

4. Modelování větrné elektrárny

[4]

Katedra disponuje malou větrnou elektrárnou s asynchronním generátorem.

Konstrukce větrné elektrárny je umístěna v areálu Vysoké školy báňské v Ostravě-Porubě. Větrná elektrárna je umístěna v nadmořské výšce přibližně 250 m a lze ji charakterizovat následujícími základními údaji:

- výška větrného motoru nad zemí 12 m,
- průměr průmětu třílisté vrtule 2,4 m,
- optimální nasměrování rotoru větrného motoru je zajištěno větrným kormidlem s aktivní délkou 2,5 m,
- přenos výkonu z větrného motoru na rotor generátoru je zajištěn převodem s ozubeným řemenem a převodovým poměrem 3,75/1,

- jako zdroj elektrické energie je použit 3fázový asynchronní stroj s kotvou nakrátko, typ 4AP 90L 6, jehož parametry lze charakterizovat následujícími údaji:

- jmenovité napětí 3x230/400 V,
- jmenovitá frekvence 50 Hz,
- jmenovitý výkon stroje v motorickém režimu 1,1 kW,
- jmenovité otáčky 930 ot.min⁻¹,
- jmenovitý proud stroje 3 A,
- jmenovitý účinník 0,75 p.j.

K výše uvedené sestavě je k dispozici meteorologická stanice pro měření rychlosti a směru větru, teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu.

Pro modelování asynchronního motoru je v ATPDraw použit univerzální model UM3.

4.1 Definování obvodových prvků použitých v modelu větrné elektrárny

Trojfázový indukční klecový stroj



Nastavení obvodových prvků je obdobné jako v případě synchronního a stejnosměrného stroje.

Výchozí nastavení je následující:

General

Pole pairs = 3, stator coupling – Y, frequency = 50 Hz,

Magnet

LMUD = LMUQ = 0,385

Stator

Ld = Lq = 0,015 H

Rd = Rq = 8,42 Ω

Rotor

L1 = L2 = 0,015 H

R1 = R2 = 11,6 Ω

Pozn.: hodnoty magnetického obvodu, hodnoty pro rotorové a statorové vinutí byly získány pomocí programu

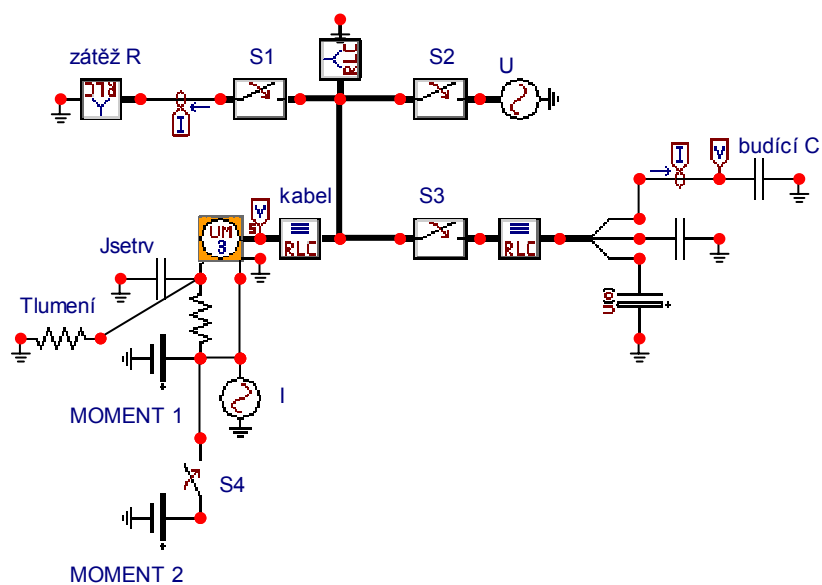
WindSyn pro následující parametry stroje:

Frekvence sítě 50 Hz

Výkon stroje 1,49 hp (1 hp = 736W)

Napětí mezi fázemi	0,4 kV
Jmenovité otáčky	930 ot.min ⁻¹
Účinník	0,75
Účinnost	0,705
Jmenovitý skluz	7 %
Záběrný proud	4,1 p.j
Záběrný moment	2 p.j
Moment setrvačnosti	5,275 (kg.m ²).10 ⁻³

Na Obr. 4.1 je uvedeno výchozí schéma zprostředkující provoz asynchronního stroje v různých režimech.



Obr. 4.1 Schéma v ATPDraw zprostředkující provoz asynchronního stroje v různých režimech

Podle Obr. 4.1 mají další veličiny definující funkci větrné elektrárny tyto hodnoty:

Jmenovité zatížení stroje

$M_N = 10,2$ N.m pro skluz 7%, v ATPDraw je respektován stejnosměrným proudovým zdrojem (AMP = -10,2, sepnutí v čase 0 s).

Moment setrvačnosti

$J = 5,275 \text{ (kg.m}^2\text{)}.10^{-3}$ v ATPDraw je respektován kapacitorem $C = 5275 \text{ }\mu\text{F}$.

Budící kondenzátory

Spojení do hvězdy, $C = 24 \text{ }\mu\text{F}$.

Tření na hřídeli, inicializace, přívodní vedení

V obvodu je použit rezistor s indexem *J-tlumení*, který modeluje tření na hřídeli, jedná se o mechanický parametr. Velikost tohoto odporu je závislá na mechanických ztrátách tj. ztráty ventilací a ztráty vzniklé třením v ložiscích. Jeho hodnota je $0,08 \text{ Nm/(rad/s)}$ v obvodu se zadává jako vodivost této hodnotě odpovídající, $R = 12,5 \text{ }\Omega$.

Druhý rezistor v obvodu společně s proudovým zdrojem I tvoří iniciaci stroje a jeho velikost je $0,1 \text{ }\Omega$, přičemž jeho velikost není pro chování obvodu důležitá.

Přívodní kabel k motoru a budícím kondenzátorům je modelován 3fázovým *RLC* obvodem s následujícími parametry: $R = 0,01 \text{ }\Omega$, $L = 0,001 \text{ mH}$, $C = 0 \text{ }\mu\text{F}$.

Pro *RLC* obvod modelující připojovací vodiče k budícím kondenzátorům byly zvoleny tyto hodnoty: $R = 1 \text{ }\Omega$, $L = 0,001 \text{ mH}$, $C = 0 \text{ }\mu\text{F}$.

Zátěž naprázdno, odporová zátěž

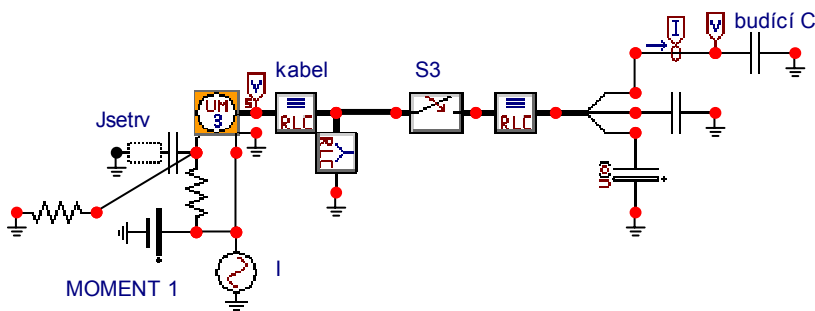
Je realizována *RLC* obvodem v zapojení hvězda s následujícími parametry: $R = 435 \text{ }\Omega$. Odporová zátěž je definována parametry: $R = 300 \text{ }\Omega$, $L = 0,001 \text{ mH}$, $C = 0 \text{ }\mu\text{F}$.

4.2 Modelování provozu asynchronního stroje

V následující části jsou uvedeny možnosti provozu asynchronního stroje dle Obr.4.1. Pro větší přehlednost je toto zapojení upraveno na jednodušší dle požadované funkce zařízení.

4.2.1 Buzení asynchronního generátoru

Na Obr.4.2 je uvedeno schéma zapojení, které je nutné použít v případě provozu asynchronního stroje v ostrovním režimu naprázdno s konstantní hodnotou hnacího momentu. Tato varianta neobsahuje model střídavé sítě, nelze tedy asynchronní stroj rozběhnout, nebo připojit paralelně k síti. Dále zde chybí zatěžovací odpory společně s možností proměnlivého hnacího momentu.



Obr. 4.2 Schéma zapojení pro provoz asynchronního stroje v ostrovním režimu

Výše uvedené schéma zprostředkovává nabuzení asynchronního stroje na jmenovitou hodnotu napětí pomocí budících kondenzátorů, jejichž velikost je $24\mu\text{F}$.

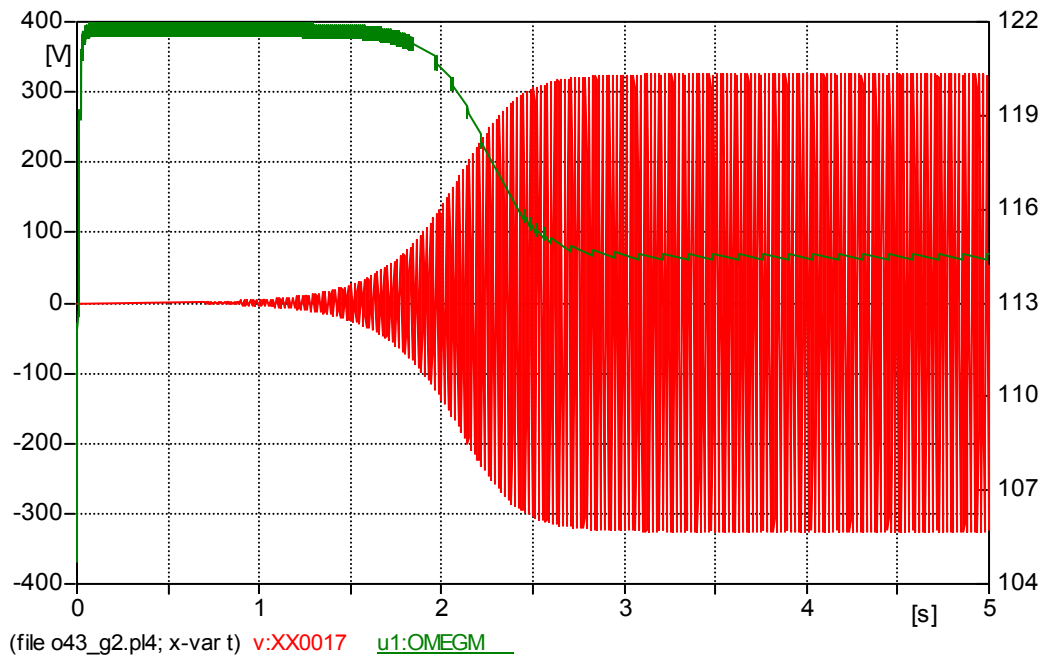
V dialogovém okně asynchronního stroje je zadán skluz 0 %, tzn. stroj má v počátku simulace synchronní otáčky (1000ot.min^{-1}).

Stroj je během simulace poháněn hnacím momentem 10 N.m.

Spínač S3 má zadaný čas sepnutí 0s.

Po spuštění simulace se v programu PlotXY vykreslí průběh napětí na kondenzátoru ve větvi, kde je připojena napěťová sonda.

Zadané napětí na budícím kondenzátoru s počátečním napětím má hodnotu $U_{(0)} = 2 \text{ V}$.



Obr. 4.3 Průběh úhlové rychlosti a napětí stroje při nabuzení

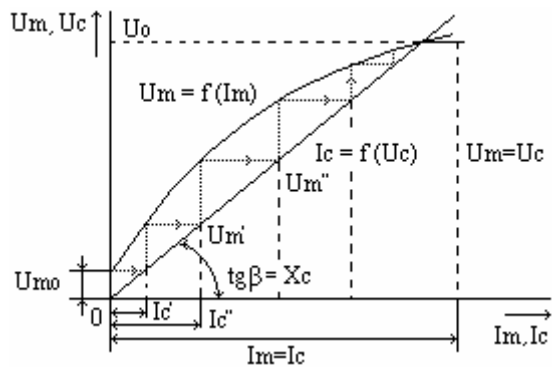
V grafu je znázorněno napětí na svorkách statorového vinutí při nabuzení asynchronního generátoru a jeho úhlová rychlost.

Při roztočení generátoru vznikne vlivem remanentního magnetismu indukované napětí, které vyvolá proud tekoucí cívkami statoru a paralelně připojenými kondenzátory. Pomocí budících kondenzátorů se indukované napětí zvýší, což má za následek zvýšení statorového proudu. Napětí roste skokově viz obr.28, až se ustálí na hodnotě, která je závislá na velikosti připojené kondenzátorové baterie a rychlosti otáčení.

V čase do 0,78 s je napětí na kondenzátorech stále minimální a poté se zvyšuje až na hodnotu 324,6 V, kterou dosáhne v čase 3,3s. Úhlová rychlost je v počátku $\omega = 104,6 \text{ rad.s}^{-1}$

(1000 ot.min⁻¹) a skokově se zvyšuje vlivem hnacího momentu $M = 10 \text{ N.m}$ na $\omega = 121 \text{ rad.s}^{-1}$, což odpovídá otáčkám $n = 1156 \text{ ot.min}^{-1}$.

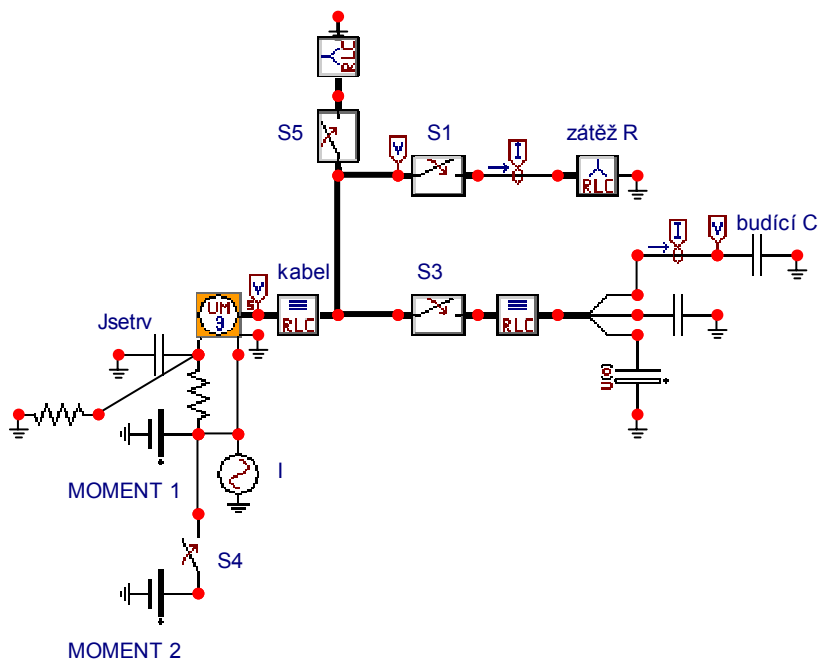
Po nabuzení stroje teče statorovým vinutím proud, který stroj zatěžuje a tím se sníží otáčky generátoru na $\omega = 114 \text{ rad.s}^{-1}$, což je $n = 1089 \text{ ot.min}^{-1}$



Obr.4.3 Průběh nabuzení asynchronního generátoru

4.2.2 Asynchronní generátor pracující do odporové zátěže

Na obrázku 4.4 je schéma zapojení asynchronního stroje pro dodávku výkonu do zatěžovacích odporů.

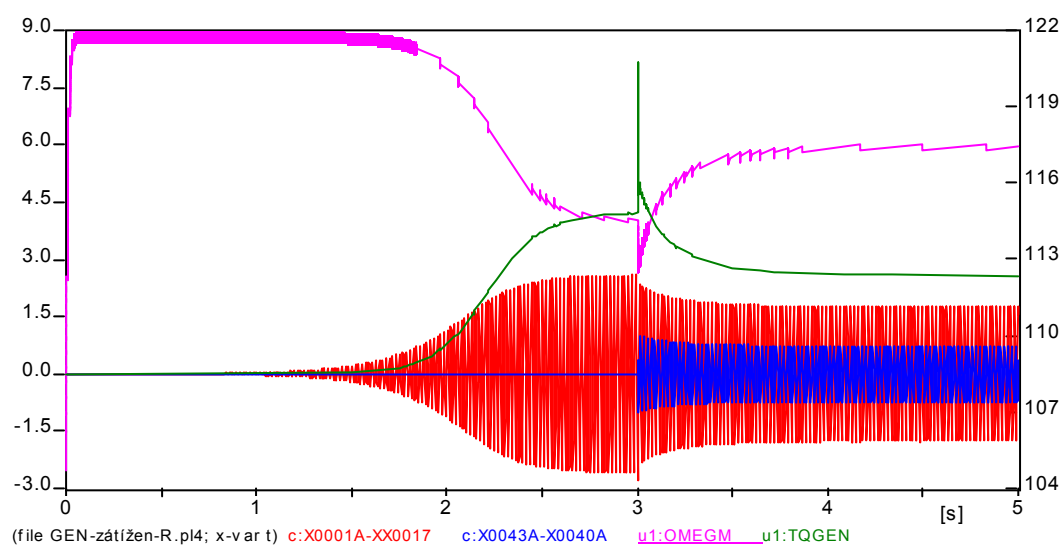


Obr.4.4 Schéma zprostředkující provoz asynchronního stroje v ostrovním režimu

V obvodu je vypínač S1, který v čase 3s připojuje ke statorovému vinutí zátěž ohmického charakteru, která má velikost 200Ω v každé fázi statorového vinutí. Před tímto připojením se opět stroj nabudil na jmenovitou hodnotu napětí.

Vypínač S3 je zapnut v nule a vypínač S1 spíná ve vhodně zvoleném čase, ve kterém je už generátor nabuzen na jmenovité satorové napětí. Tento čas byl zvolen 3s, přičemž je nutné zadat tento čas jako vypínací pro vypínač S5, který byl do obvodu přidán. Prakticky se jedná pouze o přepnutí mezi zátěží naprázdno a zvolené jmenovité zátěži o velikosti 300Ω . Sledované veličiny jsou znázorněny na Obr. 4.5.

V simulaci bylo provedeno v čase 4s zvýšení hnacího momentu asynchronního generátoru z hodnoty $M_1 = 10 \text{ N.m}$ na hodnotu $M_2 = 20 \text{ N.m}$. Průběhy sledovaných veličin po tomto zvýšení jsou na Obr.4.6.

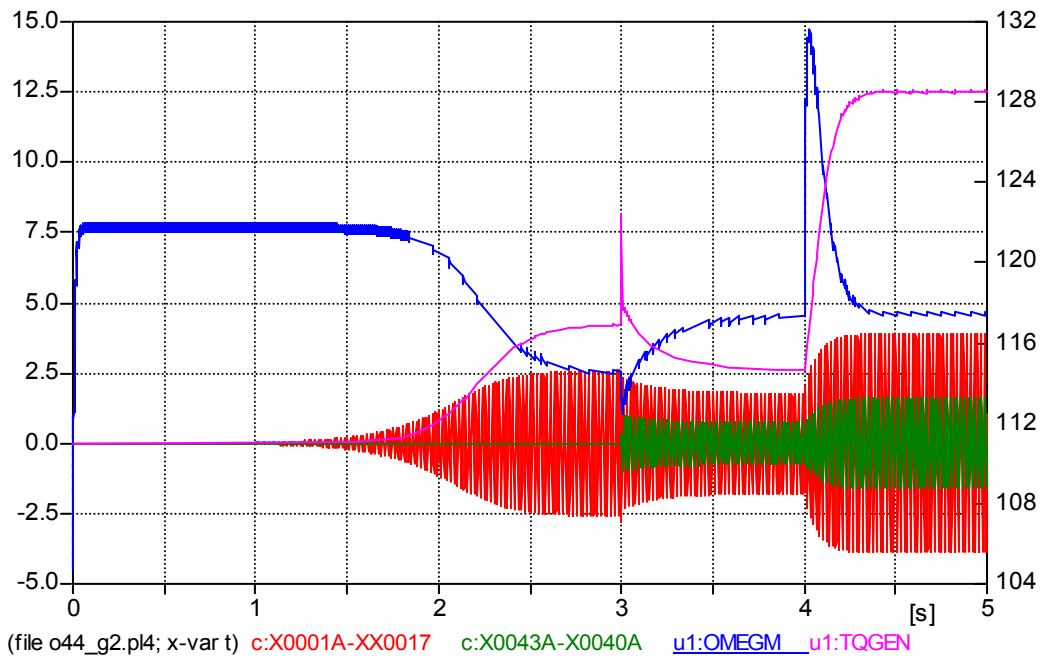


Obr.4.5 Průběhy úlové rychlosti, mechanického momentu a proudu

Na Obr.4.5 jsou zachyceny průběhy úhlové rychlosti, mechanického momentu a proudy tekoucí kondenzátory a zatěžovacími odpory. Stroj má zadán skluz 0%, to znamená, že v počátku simulace má synchronní otáčky $n = 1000 \text{ ot.min}^{-1}$. Tyto otáčky vzrostou vlivem hnacího momentu na hodnotu $\omega = 121 \text{ rad.s}^{-1}$ což odpovídá $n = 1156 \text{ ot.min}^{-1}$. Vlivem nabuzení se zvýší moment stroje na hodnotu $M_1 = 4,2 \text{ N.m}$ a tím poklesnou otáčky na hodnotu $n = 1089 \text{ ot.min}^{-1}$ ($\omega = 114 \text{ rad.s}^{-1}$). V čase 3s dojde k připojení odporové zátěže ke satorovému vinutí a počáteční amplituda proudu této zátěže má velikost $I_{R1} = 1 \text{ A}$ přičemž se ustálí v čase 3,7s na hodnotě $I_{R2} = 0,73 \text{ A}$.

Proud budícími kondenzátory poklesne z ustálené hodnoty $I_{C1} = 2,5 \text{ A}$ na hodnotu $I_{C2} = 1,8 \text{ A}$, tím poklesne zatížení generátoru vyvolaného momentem na hodnotu $M_2 = 2,6 \text{ N.m}$ a to je doprovázeno zvýšením otáček na hodnotu $n = 1118 \text{ ot.min}^{-1}$ ($\omega = 117 \text{ rad.s}^{-1}$).

Nový rovnovážný stav je charakterizován hodnotami: $n = 1118 \text{ ot.min}^{-1}$, $I_C = 1,8 \text{ A}$, $I_R = 0,73 \text{ A}$, $M = 2,6 \text{ N.m}$.



Obr.4.6 Průběhy sledovaných veličin při zvýšení hnacího momentu stroje

Na Obr. 4.6 jsou zachyceny průběhy již uvedených veličin při zvýšení mechanického hnacího momentu na hřídeli asynchronního generátoru.

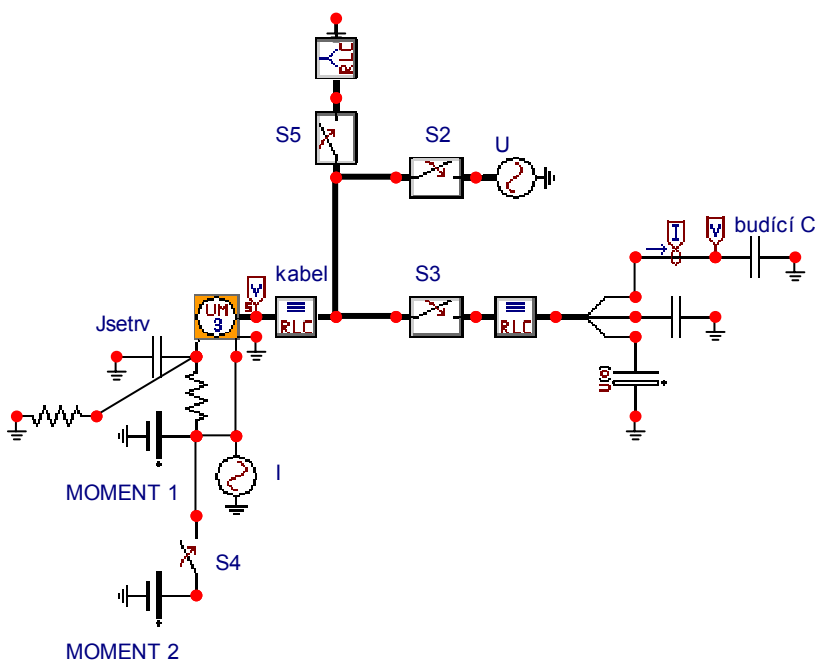
Zvýšení hnacího momentu je provedeno pomocí přídavného stejnosměrného zdroje s označením MOMENT 2 na Obr.4.1 a jednofázového vypínače S4, který připojuje tento zdroj paralelně k již stávajícímu zdroji s označením MOMENT 1. Oba proudové zdroje mají v dialogovém okně v kolonce amp hodnotu 10, tzn., že hnací moment na hřídeli se po sepnutí vypínače S4 zvýší z hodnoty $M_1 = 10 \text{ N.m}$ na hodnotu $M_2 = 20 \text{ N.m}$.

Po sepnutí S4 v čase 4s vzrůstají skokově otáčky až na $\omega = 132 \text{ rad.s}^{-1}$ ($n = 1262 \text{ ot.min}^{-1}$), to vyvolá větší proud budícím kondenzátory z hodnoty $I_{C1} = 1,8 \text{ A}$ na hodnotu $I_{C2} = 3,8 \text{ A}$, vzroste napětí stroje až na hodnotu 480V a tím vzroste i proud zatěžovacími odpory z hodnoty $I_{R1} = 0,73 \text{ A}$ na hodnotu $I_{R2} = 1,6 \text{ A}$. Úhlová rychlost rotoru se po čase 4,6s sníží opět na hodnotu $\omega = 117 \text{ rad.s}^{-1}$ ($n = 1118 \text{ ot.min}^{-1}$). Výsledný hnací moment rotoru je $M = 12,5 \text{ N.m}$.

4.2.3 Připojení asynchronního generátoru k síti

Asynchronní generátor pracující paralelně s elektrickou sítí nemusí mít připojenou kondenzátorovou baterii, jelikož je schopen si jalovou energii pro tvorbu magnetického pole vzít přímo ze sítě. Na statorovém vinutí není tedy v okamžiku připojení žádné napětí až na zanedbatelnou hodnotu vzniklou remanencí v rotoru.

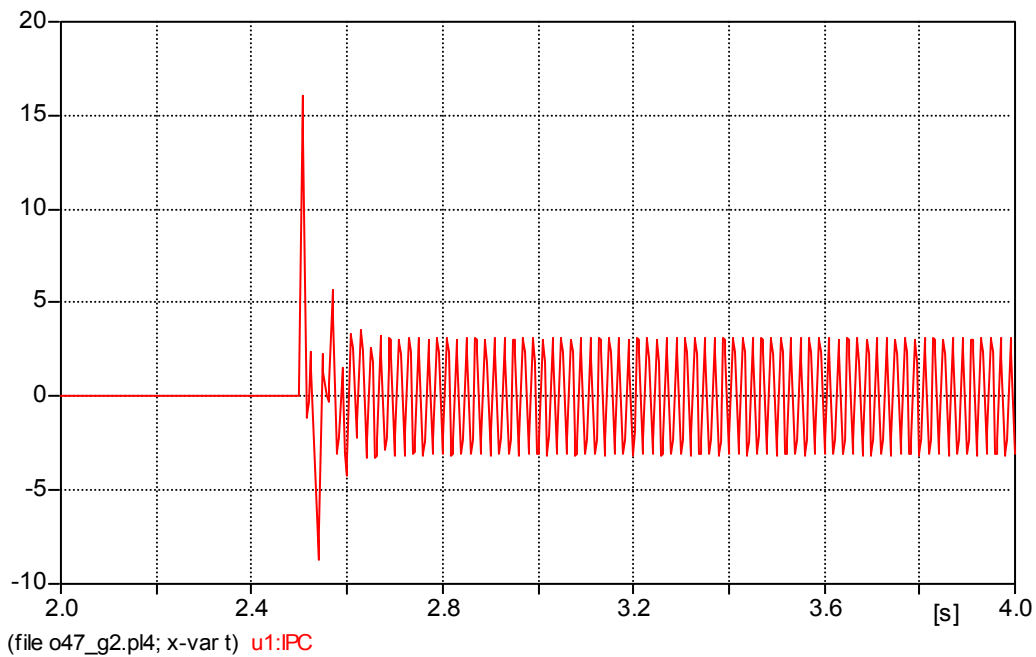
Jestliže by byla zachována kondenzátorová baterie a stroj by byl v okamžiku připojení k síti nabuzen, je tu možnost, že vznikne větší proudový ráz než v případě nenabuzeného stroje.



Obr.4.7 Zapojení asynchronního stroje pro připojení k síti

Třífázový vypínač S2 připojující generátor paralelně k síti spíná v čase 2,5s a v čase 4s sepne vypínač S4, který připojí proudový zdroj simulující hnací moment na hřídeli stroje. Výsledný moment je pak jako v předchozím případě zvýšen z hodnoty $M_1 = 10 \text{ N.m}$ na hodnotu $M_2 = 20 \text{ N.m}$. Jelikož vypínač S3 nebyl sepnutý, pak se stroj k síti připojil nenabuzený.

Vypínač S5 je v tomto případě trvale sepnutý během celé délky simulace. Výsledný proud tekoucí statorovým vinutím po připojení je znázorněn na Obr.4.8.



Obr.4.8 Průběh proudu po připojení asynchronního generátoru k síti

Stroj má před připojením k síti úhlovou rychlost $\omega = 122 \text{ rad.s}^{-1}$ ($n = 1166 \text{ ot.min}^{-1}$) a po připojení k síti tato rychlost poklesne na $\omega = 110 \text{ rad.s}^{-1}$ ($n = 1051 \text{ ot.min}^{-1}$). Moment $M_1 = 7 \text{ N.m}$ (v grafu nezobrazen).

Proudový náraz má amplitudu $I = 16 \text{ A}$ trvajícím $t = 0,0153 \text{ s}$ a po čase $2,75 \text{ s}$ se proud ustálí na hodnotě $I_1 = 3,07 \text{ A}$ (Berme v úvahu, že stroj je připojen v čase $2,5 \text{ s}$, tzn. že k proudovému ustálení nedojde v čase $2,75 \text{ s}$, ale v čase $2,75 - 2,5 = 0,25 \text{ s}$ po připojení k síti.)

Po zvýšení hnacího momentu v čase 4 s se zvýší statorový proud na hodnotu $I_2 = 4,3 \text{ A}$, moment rotoru se zvýší na hodnotu $M_2 = 14 \text{ N.m}$ a úhlová rychlost vzroste na $\omega = 115 \text{ rad.s}^{-1}$ ($n = 1100 \text{ ot.min}^{-1}$).