

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MĚŘICÍ SYSTÉM PRO LABORATORNÍ GENERÁTOROVÉ SOUSTROJÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ZBYNĚK POCHOP

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Zbyněk Pochop

ID: 78322

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Měřicí systém pro laboratorní generátorové soustrojí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Technický popis současného stavu laboratorního generátorového soustrojí.
2. Návrh vhodné metody pro měření parametrů synchronního alternátoru.
3. Měřicí systém pro určení zátěžného úhlu stroje.
4. Výsledky provedených laboratorních měření a testů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 24.5.2013

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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.

Bibliografická citace práce:

POCHOP, Z. *Měřicí systém pro laboratorní generátorové soustrojí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 67 s.

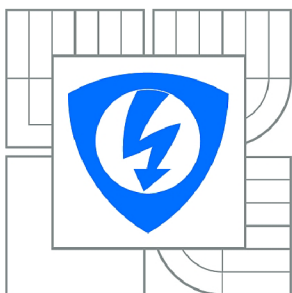
Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MĚŘICÍ SYSTÉM PRO LABORATORNÍ GENERÁTOROVÉ SOUSTROJÍ

MEASURING SYSTEM FOR LABORATORY GENERATOR UNIT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

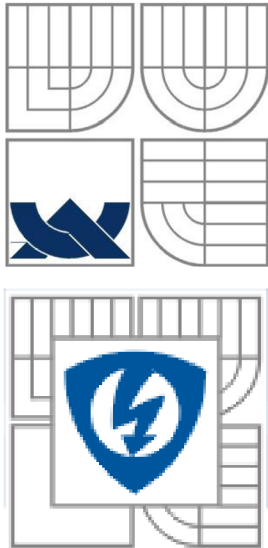
Bc. ZBYNĚK POCHOP

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAVA ORSÁGOVÁ,
Ph.D.

BRNO 2013



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Master's Thesis

Measuring system for laboratory generator unit

by

Bc. Zbyněk Pochop

Supervisor: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Brno University of Technology, 2013

Brno

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá měřením a popisem synchronního generátoru, který je umístěn v laboratořích. Nejprve se práce věnuje teorii synchronního stroje. Následuje podrobný popis zapojení laboratorního soustrojí.

Následně se práce zabývá měřením základních parametrů synchronního stroje a potom také se poměrně důkladně věnuje zobrazením přechodných dějů při různých stavech na digitálním osciloskopu.

Diplomová práce se snaží porovnat teoretické představy s naměřenými výsledky. Závěrem je uvedeno co všechno by se dalo měřit dalšího na tomto generátorovém soustrojí.

KLÍČOVÁ SLOVA: Provozní diagram alternátoru; Zátěžný úhel; Přechodný děj; Fázování alternátoru

ABSTRACT

This Master thesis deals with the measurement and description of the synchronous generator, which is located in laboratories. First, the thesis deals with the theory of synchronous machines. This is followed by a detailed description of the involvement of laboratory genetary unit.

Subsequently, the work deals with the measurement of basic parameters of the synchronous machine and also quite thoroughly devoted to displaying transients at various levels on the digital oscilloscope.

The dissertation aims to compare theoretical ideas with the measured results. Finally, it is shown what could be measured next to the generator set.

KEY WORDS: Operating diagram of alternator; Load angle of alternator; Transient; Synchronizing an alternator

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD.....	14
2 SYNCHRONNÍ STROJ.....	15
2.1 KONSTRUKCE:.....	15
2.2 TEORIE SYNCHRONNÍHO STROJE:.....	16
2.2.1 REAKCE KOTVY:	17
2.2.2 MAGNETICKÉ TOKY KOTVY:.....	19
3 LABORATORNÍ SOUSTROJÍ	21
3.1 POPIS BUDÍČÍHO SYSTÉMU:	22
3.2 NAPÁJENÍ BUDÍČÍHO OBVODU	23
3.3 ZAPOJENÍ VINUTÍ STATORU.....	24
3.4 ZAPOJENÍ PRACOVIŠTĚ.....	25
3.5 ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU	26
3.6 ZÁKLADNÍ OVLÁDÁNÍ SOUSTROJÍ.....	27
3.7 CELKOVÉ ZÁKLADNÍ SCHÉMA SILOVÝCH OBVODŮ	28
4 MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU	29
4.1.1 CHARAKTERISTIKA NAPRÁZDNO:	29
4.1.2 CHARAKTERISTIKA NAKRÁTKO:	29
4.1.3 URČENÍ SYNCHRONNÍ REAKTANCE X_D MĚŘENÍM:	30
4.1.4 ZKOUŠKA SE ZÁPORNÝM BUZENÍM.....	33
5 FÁZOVÁNÍ ALTERNÁTORU K SÍTI	34
5.1 PŘECHODNÝ DĚJ PŘI FÁZOVÁNÍ ALTERNÁTORU K SÍTI.....	35
5.2 MĚŘENÍ PŘECHODNÉHO DĚJE PŘI FÁZOVÁNÍ ALTERNÁTORU K SÍTI:	35
5.2.1 $U_G = 226 \text{ V}$, $F_G = 50 \text{ Hz}$	37
5.2.2 $U_G = 216 \text{ V}$, $F_G = 50 \text{ Hz}$	38
5.2.3 $U_G = 236 \text{ V}$, $F_G = 50 \text{ Hz}$	39
5.2.4 $U_G = 226 \text{ V}$, $F_G = 49,5 \text{ Hz}$	40
5.2.5 $U_G = 226 \text{ V}$, $F_G = 50,5 \text{ Hz}$	41
6 PROVOZNÍ DIAGRAM SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU PRACUJÍCÍHO DO TVRDÉ SÍTĚ.....	42
6.1 PRINCIP P-Q DIAGRAMU.....	42
6.2 MĚŘENÍ P-Q CHARAKTERISTIK.....	43
6.2.1 MĚŘENÍ VLIVU ZMĚNY MOMENTU NA POLOHU PRACOVNÍHO BODU V P-Q DIAGRAMU:	43
6.2.2 MĚŘENÍ VLIVU ZMĚNY BUDÍČÍHO PROUDU NA POLOHU PRACOVNÍHO BODU V P-Q DIAGRAMU	45
7 ZKRAT ALTERNÁTORU.....	47

7.1 ZKOUŠKA NÁHLÝM TROJFÁZOVÁM ZKRATEM [I]	47
7.2 MĚŘENÍ PŘECHODNÉHO DĚJE PŘI TŘÍFÁZOVÉM ZKRATU ALTERNÁTORU:	48
7.2.1 TROJFÁZOVÝ ZKRAT Z CHODU NAPRÁZDNO S NAPĚTÍM 64 V	49
7.2.2 TROJFÁZOVÝ ZKRAT Z CHODU NAPRÁZDNO S NAPĚTÍM 205 V	50
7.2.3 MĚŘENÍ PRŮBĚHU ZOTAVENÉHO NAPĚTÍ PŘI PŘERUŠENÍ ZKRATOVÉHO PROUDU	51
8 ZÁTĚŽNÝ ÚHEL SYNCHRONNÍHO STROJE	52
8.1 MĚŘENÍ ZÁTĚŽNÉHO ÚHLU NEPŘÍMOU METODOU:	53
8.2 MĚŘENÍ ZÁTĚŽNÉHO ÚHLU NEPŘÍMOU METODOU:	55
8.3 MĚŘENÍ ZÁTĚŽNÉHO ÚHLU POMOCÍ FREKVENČNÍHO MĚNIČE	56
9 PŘÍLOHY	58
10 ZÁVĚR	66
POUŽITÁ LITERATURA	67

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Synchronní generátor LSA 37 M5.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2 Náhradní schéma kotvy alternátoru s hladkým rotorem.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 3 Fázorový diagram alternátoru s hladkým rotorem.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 4 Blokové schéma.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 5 Budicí systém generátoru.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 6 Způsob napájení R250 z vinutí statoru</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 7 Schéma zapojení vinutí a svorkovnice</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 8 Zapojení statorového vinutí</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 9 Základní zapojení pracoviště</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 10 Zapojení asynchronního motoru přes frekvenční měnič</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 11 Schéma zapojení pro přepínání režimů.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 12 Zapojení silových obvodů</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 13 Charakteristiky naprázdno a nakrátko</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 14 Charakteristika naprázdno</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 15 Charakteristika nakrátko</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 16 Určení X_d pomocí charakteristik naprázdno a nakrátko</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 17 Určení "e" z charakteristiky naprázdno pomocí i_{fr} a u_r.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 18 Principiální schéma při fázování</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 19 Zapojení osciloskopu pro měření přechodného děje při fázování.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 20 Průběhy proudů při fázování</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 21 Průběhy proudů při fázování pro delší časový úsek</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 22 Průběhy proudů při fázování</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 23 Průběhy proudů při fázování pro delší časový úsek</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 24 Průběhy proudů při fázování</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 25 Průběhy proudů při fázování pro delší časový úsek</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 26 Průběhy proudů při fázování</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 27 Průběhy proudů při fázování pro delší časový úsek</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 28 Průběhy proudů při fázování</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 29 Průběhy proudů při fázování pro delší časový úsek</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 30 P-Q diagramy synchronního generátoru</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 31 Trajektorie pohybu pracovního bodu při změně momentu</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 32 Naměřené hodnoty polohy pracovního bodu</i>	<i>44</i>

<i>Obr. 33</i>	<i>Naměřené hodnoty polohy pracovního při změnách budicího proudu</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 34</i>	<i>Trajektorie pohybu pracovního bodu při změně budicího proudu</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 35</i>	<i>Naměřené hodnoty při změně budicího proudu</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 36</i>	<i>Způsob zapojení při měření průběhu zkratového proudu</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 37</i>	<i>Naměřený průběh zkratového proudu. Pro $U_0 = 64 \text{ V}$</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 38</i>	<i>Naměřený průběh napětí při zkratu</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 39</i>	<i>Naměřený průběh zkratového proudu. Pro $U_0 = 205 \text{ V}$</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 40</i>	<i>Naměřený průběh napětí při zkratu</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 41</i>	<i>Zaznamenaný průběh zotaveného napětí</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 42</i>	<i>Diagram synchronního generátoru s hladkým rotorem</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 43</i>	<i>Diagram synchronního generátoru s vyniklými póly</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 44</i>	<i>Průběh napětí během jedné otáčky při stavu naprázdno</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 45</i>	<i>Průběh napětí během jedné otáčky při stavu zatížení</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 46</i>	<i>Průběh napětí během jedné otáčky u čtyřpolového alternátoru</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 47</i>	<i>Určení zátěžného úhlu</i>	<i>57</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Parametry motoru.....</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 2 Parametry generátoru.....</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 3 Naměřené hodnoty</i>	<i>55</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ϕ	Magnetický tok
ω	Úhlová rychlost
δ	Zátěžný úhel
X_q	Příčná synchronní reaktance
U	Elektrické napětí
U_0	Napětí naprázdno
I	Elektrický proud
I_k	Zkratový proud
P	Činný výkon
Q	Jalový výkon
φ	Fázový posun
ψ	Magnetický tok
E	Vnitřní indukované napětí
X'_d	Přechodná synchronní reaktance
X''_d	Rázová synchronní reaktance
X_n	Jmenovitá reaktance
$I(\infty)$	Ustálená hodnota proudu nakrátko
E	Vnitřní indukované napětí
f	Frekvence
i_b, i_f	Budící proud
$\cos \varphi$	Účinník
ν	Zkratový poměr
R_a	Vnitřní odpor kotvy
X_p	Rozptylová reaktance
X_{ad}	Reaktance reakce kotvy
R	Elektrický odpor
R_m	Magnetický odpor
N_f	Efektivní počet závitů budícího vinutí
S	Zdánlivý výkon
L	Indukčnost

1 ÚVOD

Elektrická energie je nepochybně nejvýznamější objev v historii lidstva. Vliv elektrické energie na rozvoj a životní úroveň byl velmi výrazný. Dnešní svět si už nelze představit bez elektrické energie. Protože spotřeba energie neustále roste musí proto růst i množství vyrobené elektrické energie. Nejvíce elektrické energie se vyrábí v alternátorech neboli synchronních generátorech. V elektrárnách jsou používány synchronní generátory nejen obřích výkonů ale i obřích rozměrů. My se sice budeme věnovat alternátorům malých výkonů, ale ty velké pracují úplně stejným způsobem.

Nejprve se tato práce zabývá, tím co je to vůbec synchronní generátor z čeho se skládá a jak vlastně funguje. Následně je probrána teorie synchronního stroje, kde je vysvětleno i matematicky jakým způsobem pracuje alternátor.

Hlavním objektem zájmu je synchronní generátor LSA 37 M5, který je umístěn v laboratorní učebně. V práci je postupně podrobně popsáno zapojení synchronního generátoru k rozvaděči a způsob manipulace s ním. Dále jsou uvedena u konkrétního alternátoru i jeho specifika, které pak při měření musíme brát v potaz.

Po již zmíněném důkladném popisu zapojení alternátoru následují kapitoly zabývající se praktickým měřením jako je měření základních parametrů synchronního stroje.

Další kapitoly se věnují měřením a zaznamenáváním přechodných dějů při fázování alternátoru k síti nebo při trojfázovém zkratu.

Dále práce pojednává o provozních diagramech a to jak teoreticky tak i praktickým měřením, které má názorně ukázat, že se naměřené hodnoty blíží teoretickým. A nakonec je ještě probrán zátěžný úhel a některé způsoby jeho měření.

2 SYNCHRONNÍ STROJ

Synchronní stroj je střídavý točivý stroj, jehož rotor se otáčí stejnou rychlostí jako otáčky točivého magnetického pole statoru. Může pracovat jako motor, kompenzátor pro kompenzaci účinníku a nebo jako generátor. Právě synchronní generátor neboli alternátor má největší uplatnění v elektroenergetice. Používá se v elektrárnách velkých výkonů jako jsou jaderné či tepelné k přeměně mechanické energie na energii elektrickou pomocí elektromagnetické indukce.

2.1 Konstrukce

Stator je netočivá část stroje. A skládá se z vinutí a železného jádra. Železné jádro se používá ke zvětšení magnetické vodivosti a tedy i ke zvětšení indukčnosti vinutí na statoru. Jádro není složeno z jednolitého železa, ale z důvodů snížení ztrát vířivými proudy se skládá z tenkých navzájem od sebe izolovaných plechů. Statorové vinutí je uloženo v drážkách železného jádra statoru. V případě třífázového alternátoru jsou jednotlivá vinutí statoru vzájemně posunuta o 120° , čímž se dosáhne toho, že i indukovaná napětí v jednotlivých fázích budou také posunuta o 120° .

Rotor alternátoru je točivá část stroje, protože je součástí hřídele. Železné jádro je zde složeno z jednolitého kusu železa, jelikož se v něm nebudou indukovat vířivé proudy, protože se poloha rotoru vůči magnetickému poli nemění. Pouze v případě, že budicí proud byl pulsující, pak by se dal i rotor složit z plechů. Vinutí rotoru se napájí stejnosměrným proudem. Rotor může být v provedení s vyniklými póly nebo s hladkým rotorem. Rotor s vyniklými póly se používá u hydrogenerátorů, které mají velký počet pólů a velký průměr ale nízké otáčky. A naopak hladký rotor se používá u turboalternátorů, které mají malý počet pólů a malý průměr ale vysoké otáčky.

Budič slouží k napájení budicího vinutí na rotoru. Je několik způsobů, jak to provést. První možnost je napájení budicího vinutí přes sběrací kroužky, které slouží jako vodivé propojení mezi rotující a nerotující částí budicího obvodu. Druhá možnost je vlastní buzení, což rotující budič (dynamo, alternátor), který je umístěn přímo na hřídeli. A třetí variantou je budicí vinutí umístěné na statoru, které pak indukuje do dalšího budicího vinutí na rotoru proud, který se pak usměrní. U posledních dvou zmíněných možností odpadá nutnost kontaktního styku kartáčů se sběracími kroužky.



Obr. 1 Synchronní generátor LSA 37 M5

2.2 Teorie synchronního stroje

Budící vinutí na rotoru je napájeno konstantním stejnosměrným proudem. Rotorové vinutí tak funguje jako elektromagnet, který kolem sebe vytváří magnetické pole. Magnetický tok u dvupolového rotoru je rozložen v prostoru okolo rotoru podle funkce cosinus. Největší hodnota magnetického toku je v podélné ose rotoru, kde má hodnotu:

$$\phi = \frac{i_f \cdot N_f}{R_m} \cdot \cos 0^\circ = \frac{i_f \cdot N_f}{R_m} \quad (2.1)$$

a naopak v kolmé ose rotoru je magnetický tok nulový:

$$\phi_f = \frac{i_f \cdot N_f}{R_m} \cdot \cos 90^\circ = 0 \quad (2.2)$$

I_f - proud budícího vinutí

N_f - efektivní počet závitů budícího vinutí

R_m - magnetický odpor magnetického obvodu budícího vinutí

Část magnetického toku rotoru prochází plochou závitů vinutí statoru. Tento magnetický tok si můžeme rozložit na dvě složky. Na kolmou a rovnoběžnou s plochou závitů vinutí statoru. V tomto případě nás bude zajímat pouze kolmá složka. Pokud se bude rotor otáčet, bude se měnit kolmá složka magnetického toku procházející plochou závitů vinutí statoru, což způsobí vznik, na magnetický tok kolmého, kruhového elektrického pole uvnitř i vně plochy závitů. Toto elektrické pole bude elektrickou silou působit na elektrony uvnitř vodiče závitů a tak se v závitě indukují napětí. Jeho velikost bude záviset na záporné rychlosti změny v čase kolmé složky magnetického toku procházející plochou závitů neboli na záporné derivaci kolmé složky magnetického toku podle času. A také záleží na vzájemné indukčnosti mezi budícím vinutím a vinutím kotvy. Čím rychlejší bude změna magnetického toku procházející plochou závitů v čase, tím větší bude indukované napětí. Indukované napětí pro jednu z cívek statoru bude:

$$e_{fI}(t) = -M \cdot \frac{d\psi_f}{dt} = -M \cdot i_f \cdot \frac{d\cos \omega t}{dt} = \omega \cdot M \cdot i_f \cdot \sin \omega t \quad (2.3)$$

M - vzájemná indukčnost mezi budícím vinutím a vinutím kotvy

ψ_f - kolmá složka magnetického toku, procházející plochou závitů vinutí statoru

ω - úhlová rychlost

Indukovaná napětí ve zbylých dvou cívkách budou posunuta o 120° a 240° .

$$e_{fII}(t) = \omega \cdot M \cdot i_f \cdot \sin (\omega t + 120^\circ) \quad (2.4)$$

$$e_{fIII}(t) = \omega \cdot M \cdot i_f \cdot \sin (\omega t + 240^\circ) \quad (2.5)$$

Vztahy (2.1) až (2.5) jsou čerpány z [3];

2.2.1 Reakce kotvy

Jakmile se na alternátor připojí zátěž, začne procházet všemi třemi cívkami statoru elektrický proud. Každá tato cívka vytvoří vlastní magnetický tok $\psi_A(t)$, $\psi_B(t)$ a $\psi_C(t)$. Pokud je vektorově sečteme dostaneme magnetický tok kotvy (statoru) $\psi_a(t)$, který rotuje stejnou synchronní rychlostí jako rotor.

$$\bar{\psi}_a = \bar{\psi}_A + \bar{\psi}_B + \bar{\psi}_C \quad (2.6)$$

Pokud je proud tekoucí statorom čistě kapacitního charakteru, tak magnetický tok reakce kotvy má stejný směr jako magnetický tok rotoru. Pokud je proud čistě induktivního charakteru, tak má magnetický tok kotvy přesně opačný směr než magnetický tok rotoru. Při odporové zátěži jsou na sebe oba magnetické toky kolmé.

Zatímco u nezatíženého alternátoru nám uvnitř stroje rotoval pouze magnetický budící tok $\psi_f(t)$, tak u zatíženého generátoru máme kromě rotujícího budícího magnetického toku $\psi_f(t)$ také rotující magnetický tok kotvy $\psi_a(t)$. Každý z těchto magnetických toků indukuje svoji složku napětí ve vinutí statoru. Výsledné indukované napětí v kotvě bude součtem obou složek napětí:

$$e_c(t) = e_f(t) + e_a(t) \quad (2.7)$$

$$e_c(t) = -\frac{d\psi_f(t)}{dt} - \frac{d\psi_a(t)}{dt} \quad (2.8)$$

$$e_c(t) = -M \cdot i_f \cdot \frac{d\cos \omega t}{dt} - L_a \cdot I_m \cdot \frac{d\cos(\omega t - \lambda)}{dt} \quad (2.9)$$

$$e_c(t) = \omega \cdot M \cdot i_f \cdot \sin \omega t + \omega \cdot L_a \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - \lambda) \quad (2.10)$$

Kde první člen je indukované napětí od magnetického toku budícího vinutí a druhý člen je indukované napětí od magnetického toku statorového vinutí. L_a je indukčnost vinutí kotvy a λ je úhel mezi oběma magnetickými toky. Ten je dán charakterem zátěže.

V náhradním schéma alternátoru je indukované napětí od budícího magnetického toku $\psi_f(t)$ reprezentováno zdrojem vnitřního indukovaného napětí $e_f(t)$ nebo fázorově \bar{E}_f . Magnetický tok kotvy $\psi_a(t)$ indukuje v kotvě napětí, které je rovno záporné derivaci proudu násobené indukčností statorového vinutí. Proto nemusíme do schématu kreslit další zdroj napětí ale stačí zakreslit indukčnost reakce kotvy L_a nebo spíše induktivní reaktaci X_{ad} , na které vznikne napětí $e_a(t)$.

Fázově to lze zapsat:

$$\bar{E}_c = \bar{E}_f - j \cdot \bar{I} \cdot X_{ad} \quad (2.11)$$

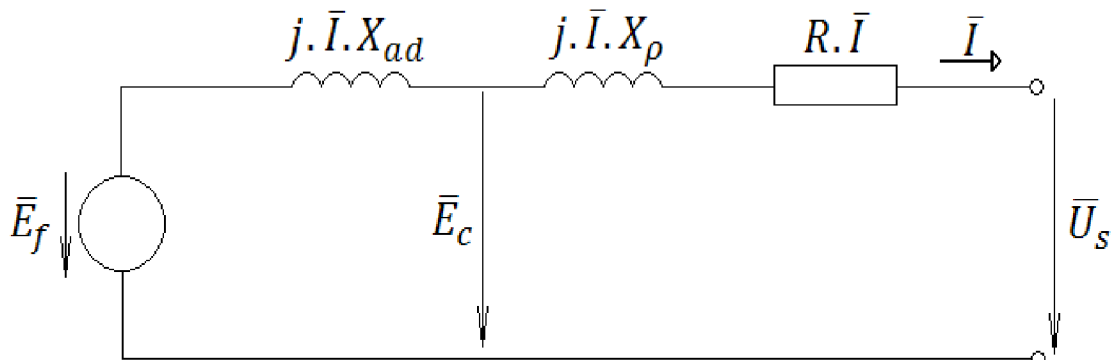
Pro určení výsledného napětí na svorkách alternátoru musíme uvažovat ještě úbytky napětí na rozptylové reaktanci a odporu vinutí kotvy.

$$\bar{U}_s = \bar{E}_f - j \cdot \bar{I} \cdot X_{ad} - j \cdot \bar{I} \cdot X_\rho - R \cdot \bar{I} \quad (2.12)$$

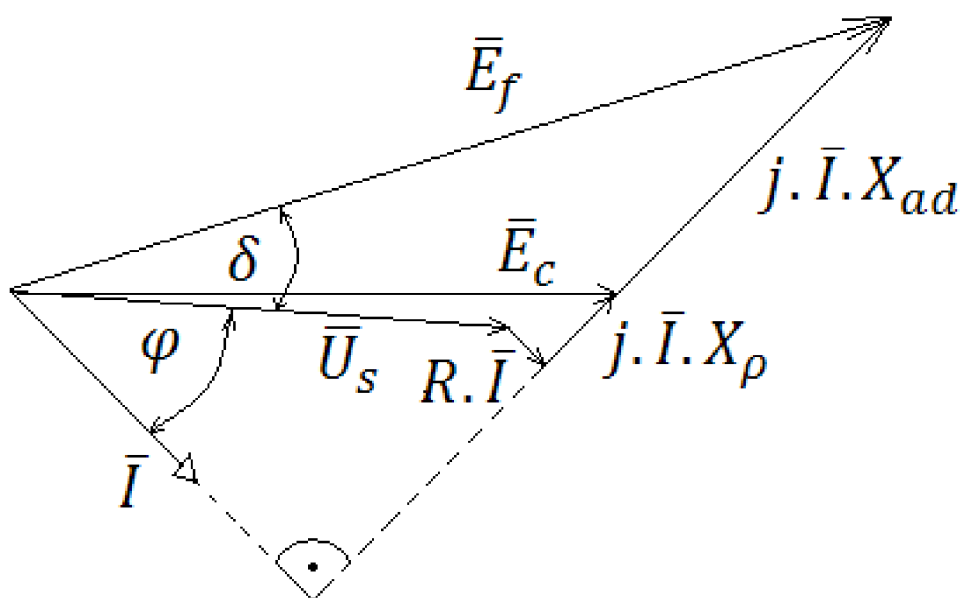
Vztahy (2.6) až (2.13) vychází z [3];

Rovnice synchronního generátoru s hladkým rotorem:

$$\bar{U}_s = \bar{E}_f - j \cdot \bar{I} \cdot X_{ad} - j \cdot \bar{I} \cdot X_\rho - R \cdot \bar{I} \quad (2.13)$$



Obr. 2 Náhradní schéma kotvy alternátoru s hladkým rotorem



Obr. 3 Fázorový diagram alternátoru s hladkým rotorem

Úhel φ je fázový posun mezi svorkovým napětím U_s a proudem. Úhel δ je zátěžný úhel alternátoru.

2.2.2 Magnetické toky kotvy

Třífázový proud protékající kotvou, složenou z vinutí tří fází vzájemně posunutých o 120° , vytváří točivé magnetické pole. Náhradní schéma se kreslí jen pro jednu fázi, proto budeme vyšetřovat magnetický tok procházející pouze cívkou fáze A. Magnetický tok, který prochází dutinou fáze cívky A se skládá ze dvou složek. První složka je rozptylový magnetický, který prochází pouze cívkou A ale neprochází vůbec cívkami dalších fází. Druhá složka magnetického toku procházející dutinou cívky A je magnetický tok reakce kotvy.

$$\bar{\psi}_{ad} = \bar{\psi}_{AB} + \bar{\psi}_{AC} + \bar{\psi}_{CA} + \bar{\psi}_{BA} \quad (2.14)$$

$\bar{\psi}_{ad}$ – Magnetický tok reakce kotvy

$\bar{\psi}_{AB}$ – Magnetický tok generovaný cívkou A, jenž prochází dutinou cívky B

$\bar{\psi}_{AC}$ – Magnetický tok generovaný cívkou A, jenž prochází dutinou cívky C

$\bar{\psi}_{CA}$ – Magnetický tok generovaný cívkou C, jenž prochází dutinou cívky A

$\bar{\psi}_{BA}$ – Magnetický tok generovaný cívkou B, jenž prochází dutinou cívky A

Reaktance reakce kotvy X_{ad} : Magnetický tok reakce kotvy $\bar{\psi}_{ad}$, který prochází dutinou cívky A v ní indukuje napětí, jež závisí na záporné derivaci magnetického toku podle času. Toto indukované napětí reprezentuje v náhradním schématu úbytek na magnetizační reaktanci, které se také říká reaktance reakce kotvy. Velikost magnetizační reaktance závisí na frekvenci, počtu závitů vinutí kotvy a na vodivosti magnetického obvodu.

Rozptylová reaktance X_p : Magnetický tok, který prochází cívkou A ale neprochází cívkami dalších fází se nazývá rozptylový magnetický tok. V cívkě A tento rozptylový magnetický tok indukuje napětí, které v náhradním schématu představuje úbytek napětí na rozptylové reaktanci.

Odpor vinutí kotvy R_a : Vinutí kotvy je navinuto z měděných vodičů, které mají určitý odpor. Jeho velikost závisí na délce navinutého vodiče, na průřezu vodiče, na teplotě a měrném odporu materiálu.

Synchronní reaktance X_d : Vzhledem k tomu, že velikost odporu vinutí kotvy je mnohonásobně menší než obě reaktance, tak se odpor R_a zanedbává. Magnetizační a rozptylovou reaktanci můžeme sečíst do jedné reaktance a dostaneme synchronní reaktanci, která patří mezi důležité parametry synchronního stroje. Její velikost závisí na počtu závitů vinutí kotvy a také na vodivosti magnetického obvodu, kterým prochází magnetický tok. Čím větší počet závitů a čím větší magnetická vodivost obvodu, tím je synchronní reaktance větší. Rozlišujeme nasycenou a nenasyčenou synchronní reaktanci podle toho zda předpokládáme magnetický obvod nasycený nebo nenasyčený.

Jmenovité napětí U_n : Jmenovité napětí je základní parametr synchronního stroje. Udává velikost napětí, pro které je stroj konstruován. Čím větší je jmenovité napětí, tím menší vliv budou mít úbytky napětí a tím je zdroj tvrdší. Na druhou stranu vyšší napětí má větší nároky na izolační pevnost a hlavně vyžaduje vyšší budící proud, větší průřez vinutí budící cívky, větší počet závitů budící cívky i kotvy a také masivnější magnetický obvod jak rotoru tak i statoru, což výrazně zvyšuje cenu stroje. Proto hodnota jmenovité napětí je výsledkem kompromisu.

Jmenovitý výkon S_n : Je to výkon, který je schopen bezpečně a dlouhodobě alternátor přenášet při daném jmenovitém napětí. Při odebrání většího výkonu než je výkon jmenovitý by vinutím tekla větší proud, než ten na který je stroj konstruován a mohlo by dojít k jeho poškození. Jmenovitý výkon úzce souvisí s napětím proto závisí také na počtu závitů budícího vinutí, vinutí kotvy, budícím proudem, velikosti vzduchové mezery a vodivosti magnetických obvodů. S rostoucím výkonem roste i proud, proto se zvýší i průřezy vinutí.

Jmenovitý proud I_n : Jmenovitý proud je proud, který poteče alternátorem, je-li zatížen jmenovitým zatížením při jmenovité hodnotě budícího proudu a na svorkách je jmenovité napětí.

Jmenovitý účinník $\cos\varphi$: Vyjadřuje fázový posuv mezi napětím a proudem, pokud je alternátor zatížen jmenovitým výkonem a budícím vinutím prochází jmenovitý budící proud.

Jmenovitý budící proud I_f : Je to proud procházející budícím vinutím v případě, že kotvou prochází jmenovitý proud s jmenovitým účinníkem $\cos\varphi$ a na svorkách stroje je jmenovité napětí.

Zkratový poměr ν :

Zkratový poměr je podíl zkratového proudu I_k při buzení naprázdno I_{b0} a proudu jmenovitého I_n . Nebo také podíl budícího proudu odpovídajícího jmenovitému napětí na charakteristice naprázdno a budícího proudu odpovídajícího jmenovitému proudu na charakteristice naprázdno. Změna zkratového poměru by se na charakteristice nakrátko projevila změnou sklonu této charakteristiky. Zkratový poměr lze vyjádřit také jako převrácenou hodnotu nasycené poměrné synchronní reaktance. Z konstrukčního hlediska tedy zkratový poměr vyjadřuje jak moc se na elektromagnetické indukci podílí rotor a stator. Generátory s velkým zkratovým poměrem mají menší počet závitů kotvy a méně vodivý magnetický obvod statoru, ale aby na kotvě dosáhly požadovaného výkonu a napětí musí mít zase větší počet závitů budícího vinutí, masivnější magnetický obvod rotoru, menší vzduchovou mezeru a nebo větší budící proud. Generátory s malým zkratovým poměrem mají zase větší počet závitů kotvy a masivnější magnetický obvod statoru, a proto k získání požadovaného výkonu a napětí kotvy pak není potřeba tak velký budící proud ani velký počet závitů budícího vinutí.

U strojů s menším zkratovým poměrem má větší vliv reakce kotvy, což se projeví tak, že při změnách zatížení dojde k velkým změnám výsledného budícího proudu. Z toho pohledu je lepší, aby měl stroj co největší zkratový poměr. Na druhou stranu ale stroj s větším zkratovým poměrem je dražší a těžší.

3 LABORATORNÍ SOUSTROJÍ

Laboratorní soustrojí se skládá z motoru a generátoru, jejichž hřídele jsou spojeny pevnou mechanickou spojkou. Asynchronní motor je ovládán frekvenčním měničem. Motor přeměňuje elektrickou energii na mechanickou. A generátor zase tuto mechanickou energii přeměňuje na elektrickou energii.



Obr. 4 Blokové schéma

Motor:

Poháněcí motor je třífázový asynchronní motor s cizí ventilací. Statorové vinutí je zapojeno do trojúhelníka.

Tab. 1: Parametry motoru. Parametry jsou čerpány z [2].

Typ	Slg132 M4
Výrobce	Tamel
Jmenovité napětí	3x400 V
frekvence	50 Hz
Mechanický výkon	7,5 kW
Otáčky	1455 ot/min
Jmenovitý proud	14,4 A
Účinnost	0,86
Hmotnost	59 kg
Krytí	IP55

Generátor:

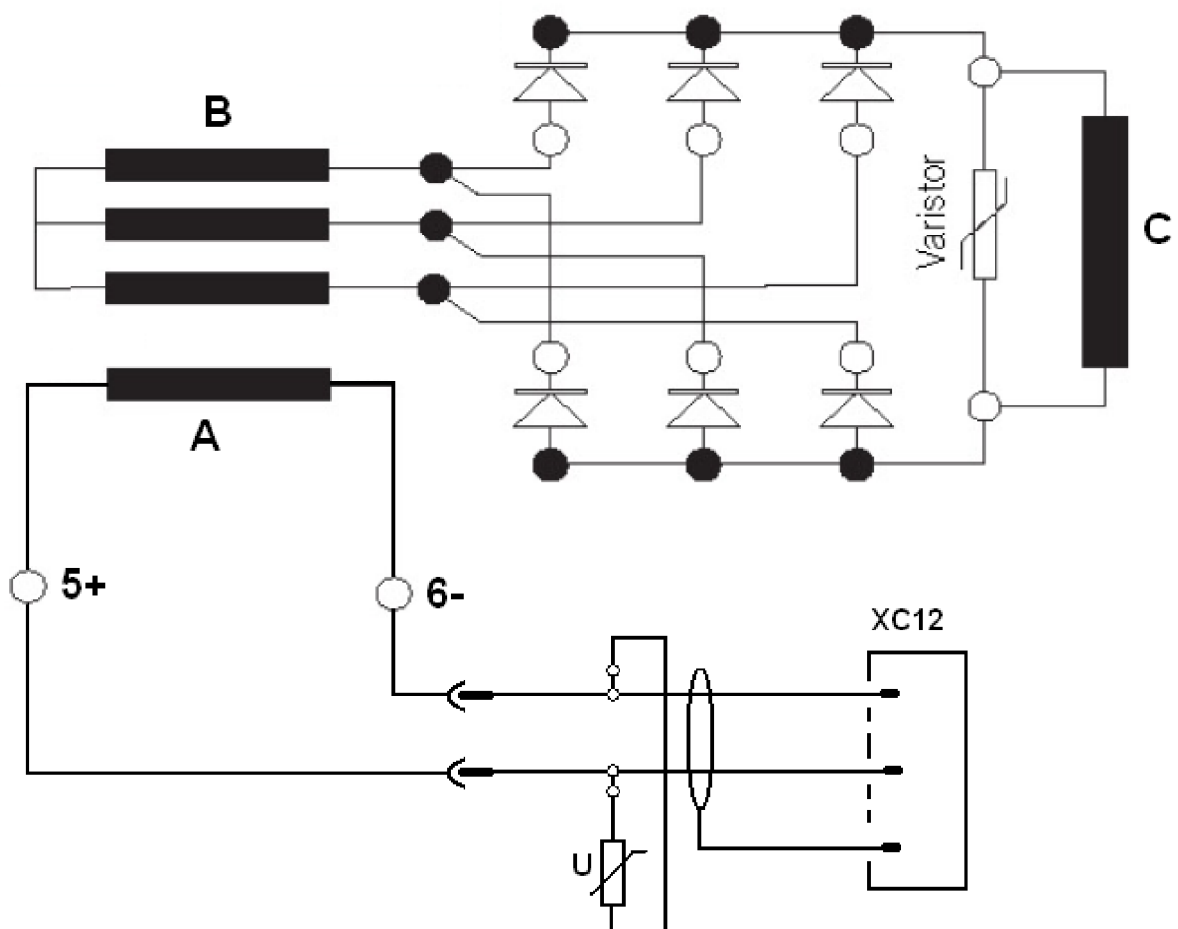
Čtyřpólový synchronní generátor s vlastní ventilací. Statorové vinutí je zapojeno do hvězdy.

Tab. 2 Parametry generátoru. Parametry jsou čerpány z [2].

Typ	LSA 37M5	x_d	140%
Jmenovité napětí	3x400 V	x_q	70%
Frekvence	50 Hz	x_d'	9,90%
Výkon	7,5 kVA	x_d''	4,90%
Hmotnost	95 kg	x_q''	8,50%
Jmenovité otáčky	1500 min ⁻¹	T_d'	40 ms
Účinnost	0,8	T_d''	3,7 ms
Počet pólů	4	T_a	6 ms

3.1 Popis budicího systému

Jedná se o bezkroužkový budicí systém s neřízeným usměrňovačem. Jeho velkou výhodou je, že nemá kroužky a kartáče a proto má vysokou spolehlivost. Přenos energie potřebnou pro buzení se tak zde provádí bezkontaktně pomocí elektromagnetické indukce. Na statoru je umístěno vinutí A, které je napájeno stejnosměrným proudem. Na rotoru je umístěn usměrňovač a vinutí B a C. Vinutí B jsou zapojeny do hvězdy bez vyvedeného středního vodiče. V těchto vinutích B se při otáčení rotoru indukují střídavý trojfázový proud. Neřízený usměrňovač, který se skládá ze šesti diod, proud usměrní. Paralelně k usměrňovači je připojen varistor sloužící k vyhlazení stejnosměrného proudu. Vinutí C pak slouží jako hlavní budicí vinutí synchronního generátoru.



Obr. 5 Budicí systém generátoru. Obrázek částečně vychází z [2].

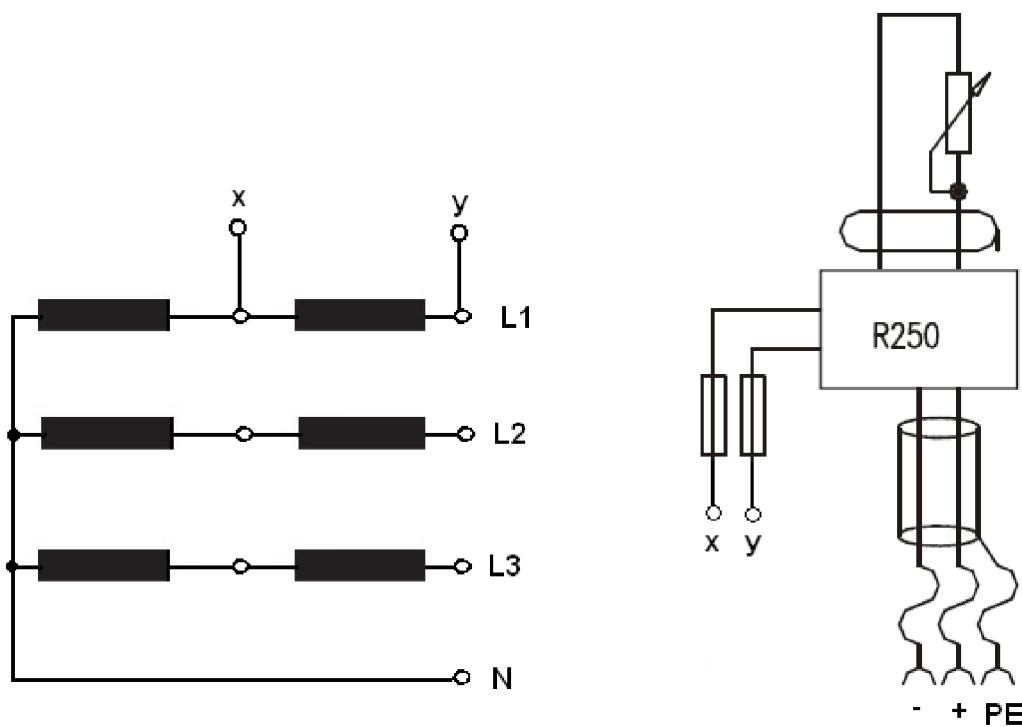
Ke svorkám cívky A je připojen kabel s varistorem a s koncovkou XC12, kam můžeme připojit externí stabilizovaný zdroj Statron nebo regulátor napětí R250. Maximální proud vinutí A, který nesmíme překročit je 2A.

3.2 Napájení budícího obvodu

Regulátor R250 je napájen přes pojistky přímo ze svorkovnice statorového vinutí a je připojen paralelně na jedno z vinutí statoru. Protože každé vinutí statoru se skládá ze dvou seriově zapojených vinutí vyvedených na svorkovnici, bude regulátor napájen polovičním napětím tzn. 115 V. Výstupem je stejnosměrné napětí, které připojíme na koncovku XC12.

Parametry regulátoru napětí generátoru:

typ R 250	
Rozsah napájecího napětí	85 až 139V
Jmenovitý proud.....	8A
Přesnost regulace výstupního napětí generátoru.....	$\pm 0.5\%$



Obr. 6 Způsob napájení R250 z vinutí statoru. Obrázek vychází z [2].

Druhý způsob napájení je pomocí externího zdroje Statron, který je napájen ze sítě 230 V. Jeho výstup připojíme na koncovku XC12. Na výstupu Statronu získáme stejnosměrné napětí v rozsahu 0 - 48 V.

Parametry stabilizovaného zdroje stejnosměrného napětí a proudu:

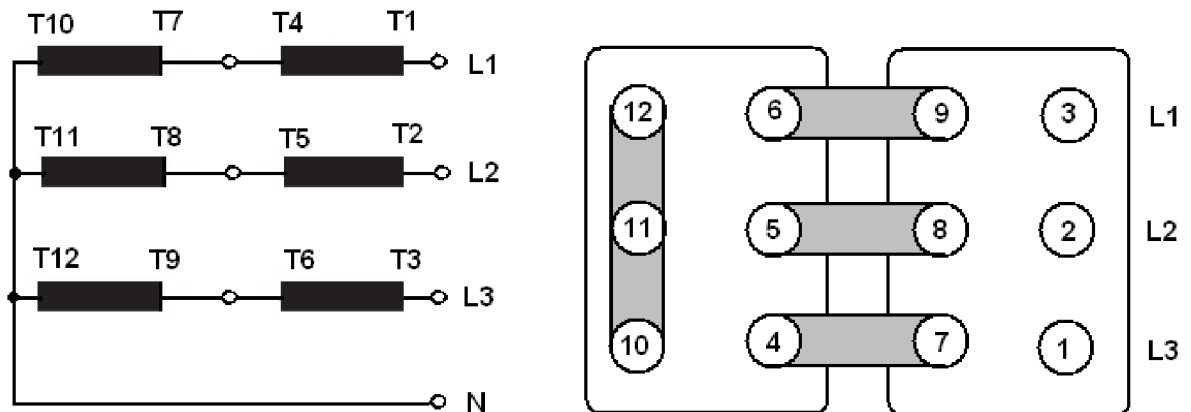
typ STATRON 2224.2	
Příkon	300W
Rozsah výstupního napětí	0 až 48V
Rozsah výstupního proudu	0 až 3.5A

Veškeré parametry jsou čerpány z [2].

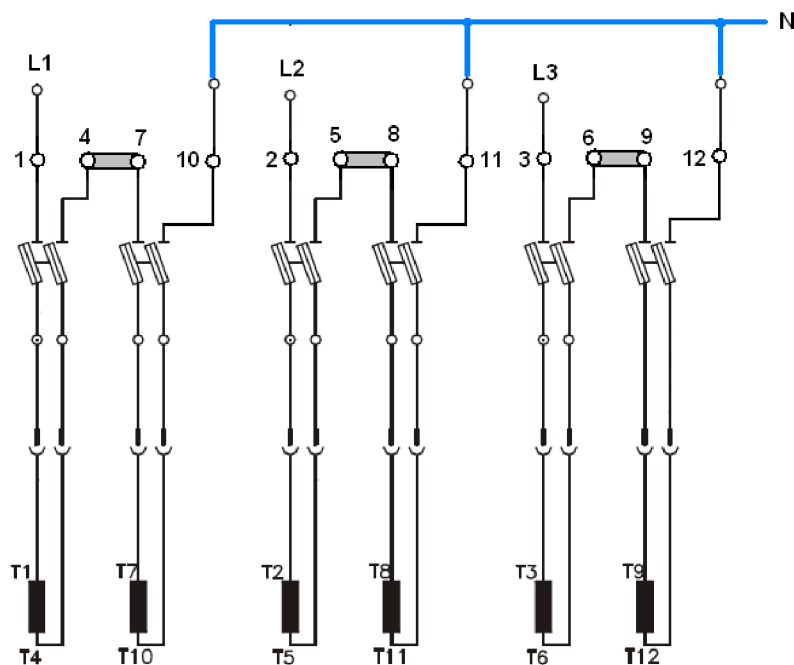
3.3 Zapojení vinutí statoru

Kotva má celkem šest cívek. Je několik možností, jak je lze zapojit. Například do hvězdy s vinutími v serií nebo do hvězdy s vinutími zapojenými paralelně. Další možností je zapojení do trojúhelníku s vinutími v serií nebo paralelně.

U našeho alternátoru LSA 37 je vinutí kotvy zapojeno do hvězdy vždy se dvěma vinutími v serií. Zapojení svorkovnice je na obrázku 7.



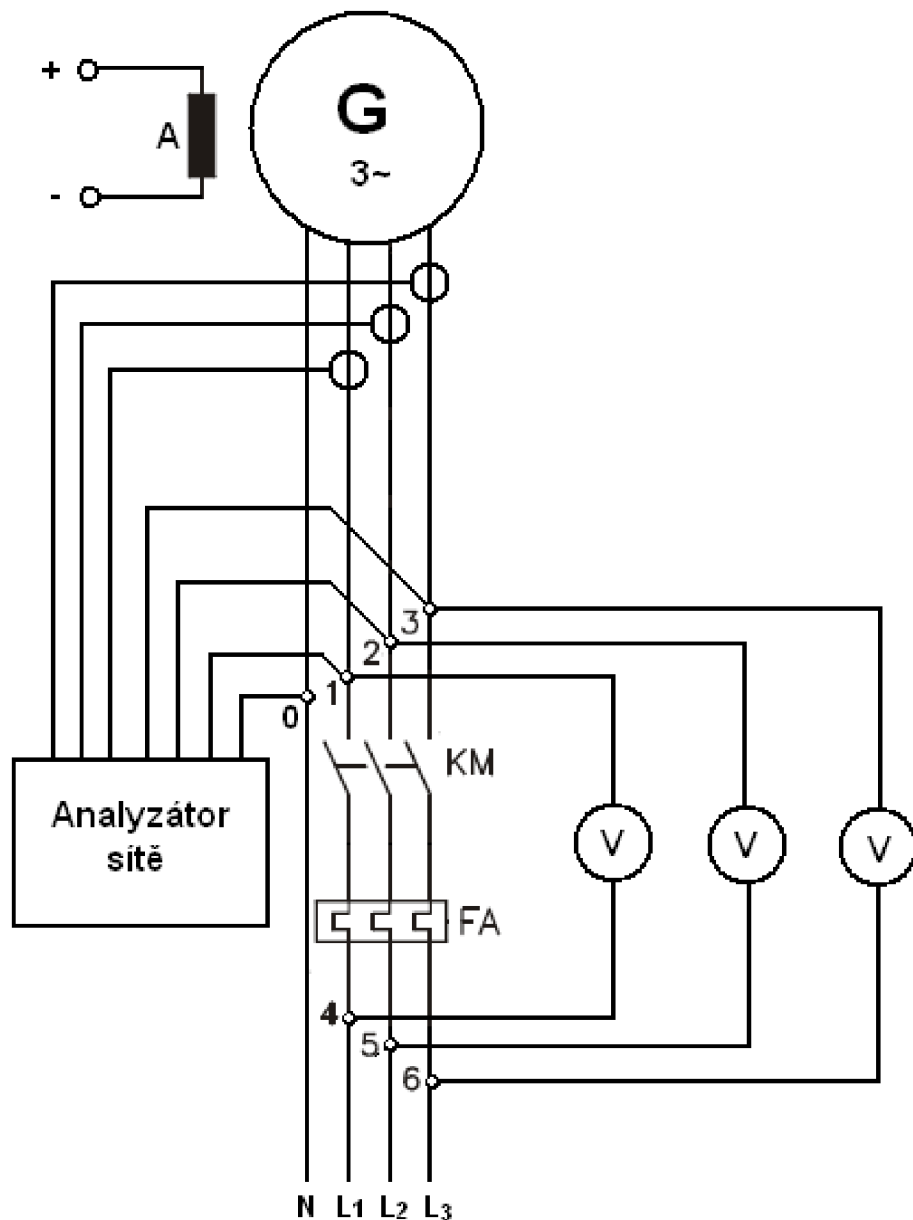
Obr. 7 Schéma zapojení vinutí a svorkovnice



Obr. 8 Zapojení statorového vinutí

3.4 Zapojení pracoviště

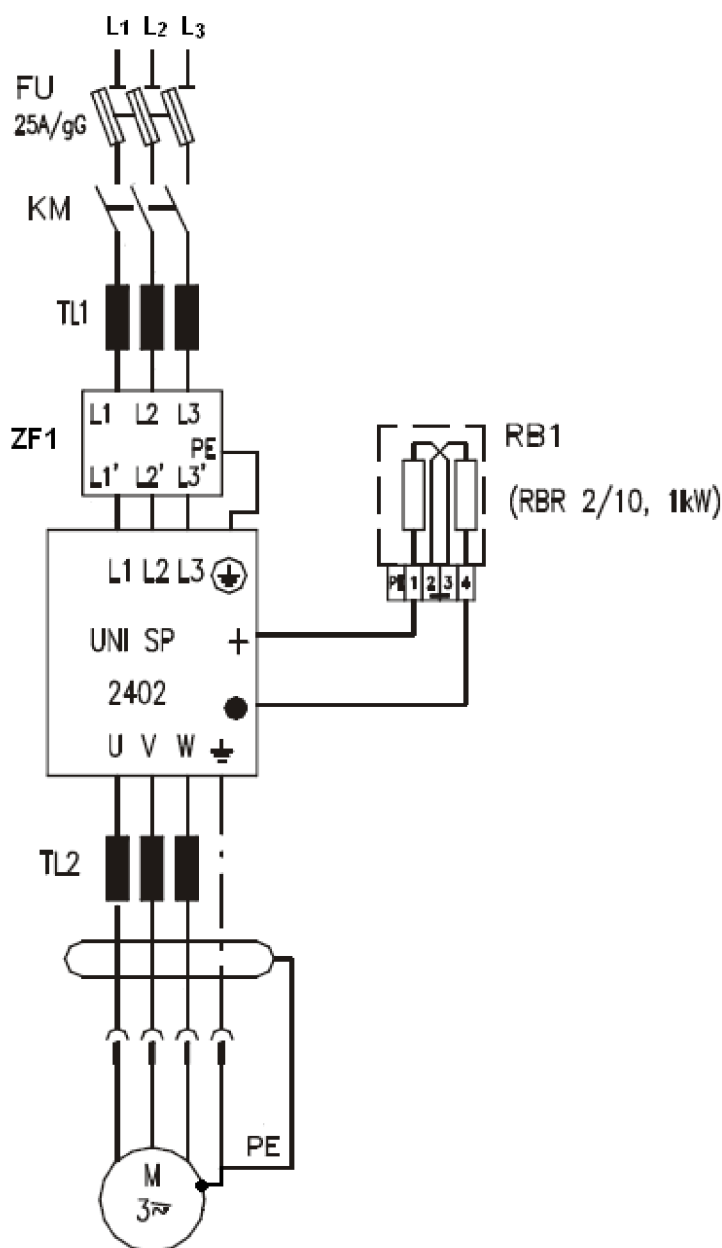
Generátor je připojen k síti přes stykač zátěže a tepelnou ochranu. Fázovací voltmetry jsou v každé fázi mezi sítí a alternátorem. Voltmetr na fázi L1 se připojí mezi svorky 1 a 4. Voltmetr pro fázi L2 zase na svorky 2 a 5. A voltmetr fáze L3 je na svorkách 3 a 6. Analyzátor sítě měří proud pomocí klešťových ampérmetrů. Pro měření napětí na kotvě generátoru jsou připojeny ještě z analyzátoru vodiče na svorky 0, 1, 2 a 3. Napájení buzení je provedeno zdrojem stabilizovaného stejnosměrného napětí Statron.



Obr. 9 Základní zapojení pracoviště

3.5 Zapojení asynchronního motoru

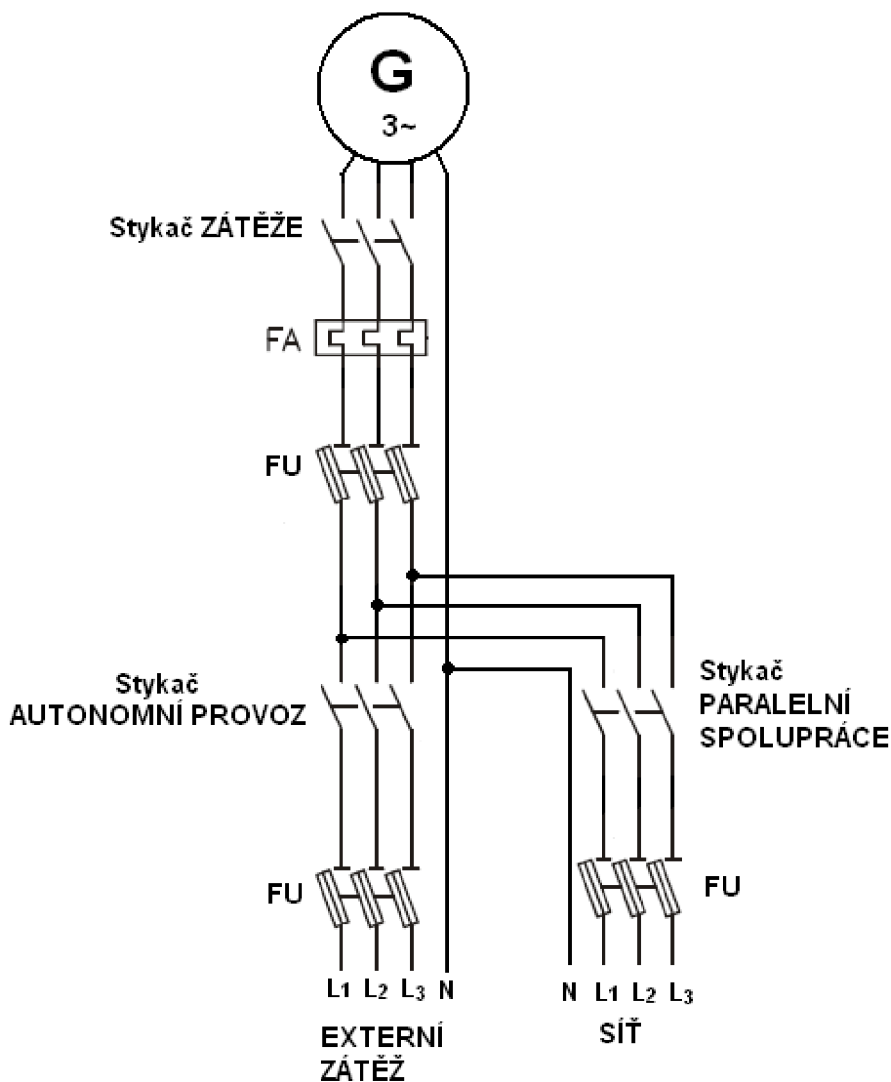
Asynchronní motor je napájen ze sítě 400 V. Je připojen přes pojistky a stykač, který lze ovládat tlačítkem na skříni rozvaděče. TL1 jsou vstupní neboli síťové tlumivky, které se zapojují mezi síť a frekvenční měnič. Jejich hlavním úkolem je omezit vliv vyšších harmonických frekvencí frekvenčního měniče na síť. Další výhodou vstupních tlumivky je, že potlačuje proudové špičky, deformaci napájecího napětí a krátkodobé síťové přepětí. ZF1 je odrušovací filtr. Uni SP je frekvenční měnič, kterým lze regulovat rychlost otáčení i moment asynchronního motoru. RB1 je brzdový rezistor, který slouží k maření energie vrácené při dynamickém brždění neboli rekuperaci. TL2 je motorová tlumivka, která se zapojuje mezi frekvenční měnič a asynchronní motor, což je nejbližší k frekvenčnímu měniči. Slouží k omezení rušivých napětí a omezení vlivu kapacity dlouhých kabelů na frekvenční měnič.



Obr. 10 Zapojení asynchronního motoru přes frekvenční měnič. Obrázek je čerpán z [2].

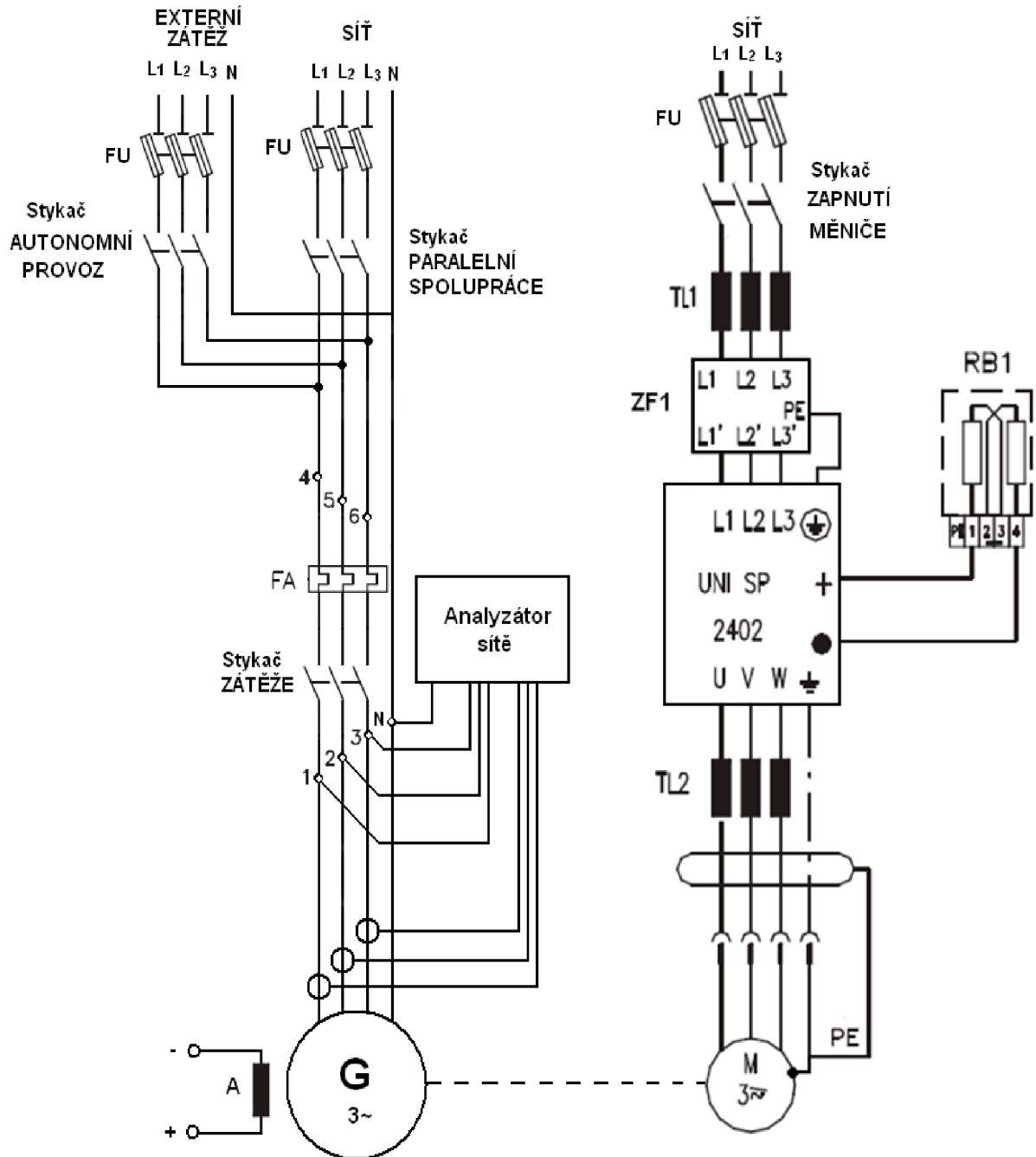
3.6 Základní ovládání soustrojí

Generátor lze provozovat se dvou základních režimech. Prvním z nich je autonomní provoz, což znamená, že generátor pracuje v ostrovním režimu do externí zátěže. Při tomto režimu není připojen k síti. Druhým režimem je paralelní spolupráce, jenž je určena pro práci generátoru sítě. Postup při spouštění začíná výběrem režimu, ve kterém chceme aby generátor pracoval. Pokud přepínač nastavíme na volbu „PARALELNÍ SPOLUPRÁCE“ je potřeba ještě vedlejší přepínač nastavit na polohu „MOMENT“. Naopak pokud zvolíme variantu „AUTONOMNÍ PROVOZ“ musíme na přepínači nastavit volbu „RYCHLOST“. Teprve potom se doporučuje zapnout hlavní vypínač na skříní rozvaděče. Poté stiskneme tlačítko „zapnutí měniče“ po asi 5 vteřinách je možné stisknout tlačítko „START“, který uvede do chodu asynchronní motor. Tlačítkem „STYKAČ ZÁTĚŽE“ se generátor připojí k zátěži případně k síti. V případě paralelní spolupráce je nutné provést fázování k síti. Při vypínání se v obou případech postupuje následovně. Vypneme tlačítko „STYKAČ ZÁTĚŽE“ a poté stiskneme tlačítko „STOP“ a nakonec vypnutí frekvenčního měniče znovu tlačítkem „ZAPNUTÍ MĚNIČE“.



Obr. 11 Schéma zapojení pro přepínání režimů

3.7 Celkové základní schéma silových obvodů



Obr. 12 Zapojení silových obvodů

4 MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU

4.1.1 Charakteristika naprázdno:

Charakteristika naprázdno je závislost napětí kotvy na budícím proudu. Vyjadřuje magnetické vlastnosti stroje, proto se jí také říká magnetizační charakteristika. Kdyby alternátor neměl feromagnetické jádro, magnetizační charakteristika by byla lineární po celé délce ale s podstatně menším sklonem. V případě feromagnetického jádra se projevuje vliv elementárních magnetů ve feromagnetiku. Tyto elementární magnety, které byly uspořádané neuspořádaně, se natačejí ve směru vnějšího magnetického pole s tím, že velikost natočení závisí na intenzitě vnějšího magnetického pole. Vektorově se sčítá vnější magnetické pole s magnetickým polem natočených elementárních magnetů, a tím se celkové magnetické pole zvýší. S rostoucím budícím proudem je charakteristika nejprve strměji lineární. Délka této přímkové části závisí na masivitě feromagnetického jádra. Od určité hodnoty se začne postupně zaoblovat a potom už bude zase lineární, ale s daleko menší strmostí, protože jádro je plně nasyceno a elementární magnety už jsou všechny natočeny ve směru vnějšího magnetického pole.

Charakteristika naprázdno se měří při nezatíženém alternátoru. Otáčky musí být takové, aby napětí mělo jmenovitou frekvenci.

Postup měření:

- 1) Zapojíme obvod podle schématu.
- 2) Měníme otáčky poháněcího motoru tak, aby frekvence napětí kotvy byla 50 Hz.
- 3) Budící proud nastavíme na hodnotu, aby na svorkách kotvy bylo jmenovité napětí.
- 4) Postupně po krocích snižujeme budící proud a pro každou hodnotu odečteme napětí na svorkách kotvy.

Ačkoliv napětí snížíme až na nulovou hodnotu, tak napětí na svorkách kotvy nebude nulové, což je způsobeno remanentním zbytkovým magnetismem, což je způsobeno tím, že elementární magnety sice vrátili do neuspořádaných poloh, ale ne tak dobře, aby se jejich magnetická pole navzájem úplně vyloučila.

4.1.2 Charakteristika nakrátko:

Charakteristika nakrátko je závislost proudu kotvy na budícím proudu. Tvar charakteristiky je lineární po celé délce a nezaoblí se tak jako se zaoblila charakteristika naprázdno. To je způsobeno tím, že magnetický tok vytvořený proudem kotvy působí proti magnetickému toku budícího vinutí, a tak s rostoucím budícím proudem roste lineárně i proud kotvou. Sklon charakteristiky v poměrných jednotkách je dán synchronní reaktancí nebo její převrácenou hodnotou, což je zkratový poměr.

Charakteristika nakrátko se měří při zkratované kotvě alternátoru. Otáčky rotoru musí být takové, aby indukované napětí mělo jmenovitou frekvenci.

Postup měření:

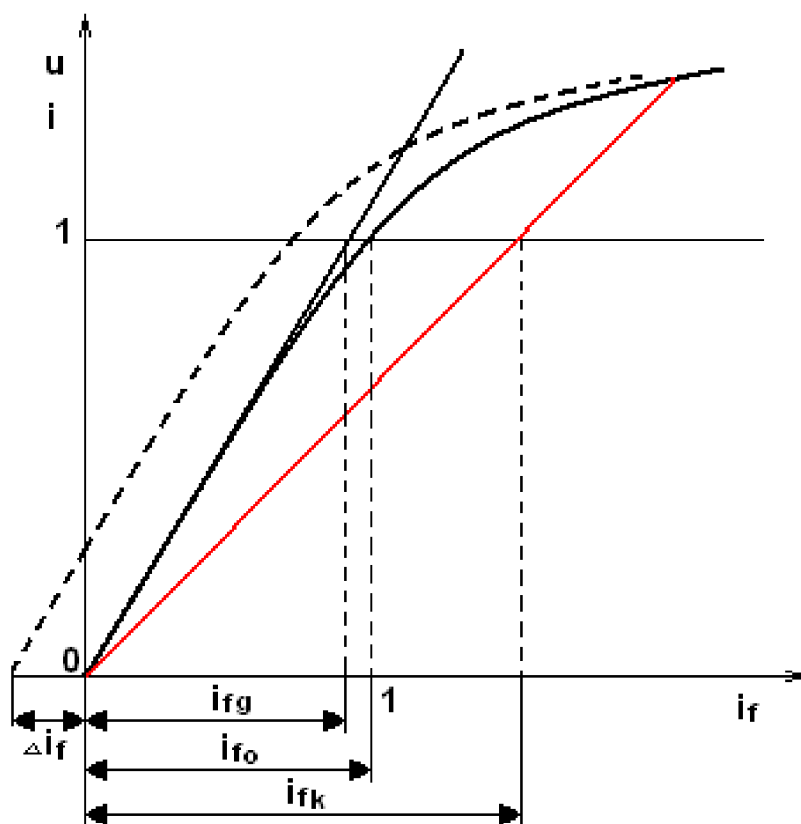
- 1) Zapojíme obvod podle schématu.
- 2) Měníme otáčky poháněcího motoru tak, aby frekvence byla 50 Hz.
- 3) Budící proud nastavíme na hodnotu, aby na svorkách kotvy bylo jmenovité napětí.
- 4) Postupně po krocích snižujeme budící proud a pro každou hodnotu odečteme napětí na svorkách kotvy.

4.1.3 Určení synchronní reaktance X_d měřením:

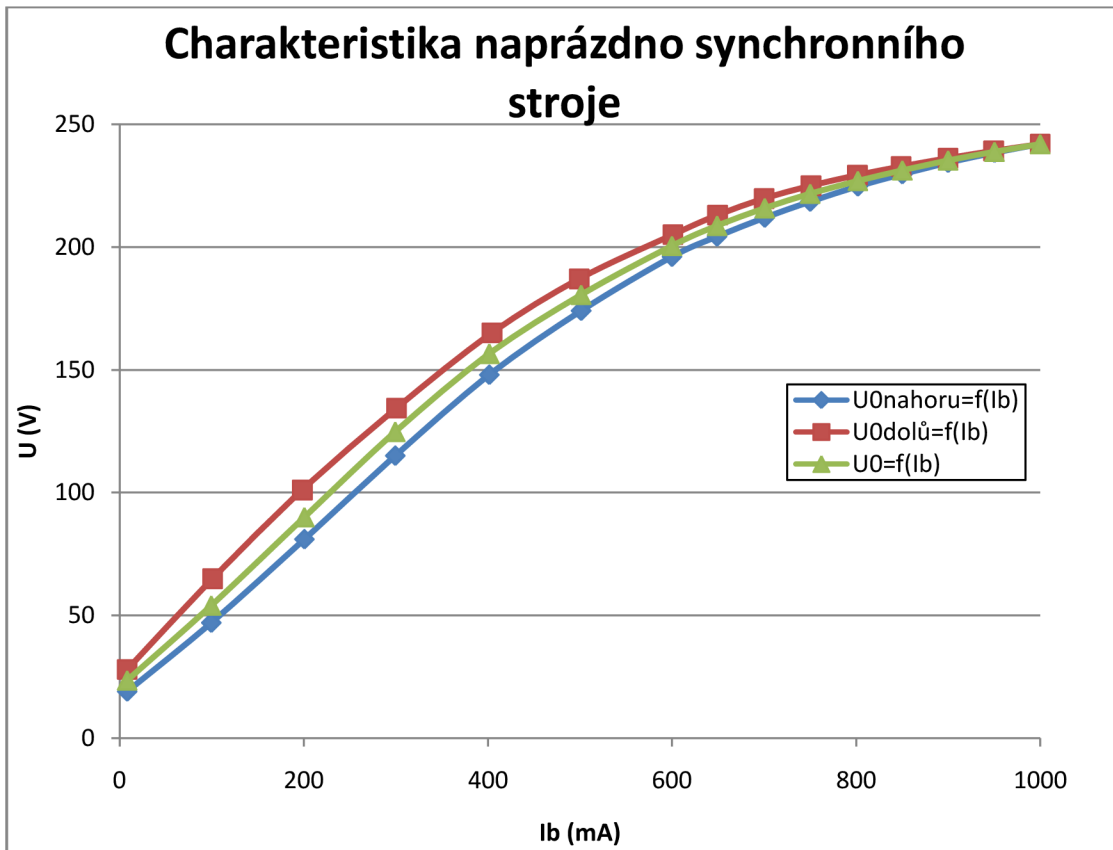
Synchronní reaktanci můžeme určit graficky z charakteristik naprázdno a nakrátko, které se umístí do společného grafu v poměrných jednotkách. Nejdřív však musíme provést korekci charakteristiky naprázdno, protože její počátek vlivem remanentního magnetismu nezačíná v nule.

$$x_d = \frac{i_{fk}}{i_{fg}} \quad (4.1)$$

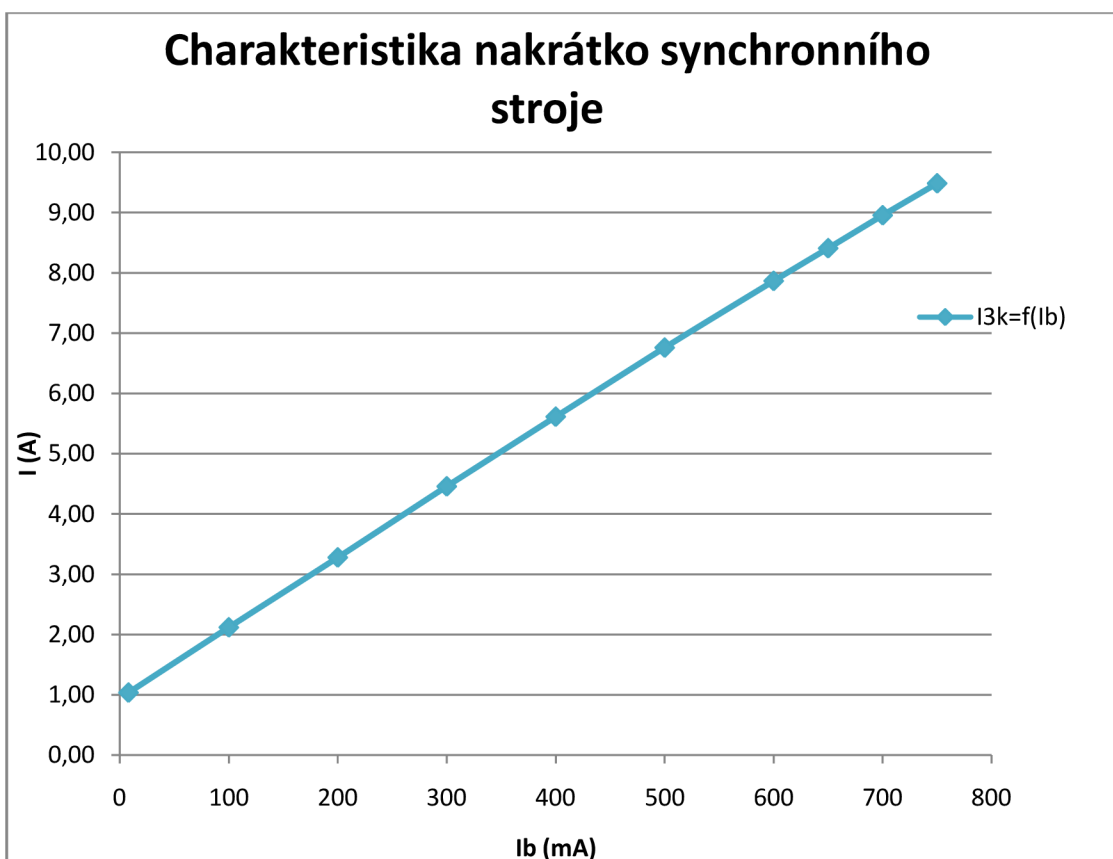
Kde i_{fk} je budící proud při jmenovitém proudu kotvy. A i_{fg} je budící proud při jmenovitém napětí kotvy. [1]



Obr. 13 Charakteristiky naprázdno a nakrátko. Obrázek vychází z [1].

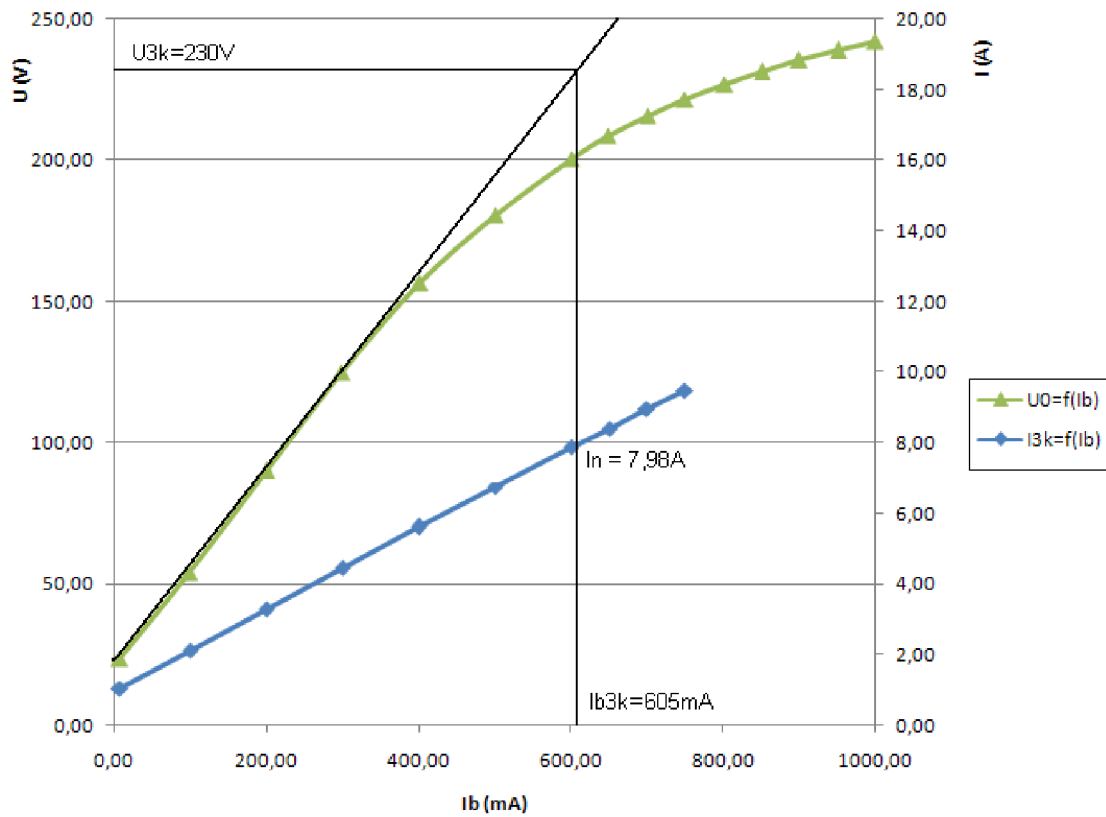


Obr. 14 Charakteristika naprázdno



Obr. 15 Charakteristika nakrátko

Charakteristika naprázdno a nakrátko synchronního stroje



Obr. 16 Určení X_d pomocí charakteristik naprázdno a nakrátko

$$X_d = \frac{U_{3k}}{I_n} = \frac{230}{7,98} = 28,82 \, \Omega \quad (4.2)$$

$$X_n = \frac{U_n}{I_n} = \frac{230}{10} = 23 \, \Omega \quad (4.3)$$

$$x_d = \frac{X_d}{X_n} \cdot 100 = \frac{28,82}{23} \cdot 100 = 125,3 \, \% \quad (4.4)$$

Štítková hodnota poměrné podélné synchronní reaktance je $x_{dn} = 140 \, \%$ zatímco změřená a vypočtená hodnota je $x_{dn} = 125,3 \, \%$.

Použité vztahy jsou čerpány z [5].

4.1.4 Zkouška se záporným buzením

Je to zkouška, kterou lze zjistit hodnotu příčné synchronní reaktance X_q . Nejprve generátor přifázujeme k síti. Poté postupně snižujeme budící proud až na nulu. Poté obrátíme polaritu buzení a plynule zvyšujeme budící proud, tak dlouho dokud rotor neproklouzne o jednu pólovou rozteč. Během zkoušky se měří napětí kotvy U_r a proud kotvou I_r . Obě hodnoty platí pro okamžik prokluzu rotoru o jednu pólovou rozteč. Příčnou reaktanci vypočítáme ze vztahu:

$$X_q = \frac{U_r}{\sqrt{3} \cdot I_r} \quad (4.5)$$

nebo v poměrných hodnotách:

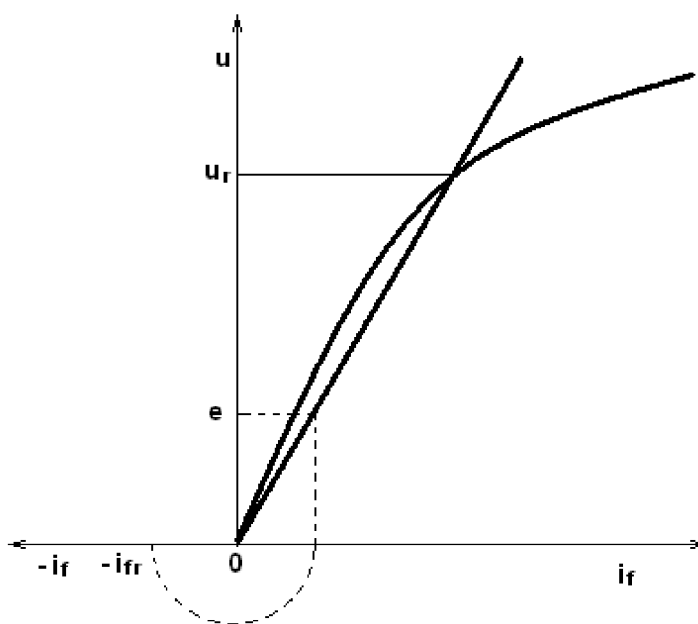
$$x_q = \frac{u_r}{i_r} \quad (4.6)$$

Druhou možností jak určit X_q ze zkoušky se záporným buzením je pomocí charakteristiky naprázdno. Pak lze X_q určit ze vztahu:

$$x_q = (x_d) \cdot \frac{u_r}{u_r + (e_r)} \quad (4.7)$$

kde (e_r) je elektromotorické napětí naprázdno určené pro budící proud v okamžiku proklouznutí rotoru o jednu pólovou rozteč.

(x_d) je podélná synchronní reaktance určená z charakteristiky naprázdno



Obr. 17 Určení "e" z charakteristiky naprázdno pomocí i_{fr} a u_r

Zkoušku se záporným buzením nebylo možné provést, protože u tohoto alternátoru není možné obrátit polaritu budícího napětí kvůli usměrňovači integrovaném v budícím obvodu.

Vztahy (4.5) až (4.7) včetně obrázku 17 jsou čerpány z [1].

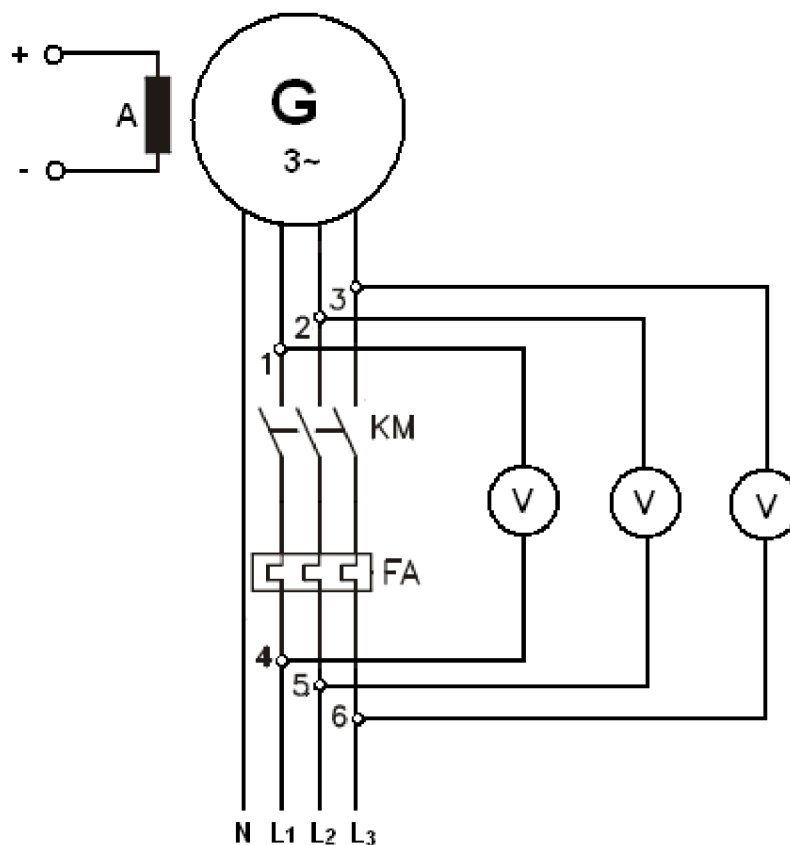
5 FÁZOVÁNÍ ALTERNÁTORU K SÍTI

Chceme-li připojit synchronní generátor k síti musíme zajistit, aby byly splněny tyto podmínky:

- 1) Stejně efektivní hodnoty napětí
- 2) Stejně frekvence
- 3) Stejný sled fází
- 4) Stejně okamžité hodnoty napětí v okamžiku připojení

Nesplnění těchto podmínek znamená, že mezi okamžitými hodnotami napětí generátoru a mezi okamžitými hodnotami sítě bude rozdíl napětí, který vyvolá proudový a momentový ráz, jejichž velikost bude záviset na tom, jak moc nebudou tyto podmínky splněny.

Frekvenci napětí generátoru měníme otáčkami poháněcího motoru. Efektivní hodnotu napětí regulujeme velikostí budícího proudu. Sled fází můžeme změnit prohozením libovolných dvou fázových vodičů kotvy. Pro nalezení vhodného okamžiku připojení alternátoru k síti využíváme toho, že frekvence sítě a generátoru nejsou úplně identické ale je mezi nimi malý rozdíl, což způsobí že v pravidelných časových intervalech jsou na zlomek vteřiny okamžité hodnoty napětí sítě i generátoru stejné. Připojení se provede přesně v okamžik jednoho ze zmíněných časových intervalů. K tomu se používají fázovací žárovky nebo fázovací voltmetry ukazující rozdíl mezi okamžitými hodnotami napětí sítě a generátoru.



Obr. 18 Principiální schéma při fázování. Obrázek vychází z [5].

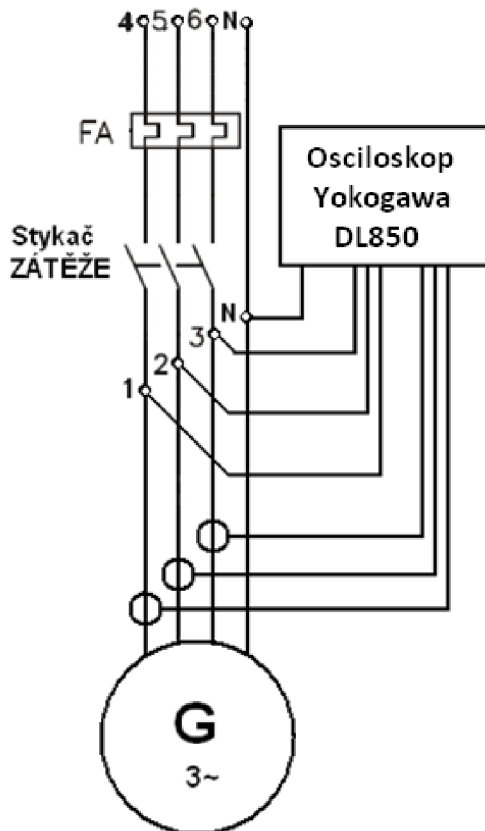
5.1 Přejídný děj při fázování alternátoru k síti

V okamžiku přifázování alternátoru k síti dojde k přejídnému ději. Velikost a průběh proudu při tomto přejídném ději závisí rozdílu na napětí sítě a generátoru, na rozdílu frekvence napětí sítě a generátoru a také na rozdílu okamžitých hodnot napětí v momentě přifázování. Rozdíl okamžitých hodnot napětí v momentě přifázování je ovlivněn okamžikem sepnutí přifázování. Aby byl tento rozdíl co nejmenší, musí se přifázování provést například metodou fázování na tmě, kde se využívá fázovacích žárovek nebo voltmetrů, které měří napětí mezi sítí a výstupem alternátoru pro každou fázi. Pokud je stejný sled fází alternátoru i sítě, tak budou všechny tři žárovky svítit a zhasínat se současně. Rychlost blikání je ovlivněna rozdílem frekvencí sítě a generátoru.

K přifázování alternátoru k síti musíme provést v momentě, kdy jsou všechny žárovky zhasnuté, případně všechny voltmetry ukazují nulové napětí. Tím bude zaručeno, že proud při přejídném jevu nebude příliš velký a tudíž nedojde ani k nebezpečným momentovým rázům generátoru.

5.2 Měření přejídného děje při fázování alternátoru k síti:

K měření a zobrazení přejídného děje při fázování byl použit digitální osciloskop Yokogawa DL850, který byl zapojen do obvodu podle schéma na obrázku 19. Osciloskop tak snímá napětí na straně synchronního generátoru a proud procházející obvodem.



Obr. 19 Zapojení osciloskopu pro měření přejídného děje při fázování

Bylo provedeno celkem pět měření přifázování alternátoru k síti. Přičemž při každém měření byly nastaveny jiné počáteční podmínky. To znamená, že měření bylo provedeno pro různá napětí alternátoru a různé frekvence. Na výstupu osciloskopu lze pak porovnat jednotlivé průběhy napětí a proudu při přechodném jevu během přifázování synchronního generátoru k síti. Před samotnými měřeními bylo provedeno měření napětí U_{sn} a frekvence sítě f_{sn} .

Naměřené hodnoty sítě: $U_{sn} = 226 \text{ V}$, $f_{sn} = 50 \text{ Hz}$

Zvolená měření:

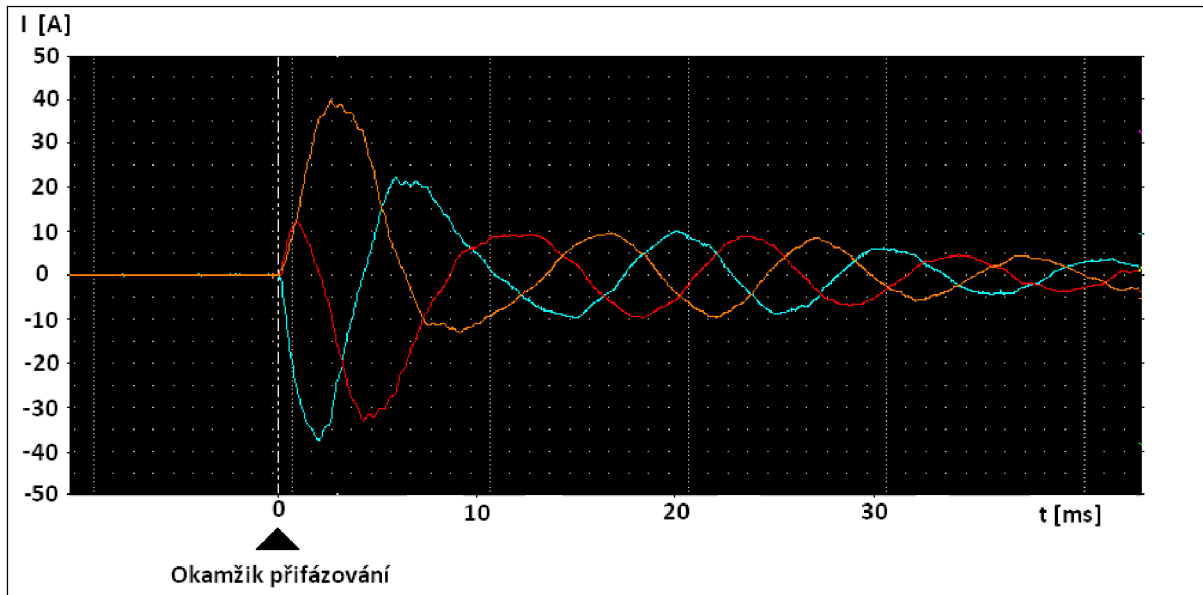
- $U_g = 226 \text{ V}$, $f_g = 50 \text{ Hz}$
- $U_g = 216 \text{ V}$, $f_g = 50 \text{ Hz}$
- $U_g = 236 \text{ V}$, $f_g = 50 \text{ Hz}$
- $U_g = 226 \text{ V}$, $f_g = 49,5 \text{ Hz}$
- $U_g = 226 \text{ V}$, $f_g = 50,5 \text{ Hz}$

Postup:

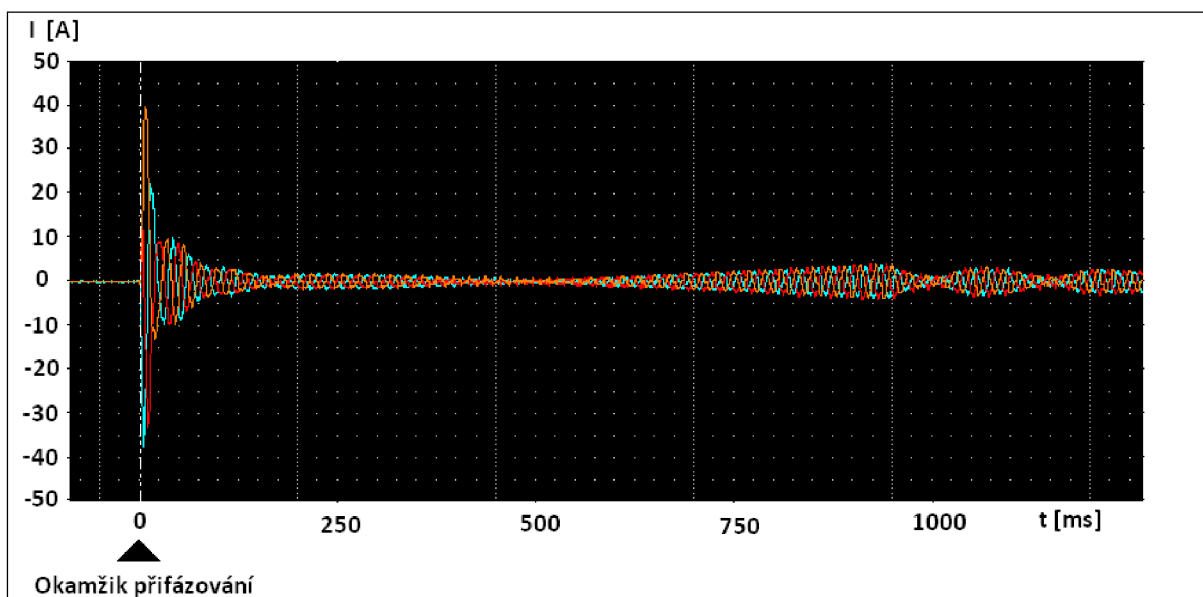
- 1) Zapojení obvodu podle schématu pro fázování.
- 2) Nastavení přepínače 1 na polohu „PARALELNÍ SPOLUPRÁCE“ a přepínače 2 na polohu „MOMENT“.
- 3) Zapnutí hlavního vypínače rozvaděče a následně i zapnutí měniče tlačítkem „ZAPNUTÍ MĚNIČE“.
- 4) Po rozsvícení kontrolky „MĚNIČ READY“ stiskneme tlačítko „START“ a asynchronní motor se tak uvede do pohybu.
- 5) Na ovládacím panelu nastavíme požadovanou frekvenci na výstupu alternátoru.
- 6) Zdrojem napájení budicího obvodu nastavíme požadované napětí na výstupu alternátoru.
- 7) Stiskneme tlačítko START/STOP na osciloskopu, čím osciloskop bude čekat na triggerovací podmínku, která spustí nahrávání přechodného děje.
- 8) Pomocí fázovacích voltmetrů zkontrolujeme splnění podmínek pro fázování.
- 9) Ve správný okamžik tlačítkem „STYKAČ ZÁTĚŽE“ přifázujeme generátor k síti, čím se na osciloskopu zaznamenají průběhy napětí a proudů přechodných jevů.
- 10) Tlačítkem „Save“ na osciloskopu uložíme záznam, který si pak přeneseme do PC
- 11) V programu Yokogawa Xviewer analyzujeme výsledné průběhy proudů a napětí.

5.2.1 $U_g = 226 \text{ V}$, $f_g = 50 \text{ Hz}$

Tento případ by měl být nejpříznivější, protože napětí na výstupu alternátoru i napětí sítě jsou stejné (226 V). Stejně tak i frekvence jsou stejné (50Hz). Na obrázku 20 je vidět průběh proudů všech tří fází v časovém úseku do 40 ms od přifázování alternátoru k síti. Vrcholová hodnota proudu těsně po přifázování dosáhla až 40 A. Na obrázku 21 je průběh proudů pro časový úsek více než jedna vteřina. Na tomto obrázku je patrné výrazné kmitání, které bylo způsobeno ne úplně přesným okamžikem přifázování. Proto i proud byl vyšší než měl být.



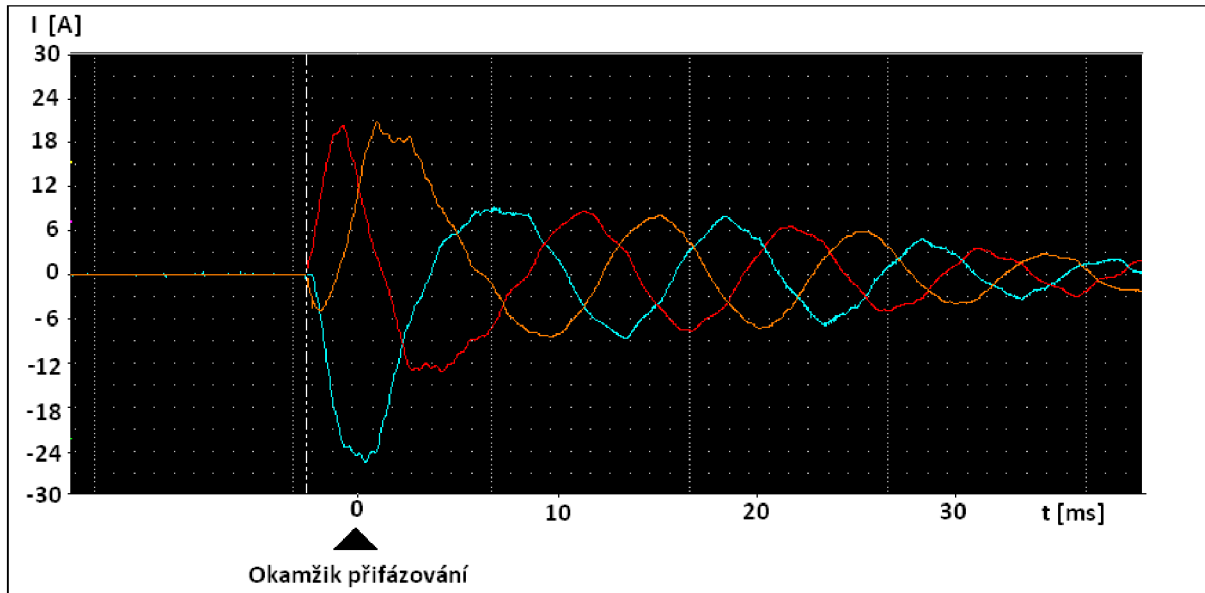
Obr. 20 Průběhy proudů při fázování



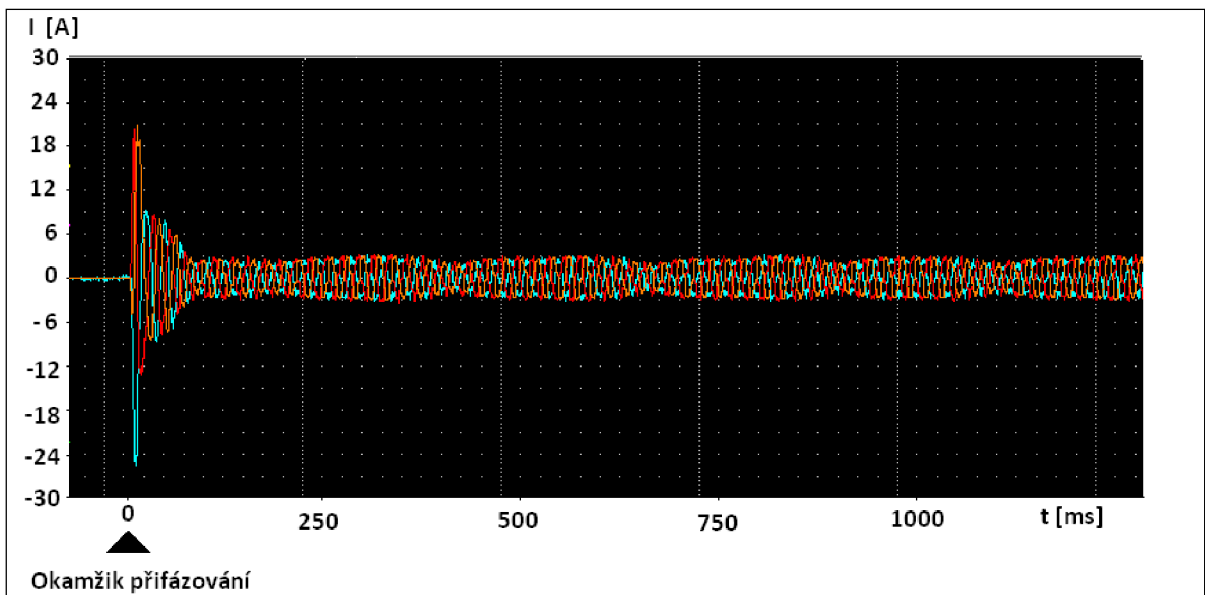
Obr. 21 Průběhy proudů při fázování pro delší časový úsek

5.2.2 $U_g = 216 \text{ V}$, $f_g = 50 \text{ Hz}$

V tomto případě se použilo napětí alternátoru o 10 V nižší zatímco frekvence zůstala stejná. Průběhy proudů jsou zobrazeny na obrázcích 22 a 23. Vrcholová hodnota proudu těsně po přifázování byla v tomto případě menší a to 27 A. Důvodem této skutečnosti ale je to, že okamžik přifázování byl velmi přesný a následné kmity jsou minimální.



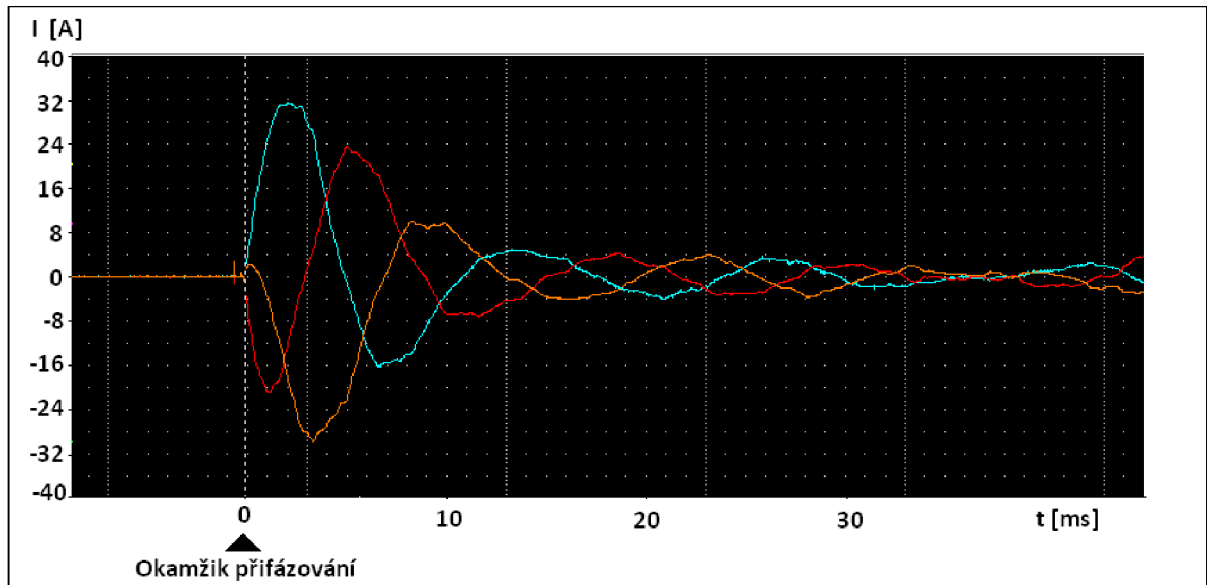
Obr. 22 Průběhy proudů při fázování



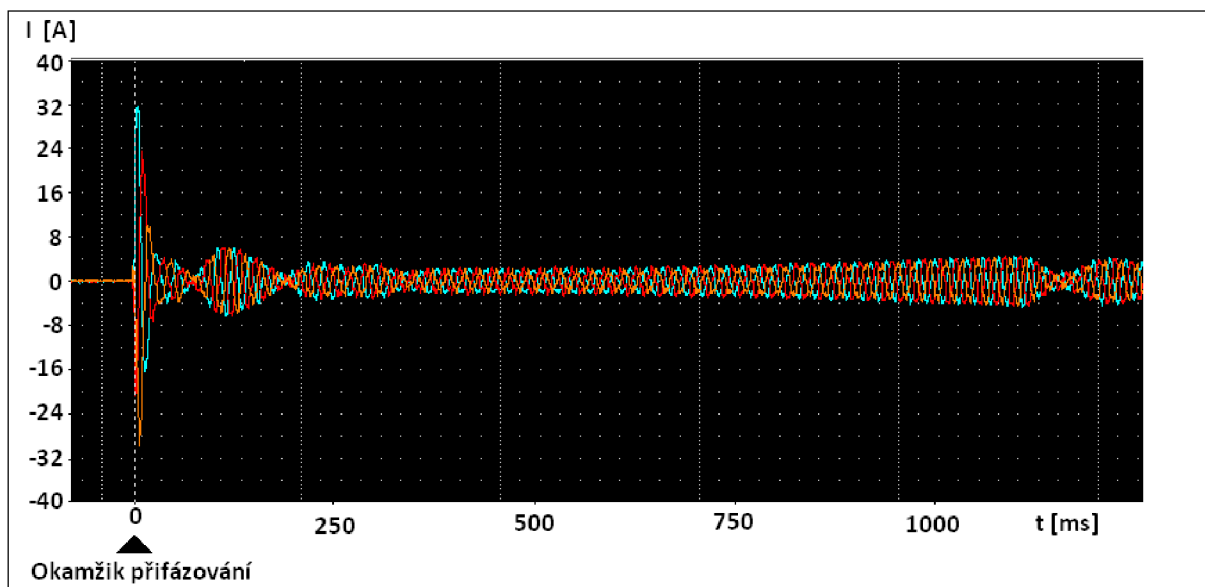
Obr. 23 Průběhy proudů při fázování pro delší časový úsek

5.2.3 $U_g = 236 \text{ V}$, $f_g = 50 \text{ Hz}$

Zde je napětí na výstupu synchronního generátoru o 10 V větší než napětí sítě ale frekvence jsou stejné. Z obrázku 24 je patrné, že okamžik přifázování byl zvolen dobře. Vrcholová hodnota proudu po přifázování byla 32 A.



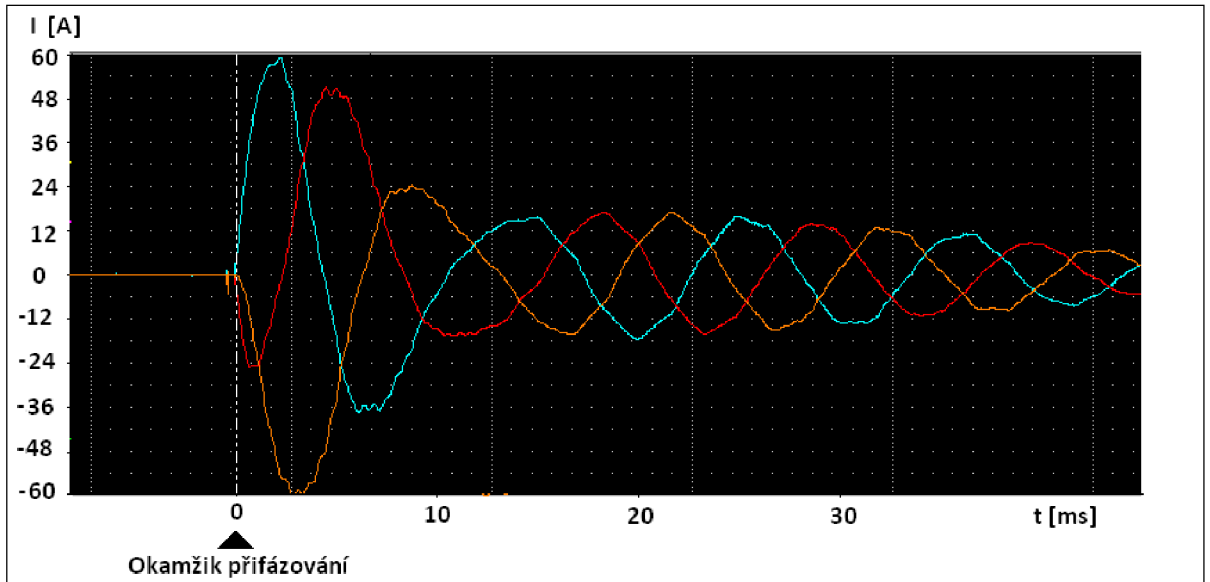
Obr. 24 Průběhy proudů při fázování



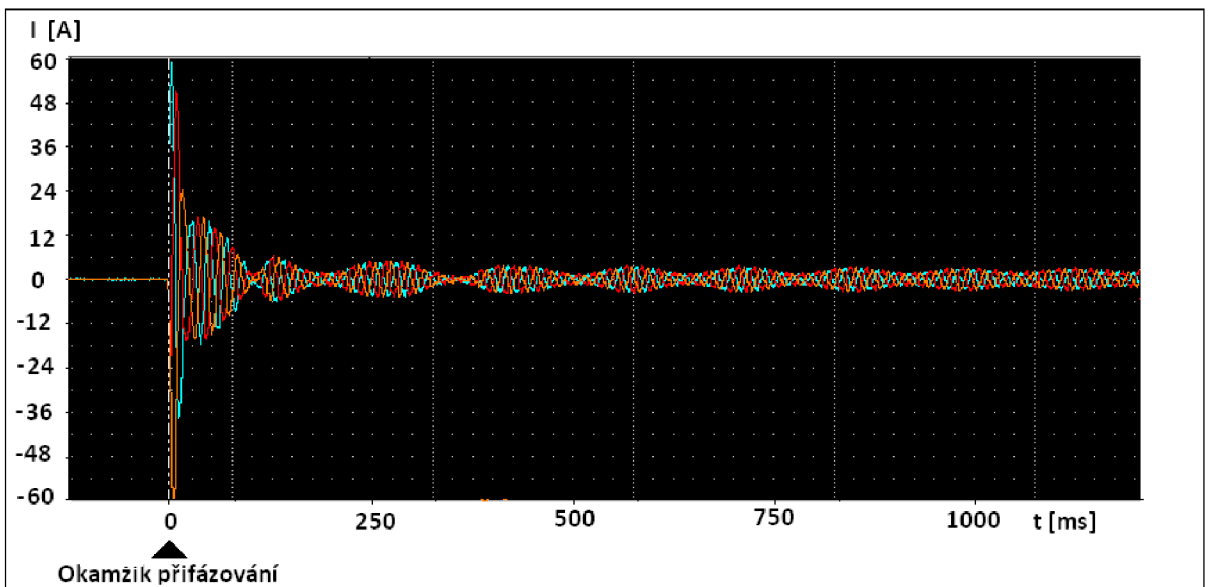
Obr. 25 Průběhy proudů při fázování pro delší časový úsek

5.2.4 $U_g = 226 \text{ V}$, $f_g = 49,5 \text{ Hz}$

Zde jsou napětí alternátoru i sítě stejná, ale liší se frekvence, která je u alternátoru o 0,5 Hz menší než frekvence sítě. Průběhy proudů jsou na obrázku 26. Vrcholová hodnota proudu po přifázování dosáhla až 60 A.



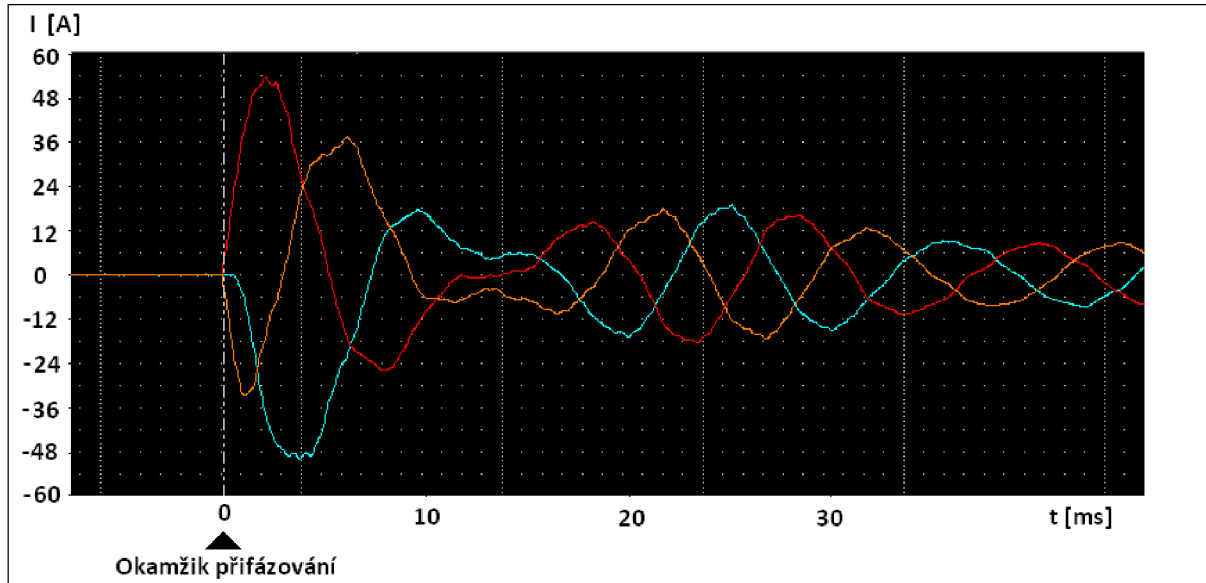
Obr. 26 Průběhy proudů při fázování



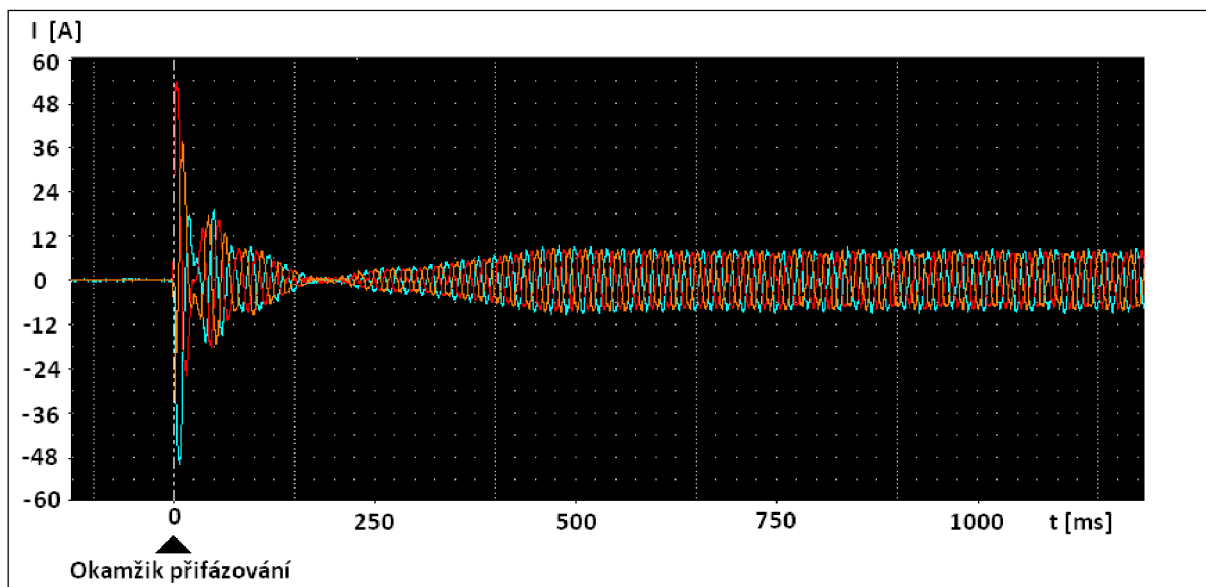
Obr. 27 Průběhy proudů při fázování pro delší časový úsek

5.2.5 $U_g = 226 \text{ V}$, $f_g = 50,5 \text{ Hz}$

V tomto případě jsou napětí sítě i napětí alternátoru stejná ale jejich frekvence se liší a to tak, že frekvence na výstupu alternátoru je o 0,5 Hz vyšší než frekvence sítě. Na obrázku 28 jsou časové průběhy proudů při fázování generátoru k síti. Vrcholová hodnota proudu dosáhla 55 A.



Obr. 28 Průběhy proudů při fázování



Obr. 29 Průběhy proudů při fázování pro delší časový úsek

6 PROVOZNÍ DIAGRAM SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU PRACUJÍCÍHO DO TVRDÉ SÍTĚ

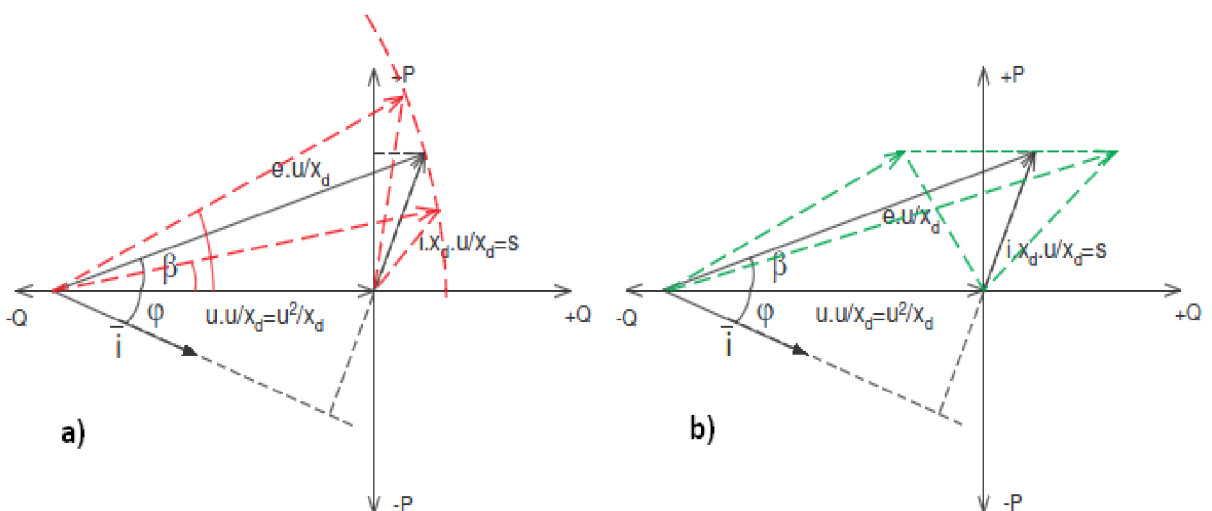
6.1 Princip P-Q diagramu

Napětí a frekvence alternátoru je pevně udržovaná sítí. Změnou momentu poháněcího zařízení se mění výrazně činný výkon P dodávaný do sítě, ale naopak jalový výkon se mění podstatně méně. Situace je zobrazena na obrázku 30a. Za předpokladu konstantního buzení s rostoucím činným výkonem roste i zátěžný úhel δ (na obrázku je označen jako úhel β) ale klesá jalový výkon.

Velikost budícího proudu ovlivňuje velikost vnitřního indukovaného napětí e a tím tedy velikost úsečky, která je na obrázku 30b označena jako $e.u/x_d$. Pokud tedy považujeme budící proud za konstantní pak $e.u/x_d$ bude konstantní. Proto se pracovní bod v diagramu bude při změně poháněcího momentu pohybovat po kružnicové trajektorii.

Jiný případ nastane pokud budeme považovat moment poháněcího stroje za konstantní a budeme měnit jalový výkon. Při změně budícího proudu se bude výrazně měnit jalový výkon zatímco činný výkon se měnit nebude. Při zvyšování budícího proudu roste i velikost úsečky $e.u/x_d$, ale zátěžný úhel δ klesá. Změnou budícího proudu lze pracovní bod alternátor dostat do přebuzené či podbuzené části. Při určité velikosti budícího proudu bude jalový výkon nulový a proud, který poteče kotvou alternátoru bude čistě činný. Při snížení budícího proudu bude generátor odebírat ze sítě jalový výkon. Čím nižší budící proud bude, tím větší jalový proud poteče ze sítě do alternátoru. Naopak pokud bude budící proud vyšší než zmíněná velikost bude alternátor v přebuzeném stavu a to tedy znamená že bude do sítě dodávat jalový výkon. Tento výkon bude tím větší, čím větší bude budící proud.

Situace je načrtnuta na obrázku 30. Pracovní bod se při změně buzení pohybuje po vodorovné přímce, jelikož se činný výkon dodávaný do sítě nemění. Pokud se nechází pracovní bod synchronního generátoru na levé straně diagramu od svislé osy, tak generátor odebírá ze sítě jalový výkon. Pokud se nachází na pravé polovině, tak výkon do sítě dodává.



Obr. 30 P-Q diagramy synchronního generátoru. Obrázky pochází z [4].

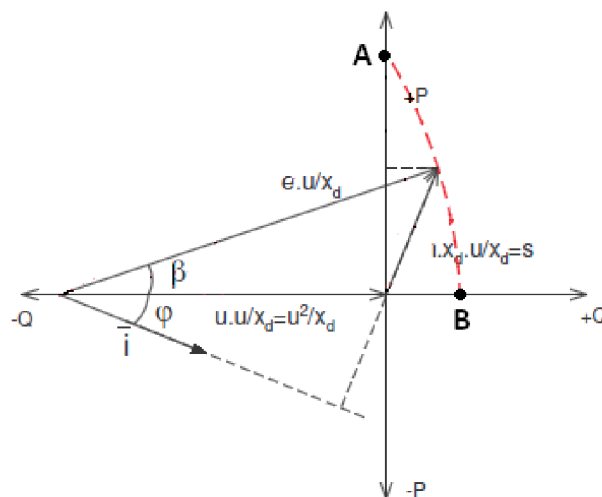
6.2 Měření P-Q charakteristik

6.2.1 Měření vlivu změny momentu na polohu pracovního bodu v P-Q diagramu:

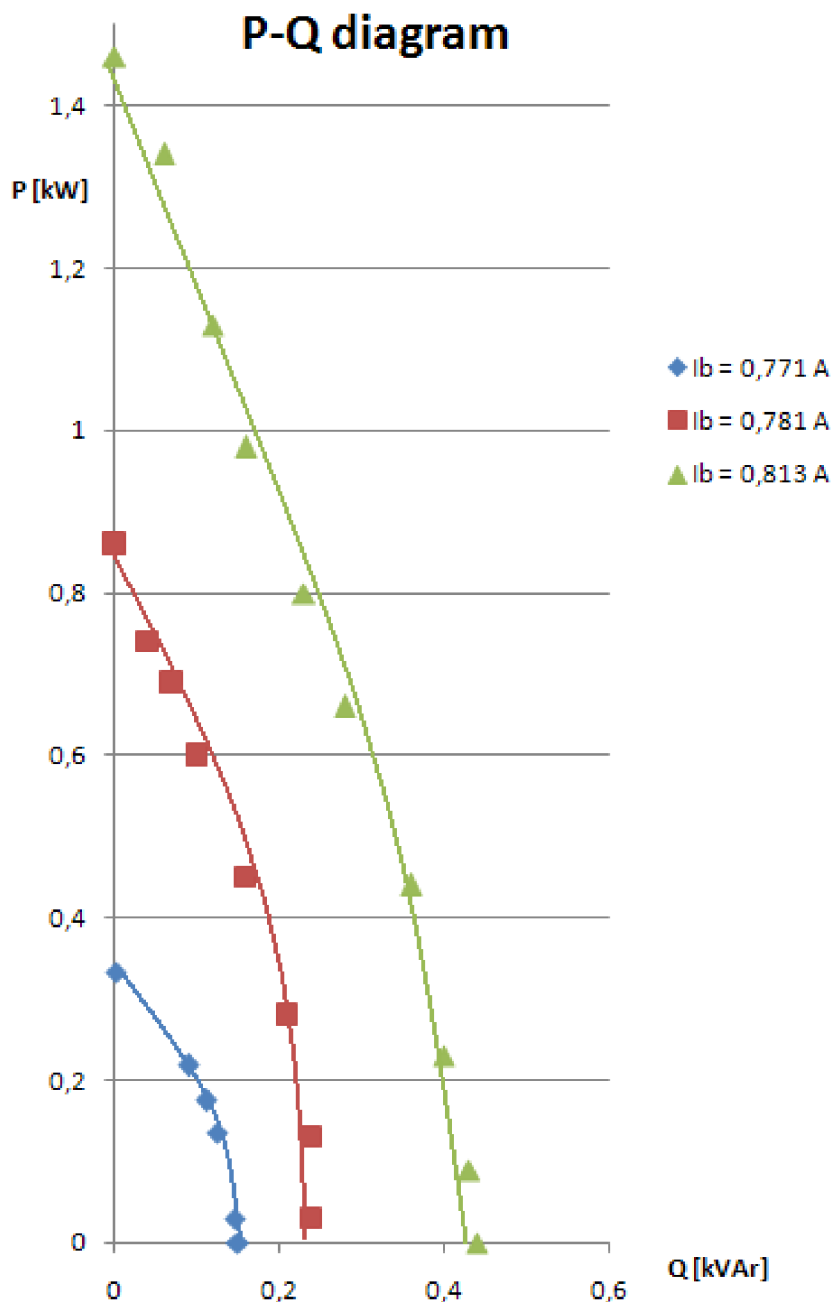
Skutečnosti napsané na předchozí stránce si zkusíme ověřit měřením. U přifázovaného alternátoru k síti budeme postupně měnit moment jeho poháněcího stroje a současně měřit činné a jalové výkony dodávané do sítě. Budeme tak měřit pozice pracovních bodů v P-Q diagramu při změnách výkonu poháněcího stroje při konstantním buzení. Výsledkem by měla být část kružnice, která je zakreslena červeně čárkovaně na obrázku 31.

Postup:

- 1) Zapojení obvodu podle schématu.
- 2) Nastavení přepínače 1 na polohu „PARALELNÍ SPOLUPRÁCE“ a přepínače 2 na polohu „MOMENT“.
- 3) Zapnutí hlavního vypínače rozvaděče a následně i zapnutí měniče tlačítkem „ZAPNUTÍ MĚNIČE“.
- 4) Po rozsvícení kontrolky „MĚNIČ READY“ stiskneme tlačítko „START“ a asynchronní motor se tak uvede do pohybu.
- 5) Na ovládacím panelu nastavíme požadovanou frekvenci na výstupu alternátoru.
- 6) Zdrojem napájení budícího obvodu nastavíme napětí na výstupu alternátoru tak, aby bylo nepatrně větší jako napětí sítě zhruba o 3 V.
- 7) Pomocí fázovacích voltmetrů zkontrolujeme splnění podmínek pro fázování.
- 8) Ve správný okamžik tlačítkem „STYKAČ ZÁTĚŽE“ přifázujeme generátor k síti.
- 9) Pomocí potenciometru označeného jako „MOMENT“ nastavíme zvolený výkon poháněcího motoru.
- 10) Pomocí zdroje buzení nastavíme takový budící proud, aby jalový výkon synchronního generátoru byl roven nule. Tím se na pracovní charakteristice dostaneme do bodu A.
- 11) Po zvolených krocích zmenšujeme moment poháněcího stroje a zaznamenáváme činný a jalový výkon alternátoru.
- 12) Měření končí až se přiblížíme k bodu B na pracovní charakteristice.



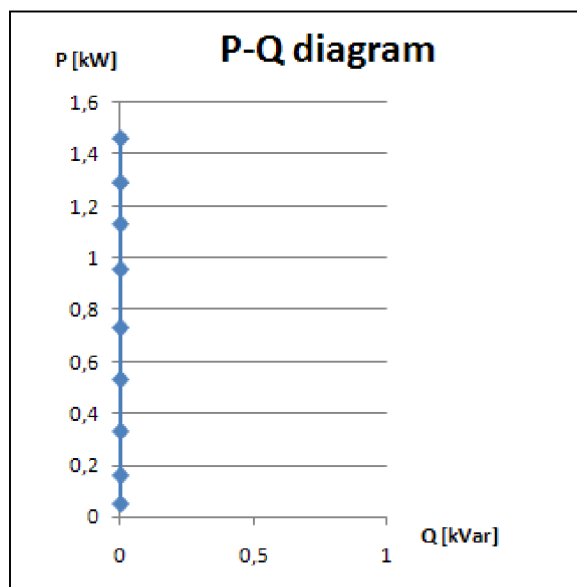
Obr. 31 Trajektorie pohybu pracovního bodu při změně momentu. Obrázek vychází z [4].



Obr. 32 Naměřené hodnoty polohy pracovního bodu

Na obrázku 32 vidíme výsledný graf P-Q diagramu synchronního generátoru pro tři různé budící proudy. Je patrné, že tvar křivek se blíží části kružnice, tak jak je to znázorněno na obrázku 31. Za předpokladu konstantního budícího proudu s klesajícím momentem poháněcího stroje klesá do sítě dodávaný činný výkon výrazně, ale jalový výkon roste jen málo. Naměřené charakteristiky souhlasí s teoretickými.

Nyní zkusíme jinou situaci a to takovou, že nebudeme budící proud považovat konstantní, ale naopak budící proud regulovat tak, aby jalový výkon byl vždy nulový. To znamená, že při každé změně momentu poháněcího stroje změníme ručně budící proud. Pracovní bod se tak nebude pohybovat po kružnicové dráze, ale bude se pohybovat po svislé přímkové dráze.



Obr. 33 Naměřené hodnoty polohy pracovního při změnách budícího proudu

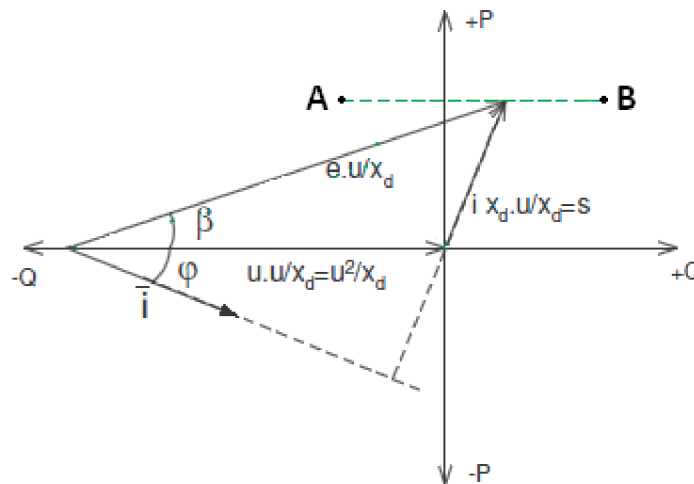
6.2.2 Měření vlivu změny budícího proudu na polohu pracovního bodu v P-Q diagramu

U přifázovaného alternátoru k elektrické síti budeme měnit budící proud a měřit činný i jalový výkon dodávaný či odebíraný ze sítě. Předpokladem k měření je konstantní moment poháněcího motoru. Pracovní bod na pracovní charakteristice by se měl pohybovat pohybovat po vodorovné přímce, která je zakreslena na obrázku 34 zelenou čárkovanou čarou.

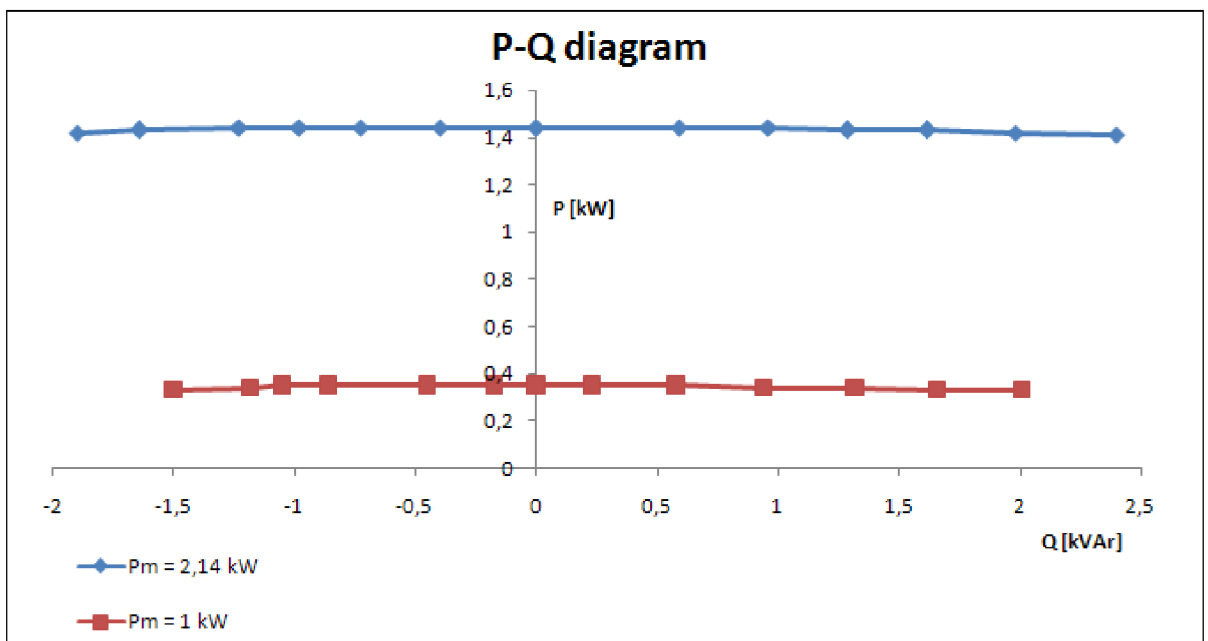
Postup:

- 1) Zapojení obvodu podle schématu.
- 2) Nastavení přepínače 1 na polohu „PARALELNÍ SPOLUPRÁCE“ a přepínače 2 na polohu „MOMENT“.
- 3) Zapnutí hlavního vypínače rozvaděče a následně i zapnutí měniče tlačítkem „ZAPNUTÍ MĚNIČE“.
- 4) Po rozsvícení kontrolky „MĚNIČ READY“ stiskneme tlačítko „START“ a asynchronní motor se tak uvede do pohybu.
- 5) Na ovládacím panelu nastavíme požadovanou frekvenci na výstupu alternátoru.
- 6) Zdrojem napájení budícího obvodu nastavíme napětí na výstupu alternátoru tak, aby bylo nepatrně větší jako napětí sítě zhruba o 3 V.
- 7) Pomocí fázovacích voltmetrů zkontrolujeme splnění podmínek pro fázování.
- 8) Ve správný okamžik tlačítkem „STYKAČ ZÁTĚŽE“ přifázujeme generátor k síti.

- 9) Pomocí potenciometru označeného jako „MOMENT“ nastavíme zvolený výkon poháněcího motoru.
- 10) Pomocí zdroje buzení nastavíme takový budící proud, aby byl alternátor podbuzený. Tím se na pracovní charakteristice dostaneme do bodu A. (Ten si zvolíme libovolně)
- 11) Po zvolených krocích zvětšujeme budící proud a zaznamenáváme činný a jalový výkon alternátoru.
- 12) Měření končí až se přiblížíme k bodu B na pracovní charakteristice.



Obr. 34 Trajektorie pohybu pracovního bodu při změně budícího proudu. Obrázek vychází z [4].



Obr. 35 Naměřené hodnoty při změně budícího proudu

Na výsledném diagramu je znázorněno jak se měnil pracovní bod při změně budícího proudu synchronního generátoru. Činný výkon dodávaný do sítě se téměř neměnil zatímco jalový výkon se měnil výrazně.

7 ZKRAT ALTERNÁTORU

7.1 Zkouška náhlým trojfázovým zkratem

Podle normy ČSN EN 60034-4 zkoušku náhlým trojfázovým zkratem provádíme při jmenovitých otáčkách, což je v našem případě 1500 ot/min. K vykrácení vinutí musí dojít u všech tří fází současně. Zkrat by musí nastat z chodu alternátoru naprázdno. Jako budič se má použít typ s cizím buzením. Pro snímání proudů použijeme proudové sondy, které se připojí k osciloskopu.

Záznamy průběhu zkratového proudu by se měly provádět s dobou trvání alespoň $3\tau'_d$ po vykrácení. Pro dosažení veličin odpovídajících nenasyčenému stavu stroje se zkouška provádí při několika napětích kotvy, která jsou 0,1 až 0,4 násobkem jmenovité hodnoty. Pro dasžení veličin odpovídajících nasycenému stavu stroje se zkouška provede se jmenovitým napětím na svorkách stroje před vykrácením kotvy. Pokud zkouška náhlým zkratem nemůže být provedena při jmenovitém napětí kotvy, doporučuje se provedení zkoušek při několika napětích kotvy (například 30 %, 50 % a 70 % jmenovitého napětí kotvy) a určení veličin pro každou zkoušku samostatně. Veličiny se potom vynesou v závislosti na napětí naprázdno před zkratem a přibližně hodnota veličiny při jmenovitém napětí kotvy se získá metodou extrapolace. [1]

Ze zkoušky náhlým trojfázovým zkratem lze vypočítat:

$$X'_d = \frac{U(0)}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{[I(\infty) + \Delta I'_k(0)]} \quad (7.1)$$

$$X''_d = \frac{U(0)}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{[I(\infty) + \Delta I'_k(0) + \Delta I''_k(0)]} \quad (7.2)$$

kde:

$U(0)$ je napětí naprázdno měřené bezprostředně před zkratem

X'_d , X''_d jsou přechodná a rázová podélná reaktance

$I(\infty)$ je ustálená hodnota proudu nakrátko

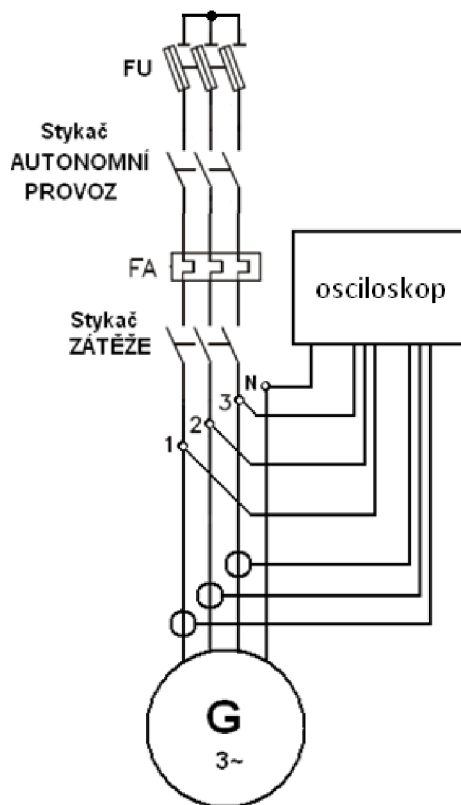
$\Delta I'_k(0)$, $I''_k(0)$ jsou počáteční přechodné respektive rázové složky proudu zkratu

Časová změna aperiodické a periodické složky proudu kotvy v každé fázi se určí z oscilogramu trojfázového zkratu jako algebraický poloviční součet a algebraický poloviční rozdíl pořadnic horních a spodních obálek zkratu proudu v jednotlivých fázích. Periodická složka proudu při zkratu se určí jako střední aritmetická hodnota periodické složky proudu ve třech fázích. Pro určení přechodné $\Delta I'_k(0)$ a rázové $I''_k(0)$ složky se odečte ustálená hodnota proudu nakrátko $I(\infty)$ od křivky periodické složky proudu kotvy. Zbývající součet ($\Delta I'_k + I''_k$) do diagramu se semilogaritmickou stupnicí. Celý postup je vysvětlen v normě ČSN EN 60034-4. [1]

Vztahy (7.1) a (7.2) jsou z [1].

7.2 Měření přechodného děje při třífázovém zkratu alternátoru:

Měření třífázového zkratu alternátoru provádíme z chodu naprázdno. Samotné spojení nakrátko není přímo na svorkách alternátoru, ale je až na svorkách pro extérní zátěž. Zjednodušené schéma zapojení je na obrázku 37. K zobrazení a zaznamenání přechodného děje byl znovu použit digitální osciloskop Yokogawa DL850 a k vyhodnocení a analýze byl použit program Xviewer Yokogama.



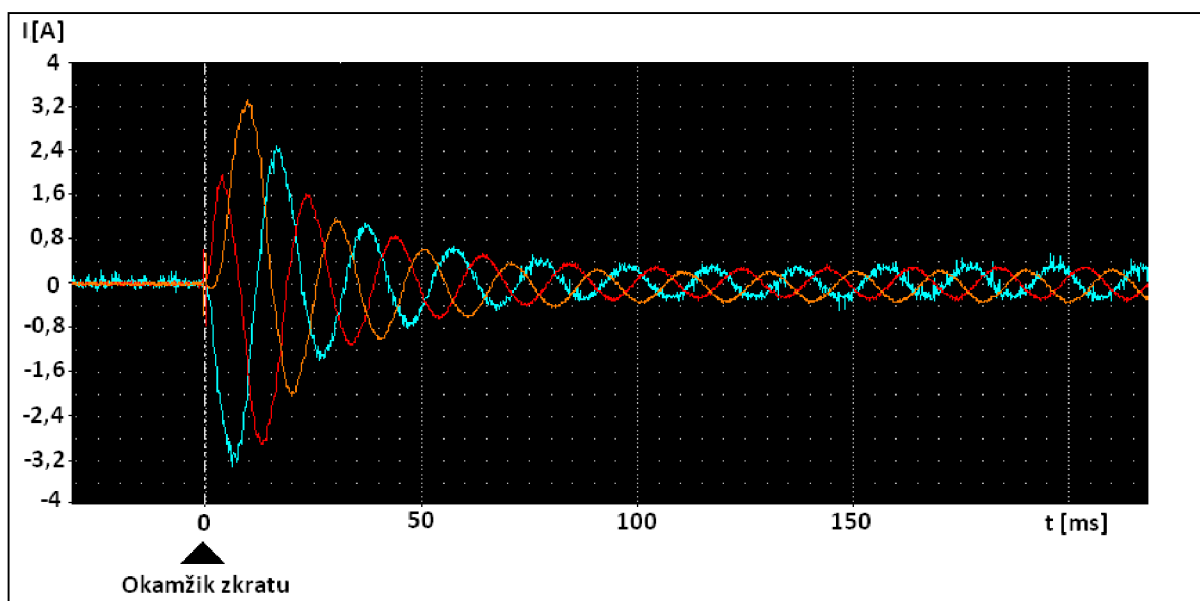
Obr. 36 Způsob zapojení při měření průběhu zkratového proudu

Postup:

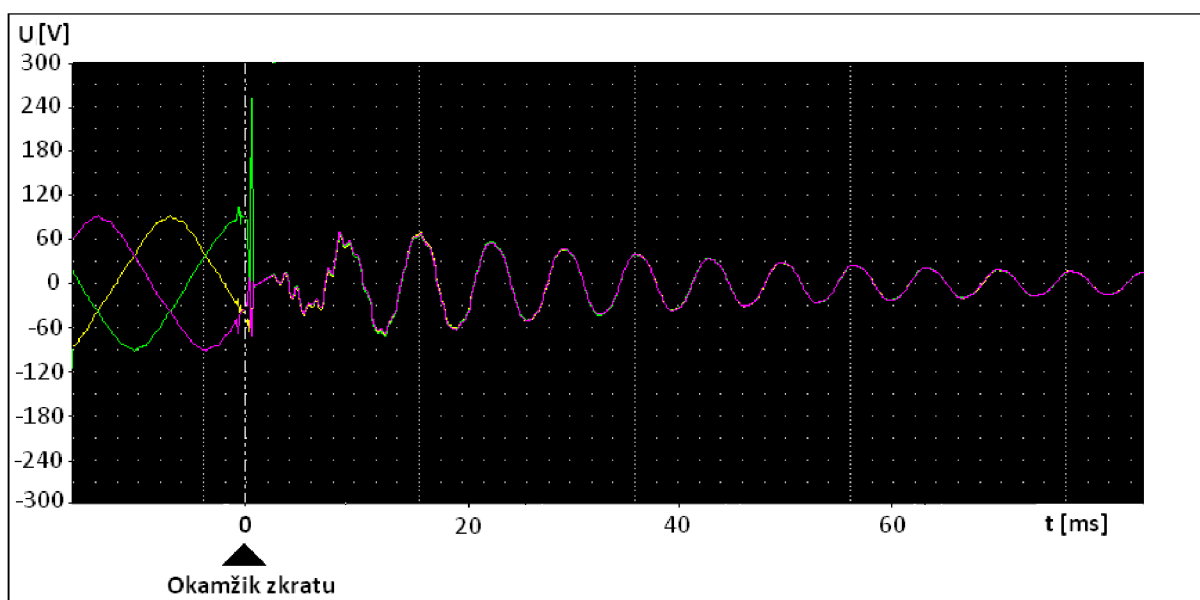
- 1) Zapojení obvodu podle schématu včetně zkratování.
- 2) Nastavení přepínače 1 na polohu „AUTONOMNÍ PROVOZ“ a přepínače 2 na polohu „RYCHLOST“.
- 3) Zapnutí hlavního vypínače rozvaděče a následně i zapnutí měniče tlačítkem „ZAPNUTÍ MĚNIČE“.
- 4) Po rozsvícení kontrolky „MĚNIČ READY“ stiskneme tlačítko „START“ a asynchronní motor se tak uvede do pohybu
- 5) Na ovládacím panelu nastavíme požadované otáčky 1500 ot/min.
- 6) Zdrojem napájení budicího obvodu nastavíme požadované napětí na výstupu alternátoru
- 7) Stiskneme tlačítko START/STOP na osciloskopu, čím osciloskop bude čekat na triggerovací podmínku, která spustí nahrávání přechodného děje.
- 8) Tlačítkem „STYKAČ ZÁTĚŽE“ zkratujeme obvod, čím se na osciloskopu zaznamenají průběhy napětí a proudů přechodných dějů.
- 9) Tlačítkem „Save“ na osciloskopu uložíme záznam, který si pak přeneseme do PC
- 10) V programu Yokogawa Xviewer analyzujeme výsledné průběhy proudů a napětí.

7.2.1 Trojfázový zkrat z chodu naprázdno s napětím 64 V

Na obrázcích 37 a 38 vidíme průběhy proudů při třífázovém zkratu na výstupu alternátoru. Zkrat nastal z chodu naprázdno při napětí naprázdno $U_0 = 64$ V. Před zkratem byl proud nulový ale ihned po vzniku zkratu proud prudce narostl až na vrcholovou hodnotu 3,3 A. Po ustálení se proud zmenšil až na efektivní hodnotu proudu 0,2 A. Na dalším obrázku 39 je průběh napětí při tomtéž zkratu.



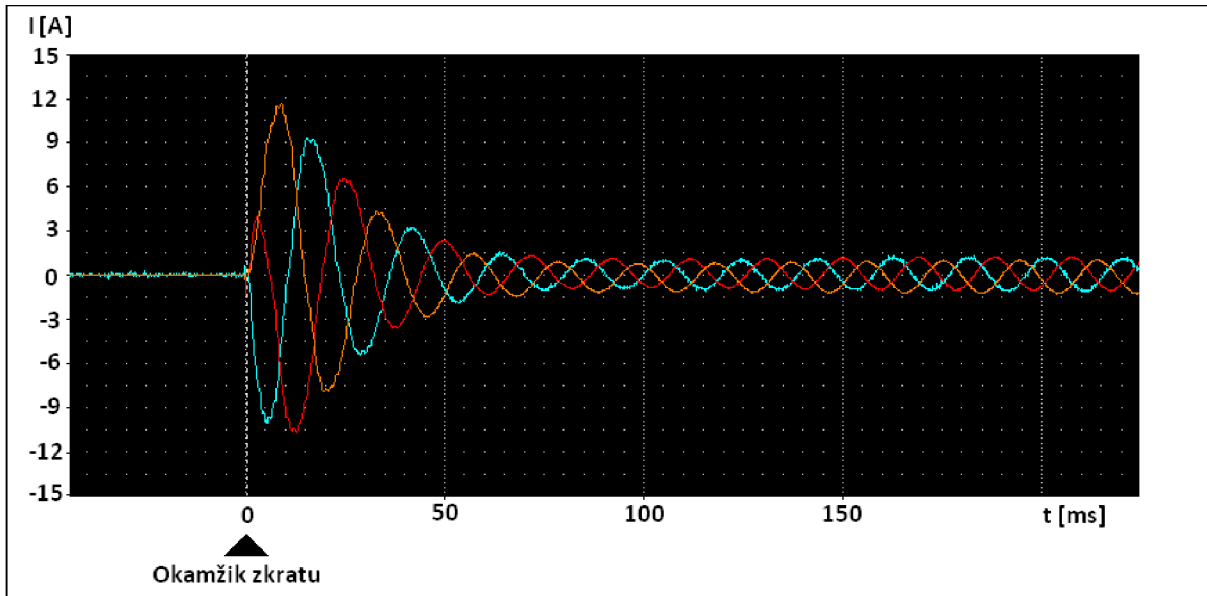
Obr. 37 Naměřený průběh zkratového proudu. Pro $U_0 = 64$ V



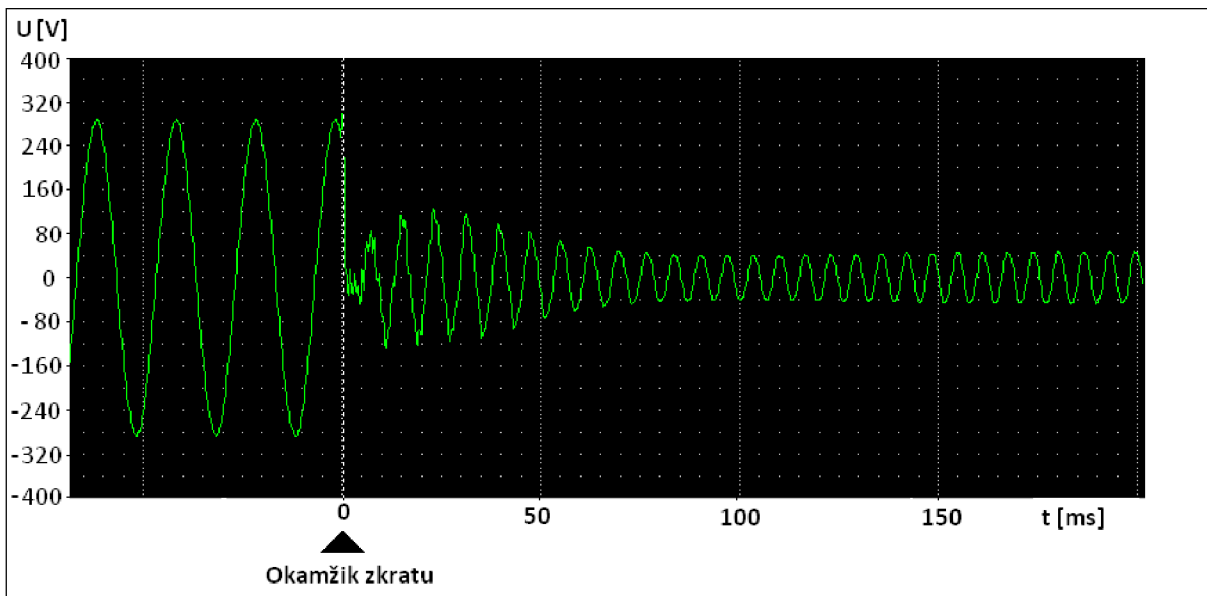
Obr. 38 Naměřený průběh napětí při zkratu

7.2.2 Trojfázový zkrat z chodu naprázdno s napětím 205 V

Zde na obrázku 39 je znovu třífázový zkrat alternátoru z chodu naprázdno, ale tentokrát byl zkrat proveden při napětí naprázdno 205 V. Vrcholová hodnota proudu v tomto případě 11,6 A. Po ustálení zkratového proudu, které trvalo asi 80 ms, protéká obvodem zkratový proud s efektivní hodnotou 1 A. Na obrázku 40 je zobrazen průběh napětí pro přehlednost pouze jedné fáze při tomto zkratu.



Obr. 39 Naměřený průběh zkratového proudu. Pro $U_0 = 205$ V



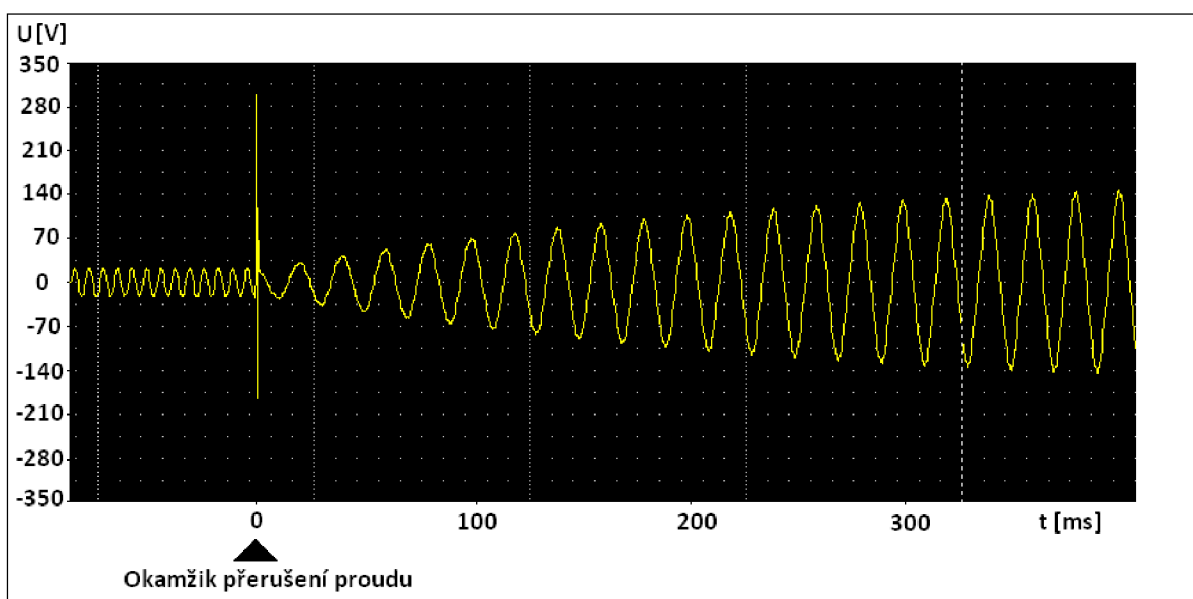
Obr. 40 Naměřený průběh napětí při zkratu

7.2.3 Měření průběhu zotaveného napětí při přerušení zkratového proudu

Toto měření slouží k zobrazení průběhu zotaveného napětí při přerušení zkratového proudu procházejícího alternátorem. V tomto případě se jednalo o přerušení střídavého proudu o efektivní hodnotě 4 A. Na obrázku 41 pro přehlednost lze vidět průběh napětí pouze jedné fáze. V okamžiku přerušení nastala krátkodobá špička 300 V, která trvala přibližně 200 μ s. Ve zbylých fázích byly průběhy podobné akorát fázově posunutě o 120° a jejich vrcholové hodnoty byly 550 V a 330 V. Po této krátkodobé špičkové hodnotě nastalo postupné zvyšování napětí až na hodnotu napětí naprázdno.

Postup:

- 1) Zapojení obvodu podle schématu včetně zkratování.
- 2) Přepínač 1 na polohu „AUTONOMNÍ PROVOZ“ a přepínač 2 na polohu „RYCHLOST“.
- 3) Zapnutí vypínače rozvaděče a následně i zapnutí měniče tlačítkem „ZAPNUTÍ MĚNIČE“.
- 4) Po rozsvícení kontrolky „MĚNIČ READY“ stiskneme tlačítko „START“ a motor se rozběhne.
- 5) Budící proud necháme na nulové hodnotě.
- 6) Na ovládacím panelu nastavíme požadované otáčky 1500 ot/min.
- 7) Tlačítkem „STYKAČ ZÁTĚŽE“ zkratujeme obvod.
- 8) Nyní nastavíme na zdroji buzení takovou hodnotu, aby alternátorem tekla zkratový proud 4 A.
- 9) Stiskneme tlačítko START/STOP na osciloskopu, čím osciloskop bude čekat na triggerovací podmínku, která spustí nahrávání přechodného děje.
- 10) Vypneme „STYKAČ ZÁTĚŽE“ příslušným tlačítkem. Záznam přechodného děje se zaznamená.
- 11) Tlačítkem „Save“ na osciloskopu uložíme záznam, který si pak přeneseme do PC
- 12) V programu Yokogawa Xviewer analyzujeme výsledné průběhy proudů a napětí.



Obr. 41 Zaznamenaný průběh zotaveného napětí

8 ZÁTĚŽNÝ ÚHEL SYNCHRONNÍHO STROJE

Zátěžný úhel δ je z elektrického hlediska úhel mezi vnitřním indukovaným napětím \bar{E}_f a mezi svorkovým napětím \bar{U}_s . Neboli fázový posun mezi okamžitými hodnotami vnitřního indukovaného napětí $e_f(t)$ a napětí sítě $u_n(t)$. Z mechanického hlediska je zátěžný úhel u dvoupólového stroje úhel natočení rotoru vůči poloze při stavu naprázdno. U vícepólových strojů se však elektrický i mechanický úhel liší. Například pro čtyřpólový stroj je mechanický úhel poloviční oproti elektrickému.

Z pohledu magnetických toků je zátěžný úhel úhel mezi magnetickým tokem rotoru $\bar{\psi}_f$ a výsledným magnetickým tokem $\bar{\psi}_v$. Už z náhradního schématu je vidět, že zátěžný úhel bude nulový pokud budou \bar{E}_f a \bar{U}_s vzájemně ve fázi, což nastane je v případě, že obvodem nepoteče žádný proud nebo poteče proud pouze jalového charakteru. Okamžitá hodnota napětí sítě $u_n(t)$ je pevně daná naopak okamžitou hodnotu vnitřního indukovaného napětí $e_f(t)$ můžeme měnit. Pokud budou okamžité hodnoty vnitřního indukovaného napětí $e_f(t)$ a napětí sítě $u_n(t)$ úplně stejné nepoteče z alternátoru do sítě ani opačně žádný proud. Budeme-li zvyšovat moment na hřídeli poháněcího stroje, tak se tento moment bude snažit urychlit rotor alternátoru. Jakákoliv změna odchylky natočení rotoru od výchozí polohy vyvolá změnu průběhu indukovaného napětí $e_f(t)$ a tím pádem i vznik rozdílu mezi vnitřním napětím alternátoru $e_f(t)$ a napětím sítě $u_n(t)$, což způsobí v kotvě nárůst proudu, který zvýší moment (točivého magnetického pole kotvy) opačného smyslu než je poháněcí moment na hřídeli. Tento moment opačného smyslu je důvodem, proč otáčky rotoru alternátoru připojeného k síti jsou konstatní. S rostoucím momentem na hřídeli, tak nerostou otáčky ale pouze se vychyluje rotor o zátěžný úhel. Čím větší je zvýšení momentu na hřídeli, tím větší je vychýlení rotoru od výchozí polohy, což způsobí větší rozdíl napětí mezi $e_f(t)$ a $u_n(t)$, a tím pádem i větší proud, který se tento rozdíl snaží vyrovnat. Výsledkem je větší moment opačného smyslu.

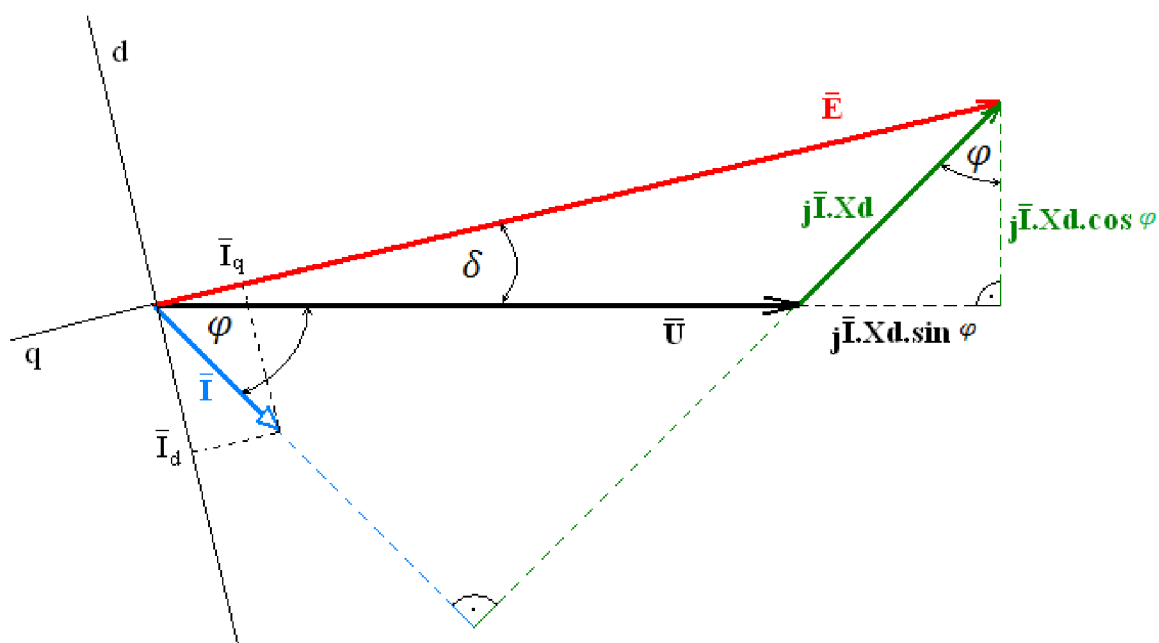
U generátoru rotor předbíhá o zátěžný úhel výsledný magnetický tok $\bar{\psi}_v$. Úhel fázoru vnitřního indukovaného napětí \bar{E}_f je dán polohou natočení rotoru. A úhel fázoru napětí sítě \bar{U}_s je dán pevně napětím sítě. Příčinou vzniku činné složky proudu, který teče z alternátoru do sítě je tedy fázový rozdíl mezi napětími \bar{E}_f a \bar{U}_s . Proud, který teče z alternátoru do sítě, vytváří úbytek napětí na synchronní reaktanci X_d . Proud bude mít podle II. Kirchhoffova zákona takovou hodnotu, při které bude vektorový součet svorkového napětí \bar{U}_s a napětí na synchronní reaktanci $j \cdot \bar{I} \cdot X_d$ roven indukovanému napětí \bar{E}_f .

Výsledný magnetický tok $\bar{\psi}_v$ je vektorový součet magnetického toku rotoru $\bar{\psi}_f$ a magnetického toku reakce kotvy $\bar{\psi}_a$. Zvětšením velikosti budícího proudu i_f se zvětší i velikost magnetického toku rotoru $|\bar{\psi}_f|$, což znamená, že se změní i fázor výsledného magnetického toku $\bar{\psi}_v$ a zátěžný úhel se zmenší. Podle vztahu (1.1) při nárůstu budícího proudu i_f vzroste i indukované napětí \bar{E}_f . Z vyjmenovaných faktů plyne, že změnou buzení se mění velikost i úhel (pokud není nulový) vnitřního indukovaného napětí, což vyvolá změnu proudu, který opět podle II. Kirchhoffova zákona musí být takový, aby se vektorový součet úbytku napětí na synchronní reaktanci $j \cdot \bar{I} \cdot X_d$ a napětí sítě \bar{U}_s rovnal vnitřnímu indukovanému napětí \bar{E}_f . Změnou buzení se tedy mění jalová složka proudu.

8.1 Měření zátěžného úhlu nepřímou metodou:

Nepřímá metoda měření zátěžného úhlu δ vychází z fázorového diagramu synchronního stroje. Neměříme přímo zátěžný úhel, ale jiné veličiny, ze kterých potom můžeme zátěžný úhel vypočítat. V případě synchronního generátoru s hladkým rotorem potřebujeme pro výpočet zátěžného úhlu znát tyto hodnoty:

- amplitudu proudu I , který teče do sítě
- napětí na svorkách generátoru U
- úhel φ mezi svorkovým napětím U a proudem I
- synchronní reaktanci stroje X_d



Obr. 42 Diagram synchronního generátoru s hladkým rotorem

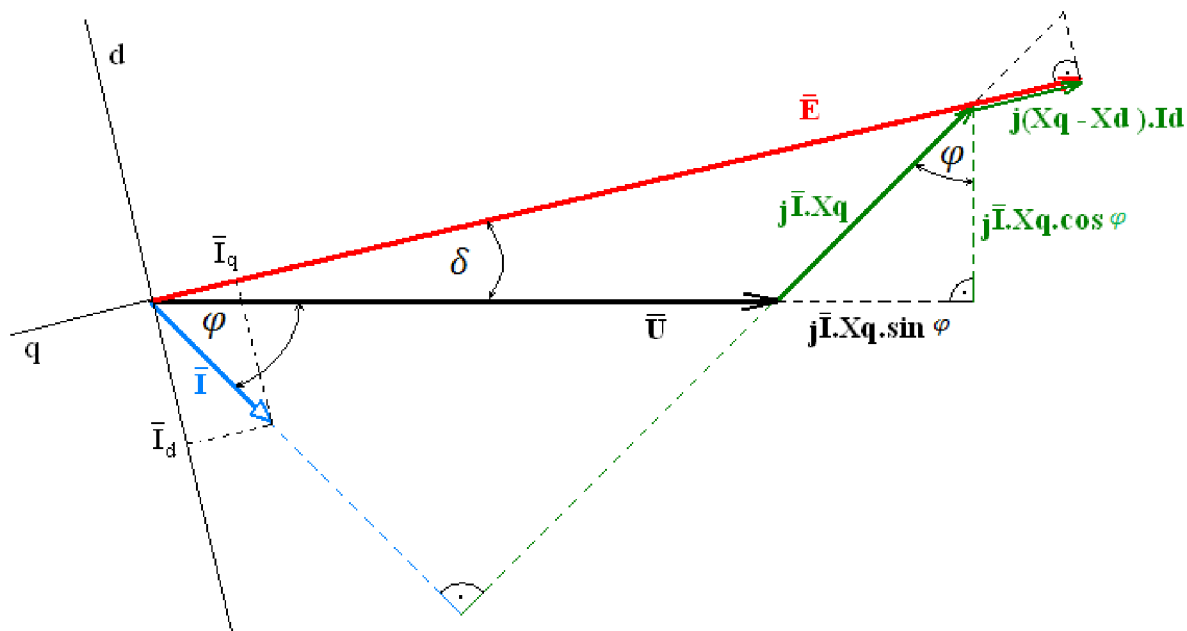
Z diagramu lze vypočítat zátěžný úhel δ pomocí goniometrických funkcí:

$$\delta = \arcsin\left(\frac{I \cdot X_d \cdot \cos \varphi}{E}\right) \quad (8.1)$$

Nebo:

$$\delta = \arctg\left(\frac{I \cdot X_d \cdot \cos \varphi}{U + I \cdot X_d \cdot \sin \varphi}\right) \quad (8.2)$$

U generátoru s vyniklými póly se zátěžný úhel počítá podobně. Tentokrát ovšem musíme znát místo podélné synchronní reaktance X_d reaktanci příčnou X_q . Výpočet vychází z fázorové diagramu pro generátor s vyniklými póly.



Obr. 43 Diagram synchronního generátoru s vyniklými póly

Zátěžný úhel vypočteme jako:

$$\delta = \arctg \left(\frac{I \cdot X_q \cdot \cos \varphi}{U + I \cdot X_q \cdot \sin \varphi} \right) \quad (8.3)$$

- I - proud protékající kotvou
- X_q - Příčná synchronní reaktance
- U - Svorkové napětí kotvy
- φ - Fázový posun mezi proudem a napětím kotvy

8.2 Měření zátěžného úhlu nepřímou metodou:

Postup:

- 1) Zapojení obvodu podle schématu.
- 2) Přepínač 1 na polohu „PARALELNÍ SPOLUPRÁCE“ a přepínač 2 na polohu „MOMENT“.
- 3) Zapnutí vypínače rozvaděče a následně i zapnutí měniče tlačítkem „ZAPNUTÍ MĚNIČE“.
- 4) Po rozsvícení kontrolky „MĚNIČ READY“ stiskneme tlačítko „START“ a asynchronní motor se tak uvede do pohybu.
- 5) Na ovládacím panelu nastavíme požadovanou frekvenci na výstupu alternátoru.
- 6) Zdrojem napájení budícího obvodu nastavíme napětí na výstupu alternátoru tak, aby bylo nepatrně větší jako napětí sítě zhruba o 3 V.
- 7) Pomocí fázovacích voltmetrů zkontrolujeme splnění podmínek pro fázování.
- 8) Ve správný okamžik tlačítkem „STYKAČ ZÁTĚŽE“ přifázujeme generátor k síti.
- 9) Pomocí potenciometru označeného jako „MOMENT“ nastavujeme po daných krocích hodnoty činného výkonu alternátoru a zaznamenáváme činný výkon, jalový výkon, zdánlivý výkon, proudy a napětí.
- 10) Zátěžné úhly pro každý krok vypočítáme

$$\delta = \arctg \left(\frac{I \cdot X_q \cdot \cos \varphi}{U + I \cdot X_d \cdot \sin \varphi} \right) \quad (8.4)$$

Příklad výpočtu pro 1. řádek:

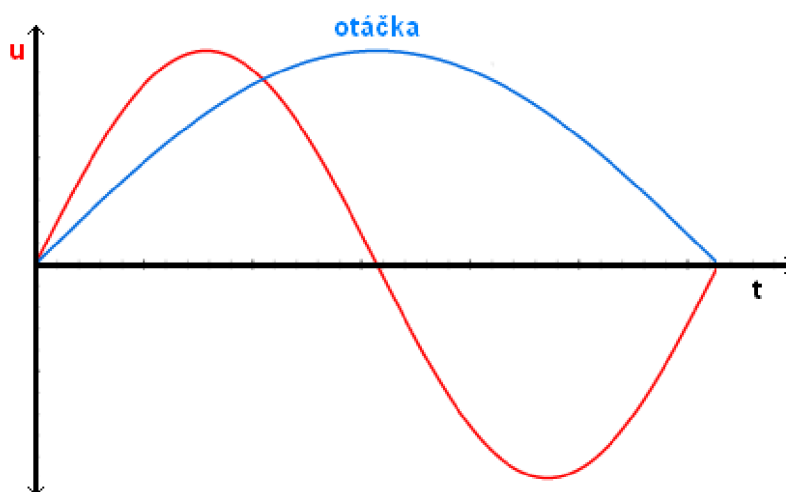
$$\delta = \arctg \left(\frac{2,18 \cdot 0,7 \cdot \frac{230^2 \cdot 1430}{7500 \cdot 1440}}{230 + 2,18 \cdot 0,7 \cdot \frac{230^2 \cdot 0}{7500 \cdot 1440}} \right) = 2,66^\circ \quad (8.5)$$

Tab. 3 Naměřené hodnoty

P_{motor}	P_g	Q	S	I	I	I	$I_{\text{průměr}}$	δ
[kW]	[kW]	[kVar]	[kVA]	[A]	[A]	[A]	[A]	[°]
2,15	1,43	0	1,44	2,27	2,07	2,2	2,18	2,66
2	1,34	0,06	1,34	2,1	1,82	2,02	1,98	2,43
1,82	1,13	0,12	1,13	1,8	1,63	1,77	1,73	2,12
1,62	0,98	0,16	0,95	1,57	1,36	1,48	1,47	1,85
1,45	0,8	0,23	0,83	1,41	1,2	1,27	1,29	1,52
1,3	0,66	0,28	0,71	1,2	1	1,1	1,10	1,25
1,12	0,44	0,36	0,55	1	0,8	0,84	0,88	0,86
0,93	0,23	0,4	0,47	0,86	0,72	0,65	0,74	0,44
0,74	0,09	0,43	0,42	0,76	0,77	0,55	0,69	0,18
0,7	0	0,44	0,44	0,78	0,77	0,6	0,72	0,00

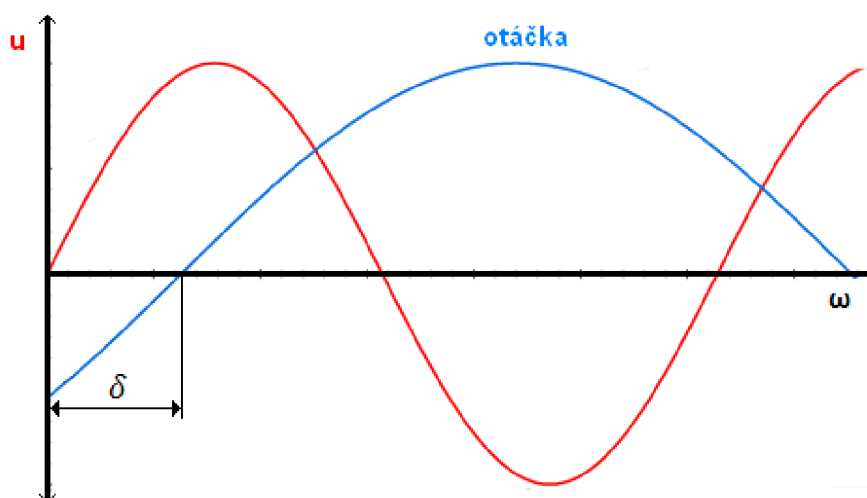
8.3 Měření zátěžného úhlu pomocí frekvenčního měniče

Metoda vychází z faktu, že během jedné otáčky dvoupólového rotoru alternátoru se do jedné z cívek kotvy indukuje celá jedna perioda průběhu napětí. To znamená, že jedna otáčka trvá stejně dlouho jako jedna perioda průběhu napětí na svorkách kotvy. Napětí můžeme zobrazit například osciloskopem a otáčky lze získat z výstupu frekvenčního měniče ve formě impulzů po jedné otáčce. Synchronní generátor je na společné hřídeli s asynchronním motorem, a proto otáčky motoru jsou stejné jako otáčky rotoru alternátoru. Důležité bude synchronizovat průběh napětí a impulzů celých otáček do jednoho grafu tak, aby při chodu alternátoru naprázdno odpovídal okamžik impulzu celé otáčky okamžiku, kdy průběh napětí prochází nulou. Nezáleží na tom, na které fázi napětí měříme, protože napětí jsou symetricky vzájemně posunuta o 120° . Na obrázku 45 vidíme červeně průběh jedné periody napětí $u(t)$ a také modře průběh jedné otáčky rotoru. Tento stav odpovídá alternátoru naprázdno. Zátěžný úhel je v tomto případě nulový.



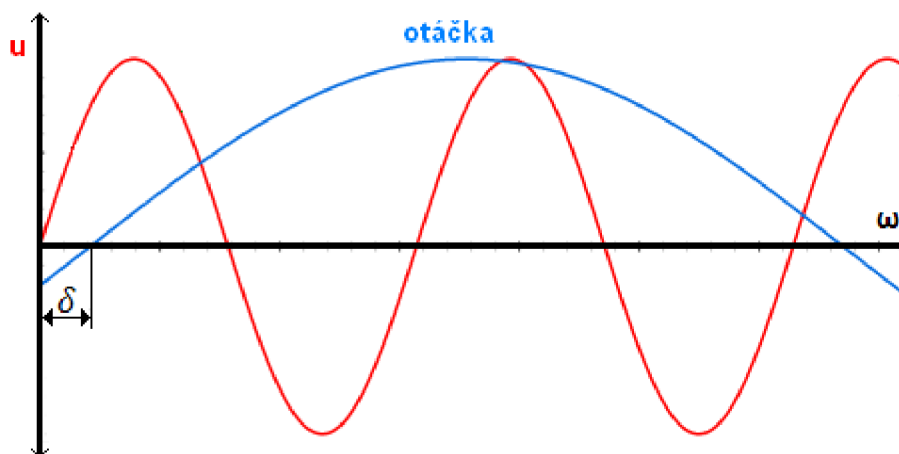
Obr. 44 Průběh napětí během jedné otáčky při stavu naprázdno

Pokud alternátor zatížíme, tak zátěžný úhel vzroste, což se na obrázku 46 projeví fázovým posunem modrého průběhu udávající jednu otáčku rotoru.



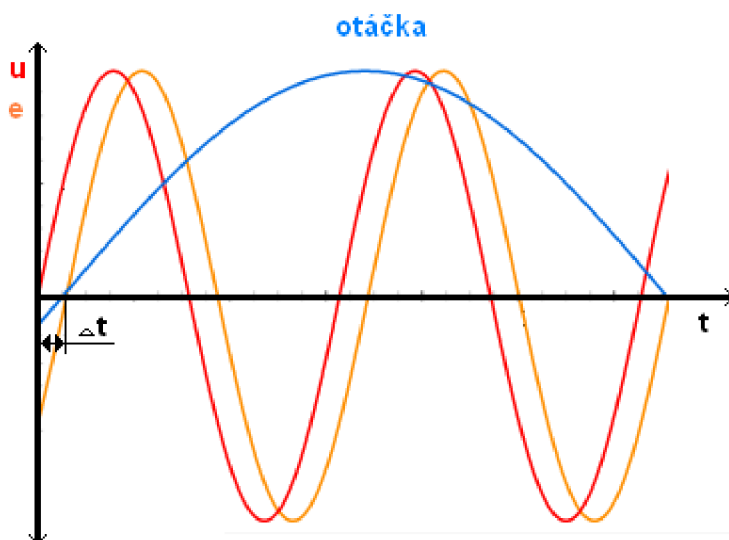
Obr. 45 Průběh napětí během jedné otáčky při stavu zatížení

V případě čtyřpólového alternátoru se situace změní v tom, že během jedné otáčky rotoru proběhnou hned dvě periody napětí. Zátěžný úhel získáme jako fázový posuv mezi oběma průběhy.



Obr. 46 Průběh napětí během jedné otáčky u čtyřpólového alternátoru

Zátěžný úhel je definován jako fázový posuv mezi svorkovým napětím kotvy U a vnitřním indukovaným napětím E . Průběh $e(t)$ bude mít stejnou frekvenci jako $u(t)$ ale fázově posunuta stejně jako doba jedné otáčky.



Obr. 47 Určení zátěžného úhlu

Z časové osy pak vypočteme zátěžný úhel jako:

$$\delta = \Delta t \cdot \frac{360}{T} \quad (8.6)$$

kde Δt je časový posun mezi $u(t)$ a $e(t)$

T je perioda svorkového napětí kotvy

9 PŘÍLOHY

TYPICAL DATA

Insulation class	H	Excitation system	Shunt
Winding pitch - Code	1 - (N° 1)	A.V.R. model	R 250
Wires	12	Voltage regulation (steady state)	± 0,5 %
Drip proof	IP 23	Sustained short-circuit current	-
Altitude	≤ 1000 m	Total harmonic (*) TGH / THC	< 3 %
Overspeed	2250 min ⁻¹	Wave form : NEMA = TIF - (*)	< 50
Air flow	0,04 m ³ /s	Wave form : I.E.C. = THF - (**)	< 2 %

(*) Total harmonic content line to line, at no load or full rated line r and balanced load

RATINGS : kVA / kW - Power factor = 0,8

Duty/Ambiant T°		Continuous / 40°C								Stand-by / 40°C				Stand-by / 27°C			
		H / 125° K				F / 105° K				H / 150° K				H / 163° K			
Class/T° rise	Phase	3 ph.		1 ph.	3 ph.		1 ph.	3 ph.		1 ph.	3 ph.		1 ph.	3 ph.		1 ph.	
	Y	380V	400V	415V	Δ Δ	380V	400V	415V	Δ Δ	380V	400V	415V	Δ Δ	380V	400V	415V	Δ Δ
	Δ	220V	230V	240V	230V	220V	230V	240V	230V	220V	230V	240V	230V	220V	230V	240V	230V
37 M5	kVA	7,5		4,5	7		4	8		5	8,5		5,5				
	kW	6		3,6	5,6		3,2	6,4		4	6,8		4,4				
37 M6	kVA	9		5,5	8		5	9,5		6	10		6				
	kW	7,2		4,4	6,4		4	7,6		4,8	8		4,8				
37 M7	kVA	13		8	12		7,5	14		8,5	14,5		9				
	kW	10,4		6,4	9,6		6	11,2		6,8	11,6		7,2				
37 VL8	kVA	17		10	15,5		9,5	18		11	19		11,5				
	kW	13,6		8	12,4		7,6	14,4		8,8	15,2		9,2				

EFFICIENCIES (%) : Class H . 40° C

	Three phase : 400 V										Single phase : 230 V									
	P.F. = 0,8					P.F. = 1					P.F. = 0,8					P.F. = 1				
	1/4	2/4	3/4	4/4	St.by	1/4	2/4	3/4	4/4	St.by	1/4	2/4	3/4	4/4	St.by	1/4	2/4	3/4	4/4	St.by
37 M5	75,5	82	83,3	83,2	82,8	78,1	85,9	88,2	89	88,9	65,1	74,6	77,1	77,7	77,2	67,2	78,3	82	83,7	83,7
37 M6	77,2	82,7	83,3	82,7	82	80	86,8	88,6	89	88,8	68,8	76,3	77,5	76,9	76,1	75	82,3	83,7	83,6	83,1
37 M7	81,8	86	86,3	85,5	85	84,2	89,5	90,6	90,7	90,5	74,7	80,7	81,3	80,5	79,9	80	85,6	86,4	85,8	85,3
37 VL8	85,1	88,6	88,7	87,9	87,5	87	91,3	92,1	92	91,8	78,7	84	84,4	83,6	83,1	83,2	87,9	88,4	87,8	87,3

REACTANCES (%) - TIME CONSTANTS (ms) : CLASS : H / 400 V

		37 M5	37 M6	37 M7	37 VL8
Kcc	Short-circuit ratio	1	0,87	0,71	0,58
Xd	Direct axis synchronous reactance unsaturated	140	160	183	198
Xq	Quadrature axis synchronous reactance unsaturated	70	80	90	100
T'do	Open circuit time constant	522	522	565	602
X'd	Direct axis transient reactance saturated	9,9	11,3	12	12,2
T'd	Short circuit transient time constant	40	40	40	40
X''d	Direct axis subtransient reactance saturated	4,9	5,7	6	6,1
T''d	Subtransient time constant	3,7	3,7	3,7	3,7
X''q	Quadrature axis subtransient reactance saturated	8,5	9,8	10,6	10,9
Xo	Zero sequence reactance unsaturated	9,9	11,3	12	12,2
X2	Negative sequence reactance saturated	6,7	7,7	8,3	8,5
Ta	Armature time constant	6	6	6	6

OTHER DATA - CLASS : H / 400 V -

io	No load excitation current (A)	0,87	0,88	0,79	0,64
ic	Full load excitation current (A)	2,03	2,3	2,3	2,05
uc	Full load excitation voltage (V)	40	45	45	40
ms	Recovery time ($\Delta U = 20\%$ Trans.)	< 300	< 300	< 300	< 300
kVA	Motor start. ($\Delta U = 20\%$ sust.) or ($\Delta U = 50\%$ Transient)	20	22	30	38
%	Transient dip (rated slip load) - PF = 0,8 L ₁₀	15,5	16,7	16,8	15,8
W	No load losses	380	384	426	438
W	Heat rejection	1128	1336	1624	1704

Tabulka 4 - Charakteristika naprázdno – dolů

dolů					
I_{bd}	U_{0f1}	U_{0f2}	U_{0f3}	U_{0d}	U₀
mA	V	V	V	V	V
8,00	30,90	30,80	30,80	30,83	24,45
100,60	65,00	64,80	64,90	64,90	57,62
198,20	99,90	99,50	99,70	99,70	91,92
300,70	134,70	134,20	134,30	134,40	125,83
404,40	164,00	163,40	163,60	163,67	157,45
499,20	185,60	184,90	185,20	185,23	180,88
600,90	201,70	201,10	201,20	201,33	198,65
649,40	214,10	213,60	213,70	213,80	209,02
700,00	220,00	219,50	219,60	219,70	215,80
751,00	225,20	224,70	224,80	224,90	221,70
801,30	229,50	229,10	229,20	229,27	226,95
848,80	233,10	232,60	232,70	232,80	231,25
900,00	236,50	236,00	236,10	236,20	235,25
949,50	239,40	238,90	239,00	239,10	238,75
1000,00	242,20	241,70	241,90	241,93	241,93

Tabulka 5 - charakteristika naprázdno – nahoru

nahoru				
I_{bn}	U_{0f1}	U_{0f2}	U_{0f3}	U_{0n}
mA	V	V	V	V
8,00	18,00	18,20	18,00	18,07
99,40	50,40	50,30	50,30	50,33
200,40	84,20	83,90	84,30	84,13
299,30	117,50	117,10	117,20	117,27
401,50	151,60	151,00	151,10	151,23
501,30	176,90	176,30	176,40	176,53
600,00	196,30	195,70	195,90	195,97
649,00	204,60	204,00	204,10	204,23
700,70	212,20	211,70	211,80	211,90
750,00	218,80	218,30	218,40	218,50
801,90	224,90	224,50	224,50	224,63
850,40	230,00	229,50	229,60	229,70
900,00	234,60	234,10	234,20	234,30
950,40	238,70	238,20	238,30	238,40
1000,00	242,20	241,70	241,90	241,93

Tabulka 6 - Charakteristika nakrátko

I_b	I_{kf1}	I_{kf2}	I_{kf3}	I_{3k}
mA	A	A	A	A
750	9,53	9,47	9,46	9,49
700	9,00	8,94	8,93	8,96
650	8,44	8,40	8,39	8,41
600	7,91	7,85	7,84	7,87
500	6,79	6,75	6,74	6,76
400	5,63	5,61	5,60	5,61
300	4,48	4,45	4,44	4,46
200	3,29	3,27	3,27	3,28
100	2,13	2,11	2,11	2,12
8	1,04	1,03	1,03	1,03

Tabulka 7 provozního diagramu pro $I_b = 0,771$ A

I_b = 0,771 A						
P_a	P_g	Q	S	I	I	I
kW	kW	kVar	kVA	A	A	A
0,98	0,333	0,002	0,32	0,61	0,5	0,57
0,92	0,218	0,09	0,26	0,55	0,43	0,42
0,85	0,175	0,112	0,19	0,51	0,41	0,38
0,78	0,135	0,125	0,178	0,45	0,41	0,31
0,72	0,03	0,145	0,17	0,43	0,44	0,32
0,68	0	0,15	0,16	0,45	0,49	0,26

Tabulka 8 provozního diagramu pro $I_b = 0,78$ A

I_b = 0,78 A						
P_a	P_g	Q	S	I	I	I
kW	kW	kVar	kVA	A	A	A
1,55	0,86	0	0,82	1,36	1,13	1,32
1,45	0,74	0,04	0,76	1,38	1,12	1,25
1,35	0,69	0,07	0,7	1,16	0,9	1,05
1,25	0,6	0,1	0,6	1,06	0,85	0,93
1,1	0,45	0,16	0,47	0,93	0,71	0,78
0,95	0,28	0,21	0,34	0,72	0,55	0,56
0,82	0,13	0,24	0,28	0,6	0,52	0,4
0,75	0,03	0,24	0,28	0,55	0,53	0,34

Tabulka 9 provozního diagramu pro $I_b = 0,813 \text{ A}$

I _b =0,813 A						
Pa	Pg	Q	S	I	I	I
kW	kW	kVar	kVA	A	A	A
2,15	1,43	0	1,44	2,27	2,07	2,2
2	1,34	0,06	1,34	2,1	1,82	2,02
1,82	1,13	0,12	1,13	1,8	1,63	1,77
1,62	0,98	0,16	0,95	1,57	1,36	1,48
1,45	0,8	0,23	0,83	1,41	1,2	1,27
1,3	0,66	0,28	0,71	1,2	1	1,1
1,12	0,44	0,36	0,55	1	0,8	0,84
0,93	0,23	0,4	0,47	0,86	0,72	0,65
0,74	0,09	0,43	0,42	0,76	0,77	0,55
0,7	0	0,44	0,44	0,78	0,77	0,6

Tabulka 10 provozního diagramu s regulací buzení

I _b	Pa	Pg	Q	S	I	I	I
A	kW	kW	kVar	kVA	A	A	A
0,815	2,18	1,46	0	1,46	2,34	2,12	2,18
0,812	1,99	1,29	0	1,29	2	1,85	2
0,79	1,83	1,13	0	1,13	1,77	1,57	1,8
0,785	1,62	0,955	0	0,955	1,5	1,3	1,5
0,782	1,43	0,73	0	0,73	1,26	1	1,2
0,77	1,23	0,53	0	0,53	0,96	0,79	1
0,758	1	0,33	0	0,33	0,57	0,43	0,65
0,75	0,8	0,16	0	0,16	0,4	0,3	0,41
0,746	0,62	0,05	0	0,05	0,24	0,41	0,26

Tabulka 11 provozního diagramu pro výkony poháněcího stroje 2,14 kW a 1 kW.

I _b	Pg	Q
A	kW	kVar
0,62	1,42	-1,9
0,67	1,43	-1,64
0,7	1,44	-1,23
0,723	1,44	-0,98
0,76	1,44	-0,73
0,8	1,44	-0,4
0,814	1,44	0
0,9	1,44	0,59
0,95	1,44	0,96
1	1,43	1,29
1,05	1,43	1,62
1,1	1,42	1,98
1,15	1,45	2,4

I _b	Pg	Q
A	kW	kVar
0,686	0,33	-1,5
0,703	0,34	-1,18
0,713	0,35	-1,05
0,726	0,35	-0,86
0,745	0,35	-0,45
0,75	0,35	-0,17
0,763	0,35	0
0,8	0,35	0,23
0,85	0,35	0,58
0,9	0,34	0,94
0,95	0,34	1,32
1	0,33	1,66
1,05	0,33	2,01



Rotační zdroj 3 x 208/120-400/230V, 50/60 Hz

1.3 Pracovní podmínky

Nadmořská výška	max. 1000 m
Rozsah teploty okolí - pracovní	+ 5°C až + 35 °C
Rozsah teploty okolí - skladovací, přepravní	0°C až + 40 °C
Dovolená rychlost změny teploty - skoková	± 5 °C
- lineární	±15°C/hod
Relativní vlhkost.....	do 80%/20°C
.....	do 40 %/40°C (bez kondenzace)

1.4 Technické údaje

1.4.1 Přívodní napětí pohonu:

napájení: 3x400V, 50Hz, TN-C-S
Dimenzování přívodu na 10 kVA

1.4.2 Ochrana před úrazem elektrickým proudem:

samočinným odpojením od zdroje a doplňujícím pospojováním
dle ČSN 33 2000 - 4 - 41

1.4.3 Parametry rozváděče:

oceloplechový skříňový rozváděč RITTAL, řady CM1522, (v x š x hl):
1400 x 1000 x 400 mm
ventilátor vzduchu RITTAL, IP 43/54, 105 m³/h
krytí IP 54 (při zaslepených pomocných průchodkách 6 x PG48)
hmotnost 200kg

1.4.4 Parametry statického měniče frekvence:

Unidrive SP, typ SP2402, 7.5 kW
napájecí napětí 3 x 380V-10% až 480V + 10%
výstupní frekvence 0 - 3000Hz
trvalý výstupní proud 16A

1.4.5 Parametry motoru soustrojí:

3 fázový asynchronní motor s cizí ventilací :
typ Slg 132 M 4, výrobce TAMEL, Poland.
Δ 3 x 400V, 50Hz, 7.5kW, 1455 min⁻¹, 14.4 A, cosφ = 0,86
S1, třída izolace F, IP55, hmotnost 59 kg



Rotační zdroj 3 x 208/120-400/230V, 50/60 Hz

1.4.7 Parametry generátoru soustrojí:

3 fázový synchronní generátor s vlastní ventilací
 typ LSA 37M5 J 1/4
 Jmenovitý výkon 7.5kVA/3 x 400V/50Hz
 S1, třída izolace H, hmotnost 95 kg

Pozn: Viz kopie protokolů o kontrolní zkoušce - kapitola 6, příloha 5,.

1.4.8 Parametry regulátoru napětí generátoru:

typ R 250
 Rozsah napájecího napětí 85 až 139V
 Jmenovitý proud..... 8A
 Přesnost regulace výstupního napětí generátoru..... $\pm 0.5\%$
 Nastavitelná LAM („Load acceptance module“)

1.4.9 Parametry stabilizovaného zdroje stejnosměrného napětí a proudu:

typ STATRON 2224.2
 Příkon300W
 Rozsah výstupního napětí 0 až 48V
 Rozsah výstupního proudu 0 až 3.5A

10 ZÁVĚR

Hlavním objektem zájmu diplomové práce je laboratorní soustrojí a především synchronní generátor LSA 37 M5. Bylo nutné si prostudovat technickou dokumentaci nejen k samotnému soustrojí, ale a i k celému pracovišti včetně rozvaděče. Kromě toho bylo nezbytné se seznámit se všemi měřicími přístroji i jejich manuály. Důležitou součástí práce je i zjištění způsobu ovládání pracoviště a způsob jeho zapojení. Toto zapojení bylo nutné popsat a zakreslit do schématu.

Součástí práce bylo také pochopit detailně princip obecného synchronního stroje a jeho konstrukci. Následně bylo potřeba přímo konkrétní alternátor popsat a schématicky vyjádřit vnitřní zapojení vinutí kotvy nebo také zapojení budicího systému.

Nezbytné bylo se také seznámit s normou ČSN EN 60034-4, která se zabývá metodami určování veličin synchronních strojů ze zkoušek, a zjistit co všechno se dá na synchronním generátoru měřit a jakým způsobem to lze měřit. Například zkouška se záporným buzením, při které se nepřímo měří příčná synchronní reaktance, nelze pro tento alternátor použít, protože budicí systém na rotoru obsahuje usměrňovač, jenž nedovolí změnu polarity buzení.

Práce se věnuje i přechodným dějům, které nastávají při fázování alternátoru k tvrdé síti nebo při trojfázovém zkratu. Snahou bylo tyto přechodné jevy zaznamenat na osciloskopu a porovnat, jak se průběhy liší při různých stavech a při jiných počátečních podmínkách. Kapitola 6 se zase zabývá problematikou provozních diagramů alternátoru, kde je popsáno, jak a kdy se mění pracovní bod alternátoru v provozních diagramu. Následně bylo provedeno o měření, které mělo ukázat, zda naměřené hodnoty budou souhlasit s teoretickými.

Dále je v práci vysvětleno, co je to zátěžný úhel a je v ní i popsán princip nepřímé metody měření zátěžného úhlu.

Na práci by se dalo do budoucna navázat a rozvíjet například možnost měření zátěžného úhlu alternátoru pomocí frekvenčního měniče, kdy pomocí impulzů, udávajících jednu proběhnutou otáčku, a průběhu napětí je možné určit zátěžný úhel z časové odchylky mezi okamžikem impulzu dokončené otáčky rotoru a mezi okamžikem, kdy napětí prochází nulou. To vše za předpokladu, že se podaří oba děje nějakým způsobem dát do jednoho časového grafu a vhodně sesynchronizovat dohromady například v prostředí LabView.

Kapitola a přechodných jevech při zkratu by se dala rozšířit o zkraty nesouměrné jako dvojfázový zkrat či jednofázový zkrat.

Dalším možností by bylo připojit k alternátoru rozdílovou ochranu a vyzkoušet její funkci při různých provozních stavech.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ČSN EN 60034-4 ed.2 35000: 2008. *Točivé elektrické stroje. Část 4:Metody určování veličin synchronních strojů ze zkoušek*
- [2] *Rotační zdroj projektová dokumentace*. Control techniques, 2009, 116 stran
- [3] ORSÁGOVÁ Jaroslava, Přednáška 2: *Synchronní generátor Elektrárny a teplárny*, VUT Brno
- [4] Přednáška, Úhlové charakteristiky; *Alternátor pracující do soustavy nekonečného výkonu*
<http://uloz.to/xPs4xB6z/uhlovecharky-pdf>
- [5] Laboratorní návod; *Měření synchronního generátoru naprázdno a nakrátko*. FEKT VUT, 8 stran