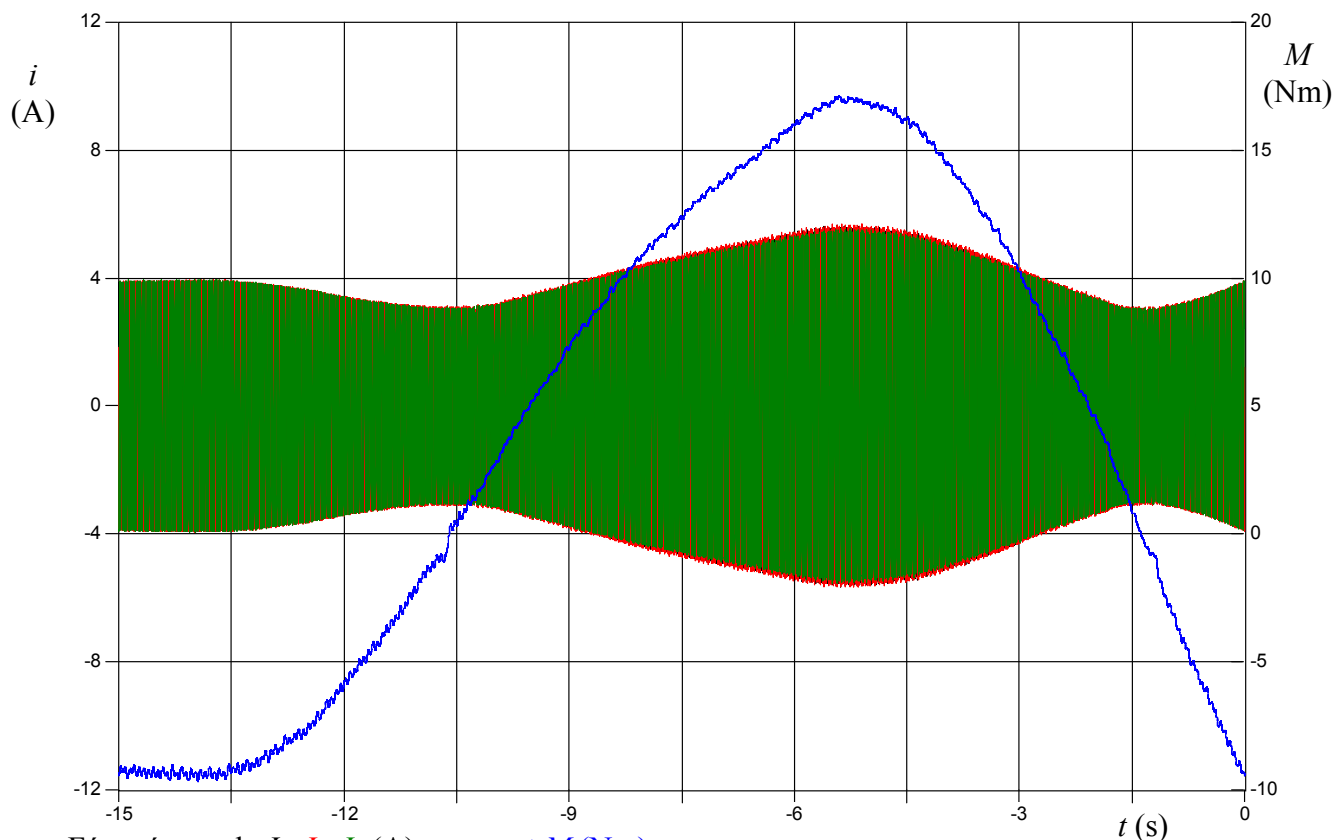


Napětí generátoru U_g (V), proud kondenzátorem I_c (V), moment M (N.m),
Obr. 4.8 Připojení kondenzátorové baterie.

Jak je zřejmé z tabulky 4.2, se zvyšující se kapacitou kondenzátorové baterie nejen roste napětí i proud, ale prudce rostou i ztráty stroje.

Změny zatížení

V případě, kdy je generátor v nadsynchronních otáčkách připojen k (tvrdé) distribuční síti, dodává do této sítě činnou energii. Zvýšení momentu na hřídeli má za následek zvýšení otáček, a tím i zvýšení proudu generátorem a naopak, v okamžiku poklesu jeho otáček pod synchronní, přechází asynchronní stroj do motorického chodu, jak je zřejmé z obr. 4.9.



Fázové proudy I_1, I_2, I_3 (A), moment M (Nm)

Obr.4.9 Plynulá změna otáček.

Vliv změny svorkového napětí asynchronního generátoru při paralelní spolupráci se sítí

V provozu se někdy liší napětí distribuční sítě od jeho jmenovité hodnoty, což může mít vážný vliv na práci asynchronního generátoru při paralelní spolupráci s touto sítí. Asynchronní generátor může pracovat paralelně s distribuční sítí, jejíž jmenovité napětí může dle normy ČSN 341610 pro nn kolísat v rozmezí $\pm 5\%$. Se změnou svorkového napětí asynchronního generátoru je spojena změna momentové charakteristiky. Podle vztahu

$$M = \frac{m_1 R_2' U_1^2}{s \omega_1 \left[\left(R_1 + c_1 \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (x_{1\sigma} + c_1 x_{2\sigma}')^2 \right]} \quad (4.5)$$

Moment je závislý na druhé mocnině svorkového napětí. Mění se tak momentová charakteristika asynchronního generátoru, zvláště sklon její přímkové části v rozmezí skluzu $\pm s_{\max}$. Se změnou svorkového napětí asynchronního generátoru se mění i hodnota maximálního momentu. Předpokládáme-li, že při konstantním momentu na hřídeli generátoru se napětí sítě U_{1n} změnilo na napětí αU_{1n} , kde $\alpha \neq 1$, potom skluz generátoru bude dán vztahem

$$s' \approx \frac{s}{\alpha^2} \quad (4.6)$$

Se změnou skluzu je spjata změna frekvence v rotorovém vinutí

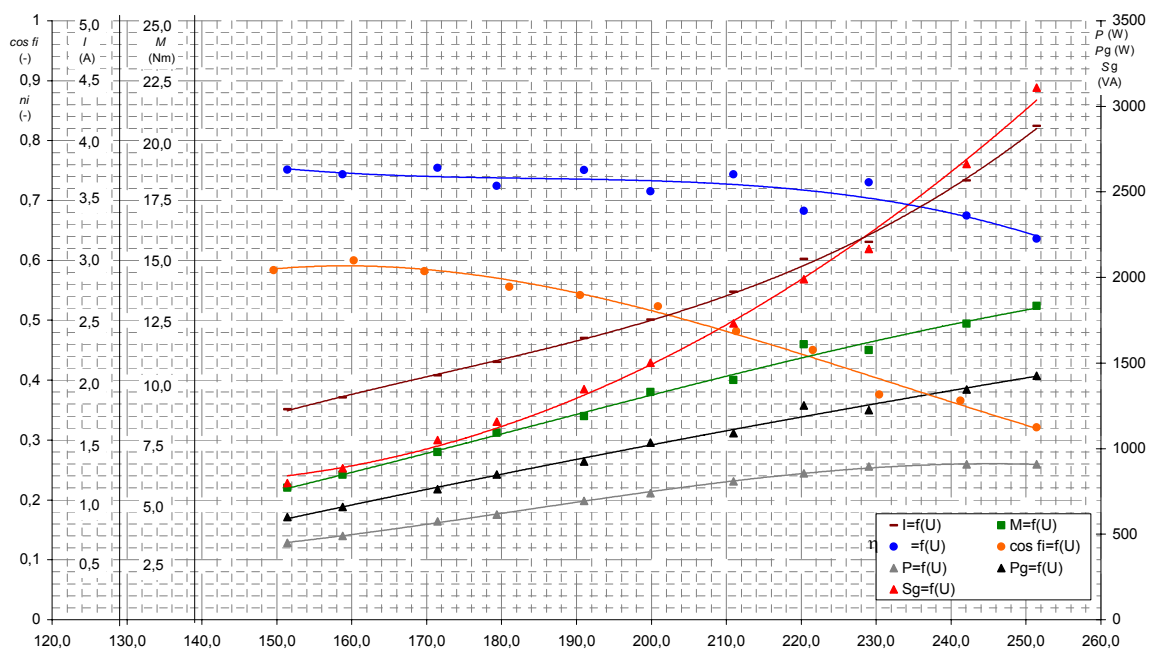
$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (4.7)$$

Zvýšení frekvence má za následek zvýšení reaktance rotorového vinutí,

$$x_{2\sigma} = \omega_2 \cdot L_{2\sigma} \quad (4.8)$$

a také snížení jalové složky proudu generátoru. Snížení jalové složky proudu je provázáno zvýšením účinníku stroje.

Chování asynchronního generátoru při změnách svorkového napětí bylo ověřováno měřením. Měření probíhalo na asynchronním stroji v generátorickém chodu, změna svorkového napětí byla realizována prostřednictvím autotransformátoru v rozmezí 65 až 110 % U_{1n} . Výsledky měření pro konstantní otáčky 1040 min^{-1} jsou zobrazeny na obr. 4.10.



Obr. 4.10 Chování asynchronního generátoru při změnách svorkového napětí.

S poklesem svorkového napětí klesá moment stroje a tedy i výkon stroje. Při konstantním momentu klesá proud dle vztahu

$$I'_{1a} \approx \frac{I_{1a}}{\alpha} \quad (4.9)$$

Jak již bylo výše zmíněno, pokles svorkového napětí je provázen také snížením jalové složky proudu a tudíž zvýšením účinníku. A z tohoto důvodu dojde také k nepatrnému zvýšení účinnosti asynchronního generátoru. Při provozování asynchronního generátoru se sníženým svorkovým napětím dochází k omezení pracovní oblasti stroje z hlediska snížení maximálního momentu.

Samostatně pracující asynchronní generátor

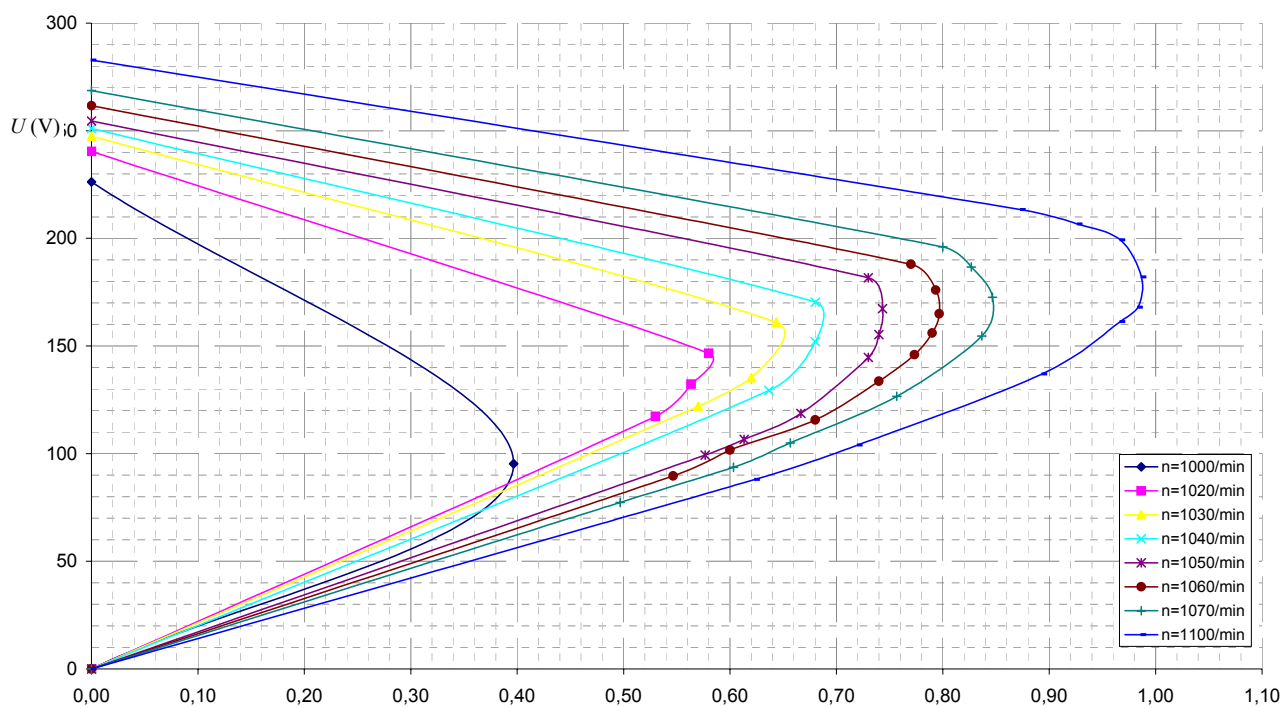
Samostatně pracující asynchronní generátor vykazuje měkkou derivační zatěžovací charakteristiku. Při změně zatížení dochází ke změně skluzu stroje a podle vztahu 4.10 také ke změně frekvence

$$f = \frac{n \cdot p}{60 \cdot (1 - s)} \quad (4.10)$$

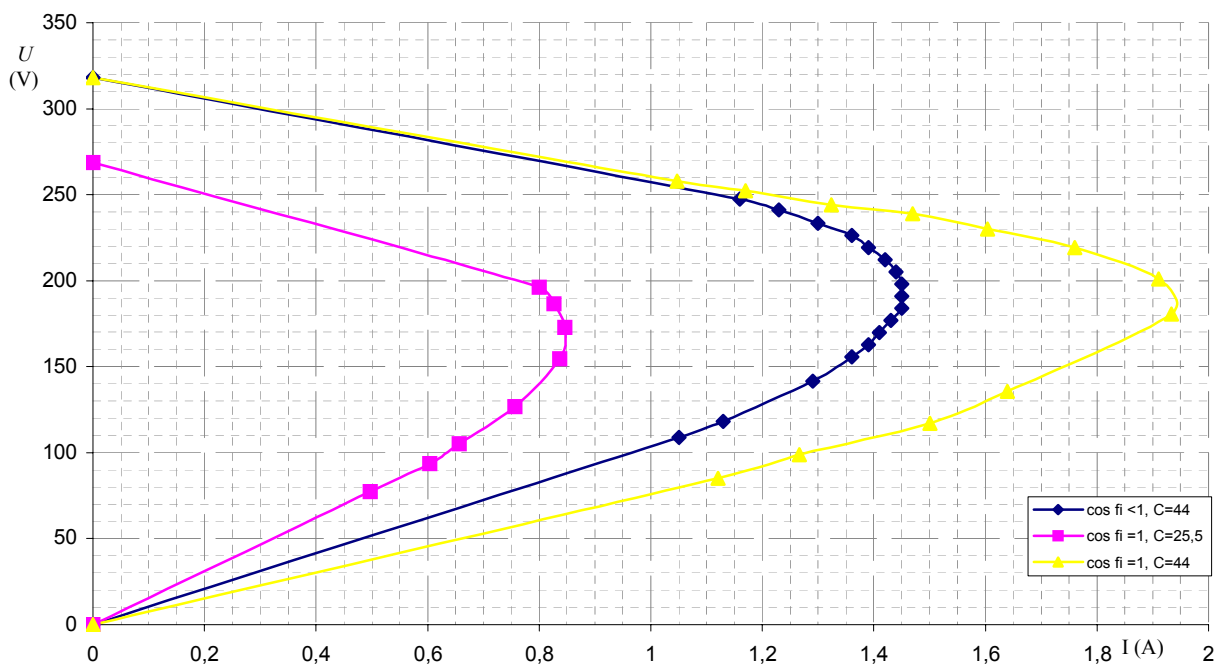
Se změnou frekvence dochází ke změnám X_C a X_L . Zatěžováním dále klesá svorkové napětí a mění se i tok stroje. Proto je velikost vypočtené kapacity minimální. Pro zatěžování generátoru je nutné tuto kapacitu zvýšit. Pro praktické využití generátoru v oblasti jmenovitého výkonu může být výsledná velikost kapacity i dvojnásobná.

Po roztočení stroje dojde k jeho nabuzení a na svorkách se objeví napětí dané otáčkami a velikostí kapacity připojené ke generátoru. Po nabuzení je možno generátor začít zatěžovat. Se snižující se impedancí zátěže klesá svorkové napětí. Po dosažení minimálního napětí (80 ÷ 100V), kdy již kondenzátorová baterie není schopna budít stroj, se napětí a proud zhroulí k nule. Zatěžovací charakteristika vykazuje „koleno“. V oblasti tohoto kolena dodává generátor výkon zátěži s nejvyšší účinností viz. obr. 4.11.

Zatěžováním generátoru induktivní zátěží dochází ke snížení jalové energie dodávané generátoru k buzení a tudíž je zatěžovací charakteristika měkčí. Zatěžovací charakteristiky při induktivní zátěži jsou patrné z obrázku 4.12. V případě kompenzace induktivního účinníku budou zatěžovací charakteristiky shodné jako pro případy zatěžování odpory. Pro zvyšující se kapacitní zátěž ale značně klesá účinnost zařízení.



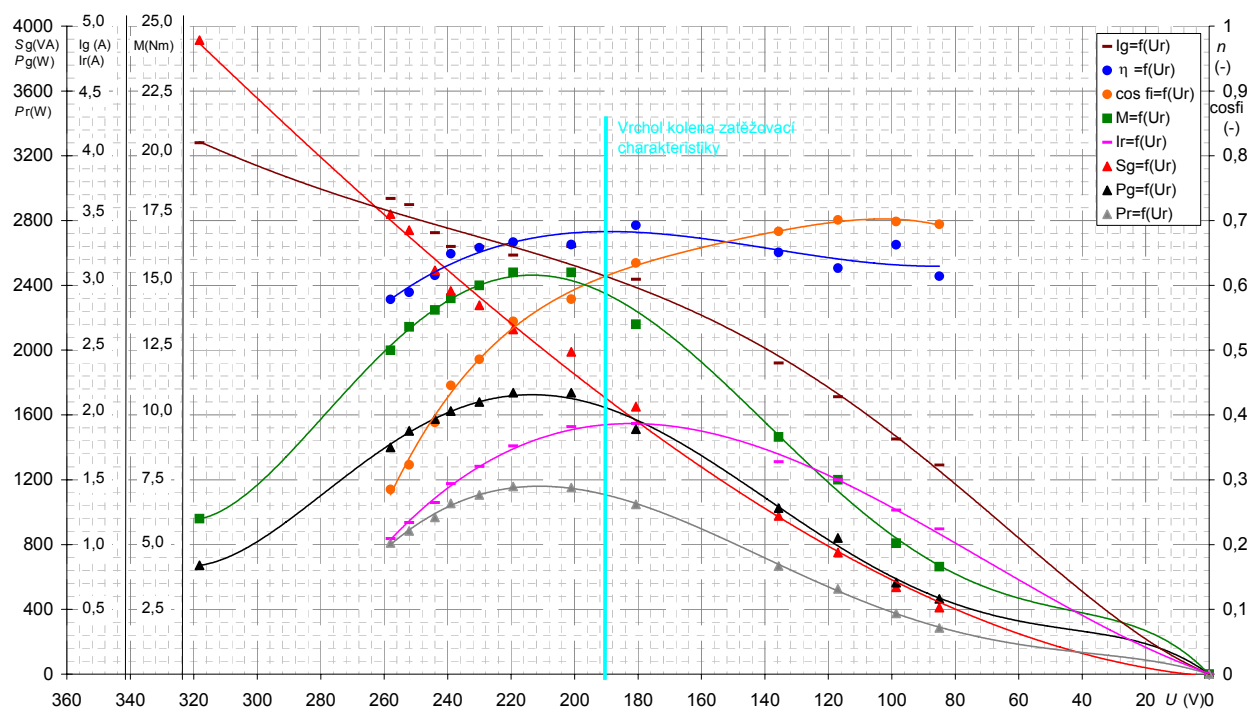
Obr. 4.11 Zatěžovací charakteristiky samostatně pracujícího generátoru pro různé otáčky.



Obr. 4.12 Zatěžovací charakteristiky pro různá zapojení, při konstantních otáčkách.

V oblasti kolena derivační charakteristiky dodává generátor výkon zátěži s nejvyšší účinností, jak ukazuje obrázek 4.13. Na tomto obrázku jsou vykresleny jednotlivé sledované veličiny (zdánlivý výkon generátoru S_G , příkon generátoru P_G , výkon na odporové zátěži P_R ,

proud generátorem I_G , proud odporem I_R , moment na hřídeli generátoru M , účinnost η a účinník $\cos(\varphi)$ v závislosti na svorkovém napětí U_R stroje, pro konstantní otáčky $n = 1070 \text{ min}^{-1}$. Podle obrázku 4.12 vrchol kolena nastává při svorkovém napětí $U_R = 190\text{V}$. Maximálního výkonu generátoru se dosahuje v oblasti před kolenem zatěžovací charakteristiky přibližně při $U_R = 210\text{V}$. Optimální provoz generátoru při konstantních otáčkách na hřídeli $n = 1070 \text{ min}^{-1}$ se pohybuje při svorkovém napětí 220 až 160V, kdy je maximální účinnost využití výkonu na hřídeli ($\eta = 68\%$)



Obr. 4.13 Zatěžovací charakteristika asynchronního generátoru pro konstantní otáčky $n=1070 \text{ min}^{-1}$ s připojenou kondenzátorovou baterií C_2 .

4.2.2 Matematický model malé větrné elektrárny s asynchronním generátorem s kotvou nakrátko

V rámci projektu byl upraven a dalším měřením verifikován matematický model malé větrné elektrárny s asynchronním generátorem 1,1 kW v prostředí preprocesoru ATPDraw. Jako výchozí byl použit model, který byl vytvořen v již řešeném projektu (2,3). V následující kapitole jsou uvedeny podstatné informace při sestavování matematického modelu větrné elektrárny jak pro ostrovní režim, tak pro režim provozu paralelně se sítí. Matematický aparát programu EMTP-ATP provádí výpočet modelu asynchronního stroje na základě zjednodušeného schéma na obr. 4.14. Elektrická část matematického modelu je definována parametry náhradního schématu asynchronního stroje. Zvlášť je také modelována část mechanická, kde mechanické parametry asynchronního stroje jsou respektovány určenými elektrickými veličinami, tzn. je definována jejich vzájemná relace (viz. tab. 4.3).

Tab. 4.3 Relace mezi fyzikálními a elektrickými veličinami matematického modelu asynchronního stroje v EMTP-ATP.

Moment setrvačnosti 1 kg/m ²	Kapacita 1 F
Tuhost vazby 1 Nm/rad	Inverzní indukčnost 1/H
Tření na hřídeli 1 Nm/rad/s	Konduktance S
Úhlová rychlost 1 rad/s	Napětí 1 V
Toč. Moment 1 Nm	Proud 1 A
Úhel 1 rad	El. Náboj 1 C
Moment setrvačnosti 1 kg/m ²	Kapacita 1 Farad

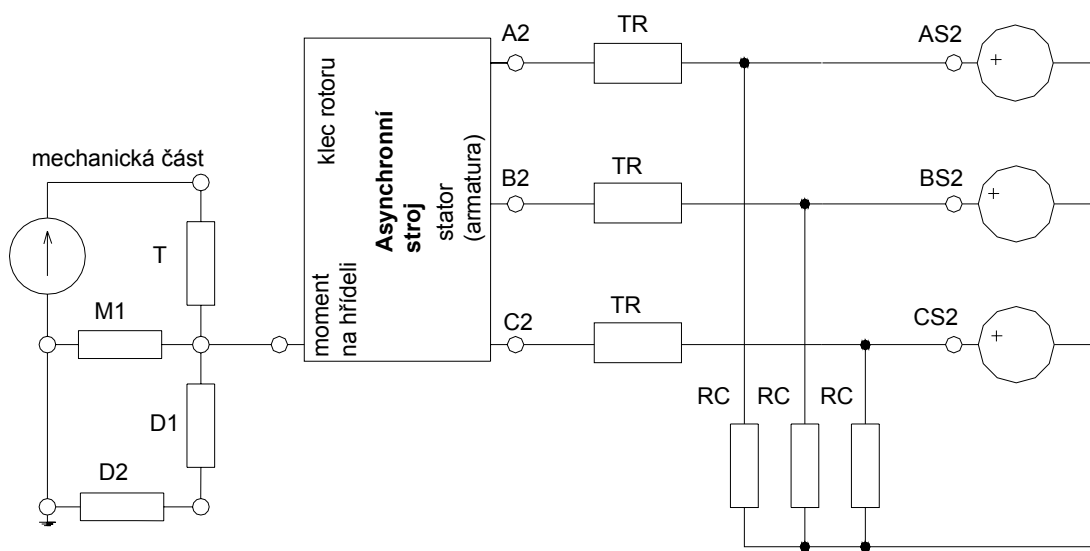
Parametry elektrické části potřebné pro sestavení matematického modelu asynchronního stroje v EMTP-ATP byly z části změřeny a z části vygenerovány pomocí programu WindSyn, který potřebné parametry generuje na základě štítkových a katalogových údajů. Na obr. 2 je pro ukázkou zobrazeno dialogové okno pro zadávání parametrů asynchronního stroje. Jak je z obrázku zřejmé, zadávání parametrů koresponduje s náhradním schématem asynchronního stroje. Uživatel má dále možnost zobrazit výstupní průběhy zvýrazněním volby TQUOT, OMOUT následně

TQUOT = 1 – průběh mech. momentu,
2 – jako 1 + magnetický tok v podélné ose d,
3 – jako 2 + magnetizační proud v podélné ose d,

OMOUT = 1 – rychlost na hřídeli (rad/s),
2 – jako 1 + magnetický tok v příčné ose q,
3 – jako 2 + magnetizační proud v příčné ose q,

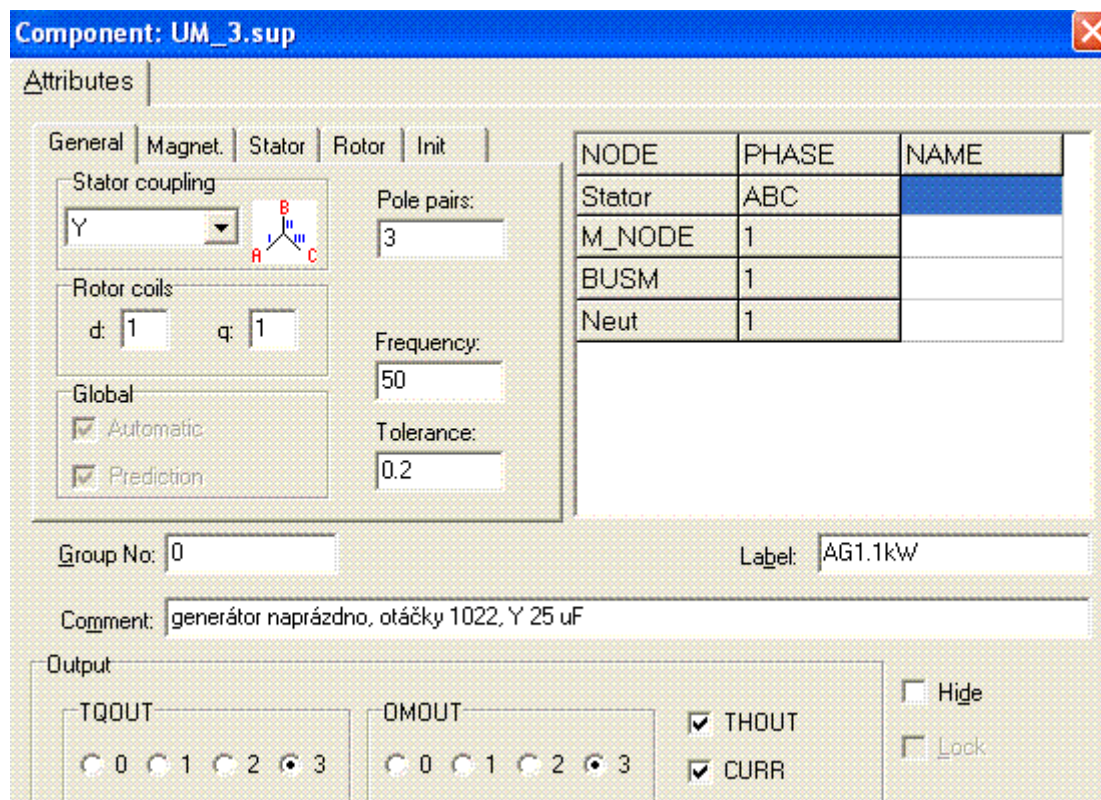
THOUT = nastaveno - pozice rotoru (stupně mechanické),

CURR = nastaveno – sledování všech proudů ve vinutí.



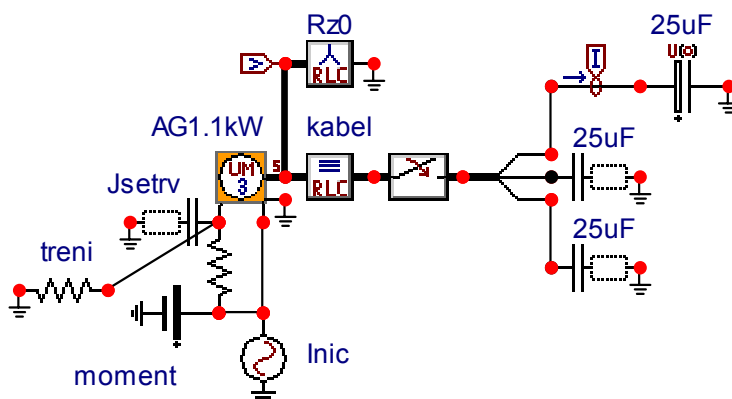
Obr. 4.14 Výchozí zjednodušené schéma pro vytvoření matematického aparátu asynchronního stroje.

Legenda k obr. 4.14: D1, D2 rezistory respektující tření na hřídeli, M1 kapacitní ekvivalent momentu setrvačnosti, RC rezistory respektující impedanci mezi statorovým vinutím, T rezistor jako snímač momentu na hřídeli, TR rezistor jako snímač proudu statorovým vinutím



Obr. 4.15 Dialogové okno pro zadávání parametrů asynchronního stroje.

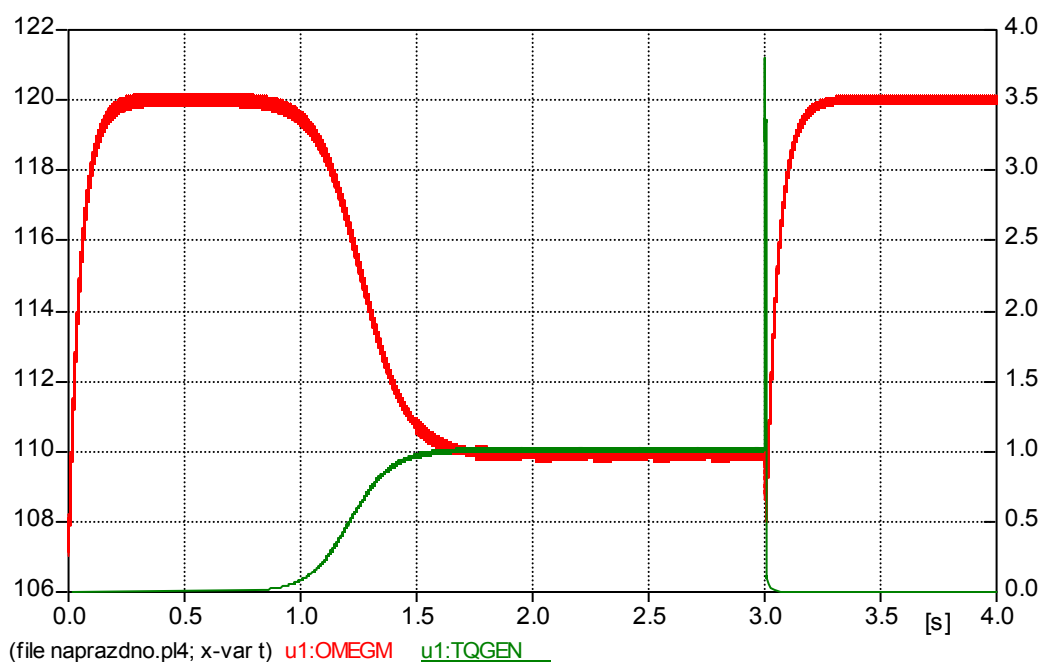
Jako příklad je na obr. 4.16 uveden výchozí model asynchronního stroje v prostředí ATPDraw pro simulování stavu naprázdno s buzením z kondenzátorové baterie.



Obr. 4.16 Model asynchronního generátoru v ATPDraw, simulace stavu naprázdno.

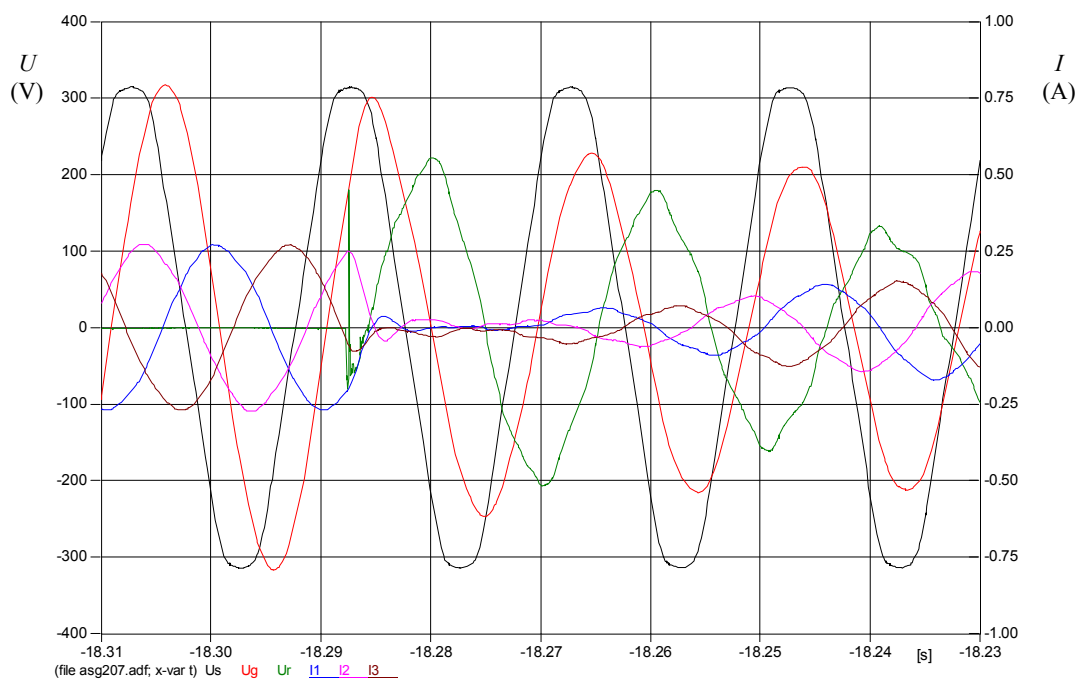
Parametry asynchronního generátoru zadané v dialogovém okně matematického modelu:

- parametry mechanické části vyjádřené jako ekvivalenty v elektrických veličinách: -moment setrvačnosti 5275 kg/m^2 , tření na hřídeli $0,08 \text{ Nm/rad/s}$, moment na hřídeli $1,3 \text{ Nm}$,
- parametry elektrické části: - odpor statoru 9Ω , indukčnost statoru $18,9 \text{ mH}$, - odpor rotoru $11,64 \Omega$, indukčnost rotoru $18,9 \text{ mH}$, - magnetizační indukčnost v d, q ose $0,387 \text{ H}$,
- počet pólových dvojic 3, uspořádání vinutí statoru Y,
- počáteční skluz je nastaven $2,2\%$, což odpovídá otáčkám 1022 min^{-1} .



Obr. 4.17 Průběh momentu a úhlové rychlosti generátoru.

Na svorky asynchronního generátoru je přes RLC prvek respektující impedanci přívodního kabelu v čase 0 připojena kondenzátorová baterie v zapojení Y a kapacitě $25 \mu\text{F}$. RLC prvek na obr. 4.16 označený jako Rz0 reprezentuje zátěž naprázdno. V čase 3 s je kondenzátorová baterie odpojena.



Obr. 4.20 Ukázka průběhů napěťových a proudových poměrů při připojení generátoru k síti přes omezovací odpor $R = 100 \Omega$, $n = 1022 \text{ min}^{-1}$.