



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

MODEL SOUSTROJÍ GENERÁTOR-POHON

MODEL OF A DIESEL-GENERATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vít Suchomel

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Bárta

BRNO 2017



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Vít Suchomel

ID: 173749

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Model soustrojí generátor-pohon

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Na základě literární rešerše popište synchronní generátor a jeho budicí systém.
2. Sestavte elektromechanický model generátor-pohon s budicím systémem generátoru dle požadavků Siemens Drásov.
3. Proveďte výpočet na modelu při provozu v ostrovní síti pro následující stavy – zvýšení zátěže, trojfázový zkrat, dvoufázový zkrat. Výsledky okomentujte.
4. Proveďte výpočet na modelu při nedodržení podmínek fázování generátoru ke tvrdé síti

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] A. E. Fitzgerald, Ch. Kingsley, S. Umans "Electric Machinery", McGraw-Hill Companies Inc., 2003. 688 s. ISBN 0-07-112193-5
- [2] Juha Pyrhonen, Valeria Hrabovcova, R. Scott Semken „Electrical Machine Drives Control: An Introduction“ Wiley, November 2016, ISBN: 978-1-119-26045-5

Termín zadání: 6. 2. 2017

Termín odevzdání: 31. 5. 2017

Vedoucí práce: Ing. Jan Bárta

Konzultant:



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

Tato práce se zabývá principy a způsoby regulace soustrojí generátor-pohon-sít' a dále simulací tohoto soustrojí v prostředí Simulinku v programu Matlab. Práce je zpracovávána pro firmu Siemens Drásov. Vzniklý model soustrojí by měl později sloužit jako školící model pro zaměstnance firmy pro lepší a názornější objasnění této problematiky. V úvodní části je popsáno obecně soustrojí. Dále je pozornost věnována především popisu synchronního generátoru. Je zde vysvětlen princip jeho činnosti, popsány různé druhy buzení, vysvětlena práce generátoru se sítí, naznačena transformace synchronního generátoru na obecný elektrický stroj, odvozeno náhradní schéma v d, q souřadnicích. V praktické části práce se řeší simulace různých stavů generátoru. Nejprve je ve vytvořeném modelu provedena simulace při změně zatížení generátoru a dále simulace při výskytu různých zkratových poruch na svorkách generátoru. Na závěr je provedena simulace připojení synchronního generátoru do tvrdé sítě při ideálních a nepříznivých podmínkách. Všechny simulace jsou vybaveny řadou osciloskopů, ve kterých lze sledovat velké množství časových průběhů.

Klíčová slova

Regulace soustrojí; model soustrojí; simulace soustrojí; soustrojí; synchronní generátor; Simulink

Abstract

This work deals with principles and methods of drive-train regulation. Furthermore it deals with simulation of drive train via Simulink in a program Matlab. The work is done in cooperation with Siemens Drasov. A created model will be used as an educational model for employees of company. The model will allow better and more graphic education. In the beginning part is drive-train generally described. Next part is especially about a synchronous generator. This work also explains a working principle of generator and excitation. There is a cooperation of generator with electrical network described and transformation of synchronous generator into a model of general electric machine showed, substitute scheme is in d, q coordinates deduced in the next part. There are simulations of different states of generator solved in a practical part of the work. At first there is simulation of generator's load change by using the created model done and further there are simulations of short circuits in stator winding realized. Finally there are simulations of connecting the synchronous generator into infinite bus for ideal and unfavorable conditions done. All simulation models include lots of oscilloscopes, which allow time courses to display, currents, shaft's revolutions, torques and so on.

Keywords

Drive-train regulation; model of drive-train; simulation of drive-train; drive-train; synchronous generator; Simulink

Bibliografická citace:

SUCHOMEL, V. *Regulace soustrojí generátor-pohon*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Bárta.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Regulace soustrojí generátor-pohon jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

V Brně dne 31. května 2017

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Bártovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 31. května 2017

.....

podpis autora

OBSAH

1	Úvod	1
1.1	Základní popis soustrojí.....	1
1.1.1	Pohon	2
1.1.2	Hřídel	3
1.1.3	Generátor.....	3
2	Synchronní generátor.....	4
2.1.1	Princip činnosti	5
2.1.2	Popis buzení	5
2.1.3	Provoz samostatně pracujícího alternátoru	7
2.1.4	Paralelní práce synchronního generátoru se sítí.....	8
2.1.4.1	Připojení synchronního generátoru do společné sítě	8
2.1.5	Přechodné děje.....	10
2.1.6	Popis synchronního stroje pomocí teorie obecného elektrického stroje.....	11
2.1.6.1	Náhradní schéma dvouosého modelu.....	14
2.1.6.2	Synchronní stroj v ustáleném stavu	16
3	Elektromechanický model soustrojí.....	19
3.1	Parametry modelovaného soustrojí.....	19
3.2	Popis modelu	19
4	Simulace soustrojí při provozu v ostrovní síti.....	22
4.1	Změna zátěže	22
4.2	Simulace zkratů	25
4.2.1	Třífázový zemní zkrat.....	26
4.2.2	Dvoufázový zemní zkrat.....	29
5	Simulace soustrojí při fázování ke tvrdé síti	30
5.1	Připojení generátoru k síti za ideálních podmínek	31
5.2	Připojení generátoru k síti při rozdílných okamžitých hodnotách napětí	32
5.3	Připojení generátoru k síti při rozdílném sledu fází	34
6	Závěr.....	37
	Použitá literatura.....	39
	Seznam symbolů a zkratk	40
	Přílohy.....	42

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Demonstrativní obrázek soustrojí.....</i>	<i>2</i>
<i>Obrázek 2: Kompletní synchronní generátor, obrázek poskytnut od firmy Siemens Drásov.....</i>	<i>4</i>
<i>Obrázek 3: Bezkartáčový budicí systém synchronního stroje v ostrovním režimu [8].....</i>	<i>6</i>
<i>Obrázek 4: Provedení bezkartáčového buzení synchronního generátoru [8].....</i>	<i>7</i>
<i>Obrázek 5: Schéma synchronizace generátoru do společné sítě [5].....</i>	<i>9</i>
<i>Obrázek 6: Průběh zkratového proudu jedné fáze statoru při třífázovém zkratu synchronního alternátoru s vyniklými póly, převzato z [1].....</i>	<i>10</i>
<i>Obrázek 7: Dvouosý model synchronního generátoru s vyniklými póly [8].....</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 8: Náhradní schéma d osy synchronního generátoru.....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 9: Náhradní schéma q osy synchronního generátoru.....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 10: Fázorový diagram vykreslený programem pro parametry z Tabulky 1 (původní stav) a pro nové parametry z Tabulky 2 (nový stav), převzato z [9].....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 11: Vzájemné propojení dieselmotoru, generátoru a budiče.....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 12: Část modelu, princip buzení a regulace napětí.....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 13: Vnitřní schéma napěťového regulátoru.....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 14: Schéma použitého PI regulátor.....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 15: Zatížený generátor s měřícím blokem a osciloskopem v Simulinku.....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 16: Časové průběhy napětí a proudů při připnutí a odepnutí zátěže ke generátoru ..</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 17: Časový průběh otáček hřídele při změně zátěže.....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 18: Časový průběh budicího napětí generátoru při změně zátěže.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 19: Časový průběh regulovaného napětí při změně zátěže.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 20: Část modelu s volbou typu zkratu na svorkách generátoru.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 21: Průběh omezeného regulovaného napětí při zkratech.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 22: Časové průběhy napětí a proudů při třífázovém zemním zkratu.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 23: Časové průběhy fázových proudů generátoru po připojení třífázového zemního zkratu v čase 3 sekundy, detail.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 24: Průběh elektromagnetického momentu ve vzduchové mezeře při třífázovém zemním zkratu.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 25: Časové průběhy napětí a proudů při dvoufázovém zemním zkratu.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 26: Časové průběhy fázových proudů generátoru po připojení dvoufázového zemního zkratu v čase 3 sekundy.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 27: Model pro simulaci fázování.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 28: Časové průběhy napětí a proudů v síti při připojení generátoru za ideálních podmínek.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 29: Časové průběhy napětí a proudů sítě při připojení generátoru při rozdílných okamžitých hodnotách napětí.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 30: Detailní průběhy napětí a proudu generátorem při připojení do sítě.....</i>	<i>33</i>

Seznam obrázků

<i>Obrázek 31: Časový průběh elektromagnetického momentu ve vzduchové mezeře při připojení generátoru do sítě.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 32: Změna sledu fází v modelu.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 33: Detailní průběhy napětí a proudů generátoru po připojení generátoru do sítě s rozdílným sledem fází.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 34: Časové průběhy napětí a proudů sítě, při připojení generátoru při nedodržení sledu fází.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 35: Časový průběh elektromagnetického momentu ve vzduchové mezeře generátoru při připojení generátoru do sítě při rozdílném sledu fází.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 36: Ukázka výpočtu potřebných hodnot v prostředí Visual Basic v MS Excel.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 37: Náhled na celý program vykreslující fázorové diagramy v prostředí MS Excel.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 38: Náhled na celý model pro simulaci změny zatížení generátoru v Simulinku.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 39: Náhled na celý model pro simulaci zkratů v Simulinku.....</i>	<i>44</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Příklad zadaných parametrů generátoru v programu (původní stav).....</i>	<i>17</i>
<i>Tabulka 2: Jiný příklad zadaných parametrů generátoru v programu (nový stav)</i>	<i>17</i>
<i>Tabulka 3: Hlavní parametry simulovaného generátoru zadané firmou Siemens Drásov.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabulka 4: Hlavní parametry simulovaného budiče zadané firmou Siemens Drásov.....</i>	<i>19</i>

1 ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je teoreticky pochopit a popsat soustrojí a dále sestavit model tohoto soustrojí ve vhodném programu. Tento model by měl později sloužit firmě pro různá školení či prezentace. Model by měl být především názorný a dobře pochopitelný. Ve vzniklém modelu by mělo být možné simulovat různé stavy generátoru jako jsou připnutí či odepnutí zátěže, zkratové poruchy a připojení generátoru do tvrdé sítě. Model by měl umožňovat zobrazení časových průběhů různých veličin, aby bylo možné sledovat na těchto průbězích změny a vlivy zmíněných různých stavů a zatížení generátoru.

Soustrojí generátor-pohon-sít' se v současné době velmi využívá. V každé elektrárně najdeme toto soustrojí. Pohon je většinou zajištěn turbínou, která roztočí rotor generátoru a díky tomu se může indukovat napětí na svorkách statoru. Dle svých specifických vlastností se jako generátory v elektrárnách používají právě synchronní stroje, zvané také alternátory. Regulace alternátorů je velice důležitá, protože alternátory z více elektráren jsou zapojeny do společné sítě, díky které se vyráběná elektrická energie přenáší ke konečným uživatelům. Díky regulaci je tak možné reagovat na aktuální požadovanou spotřebu elektrické energie v distribuční síti. V distribuční síti se neustále mění aktuální spotřeba elektrické energie, a to například zapojením spotřebiče o velkém výkonu do sítě anebo naopak odpojením velkého spotřebiče. Na takové velké změny se musí zareagovat a to právě pomocí regulace alternátorů. Jejich dodávaný výkon do sítě lze regulovat například pomocí buzení.

Dalším příkladem použití soustrojí pohon-generátor-sít' jsou elektrocentrály. Ty jsou využívány na místech bez přístupu k distribuční elektrické síti. Hlavní využití elektrocentrál je na lodích a letadlech. Jsou zde nezbytné pro vytvoření vlastní elektrické sítě, takzvané ostrovní sítě. Vlastní elektrická síť je potřebná pro elektrické spotřebiče a zařízení, a to zejména pro osvětlení, řízení, elektrické spotřebiče a další. V těchto aplikacích bývá pohonem dieselový spalovací motor, který roztáčí společnou hřídel, na níž je umístěn rotor generátoru. Na statoru generátoru se indukují napětí nutné k napájení elektrické ostrovní sítě. I v tomto případě je nutné reagovat na změny v síti pomocí regulace soustrojí.

1.1 Základní popis soustrojí

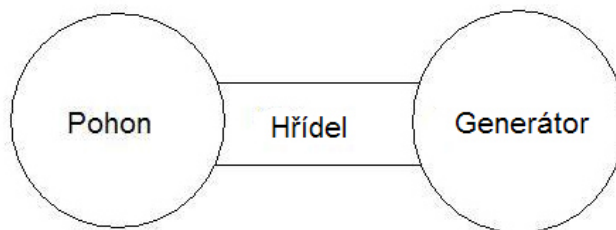
Pojmem soustrojí rozumíme soustavu dvou a více točivých strojů, které jsou umístěny na společné hřídeli. Nejčastějším typem soustrojí je kombinace mechanického točivého stroje, který roztočí hřídel, a elektrického točivého stroje, který mechanickou energii na hřídeli přemění na energii elektrickou. Stroj, který dodává energii do soustrojí, se označuje jako pohon. Stroj, který následně transformuje mechanickou energii na hřídeli na energii elektrickou, se označuje generátor.

Přeměna energií v soustrojí samozřejmě neprobíhá bezeztrátově. Existuje několik faktorů, které snižují výslednou účinnost soustrojí. Každý pohon má určitou účinnost přeměny energie a ta nemůže, být nikdy zcela bezeztrátová. Dále jsou zde ztráty při předávání energie pomocí hřídele, kdy dochází k mechanickým ztrátám, především ke ztrátám třecím. Bezeztrátový rozhodně není i samotný generátor. Pro výslednou účinnost soustrojí platí obecný vztah:

$$\eta_c = \frac{E_2}{E_1} \quad (1.1)$$

Výsledná účinnost soustrojí lze stanovit i jako součin dílčích účinností všech součástí soustrojí, což je naznačeno v následujícím vztahu:

$$\eta_c = \eta_p * \eta_g * \eta_o \quad (1.2)$$



Obrázek 1: Demonstrativní obrázek soustrojí

1.1.1 Pohon

Jak již bylo zmíněno, pohon je stroj, který dodává do soustrojí energii, která je předávána pomocí hřídele do generátoru. Rozlišujeme několik typů pohonů, mezi hlavní typy se řadí:

- Elektrický motor

Elektrický motor je nejpoužívanějším typem pohonu. Kombinace elektrického motoru a generátoru se nejčastěji používá k vytvoření si takzvané vlastní elektrické sítě. V tomto případě elektrický motor transformuje elektrickou energii z distribuční sítě na mechanickou energii, která je pomocí hřídele předána generátoru. Generátor mění dodanou mechanickou energii opět na energii elektrickou. Dle parametrů generátoru si může uživatel zvolit jemu vyhovující parametry napětí na svorkách generátoru a následně si může vytvořit svoji vlastní elektrickou síť odpovídající jeho požadavkům.

- Dieselový motor

V dieselově vznětovém motoru se mění energie uchovaná ve fosilním palivu (v tomto případě v naftě) na energii potřebnou k roztočení hřídele. Děje se tak ve spalovací komoře motoru, kam se přivádí palivo, kde je spalováno. Palivo po zažehnutí expanduje a tato energie je převáděna na hřídel motoru, kterou následně roztáčí.

- Turbína

V dnešní době je velké množství druhů turbín, ale principiálně jsou všechny stejné. Mají odlišné tvary a konstrukci, ale každá z nich má lopatky. Turbíny jsou velmi rozmanité konstrukcí lopatek i velikostí, mohou být velmi malé (řádově desítky centimetrů), ale existují i turbíny s průměrem desítek metrů.

Turbína je napojena na společnou hřídel pohonu a generátoru, a to buď přímo anebo pomocí převodovky. Předání energie z turbíny na hřídel probíhá prostřednictvím zmíněných lopatek. Turbína je roztočena prostřednictvím hmoty či látky, která působí svojí energií přímo na lopatky. Děje se tak například u větrných turbín, kdy dochází k předání energie z proudění vzduchu. Proud vzduchu působí na vhodně konstruované lopatky turbíny, v tomto případě se označují jako listy turbíny, a roztáčí tak hřídel turbíny. Dalším příkladem je několik druhů vodních turbín, které využívají kinetickou i potenciální energii vody. A v neposlední řadě se turbíny používají v tepelných, plynových a jaderných elektrárnách. V těchto elektrárnách se používají takzvané parní turbíny. Princip mají tyto elektrárny stejný. Spaluje se zde příslušné palivo a energie, která se při spalování uvolňuje

ve formě tepla se využívá k ohřátí kapaliny, nejčastěji vody. Voda se vypařuje, vzniká vodní pára, která je přivedena k parní turbíně. Energie vodní páry je pomocí lopatek turbíny převedena na hřídel, která zajišťuje pohon soustrojí.

1.1.2 Hřídel

Jedná se o nepostradatelnou část soustrojí sloužící k přenosu energie od pohonu ke generátoru. Má tvar válce a je vyráběn ve velkém rozsahu velikostí průměrů a délek. Hřídel musí pevnostně odolat tíze otáčejících se částí, které jsou na ní umístěny, a silám vyvolaných točivým momentem stroje. U typických soustrojí je vyráběna z ušlechtilých kvalitních ocelí, které mají velmi dobré mechanické vlastnosti. Rotační pohyb hřídele je umožněn díky ložiskům, ve kterých je hřídel uložena. [4]

Základem pro stanovení rozměrů hřídele je takzvaný pevnostní výpočet. V pevnostním výpočtu hřídele se uvažuje zejména namáhání hřídele ohybem a kroucením. Rozhodujícím kritériem pro stanovení rozměrů hřídele bývá často velikost přípustného průhybu hřídele, který je způsoben vlastní tíhou hřídele a vnějšími silami, které v daném momentě hřídel zatěžují. [3]

1.1.3 Generátor

Je elektrický točivý stroj, který transformuje mechanickou energii na energii elektrickou. Skládá se ze dvou hlavních částí a to ze statoru a rotoru. Stator je statická část generátoru, zatímco rotor je pohyblivá část generátoru. Rotor generátoru je roztáčen pomocí pohonu přes hřídel, skrze kterou se přivádí mechanická energie to generátoru. Mezi státorem i rotorem je vzduchová mezera umožňující otáčení rotoru a indukci napětí. Velikost vzduchové mezery záleží na mnoha faktorech, u velkých synchronních generátorů je v řádech jednotek milimetrů. Každý generátor se skládá z:

1) magnetického obvodu

Magnetický obvod generátoru je tvořen statorovým a rotorovým svazkem, které jsou od sebe navzájem odděleny vzduchovou mezerou. Stator má tvar mezikruží a rotor má tvar kruhu, který je umístěn v mezikruží statoru. Stator i rotor bývá složen z tenkých plechů, tloušťka plechů bývá v řádech desetin milimetru. Tato skladba se volí z důvodu omezení vířivých proudů, které by zde vznikaly, pokud by byla konstrukce těchto částí z celistvého kusu. Materiál plechů se volí tak, aby měl co možná nejlepší magnetické vlastnosti. [2]

2) vinutí

Vinutím rozumíme vodiče, které jsou umístěny ve statoru a rotoru generátoru. Ve statoru jsou pro vinutí vytvořeny drážky na vnitřním průměru mezikruží, naopak u rotoru jsou drážky pro vinutí na vnějším průměru. Pro vinutí se volí vodiče o velké elektrické vodivosti. Vodiče jsou buď kruhového, nebo obdélníkového průřezu. Nejpoužívanějším materiálem vodičů je měď. Druhým nejpoužívanějším materiálem pro výrobu vodičů je hliník. S porovnáním s mědí má hliník horší elektrickou vodivost a mechanickou pevnost. Oproti mědi má však hliník asi 3,5 krát menší měrnou hmotnost. Rozdíl mezi těmito materiály je i v ceně, hliník je výrazně levnější oproti mědi. [2]

Vodiče musejí být izolovány od magnetického obvodu tedy od drážek, ve kterých jsou uloženy, a zároveň musejí být také izolovány samy od sebe. V každé drážce je totiž uloženo hned několik vodičů. Každý vodič představuje závit cívky, ve které se průchodem proudu vytváří magnetické pole.

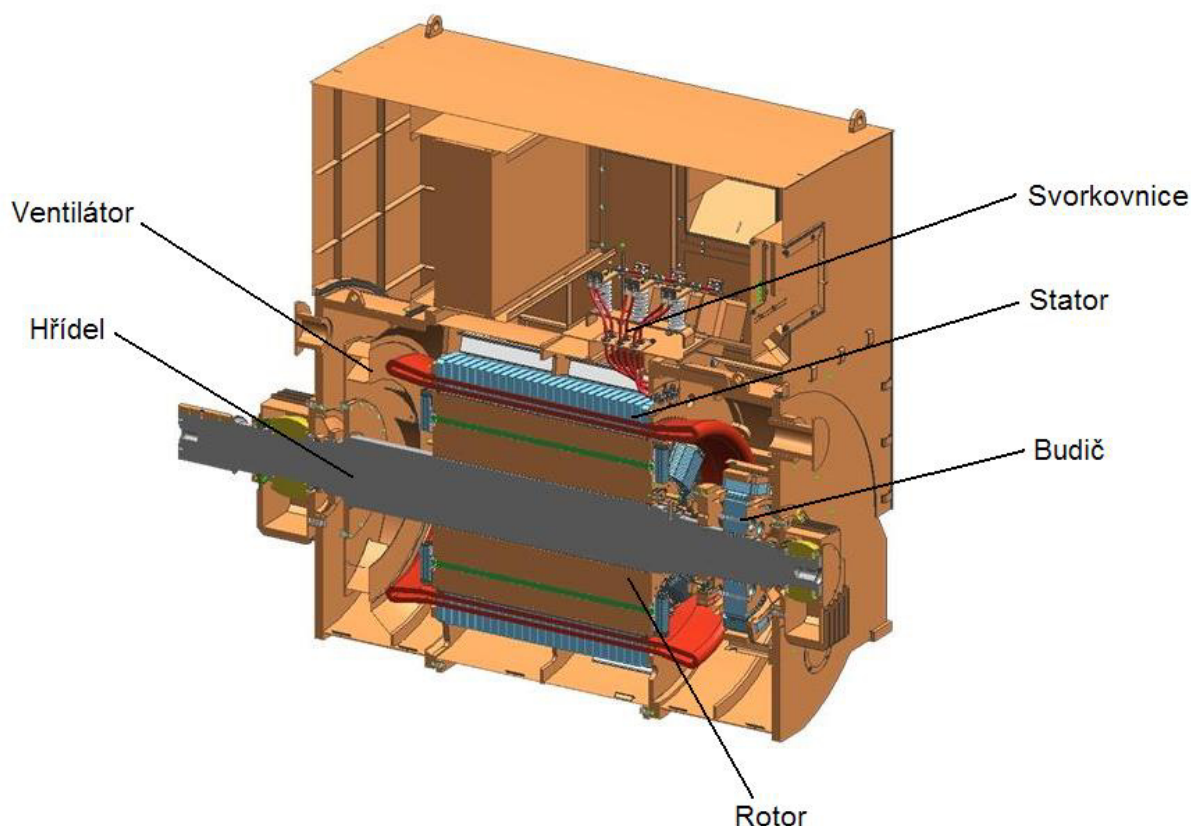
2 SYNCHRONNÍ GENERÁTOR

Název synchronní generátor je odvozen od stejné rychlosti otáčení rotoru generátoru a točivého magnetického pole statoru. Pro označení synchronního generátoru se užívá také pojem alternátor.

Dělí se na dvě kategorie a to dle typu rotoru:

1. Synchronní generátor s hladkým rotorem
2. Synchronní generátor s rotorem s vyniklými póly

Rozdíl mezi těmito dvěma typy je v rychlosti otáčení rotoru. Hladký rotor synchronního generátoru se otáčí v porovnání s rotorem s vyniklými póly několikrát rychleji. Této skutečnosti také odpovídá jejich konstrukční řešení. Hladký rotor má většinou větší délku v porovnání se svým průměrem, zatímco rotor s vyniklými póly má většinou průměr rotoru větší než jeho délka. Liší se i samotný tvar rotoru. Hladký rotor má po obvodu velké množství drážek, kterými prochází vinutí, oproti tomu rotor s vyniklými póly má po obvodu rozmístěné póly, na kterých je omotáno vinutí. [2]



Obrázek 2: Kompletní synchronní generátor, obrázek poskytnut od firmy Siemens Drásov

Obrázek 2 zobrazuje řez kompletním synchronním generátorem. Kromě hřídele, na které je umístěn rotorový svazek a budič, lze na obrázku vidět vyvedenou svorkovnici statorového vinutí. Dále je na hřídeli umístěn ventilátor, který svojí rotací a pomocí lopatek směřuje vzduch do generátoru a zajišťuje dílčí chlazení. Celý generátor je uzavřen v kovovém ochranném boxu.

2.1.1 Princip činnosti

Rotor generátoru je pomocí pohonu roztočen na určité otáčky. Součástí rotoru je i takzvané budící vinutí, pomocí kterého se do rotoru přivádí stejnosměrný proud. Proud, který prochází jednotlivými závity rotorového vinutí, vytváří magnetické pole. Toto magnetické pole vytvořené rotorem prochází přes vzduchovou mezeru do magnetického obvodu statoru a poté opět přes vzduchovou mezeru prochází zpátky do rotoru. Vinutí statoru bývá třífázové, jelikož se většinou třífázové vedení požaduje. Proto je vinutí statoru složeno ze tří hlavních cívek, které jsou vůči sobě natočeny o 120 stupňů, aby i následné dílčí složky indukované napětí byly posunuty o 120 stupňů. [1]

Otáčí-li se rotor určitými otáčkami, tak se otáčí synchronními (stejnými) otáčkami i magnetické pole vzniklé ve vinutí statoru. Změna magnetického pole indukuje v jednotlivých vinutích statoru takzvané elektromotorické napětí. Tento jev popsal již v roce 1831 Michael Faraday.

Efektivní hodnotu indukovaného napětí lze popsat pomocí vztahu:

$$U_{ief} = 4,44 * \phi_M * N_1 * f_1 * k_{v1} \quad (2.1)$$

a dále pro f_1 platí:

$$f_1 = n_2 * p \quad (2.2)$$

2.1.2 Popis buzení

Buzení je realizováno budícím vinutím anebo permanentními magnety. Buzení je potřebné k vytvoření magnetického pole. Toto vzniklé magnetické pole je potřebné k následnému vzniku indukovaného napětí ve statoru generátoru. Ve většině případů je buzení umístěno na rotoru generátoru.

Při použití permanentních magnetů jako buzení se permanentní magnety umístí nejčastěji po obvodu rotoru. Permanentní magnety vytvářejí potřebné magnetické pole. Permanentní magnety se používají pro buzení synchronních strojů malých výkonů.

V případě použití budícího vinutí existují dva způsoby uložení, které závisí na typu rotoru. V případě hladkého rychloběžného rotoru se budící vinutí umísťuje do drážek rotoru, zatímco v případě rotoru s vyniklými póly je budící vinutí tvořeno cívkami, uloženými na jádrech vystupujících pólů rotoru. Magnetické pole vzniká okolo budícího vinutí s průchodem proudu skrze budící vinutí. Budící vinutí se napájí stejnosměrným proudem z řízeného zdroje. Přívod stejnosměrného proudu k budícímu vinutí lze provést dvěma způsoby: [1]

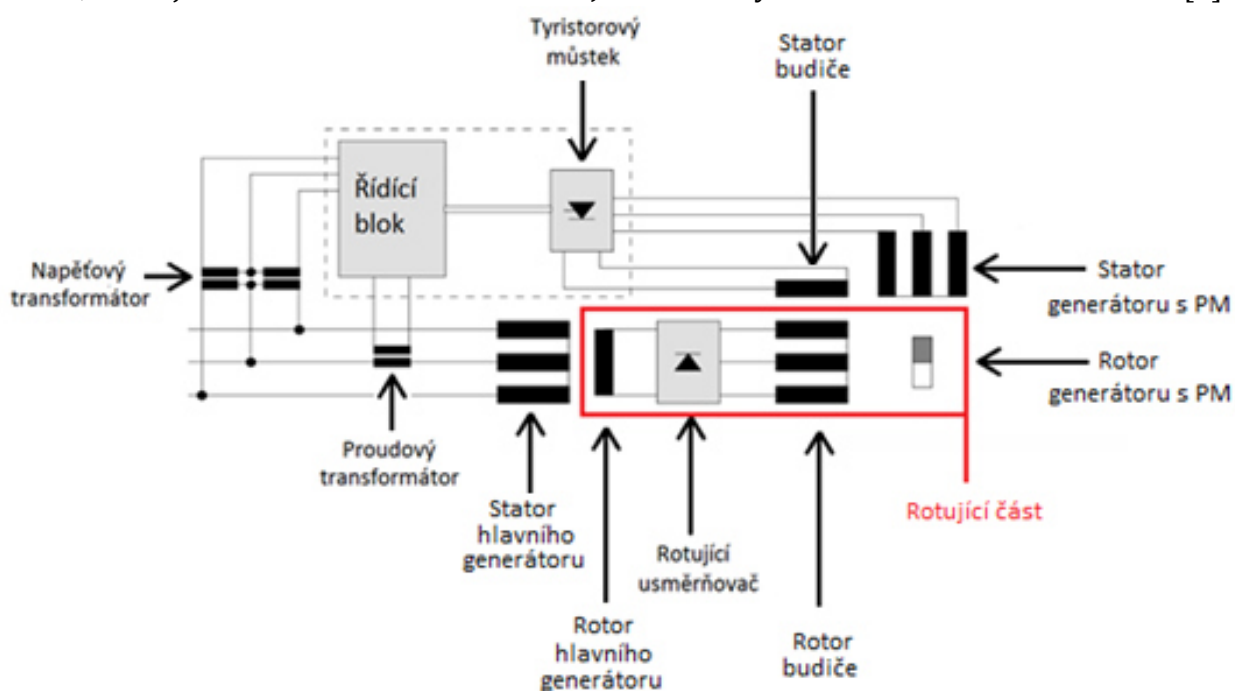
1) pomocí kroužků

V tomto případě je stejnosměrný proud potřebný pro budící vinutí přiváděn pomocí dvou vodičů, které jsou napojeny k takzvaným sběracím kroužkům umístěných na obvodu hřídele. Vodivý styk vodičů a kroužků je realizován nejčastěji pomocí grafitových kartáčů. Jsou to speciálně tvarované kvádry, které jsou pomocí pružin přitlačovány ke kroužkům. Od kroužků je poté proud přiveden do samotného budícího vinutí. Hlavní nevýhodou tohoto provedení je postupné opotřebení grafitových kartáčů.

2) pomocí střídavého budiče

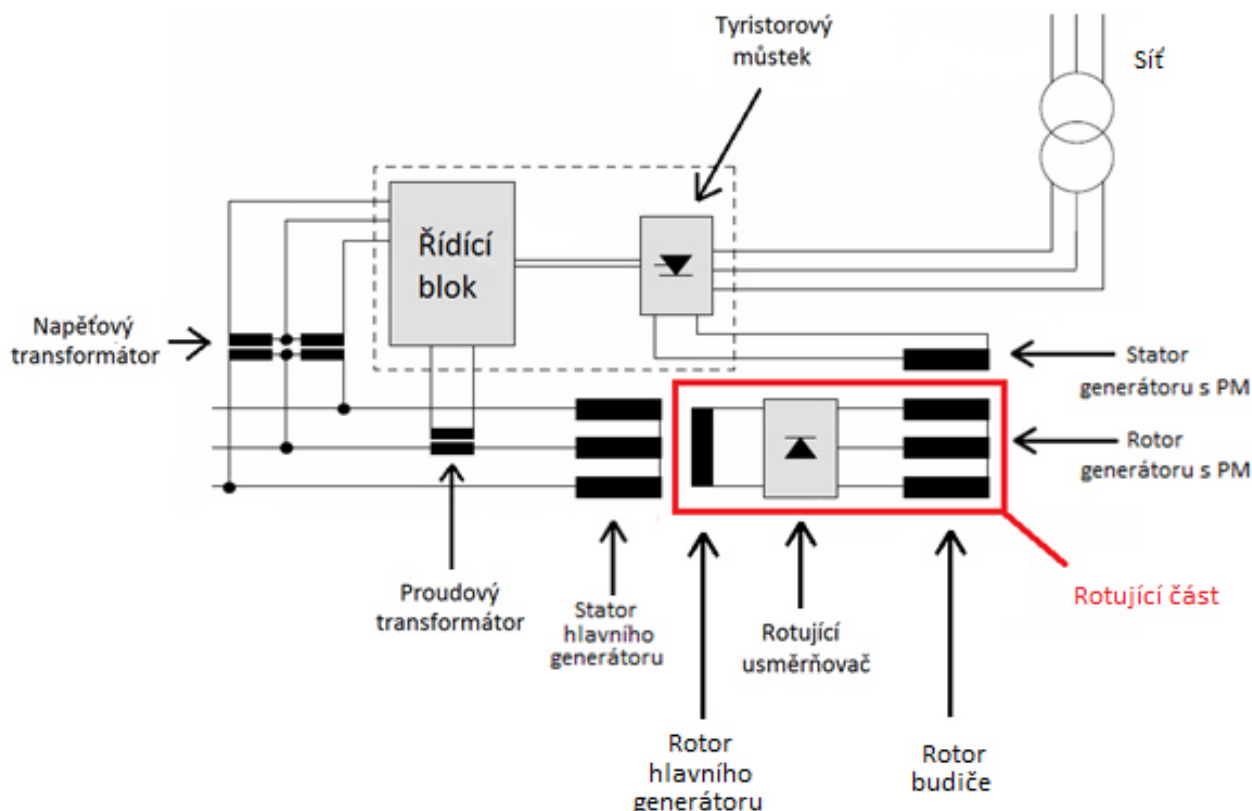
Jedná se o takzvanou bezkartáčovou budící soustavu, která, jak již název napovídá, nevyužívá kroužky ani kartáče. Vyžívá se zde střídavého budiče, který má budící vinutí na statoru a třífázové vinutí na rotoru tedy přesně naopak oproti synchronnímu generátoru. Rotor budiče je na stejné hřídeli jako rotor generátoru. V rotorovém vinutí rotačního budiče se při otáčení hřídele indukuje střídavé napětí. Rotorovým vinutím budiče prochází střídavý proud, který se pomocí neřízeného usměrňovače, který je taktéž umístěn společně s rotorem generátoru i rotorem budiče na jedné hřídeli, usměrní na stejnosměrný proud potřebný pro budící vinutí. Tento usměrněný proud se poté přímo přivádí do budícího vinutí umístěném v rotoru synchronního generátoru. [1]

Na Obrázku 3 je zobrazen bezkartáčový budící systém plně nezávislého generátoru. Tento systém buzení se využívá při provozu generátoru v ostrovní síti. Buzení stroje je zajištěno pomocí budiče. Na jedné hřídeli je umístěn rotor hlavního generátoru, který je potřeba budit, rotor budiče a rotor generátoru s PM. V tomto případě pohon roztočí hřídel, na které jsou umístěny již zmíněné 3 rotory. Rotující část je v Obrázku 3 zvýrazněna v červeném obdélníku. Generátor s PM zajišťuje napájení tyristorového můstku. Rotor generátoru s PM je osazen permanentními magnety. Otáčející se rotor s PM indukuje ve statorovém vinutí generátoru s PM střídavé napětí, které je potřebné k napájení tyristorového můstku. Tyristorový můstek napájí stator budiče, díky kterému se v třífázovém vinutí rotoru budiče indukuje střídavé napětí a prochází jím střídavý proud. Střídavý proud se usměrní pomocí rotujícího usměrňovače, který je součástí rotoru budiče. Usměrněný proud se využije jako budící proud hlavního generátoru, který je třeba budit. Na Obrázku 3 lze vidět i transformátory proudu a napětí, které jsou zde z důvodu měření a přivedení naměřených hodnot napětí a proudu do řídicího bloku. Tyristorový můstek poté dle informací z řídicího bloku patřičně spíná elektrický obvod a napájí tak budící vinutí budiče, které je umístěné na statoru budiče. Jedná se tedy o nezávislou budící soustavu. [8]



Obrázek 3: Bezkartáčový budící systém synchronního stroje v ostrovním režimu [8]

Na Obrázku 4 je zobrazen obdobný případ bezkartáčového buzení stroje jako v předchozím případě. S tím rozdílem, že zde již není ostrovní síť. Tyristorový můstek je v tomto případě napájen z distribuční sítě. Princip buzení je jinak stejný jako v předchozím budícím systému. Tato popsaná budící soustava je závislá, protože závisí na stavu distribuční sítě a bez ní nemůže fungovat.



Obrázek 4: Provedení bezkartáčového buzení synchronního generátoru [8]

Rozlišujeme dva druhy budících soustav a to:

a) závislé

Budící soustava je závislá tehdy, odebírá-li potřebný budící proud ze stejné sítě, ke které je synchronní stroj připojen, anebo i z jiné sítě, protože je na stavu této sítě závislá. [1]

b) nezávislé

Budící soustava je nezávislá v případě, kdy zdroj potřebného budícího proudu není bezprostředně závislý na stavu sítě. Zdrojem budícího proudu je v tomto případě například již zmíněný rotační budič. [1]

2.1.3 Provoz samostatně pracujícího alternátoru

Alternátor v tomto případě pracuje do vlastní sítě. Pokud se alternátor zatíží nějakým spotřebičem, tak klesne jeho frekvence, a tedy dojde k poklesu i jeho otáček, dále klesne i jeho napětí. Na pokles těchto hodnot se musí zareagovat, aby se docílilo stálých parametrů sítě vytvářené alternátorem. Proto se dodáním větší mechanické energie na hřídel alternátoru zvýší jeho otáčky, popřípadě zvětšením budícího proudu zvýšíme budící napětí. Hodnoty frekvence a napětí sítě se musí udržovat na stálých příslušných hodnotách během provozu při všech změnách zatížení alternátoru. Pohon musí na tyto změny zatížení

reagovat a to tak, že dle potřeby dodává větší anebo menší mechanickou energii na společnou hřídel soustrojí. Samočinnou regulaci těchto proměnlivých otáček hřídele zajišťuje odstředivý regulátor, který řídí činnost servomotoru na přívodu energie do pohonu, jedná se například o regulaci přívodu páry u turbíny nebo vstřikování většího množství paliva u dieselových motorů. [11]

Nejčastější použití této práce generátoru do vlastní sítě je zejména v elektrocentrálách a také ve zdrojových soupravách motorových vozidel a letadel. Alternátor se uvede do provozu tak, že je nejdříve pohonem roztočen jeho rotor na požadované synchronní otáčky. Jakmile dosáhne alternátor synchronních otáček tak se pomocí buzení nabudí a může se již zatěžovat. U elektrocentrál je nutné dodržovat konstantní výstupní napětí a kmitočet. Konstantní kmitočet je zajištěn konstantními otáčkami pohonu a konstantní hodnota výstupního napětí se zajistí regulací buzení. [2]

2.1.4 Paralelní práce synchronního generátoru se sítí

Již od počátků elektrifikace bylo nutné zajistit paralelní práci více synchronních alternátorů kvůli vzrůstající spotřebě elektrické energie. V současné době je v elektrických sítích zapojeno velké množství paralelně pracujících alternátorů, které jsou umístěny v různých elektrárnách. [1]

Výkon jednoho synchronního generátoru pracujícího do společné sítě je zanedbatelný ve srovnání se součtem výkonů všech ostatních alternátorů napájejících tuto síť. Lze tedy tvrdit, že v tomto případě pracuje synchronní generátor do sítě nekonečného výkonu. Znamená to, že jakákoliv změna práce jednoho dílčího alternátoru nemá vliv na velikost výsledného napětí a kmitočtu společné sítě. Tyto hodnoty napětí a kmitočtu společné sítě lze tedy považovat za konstantní. Ve skutečnosti stále konstantní nejsou, ale jejich hodnoty se liší pouze o jednotky procent oproti požadovaným. [1]

Jednou z velkých předností synchronního stroje je fakt, že pokud je zapojen do společné sítě nekonečného výkonu, tak se snaží sám od sebe udržovat si své synchronní otáčky. Tato vlastnost stroje je jeho velkou ctností, ale má své omezení. Přesáhnou-li momenty urychlující či zpomalující rotor generátoru své kritické hodnoty, tak stroj takzvaně vypadne ze synchronismu, to znamená, že se rotor generátoru přestane synchronně otáčet s magnetickým polem statoru. [1]

2.1.4.1 Připojení synchronního generátoru do společné sítě

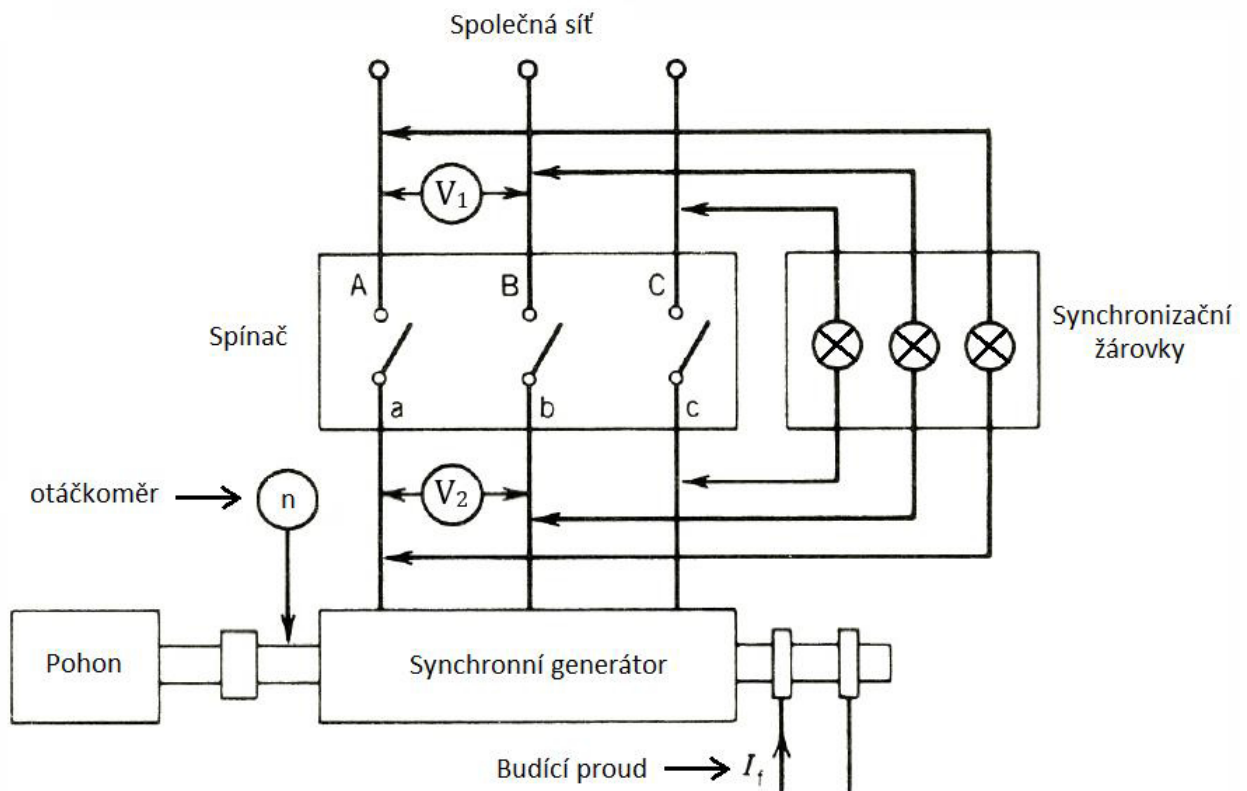
Dle okamžité potřeby se k distribuční síti připojují další generátory takovým způsobem, aby se docílilo takového zatížení na alternátoru, které je blízké jeho jmenovitému zatížení. Synchronní generátor můžeme připojit na společnou síť pouze v případě, jsou-li splněny čtyři podmínky paralelní práce. [5]

Podmínky umožňující připojení synchronního generátoru do společné sítě [5]:

1. Stejně efektivní hodnoty napětí generátoru a sítě
2. Stejný kmitočet generátoru a sítě
3. Stejný sled fází generátoru a sítě
4. Stejně okamžité hodnoty napětí generátoru a sítě v okamžiku připojení

Přesné dodržení těchto podmínek v praxi je velmi obtížné, proto se dodržují jen přibližně. Již bylo vyvinuto mnoho způsobů a zařízení, které umožňovaly zjistit, jsou-li dodrženy všechny potřebné podmínky a je tedy možnost připojit alternátor k síti. Nejvíce osvědčená, velmi jednoduchá a názorná je metoda synchronizace pomocí tří žárovek, voltmetru a otáčkoměru. Při použití této metody nejprve roztočíme pohonem alternátor na otáčky blízké synchronním s takovou přesností, jakou umožňuje otáčkoměr. Tímto je zajištěna podmínka stejného kmitočtu. Podmínka stejného sledu fází je splněna správným zapojením dílčích fází generátoru a sítě. V dalším kroku nabudíme alternátor na napětí sítě, napětí si určíme pomocí voltmetru, čímž si zajistíme podmínku stejné efektivní hodnoty. Dále si propojíme fáze sítě a fáze na satorovém vinutí alternátoru, přičemž v každé fázi máme připojenou žárovku. Poté dodatečně řídíme otáčky alternátoru tak, aby žárovky rovnoměrně a ve stejný čas zhasínaly a aby interval mezi jednotlivými zhasnutími byl v řádu několika sekund. Alternátor připojíme k síti v okamžiku, kdy žárovky nesvítí, tím zajistíme podmínku, a to stejné okamžité hodnoty napětí. Tato metoda připojení alternátoru k síti se někdy nazývá synchronizace „na tmou“, protože alternátor připojíme v okamžiku, kdy žárovkami neprochází žádný proud, a proto jsou v jednotlivých fázích zhasnuté. [5]

Na Obrázku 5 je naznačeno schéma metody synchronizace pomocí žárovek. Synchronní generátor, který má být připojen do sítě je roztočen pomocí pohonu na požadované otáčky. Otáčky společně hřídele pohonu a generátoru měří otáčkoměr. Stejně fáze sítě a generátoru jsou propojené mezi sebou vodiči, v každém z těchto vodičů je zapojená i žárovka. Voltmetry V_1 a V_2 měří efektivní hodnoty sdruženého napětí generátoru a sítě. Pomocí budícího proudu si lze upravovat efektivní hodnotu napětí na generátoru. V tomto případě je stejnosměrný budící proud přiváděn do generátoru pomocí kroužků. Spínač ve schématu umožňuje v příslušný okamžik připojit generátor so společné sítě.



Obrázek 5: Schéma synchronizace generátoru do společné sítě [5]

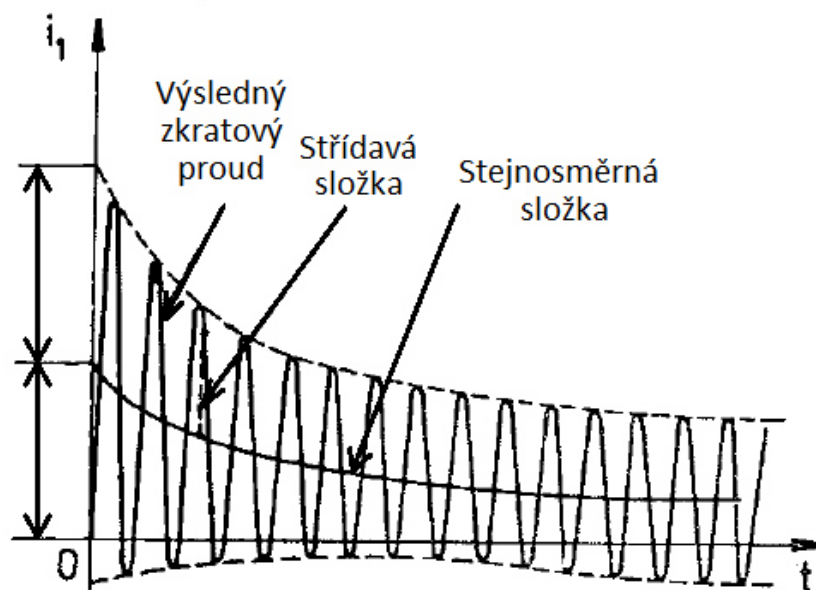
2.1.5 Přejchodné děje

Přejchodné děje jsou děje, které se projevují pouze určitou dobu a poté odezní. Ke vzniku přejchodných dějů u synchronních strojů dochází při rychlých změnách chodu stroje. Vznik přejchodných dějů lze tedy očekávat při zkratech, po připojení či odpojení stroje k síti a při rychlých změnách zatížení stroje. Přejchodné děje ovlivňují stabilitu stroje. U synchronních strojů se pojmem stabilita stroje označuje schopnost udržet synchronní otáčky stroje při změně ustáleného chodu. [1]

V synchronním stroji je hned několik elektrických obvodů, které se navzájem ovlivňují generovaným magnetickým polem. Rotor se společně s jeho vinutími otáčí periodickou rychlostí vůči jednotlivým fázím statoru. Rozbor a popis přejchodových dějů vznikajících v synchronním stroji je proto složitý a obtížný. Přejchodné děje ve vinutí statoru a rotoru lze popsat pomocí soustavy diferenciálních rovnic s periodicky se měnícími koeficienty, toto řešení je poměrně složité. Existuje však metoda, která je velice rozšířená a usnadňuje řešení této soustavy. Tato metoda se označuje jako tzv. transformace d, q, 0. [1]

Typickým přejchodným dějem je zkratový proud ve statorovém vinutí. Vzniklý zkratový proud ve fázích statoru má dvě dílčí složky, a to jmenovitě střídavou a stejnosměrnou. Střídavá složka zkratového proudu vybudí točivé magnetické pole, které se otáčí stejnými otáčkami jako rotor. Zatímco stejnosměrná složka zkratového proudu vybudí stojící netočivé magnetické pole. Tato nově vzniklá magnetická pole vyvolají vznik proudů ve všech uzavřených obvodech stroje, tyto nově vzniklé proudy zabraňují vytvoření nových magnetických polí. [1]

Točivé pole vzniklé na základě střídavé složky zkratového proudu se otáčí synchronně s rotorem a vyvolává v uzavřených obvodech rotoru stejnosměrné proudy. Tyto proudy, ale postupně zanikají díky ztrátám ve vinutích. Stojící netočivé pole statoru vzniklé na základě stejnosměrné složky zkratového proudu vyvolává v uzavřených obvodech statoru střídavý proud, který jako stejnosměrný proud v rotorových obvodech s postupem času zanikne. [1]



Obrázek 6: Průběh zkratového proudu jedné fáze statoru při třífázovém zkratu synchronního alternátoru s vyniklými póly, převzato z [1]

2.1.6 Popis synchronního stroje pomocí teorie obecného elektrického stroje

Tuto teorii matematicky formuloval Gabriel Kron již kolem roku 1935. Definoval univerzální elektrický stroj, který při rozdílných zapojeních reprezentoval různé druhy elektrických strojů. Teorie obecného elektrického stroje s využitím základních principů a rovnic sjednocuje všechny typy elektrických strojů pouze na jediný a to obecný elektrický stroj. Hlavní výhodou této teorie je fakt, že její rovnice pro popis elektrických strojů platí nejen pro ustálené, ale i pro přechodné děje v elektrických strojích. V této teorii jsou elektrické stroje popisovány jako celek vzájemně magneticky propojených pohyblivých a nepohyblivých elektrických obvodů tedy vinutých strojů. Tyto vinutí jsou charakterizovány činnými odpory, momenty setrvačnosti a svými vlastními a vzájemnými indukčnostmi. Vzájemná indukčnost závisí na poloze jednotlivých vinutí. [6]

Teorie obecného elektrického stroje nezahrnuje všechny detailní procesy v elektrických strojích, ale je společná pro většinu elektrických strojů. Vysvětluje a popisuje základní vlastnosti a charakteristiky různých elektrických strojů na základě společných principů. Její univerzálnost je také dána tím, že lze použít pro různé provozní stavy, vedle ustálených a přechodných lze použít i v případě nesouměrných stavů či pro nesinusové napájecí napětí atd. Tato metoda má však i některé nevýhody. Jednou z nich je částečné zjednodušení a tedy i malé nepřesnosti. V této teorii se elektrické stroje idealizují pomocí zjednodušujících předpokladů. Tyto předpoklady zjednoduší znění a řešení odvozených rovnic obecného elektrického stroje. Zanedbání kapacity mezi závity a vinutími, zanedbání vlivu oteplení na velikost činných odporů a další podobné zjednodušení jsou pochopitelné a nemají zásadní vliv. Tato metoda zavádí však i zjednodušující předpoklady, které zanedbávají i vlivy podstatnější a vznikají nepřesnosti. Mezi tyto předpoklady patří: [6]

- Zanedbání vlivu magnetického sycení.
- Činné odpory a indukčnosti vinutí nezávisí na kmitočtu.
- Zanedbává se vliv komutace.
- Vinutí stroje jsou rovnoměrně rozložena po obvodu stroje.
- Vinutí strojů na střídavý proud jsou rozložena sinusově.

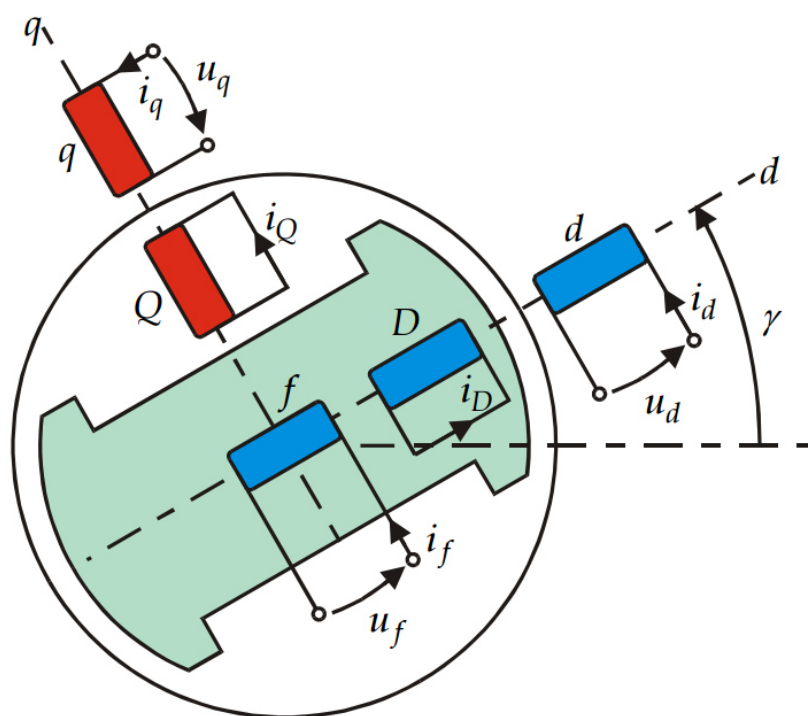
I přes některé nepřesnosti se jeví tato teorie jako jednoduchá, univerzální a vhodná pro popis dějů v elektrických strojích.

Pro snadnější popis chování synchronního generátoru se musí nejprve transformovat na takzvaný dvouosý model. Využívá se zde transformace $d, q, 0$.

V transformaci $d, q, 0$ se nahradí trojfázové stojící vinutí statoru dvoufázovým vinutím, které se otáčí synchronně s rotorem. V ustáleném stavu protéká v dvoufázovém vinutí stejnosměrný proud. Vybuzené magnetické pole náhradním dvoufázovým vinutím se musí rovnat točivému magnetickému poli nahrazeného trojfázového vinutí. Tato rovnost se zajistí změnou velikosti stejnosměrných proudů, které protékají dvoufázovým vinutím a budí magnetické pole. [1]

Při přechodném ději se mění velikost střídavých proudů v trojfázovém vinutí statoru. Odpovídajícím způsobem se musí měnit i velikost stejnosměrných proudů v otáčejícím se

dvoufázovém vinutí. Platí zde opět podmínka, že generované magnetické pole musí být v případě trojfázového i dvoufázového vinutí stejné. [1]



Obrázek 7: Dvouosý model synchronního generátoru s vyniklými póly [8]

Na Obrázku 7 je zobrazen dvouosý model synchronního generátoru s vyniklými póly. Tento model byl získán po $d, q, 0$ transformaci. Tento model má dvě hlavní osy a to osu d a q . Osa q je posunuta vůči ose d o 90 elektrických stupňů. Budící vinutí je na Obrázku 7 reprezentováno zkratkou f a leží v ose d . Tlumící vinutí v rotoru je nahrazeno dvěma vinutími, je to vinutí D v ose d a vinutí Q , které leží v ose q . Třífázové statorové vinutí je nahrazeno dvoufázovým vinutím d a q , které leží na stejnojmenných osách. Tlumící vinutí reprezentované cívkami D a Q je spojeno nakrátko. V tomto modelu je stroj popisován v rotorových souřadnicích, to znamená, že se namísto rotoru otáčí stator, zatímco rotor stojí na místě. [7]

Při použití tohoto modelu a následných transformací vyjdou napěťové rovnice synchronního stroje následovně: [7]

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q \quad (2.3)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d \quad (2.4)$$

$$u_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \quad (2.5)$$

$$0 = R_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt} \quad (2.6)$$

$$0 = R_Q i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt} \quad (2.7)$$

Výše uvedené napěťové rovnice se skládají z několika dílčích částí. První část pravé strany rovnice tvoří úbytek napětí na odporu vinutí vyvolaný procházejícím proudem. Druhým členem pravé strany rovnice je indukované napětí, které se určí jako změna spřaženého magnetického toku v čase. Třetím a posledním členem pravé strany rovnice je napětí vzniklé pohybem statorového vinutí úhlovou rychlostí ω v magnetickém poli. Tyto členy obsahující ve svém výrazu ω se vyskytují pouze u rovnic (2.3) a (2.4), které popisují statorové vinutí. V dalších rovnicích popisujících rotor (2.5)-(2.7) již tento člen není, protože se rotor v tomto modelu neotáčí. U rovnic (2.6) a (2.7) je napětí na levé straně rovnice nulové, protože jsou tyto vinutí reprezentující tlumící vinutí spojené nakrátko.

Pro spřažené magnetické toky uvedené v předešlých napěťových rovnicích platí tyto rovnice:[7]

$$\psi_d = L_d i_d + L_{df} i_f + L_{dD} i_D \quad (2.8)$$

$$\psi_f = L_{df} i_d + L_f i_f + L_{fD} i_D \quad (2.9)$$

$$\psi_D = L_{dD} i_d + L_{fD} i_f + L_D i_D \quad (2.10)$$

$$\psi_q = L_q i_q + L_{qQ} i_Q \quad (2.11)$$

$$\psi_Q = L_{qQ} i_q + L_Q i_Q \quad (2.12)$$

Spřažené magnetické toky jednotlivých vinutí jsou dány několika sčítanci. Magnetický tok se určí jako součin indukčnosti a procházejícího proudu vinutím. Spřažený magnetický tok se v jedné ose dvuosého modelu synchronního generátoru určí jako součet součinů jednotlivých indukčností a proudů procházejících dílčími vinutími. V případě určení indukčnosti jednotlivých vinutí v příslušných osách se zde projeví i vzájemná indukčnost. Tato vzájemná indukčnost vzniká mezi vinutími, které jsou umístěny ve stejné ose.

Pro zjednodušený model synchronního stroje v d, q osách lze určit i pohybovou rovnici. Tato rovnice se skládá z levé a pravé strany. Levou stranu rovnice představuje elektromagnetický moment generovaný synchronním strojem. V d, q osách lze tento moment vyjádřit následovně:

$$M_e = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (2.13)$$

Pravou stranu rovnice tvoří dynamický moment a moment zátěžný. Dynamický moment se vyjádří:

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.14)$$

Výsledná pohybová rovnice pro model synchronního generátoru v d, q osách má tvar: [7]

$$M_e = M_d + M_z \quad (2.15)$$

Po dosazení získáme výslednou pohybovou rovnici.

$$\frac{3}{2}p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) = J \frac{d\omega}{dt} + M_z \quad (2.16)$$

V dvouosém modelu lze úhlovou rychlost ω popsat také pomocí úhlu γ , je to úhel mezi pomyslnou vodorovnou rovinou a natočenou osou d. Tento úhel lze vidět v Obrázku 7.

Úhlová rychlost lze tedy vyjádřit i jako časová změna tohoto úhlu. Platí tedy rovnice: [7]

$$\omega = \frac{d\gamma}{dt} \quad (2.17)$$

2.1.6.1 Náhradní schéma dvouosého modelu

Výše uvedené napěťové rovnice a rovnice popisující spřažený magnetický tok dvouosého synchronního stroje lze upravit a sestavit z nich náhradní schéma pro jednotlivé osy. Tato náhradní schémata dílčích os názorně popisují tento stroj. K popisu není potřeba řada rovnic, ale tento stroj je popsán pouze pomocí dvou náhradních elektrických obvodů pro dílčí osy. Z těchto náhradních schémat lze odvodit potřebné napěťové rovnice.

Za předpokladu, že se vzájemné indukčnosti v ose d rovnají a označí se L_{md} , lze psát následující rovnici:

$$L_{df} = L_{dD} = L_{fD} = L_{md} \quad (2.18)$$

Dále pro indukčnost vinutí v ose platí, že se skládá z dvou dílčích složek, a to indukčnosti rozptylové a indukčnosti vzájemné v dílčí ose:

$$L_i = L_{i\sigma} + L_{mj} \quad (2.19)$$

, kde pro osu d se index i rovná d, f, D a index j se rovná v tomto případě d.

Dva předešlé vztahy jsou použity v následujících rovnicích, kde je pomocí těchto rovnic upravena rovnice pro spřažený magnetický tok členu d, který představuje nahrazené statorové vinutí v ose d. Nejprve lze s využitím rovnice (2.19) upravit rovnici (2.8) následovně:

$$\psi_d = L_{d\sigma} i_d + L_{md} i_d + L_{df} i_f + L_{dD} i_D \quad (2.20)$$

Další úprava rovnice (2.20) je možná s využitím rovnice (2.18). Po použití této rovnice lze vzájemnou indukci L_{md} vytknout a získat následující tvar rovnice:

$$\psi_d = L_{d\sigma} i_d + L_{md}(i_d + i_f + i_D) \quad (2.21)$$

Předešlé úpravy pro rovnici spřaženého magnetického toku pro prvek d, lze použít i na další dvě rovnice popisující spřažený magnetický tok dílčích prvků. Po těchto úpravách mají rovnice (2.9) a (2.10) tvary:

$$\psi_f = L_{f\sigma} i_f + L_{md}(i_d + i_f + i_D) \quad (2.22)$$

$$\psi_D = L_{D\sigma} i_D + L_{md}(i_d + i_f + i_D) \quad (2.23)$$

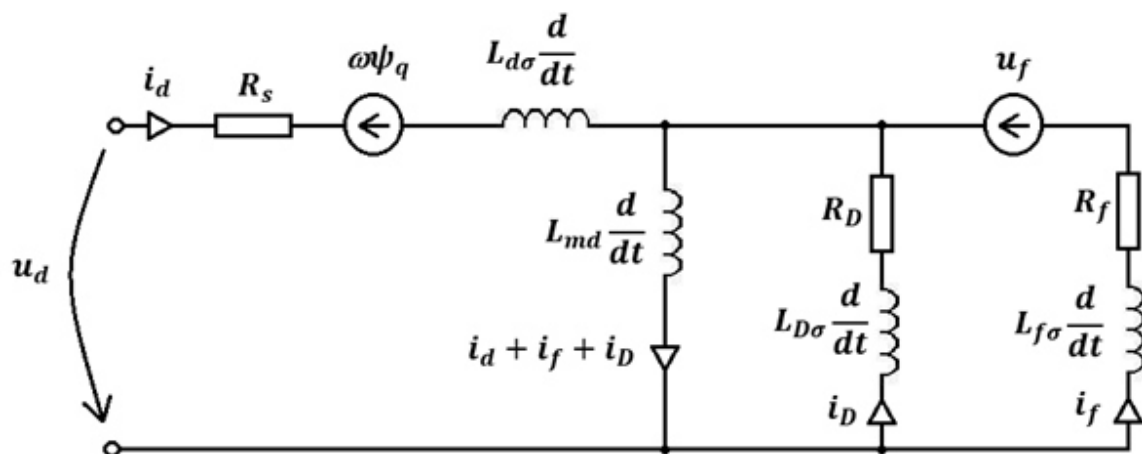
Po dosazení rovnic (2.20), (2.22) a (2.23) do napěťových rovnic popisujících osu d (2.3), (2.5) a (2.6) vzniknou následující rovnice vhodné pro vytvoření náhradního schématu synchronního stroje v ose d:

$$u_d = R_s i_d - \omega \psi_q + L_{d\sigma} \frac{di_d}{dt} + L_{md} \frac{d}{dt} (i_d + i_f + i_D) \quad (2.24)$$

$$u_f = R_f i_f + L_{f\sigma} \frac{di_f}{dt} + L_{md} \frac{d}{dt} (i_d + i_f + i_D) \quad (2.25)$$

$$0 = R_D i_D + L_{D\sigma} \frac{di_D}{dt} + L_{md} \frac{d}{dt} (i_d + i_f + i_D) \quad (2.26)$$

Z rovnic (2.24) – (2.26) lze sestavit odpovídající náhradní schéma synchronního stroje v ose d, toto schéma je zobrazeno na Obrázku 8.



Obrázek 8: Náhradní schéma d osy synchronního generátoru

Obdobným způsobem jako pro osu d lze odvodit i náhradní schéma pro osu q. V tomto případě se nahradí vzájemná indukčnost osy q indukčností L_{mq} . Platí tedy rovnice:

$$L_{qQ} = L_{mq} \quad (2.27)$$

Dále pro indukčnost vinutí v ose platí jako v předchozím případě, že se skládá z dvou dílčích složek, a to indukčnosti rozptylové a indukčnosti vzájemné v dílčí ose:

$$L_i = L_{i\sigma} + L_{mj} \quad (2.28)$$

, kde pro osu q se index i rovná q, Q a index j se rovná v tomto případě q.

Rovnice pro spřažené magnetické toky v ose q (2.11) a (2.12) lze upravit do následujících tvarů:

$$\psi_q = L_{q\sigma} i_q + L_{mq} (i_q + i_Q) \quad (2.29)$$

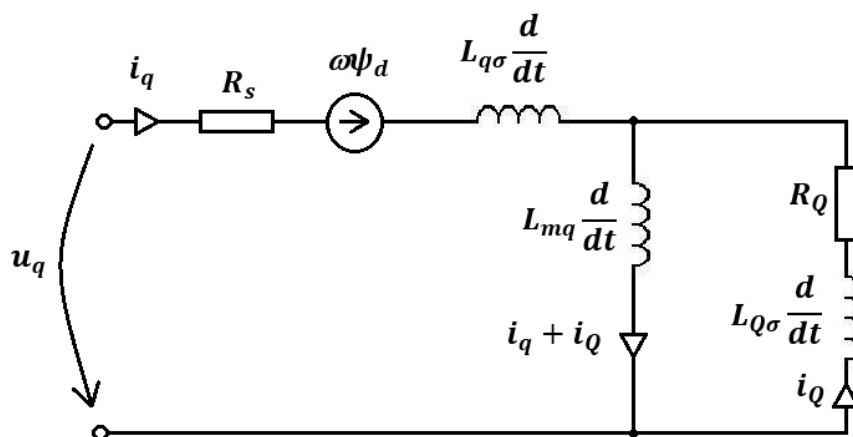
$$\psi_Q = L_{Q\sigma} i_Q + L_{mq} (i_q + i_Q) \quad (2.30)$$

Po dosazení vztahů (2.29) a (2.30) do napěťových rovnic popisující osu q (2.4) a (2.7) vzniknou následující rovnice vhodné pro vytvoření náhradního schématu synchronního stroje v ose q:

$$u_q = R_s i_q + \omega \psi_d + L_{q\sigma} \frac{di_q}{dt} + L_{mq} \frac{d}{dt} (i_q + i_Q) \quad (2.31)$$

$$0 = R_Q i_Q + L_{Q\sigma} \frac{di_Q}{dt} + L_{mq} \frac{d}{dt} (i_q + i_Q) \quad (2.32)$$

Z rovnic (2.31) a (2.32) bylo sestaveno náhradní schéma synchronního stroje v ose q, toto schéma je zobrazeno na Obrázku 9.



Obrázek 9: Náhradní schéma q osy synchronního generátoru

Odvození rovnic popisujících dvouosý model synchronního stroje a následná úprava rovnic a sestavení náhradních elektrických obvodů pro dílčí osy je v souladu s [7].

2.1.6.2 Synchronní stroj v ustáleném stavu

V ustáleném stavu nedochází k žádným časovým změnám u veličin. Proto se napěťové rovnice (2.3)-(2.5) výrazně zjednoduší. V ustáleném stavu jsou totiž derivace spřaženého magnetického toku dle času nulové. Napěťové rovnice popisující synchronní stroj transformovaný do d, q os a zároveň nacházející se v ustáleném stavu budou mít tvar:

$$u_d = R_s i_d - \omega \psi_q \quad (2.33)$$

$$u_q = R_s i_q - \omega \psi_d \quad (2.34)$$

$$u_f = R_f i_f \quad (2.35)$$

V ustáleném stavu již nebude mít žádný vliv tlumící vinutí, protože skrze vinutí nebude procházet žádný proud. Proto i rovnice magnetického spřaženého toku v osách d a q budou zjednodušené oproti rovnicím (2.8) a (2.11) a budou mít následující tvary:

$$\psi_d = L_d i_d + L_{df} i_f \quad (2.36)$$

$$\psi_q = L_q \dot{i}_q \quad (2.37)$$

V rámci semestrální práce byl vytvořen program, který umožňuje ze zadaných parametrů generátoru a zátěže vykreslit fázorový diagram. Fázorový diagram slouží k názornému popisu synchronního stroje v ustáleném stavu. Tento program byl vytvořen v prostředí Microsoft Excel. Příslušné výpočty jsou prováděny pomocí maker a pomocí programovacího jazyka Visual Basic. Pro jednoduchost a názornost jsou makra reprezentována tlačítky, která stisknutím myši spustí odpovídající makra. Ukázka výpočtu potřebných hodnot v jazyce Visual Basic a celkový náhled na celý program v MS Excel jsou umístěny v přílohách práce.

Program vykreslí fázorový diagram indukčně zatíženého generátoru v ustáleném stavu. Uživatel si může změnit některé parametry a sledovat jejich vliv na vykreslovaném fázorovém diagramu. Lze si tedy například měnit příkon zátěže a sledovat změnu zátěžného úhlu.

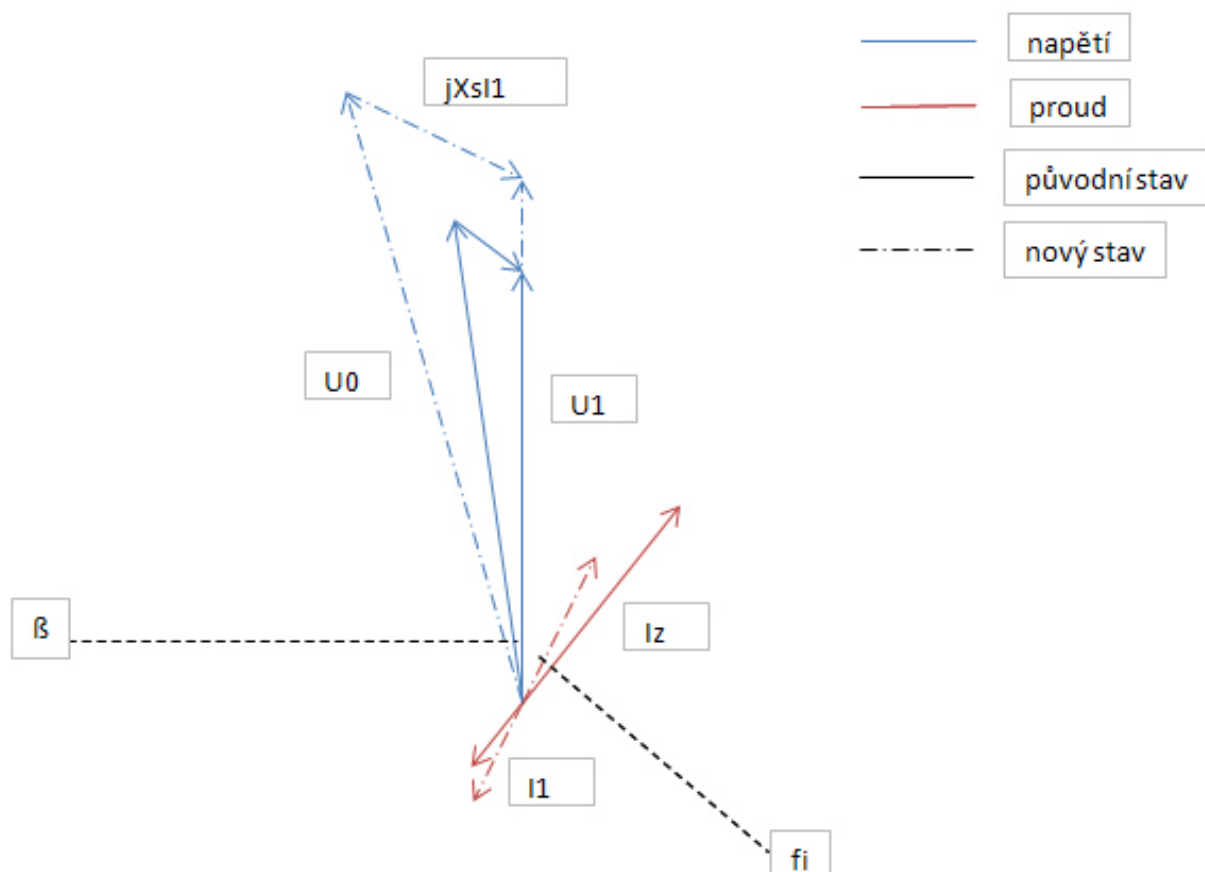
Níže uvedené dvě tabulky se liší v zadání vstupních parametrů programu. Pro obě tabulky byl proveden výpočet a následně vykreslen fázorový diagram vzniklým programem. Na diagramu lze sledovat změny a odchylky dílčích fázorů pro dvě různá zadání. Toto srovnání fázorových diagramů je zobrazeno na Obrázku 10. [9]

Tabulka 1: Příklad zadaných parametrů generátoru v programu (původní stav)

Zadané hodnoty Synchronní generátor		
Zapojení vinutí		Y
Frekvence	f [Hz]	60
Jmenovité napětí	Un [V]	6600
Příkon	S [VA]	3,963E+06
Účinnost	cosφ [-]	0,8
Počet pólů	2p [-]	10
Počet fází	m [-]	3
Impedance synchronní reaktance	Xs [Ohm]	9
Příkon zátěže	Sz [VA]	1,00E+06

Tabulka 2: Jiný příklad zadaných parametrů generátoru v programu (nový stav)

Zadané hodnoty Synchronní generátor		
Zapojení vinutí		Y
Frekvence	f [Hz]	50
Jmenovité napětí	Un [V]	8000
Příkon	S [VA]	4,000E+06
Účinnost	cosφ [-]	0,9
Počet pólů	2p [-]	8
Počet fází	m [-]	3
Impedance synchronní reaktance	Xs [Ohm]	15
Příkon zátěže	Sz [VA]	8,00E+05



Obrázek 10: Fázorový diagram vykreslený programem pro parametry z Tabulky 1 (původní stav) a pro nové parametry z Tabulky 2 (nový stav), převzato z [9]

Na Obrázku 10 je zobrazený vykreslený fázorový diagram pro dvojí různé parametry synchronního generátoru a zátěže. V novém stavu je jmenovité napětí i impedance synchronní reaktance větší, což lze vidět na vykreslených diagramech. V novém stavu je dále vyšší účinník a menší příkon zátěže, proto je úhel mezi zátěžným proudem a svorkovým napětím nového stavu menší a hodnota zátěžného proudu je také zmenšená. Na diagramech lze také sledovat změnu zátěžného úhlu β při rozdílných zadáních.

3 ELEKTROMECHANICKÝ MODEL SOUSTROJÍ

3.1 Parametry modelovaného soustrojí

V následující části bude specifikován a blíže popsán použitý generátor a budič v simulovaném modelu. V simulaci byly nadefinovány parametry generátoru a budiče dle zadaných požadavků od firmy Siemens Drásov. Hlavní parametry generátoru zadané od firmy jsou zobrazeny v Tabulce 3. Jedná se o synchronní generátor s vyniklými póly. Synchronní generátor je v simulaci definován v dq souřadnicích.

Tabulka 3: Hlavní parametry simulovaného generátoru zadané firmou Siemens Drásov

Synchronní generátor s rotorem s vyniklými póly							
m [-]	S_n [kVA]	U_n [V]	f [Hz]	$\cos\varphi$ [-]	I_n [A]	$2p$ [-]	n_n [ot/min]
3	3963	6600	60	0.8	347	10	720

Obdobným způsobem jako generátor je nadefinován i budič v simulovaném modelu. Jeho parametry jsou také v souladu se zadáním od firmy, hlavní parametry jsou uvedeny v Tabulce 4.

Tabulka 4: Hlavní parametry simulovaného budiče zadané firmou Siemens Drásov

Budič							
m [-]	S_n [VA]	U_n [V]	f [Hz]	$\cos\varphi$ [-]	I_n [A]	$2p$ [-]	n_n [ot/min]
3	24300	192.7	72	0.8	72.8	6	1440

3.2 Popis modelu

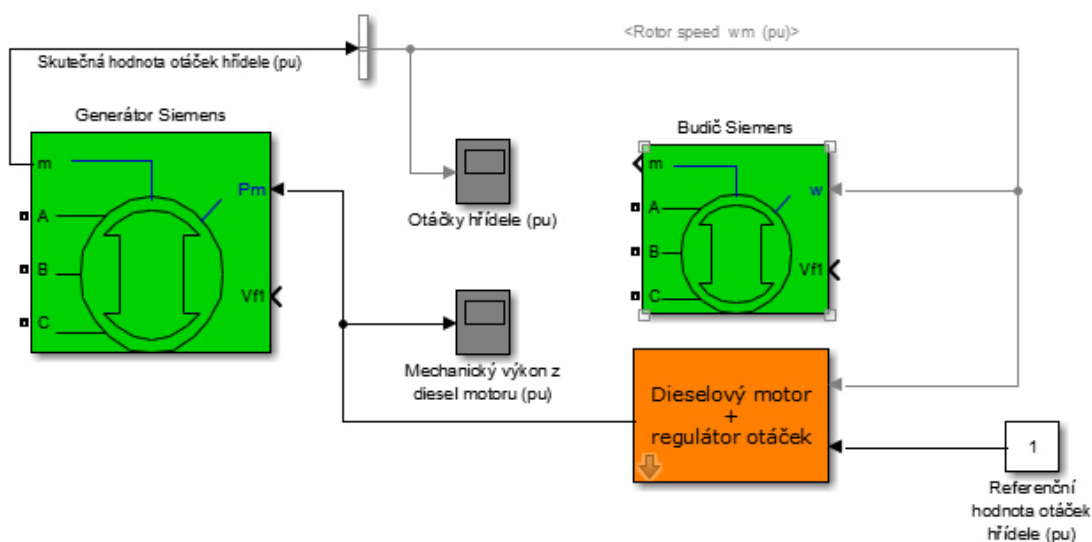
Model se věnuje samostatné simulaci celého soustrojí. Tento model by měl v budoucnu posloužit firmě Siemens Drásov k snazšímu a názornějšímu školení. Ve vzniklém modelu lze simulovat různé stavy, které mohou nastat. Na časových průbězích je možné tyto stavy pozorovat a analyzovat. Jedná se například o připnutí či odepnutí zátěže ke generátoru, zkratové poruchy a připojení generátoru ke tvrdé síti. Náhled na celý model soustrojí je k dispozici v přílohách práce.

Jako nejvhodnější prostředí pro simulaci se ukázala nadstavba Matlabu-Simulink. Jednotlivými částmi simulovaného soustrojí jsou generátor s budičem, diesellový motor a dále regulátor napětí a regulátor otáček. Simulace podobného soustrojí je již v Simulinku řešena. Tento model je dostupný z [10], model lze také získat zadáním výrazu: "power_SM_exciter" do příkazového okna Matlabu. Tento volně dostupný model posloužil jako základ pro tvorbu vlastního modelu pro simulování. V Simulinku je dostupná knihovna Simscape a podknihovna Power Systems, ve které jsou k dispozici bloky, které přímo

reprezentují chování elektrického stroje. Je zde i blok pro synchronní generátor v d, q souřadnicích, který si lze nadefinovat parametry. Tento je využit ve vzniklém modelu.

Vzniklý model obsahuje velké množství osciloskopů, ve kterých si lze zobrazit příslušné časové průběhy. Tyto osciloskopy umožňují sledovat časové průběhy napětí, proudů, výkonů a otáček hřídele.

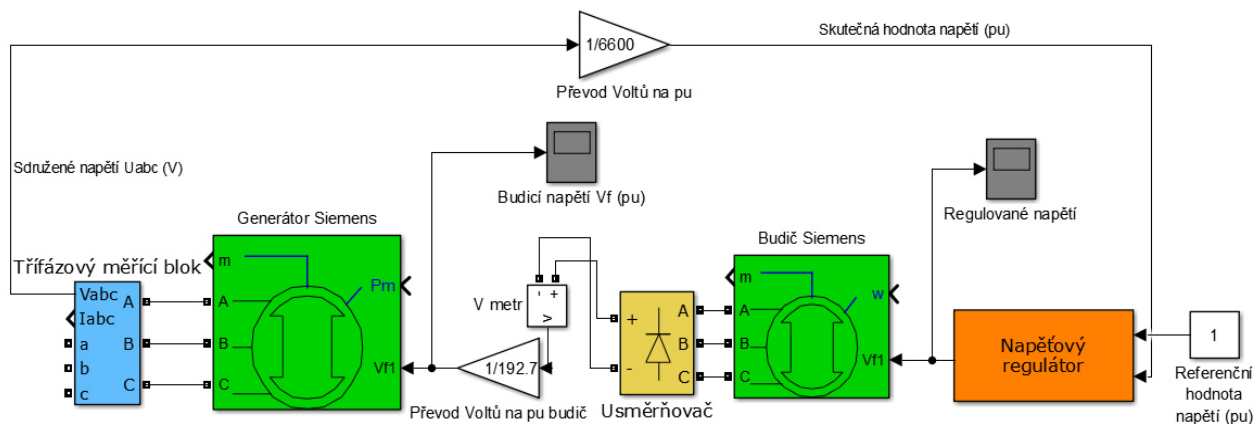
Vytvořený model soustrojí může pracovat v režimu ostrovní sítě i v tvrdé síti. V celém modelu se pracuje s veličinami v poměrných jednotkách (p.u.). Je zde jeden blok, který představuje diesellový motor a zároveň i regulátor otáček hřídele. Blok reprezentující diesellový motor je propojen se synchronním generátorem a zároveň s budičem. V realitě toto spojení dílčích bloků představuje diesellový motor, který při spalování paliva roztáčí hřídel, na níž je připevněn rotor generátoru a zároveň i rotor budiče. Do regulátoru otáček hřídele vstupuje konstantní hodnota rovna jedné, která reprezentuje požadované konstantní otáčky. Zároveň do regulátoru vstupuje skutečná hodnota otáček hřídele. Regulátor porovnává skutečnou a požadovanou hodnotu otáček, z tohoto porovnání si určí regulační odchylku, dle této odchylky vyvine akční zásah, kterým zreguluje otáčky na žádanou hodnotu. Na následujícím Obrázku 11 je zobrazena pouze část schématu z vytvořeného modelu. Jedná se pouze o část výše popsanou, představující mechanické spojení dieselmotoru, generátoru a budiče pomocí hřídele. Do dieselmotoru vstupuje hodnota skutečných otáček pro porovnání s žádanými, do budiče vstupuje hodnota skutečných otáček a do generátoru vstupuje hodnota mechanického výkonu, který je do generátoru dodáván z dieselmotoru. Tímto způsobem jsou tedy tyto bloky vzájemně propojené, v reálném soustrojí představuje toto vzájemné propojení společná hřídel.



Obrázek 11: Vzájemné propojení dieselmotoru, generátoru a budiče

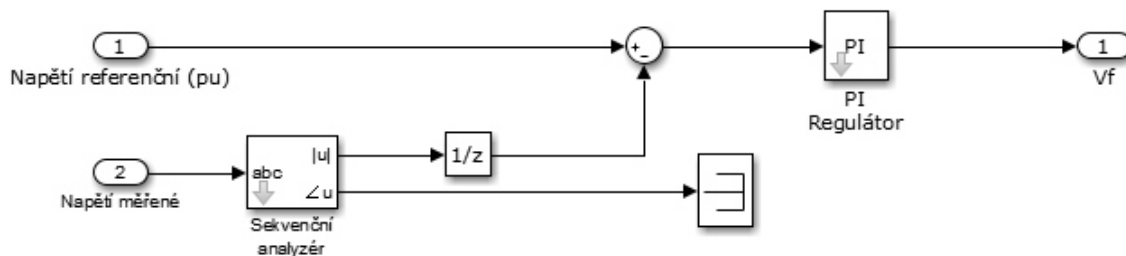
Na Obrázku 12 je zobrazena pouze část modelu, která se zabývá budícím napětím a jeho regulací. Budicí napětí, generované budičem vstupuje do generátoru. Před vstupem do generátoru musí být nejprve třífázové střídavé napětí generované budičem usměrněné neřízeným diodovým usměrňovačem a následně se musí převést na poměrné jednotky. Do generátoru tedy vstupuje usměrněné napětí v poměrných jednotkách. Naměřená hodnota sdruženého napětí třífázovým měřícím blokem je převedena na poměrné jednotky a

přivedena do regulátoru napětí. Regulátor napětí má dva vstupy a to naměřenou hodnotu sdruženého napětí generátoru a konstantní hodnotu napětí, která se je uvedena v poměrných jednotkách a je rovna jedné. Regulátor se snaží skutečnou naměřenou hodnotu napětí, co nejvíce přiblížit požadovanému průběhu napětí, který je konstantní. Výstup napěťového regulátoru je připojen do budiče. Celý systém budícího napětí je vzájemně propojen a vázán touto společnou smyčkou.



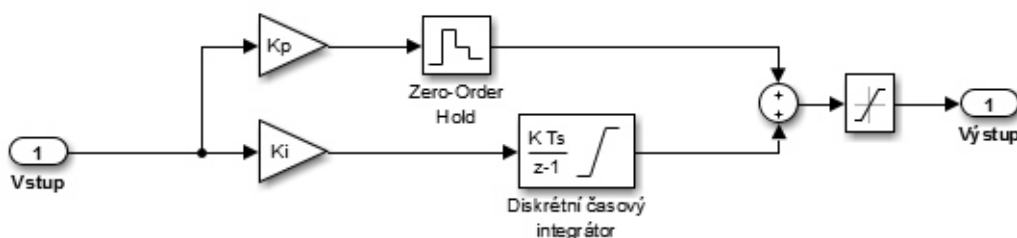
Obrázek 12: Část modelu, princip buzení a regulace napětí

Na dalších obrázcích je blíže popsán napěťový regulátor a poté i použitý PI regulátor. Tento regulátor byl převzat z již zmíněného modelu, který je v Simulinku dostupný. Převzatý regulátor byl upraven na jednotky p.u. a byly změněny parametry PI regulátoru, a to jmenovitě proporcionální a integrační člen. Na Obrázku 13 lze vidět schéma v Simulinku, které porovnává referenční a naměřené hodnoty napětí a následně je sjednotí na jeden signál, který je poté pomocí PI Regulátoru upraven.



Obrázek 13: Vnitřní schéma napěťového regulátoru

Obrázek 14 zobrazuje vnitřní strukturu PI Regulátoru. Vstupní hodnota regulovaného napětí je násobena proporcionálním a integračním členem a následně opět sečtena. Tím je zajištěna regulace napětí. Blok za sumátorem slouží k nastavení horních a dolních limit signálu v definovaném rozmezí hodnot. Možnost nastavení limit je využita při simulaci zkratových poruch.

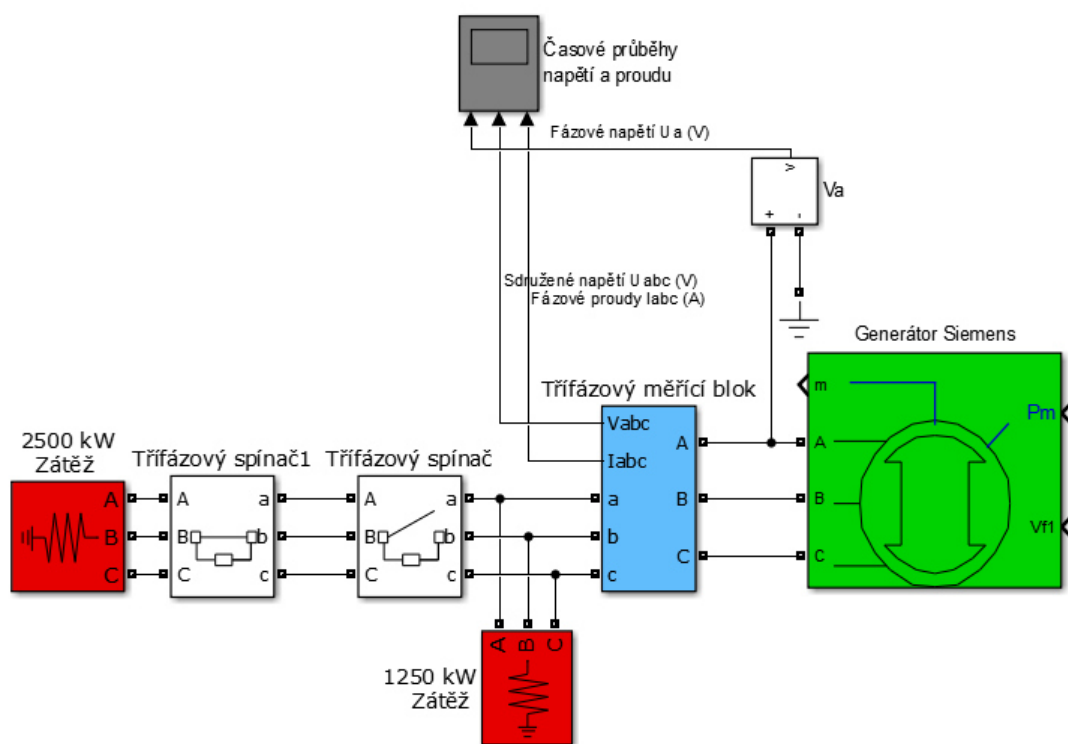


Obrázek 14: Schéma použitého PI regulátor

4 SIMULACE SOUSTROJÍ PŘI PROVOZU V OSTROVNÍ SÍTI

4.1 Změna zátěže

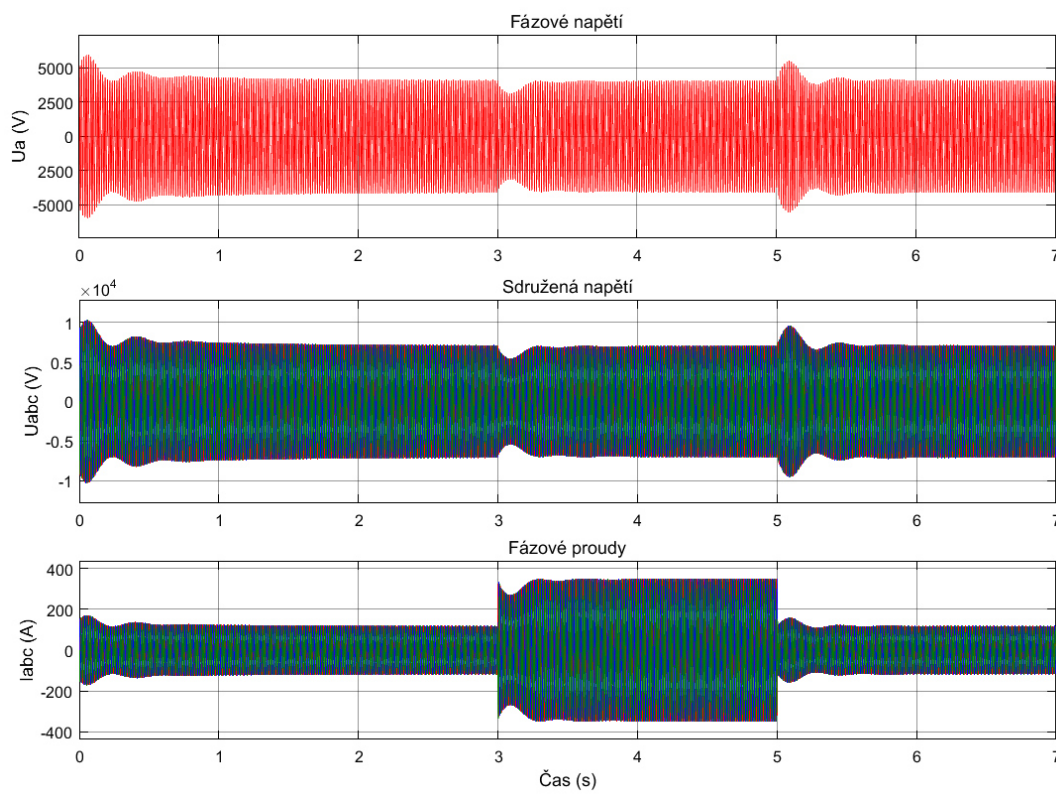
Na výstup synchronního generátoru je připojena činná zátěž o výkonu 1250 kW a dále jsou zde připojeny dva třífázové spínače, jeden spínač v definovaném čase připojí a druhý spínač v definovaném čase uživatelem odpojí na výstupu synchronního generátoru další činnou zátěž o hodnotě 2500 kW. Mezi výstupními svorkami generátoru a zátěží je umístěn třífázový měřicí blok, který měří průběhy napětí a proudů v čase a tyto naměřená data jsou předána do osciloskopu, který umožní tyto průběhy zobrazit. Na Obrázku 15 je zobrazena výše popsána část simulovaného soustrojí. Náhled na celý model soustrojí je k dispozici v přílohách práce.



Obrázek 15: Zatížený generátor s měřícím blokem a osciloskopem v Simulinku

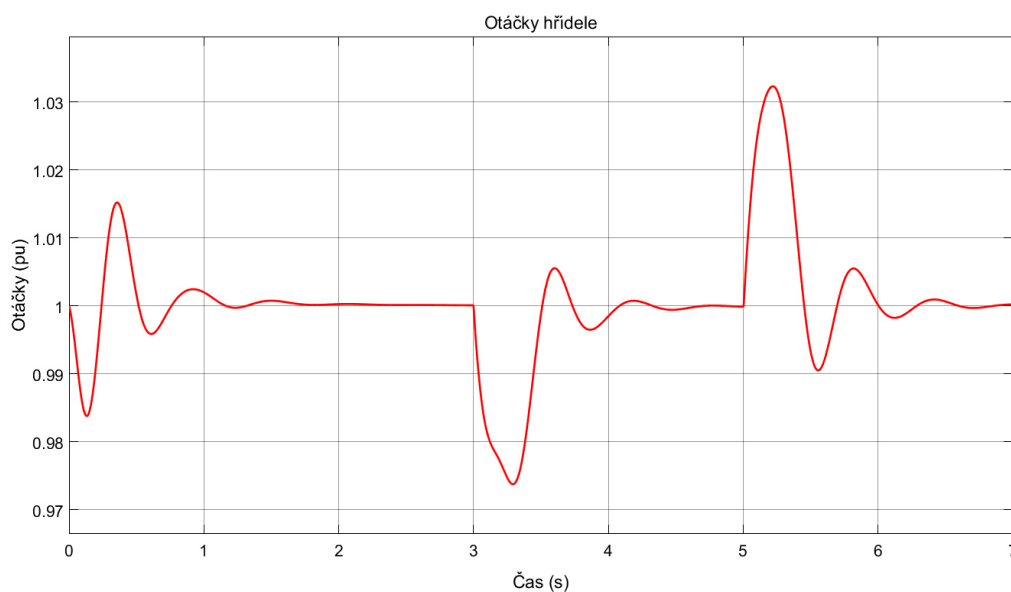
Jedná se zde o jeden z hlavních výstupů programu. Je to možnost sledovat okamžité průběhy napětí a proudů v čase. Na těchto průbězích je zajímavý především okamžik, kdy je připojena přídatná zátěž na svorky generátoru v čase 3 sekundy a následně je v čase 5 sekund odpojena dalším spínačem. Tyto změny jsou doprovázeny přechodnými ději, které jsou patrné na časových průbězích na Obrázku 16. Počáteční přechodný děj na začátku simulace je způsoben prvotním nastavením a ustálením regulátorů. Tyto časové průběhy proudů a napětí pro různé situace a různé zátěže poslouží firmě k názornějšímu vysvětlení a popisu vlivu zátěže na výstupní napětí generátoru a odebíraný proud. Z časových průběhů proudů a napětí na generátoru je například patrné, že při připojení zátěže ke generátoru krátkodobě poklesne napětí, než regulátor hodnotu napětí opět zreguluje na požadovanou konstantní hodnotu. Dále je patrné, že při připojení zátěže okamžitě naroste hodnota

odebíraného proudu z generátoru. Při následném odpojení zátěže naopak krátkodobě naroste hodnota napětí a odebíraný proud klesne a opět se ustálí na původní hodnotě. Tyto popsané stavy a průběhy jsou zobrazeny na následujícím obrázku.



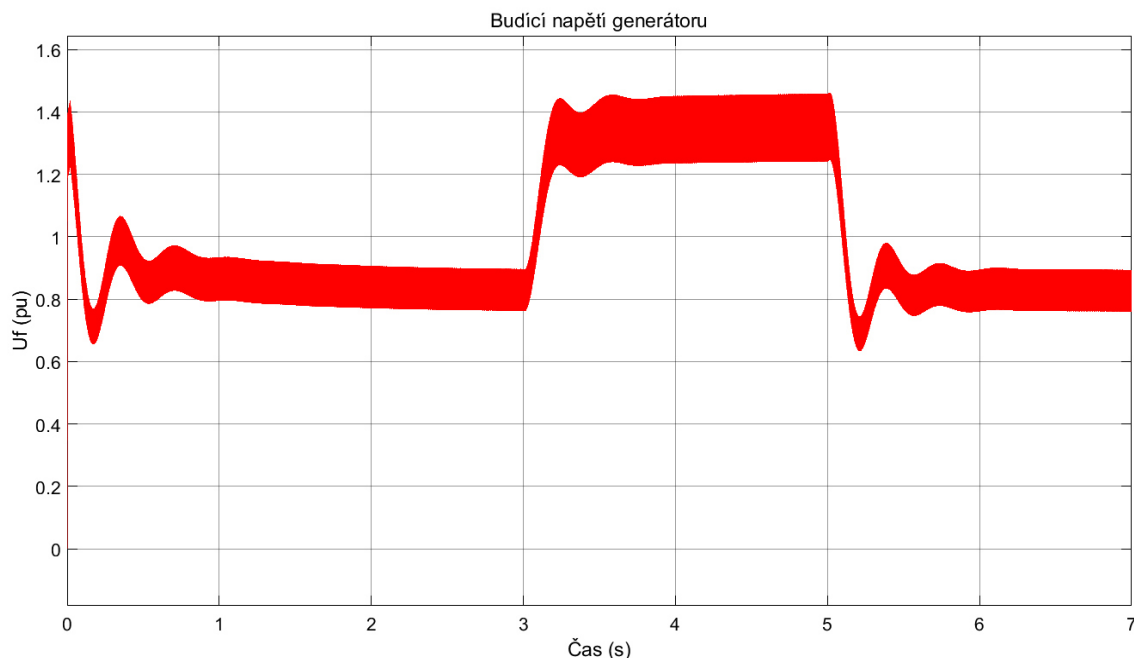
Obrázek 16: Časové průběhy napětí a proudů při připnutí a odepnutí zátěže ke generátoru

Obrázek 17 zobrazuje časový průběh otáček společné hřídele soustrojí při změně zátěže. Ihned po startu simulace průběh otáček mírně zakolísá, což je způsobené počátečním nastavením a ustálením regulátoru. Další výkyvy v průběhu jsou způsobeny rázovým připnutím a odepnutím zátěže. Dle očekávání po připojení zátěže v čase 3 sekundy mírně poklesnou otáčky, zatímco při odepnutí zátěže, tedy při odlehčení soustrojí otáčky rostou. Tyto výkyvy jsou v krátkém časovém okamžiku eliminovány regulátorem otáček.



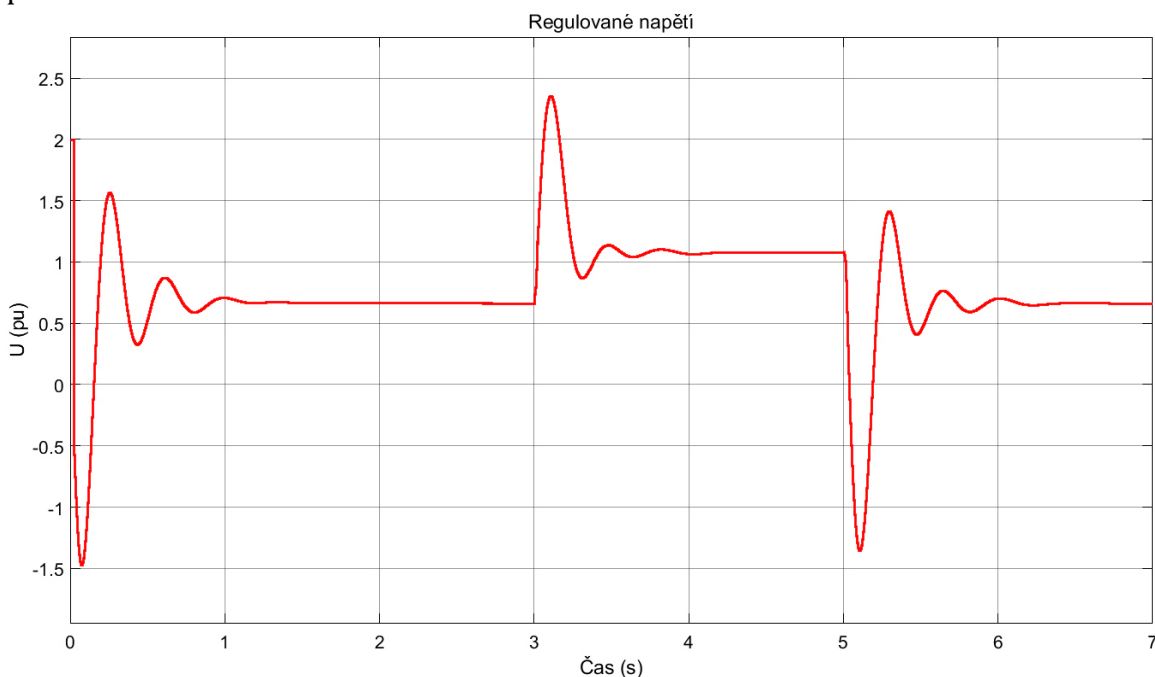
Obrázek 17: Časový průběh otáček hřídele při změně zátěže

Další časový průběh na Obrázku 18 se věnuje průběhu budícího napětí generátoru. Opět jsou zde patrné kmity při počátečním nastavení regulátoru, připnutí a odepnutí zátěže. Z tohoto průběhu je zřejmé, že v době zvýšené zátěže, tedy v časovém intervalu 3-5 sekund, je třeba generátoru dodávat patřičně zvýšené budící napětí, protože je na jeho svorky v tomto časovém intervalu připojena vyšší zátěž.



Obrázek 18: Časový průběh budícího napětí generátoru při změně zátěže

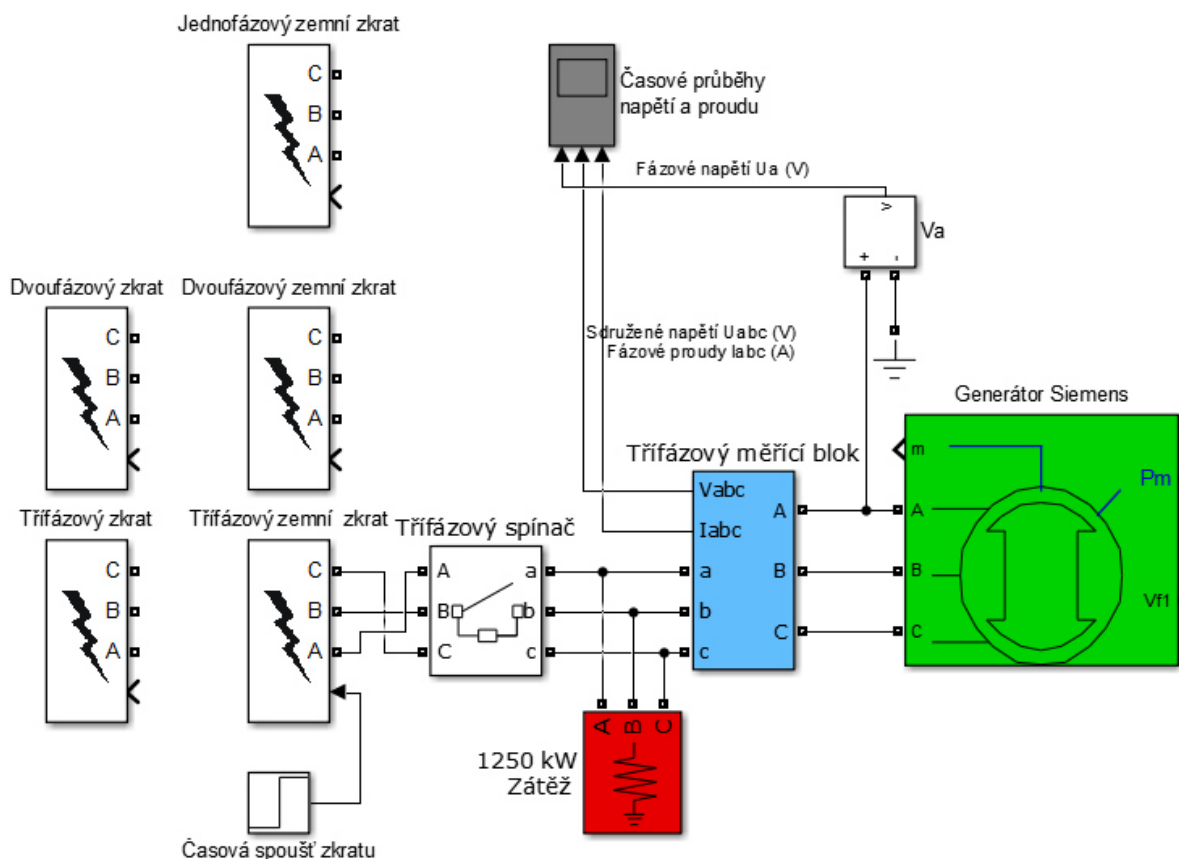
Průběh regulovaného napětí vstupujícího do budiče je k dispozici na Obrázku 19. Jsou zde vidět přechodné děje vyskytující se při počátku simulace, připnutí a následném odepnutí zátěže.



Obrázek 19: Časový průběh regulovaného napětí při změně zátěže

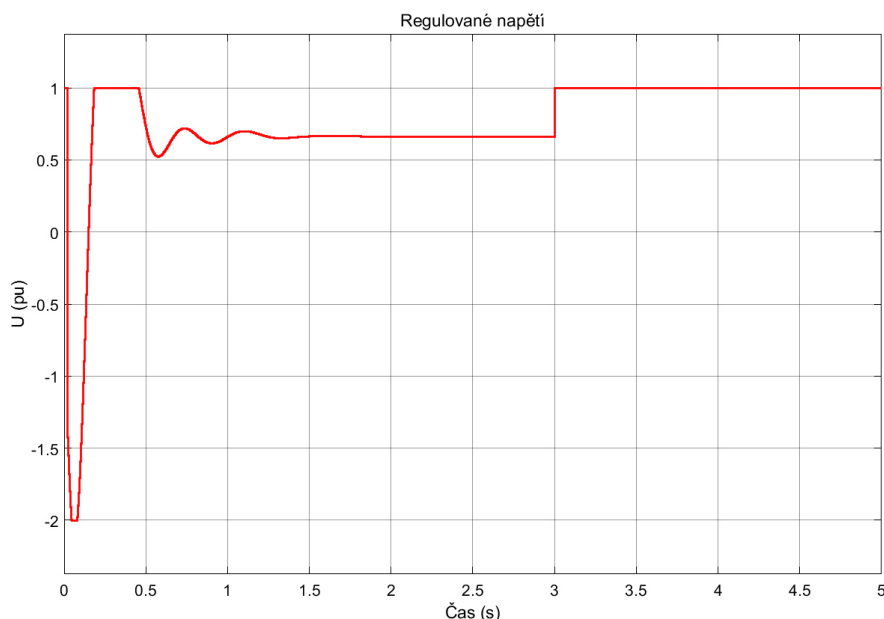
4.2 Simulace zkratů

Ve vzniklém modelu soustrojí si lze simulovat nejen změnu zátěže generátoru, ale i poruchy, které jsou reprezentovány zkraty. Pro tento účel se pouze upravil zdrojový model. Namísto připnutí přídavné zátěže se v určitém čase, který si uživatel nadefinuje v časové spoušti, připne zkrat na svorky generátoru. V modelu je vytvořeno celkem 5 bloků reprezentujících různé typy zkratů. Tento model tedy umožňuje simulovat různé typy zkratů. Časové průběhy napětí a proudů při zkratu si lze zobrazit pomocí osciloskopu. Obrázek 20 zobrazuje část modelu, kde se volí typ zkratu pro následnou simulaci. Náhled na celý model sloužící k simulaci zkratů je zobrazen v přílohách práce.



Obrázek 20: Část modelu s volbou typu zkratu na svorkách generátoru

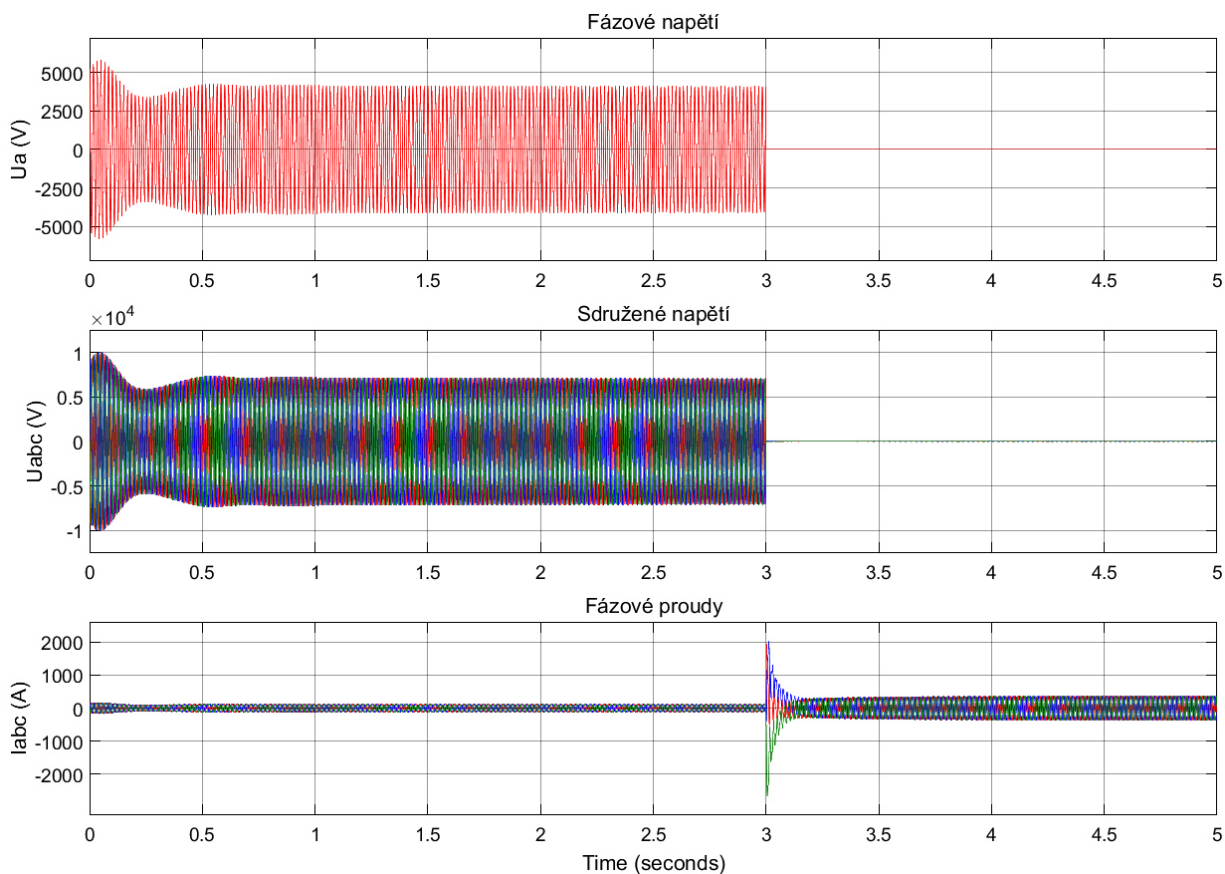
Při simulaci zkratů se musel patřičně upravit regulátor napětí v modelu. Při těchto simulacích klesá napětí na svorkách generátoru až k nulovým hodnotám. Když napětí poklesne na nulovou hodnotu, tak se regulátor snaží napětí opět zregulovat na jmenovitou hodnotu. Při zkratech je však hodnota napětí neustále téměř nulová a regulátor ji nemůže ovlivnit. Použitý regulátor v modelu po vyvolaném umělém zkratu rapidně navyšoval budící napětí a snažil se tak uměle navyšovat hodnotu napětí. Budící napětí dosahovalo velmi vysokých hodnot a díky tomu byly zkresleny výstupní průběhy zkratových proudů. Tyto nepřesnosti byly eliminovány tím, že se v nastavení regulátoru omezil průběh regulovaného napětí limitou shora. Díky tomu již nemohlo rapidně narůstat budící napětí. Průběh regulovaného napětí, který je oříznutý limitou shora je zobrazen na Obrázku 21.



Obrázek 21: Průběh omezeného regulovaného napětí při zkratech

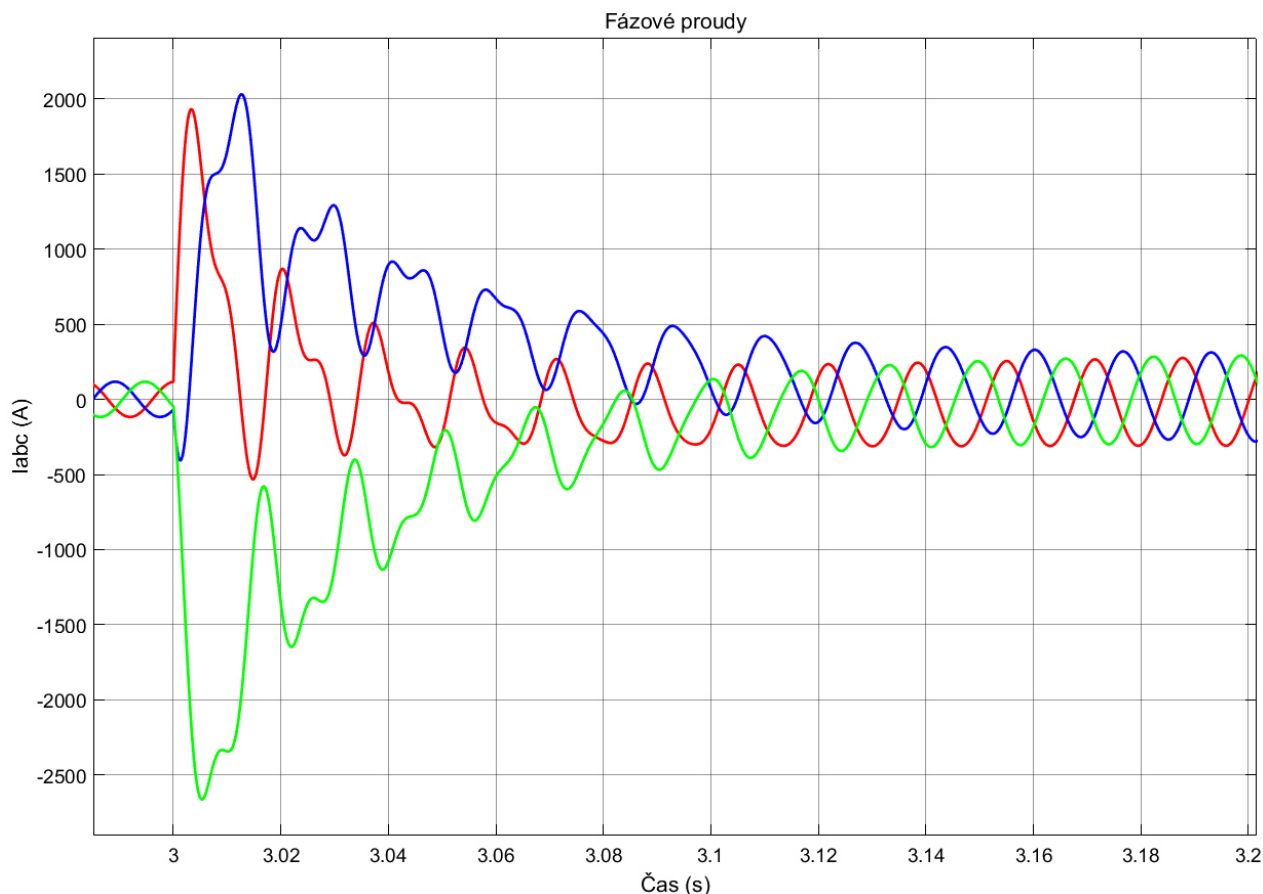
4.2.1 Třífázový zemní zkrat

Obrázek 22 zobrazuje časové průběhy napětí a proudů na výstupu generátoru při simulovaném třífázovém zemním zkratu, který je uměle vyvolán v čase 3 sekundy. Dle předpokladů při tomto zkratu napětí klesnou k nulové hodnotě a odebírané proudy z generátoru rázově narostou až na hodnoty tisíců Ampérů. Po přechodném ději se hodnoty proudů začnou ustalovat.



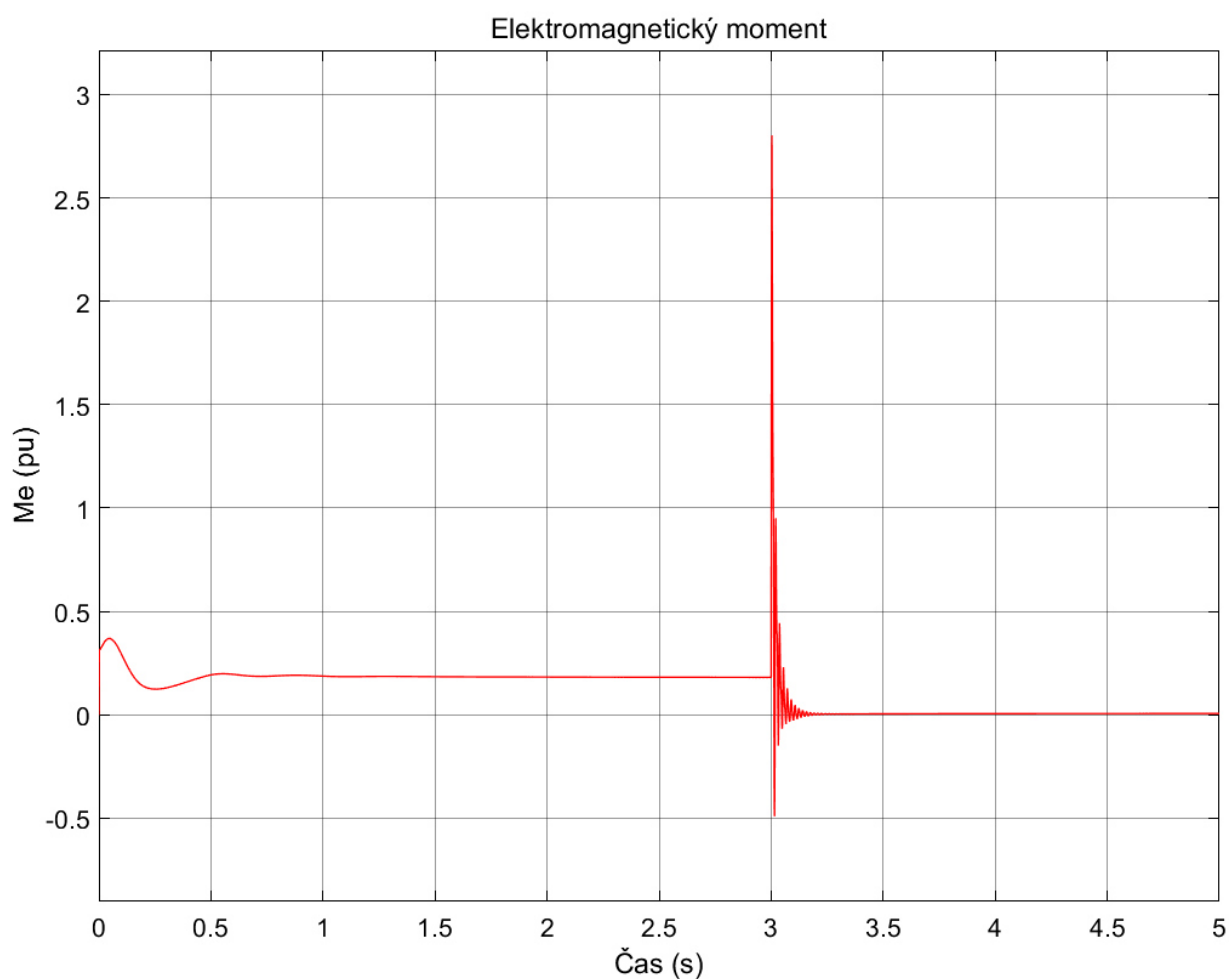
Obrázek 22: Časové průběhy napětí a proudů při třífázovém zemním zkratu

Na Obrázku 23 je detailněji zobrazen přechodný děj, který nastal při připojení třífázového zemního zkratu na svorky generátoru. Při tomto přechodném ději mají průběhy fázových proudů specifický tvar. Z průběhů proudů lze vyčíst, že hodnota jednoho fázového proudu dosáhla přes 2500 Ampérů. Přechodný děj při této simulaci trval asi dvě desetiny sekundy. Po přechodném ději jsou průběhy fázových proudů již typicky stejné velikosti a dílčí fáze jsou posunuté o 120° .



Obrázek 23: Časové průběhy fázových proudů generátoru po připojení třífázového zemního zkratu v čase 3 sekundy, detail

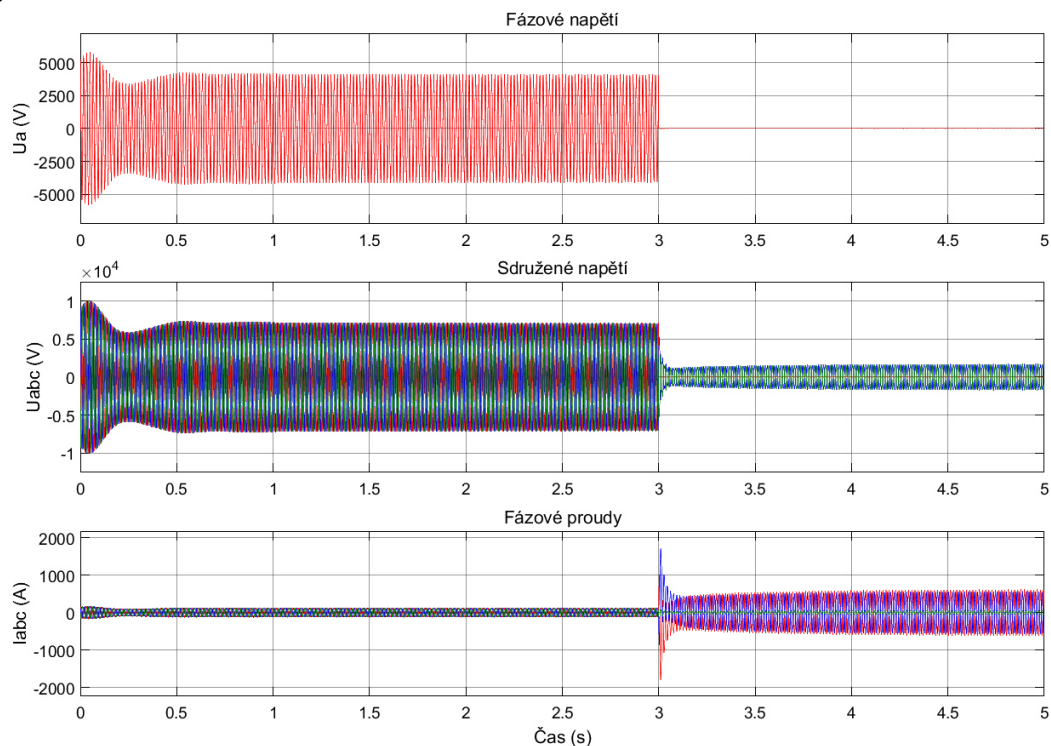
Třífázový zemní zkrat výrazně ovlivňuje i moment stroje. Moment stroje je především ovlivňován dynamickými účinky zkratového proudu. V krajním případě může dojít až k překonání mechanické odolnosti rotoru a hřídele. To může vést až k uvolnění rotoru či prasknutí hřídele a následné destrukci celého stroje. Na Obrázku 24 je zobrazen časový průběh elektromagnetického momentu ve vzduchové mezeře. Dle předpokladů při výskytu zkratu naroste moment na několika násobek svojí jmenovité hodnoty. V tomto průběhu narostl elektromagnetický moment ve vzduchové mezeře až na 2,75násobek své jmenovité hodnoty. V krátkém časovém okamžiku se tento výkyv opět ustálí díky zásahům regulátorů.



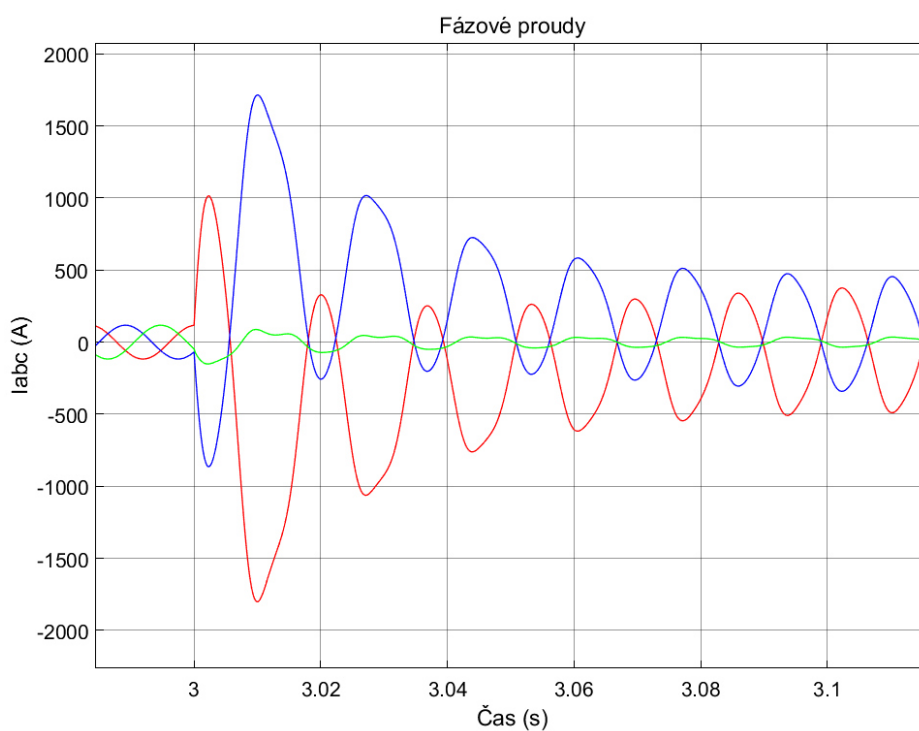
Obrázek 24: Průběh elektromagnetického momentu ve vzduchové mezeře při třífázovém zemním zkratu

4.2.2 Dvoufázový zemní zkrat

Na následujících dvou obrázcích jsou časové průběhy napětí a proudů po připnutí dvoufázového zemního zkratu na svorky generátoru. Fázové napětí je při zkratu nulové, avšak dvě složky sdružených napětí jsou i při zkratu nenulové a výrazně zmenšené oproti stavu před zkratem. Detailní průběh fázových proudů po připojení dvoufázového zemního zkratu je zobrazen na Obrázku 26.



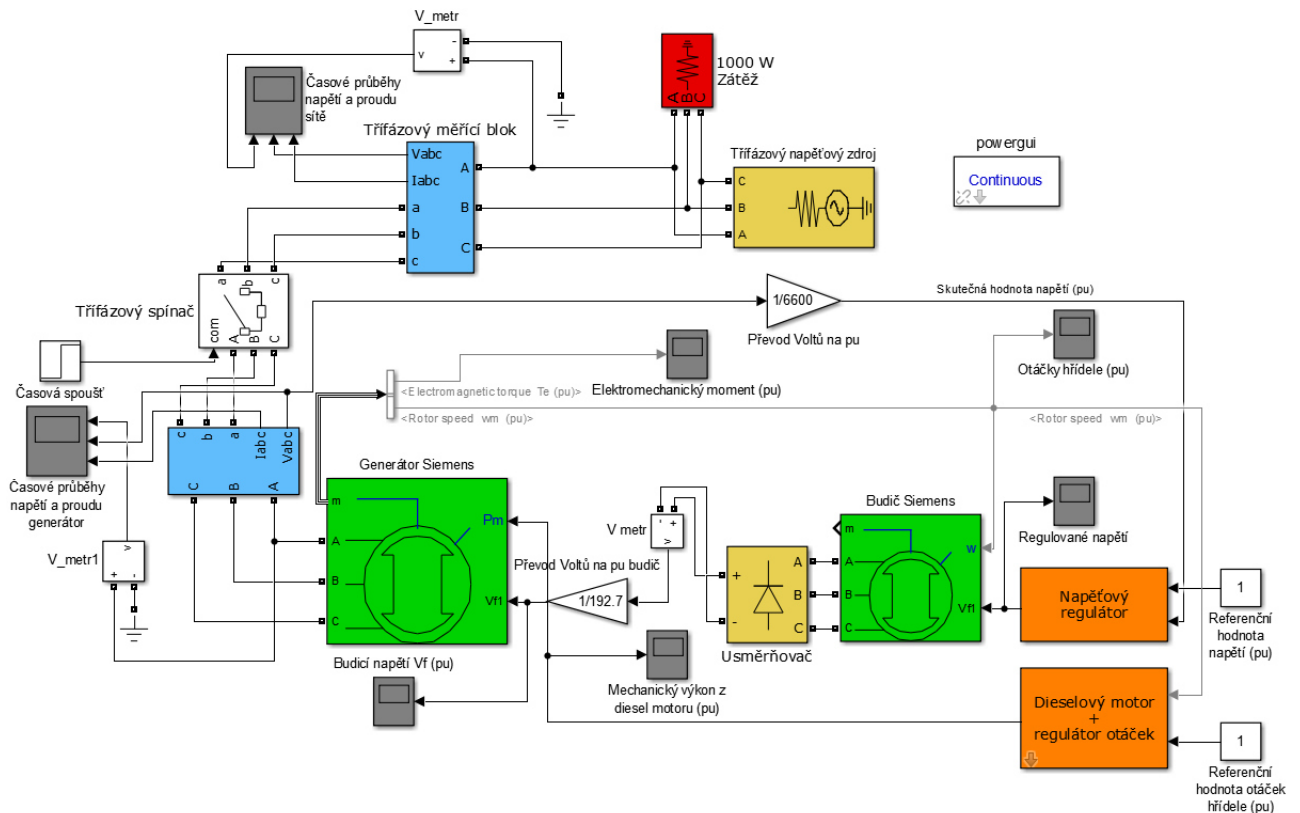
Obrázek 25: Časové průběhy napětí a proudů při dvoufázovém zemním zkratu



Obrázek 26: Časové průběhy fázových proudů generátoru po připojení dvoufázového zemního zkratu v čase 3 sekundy

5 SIMULACE SOUSTROJÍ PŘI FÁZOVÁNÍ KE TVRDÉ SÍTI

Pro simulaci soustrojí při fázování ke tvrdé síti byl vytvořen další model v Simulinku. V tomto modelu bylo použito již vytvořené soustrojí v Simulinku, které bylo použito při simulaci změny zátěže a při simulaci zkratových proudů. Generátor tohoto soustrojí je v určitém definovaném čase připojen do tvrdé sítě. Připojení je realizováno za pomoci třífázového spínače, který je v Simulinku k dispozici. Spínač je ovládán pomocí časové spouště, čas sepnutí se definuje právě v této spoušti. Tvrdou síť v modelu představuje ideální třífázový napěťový zdroj, který je v Simulinku k dispozici. Na svorkách generátoru a zdroje jsou připojeny třífázové měřicí bloky, které měří časové průběhy napětí a proudů. Tyto průběhy jsou následně vyvedeny do osciloskopů, ve kterých si lze po rozkliknutí tyto průběhy zobrazit. Na následujícím obrázku je zobrazený vytvořený model pro simulaci fázování synchronního generátoru k tvrdé síti.

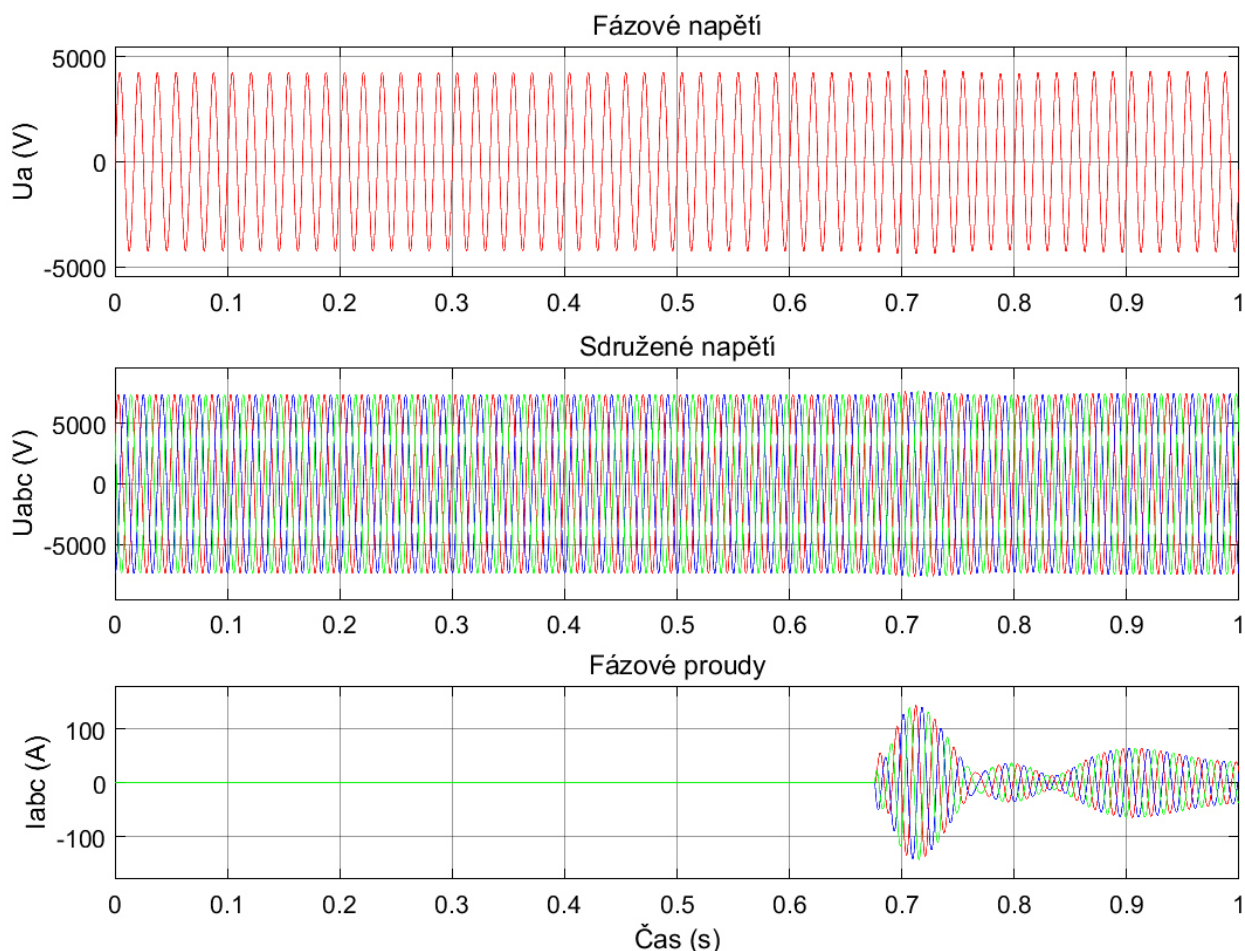


Obrázek 27: Model pro simulaci fázování

5.1 Připojení generátoru k tvrdé síti za ideálních podmínek

V tomto případě jsou zajištěny všechny podmínky pro správné připojení synchronního generátoru do tvrdé sítě. A to jsou jmenovitě stejné efektivní hodnoty napětí, stejný kmitočet, stejný sled fází a stejné okamžité hodnoty napětí generátoru a sítě v čase připojení generátoru. Jmenovité hodnoty napětí a kmitočtu jsou nadefinovány v blocích zdroje a generátoru, sled fází je dán správným zapojením fází v modelu. Stejně průběhy okamžitých hodnot napětí jsou zajištěny pomocí fázových posunů mezi napětím sítě a generátoru. V ideálním případě musí být fázový posuv mezi napětími sítě a generátoru v době připnutí generátoru do sítě nulový. Tohoto stavu bylo dosaženo postupnou změnou času připojení a také možností definice fázových posuvů napětí v bloku napěťového zdroje.

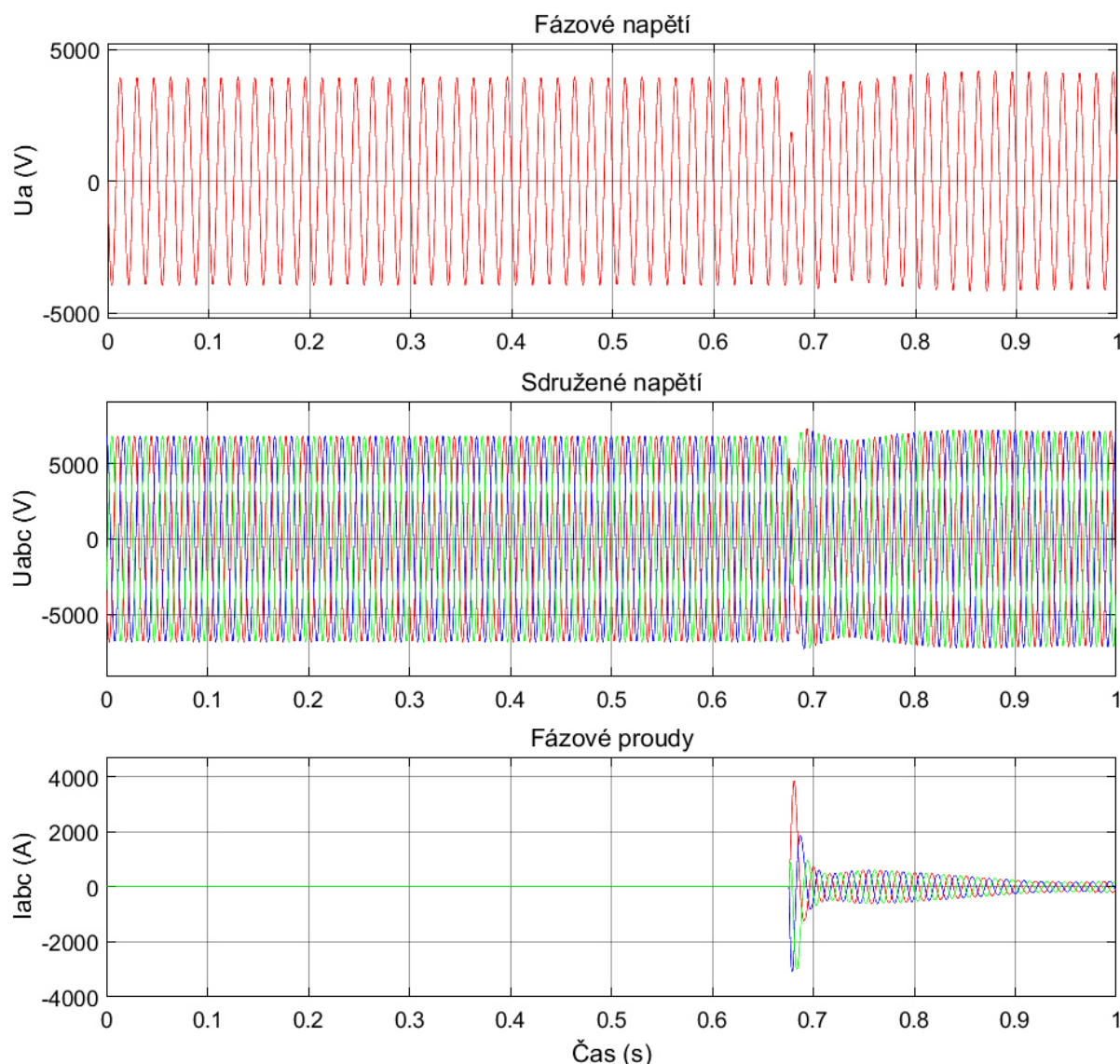
Obrázek 28 zobrazuje časové průběhy napětí a proudu sítě při připojení generátoru v čase 0,676 sekundy. Čas připojení 0,676 sekundy byl zvolen z toho důvodu, že v tomto okamžiku je téměř nulový fázový posuv mezi napěťovými průběhy sítě a generátoru. V ideálním případě by po připojení generátoru do sítě měl průběh napětí sítě zůstat nezměněný a síť by neměl téci žádný proud. V případě této simulace však nelze dosáhnout absolutně žádného fázového posuvu a efektivní hodnoty napětí generátoru a sítě se také mírně liší. Z těchto důvodů po připojení generátoru do tvrdé sítě teče síť vyrovnávací proud, který je způsoben zmíněnými rozdíly napětí. Na časových průbězích napětí lze po připojení generátoru do sítě pozorovat jen nepatrné výkyvy v harmonickém napětí.



Obrázek 28: Časové průběhy napětí a proudů v síti při připojení generátoru za ideálních podmínek

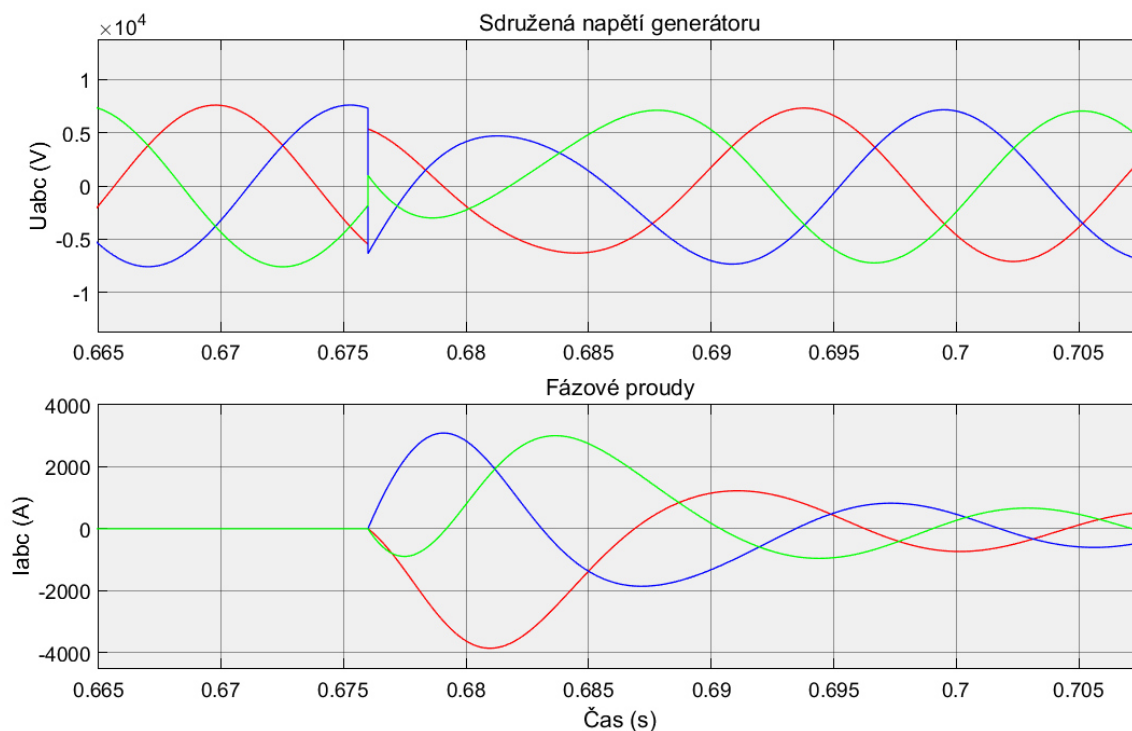
5.2 Připojení generátoru k tvrdé síti při rozdílných okamžitých hodnotách napětí

Tato simulace se věnuje nejméně příznivému okamžiku připojení generátoru do sítě z hlediska okamžitých hodnot napětí. Při této simulaci je v čase připojení synchronního generátoru k síti napětí sítě fázově posunuto o 180° vůči napětí na připojovaném generátoru. Jedná se o nejhorší možný případ. Po připojení za těchto předpokladů se objeví krátkodobé proudové špičky, které dosahují hodnot tisíců Ampérů. Tyto proudové špičky se zde objeví z důvodu fázového posuvu a také rozdílné okamžité velikosti napětí na generátoru a v síti. Při takto velkých rozdílech ve fázových posuvech a velikosti napětí, se přechodně objeví proudové špičky na vyrovnání těchto rozdílných napěťových hladin. Po krátkém časovém okamžiku opět odezní, protože se napěťové průběhy generátoru a sítě vyrovnají. Z důvodu malých rozdílností mezi hodnotami napětí generátoru a sítě po odeznění přechodných proudových špiček teče sítí vyrovnávací proud nízkých hodnot namísto nulové hodnoty. Časové průběhy napětí a proudů sítě, ke které byl v čase 0,676 sekundy připojen synchronní generátor, jsou zobrazeny v Obrázku 29.



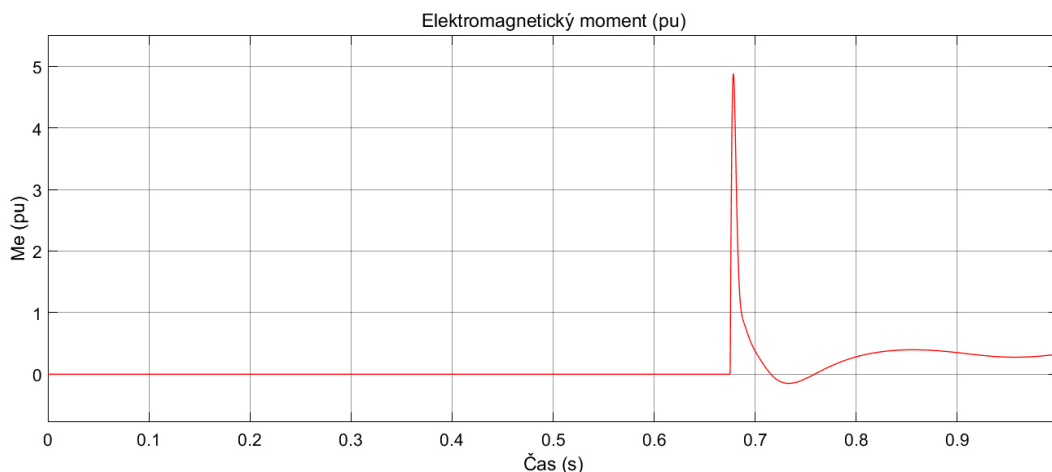
Obrázek 29: Časové průběhy napětí a proudů sítě při připojení generátoru při rozdílných okamžitých hodnotách napětí

Na následujícím Obrázku 30 jsou zobrazeny detailní průběhy napětí a proudů generátorem, který je v čase 0,676 sekundy připojen ke tvrdé síti. První časový průběh se týká sdruženého napětí na svorkách generátoru. Lze zde vidět, že v čase 0,676 sekundy, kdy je generátor připojen do sítě, je opravdu fázový posuv mezi dílčími fázemi napětí zmíněných 180° . Druhý časový průběh na Obrázku 30 zobrazuje průběh fázových proudů generátoru v čase. Zde lze pozorovat, že po připnutí synchronního generátoru do tvrdé sítě v čase 0,676 sekundy okamžitě narostou hodnoty proudů ve fázích z nulové hodnoty až ke 4000 Ampér. Po odeznění přechodového děje v podobě proudových špiček sítě nadále prochází nenulový proud, který je způsoben malými rozdíly mezi napětím v síti a napětím na generátoru.



Obrázek 30: Detailní průběhy napětí a proudů generátorem při připojení do sítě

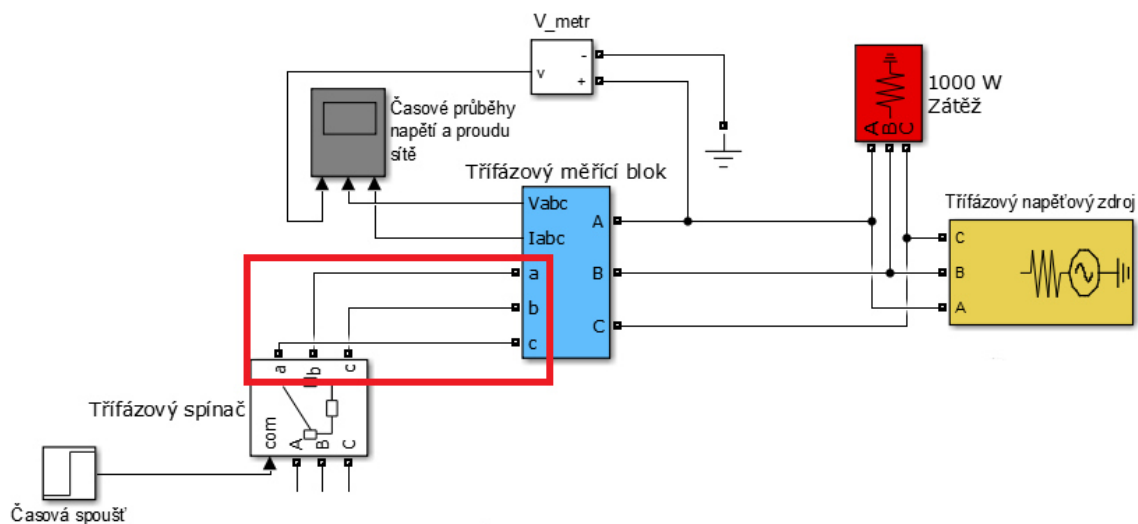
Obrázek 31 zobrazuje časový průběh elektromagnetického momentu ve vzduchové mezeře generátoru. Z průběhu je zřejmé, že po připojení generátoru k tvrdé síti dojde ke skokovému nárůstu momentu ve vzduchové mezeře. Tento prudký nárůst momentu je způsoben napěťovými rozdíly a velkými vyrovnávacími proudy.



Obrázek 31: Časový průběh elektromagnetického momentu ve vzduchové mezeře při připojení generátoru do sítě

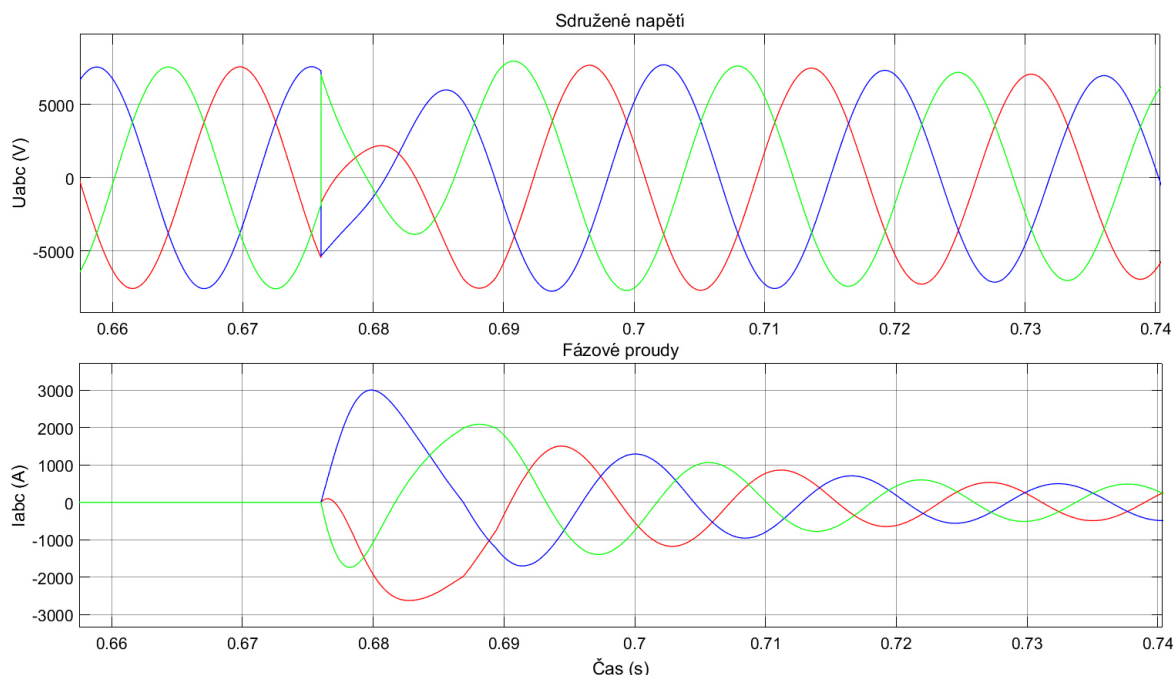
5.3 Připojení generátoru k síti při rozdílném sledu fází

Při této simulaci nebyla dodržena jedna z podmínek správného připojení synchronního generátoru do tvrdé sítě. Jedná se o podmínku stejného sledu fází generátoru a sítě. V simulačním modelu se k síti připojují fáze generátoru v rozdílném sledu. Tato změna v modelu je zvýrazněna v červeném obdélníku v následujícím Obrázku 32.



Obrázek 32: Změna sledu fází v modelu

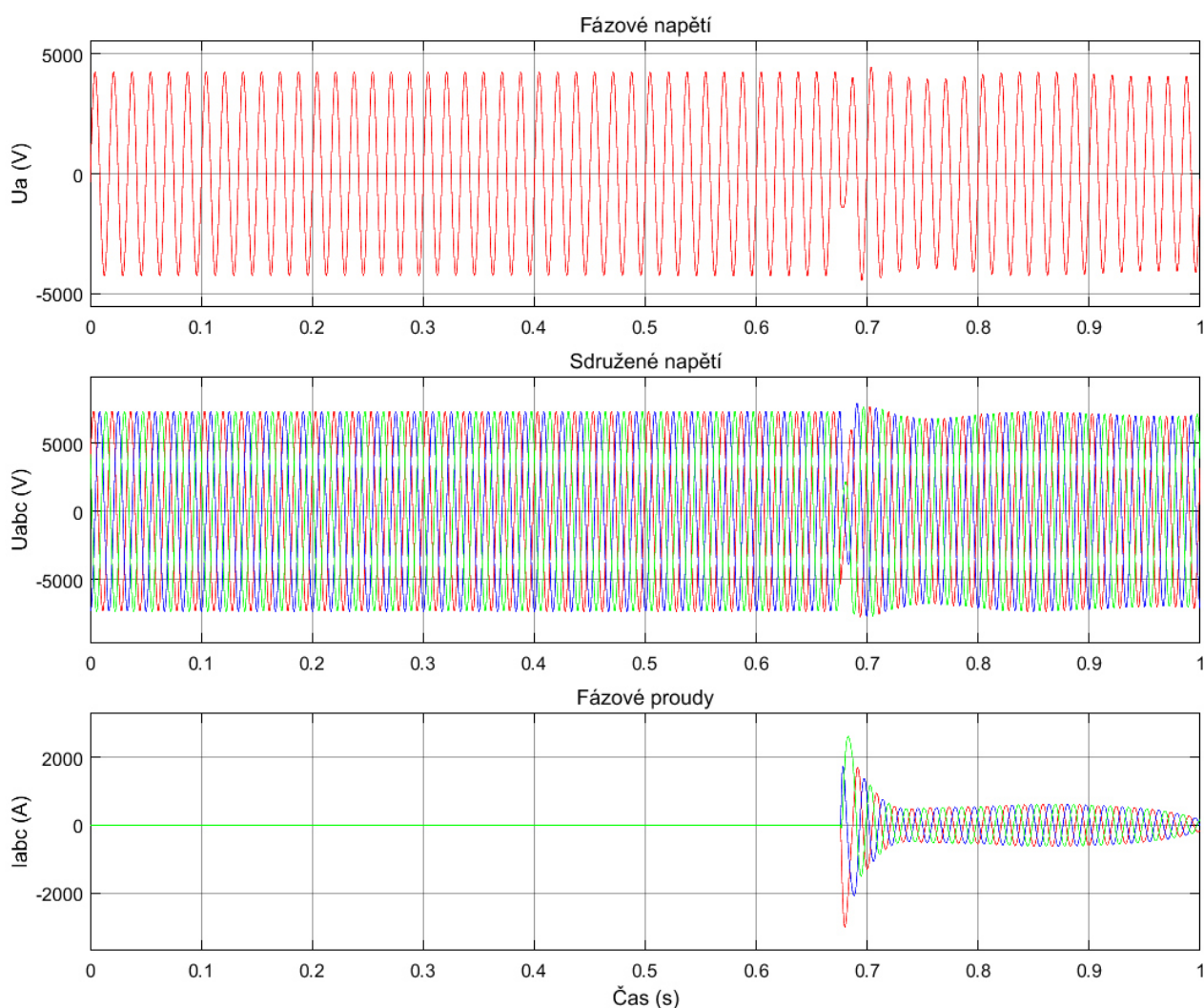
Při připojení synchronního generátoru v čase 0.676 sekundy do tvrdé sítě s rozdílným sledem fází oproti síti, vznikají přechodné proudové špičky. Tyto špičky jsou způsobeny rozdíly okamžitých napěťových hodnot generátoru a sítě v čase připojení. Proto síť tečou tyto vysoké proudy, které vyrovnávají rozdíly napěťových hladin. Po krátkém čase se napětí generátoru a sítě vyrovnají, proto hodnota proudu v síti po tomto vyrovnání klesá.



Obrázek 33: Detailní průběhy napětí a proudů generátoru po připojení generátoru do sítě s rozdílným sledem fází

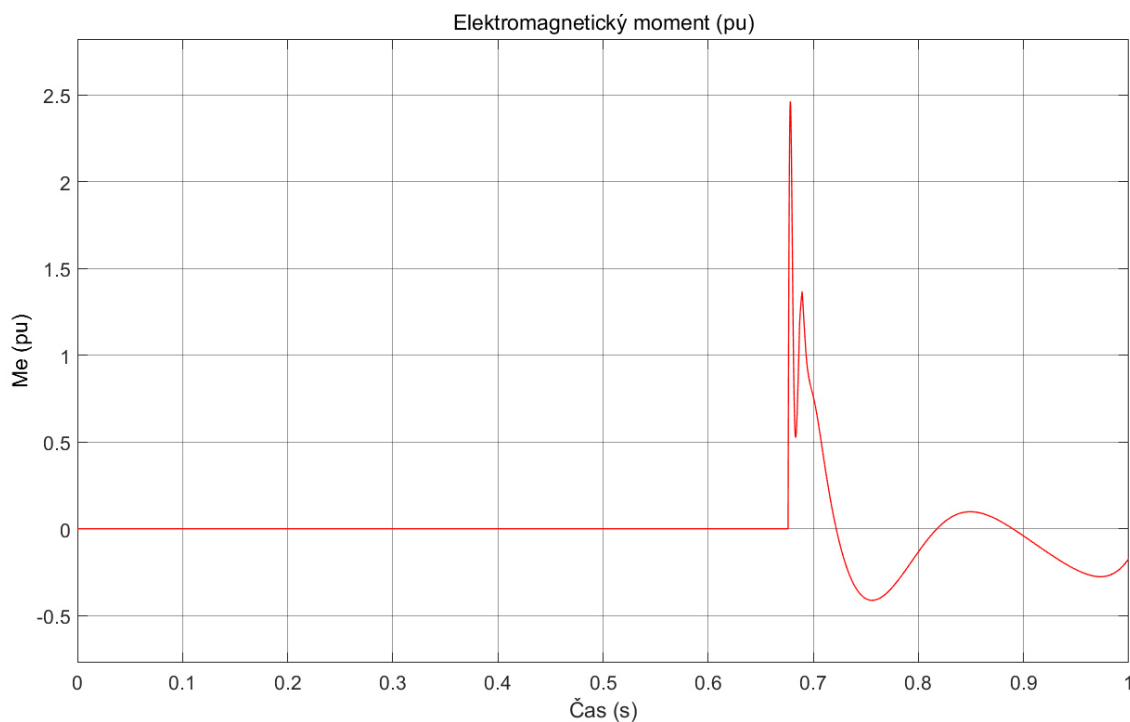
Na předchozím Obrázku 33 jsou průběhy napětí a proudů na generátoru, který byl v čase 0.676 sekundy připojen ke tvrdé síti. Na průběhu sdruženého napětí je vidět, že při připojení generátoru do tvrdé sítě v čase 0,676 sekundy nebyl dodržen sled fází, a to výrazně ovlivnilo tyto průběhy.

Na dalším Obrázku 34 jsou zobrazeny časové průběhy napětí a proudů sítě. Na těchto průbězích lze sledovat v čase 0.676 sekund, kdy je připojen generátor do sítě, zakolísání napětí sítě. V krátkém čase se však napětí sítě vrátí na svou jmenovitou hodnotu. Tento výkyv napětí v čase připojení je způsoben rozdílným sledem fází generátoru a sítě v čase připojení generátoru. Jak již bylo zmíněno v okamžiku připojení generátoru do sítě se liší okamžité hodnoty napětí generátoru sítě. Ty vyvolají vyrovnávací proudy, které po vyrovnání napěťových hladin odezní. Tyto popsání jevy lze sledovat na následujících časových průbězích.



Obrázek 34: Časové průběhy napětí a proudů sítě, při připojení generátoru při nedodržení sledu fází

Další obrázek zobrazuje časový průběh elektromagnetického momentu ve vzduchové mezeře generátoru. V průběhu je zřetelná momentová špička, která se vyskytne v čase připojení generátoru k tvrdé síti v případě nedodržení stejného sledu fází mezi generátorem a sítí. Z průběhu lze vyčíst, že v čase připojení generátoru do tvrdé sítě vzroste hodnota elektromagnetického momentu ve vzduchové mezeře z nulové hodnoty až na téměř 2,5násobek jmenovité hodnoty.



Obrázek 35: Časový průběh elektromagnetického momentu ve vzduchové mezeře generátoru při připojení generátoru do sítě při rozdílném sledu fází

6 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se věnovala tématu regulace soustrojí. Hlavní pozornost byla věnována dílčí části soustrojí a to synchronnímu generátoru a jeho popisu, protože ve většině případů je právě tento typ generátoru v soustrojích používán. V úvodu teoretické části se rozebírá samotné soustrojí. Je zde uvedeno, z jakých částí se skládá a kde se využívá. Jednotlivé části soustrojí jsou podrobněji popsány a specifikovány, například je zde nastíněno rozdělení hlavních typů pohonů. Další část teoretické práce se již věnuje nejzobecnějším tématu a to synchronnímu generátoru. Nejprve je obecně popsán, včetně uvedení jeho dvou typů dle použití. V následujících kapitolách je vysvětlen jeho princip činnosti, rozebírá se zde indukované napětí na svorkách generátoru. Poté je pozornost věnována různým typům buzení. Jsou zde rozděleny a stručně vysvětleny různé provedení buzení. Dále je zde popsána práce generátoru se sítí a také společná práce více generátorů do jedné sítě. Část této kapitoly se věnuje samotnému připojení synchronního generátoru do společné sítě, kdy musí být splněny určité podmínky pro možnost připojení generátoru do společné sítě. Další část práce se věnuje popisu synchronního stroje pomocí metody obecného elektrického stroje. Tato metoda je zde popsána, dále je zde uveden dvouosý model stroje a v práci je naznačeno odvození rovnic popisující tento dvouosý model. Teorie obecného stroje je popsána z důvodu využití tohoto dvouosého stroje v pozdější simulaci soustrojí v Simulinku. Pro dvouosý model synchronního stroje byla odvozena příslušná náhradní schémata jednotlivých os. Konec teoretické části se věnuje ustálenému stavu synchronního stroje. V rámci semestrálního projektu byl vytvořen program vykreslující fázorový diagram zatíženého generátoru v ustáleném stavu.

Praktická část práce se věnuje simulaci soustrojí v programu. Jako nejvhodnější prostředí pro simulaci soustrojí se ukázala nadstavba Matlabu a to Simulink. Jako vzor vzniklého modelu soustrojí posloužil již podobný vzniklý model, který je v Matlabu veřejně dostupný pod příkazem "power_SM_exciter". Dle této předlohy byl sestaven model celého soustrojí skládající se z diesel motoru, generátoru, budiče a regulátorů napětí a otáček. Generátor a budič v modelu byly vytvořeny dle zadaných hodnot od firmy Siemens Drásov. V modelu jsou také umístěné měřicí bloky z knihovny Simulinku, které umožňují měřit napětí a proudy. Dále jsou modely vybavené řadou osciloskopů, ve kterých si lze zobrazovat příslušné průběhy napětí, proudů, otáček, výkonů atd. Pomocí vytvořených modelů lze simulovat různé děje a stavy generátoru.

První vytvořený model simuluje soustrojí v ostrovní síti. Na generátor je připojena zátěž a v definovaném čase je ke generátoru pomocí spínače připojena další zátěž a následně je po definovaném čase pomocí dalšího spínače odpojena. Změny, které nastanou při změně zátěže generátoru, lze sledovat na osciloskopech. Z časových průběhů získaných z osciloskopů je například zřejmé, že při připnutí zátěže přechodně poklesne hodnota napětí na generátoru a skokově naroste odebíraný proud. Naopak při následném odpojení zátěže přechodně naroste napětí na generátoru a proud poklesne na původní hodnotu před připojením zátěže. Změna zátěže se také projeví na otáčkách hřídele soustrojí, na časovém průběhu otáček hřídele lze pozorovat při připnutí zátěže mírný pokles, a naopak při odepnutí zátěže mírný nárůst otáček hřídele. Vliv změny zátěže se také projeví na budícím napětí generátoru. Dle očekávání při zvýšené zátěži naroste odpovídajícím způsobem budící napětí generátoru.

Další vzniklý model se věnuje simulaci zkratové poruchy na svorkách generátoru. V modelu určenému k simulaci změny zátěže byl upraven regulátor napětí a mohl tak být využit i pro simulaci zkratových poruch. V tomto případě byly k modelu přidány různé typy zkratových poruch, které lze připojit na výstupní svorky generátoru. V Simulinku je dostupný blok, který reprezentuje tyto zkratové poruchy. Na svorky generátoru si lze připojit libovolnou vytvořenou poruchu, následně se spustí simulace a časové průběhy napětí a proudů je možné sledovat na osciloskopech.

Poslední vytvořený model se věnuje simulaci fázování synchronního generátoru do tvrdé sítě. Na tomto modelu lze simulovat připojení synchronního generátoru do tvrdé sítě. Pro správné připojení musejí být splněny určité podmínky. Na tomto modelu si lze simulovat ideální a nepříznivé podmínky při připojení a sledovat časové průběhy. V práci je simulován ideální stav, kdy jsou splněny všechny podmínky správného připojení generátoru do tvrdé sítě. Na tomto modelu jsou provedeny i simulace připojení generátoru do společné sítě při nedodržení některé z podmínek správného připojení. Po simulaci si lze zobrazit časové průběhy napětí a proudů a na těchto průbězích jsou patrné vlivy nedodržení podmínek správného připojení.

Vzniklé modely soustrojí by měly posloužit firmě Siemens Drásov jako podklady pro školení svých stávajících a budoucích zaměstnanců. Díky těmto modelům by mělo být školení názornější a srozumitelnější.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] PETROV, G.N. Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje-synchronní stroje. Praha: Academia, 1982, 728 s.
- [2] ONDRŮŠEK, Čestmír. Elektrické stroje. VUT, 79 s. Skriptum. VUT
- [3] KELLENBERGER, W a E WIEDEMANN. Konstrukce elektrických strojů. Praha: SNTL, 1973, 650 s
- [4] KOPYLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [5] SEN, P. C. Principles of electric machines and power electronics. Third edition. ISBN 9781118078877.
- [6] MĚŘIČKA, Jiří a Zdeněk ZOUBEK. Obecná teorie elektrického stroje. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1973, 162 s.
- [7] LUOMI, Jorma. Transient Phenomena in Electrical Machines. Göteborg: Chalmers University of Technology, 1998.
- [8] Juha Pyrhonen, Valeria Hrabovcova, R. Scott Semken „Electrical Machine Drives Control: An Introduction“ Wiley, November 2016, ISBN: 978-1-119-26045-5
- [9] SUCHOMEL, V. *Regulace soustrojí generátor-pohon*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 32 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Jan Bárta.
- [10] Mechanical Coupling of Synchronous Generator with Exciter System. *MathWorks* [online]. Québec: Gilbert Sybille [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/phymod/sps/examples/mechanical-coupling-of-synchronous-generator-with-exciter-system.html>
- [11] Elektrické stroje a přístroje I: učebnice pro 3. ročník studia oboru 26-61-6 Zařízení silnoproudé elektrotechniky na středních průmyslových školách. Praha: SNTL, 1990. ISBN 80-030-0406-3.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka (Symbol)	Význam	Jednotka
γ	úhel natočení osy d v dvouosém modelu stroje	[°]
ω	úhlová rychlost	[rad/s]
$2p$	počet pólů	[-]
$\cos\varphi$	účinník	[-]
E_1	energie dodaná do soustrojí	[J]
E_2	energie odebraná ze soustrojí	[J]
f	frekvence	[Hz]
f_1	frekvence otáčení magnetického pole statoru	[Hz]
f_i	úhel mezi napětím statoru a zátěžným proudem	[°]
I_1	proud statorem	[A]
I_{abc}	fázové proudy	[A]
i_d, i_q, i_f, i_D, i_Q	proudy po d, q, 0 transformaci	[A]
I_z	zatěžovací proud	[A]
J	moment setrvačnosti	[kg m ²]
k_{v1}	činitel vinutí statoru	[-]
L	indukčnost	[H]
L_d, L_q, L_f, L_D, L_Q	indukčnosti jednotlivých vinutí v d, q osách	[H]
$L_{df}, L_{dD}, L_{fD}, L_{dD}, L_{qQ}$	vzájemné indukčnosti vinutí v d, q osách	[H]
$L_{d\sigma}, L_{q\sigma}, L_{f\sigma}, L_{D\sigma}, L_{Q\sigma}$	rozptylové indukčnosti vinutí v d, q osách	[H]
L_{md}	vzájemná indukčnost v ose d	[H]
L_{mq}	vzájemná indukčnost v ose q	[H]
m	počet fází	[-]
M_d	dynamický moment	[Nm]
M_e	elektromagnetický moment v p.u.	[p.u.]
M_e	elektromagnetický moment	[Nm]
M_z	zátěžný moment	[Nm]
N_1	počet závitů jedné fáze	[-]
n_2	otáčky rotoru	[ot./min]
n_n	jmenovité otáčky	[ot./min]
p	počet pólových dvojic	[-]
p.u.	poměrné jednotky	
PM	permanentní magnety	
pu	poměrné jednotky	
R_D, R_Q	odpory tlumícího vinutí v d, q osách	[Ω]
R_f	odpor budícího vinutí	[Ω]
R_s	odpor statoru	[Ω]
S	elektrický příkon	[VA]
S_z	elektrický příkon zátěže	[VA]
t	čas	[s]
U_0	napětí indukované tokem budícího vinutí	[V]
U_1	výstupní napětí statoru generátoru	[V]
U_a	fázové napětí	[V]

U_{abc}	sdružená napětí	[V]
u_d, u_q, u_f	napětí po d, q, 0 transformaci	[V]
U_{ief}	efektivní hodnota indukovaného napětí	[V]
U_n	jmenovité napětí	[V]
X_s	impedance synchronní reaktance	[Ω]
Y	zapojení vinutí do hvězdy	
β	zátěžný úhel	[$^\circ$]
η_c	celková účinnost soustrojí	[-]
η_g	účinnost generátoru	[-]
η_o	účinnost ostatních částí soustrojí	[-]
η_p	účinnost pohonu	[-]
φ	úhel mezi napětím statoru a zátěžným proudem	[$^\circ$]
ϕ_M	maximální hodnota magnetického toku	[Wb]
$\psi_d, \psi_q, \psi_f, \psi_D, \psi_Q$	spřažené magnetické toky v d, q osách	[Wb]

PŘÍLOHY

```
'VÝPOČET'  
omega = (2 * pi * 50) / (poly / 2)  
n = 60 * fs / (poly / 2)  
I_n = Sn / (Sqr(m) * Un)  
Zn = Un / Sqr(m) / I_n  
U1 = Un / Sqr(m)  
Iz = Sz / U1  
I1 = I_n - Iz  
UXs = Xs * I1  
A = Xs * I1 * cosfi  
fi = Excel.WorksheetFunction.Acos(cosfi)  
fi_deg = Excel.WorksheetFunction.Degrees(fi)  
U0 = Sqr((U1 + Xs * I1 * Sin(fi)) * (U1 + Xs * I1 * Sin(fi)) + A * A)  
beta_rad = Excel.WorksheetFunction.Asin(A / U0)  
beta_deg = Excel.WorksheetFunction.Degrees(beta_rad)
```

Obrázek 36: Ukázka výpočtu potřebných hodnot v prostředí Visual Basic v MS Excel

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a custom interface for calculating and plotting phasor diagrams of a loaded synchronous generator. The interface is organized into columns A through U.

Column A (Labels): 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42.

Column B (Parameters): Zadané hodnoty (Given values): w [rad/s], n [ot./s], I_1 [A], U_1 [A], Z_n [Ohm], I_z [A], β [°], p [-], m [-], X_s [Ohm], S_z [VA].

Column C (Results): Výsledky (Results): 62.83, 720.00, 84.24, 3810.51, 10.99, 262.43, 8.09, 4308.32, 345.67, 36.87.

Column D (Buttons): Vypočít (Calculate), Vymaž výpočet (Clear calculation), Vykreslí fázor (Plot phasor), Smazat diagram (Delete diagram).

Column E (Formulas): Synchronní generátor (Synchronous generator), Zapojení vinutí (Winding connection), Y, 60, 6600, 3.98E+06, 0.8, 10, 3, 9, 1.00E+06.

Column F (Menu): Soubor, Domů, Vložení, Rozložení stránky, Vzorce, Data, Revize, Zobrazení, Vývojář, Acrobat, Vlastnosti mapování, Rozšiřující balíky, Import, Export, Panel dokumentů, Změnit.

Column G (Tools): Zdroj, Aktualizovat data, XML, Vlastnosti, Zobrazit kód, Spustit dialog, Ovládací prvky.

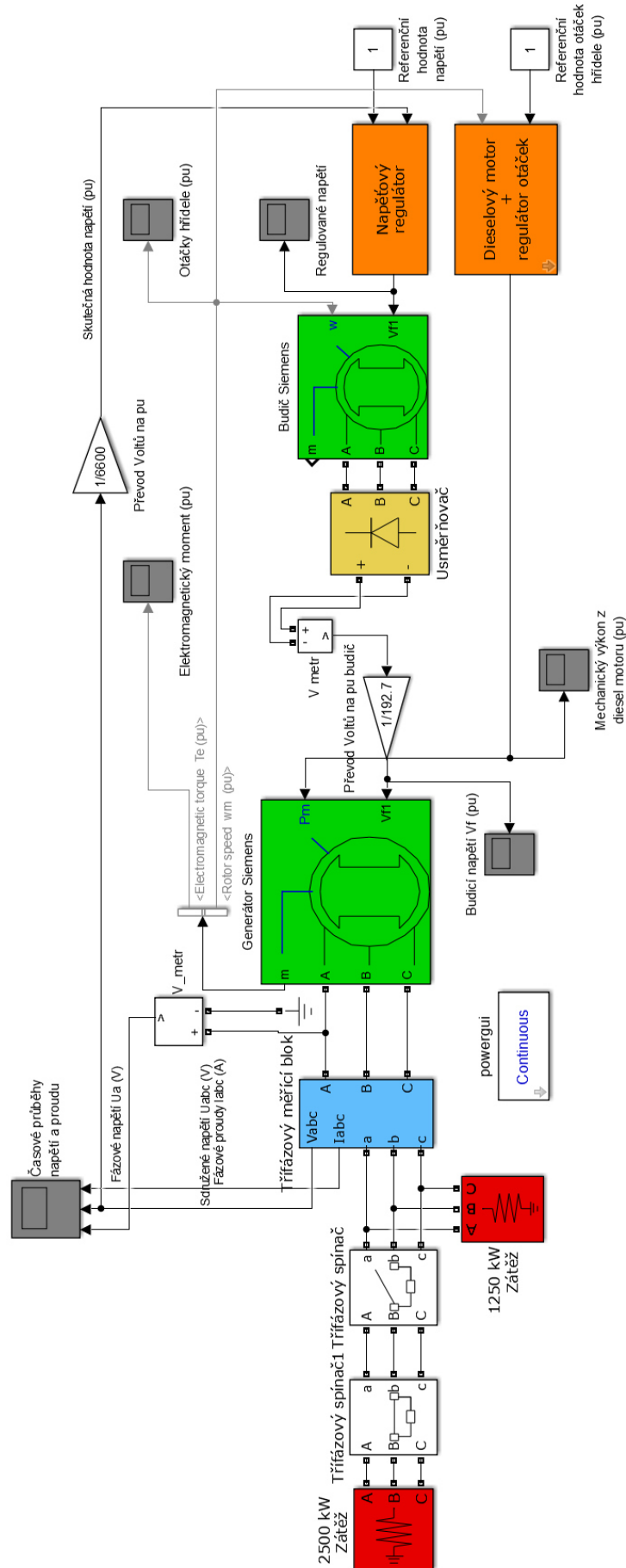
Column H (Visuals): Visual Makra, Použít relativní odkazy, Zabezpečení makr, Kód, Doplněk, Doplněk modelu COM, Doplněk.

Column I (Diagram 1): Fázorový diagram alternátoru zatíženého indukčně (Phasor diagram of an inductively loaded alternator). Shows vectors U_0 , U_1 , I_1 , I_z , β , φ , and $jX_s I_1$.

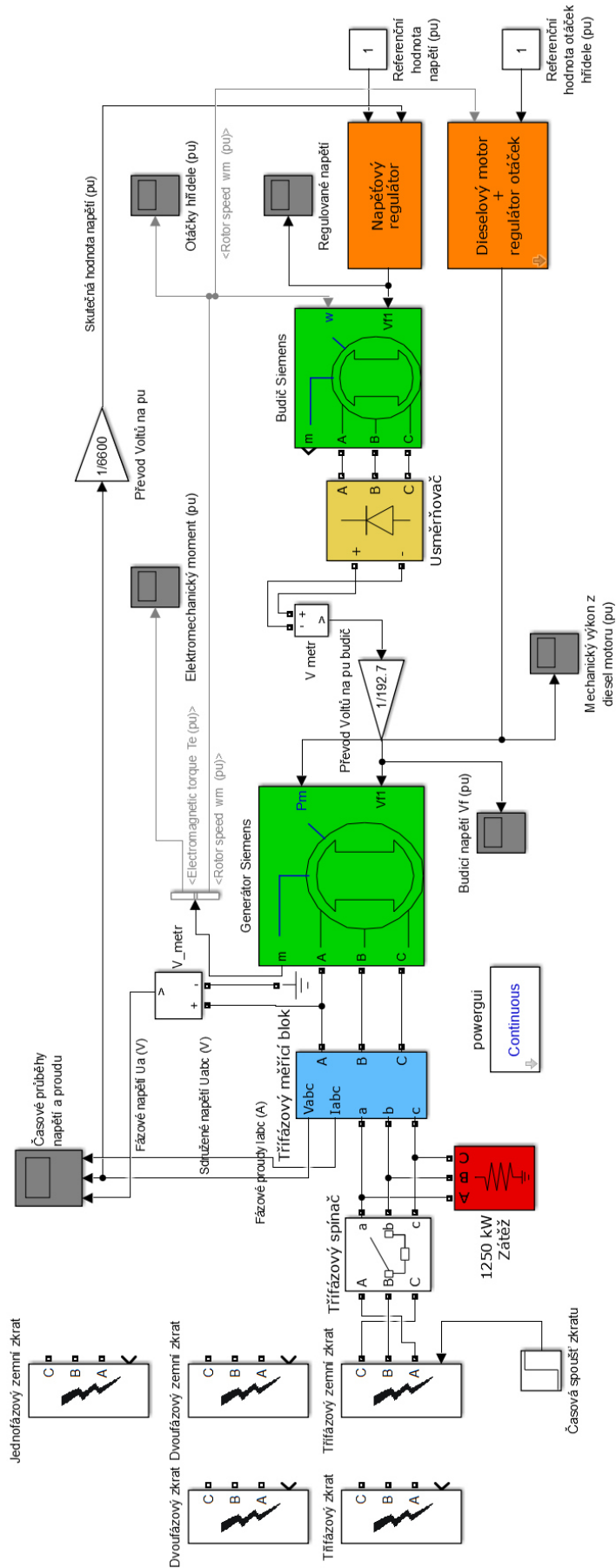
Column J (Diagram 2): Fázorový diagram alternátoru zatíženého indukčně (Phasor diagram of an inductively loaded alternator). Shows vectors U_0 , U_1 , I_1 , I_z , β , φ , and $jX_s I_1$.

Column K (Diagram 3): Schéma zjednodušeného obvodového modelu synchronního generátoru zatíženého zátěží (Simplified circuit model of a synchronous generator loaded with a load). Shows a voltage source U_0 , a synchronous reactance X_s , a load impedance Z , and currents I_1 and I_z .

Obrázek 37: Náhled na celý program vykreslující fázorové diagramy v prostředí MS Excel



Obrázek 38: Náhled na celý model pro simulaci změny zatížení generátoru v Simulinku



Obrázek 39: Náhled na celý model pro simulaci zkratů v Simulinku