

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

ZKRATOVÝ PROUD SYNCHRONNÍHO STROJE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ONDŘEJ ŠEBESTA

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Ondřej Šebesta

ID: 125650

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Zkratový proud synchronního stroje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teoretický průběh zkratového proudu synchronního stroje
2. Simulace časového průběhu zkratového proudu
3. Měření zkratového proudu synchronního stroje

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 23.5.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

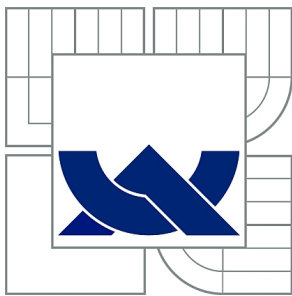
Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných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

Bibliografická citace práce:

ŠEBESTA, O. *Zkratový proud synchronního stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 86 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D..

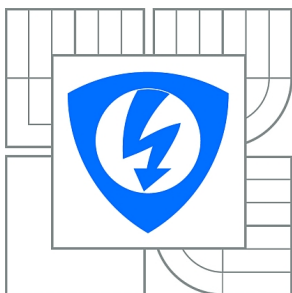
Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského 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

ZKRATOVÝ PROUD SYNCHRONNÍHO STROJE

SHORT CIRCUIT CURRENT OF SYNCHRONOUS GENERATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ONDŘEJ ŠEBESTA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR TOMAN, Ph.D.

BRNO 2014

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou zkratového proudu synchronního stroje. První část je věnována teoretickému průběhu zkratového proudu synchronního stroje a popisuje, jak se tento přechodný děj ve své době trvání mění a jakými reaktancemi a časovými konstantami je charakterizován. Následně se tato část věnuje metodice zkoušek synchronního stroje, kterými se dají určit jeho reaktance.

Druhá část práce se zabývá měřením zkratového proudu konkrétního synchronního stroje. Jsou zde provedeny zkoušky měřením, ze kterých jsou určeny reaktance stroje. Dále jsou zde změřeny časové průběhy zkratového proudu a provedena jejich analýza.

Poslední část práce se zabývá simulací časového průběhu zkratového proudu. Simulace je provedena v programu Matlab/Simulink pro konkrétní zkoušený synchronní stroj. Nasimulované průběhy zkratového proudu jsou porovnány s časovými průběhy, které byly naměřeny v předchozí části práce.

KLÍČOVÁ SLOVA: synchronní stroj; reaktance; časová konstanta; zkratový proud; simulace zkratového proudu

ABSTRACT

The thesis deals with the problematics of short-circuit current of synchronous machine. The first section focuses on the theoretical process of short-circuit current of synchronous machine and describes how this transient process changes throughout its duration and with what reactances and time constants it is defined. Subsequently, this section deals with the methodologies of tests of the synchronous machine, which may be used to set its reactances.

The second part of the work focuses on measurement of the short-circuit current in a specific synchronous machine. Further, there are measurements of processes of the short-circuit in time and their analysis.

The last section of the thesis deals with the simulation of short-circuit current process. The simulation is run by the Matlab/Simulink software. Simulated processes of short-circuit are then compared with the results of measurements from the previous section of the thesis.

KEY WORDS: synchronous machine; reactance, time constant; short circuit current; simulations of short circuit current

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD	16
2 CÍLE PRÁCE	17
3 SYNCHRONNÍ STROJE	18
3.1 ROZDĚLENÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ	18
3.1.1 SYNCHRONNÍ STROJ S HLADKÝM ROTOREM	19
3.1.2 SYNCHRONNÍ STROJ S VYNIKLÝMI PÓLY	20
4 PŘECHODNÉ DĚJE V SYNCHRONNÍCH STROJÍCH.....	21
4.1 TROJFÁZOVÝ ZKRAT NA SVORKÁCH NEZATÍŽENÉHO SYNCHRONNÍHO STROJE	21
4.2 ZAPÍNÁNÍ OBVODU TŘÍFÁZOVÉHO PROUDU	21
4.3 ZKRATOVÉ PROUDY STATOROVÉHO VINUTÍ.....	23
4.4 REAKTANCE SYNCHRONNÍCH STROJŮ	24
4.4.1 RÁZOVÁ REAKTANCE.....	24
4.4.2 PŘECHODNÁ REAKTANCE	25
4.4.3 SYNCHRONNÍ REAKTANCE.....	26
4.4.4 RÁZOVÁ REAKTANCE TLUMÍCÍHO VINUTÍ	27
4.4.5 PŘECHODNÁ A USTÁLENÁ REAKTANCE BUDÍCÍHO VINUTÍ	28
4.4.6 RÁZOVÁ PŘÍČNÁ REAKTANCE STATOROVÉHO VINUTÍ.....	29
4.4.7 ALTERNÁTOR BEZ TLUMÍCÍHO VINUTÍ.....	30
4.5 ČASOVÉ KONSTANTY SYNCHRONNÍHO STROJE S TLUMÍCÍM VINUTÍM.....	30
4.5.1 RÁZOVÁ PODÉLNÁ ČASOVÁ KONSTANTA	30
4.5.2 PŘECHODNÁ PODÉLNÁ ČASOVÁ KONSTANTA.....	32
4.5.3 ČASOVÁ KONSTANTA STEJNOSMĚRNÉ SLOŽKY	33
4.6 ČASOVÉ KONSTANTY SYNCHRONNÍHO STROJE BEZ TLUMÍCÍHO VINUTÍ	33
4.6.1 ČASOVÁ KONSTANTA VOLNÉHO PROUDU BUDÍCÍHO VINUTÍ	34
4.6.2 ČASOVÁ KONSTANTA STEJNOSMĚRNÉ SLOŽKY PROUDU ZKRATU STATORU	34
4.7 ČASOVÝ PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU VE VINUTÍ STATORU	35
4.7.1 STRÍDAVÁ SLOŽKA ZKRATOVÉHO PROUDU STROJE S HLADKÝM ROTOREM	35
4.7.2 STEJNOSMĚRNÁ SLOŽKA ZKRATOVÉHO PROUDU STROJE S HLADKÝM ROTOREM	37
4.7.3 VÝSLEDNÝ ZKRATOVÝ PROUD STROJE S HLADKÝM ROTOREM	38
4.7.4 STRÍDAVÁ SLOŽKA ZKRATOVÉHO PROUDU STROJE S VYNIKLÝMI PÓLY	39
4.7.5 STEJNOSMĚRNÁ SLOŽKA ZKRATOVÉHO PROUDU STROJE S VYNIKLÝMI PÓLY	39
4.7.6 VÝSLEDNÝ ZKRATOVÝ PROUD STROJE S VYNIKLÝMI PÓLY	39
4.8 TROJFÁZOVÝ ZKRAT V SÍTI.....	40
5 MĚŘENÍ REAKTANCÍ.....	41
5.1 ZKOUŠKA NAPRÁZDNO A NAKRÁTKO	41

5.1.1 VÝPOČET REAKTANCI Z MĚŘENÍ NAPRÁZDNO A NAKRÁTKO.....	42
5.1.2 FALLOUOVA METODA	42
5.2 ZKOUŠKA NÁHLÝM TROJFÁZOVÝM ZKRATEM	43
5.2.1 PŘECHODNÁ PODÉLNÁ REAKTANCE	43
5.2.2 RÁZOVÁ PODÉLNÁ REAKTANCE	43
5.3 ZKOUŠKA PŘI DVOUFÁZOVÉM SPOJENÍM NAKRÁTKO S UZLEM VINUTÍ.....	43
5.3.1 NETOČIVÁ REAKTANCE	44
5.4 ZKOUŠKA NÁHLÝM DVOUFÁZOVÝM ZKRATEM	44
5.4.1 ZPĚTNÁ REAKTANCE.....	44
6 MĚŘENÍ ZKRATOVÉHO PROUDU SYNCHRONNÍHO STROJE	45
6.1 ZKOUŠENÝ SYNCHRONNÍ STROJ.....	45
6.2 VÝPOČET REAKTANCÍ Z CHARAKTERISTIKY NAPRÁZDNO A NAKRÁTKO	46
6.2.1 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY NAPRÁZDNO A NAKRÁTKO	48
6.3 URČENÍ NETOČIVÉ REAKTANCE ZE ZKOUŠKY PŘI DVOUFÁZOVÉM SPOJENÍ KOTVY NAKRÁTKO S UZLEM VINUTÍ.....	49
6.4 ČASOVÝ PRŮBĚH TROJFÁZOVÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU.....	50
6.4.1 ČASOVÝ PRŮBĚH TROJFÁZOVÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU PŘI NAPĚTÍ NAPRÁZDNO 67 V	51
6.4.2 ČASOVÝ PRŮBĚH TROJFÁZOVÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU PŘI NAPĚTÍ NAPRÁZDNO 91 V	54
6.4.3 ČASOVÝ PRŮBĚH TROJFÁZOVÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU PŘI NAPĚTÍ NAPRÁZDNO 119 V ...	57
6.4.4 ČASOVÝ PRŮBĚH TROJFÁZOVÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU PŘI NAPĚTÍ NAPRÁZDNO 138 V ...	60
6.4.5 ČASOVÝ PRŮBĚH TROJFÁZOVÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU PŘI NAPĚTÍ NAPRÁZDNO 161 V ...	63
6.4.6 VYHODNOCENÍ VELIČIN ZÍSKANÝCH Z ČASOVÉHO PRŮBĚHU TROJFÁZOVÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU.....	64
6.5 ČASOVÝ PRŮBĚH DVOUFÁZOVÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU.....	65
6.5.1 ČASOVÝ PRŮBĚH DVOUFÁZOVÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU PŘI NAPĚTÍ NAPRÁZDNO 140 V A ZKRATOVANÝCH FÁZÍCH L1 A L3.....	65
6.5.2 ČASOVÝ PRŮBĚH DVOUFÁZOVÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU PŘI NAPĚTÍ NAPRÁZDNO 117 V A ZKRATOVANÝCH FÁZÍCH L1 A L3.....	67
6.5.3 ČASOVÝ PRŮBĚH DVOUFÁZOVÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU PŘI NAPĚTÍ NAPRÁZDNO 92 V A ZKRATOVANÝCH FÁZÍCH L2 A L3.....	69
6.5.4 VYHODNOCENÍ VELIČIN ZÍSKANÝCH Z ČASOVÉHO PRŮBĚHU DVOUFÁZOVÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU.....	71
7 SIMULACE ZKRATOVÉHO PROUDU	71
7.1 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH ČASOVÝCH PRŮBĚHŮ ZKRATOVÉHO PROUDU SE SIMULACÍ.....	71
7.1.1 TROJFÁZOVÝ ZKRAT	73
7.1.2 DVOUFÁZOVÝ ZKRAT	76
8 ZÁVĚR.....	78
POUŽITÁ LITERATURA	79
PŘÍLOHA A PRŮBĚHY NAMĚŘENÉHO DVOUFÁZOVÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU.....	80
PŘÍLOHA B SROVNÁNÍ NAMĚŘENÉHO A NASIMULOVANÉHO DVOUFÁZOVÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU.....	83
PŘÍLOHA C PRŮBĚHY NAMĚŘENÉHO JEDNOFÁZOVÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU.....	84

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3-1 Rotor synchronního stroje a) s vyniklými póly, b) s hladkým rotorem [2].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 3-2 Schéma konstrukce rotoru synchronního stroje s vyniklými póly [3]</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3-3 Rozložení vinutí rotoru [3]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 4-1 Schéma zapínání jednofázového obvodu</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 4-2 Průběh a schéma rázového děje [3]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 4-3 Průběh a schéma přechodného děje [3].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 4-4 Průběh a schéma ustáleného děje [3]</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4-5 Náhradní schéma rázové podélné reaktance tlumícího vinutí [3]</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4-6 Náhradní schémata pro přechodnou reaktanci X'_f a reaktanci budícího vinutí X_f [3] ...</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 4-7 Náhradní schéma pro rázovou příčnou reaktanci X''_q [3]</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 4-8 Schéma pro určení rázové podélné časové konstanty</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 4-9 Schéma pro určení rázové podélné časové konstanty naprázdno</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 4-10 Schéma pro výpočet přechodné podélné časové konstanty</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 4-11 Schéma pro výpočet přechodné podélné časové konstanty naprázdno</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 4-12 Schéma pro určení časové konstanty stejnosměrné složky.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4-13 Náhradní schéma pro výpočet časové konstanty budícího vinutí.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 4-14 Průběh rázového zkratového proudu.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 4-15 Průběh přechodného rázového zkratového proudu.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 4-16 Průběh ustáleného zkratového proudu.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4-17 Průběh stejnosměrné složky zkratového proudu</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4-18 Časový průběh zkratového proudu ve vinutí A statoru, při $\alpha = 90^\circ$</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 4-19 Časový průběh zkratového proudu ve vinutí A statoru, při $\alpha = 0$</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 4-20 Časový průběh zkratového proudu ve vinutí A statoru stroje s vyniklými póly, při $\alpha = 0$</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 5-1 Charakteristika naprázdno a nakrátko synchronního stroje.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6-1 Zkoušený synchronní stroj [9]</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 6-2 Naměřená charakteristika naprázdno a nakrátko synchronního stroje</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 6-3 Schéma zapojení měření časového průběhu trojfázového zkratového proudu.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 6-4 Osciloskop Yokogawa DL850.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 6-5 Proudová sonda Chauvin Arnoux E3n</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 6-6 Časový průběh trojfázového zkratového proudu při $U_0 = 67 V$</i>	<i>51</i>

<i>Obr. 6-7 Obalové křivky zkratového proudu při $U_0 = 67 V$</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 6-8 Průběh periodické složky proudu při $U_0 = 67 V$</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 6-9 Přejídná a rázová složka proudu zkratu při $U_0 = 67 V$</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 6-10 Časový průběh trojfázového zkratového proudu při $U_0 = 91 V$</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 6-11 Obalové křivky zkratového proudu při $U_0 = 91 V$</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 6-12 Průběh periodické složky proudu při $U_0 = 91 V$</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 6-13 Přejídná a rázová složka proudu zkratu při $U_0 = 91 V$</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 6-14 Časový průběh trojfázového zkratového proudu při $U_0 = 119 V$</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 6-15 Obalové křivky zkratového proudu při $U_0 = 119 V$</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 6-16 Průběh periodické složky proudu při $U_0 = 119 V$</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 6-17 Přejídná a rázová složka proudu zkratu při $U_0 = 119 V$</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 6-18 Časový průběh trojfázového zkratového proudu při $U_0 = 138 V$</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 6-19 Obalové křivky zkratového proudu při $U_0 = 138 V$</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 6-20 Průběh periodické složky proudu při $U_0 = 138 V$</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 6-21 Přejídná a rázová složka proudu zkratu při $U_0 = 138 V$</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 6-22 Časový průběh trojfázového zkratového proudu při $U_0 = 161 V$</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 6-23 Obalové křivky zkratového proudu při $U_0 = 161 V$</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 6-24 Průběh periodické složky proudu při $U_0 = 161 V$</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 6-25 Časový průběh dvoufázového zkratového proudu při $U_0 = 140 V$ a zkratovaných fázích L1 a L3.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 6-26 Obalové křivky dvoufázového zkratového proudu při $U_0 = 140 V$</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 6-27 Časový průběh periodické složky dvoufázového zkratového proudu při $U_0 = 140 V$..</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 6-28 Časový průběh dvoufázového zkratového proudu při $U_0 = 117 V$ a zkratovaných fázích L1 a L3.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 6-29 Obalové křivky dvoufázového zkratového proudu při $U_0 = 117 V$ a zkratovaných fázích L1 a L3.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 6-30 Časový průběh periodické složky dvoufázového zkratového proudu při $U_0 = 117 V$ a zkratovaných fázích L1 a L3.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 6-31 Časový průběh dvoufázového zkratového proudu při $U_0 = 92 V$ a zkratovaných fázích L2 a L3.....</i>	<i>69</i>

<i>Obr. 6-32 Obalové křivky dvoufázového zkratového proudu při $U_0 = 92 V$ a zkratovaných fázích L2 a L3.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 6-33 Časový průběh periodické složky dvoufázového zkratového proudu při $U_0 = 92 V$ a zkratovaných fázích L2 a L3.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 7-1 Nastavení parametrů synchronního stroje pro simulaci</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 7-2 Schéma simulace průběhu zkratového proudu testovaného synchronního stroje.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 7-3 Srovnání zkratového proudu ve fázi L1 získaného měřením a simulací při $U_0 = 67 V$ a trojfázovém zkratu</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 7-4 Srovnání zkratového proudu ve fázi L2 získaného měřením a simulací při $U_0 = 67 V$ a trojfázovém zkratu</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 7-5 Srovnání zkratového proudu ve fázi L3 získaného měřením a simulací při $U_0 = 67 V$ a trojfázovém zkratu</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 7-6 Srovnání zkratového proudu ve fázi L1 získaného měřením a simulací při $U_0 = 91 V$ a trojfázovém zkratu</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 7-7 Srovnání zkratového proudu ve fázi L2 získaného měřením a simulací při $U_0 = 91 V$ a trojfázovém zkratu</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 7-8 Srovnání zkratového proudu ve fázi L3 získaného měřením a simulací při $U_0 = 91 V$ a trojfázovém zkratu</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 7-9 Srovnání zkratového proudu ve fázi L1 získaného měřením a simulací při $U_0 = 69 V$ a dvoufázovém zkratu</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 7-10 Srovnání zkratového proudu ve fázi L2 získaného měřením a simulací při $U_0 = 69 V$ a dvoufázovém zkratu</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 7-12 Srovnání zkratového proudu ve fázi L1 získaného měřením a simulací při $U_0 = 94 V$ a dvoufázovém zkratu</i>	<i>77</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 6-1 Specifikace zkoušeného synchronního stroje [9]</i>	45
<i>Tab. 6-2 Reaktance a časové konstanty zkoušeného stroje [9]</i>	45
<i>Tab. 6-3 Naměřené hodnoty pro sestavení charakteristiky naprázdno</i>	46
<i>Tab. 6-4 Naměřené hodnoty pro charakteristiku nakrátko při trojfázovém zkratu</i>	46
<i>Tab. 6-5 Naměřené hodnoty pro charakteristiku nakrátko, při dvoufázovém zkratu</i>	47
<i>Tab. 6-6 Naměřené hodnoty pro charakteristiku nakrátko, při jednofázovém zkratu</i>	47
<i>Tab. 6-7 Vyhodnocení zkoušky naprázdno a nakrátko</i>	48
<i>Tab. 6-8 Naměřené hodnoty potřebné k určení netočivé reaktance</i>	49
<i>Tab. 6-9 Vyhodnocení veličin získaných z časového průběhu trojfázového zkratového proudu</i>	65
<i>Tab. 6-10 Vyhodnocení veličin získaných z časového průběhu dvoufázového zkratového proudu</i>	71

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$\cos \varphi$	Účinit	
f	Frekvence	[Hz]
$i_A(t)$	Průběh proudu ve fázi A vinutí statoru	[A]
I_b	Budící proud	[A]
$i_B(t)$	Průběh proudu ve fázi B vinutí statoru	[A]
$i_C(t)$	Průběh proudu ve fázi C vinutí statoru	[A]
I_{k1f}	Velikost zkratového proudu ve fázi L1	[A]
I_{k2f}	Velikost zkratového proudu ve fázi L2	[A]
I_{k3f}	Velikost zkratového proudu ve fázi L3	[A]
I_{k1}	Průměrná hodnota jednofázového zkratového proudu	[A]
I_{k2}	Průměrná hodnota dvoufázového zkratového proudu	[A]
I_{k3}	Průměrná hodnota trojfázového zkratového proudu	[A]
I_n	Jmenovitý proud	[A]
i_p	Ustálená složka proudu	[A]
i_{1d}	Střídavá složka zkratového proudu	[A]
i_{1a}	Stejnoseměrná složka zkratového proudu	[A]
$I(\infty)$	Ustálená hodnota zkratového proudu	[A]
I_m	Maximální hodnota proudu	[A]
L	Indukčnost	[H]
L1,L2,L3	Označení jednotlivých fází trojfázové soustavy	
R	Rezistance	[Ω]
R_D	Odpor tlumícího vinutí v podélné ose	[Ω]
R_F	Odpor budícího vinutí	[Ω]
R_S	Odpor vinutí statoru	[Ω]
t	Čas	[s]
T_a	Časová konstanta stejnosměrné složky	[s]
T_a''	Časová konstanta stejnosměrné složky proudu zkratu statoru	[s]
T_d'	Podélná přechodná časová konstanta	[s]

T_d''	Podélná rázová časová konstanta	[s]
T_{d0}'	Podélná přechodná časová konstanta naprázdno	[s]
T_{d0}''	Rázová podélná časová konstanta naprázdno	[s]
T_{dk}'	Přechodná časová konstanta zkratu	[s]
T_{dk}''	Rázová časová konstanta zkratu	[s]
T_f'	Časová konstanta volného proudu budícího vinutí	[s]
U_m	Maximální hodnota napětí	[V]
U_n	Jmenovité napětí	[V]
U_0	Hodnota napětí naprázdno	[V]
X_{ad}	Podélná reaktance kotvy	[Ω]
X_{aq}	Příčná reaktance statorového vinutí	[Ω]
X_d	Podélná synchronní reaktance	[Ω]
x_d	Poměrná podélná synchronní reaktance	[%]
X_d'	Podélná přechodná reaktance	[Ω]
x_d'	Poměrná podélná přechodná reaktance	[%]
X_d''	Podélná rázová reaktance	[Ω]
x_d''	Poměrná podélná rázová reaktance	[Ω]
X_f	Ustálená reaktance budícího vinutí	[Ω]
X_f'	Podélná přechodná reaktance budícího vinutí	[Ω]
X_k	Synchronní reaktance zkratu	[Ω]
X_k'	Přechodná reaktance zkratu	[Ω]
X_k''	Rázová reaktance zkratu	[Ω]
X_t	Reaktance blokového transformátoru	[Ω]
X_q''	Příčná přechodná reaktance statorového vinutí	[Ω]
X_q''	Příčná rázová reaktance statorového vinutí	[Ω]
X_{tD}''	Podélná rázová reaktance tlumícího vinutí	[Ω]
X_σ	Rozptylová reaktance statorového vinutí	[Ω]
X_σ'	Rozptylová reaktance budícího vinutí na rotoru	[Ω]

$X_{\sigma d}$	Rozptylová reaktance tlumícího vinutí rotoru	[Ω]
$X_{\sigma dq}$	Rozptylová reaktance tlumícího vinutí v příčné ose	[Ω]
X_0	Netočivá reaktance statorového vinutí	[Ω]
X_2	Zpětná reaktance statorového vinutí	[Ω]
x_2	Poměrná zpětná reaktance statorového vinutí	[Ω]
Z	Impedance	[Ω]
ω	Úhlová rychlost	[rad. ^{s-1}]
α_0	Úhel určený okamžikem vzniku zkratu	[°]
$\Delta I'_k$	Rázová složka zkratového proudu	[A]
$\Delta I''_k$	Přechodná složka zkratového proudu	[A]

1 ÚVOD

Trojfázové synchronní alternátory představují v současné době hlavní zdroje elektrické energie v našich elektrárnách. Při provozu elektrizační soustavy dochází velmi často ke vzniku různých poruchových stavů. Současně pro správný návrh systému chránění je nutná znalost těchto poruchových jevů a dále schopnost tyto jevy modelovat a simulovat.

Při zkratu dochází k náhlému poklesu impedance obvodu, do místa zkratu tak tečou zkratové proudy ze všech zdrojů ES, my se v tomto případě budeme zabývat synchronním generátorem. Vznik zkratového proudu v ES je doprovázen změnou z jednoho na druhý ustálený stav. Tento přechod se neodehraje v jednom okamžiku, ale trvá jistou dobu, závislou na elektromagnetické energii zkratovaného obvodu.

Pro praktické aplikace teorie přechodných jevů synchronních alternátorů má velký význam znalost velikosti proudů v prvním okamžiku vzniku přechodného jevu. V praxi potřebujeme znát nejčastěji počáteční velikost střídavé složky statorového proudu.

Podle normy ČSN EN 60034-4 ed.2: Metody určování veličin synchronních strojů ze zkoušek se dají porovnat hodnoty udané výrobcem synchronního stroje s vypočtenými hodnotami, dle této normy.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je detailní seznámení se s průběhem zkratových proudů synchronních strojů obecně a dále s průběhem zkratových proudů konkrétních synchronních strojů. Práce bude doplněna měřeními zkratů na vybraných zdrojích a jejich simulací.

3 SYNCHRONNÍ STROJE

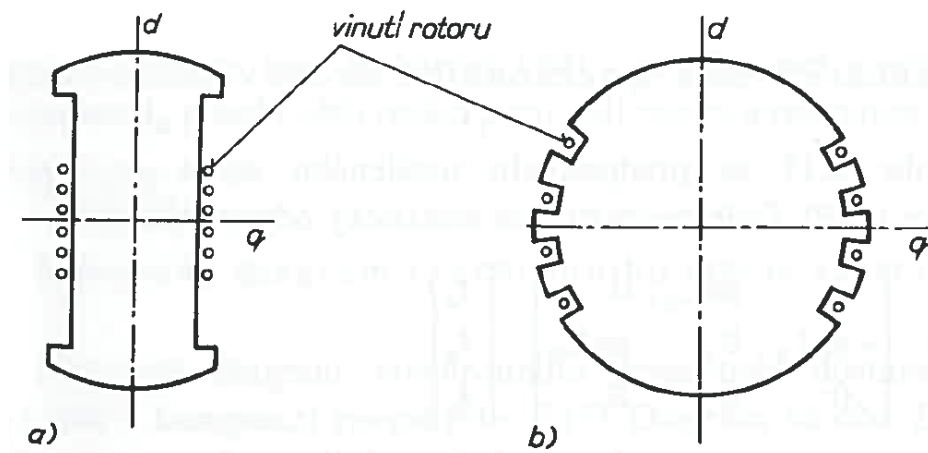
Synchronní generátory tvoří základní elektromechanické měniče energií při generaci elektrické energie v našich elektrárnách. Synchronní generátory jsou charakteristické tím, že nemění otáčky se změnou zatížení, ale mají meze zatížení pro zachování stability. Z hlediska otáček s nimi souvisejícím provedením se člení na dvě základní skupiny [1]:

- vysokorychlostní (turbo)generátory
- nízkorychlostní (hydro)generátory

Synchronní stroj je tvořen dvěma hlavními částmi: státorem a rotorem. Obě části jsou vybavené vinutími. Vinutí statoru je umístěno v drážkách rozmístěnými ekvidistantně podél jeho vnitřního obvodu a je složeno ze tří fragmentů příslušejících jednotlivým fázím. Budící vinutí turbogenerátorů je umístěno podobným způsobem v drážkách na rotoru, zatímco v případě hydrostrojů na vyniklých pólech rotoru, který je navíc vybaven tlumícím vinutím (amortizérem) tvořeného vodivými klíny v drážkách budícího vinutí. U hydroalternátorů se umísťuje do osových drážek v pólových nástavcích. Stejnoseměrný budící proud točícího se rotoru vyvolává ve stroji točivé magnetické pole, které indukuje v každé ze tří fází statorového vinutí napětí protlačující v případě uzavřeného obvodu statoru třífázový proud, který prostorovým součtem okamžitých hodnot vytváří své vlastní točivé magnetické pole. Točivé magnetické pole statoru se superponuje s tokem rotoru ve výsledný tok, který se otáčí synchronně s rotorem a synchronní úhlovou rychlostí vůči statoru.

V tlumícím vinutí rotoru se začnou dle téhož principu indukovat tlumící proudy v případě, že se úhlová rychlost rotoru z nějakého důvodu odchýlí od úhlové rychlosti aktivní sítě, do které stroj pracuje. Tyto proudy vyvolají pak magnetický tok a tím i moment opačného směru, který působí tlumícím účinkem na oscilace. [1]

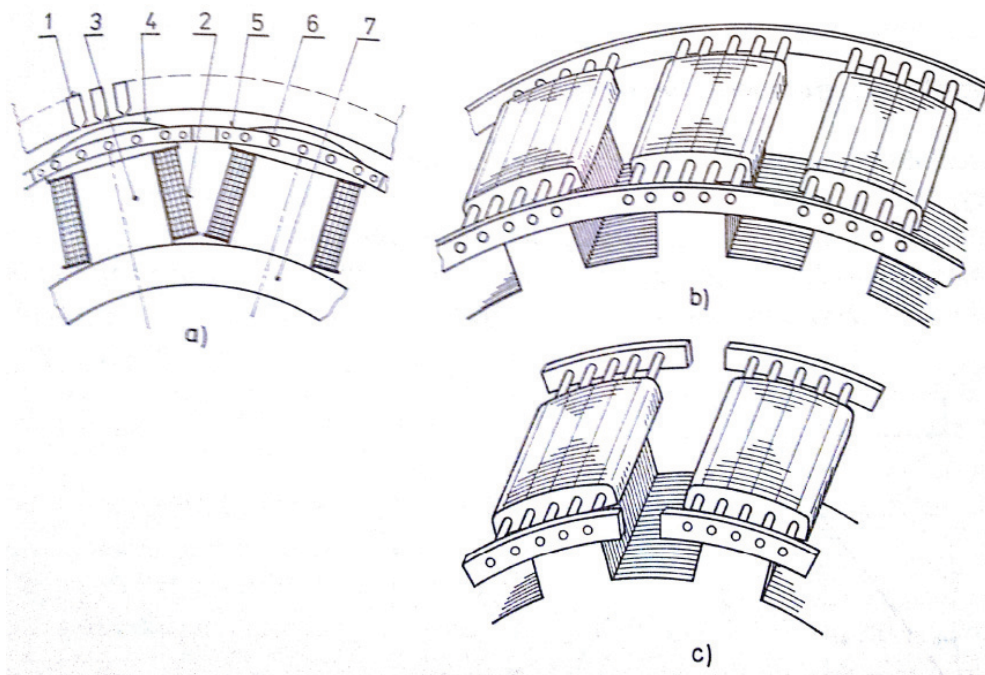
3.1 Rozdělení synchronních strojů



Obr. 3-1 Rotor synchronního stroje a) s vyniklými póly, b) s hladkým rotorem [2]

Rotory synchronních strojů jsou v principu dvojího druhu [3]:

- dvoupólové stroje a velké čtyřpólové stroje se navrhuje s hladkým rotorem, kdy budící vynutí je tvořeno rozloženými cívkami, vloženými do drážek po obvodu rotoru (Obr.3-1b);
- čtyřpólové stroje malých a středních výkonů a šestipólové a vícepólové stroje všech výkonů mají zpravidla rotor s vyniklými póly, u něhož je budící vinutí tvořeno cívkami, uloženými na jádrech pólů (Obr.3-2).

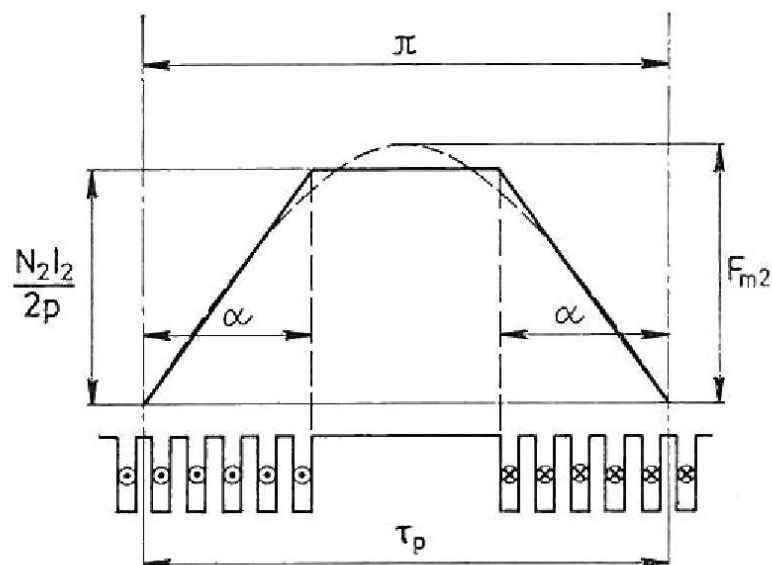


Obr. 3-2 Schéma konstrukce rotoru synchronního stroje s vyniklými póly [3]

a) umístění vinutí ve statoru a v rotoru: 1- drážky statoru, 2- cívky budícího vinutí, 3- jádro pólu, 4- pólový nástavec, 5- kruhy nakrátko tlumícího vinutí, 6 tyče tlumícího vinutí, 7- jho rotoru; b) tlumící vinutí s kruhy nakrátko, c) tlumící vinutí se segmenty

3.1.1 Synchronní stroj s hladkým rotorem

Rychloběžné synchronní stroje - turboalternátory - mají válcové rotory. Magnetický obvod rotoru včetně hřídele se vyrábí z výkovků, proto masiv rotoru plní současně i funkci tlumícího vinutí [3].



Obr. 3-3 Rozložení vinutí rotoru [3]

3.1.2 Synchronní stroj s vyniklými póly

Jedná se zpravidla o pomaluběžné generátory o mnoha pólech, v nichž nepůsobí tak vysoké odstředivé síly. Rozdílné magnetické vlastnosti v podélné (d) a příčné (q) ose způsobují, že matematický model synchronního stroje s vyniklými póly musí respektovat rozdílné indukčnosti a reaktance v osách d a q. [2]. Jak je vidět na Obr.3-1a, tak na hřídeli jsou po obvodu připevněny póly s cívkami, které jsou napájeny stejnosměrným proudem.

4 PŘECHODNÉ DĚJE V SYNCHRONNÍCH STROJÍCH

Přechodné děje vznikají v synchronních strojích (při rychlých změnách chodu stroje) při připojení k sítí a odpojení od ní, při rychlých změnách zatížení, při zkratech apod.[3]

Přechodné děje v synchronních strojích mohou mít vliv na stabilitu stroje, tj. na jeho schopnost udržet synchronní otáčky při změně ustáleného chodu. [3]

Při výpočtech elektromagnetických přechodných jevů v synchronních strojích se zavádějí některá zjednodušení, která usnadňují řešení. Jsou to především tato zjednodušení [4] :

1. Předpokládá se konstantní (synchronní) úhlová rychlost rotoru stroje během přechodného jevu.
2. Všechny tlumící obvody na rotoru se nahrazují jedním tlumícím vinutím v podélné ose a jedním v příčné ose.
3. Zanedbává se vliv magnetického sycení, takže vlastní a vzájemné indukčnosti jsou nezávislé na velikosti proudů a magnetické toky stroje jsou lineárními funkcemi proudů.
4. Předpokládá se sinusové prostorové rozložení magnetomotorického napětí ve vzduchové mezeře.
5. Předpokládá se plná symetrie statorového vinutí a symetrie rotoru vzhledem k jeho podélné a příčné ose.

4.1 Trojfázový zkrat na svorkách nezatíženého synchronního stroje

Trojfázový zkrat na svorkách synchronního stroje je typickým případem rychlé změny jeho zatížení, který pracoval před zkratem naprázdno. Proudové ve statorovém vinutí se v krátké době zvětší z nulové hodnoty na hodnoty mnohonásobně vyšší, než je jmenovitý proud statoru. Tyto proudy se nazývají zkratové.

Předpokládá se, že trvání přechodného jevu je velmi krátká doba a otáčky rotoru se za tuto dobu prakticky nezmění a zůstanou konstantní.

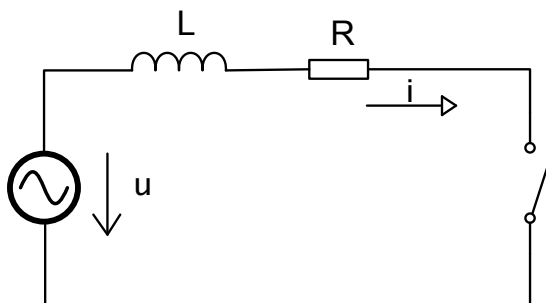
Zkratované statorové vinutí má odpor s porovnáním s jeho reaktancí malý, proto můžeme zkratové proudy považovat v prvním přiblížení za čistě jalové, zpožděné za elektromotorickou silou o 90° . [3]

4.2 Zapínání obvodu třífázového proudu

Při výpočtu zkratových proudů, je často z hlediska dimenzování, důležité znát jejich časový průběh. Pro vysvětlení některých situací časového průběhu bude zvolen jednoduchý elektrický obvod R, L. Pokud všechny tři fáze spínají ve stejném časovém okamžiku, lze pro pochopit zapínání považovat trojfázový systém za tři nezávislé obvody. V takovém případě jsou napětí ve všech fázích stejná, avšak časově posunuta o 120 elektrických stupňů, tj. o $\frac{2}{3}\pi$ a pokud jsou zátěže stejné, pak je stejně velká i ustálená složka proudu a ve všech fázích posunutá o úhel φ oproti napětí. Velikost ustálené složky proudu tedy je

$$i_p = \frac{U_m}{Z} \cdot \sin(\omega t + \varphi - \alpha) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi - \alpha) \quad (4.1)$$

,kde $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ a $\alpha = \arctg \frac{\omega L}{R}$.



Obr. 4-1 Schéma zapínání jednofázového obvodu

Budeme uvažovat, že před zkratem byl obvod ve stavu naprázdno, tudíž $i(0) = 0$ a napájený zdrojem harmonického napětí $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$.

Obvod se připojí v čase $t=0$ na sinusové napětí a popisuje se rovnicí pomocí druhého Kirchhoffova zákona,

$$u_L + u_R = u \quad (4.2)$$

, která po dosazení za jednotlivá napětí přejde do tvaru:

$$L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i = u = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (4.3)$$

Toto je diferenciální rovnice prvního řádu s konstantními koeficienty a pravou stranou, která je funkcí času. Pro řešení, které se provede klasickým způsobem platí počáteční podmínka (pro $t=0$) $i(0) = 0$.

Platí:

$$i(t) = i_a(t) + i_p(t) \quad (4.4)$$

Řešení homogenní rovnice je

$$i_a(t) = k \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.5)$$

kde $\tau = \frac{L}{R}$.

Obecné řešení tedy je,

$$i(t) = k \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi - \alpha) \quad (4.6)$$

kde k je integrační konstanta, která se určí z počáteční podmínky pro $t=0$,

$$i(0) = 0 = k + I_m \cdot \sin(\varphi - \alpha) \quad (4.7)$$

odkud,

$$k = I_m \cdot \sin(\varphi - \alpha) \quad (4.8)$$

a tedy po dosazení do rovnice (4.7) se obdrží řešení.

$$i(t) = I_m \cdot \left[\sin(\omega t + \varphi - \alpha) - \sin(\varphi - \alpha) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (4.9)$$

Pro výsledný proud mohou nastat dva případy, jestliže $\varphi = \alpha$, pak

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t) \quad (4.10)$$

V tomto případě přechodný jev nenastane, aperiodická složka je rovna nule a tedy je to případ z hlediska proudového zatížení nejvýhodnější [5].

Jestliže $\varphi - \alpha = 90^\circ$ pak,

$$i(t) = I_m \cdot \cos\left(\omega t - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (4.11)$$

Tento případ je z hlediska proudového zatížení nejméně příznivý. Aperiodická složka se vyvinula v maximální míře, superponovala se na periodickou složku $i_p(t)$. [5]

4.3 Zkratové proudy statorového vinutí

Zkratové proudy statorového vinutí se skládají ze dvou složek, a to střídavou složku i_{1d} a stejnosměrnou složku i_{1a} . Velikost stejnosměrné složky proudu závisí na okamžiku vzniku zkratu, jelikož součet obou složek musí být v tomto okamžiku ($t=0$) nulový, a to ve všech fázích.

Střídavé složky zkratových proudů ve fázích statoru vybudí točivé pole, které se otáčí synchronně s rotorem.

Stejnoseměrné složky zkratových proudů ve fázích statoru vybudí v prostoru stojaté netočivé pole.

Tyto dvě pole, jenž byla vybudena zkratovými proudy, před vznikem zkratu ve stroji neexistovala. Jejich vznik vyvolá v souladu s Lenzovým pravidlem reakci ve všech uzavřených obvodech stroje, s kterými jsou tato pole spřažena. V oněch obvodech vznikají proudy, které

působí proti vytvoření nových polí. [3]

Točivé pole, jenž bylo vybuzeno střídavými složkami zkratových proudů statorových vinutí, a které se otáčí synchronně s rotorem, vyvolá v tlumícím a budícím vinutí nekmitavé jednosměrné proudy. Velikost takto vzniklých proudů se vlivem ztrát ve vinutích postupně snižuje, až je nulová. Tyto proudy vybudí magnetické pole, otáčející se synchronně s točivým polem statoru.

Stojící netočivé pole statoru, které bylo vybuzené stejnosměrnými složkami zkratových proudů statoru vyvolá v tlumícím a budícím vinutí střídavé proudy o frekvenci f_1 , které se zmenšují tak, jak se zmenšují stejnosměrné složky zkratových proudů statoru. [3]

4.4 Reaktance synchronních strojů

Reaktancemi se nahrazuje alternátor při výpočtech prvního okamžiku přechodného jevu. Náhlá změna zatížení generátoru, způsobená zkratovou poruchou je doprovázena přechodným dějem, v níž dochází k plynulým změnám reaktancí. [5]

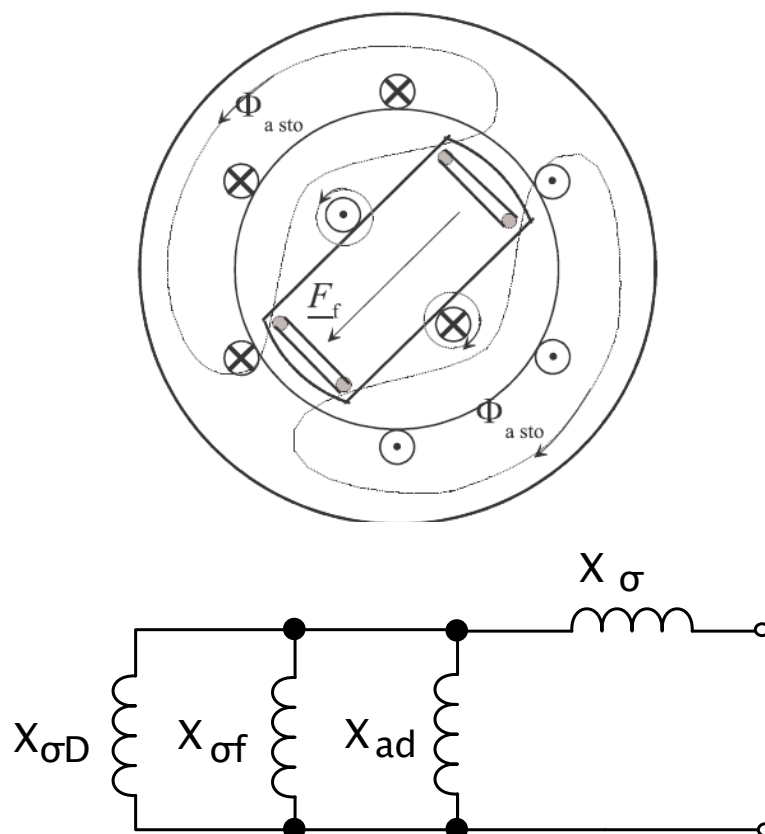
U synchronních strojů uvažujeme následující předpoklady [5]:

1. omezuje se jen na první harmonickou
2. činné odpory se respektují jen pro výpočet časových konstant, jinak se zanedbávají
3. předpokládáme jen jalové zatížení - indukční
4. vzhledem k tomu, že zkrat je ind. zatížení, takže osa magneto motorické síly reakce statoru splývá s podélnou osou magnetů, je pro výpočet zkratů nejdůležitější reaktance podélná - tudíž se předpokládá stejné chování v poloze podélné i příčné
5. reaktance vyjadřujeme poměrnými hodnotami

Reaktance synchronních strojů se v průběhu zkratu značně mění.

4.4.1 Rázová reaktance

Přechodný děj v první části probíhá podle náhradního schématu (Obr.4-2) s reaktancí v podélné ose X_d'' [6]. Tok vybuzený střídavou složkou proudů ve statorovém vinutí rotorem nesmí procházet (smyčkami tlumícího a budícího vinutí). V budícím a tlumícím vinutí se proto indukují proudy vyvolávající tok opačný, který se uzavírá rozptylovými cestami. Generátor se nachází v rázovém stavu.



Obr. 4-2 Průběh a schéma rázového děje [3]

Výpočet rázové reaktance

$$X_d'' = X_{\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma D}}} \quad (4.12)$$

kde X_{σ} je rozptylová reaktance statorového vinutí,

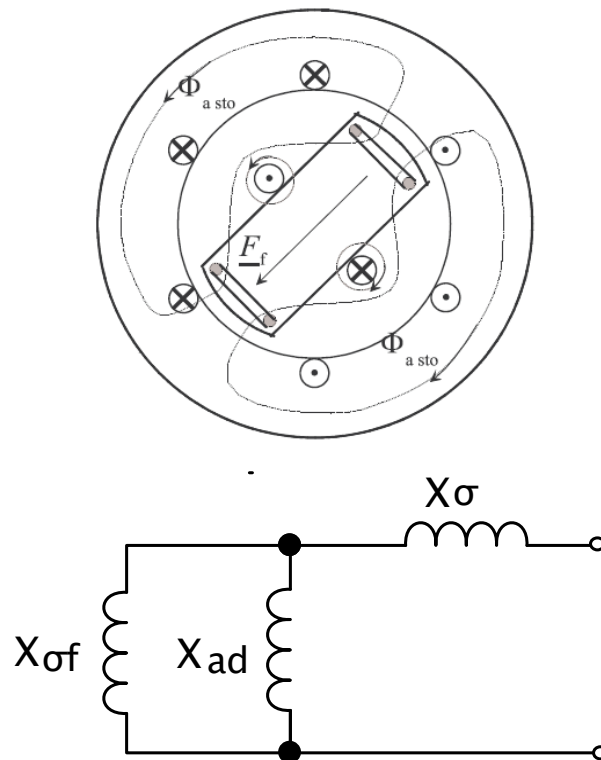
X_{ad} - podélná reaktance kotvy,

$X_{\sigma f}$ - rozptylová reaktance budícího vinutí na rotoru,

$X_{\sigma D}$ - rozptylová reaktance tlumícího vinutí rotoru.

4.4.2 Přechodná reaktance

V druhé části přechodného děje se uplatňuje výsledná přechodná reaktance, kterou se získá z náhradního schématu podle Obr.4-3 [6]. Postupně se zmenšují proudy v tlumícím a budícím vinutí a magnetické pole statoru postupně proniká do rotoru a jeho vinutí. Proud v tlumícím vinutí se zmenšuje rychleji, než ve vinutí budícím, proto statorové pole pronikne dříve do tlumícího vinutí. Jakmile proud v tlumícím vinutí zmenší na nulu, reaktance statoru bude rovna přechodné podélné reaktanci statoru [3]. Nyní se generátor nachází v přechodném stavu.



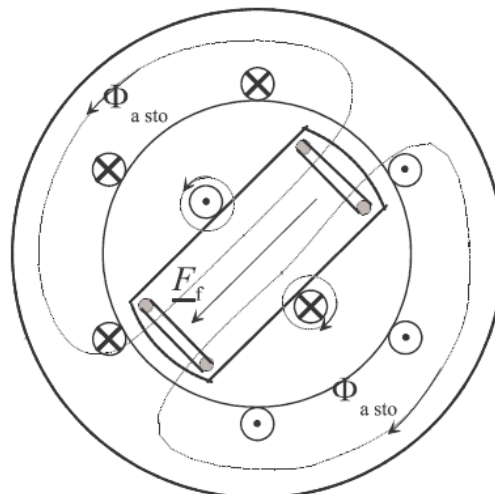
Obr. 4-3 Průběh a schéma přechodného děje [3]

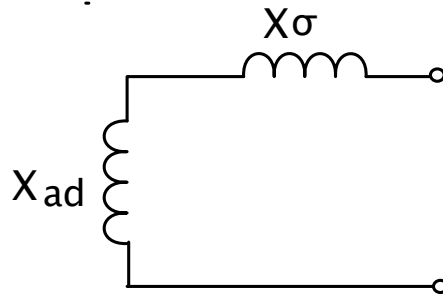
Výpočet přechodné reaktance

$$X'_d = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}}} \quad (4.13)$$

4.4.3 Synchronní reaktance

V třetí části přechodného děje tj. v ustáleném stavu se uplatňuje synchronní reaktance, která se určí podle náhradního schématu podle Obr.4-4. Došlo k zatlumení přechodné složky proudu v budícím vinutí rotoru, tok od statorového vinutí může protékat celým rotorem, tj. po dráze s minimální reluktancí. Generátor se nachází v ustáleném stavu.





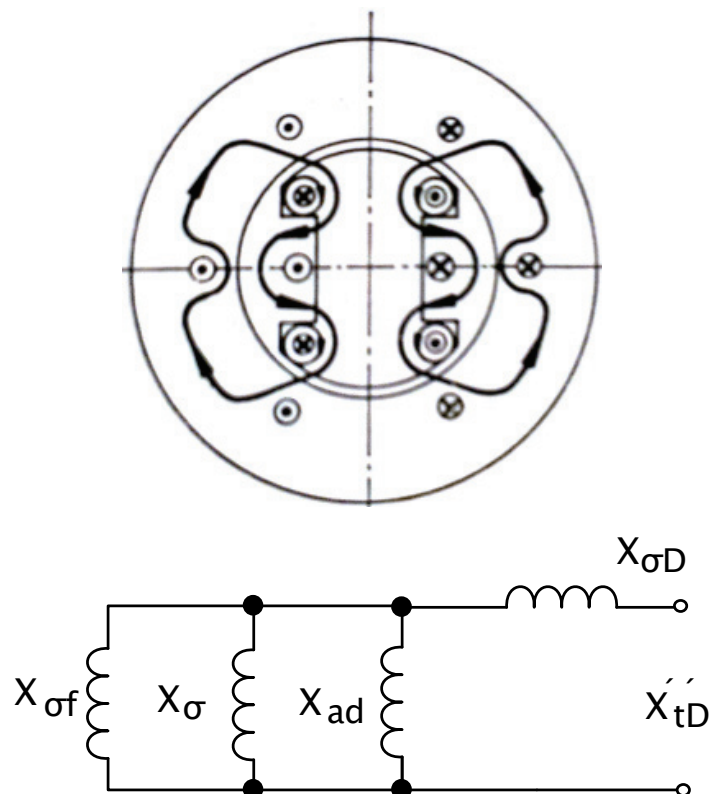
Obr. 4-4 Průběh a schéma ustáleného děje [3]

Výpočet synchronní reaktance

$$X'_d = X_\sigma + X_{ad} \quad (4.14)$$

4.4.4 Rázová reaktance tlumícího vinutí

Rázová podélná reaktance tlumícího vinutí je určena podobně jako rázová podélná reaktance statorového vinutí X''_d . Uvažuje se, že tlumící vinutí je primárním a že ve stroji se nachází ještě dvě vinutí uzavřená, a to statorové a budící. Tuto reaktance se určí podle schématu na Obr.4-5.



Obr. 4-5 Náhradní schéma rázové podélné reaktance tlumícího vinutí [3]

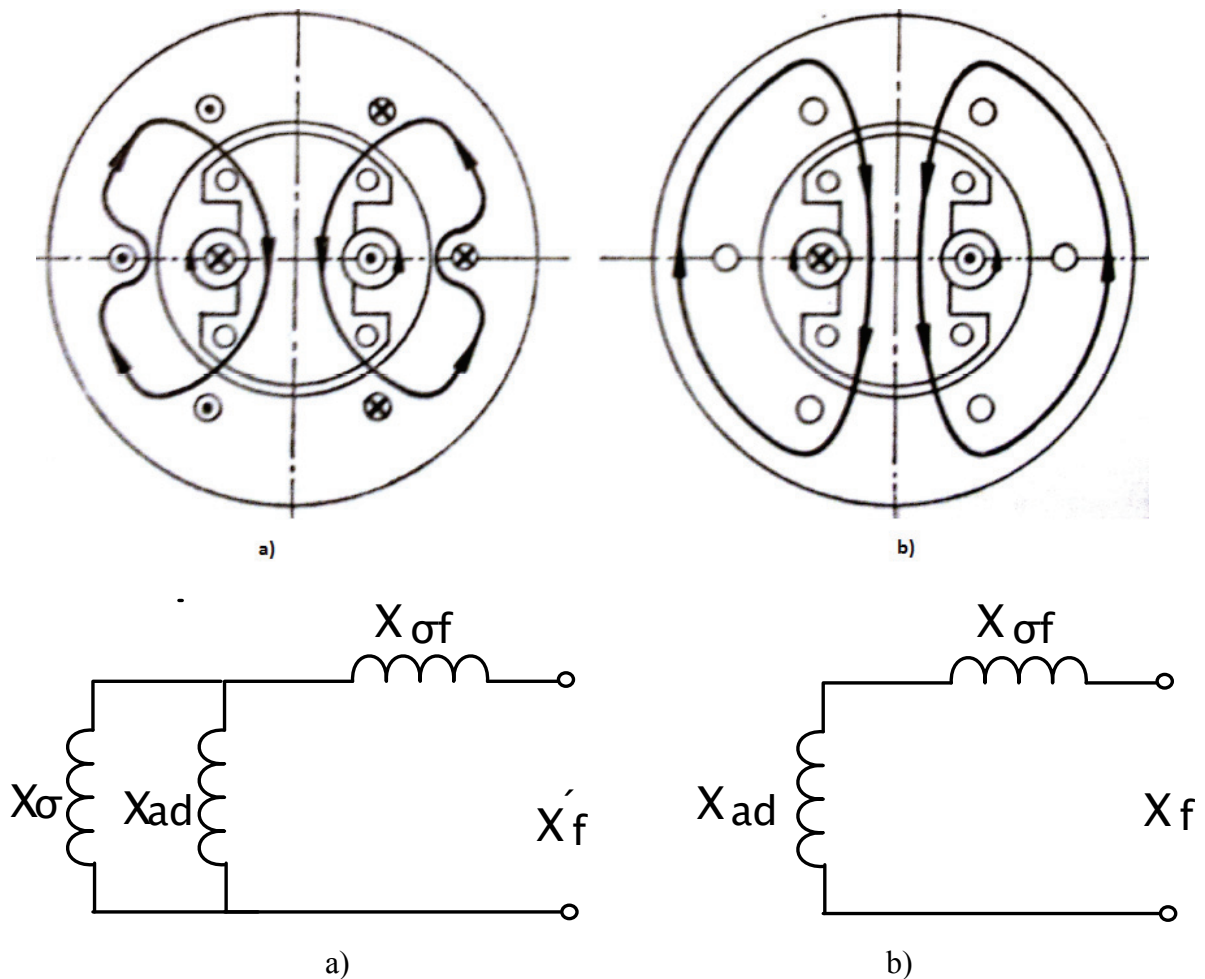
Výpočet rázové podélné reaktance tlumícího vinutí

$$X''_{iD} = X_{\sigma D} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{of}} + \frac{1}{X_{\sigma}}} \quad (4.15)$$

kde X''_{iD} je rázová podélná reaktance tlumícího vinutí.

4.4.5 Přechodná a ustálená reaktance budícího vinutí

Přechodná podélná reaktance budícího vinutí je určena podobně jako přechodná podélná reaktance statorového vinutí X'_d . Uvažuje se, že budící vinutí je primárním a že ve stroji se nachází ještě jedno nakrátko uzavřené vinutí, a to statorové vinutí. Tuto reaktance se určí podle schématu na Obr.4-6.



Obr. 4-6 Náhradní schémata pro přechodnou reaktanci X'_f a reaktanci budícího vinutí X_f [3]

- výpočet přechodné podélné reaktance budícího vinutí

$$X'_f = X_{\sigma f} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma}}} \quad (4.16)$$

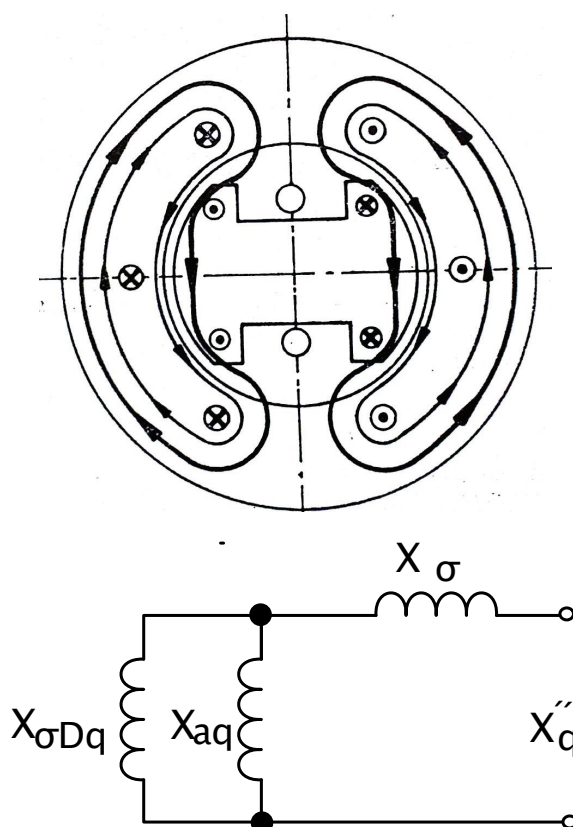
kde X'_f - přechodná podélná reaktance budícího vinutí.

- výpočet reaktance budícího vinutí

$$X_f = X_{ad} + X_{\sigma f} \quad (4.17)$$

4.4.6 Rázová příčná reaktance statorového vinutí

Rázová příčná reaktance statorového vinutí je určena podobně jako rázová příčná reaktance statorového vinutí X''_d . Tato reaktance se určí podle schématu na Obr.4-7. Na tomto obrázku není zakreslena reaktance budícího vinutí, protože v příčné ose toto vinutí u normálních strojů neexistuje.



Obr. 4-7 Náhradní schéma pro rázovou příčnou reaktanci X''_q [3]

Výpočet rázové příčné reaktance

$$X_q'' = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_{aq}} + \frac{1}{X_{\sigma Dq}}} \quad (4.18)$$

kde X_{aq} - příčná reaktance statorového vinutí,

$X_{\sigma Dq}$ - rozptylová reaktance tlumících vinutí v příčné ose.

4.4.7 Alternátor bez tlumícího vinutí

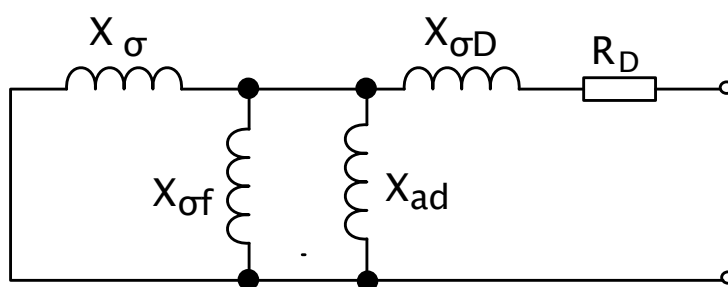
Reaktance alternátoru bez tlumícího vinutí se počítají stejně jako u alternátoru s tlumícím vinutím, s tím rozdílem, že z nich odpadají všechny členy označené dvěma čárkami ('').

4.5 Časové konstanty synchronního stroje s tlumícím vinutím

Tlumič alternátoru nahrazujeme při výpočtech dvěma vinutími D a Q, umístěnými v podélné a příčné ose. časové konstanty stanovujeme za předpokladu nulové rezistance statorového vinutí. V podélné ose stroje jsou za tohoto předpokladu tři magneticky vázané obvody, v příčné ose jsou dva magneticky vázané obvody. [4]

4.5.1 Rázová podélná časová konstanta

Při určování rázové časové konstanty se vychází ze schématu na Obr.4-8. Toto schéma vychází z Obr.4-2, kdy se určovala rázová reaktance statorového vinutí.



Obr. 4-8 Schéma pro určení rázové podélné časové konstanty

Výpočet rázové podélné časové konstanty.

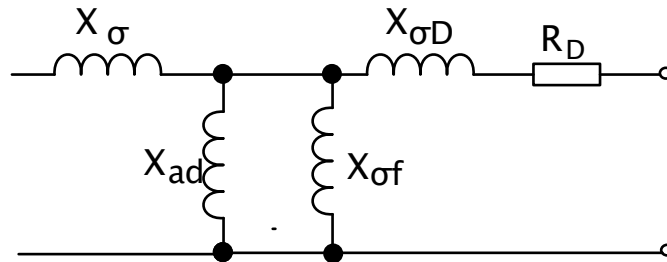
$$T_d'' = \frac{X_{\sigma D} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_\sigma} + \frac{1}{X_{\sigma f}}}}{\omega \cdot R_D} \quad (4.19)$$

kde R_D - odpor tlumícího vinutí v podélné ose.

Pokud se podíváme na vztah (4.15), může se rovnice (4.19) upravit.

$$T_d'' = \frac{X_{td}''}{\omega \cdot R_D} \quad (4.20)$$

Výpočet rázové podélné časové konstanty statoru naprázdno.



Obr. 4-9 Schéma pro určení rázové podélné časové konstanty naprázdno

$$T_{d0}'' = \frac{X_{\sigma D} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}}}}{\omega \cdot R_D} \quad (4.21)$$

Pokud se porovnají rovnice (4.19) a (4.21), obdrží se

$$T_d'' = T_{d0}'' \cdot \frac{X_{\sigma D} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_\sigma}}}{X_{\sigma D} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}}}} \quad (4.22)$$

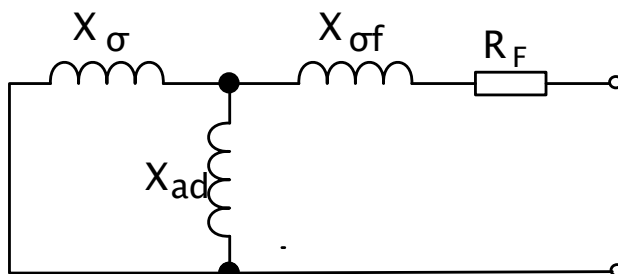
a pokud se zanedbá X_σ

$$T_d'' = T_{d0}'' \cdot \frac{X_{\sigma D}}{X_{\sigma D} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}}}} \cong T_{d0}'' \cdot \frac{X_d''}{X_d'} \quad (4.23)$$

4.5.2 Přechodná podélná časová konstanta

Při určování přechodné časové konstanty se vychází ze schématu na Obr.4-10. Toto schéma vychází z Obr.4-3, kde se určovala přechodná reaktance statorového vinutí.

Výpočet přechodné podélné časové konstanty.



Obr. 4-10 Schéma pro výpočet přechodné podélné časové konstanty

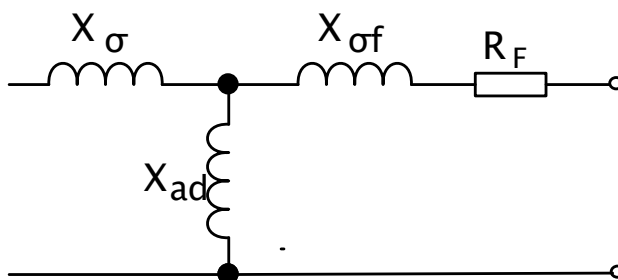
$$T'_d = \frac{X_{\sigma f} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma}}}}{\omega \cdot R_F} \quad (4.24)$$

kde R_f - je odpor budícího vinutí.

Pokud se uvažuje vztah (4.17), může se rovnice (4.24) upravit

$$T'_d = \frac{X'_f}{\omega \cdot R_f} \quad (4.25)$$

Výpočet přechodné podélné časové konstanty naprázdno



Obr. 4-11 Schéma pro výpočet přechodné podélné časové konstanty naprázdno

$$T'_{d0} = \frac{X_{\sigma f} + X_{ad}}{\omega \cdot R_f} \quad (4.26)$$

Pokud se uvažuje vztah (4.17), může se rovnice (4.26) upravit.

$$T'_{d0} = \frac{X_f}{\omega \cdot R_f} \quad (4.27)$$

Pokud se porovnají rovnice (4.24) a (4.26), dostane se

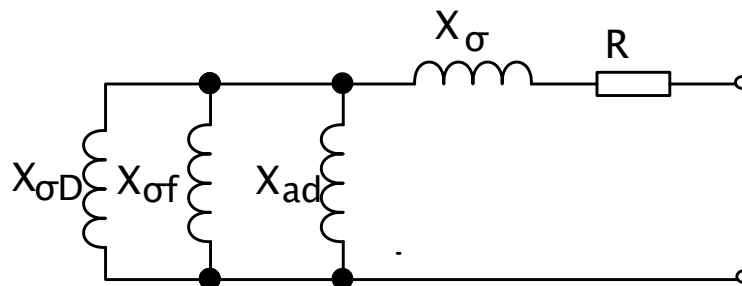
$$T'_d = T'_{d0} \cdot \frac{X_{\sigma f} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma}}}}{X_{\sigma f} + X_{ad}} \quad (4.28)$$

při zanedbání X_{σ}

$$T'_d \cong T'_{d0} \cdot \frac{X_{\sigma f}}{X_{\sigma f} + X_{ad}} \cong T'_{d0} \cdot \frac{X'_d}{X_d} \quad (4.29)$$

4.5.3 Časová konstanta stejnosměrné složky

Časová konstanta doznívání stejnosměrné složky zkratového proudu se stanoví na základě náhradního schématu na Obr.4-12.



Obr. 4-12 Schéma pro určení časové konstanty stejnosměrné složky

$$T_a = \frac{X_{\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma D}}}}{\omega \cdot R} \quad (4.30)$$

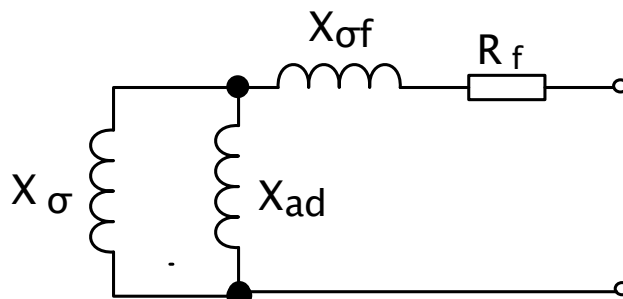
kde R - je odpor vinutí statoru.

4.6 Časové konstanty synchronního stroje bez tlumícího vinutí

Časové konstanty rotoru synchronního stroje bez tlumícího vinutí se vypočítají tak, že se zanedbá rezistance statorového vinutí a při výpočtu časových konstant statorových obvodů se zanedbá rezistance rotorových vinutí. [4]

4.6.1 Časová konstanta volného proudu budícího vinutí

Pokud se zanedbá rezistance statorového vinutí, představuje toto vinutí obvod bez rezistance, magneticky spřažený s budícím vinutím. Tomu odpovídá náhradní schéma na Obr.4-13.



Obr. 4-13 Náhradní schéma pro výpočet časové konstanty budícího vinutí

Z tohoto schématu se obdrží pro časovou konstantu budícího vinutí při zkratovaném statorovém vinutí výraz

$$T_f' = \frac{X_f'}{\omega \cdot R_f} \quad (4.31)$$

,kde

$$X_f' = X_{\sigma f} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma}}} \cong \frac{X_f}{X_d} \cdot X_d' \quad (4.32)$$

Po dosazení do (4.31)

$$T_f' = \frac{X_f}{\omega \cdot R_f} \cdot \frac{X_d'}{X_d} = T_f \cdot \frac{X_d'}{X_d} \quad (4.33)$$

Pokud by se nezanedbala rezistance statorového vinutí, změnil by se vztah (4.33) podle [4] na:

$$T_f' = T_f \cdot \frac{X_d' \cdot X_q + R^2}{X_d \cdot X_q + R^2} \quad (4.34)$$

4.6.2 Časová konstanta stejnosměrné složky proudu zkratu statoru

Časová konstanta stejnosměrné složky proudu zkratu statoru je dle [3] dána vztahem

$$T_a'' = \frac{X_2}{\omega \cdot R_1} \quad (4.35)$$

, kde X_2 je zpětná reaktance statorového vinutí a vypočítá se podle vztahu

$$X_2 = \frac{2 \cdot X'_d \cdot X'_q}{X'_d + X'_q} \approx \frac{X'_d + X'_q}{2} \quad (4.36)$$

4.7 Časový průběh zkratového proudu ve vinutí statoru

Velikosti proudů v jednotlivých fázích statoru se dá popsat rovnicemi:

$$i_A(t) = -i_m(t) \cdot \cos(\omega t + \alpha) - i_m(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_a}} \cdot \cos \alpha \quad (4.37)$$

$$i_B(t) = -i_m(t) \cdot \cos\left(\omega t + \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) - i_m(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_a}} \cdot \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4.38)$$

$$i_C(t) = -i_m(t) \cdot \cos\left(\omega t + \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) - i_m(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_a}} \cdot \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4.39)$$

V případě trojfázového zkratu na svorkách nezatíženého synchronního alternátoru jsou všechna napětí stejná a leží v ose q stroje.

$$\overline{E}_q'' = \overline{E}_q' = \overline{E}_q = \overline{E}_{10} = \overline{U}_{10} \quad (4.40)$$

4.7.1 Střídavá složka zkratového proudu stroje s hladkým rotorem

Nyní bude uvažován synchronní alternátor s hladkým rotorem a tlumičem. V průběhu zkratu se postupně mění reaktance statoru, tím se zmenšuje také amplituda střídavé složky zkratu i_{1d} od maximální hodnoty $\sqrt{2} \cdot \frac{E_{10}}{X_d''}$, do hodnoty minimální. $\sqrt{2} \cdot \frac{E_{10}}{X_d}$. Tato skutečnost se dá vyjádřit vztahem,

$$i_{1d} = -\sqrt{2} \cdot E_{10} \cdot \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d} \right] \cdot \cos(\omega t + \alpha_0) \quad (4.41)$$

, kde α_0 - úhel určený okamžikem vzniku zkratu.

Tento zkratový proud je složen ze tří složek a to rázového, přechodného a ustáleného zkratového proudu.

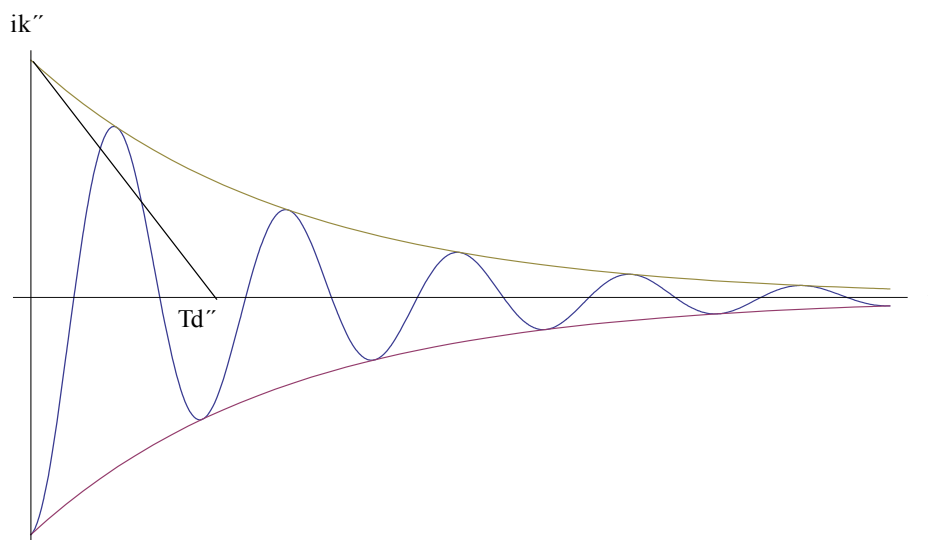
4.7.1.1 Rázový zkratový proud stroje s hladkým rotorem

Rázový zkratový proud je dán vztahem,

$$i''_{1d} = -\sqrt{2} \cdot E_{10} \cdot \left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] \cdot \cos(\omega t + \alpha_0) \quad (4.42)$$

kde α_0 - úhel určený okamžikem vzniku zkratu.

Průběh tohoto proudu je zobrazen vidět na následujícím obrázku:



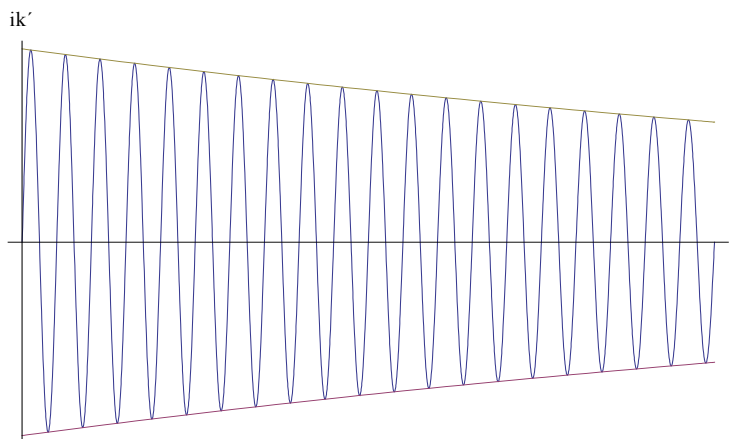
Obr. 4-14 Průběh rázového zkratového proudu

4.7.1.2 Přechodný zkratový proud stroje s hladkým rotorem

Přechodný zkratový proud je dán vztahem:

$$i'_{1d} = -\sqrt{2} \cdot E_{10} \cdot \left[\left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} \right] \cdot \cos(\omega t + \alpha_0) \quad (4.43)$$

Průběh tohoto proudu je zobrazen na následujícím obrázku:



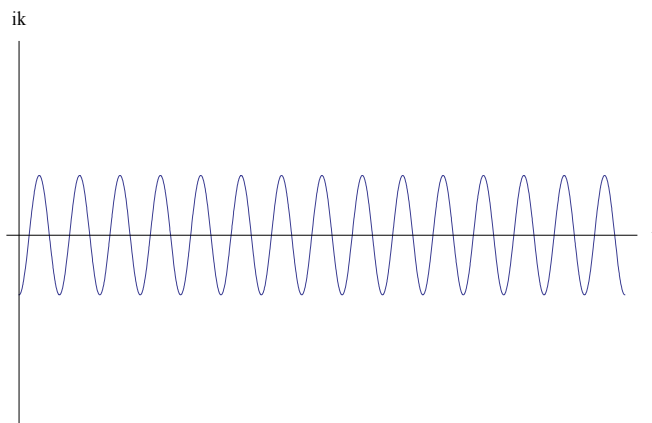
Obr. 4-15 Průběh přechodného rázového zkratového proudu

4.7.1.3 Ustálený zkratový proud stroje s hladkým rotorem

Ustálený zkratový proud je tvořen vztahem:

$$i_{1d\infty} = -\sqrt{2} \cdot E_{10} \cdot \left[\frac{1}{X_d} \right] \cdot \cos(\omega t + \alpha_0) \quad (4.44)$$

Průběh tohoto proudu je zobrazen na následujícím obrázku:



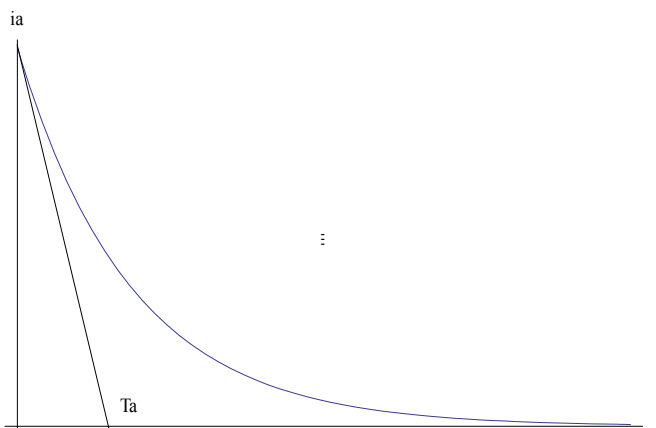
Obr. 4-16 Průběh ustáleného zkratového proudu

4.7.2 Stejnoseměrná složka zkratového proudu stroje s hladkým rotorem

U strojů s hladkým rotorem jsou periodické změny stejnosměrné složky zanedbatelné a platí, že:

$$i_{1a} = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{10}}{X_d''} \cdot e^{-\frac{t}{T_d}} \cos(\alpha_0) \quad (4.45)$$

Průběh stejnosměrné složky zkratového proudu je zobrazen na následujícím obrázku:



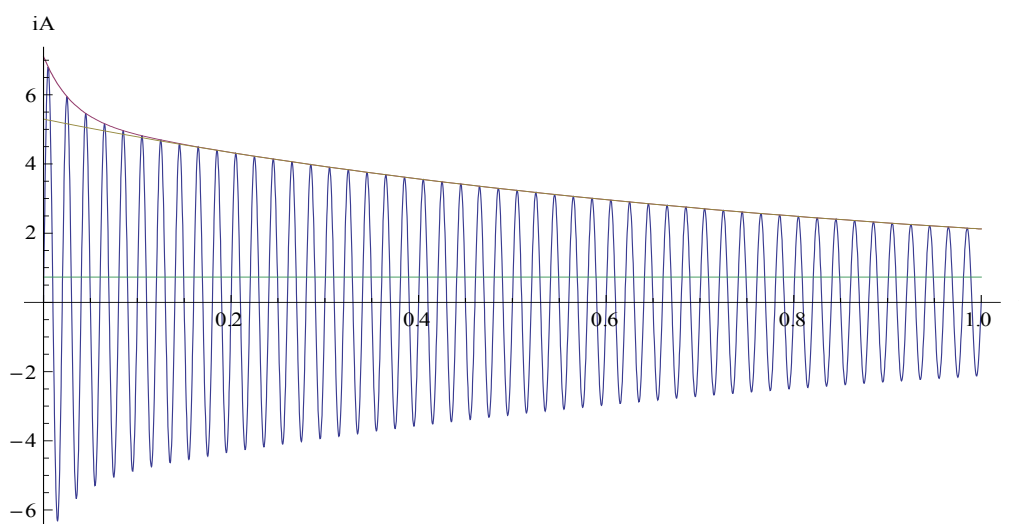
Obr. 4-17 Průběh stejnosměrné složky zkratového proudu

4.7.3 Výsledný zkratový proud stroje s hladkým rotorem

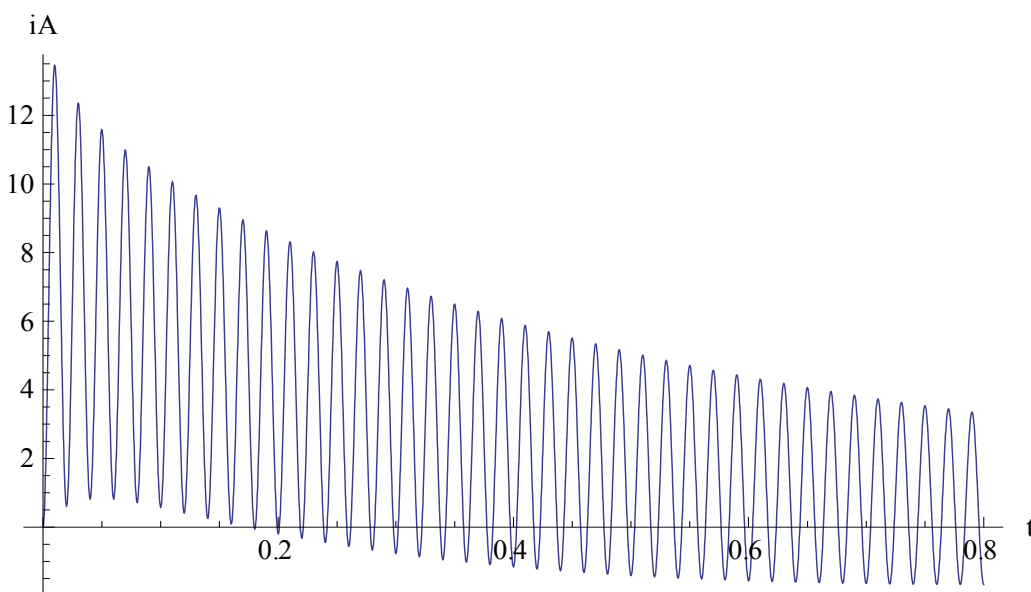
Výsledný zkratový proud stroje s hladkým rotorem se obdrží, pokud se sečte rázová, přechodná, ustálená a stejnosměrná složka zkratové proudy. Výsledná vztah pro takto obdržený zkratový proud je uveden v následujícím vztahu.

$$i_1 = -\sqrt{2} \cdot E_{10} \cdot \cos(\omega t + \alpha_0) \cdot \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d} \right] + \frac{\sqrt{2} \cdot E_{10}}{X_d''} \cdot e^{-\frac{t}{T_A}} \cos(\alpha_0) \quad (4.46)$$

Na následujících dvou obrázcích jsou zobrazeny obecné průběhy zkratového proudy ve vinutí A statoru:



Obr. 4-18 Časový průběh zkratového proudy ve vinutí A statoru, při $\alpha = 90^\circ$



Obr. 4-19 Časový průběh zkratového proudy ve vinutí A statoru, při $\alpha = 0$

4.7.4 Střídavá složka zkratového proudu stroje s vyniklými póly

Střídavá složka zkratového proudu stroje s vyniklými póly je totožná, jako střídavá složka zkratového proudu stroje s hladkým rotorem podle vztahu (4.38)

4.7.5 Stejnoseměrná složka zkratového proudu stroje s vyniklými póly

Stejnoseměrná složka proudu statoru i_{1a} se ve strojích s vyniklými póly při svém postupném zmenšování periodicky mění. To je způsobeno tím, že netočivé magnetické pole, vybuzené proudem i_{1a} , kmitá s dvojnásobnou frekvencí $2f_1$. Tento jev je způsoben vlivem opakující se změny magnetického odporu cesty, po které se toto pole uzavírá. Změna magnetického odporu je způsobena změnou polohy rotoru (osy d a q) vůči ose netočivého magnetického pole.[3]

Proud i_{1a} se pak mění a dá se určit dle [3] ze vztahu:

$$i_{1a} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot E_{10} \cdot \left[\left(\frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) \cdot \cos(\alpha_0) + \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''} \right) \cdot \cos(2\omega t + \alpha_0) \right] \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d'}} \quad (4.47)$$

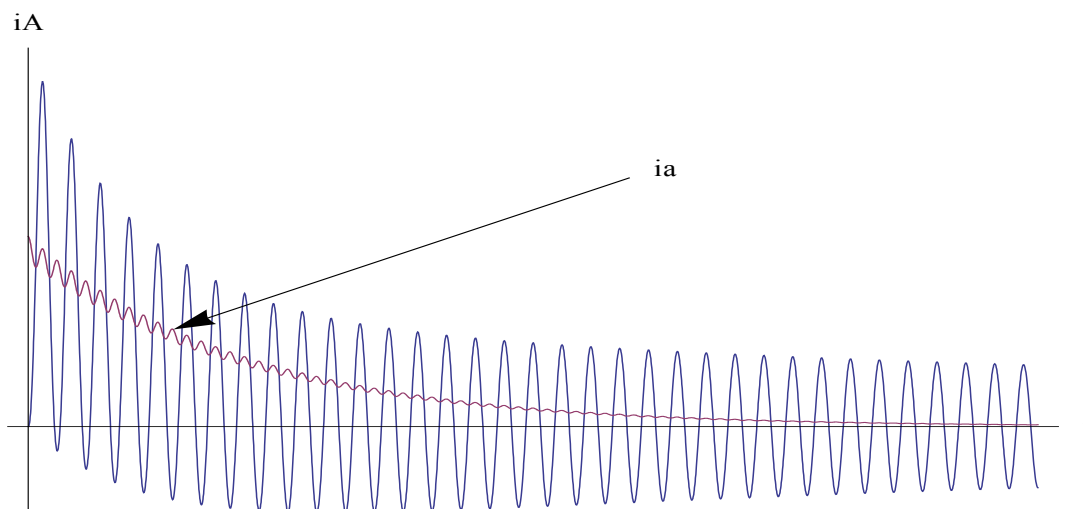
4.7.6 Výsledný zkratový proud stroje s vyniklými póly

Výsledný zkratový proud stroje s vyniklými póly je tedy opět součtem střídavé i_{1d} (4.38) a stejnosměrné (4.42) složky.

$$i_1 = i_{1d} + i_{1a} \quad (4.48)$$

$$i_1(t) = -\sqrt{2} \cdot E_{10} \cdot \cos(\omega t + \alpha_0) \cdot \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d'}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d}} + \frac{1}{X_d} \right] + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot E_{10} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d'}} \cdot \left[\left(\frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) \cdot \cos(\alpha_0) + \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''} \right) \cdot \cos(2\omega t + \alpha_0) \right] \quad (4.49)$$

Následující obrázek zobrazuje časový průběh zkratového proudu pro fázi A statoru.



Obr. 4-20 Časový průběh zkratového proudu ve vinutí A statoru stroje s vyniklými póly, při $\alpha = 0$

4.8 Trojfázový zkrat v síti

Uvažuje se, že ke zkratu došlo v době, kdy nebyl synchronní stroj zatížen. V tomto případě se musí započítat kromě reaktancí samotného stroje, také reaktance vnějšího zkratového obvodu.

V případě, že ke zkratu dojde za blokovým transformátorem, bude se místo rázové, přechodné a synchronní reaktance stroje počítat s :

- rázovou reaktancí zkratu

$$X_k'' = X_d'' + X_t \quad (4.50)$$

- přechodnou reaktancí zkratu

$$X_k' = X_d' + X_t \quad (4.51)$$

- synchronní reaktancí zkratu

$$X_k = X_d + X_t \quad (4.52)$$

Jestliže dochází ke zkratu za blokovým transformátorem, mění se časové konstanty přechodných složek takto:

- rázová časová konstanta zkratu

$$T_{dk}'' = T_d'' \cdot \frac{X_d'' + X_t}{X_d''} \cong T_{d0}'' \cdot \frac{X_d'' + X_t}{X_d' + X_t} \quad (4.53)$$

- přechodná časová konstanta

$$T_{dk}' = T_d' \cdot \frac{X_d' + X_t}{X_d'} \cong T_{d0}' \cdot \frac{X_d' + X_t}{X_d + X_t} \quad (4.54)$$

5 MĚŘENÍ REAKTANCÍ

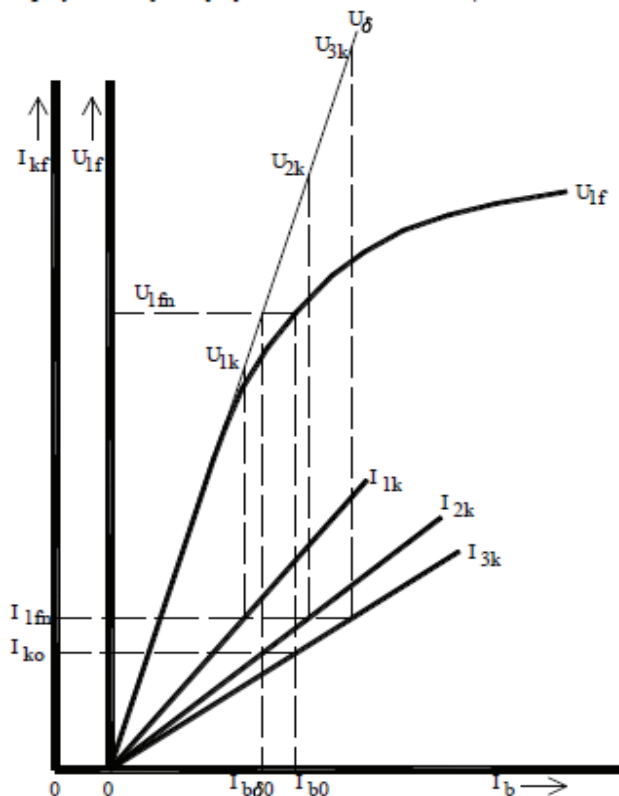
5.1 Zkouška naprázdno a nakrátko

Zkouška naprázdno probíhá na zkoušeném synchronním stroji, který pracuje naprázdno. Touto problematikou se zabývá norma ČSN EN 60034-4 ed.2, dále jen [7]. Podle této normy se roztočí zkoušený synchronní stroj na jmenovité otáčky libovolným poháněcím strojem. Při provádění této zkoušky se mají změny buzení provádět v pravidelných krocích od vyšších hodnot napětí k nižším. Nejvyšší hodnota napětí by měla být minimálně 1,3 násobek jmenovitého napětí stroje. V průběhu zkoušky se zaznamenává budící proud a svorkové napětí.

Trojfázová zkouška nakrátko se provádí opět podle [7]. Zkoušený synchronní stroj se opět roztočí libovolným poháněcím strojem na jeho jmenovité otáčky. Spojení nakrátko má být provedeno co nejbližší u svorek stroje. Budící proud má být připojen až po spojení svorek nakrátko. Proud kotvy se mění řízením budícího proudu a při měření se zaznamenává proud kotvy a budící proud. Jedna z hodnot by měla být zaznamenána v okolí jmenovitého proudu statoru a dále se pokračuje po krocích v sestupném pořadí až na nulovou hodnotu budícího proudu.

Dále se dá změřit dvoufázová a jednofázová zkouška nakrátko, která probíhá stejně jako trojfázová zkouška nakrátko s rozdílem počtu vykrácených fází.

Vyhodnocení těchto zkoušek se provede tak, že zaznamenané hodnoty z provedených zkoušek se vynesou do společné grafické závislosti, kde na vodorovné ose bude vynesena budící proud a na horizontální ose hodnoty napětí a proudu.



Obr. 5-1 Charakteristika naprázdno a nakrátko synchronního stroje

5.1.1 Výpočet reaktanci z měření naprázdno a nakrátko

Při zkoušce naprázdno a nakrátko se uplatňuje pouze podélná synchronní reaktance X_d . Tato reaktance se podle [8] všeobecně udává pro nenasycený stroj, tj. pro jmenovitý proud I_n a určí se jako poměr napětí naprázdno, které se odečítá na přímkové charakteristice vzduchové mezery U_δ , při hodnotě buzení odpovídající jmenovitému proudu.

- výpočet podélné synchronní reaktance

$$X_d = \frac{U_{3k}}{I_{1fn}} \quad (5.1)$$

- výpočet podélné synchronní reaktance v poměrných hodnotách

$$x_d = \frac{X_d}{X_n} \cdot 100 \quad (5.2)$$

Jmenovitá reaktance se vypočítá z jmenovitých hodnot stroje uvedených na štítku poměrem jmenovitého fázového napětí U_n ku fázovému proudu I_n .

- výpočet jmenovité reaktance

$$X_n = \frac{U_n}{I_n} \quad (5.3)$$

5.1.2 Fallouova metoda

Fallouova metoda podle [8] měří zpětnou reaktanci X_2 a netočivou reaktanci X_0 z charakteristiky naprázdno vzduchové mezery U_δ a ze tří charakteristik nakrátko I_{3k}, I_{2k}, I_{1k} při trojfázovém, dvoufázovém a jednofázovém chodu nakrátko dle Obrázku 4-1. Jednotlivé reaktance se vypočtou následujícím způsobem.

- zpětná reaktance

$$X_2 = \frac{U_{2k} \cdot \sqrt{3} - U_{3k}}{I_n} \quad (5.4)$$

- netočivá reaktance

$$X_0 = \frac{3 \cdot U_{1k} - U_{2k} \cdot \sqrt{3}}{I_n} \quad (5.5)$$

Určení jednotlivých reaktancí touto metodou je celkem snadné, ale výsledné hodnoty nejsou příliš přesné.

5.2 Zkouška náhlým trojfázovým zkratem

Postup této zkoušky vychází z normy [7]. Zkouška se provádí při jmenovitých otáčkách a vykrácení vinutí kotvy se provede, když stroj pracuje naprázdno při požadovaném napětí. Pro dosažení veličin, které odpovídají nasycenému stavu stroje se zkouška provede se jmenovitým napětím na svorkách stroje před vykrácením kotvy. Jestliže nemůže být zkouška provedena při jmenovitém napětí kotvy, je doporučeno provedení několika zkoušek při několika napětích kotvy a určení veličin pro každou zkoušku zvlášť. Oscilografuje se proud kotvy ve všech fázích. Z této zkoušky se dají určit následující veličiny.

5.2.1 Přechodná podélná reaktance

Přechodná podélná reaktance X'_d se určí ze zkoušky trojfázovým zkratem. Vypočítá se podle [7]:

$$X'_d = \frac{U_0}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{[I(\infty) + \Delta I'_K(0)]} \quad (5.6)$$

kde

U_0 je sdružené napětí naprázdno měřené bezprostředně před zkratem,

$I(\infty), \Delta I'_K(0)$ se určí z [7] podle 7.1.2.

5.2.2 Rázová podélná reaktance

Rázová podélná reaktance X''_d se určí ze zkoušky trojfázovým zkratem. Vypočítá se podle [7]:

$$X''_d = \frac{U_0}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{[I(\infty) + \Delta I'_K(0) + \Delta I''_K(0)]} \quad (5.7)$$

kde

U_0 je napětí naprázdno měřené bezprostředně před zkratem,

$I(\infty), \Delta I'_K(0), \Delta I''_K(0)$ se určí z [7] podle 7.1.2.

5.3 Zkouška při dvoufázovém spojení nakrátko s uzlem vinutí

Zkouška při dvoufázovém spojení nakrátko s uzlem vinutí se opět provede podle [7]. Jedná se o měření, kdy je vinutí kotvy zapojeno do hvězdy, dvě fázové svorky jsou spojeny nakrátko s uzlem vinutí. Zkoušený stroj je poháněn jmenovitými otáčkami. Měří se napětí U_0 mezi volnou fázovou svorkou a uzlem vinutí a proud I_0 protékající mezi fázovými svorkami spojenými nakrátko a uzlem vinutí [7]. Měření je opakováno pro několik hodnot proudu tekoucího do uzlu vinutí.

5.3.1 Netočivá reaktance

Netočivá reaktance X_0 je určena ze zkoušky při dvoufázovém spojení nakrátko s uzlem vinutí. Podle [7] se vypočítá jako:

$$X_0 = \frac{U_0}{I_0} \quad (5.8)$$

Netočivá reaktance by měla být vypočtena pro několik hodnot proudu tekoucího do uzlu vinutí. Na základě zkušebních údajů se X_0 vynese v závislosti na proudu tekoucího do uzlu vinutí [7].

5.4 Zkouška náhlým dvoufázovým zkratem

Postup této zkoušky vychází z normy [7]. Zkoušku se provádí při jmenovitých otáčkách a zkoušený stroj pracuje před zkratem naprázdno. Bezprostředně před zkratem se změří svorkové napětí stroje. Oscilografuje se napětí a proud ve vinutí kotvy u zkratovaných fází.

Pro získání reaktancí odpovídajících nasycenému stavu stroje má být napětí na svorkách zkoušeného stroje před dvoufázovým zkratem rovno jmenovitému. Pokud zkouška nemůže být provedena pro jmenovitou hodnotu napětí, může se provést při několika hodnotách sníženého napětí kotvy a reaktance se určí pro každou zkoušku zvlášť.

5.4.1 Zpětná reaktance

Zpětná reaktance X_2 se získá ze zkoušky náhlým dvoufázovým zkratem a podle [7] se určí podle vzorce:

$$X_2 = \frac{U}{I''} - X_d'' \quad (5.9)$$

kde

U je sdružené napětí kotvy naprázdno, měřené bezprostředně před zkratem,

I'' počáteční základní periodická složka proudu kotvy při dvoufázovém zkratu, získaná z oscilogramu jako součet $I(\infty) + \Delta I'_k(0) + \Delta I''_k(0)$,

X_d'' rázová podélná reaktance určena podle 4.2.2.

6 MĚŘENÍ ZKRATOVÉHO PROUDU SYNCHRONNÍHO STROJE

Poznatky, které byly uvedeny v teoretické části této práce budou ověřeny formou měření na zkoušeném synchronním stroji. Bude provedena zkouška naprázdno a nakrátko, z níž se vypočítají reaktance dle teoretické části této práce. Dále bude provedeno měření časového průběhu zkratového proudu pro trojfázový, dvoufázový a jednofázový zkrat na svorkách zkoušeného synchronního stroje. Z těchto získaných časových průběhů zkratového proudu budou určeny jednotlivé reaktance, charakterizující průběh zkratového proudu.

6.1 Zkoušený synchronní stroj

Měření je provedeno na zkoušeném synchronním stroji od společnosti Leroy Somer. Specifikace toho stroje jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 6-1 Specifikace zkoušeného synchronního stroje [9]

typ	LSA 37 M5
zdánlivý výkon	7,5 kVA
cos φ	0,8
jmenovité napětí	400V
frekvence	50 Hz
počet pólů	4
jmenovité otáčky	1500 ot/min

Jedná se o čtyřpólový stroj s vyniklými póly a tlumícím vinutím o zdánlivém výkonu 7,5 kVA a jmenovitých otáčkách 1500 ot/min. Tento stroj je poháněn řízeným asynchronním motorem s kterým je pevně spojen hřídel a tvoří soustrojí. Statorové vinutí zkoušeného stroje je zapojeno do hvězdy.



Obr. 6-1 Zkoušený synchronní stroj [9]

V následující tabulce jsou uvedeny reaktance a časové konstanty tohoto stroje, které udává výrobce.

Tab. 6-2 Reaktance a časové konstanty zkoušeného stroje [9]

veličina	typ	velikost
X_d	nenasyčená	140%
X_q	nenasyčená	70%
X'_d	nasycená	9,90%
X''_d	nasycená	4,90%
X''_q	nasycená	8,50%

X_0	nenasyčená	9,90%
X_2	nasyčená	6,70%
$T'd$	-	40ms
$T''d$	-	3,7ms
T_a	-	6ms
T'_{do}	-	522ms

6.2 Výpočet reaktancí z charakteristiky naprázdno a nakrátko

Výpočet reaktancí z charakteristiky naprázdno a nakrátko vychází z kapitoly 5.1. Do společného grafu je vynesena závislost napětí kotvy naprázdno na měnícím se budícím proudu a závislost proudu nakrátko (pro trojfázový, dvoufázový a jednofázový zkrat) opět na budícím proudu. Naměřené hodnoty vedoucí k sestavení charakteristiky naprázdno a nakrátko jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 6-3 Naměřené hodnoty pro sestavení charakteristiky naprázdno

I_b [mA]	NAHORU				DOLŮ					U_0 [V]
	U_{01f} [V]	U_{02f} [V]	U_{03f} [V]	$U_{0nahoru}$ [V]	I_b [mA]	U_{10f} [V]	U_{20f} [V]	U_{30f} [V]	U_{0dolu} [V]	
0	25,90	25,80	25,80	25,83	0,00	32,00	31,80	31,80	31,87	28,85
97	57,00	56,80	56,80	56,87	93,00	66,40	66,20	66,20	66,27	61,57
235	100,00	99,70	99,80	99,83	234,00	117,20	116,70	116,80	116,90	108,37
303	121,30	120,80	121,00	121,03	302,00	140,20	139,60	139,80	139,87	130,45
408	154,90	154,30	154,50	154,57	407,00	170,80	170,20	170,30	170,43	162,50
496	177,70	177,10	177,30	177,37	483,00	186,40	185,80	186,00	186,07	181,72
592	197,40	196,80	196,90	197,03	595,00	207,50	206,90	207,10	207,17	202,10
677	211,40	210,80	210,90	211,03	678,00	218,20	217,70	217,80	217,90	214,47
702	214,70	214,10	214,20	214,33	703,00	220,90	220,50	220,50	220,63	217,48
744	220,20	219,60	219,70	219,83	747,00	225,20	224,70	224,80	224,90	222,37
802	226,70	226,10	226,20	226,33	807,00	230,30	229,80	229,90	230,00	228,17
851	231,30	230,80	230,90	231,00	852,00	233,50	233,00	233,10	233,20	232,10
903	235,90	235,40	235,40	235,57	901,00	236,70	236,30	236,30	236,43	236,00
953	239,60	239,20	239,20	239,33	953,00	239,60	239,20	239,20	239,33	239,33

Tab. 6-4 Naměřené hodnoty pro charakteristiku nakrátko při trojfázovém zkratu

I_b [mA]	I_{k1f} [A]	I_{k2f} [A]	I_{k3f} [A]	I_{k3} [A]
783	10,05	9,94	9,92	9,97
753	9,71	9,65	9,65	9,67
701	9,11	9,04	9,07	9,07
654	8,59	8,55	8,55	8,56
597	7,96	7,91	7,91	7,93
548	7,38	7,33	7,34	7,35
504	6,90	6,87	6,86	6,88
402	5,72	5,70	5,70	5,71
310	4,59	4,57	4,58	4,58
200	3,33	3,31	3,32	3,32
107	2,23	2,22	2,22	2,22
0	0,98	0,97	0,97	0,97

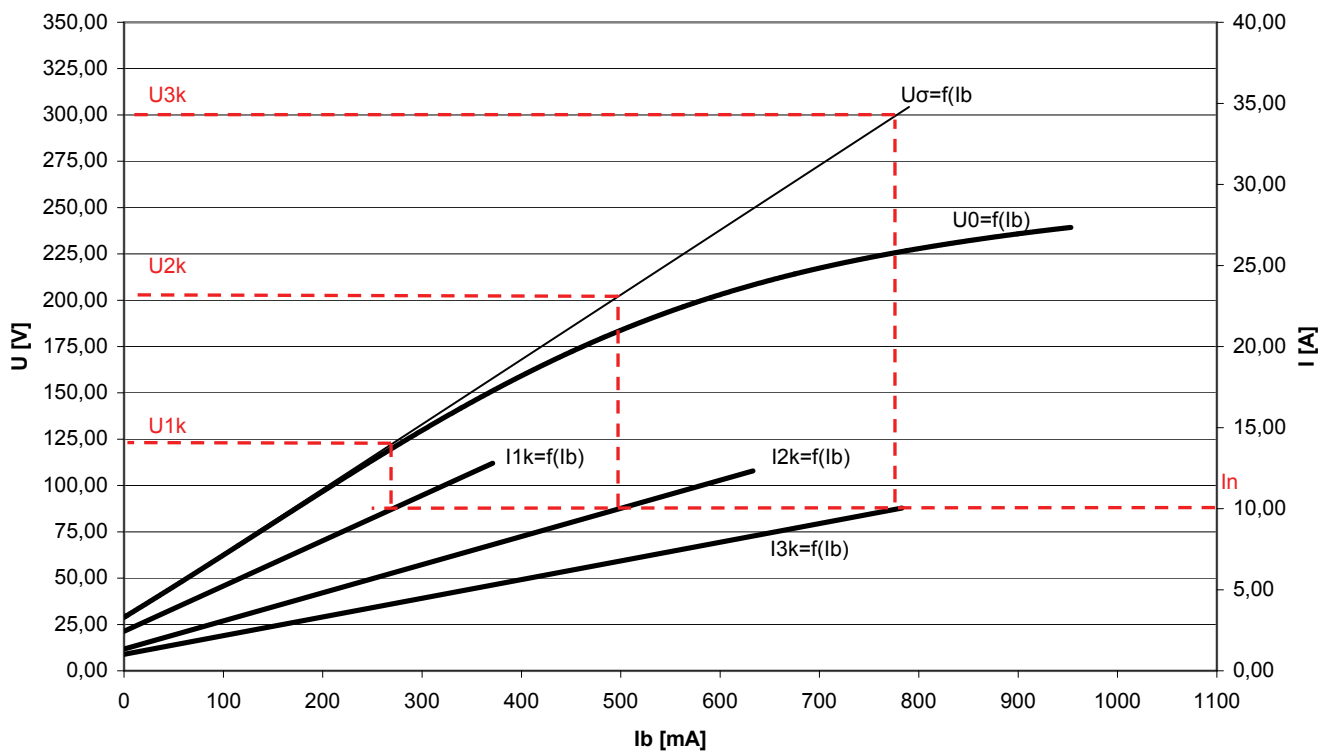
Tab. 6-5 Naměřené hodnoty pro charakteristiku nakrátko, při dvoufázovém zkratu

I_b [mA]	I_{k1f} [A]	I_{k2f} [A]	I_{k1f} [A]	I_{k3f} [A]	I_{k2f} [A]	I_{k3f} [A]	I_{k2} [A]
483	9,73	9,74	9,57	9,56	10,05	10,02	9,78
387	7,85	7,87	7,95	7,95	8,38	8,35	8,06
246	5,47	5,49	5,43	5,44	5,74	5,72	5,55
143	3,74	3,75	3,49	3,50	4,03	4,02	3,76
47	2,15	2,16	1,93	1,93	2,27	2,26	2,12
0	1,45	1,46	1,36	1,36	1,51	1,56	1,45

Tab. 6-6 Naměřené hodnoty pro charakteristiku nakrátko, při jednofázovém zkratu

I_b [mA]	I_{k1f} [A]	I_{k2f} [A]	I_{k1f} [A]	I_{k1} [A]
221	9,83	8,20	7,90	8,64
136	7,14	5,81	5,72	6,22
92	5,71	4,68	4,52	4,97
36	3,87	3,14	3,08	3,36
0	2,80	2,40	2,37	2,52

Z naměřených hodnot se již dá sestavit charakteristika naprázdno a nakrátko a je uvedena na následujícím obrázku.



Obr. 6-2 Naměřená charakteristika naprázdno a nakrátko synchronního stroje

Dosazením do rovnic 5.1-5.5 se již vypočítají jednotlivé reaktance.

- výpočet podélné synchronní reaktance

$$X_d = \frac{U_{3k}}{I_{1fn}} = \frac{302}{10} = 30,2 \Omega \quad (6.1)$$

- výpočet podélné synchronní reaktance v poměrných hodnotách

$$x_d = \frac{X_d}{X_n} \cdot 100 = \frac{30,2}{23} \cdot 100 = 131,3 \% \quad (6.2)$$

- výpočet jmenovité reaktance

$$X_n = \frac{U_n}{I_n} = \frac{230}{10} = 23 \Omega \quad (6.3)$$

- zpětná reaktance

$$X_2 = \frac{U_{2k} \cdot \sqrt{3} - U_{3k}}{I_n} = \frac{202 \cdot \sqrt{3} - 302}{10} = 4,787 \Omega \quad (6.4)$$

- zpětná reaktance v poměrných jednotkách

$$x_2 = \frac{X_2}{X_n} \cdot 100 = \frac{4,787}{23} \cdot 100 = 20,81 \% \quad (6.5)$$

- netočivá reaktance

$$X_0 = \frac{3 \cdot U_{1k} - U_{2k} \cdot \sqrt{3}}{I_n} = \frac{3 \cdot 124 - 202 \cdot \sqrt{3}}{10} = 2,213 \Omega \quad (6.6)$$

- netočivá reaktance v poměrných hodnotách

$$x_0 = \frac{X_0}{X_n} \cdot 100 = \frac{2,213}{23} \cdot 100 = 9,62 \% \quad (6.7)$$

6.2.1 Vyhodnocení zkoušky naprázdno a nakrátko

Vyhodnocení zkoušky naprázdno a nakrátko se provede tak, že vypočtené reaktance se srovnají s hodnotami, které udává výrobce zkoušeného stroje. Tyto údaje jsou vyneseny do následující tabulky, aby se daly porovnat.

Tab. 6-7 Vyhodnocení zkoušky naprázdno a nakrátko

veličina	jednotka	vypočtená hodnota	hodnota udaná výrobcem
X_d	[%]	131,3	140
X_2	[%]	20,81	-
X_0	[%]	9,62	9,9

Z Tab.6-7 je zřejmé, že vypočtené hodnoty a hodnoty udávané výrobcem zkoušeného synchronního stroje se mírně liší. Veškeré hodnoty byly z grafu odečteny pro velikost jmenovitého proudu, tedy pro nenasyčený stav. Vypočtená poměrná podélná synchronní reaktance x_d je 131,3 %, zatímco udávaná hodnota je 140 %. Do měření byly zaneseny nepřesnosti vlivem měřících přístrojů a vlivem působení remanence. Působením remanentního magnetismu neprochází charakteristiky počátkem osy, ale jsou vysunuty poněkud nahoru.

Co se týče netočivé reaktance x_0 , tak její vypočtená hodnota 9,62 % se od udávané hodnoty 9,9% liší nepatrně. Nepřesnosti měření jsou opět stejné, jako u synchronní reaktance.

Vypočtená zpětná reaktance x_2 se nedá porovnat s hodnotu, kterou udává výrobce stroje, jelikož ten jí udává pro nasycený stav stroje a vypočtena reaktance je pro stav nenasyčený.

6.3 Určení netočivé reaktance ze zkoušky při dvoufázovém spojení kotvy nakrátko s uzlem vinutí

Určení netočivé reaktance ze zkoušky při dvoufázovém spojení kotvy nakrátko s uzlem vinutí bylo provedeno v souladu s kapitolou 5.3.1. Zkoušený synchronní stroj byl roztočen na jmenovité otáčky, dvě fázové svorky byly spojeny nakrátko s uzlem vinutí. Měřilo se napětí U_0 mezi volnou fázovou svorkou a uzlem vinutí a proud I_0 protékající mezi fázovými svorkami spojenými nakrátko s uzlem vinutí. Měření bylo provedeno pro dvě hodnoty proudu tekoucího mezi zkratovanými svorkami a uzlem. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 6-8 Naměřené hodnoty potřebné k určení netočivé reaktance

měření	I_0	U_0
[-]	[A]	[V]
1	7,15	18,01
2	4,32	10,41

Nyní se bude vycházet ze vztahu (5.8) a z naměřených hodnot se dopočítají netočivé reaktance pro všechna provedená měření.

$$X_{0,1} = \frac{U_{0,1}}{I_{0,1}} = \frac{18,01}{7,15} = 2,518 \Omega \quad (6.8)$$

$$X_{0,2} = \frac{U_{0,2}}{I_{0,2}} = \frac{10,41}{4,32} = 2,409 \Omega \quad (6.9)$$

Vypočtené netočivé reaktance se přepočtou na reaktance v poměrných jednotkách.

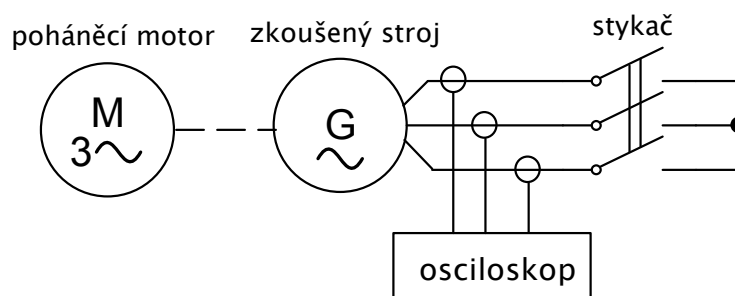
$$x_{0,1} = \frac{X_{0,1}}{X_n} \cdot 100 = \frac{2,518}{23} \cdot 100 = 10,95 \% \quad (6.10)$$

$$x_{0,2} = \frac{X_{0,2}}{X_n} \cdot 100 = \frac{2,409}{23} \cdot 100 = 10,47 \% \quad (6.11)$$

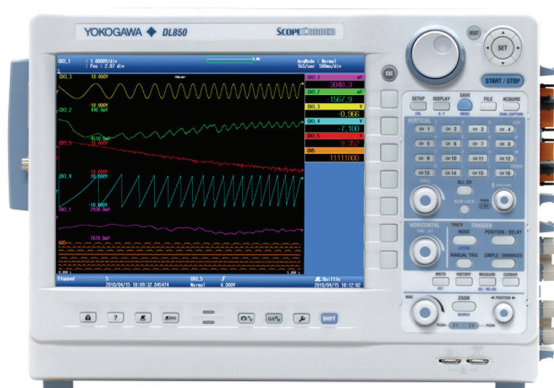
Pokud se porovnají vypočtené netočivé reaktance s hodnotou, kterou udává výrobce synchronního stroje a která je uvedena v Tab.6-2, což je 9,9%, vidíme že se poněkud liší. Hodnota udávaná výrobcem je stanovena pro nasycený stav stroje, tedy pro jmenovitý proud. Pro dosažení přesnějších výsledků by bylo potřeba provést měření pro zbylé dva způsoby, kterými se dají dvoufázově vykrátit svorky kotvy a výsledných vypočtených reaktancí udělat aritmetický průměr. Provedený způsob měření nebere v úvahu vyšší harmonické napětí a proudu. Pokud by se braly tyto vyšší harmonické v úvahu, musel by se měřit činný a jalový výkon.

6.4 Časový průběh trojfázového zkratového proudu

Zkouška náhlým trojfázovým zkratem byla provedena podle kapitoly 5.2. Časový průběh trojfázového zkratového proudu byl zachycen na osciloskopu Yokogawa DL850, ke kterému byly připojeny proudové sondy Chauvin Arnoux E3n, které měly nastaveny převod 10mV/A. Časový průběh byl zaznamenán se vzorkovací frekvencí 20kS/s. Naměřená data byla uložena na interní paměti osciloskopu a následně vyexportována pro následnou analýzu pomocí PC. Pro každý zaznamenaný oscilogram bylo zaznamenáno přibližně 4020 hodnot pro jednotlivé měřené veličiny. Zkrat statorového vinutí nebyl proveden přímo na svorkách zkoušeného synchronního stroje, ale byl proveden v rozvaděči, do kterého jsou vyvedeny konce cívek statorového vinutí, na kterých byly navlečeny proudové sondy.



Obr. 6-3 Schéma zapojení měření časového průběhu trojfázového zkratového proudu



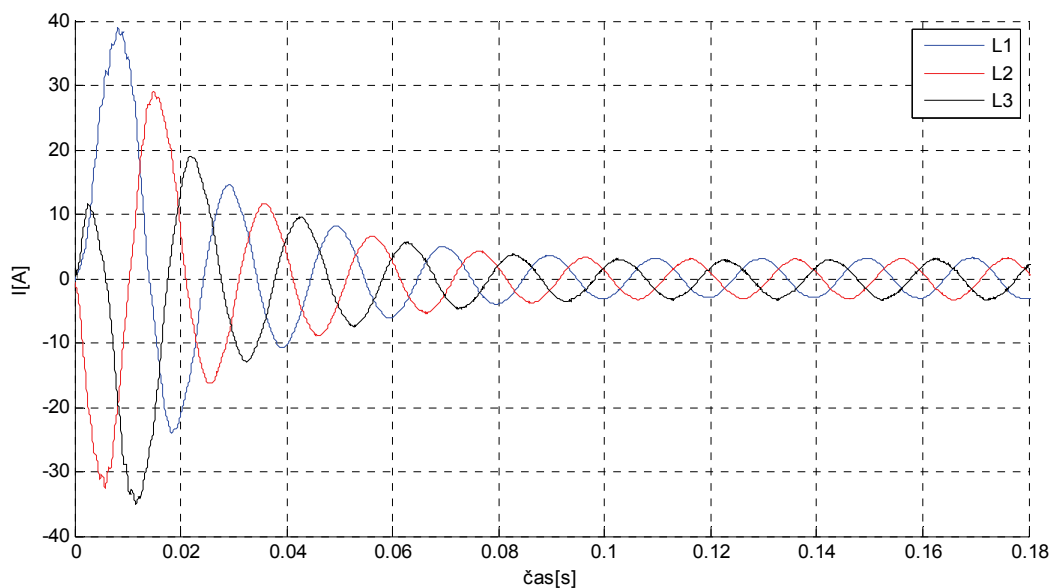
Obr. 6-4 Osciloskop Yokogawa DL850



Obr. 6-5 Proudová sonda Chauvin Arnoux E3n

Zkouška náhlým trojfázovým zkratem probíhala tak, že zkoušený synchronní stroj se roztočil pomocí poháněcího asynchronního motoru na jmenovité otáčky a byl nabuzen na dané napětí kotvy, které odpovídalo požadavkům měření. Následně se pomocí stykače zátěže vykrátilo statorové vinutí a byl zaznamenán oscilogram přechodného jevu. Toto měření se provedlo pro různé hodnoty napětí kotvy. Získané časové průběhy trojfázového zkratového proudu pro tyto napětí jsou zobrazeny na následujících grafických závislostech.

6.4.1 Časový průběh trojfázového zkratového proudu při napětí naprázdno 67 V

Obr. 6-6 Časový průběh trojfázového zkratového proudu při $U_0 = 67 V$

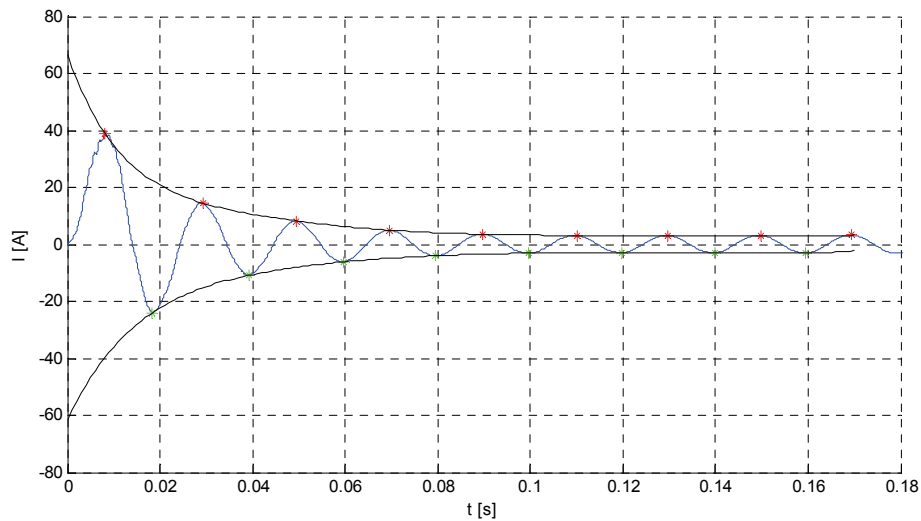
Na Obr.6-6 je zobrazen oscilogram trojfázového zkratového proudu při fázovém napětí kotvy naprázdno 67 V. Jak bylo pojednáno v teoretické části, tak v prvních okamžicích zkratu se uplatňuje rázová a přechodná reaktance a tím jsou amplitudy jednotlivých rozkmitů v této části největší. Zhruba po 100 ms dochází k ustálení zkratového proudu na ustálené hodnotě a uplatňuje se pouze synchronní reaktance. Z oscilogramu se odečte maximální hodnota ustáleného zkratového proudu $I_{K \max} = 3,15 A$. Pokud se tato hodnota podělí $\sqrt{2}$, obdrží se ustálená efektivní hodnota zkratového proudu, která je $I_K = 2,227 A$. Nyní se může vypočítat podélná synchronní reaktance X_d .

$$X_d = \frac{U}{I_K} = \frac{67}{2,27} = 30,08 \, \Omega \quad (6.12)$$

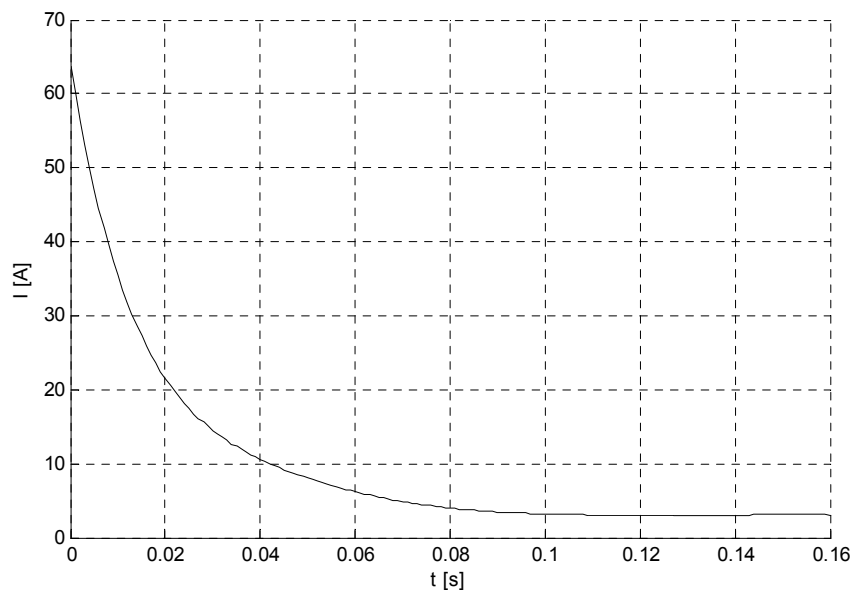
Takto získaná podélná synchronní reaktance se přepočte do poměrných jednotek.

$$x_d = \frac{X_d}{X_n} \cdot 100 = \frac{30,08}{23} \cdot 100 = 130,78 \, \% \quad (6.13)$$

Časová změna periodické složky proudu kotvy se určí z oscilogramu trojfázového zkratu jako algebraický poloviční rozdíl pořadnic horní a spodní obálky proudu zkratu. Tyto obálky pro první fázi a časový průběh změny periodické složky zkratového proudu jsou zobrazeny na následujících grafických závislostech.

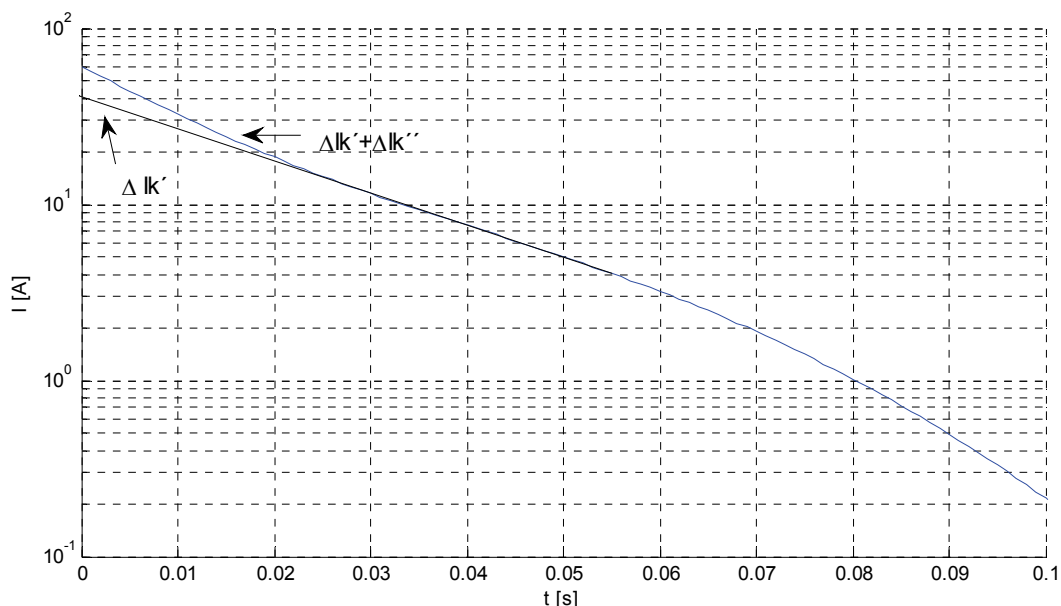


Obr. 6-7 Obalové křivky zkratového proudu při $U_0 = 67 \, V$



Obr. 6-8 Průběh periodické složky proudu při $U_0 = 67 \, V$

K určení rázové a přechodné podélné reaktance je potřeba určit rázovou $\Delta I_K''$ a přechodnou $\Delta I_K'$ složku proudu. Pro toto určení se od křivky periodické složky proudu odečte ustálená hodnota proudu nakrátko. Zbývající součet $\Delta I_K' + \Delta I_K''$ se vynese do diagramu se semilogaritmickou stupnicí.



Obr. 6-9 Přechodná a rázová složka proudu zkratu při $U_0 = 67 V$

Jak je zřejmé z Obr 6-9, tak křivka je zpočátku klesající a záhy přejde v přímku. Extrapolací přímky na svislou osu se obdrží velikost přechodné složky zkratového proudu. Odečtená hodnota přechodné složky zkratového proudu je $\Delta I_K' = 40,2 A$, rázové složky zkratového proudu $\Delta I_K'' = 20,62 A$ a ustálenou složka zkratového proudu byla určena již dříve jako $\Delta I_K = 3,15 A$.

Nyní se může vypočítat přechodná podélná reaktance, která se vypočte podle vztahu (5.6).

$$X_d' = \frac{U_0}{\frac{\Delta I_K + \Delta I_K'}{\sqrt{2}}} = \frac{67}{\frac{3,15 + 40,2}{\sqrt{2}}} = 2,186 \Omega \quad (6.14)$$

Tato hodnota se přepočte na reaktanci v poměrných jednotkách.

$$x_d' = \frac{X_d'}{X_n} \cdot 100 = \frac{2,186}{23} \cdot 100 = 9,5 \% \quad (6.15)$$

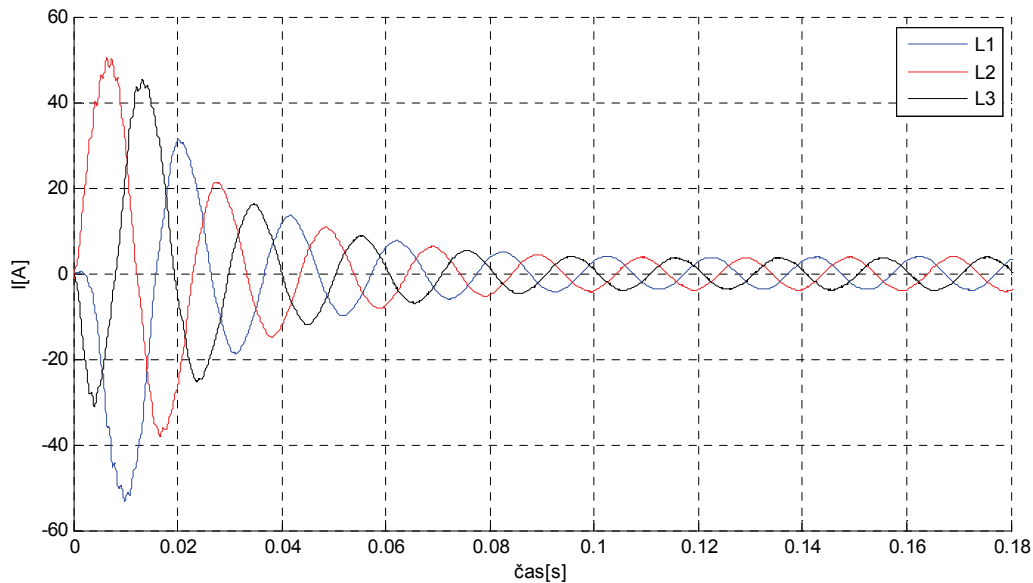
Dále se dá vypočítat rázová podélná reaktance, jejíž výpočet vychází ze vztahu (5.7)

$$X_d'' = \frac{U_0}{\frac{\Delta I_K + \Delta I_K' + \Delta I_K''}{\sqrt{2}}} = \frac{67}{\frac{3,15 + 40,2 + 20,62}{\sqrt{2}}} = 1,481 \Omega \quad (6.16)$$

Tato hodnota se přepočte opět na reaktanci v poměrných jednotkách.

$$x_d'' = \frac{X_d''}{X_n} \cdot 100 = \frac{1,481}{23} \cdot 100 = 6,44 \% \quad (6.17)$$

6.4.2 Časový průběh trojfázového zkratového proudu při napětí naprázdno 91 V



Obr. 6-10 Časový průběh trojfázového zkratového proudu při $U_0 = 91 V$

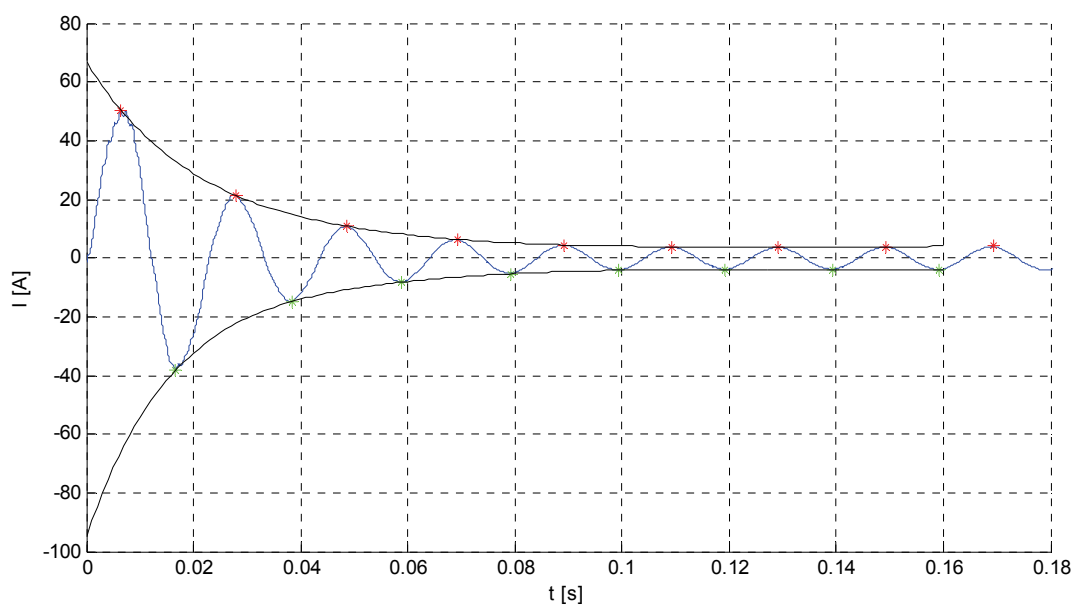
Na Obr.6-10 je zobrazen oscilogram trojfázového zkratového proudu při fázovém napětí kotvy naprázdno 91 V. Z oscilogramu se odečte maximální hodnota ustáleného zkratového proudu $I_{K \max} = 3,95 A$. Pokud se tato hodnota podělí $\sqrt{2}$, obdrží se ustálená efektivní hodnota zkratového proudu, která je $I_K = 2,793 A$. Nyní se může vypočítat podélná synchronní reaktance X_d .

$$X_d = \frac{U}{I_K} = \frac{91}{2,793} = 32,58 \Omega \quad (6.18)$$

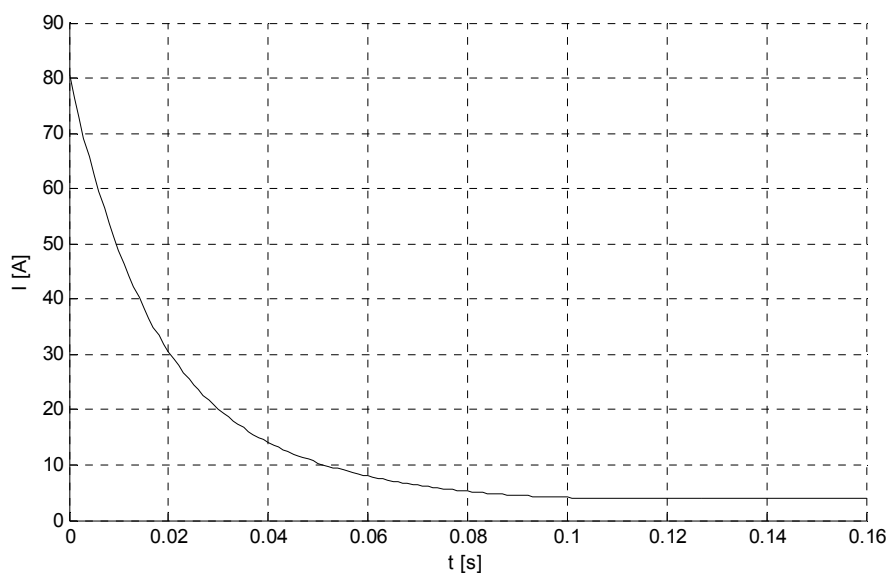
Takto získaná podélná synchronní reaktance se přepočte do poměrných jednotek.

$$x_d = \frac{X_d}{X_n} \cdot 100 = \frac{32,58}{23} \cdot 100 = 141,66 \% \quad (6.19)$$

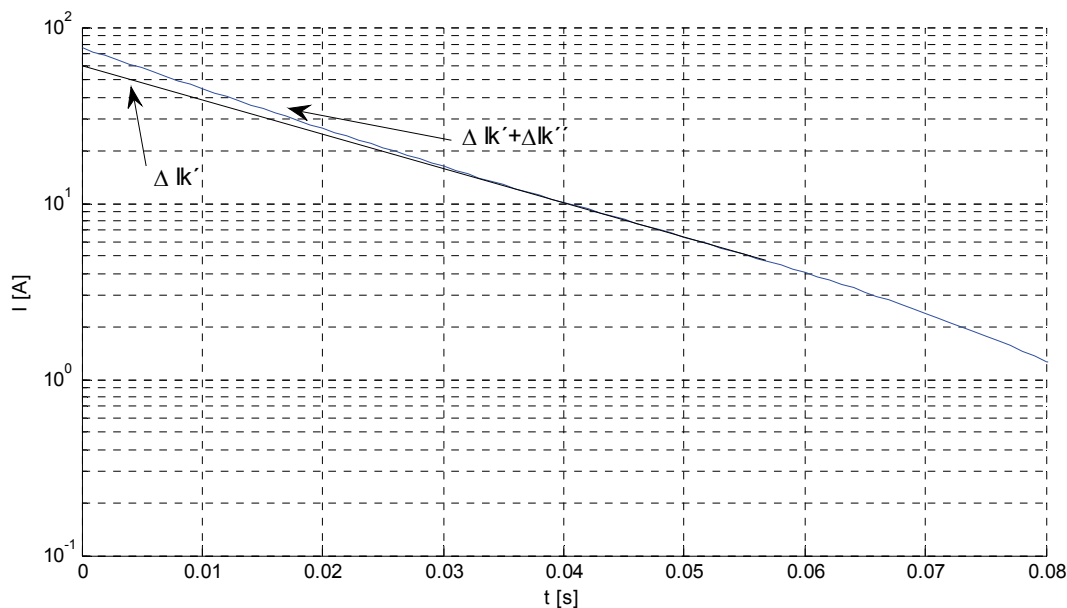
Nyní se bude postupovat jako v předchozím případě a určí se veličiny potřebné k výpočtu přechodné podélné a rázové podélné reaktance. Bude se analyzovat fáze L2.



Obr. 6-11 Obalové křivky zkratového proudu při $U_0 = 91 V$



Obr. 6-12 Průběh periodické složky proudu při $U_0 = 91 V$



Obr. 6-13 Přechodná a rázová složka proudu zkratu při $U_0 = 91 V$

Jako v předchozím případě se opět odečteme hodnotu přechodné složky zkratového proudu, která je $\Delta I'_K = 60,4 A$, rázové složky zkratového proudu $\Delta I''_K = 16,23 A$ a ustálená složka zkratového proudu byla určena již dříve jako $\Delta I_K = 3,95 A$.

Nyní se již dá vypočítat přechodná podélná reaktance, která se vypočte podle vztahu (5.6).

$$X'_d = \frac{U_0}{\frac{\Delta I_K + \Delta I'_K}{\sqrt{2}}} = \frac{91}{\frac{3,95 + 60,4}{\sqrt{2}}} = 1,999 \Omega \quad (6.20)$$

Tato hodnota se přepočte na reaktanci v poměrných jednotkách.

$$x'_d = \frac{X'_d}{X_n} \cdot 100 = \frac{1,999}{23} \cdot 100 = 8,69\% \quad (6.21)$$

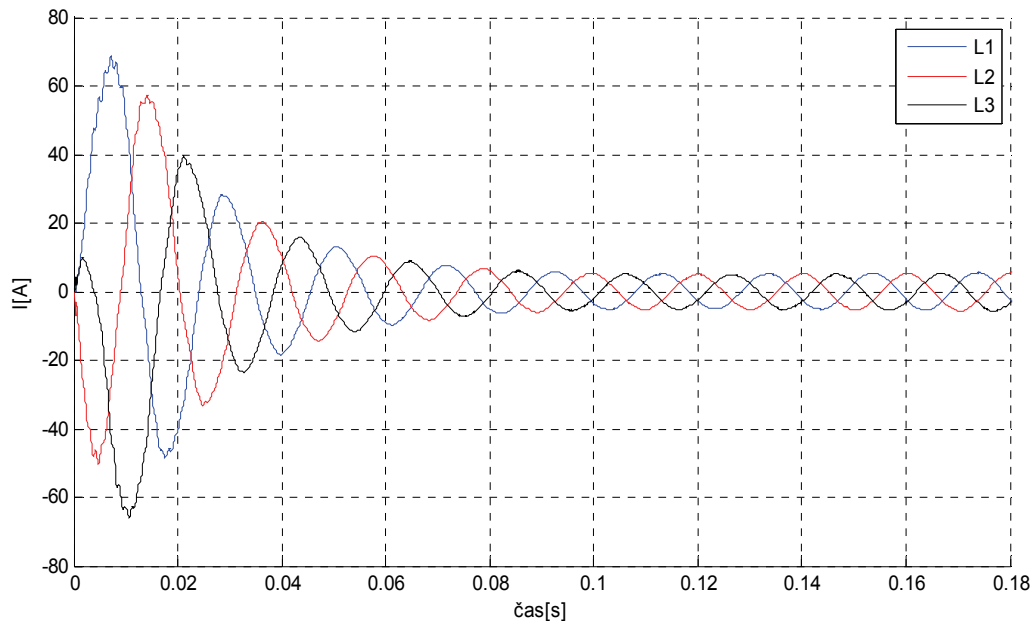
Dále se může vypočítat rázová podélná reaktance, jejíž výpočet vychází ze vztahu (5.7)

$$X''_d = \frac{U_0}{\frac{\Delta I_K + \Delta I'_K + \Delta I''_K}{\sqrt{2}}} = \frac{91}{\frac{3,95 + 60,4 + 16,23}{\sqrt{2}}} = 1,597 \Omega \quad (6.22)$$

Tato hodnota se přepočte opět na reaktanci v poměrných jednotkách.

$$x''_d = \frac{X''_d}{X_n} \cdot 100 = \frac{1,597}{23} \cdot 100 = 6,94\% \quad (6.23)$$

6.4.3 Časový průběh trojfázového zkratového proudu při napětí naprázdno 119 V



Obr. 6-14 Časový průběh trojfázového zkratového proudu při $U_0 = 119 V$

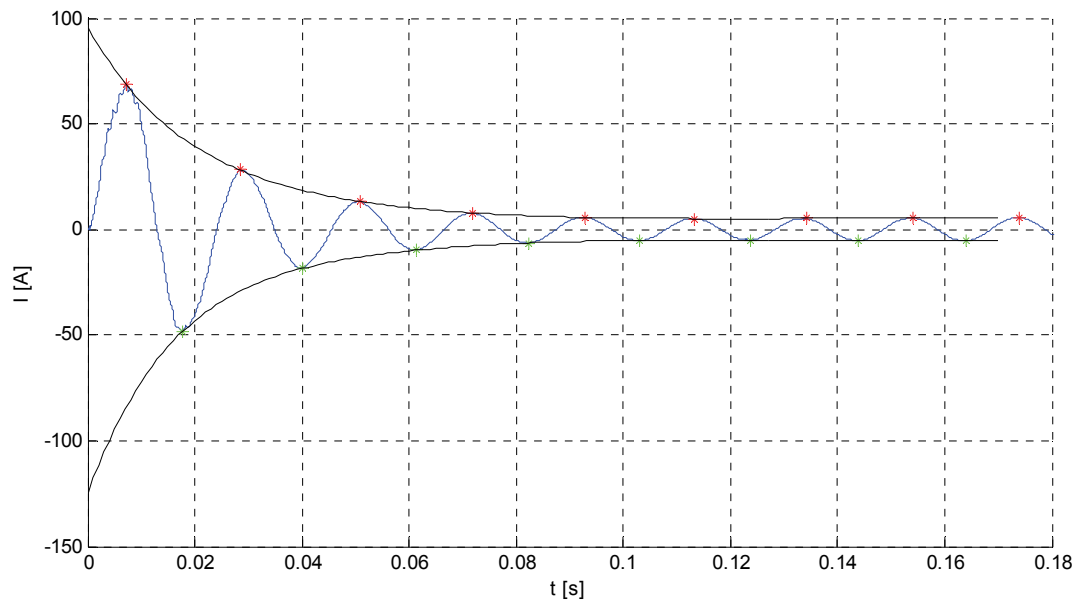
Na Obr.6-14 je zobrazen oscilogram trojfázového zkratového proudu při fázovém napětí kotvy naprázdno 119 V. Z oscilogramu se odečte maximální hodnota ustáleného zkratového proudu $I_{K_{\max}} = 5,25 A$. Pokud se tato hodnota podělí $\sqrt{2}$, obdrží se ustálená efektivní hodnota zkratového proudu, která je $I_K = 3,712 A$. Nyní se může vypočítat podélná synchronní reaktance X_d .

$$X_d = \frac{U}{I_K} = \frac{119}{3,712} = 30,06 \Omega \quad (6.24)$$

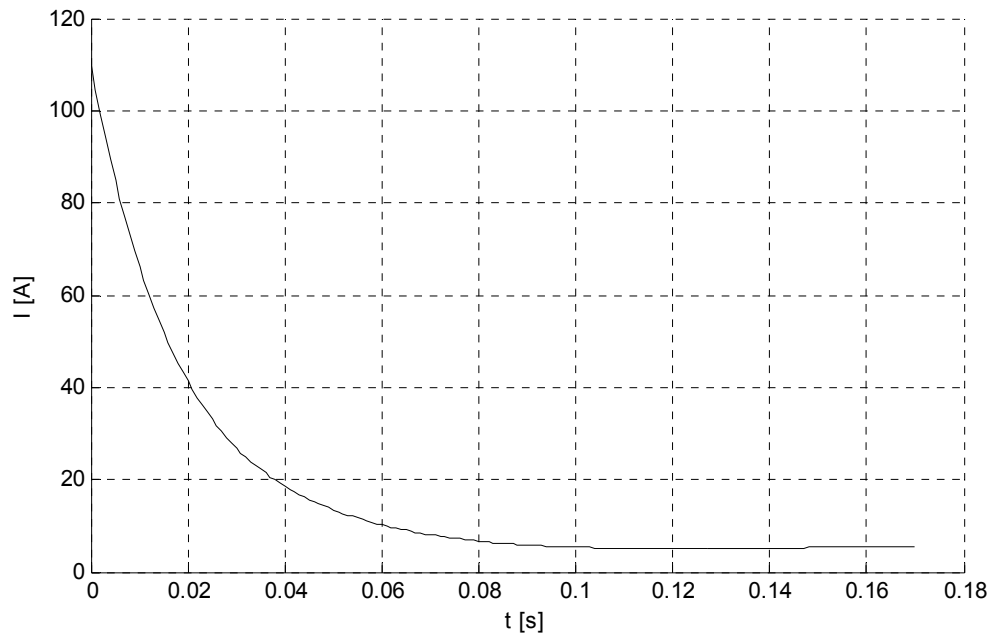
Takto získaná podélná synchronní reaktance se přepočte do poměrných jednotek

$$x_d = \frac{X_d}{X_n} \cdot 100 = \frac{30,06}{23} \cdot 100 = 130,70 \% \quad (6.25)$$

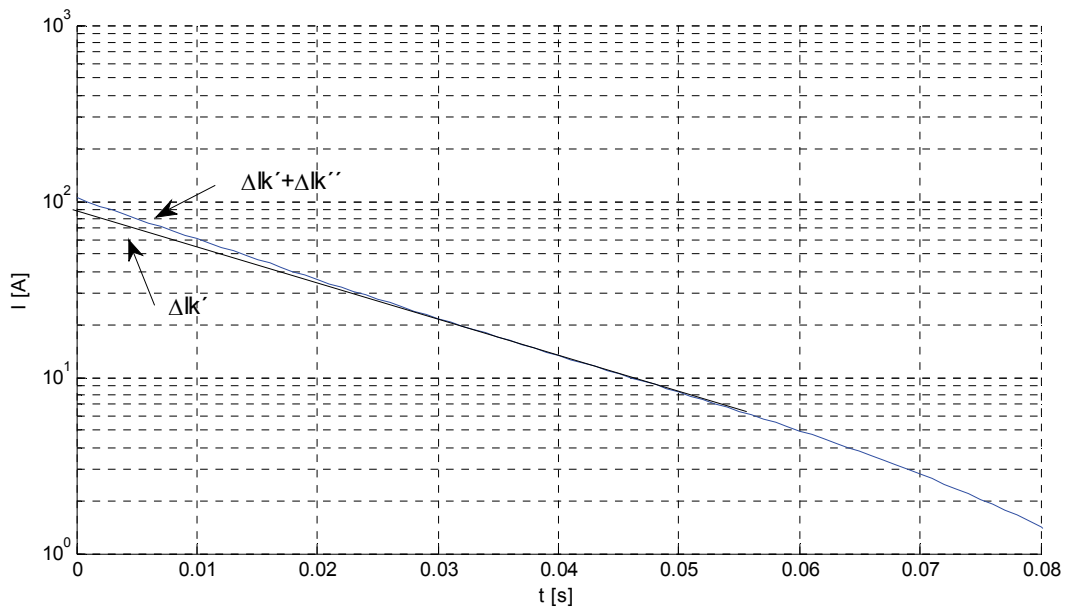
Nyní se bude postupovat jako v předchozím případě a určí se veličiny potřebné k výpočtu přechodné podélné a rázové podélné reaktance. Bude se analyzovat fáze L1.



Obr. 6-15 Obalové křivky zkratového proudu při $U_0 = 119 V$



Obr. 6-16 Průběh periodické složky proudu při $U_0 = 119 V$



Obr. 6-17 Přechodná a rázová složka proudu zkratu při $U_0 = 119 V$

Jako v předchozím případě se opět odečte hodnota přechodné složky zkratového proudu, která je $\Delta I'_K = 86,5 A$, rázové složky zkratového proudu $\Delta I''_K = 18 A$ a ustálená složka zkratového proudu byla určena již dříve jako $\Delta I_K = 5,25 A$.

Nyní se může vypočítat přechodná podélná reaktance, která se vypočte podle vztahu (5.6).

$$X'_d = \frac{U_0}{\frac{\Delta I_K + \Delta I'_K}{\sqrt{2}}} = \frac{119}{\frac{5,25 + 86,5}{\sqrt{2}}} = 1,834 \Omega \quad (6.26)$$

Tato hodnota se přepočte na reaktanci v poměrných jednotkách.

$$x'_d = \frac{X'_d}{X_n} \cdot 100 = \frac{1,834}{23} \cdot 100 = 7,97\% \quad (6.27)$$

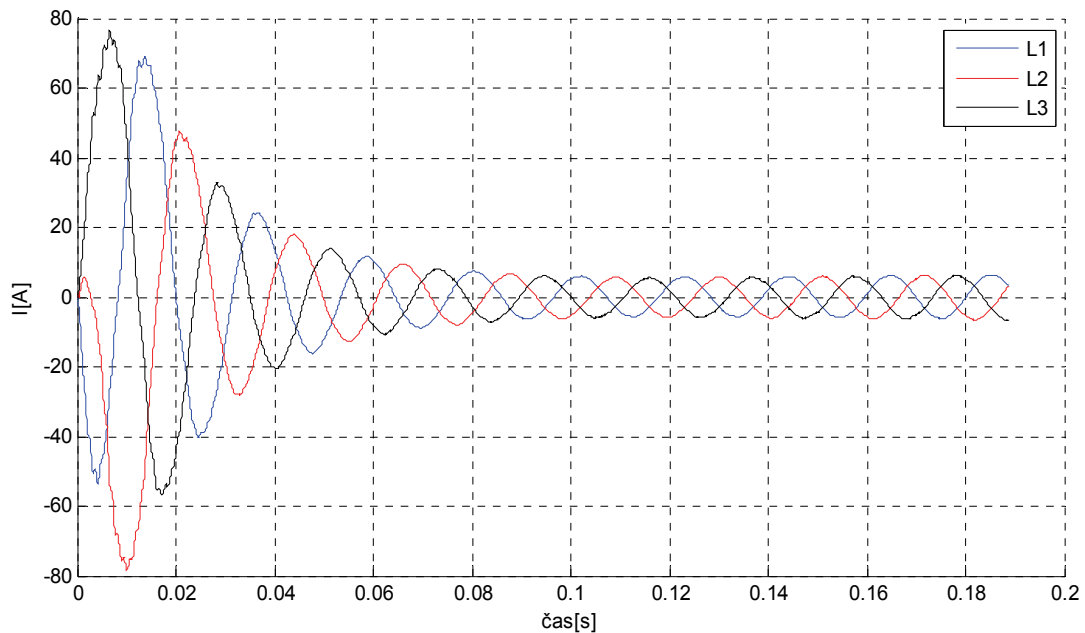
Dále se může vypočítat rázová podélná reaktance, jejíž výpočet vychází ze vztahu (5.7)

$$X''_d = \frac{U_0}{\frac{\Delta I_K + \Delta I'_K + \Delta I''_K}{\sqrt{2}}} = \frac{119}{\frac{5,25 + 86,5 + 18}{\sqrt{2}}} = 1,533 \Omega \quad (6.28)$$

Tato hodnota se přepočte opět na reaktanci v poměrných jednotkách.

$$x''_d = \frac{X''_d}{X_n} \cdot 100 = \frac{1,533}{23} \cdot 100 = 6,67\% \quad (6.29)$$

6.4.4 Časový průběh trojfázového zkratového proudu při napětí naprázdno 138 V



Obr. 6-18 Časový průběh trojfázového zkratového proudu při $U_0 = 138 V$

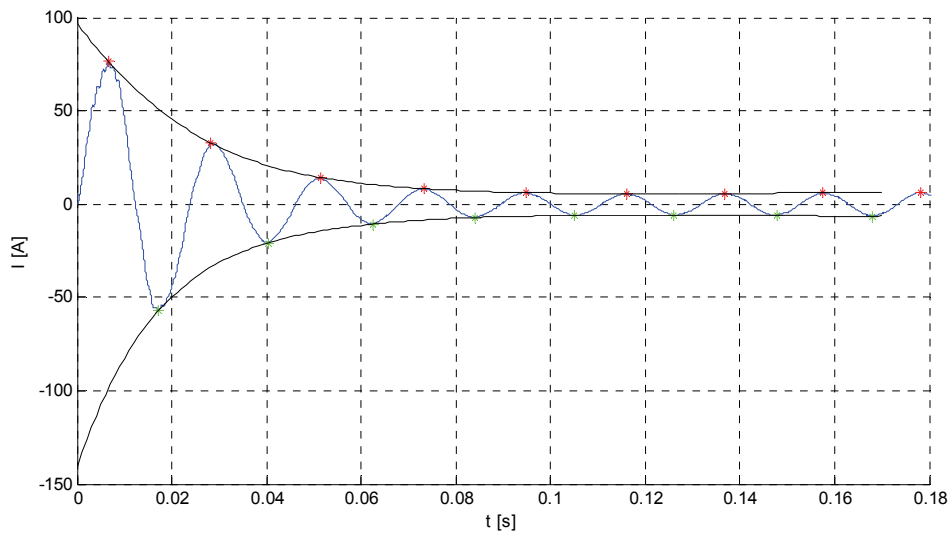
Na Obr.6-18 je zobrazen oscilogram trojfázového zkratového proudu při fázovém napětí kotvy naprázdno 138 V. Z oscilogramu se odečte maximální hodnota ustáleného zkratového proudu $I_{K \max} = 6,27 A$. Pokud se tato hodnota podělí $\sqrt{2}$, dostane se ustálená efektivní hodnota zkratového proudu, která je $I_K = 4,434 A$. Nyní se může vypočítat podélná synchronní reaktance X_d .

$$X_d = \frac{U}{I_K} = \frac{138}{4,434} = 31,12 \Omega \quad (6.30)$$

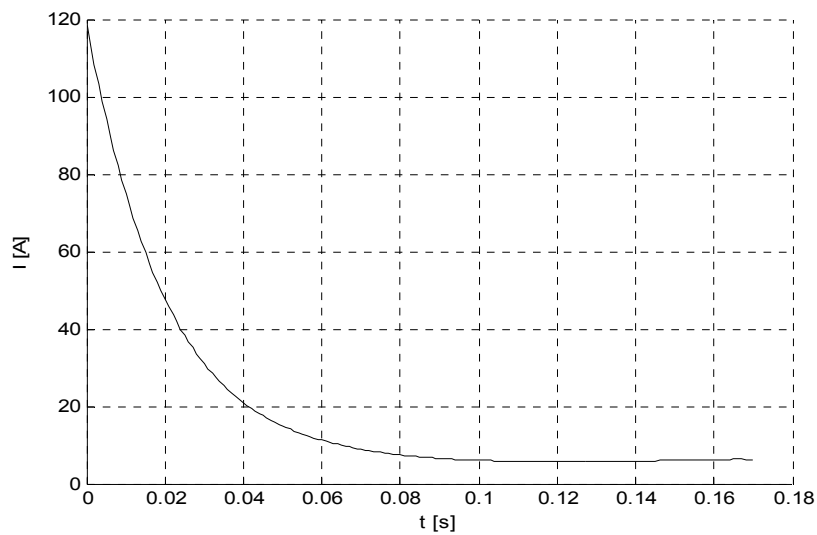
Takto získaná podélnou synchronní reaktance se přepočte do poměrných jednotek

$$x_d = \frac{X_d}{X_n} \cdot 100 = \frac{31,12}{23} \cdot 100 = 135,32 \% \quad (6.31)$$

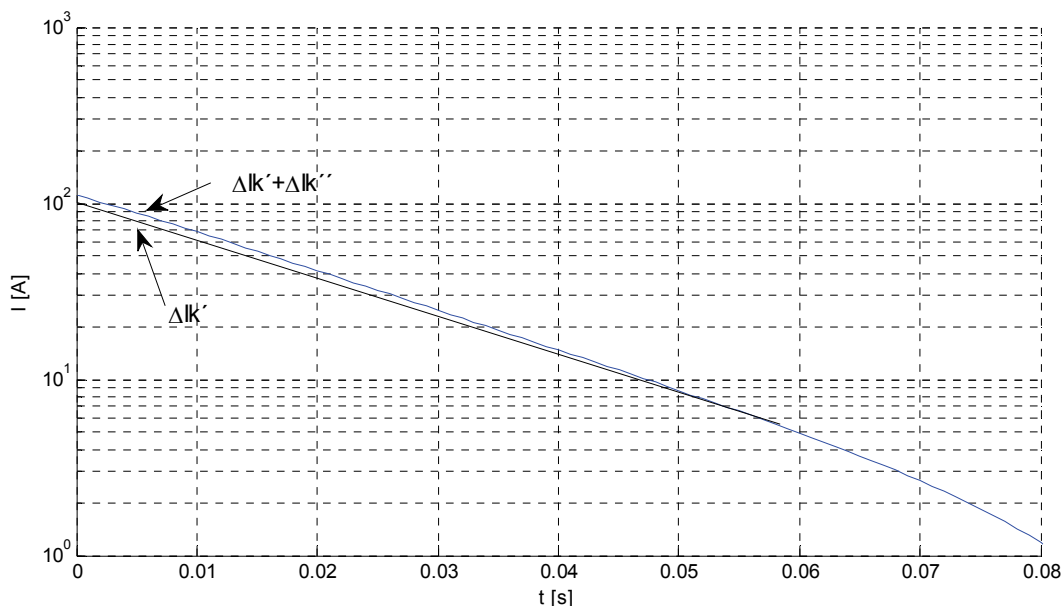
Nyní se bude postupovat jako v předchozím případě a určí se veličiny potřebné k výpočtu přechodné podélné a rázové podélné reaktance. Bude se analyzovat fáze L3.



Obr. 6-19 Obalové křivky zkratového proudu při $U_0 = 138 V$



Obr. 6-20 Průběh periodické složky proudu při $U_0 = 138 V$



Obr. 6-21 Přechodná a rázová složka proudu zkratu při $U_0 = 138 V$

Jako v předchozím případě se opět odečte hodnota přechodné složky zkratového proudu, která je $\Delta I'_K = 96,5 A$, rázové složky zkratového proudu $\Delta I''_K = 15,6 A$ a ustálena složka zkratového proudu by určena již dříve jako $\Delta I_K = 6,27 A$.

Nyní se již může vypočítat přechodná podélná reaktance, která se vypočte podle vztahu (5.6).

$$X'_d = \frac{U_0}{\frac{\Delta I_K + \Delta I'_K}{\sqrt{2}}} = \frac{138}{\frac{6,27 + 96,5}{\sqrt{2}}} = 1,899 \Omega \quad (6.32)$$

Tato hodnota se přepočte na reaktanci v poměrných jednotkách.

$$x'_d = \frac{X'_d}{X_n} \cdot 100 = \frac{1,899}{23} \cdot 100 = 8,26 \% \quad (6.33)$$

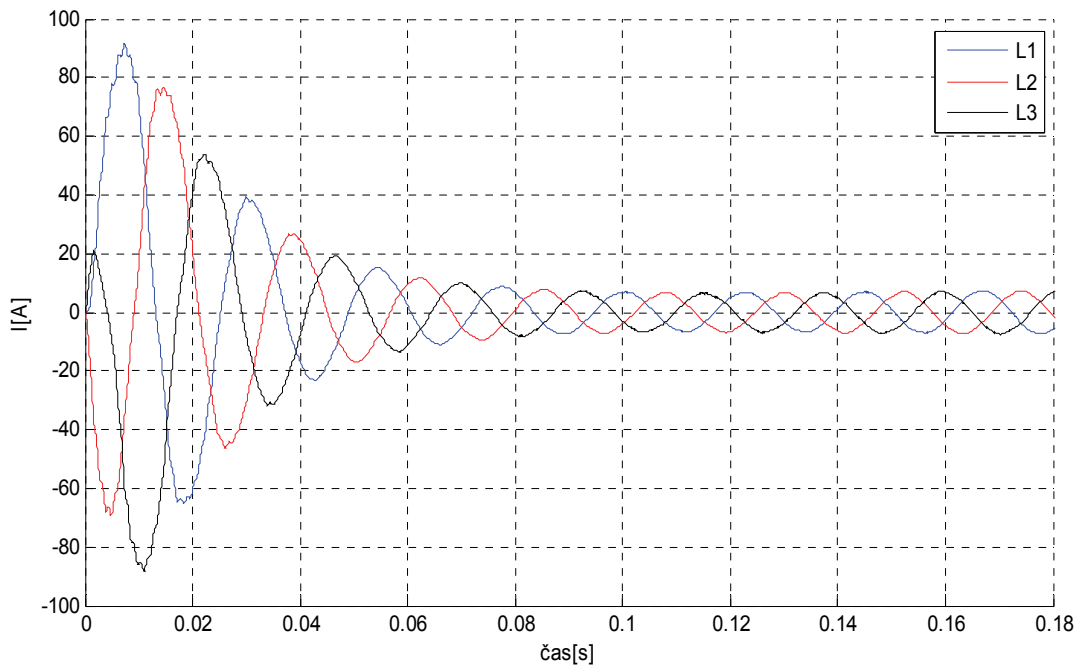
Dále se může vypočítat rázová podélná reaktance, jejíž výpočet vychází ze vztahu (5.7)

$$X''_d = \frac{U_0}{\frac{\Delta I_K + \Delta I'_K + \Delta I''_K}{\sqrt{2}}} = \frac{138}{\frac{6,27 + 96,5 + 15,6}{\sqrt{2}}} = 1,649 \Omega \quad (6.34)$$

Tato hodnota se přepočte opět na reaktanci v poměrných jednotkách.

$$x''_d = \frac{X''_d}{X_n} \cdot 100 = \frac{1,649}{23} \cdot 100 = 7,17 \% \quad (6.35)$$

6.4.5 Časový průběh trojfázového zkratového proudu při napětí naprázdno 161 V



Obr. 6-22 Časový průběh trojfázového zkratového proudu při $U_0 = 161 V$

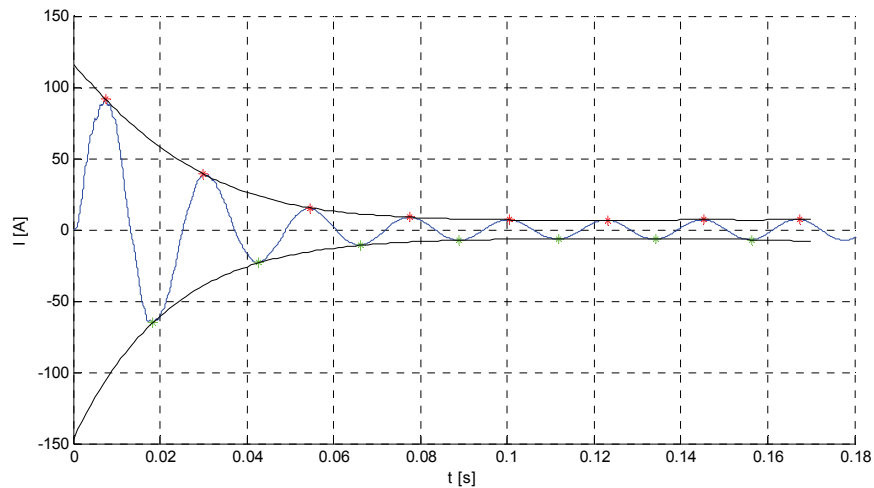
Na Obr.6-22 je zobrazen oscilogram trojfázového zkratového proudu při fázovém napětí kotvy naprázdno 161V. Z oscilogramu se odečte maximální hodnota ustáleného zkratového proudu $I_{K \max} = 7,3 A$. Pokud se tato hodnota podělí $\sqrt{2}$, dostane se ustálená efektivní hodnota zkratového proudu, která je $I_K = 5,16 A$. Nyní se může vypočítat podélná synchronní reaktance X_d .

$$X_d = \frac{U}{I_K} = \frac{161}{5,16} = 31,20 \Omega \quad (6.36)$$

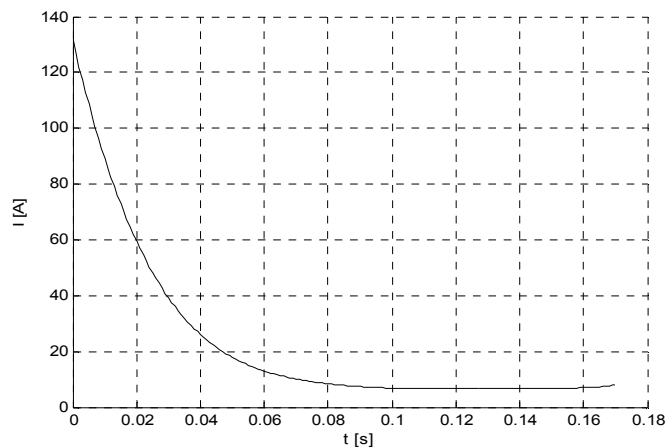
Takto získaná podélnou synchronní reaktance se přepočte do poměrných jednotek.

$$x_d = \frac{X_d}{X_n} \cdot 100 = \frac{31,20}{23} \cdot 100 = 135,67 \% \quad (6.37)$$

Nyní se bude postupovat jako v předchozím případě a určí se veličiny potřebné k výpočtu přechodné podélné a rázové podélné reaktance. Bude se analyzovat fáze L1.



Obr. 6-23 Obalové křivky zkratového proudu při $U_0 = 161 V$



Obr. 6-24 Průběh periodické složky proudu při $U_0 = 161 V$

6.4.6 Vyhodnocení veličin získaných z časového průběhu trojfázového zkratového proudu

Vyhodnocení veličin získaných z časového průběhu trojfázového zkratového proudu se provede tak, že se srovnají vypočtené hodnoty s hodnotami, které udává výrobce zkoušeného synchronního stroje.

Z určených synchronních, přechodných a rázových reaktancí pro různá napětí se udělá aritmetický průměr a získají se výsledné hodnoty těchto reaktancí.

Tab. 6-9 Vyhodnocení veličin získaných z časového průběhu trojfázového zkratového proudu

veličina	jednotka	vypočtená hodnota	hodnota udaná výrobcem
X_d	[%]	135,66	140
X'_d	[%]	8,61	9,9
X''_d	[%]	6,81	4,9

Z Tab.6-9 je zřejmé, že vypočtené hodnoty a hodnoty udávané výrobcem zkoušeného synchronního stroje se mírně liší. Vypočtená podélná synchronní reaktance $x_d = 135,66\%$ se od hodnoty 140%, kterou udává výrobce stroje liší jen nepatrně.

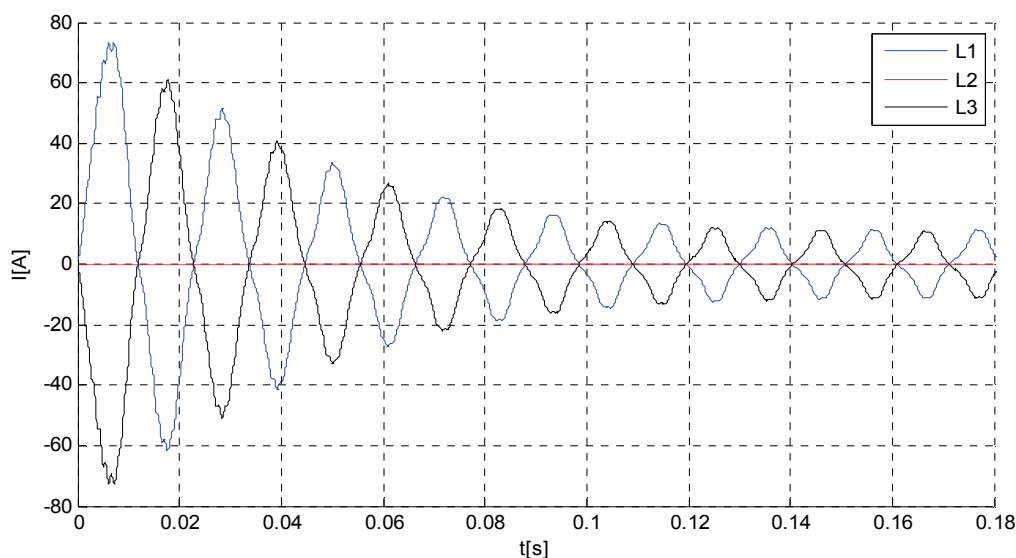
Vypočtená rázová reaktance $x'_d = 8,61\%$ se od hodnoty udávané výrobcem stroje liší již trochu více. Určitá chyba byla tvořena přesností měření. Další chyba mohla být způsobena tím, jak se obalové křivky zkratového proudu extrapolovaly do nulové hodnoty času. Takto provedená zkouška se hodí spíše k orientačnímu určení reaktancí u strojů, které nemají potřebnou dokumentaci s danými veličinami.

Vypočtená podélná přechodná reaktance $x''_d = 6,81\%$ vyšla poněkud vyšší, než je hodnota udávaná výrobcem $x''_d = 4,9\%$. Možné důvody nepřesnosti této hodnoty jsou totožné, jako v předchozím odstavci.

6.5 Časový průběh dvoufázového zkratového proudu

Časový průběh dvoufázového zkratového proudu byl měřen stejným způsobem jako trojfázový zkratový proud v předcházející kapitole. Měření bylo provedeno pro více hodnot napětí kotvy před vykrácením statorového vinutí. Naměřené průběhy jsou zobrazeny na následujících závislostech.

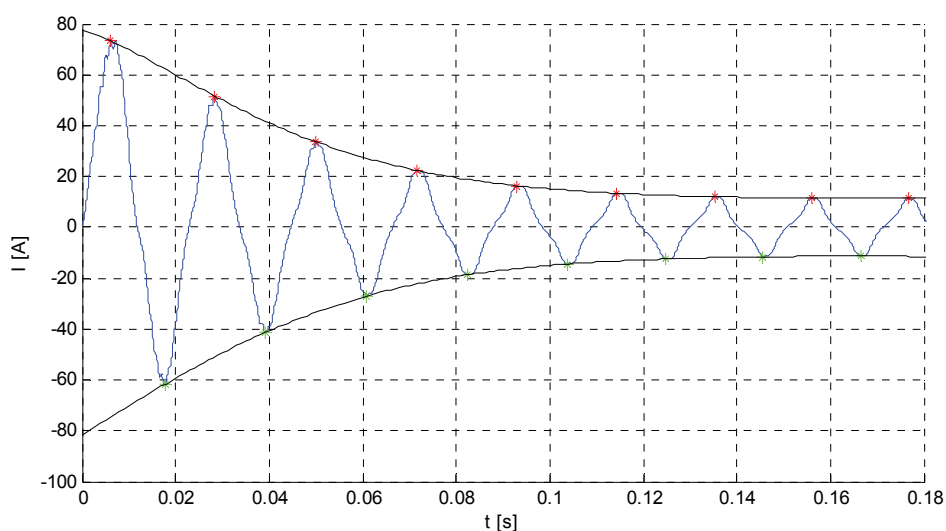
6.5.1 Časový průběh dvoufázového zkratového proudu při napětí naprázdno 140 V a zkratovaných fázích L1 a L3



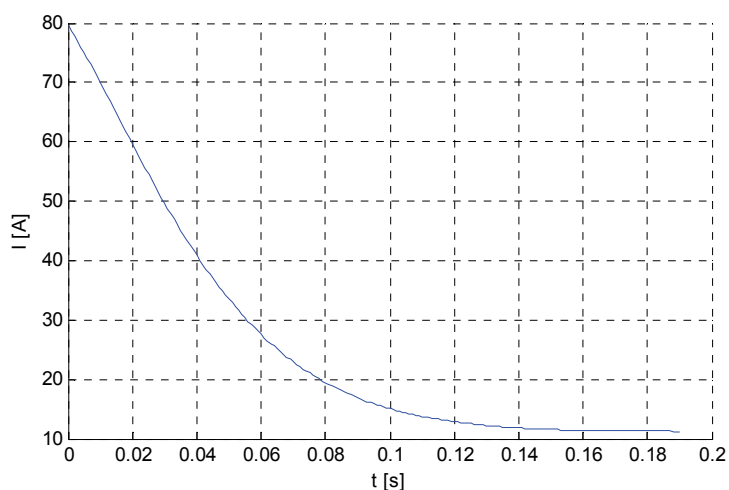
Obr. 6-25 Časový průběh dvoufázového zkratového proudu při $U_0 = 140\text{ V}$ a zkratovaných fázích L1 a L3

Na Obr.6-25 je zobrazen časový průběh dvoufázového zkratového proudu při vykrácení fází L1 a L3 satorového vinutí. Před zkratem pracoval stroj naprázdno a byl nabuzen na svorkové fázové napětí 140 V. Amplitudy obou fází v jednotlivých rozkmitech jsou stejné a jsou v protifázi. Při třífázovém zkratu se uvažuje, že střídavé sousledné, zpětné a nulové složky satorových proudů jsou sinusové. Jak je vidět na průběhu dvoufázového zkratového proudu, tak tento průběh není čistě sinusový. Toto je způsobeno tím, že zpětné proudy vyvolávají ve vinutí satoru sudé vyšší harmonické [3].

Ze zaznamenaného oscilografu se podle kapitoly 5.4.1 může určit zpětná reaktance. K tomuto výpočtu je potřeba vykreslit obalovou křivku zkratového proudu fáze L1 a sestavit z ní časový průběh periodické složky zkratového proudu, který se sestojí, jako při určování reaktancí u trojfázového zkratu.



Obr. 6-26 Obalové křivky dvoufázového zkratového proudu při $U_0 = 140 V$



Obr. 6-27 Časový průběh periodické složky dvoufázového zkratového proudu při $U_0 = 140 V$

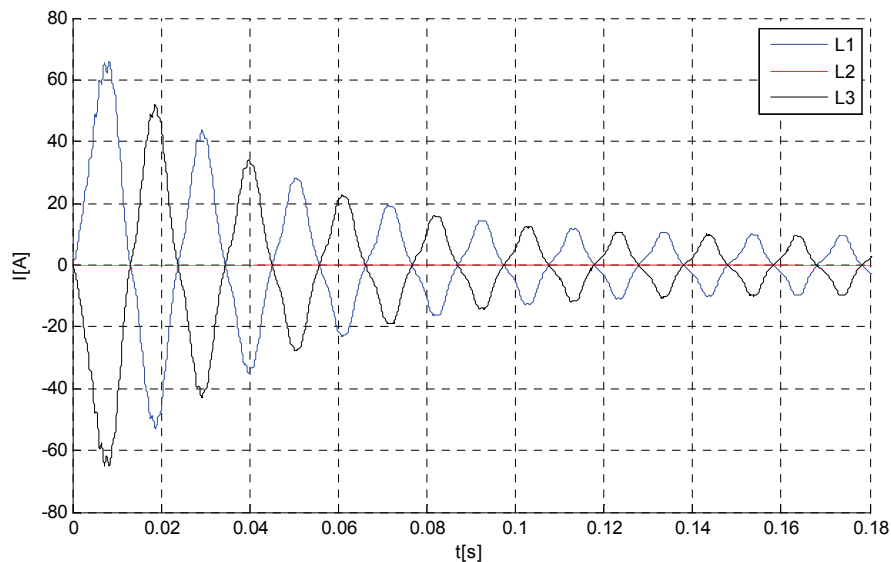
Z Obr.6-27 se dá určit velikost počáteční základní periodické složky proudu kotvy při dvoufázovém zkratu, která je rovna $I'' = 79,52 A$. Nyní se bude vycházet ze vztahu (5.9) a vypočítá se zpětná reaktance.

$$X_2 = \frac{U_s}{I''} - X_d'' = \frac{140 \cdot \sqrt{3}}{\frac{79,52}{\sqrt{2}}} - 1,567 = 2,745 \Omega \quad (6.38)$$

Tato reaktance se přepočte na poměrné hodnoty.

$$x_2 = \frac{X_2}{X_n} \cdot 100 = \frac{2,745}{23} \cdot 100 = 11,937 \% \quad (6.39)$$

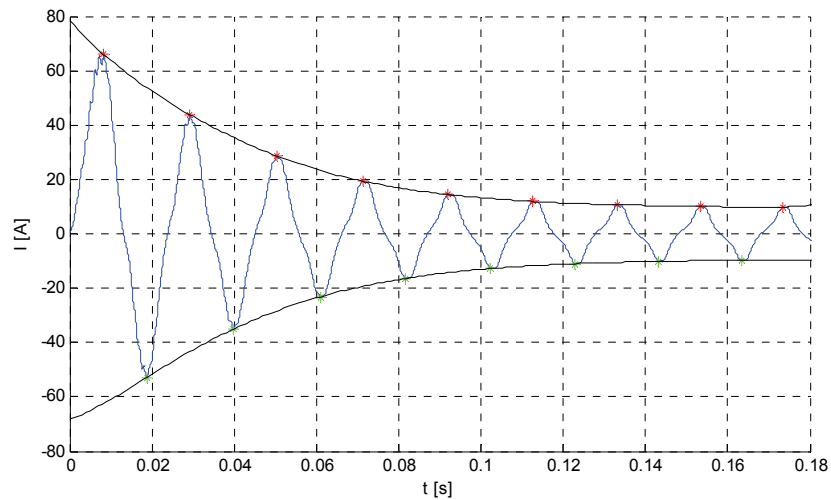
6.5.2 Časový průběh dvoufázového zkratového proudu při napětí naprázdno 117 V a zkratovaných fázích L1 a L3



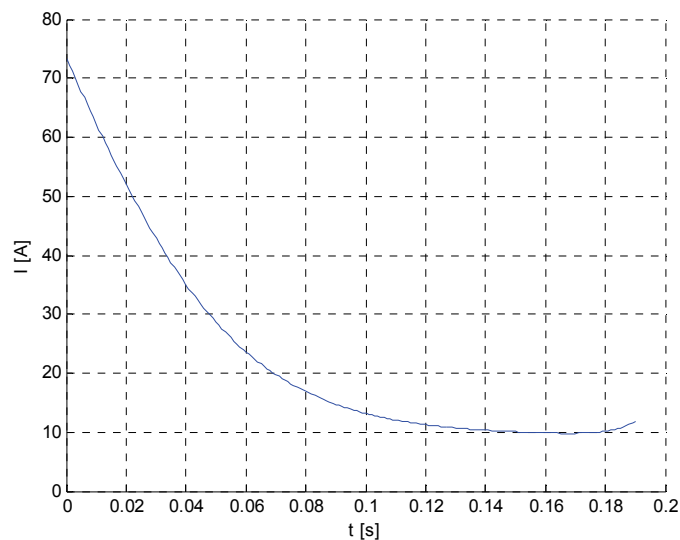
Obr. 6-28 Časový průběh dvoufázového zkratového proudu při $U_0 = 117 V$ a zkratovaných fázích L1 a L3

Na Obr.6-28 je zobrazen časový průběh dvoufázového zkratového proudu při vykrácení fází L1 a L3 statorového vinutí. Před zkratem pracoval stroj naprázdno a byl nabuzen na svorkové fázové napětí 117 V.

Ze zaznamenaného oscilografu se podle kapitoly 5.4.1 může určit zpětná reaktance. K tomuto výpočtu je potřeba vykreslit obalovou křivku zkratového proudu fáze L1 a sestrojít z ní časový průběh periodické složky zkratového proudu, který se sestrojí, jako při určování reaktancí u trojfázového zkratu.



Obr. 6-29 Obalové křivky dvoufázového zkratového proudu při $U_0 = 117 V$ a zkratovaných fázích L1 a L3



Obr. 6-30 Časový průběh periodické složky dvoufázového zkratového proudu při $U_0 = 117 V$ a zkratovaných fázích L1 a L3

Z Obr.6-30 se dá určit velikost počáteční základní periodické složky proudu kotvy při dvoufázovém zkratu, která je rovna $I'' = 73,37 A$. Nyní se bude vycházet ze vztahu (5.9) a vypočítá se zpětná reaktance.

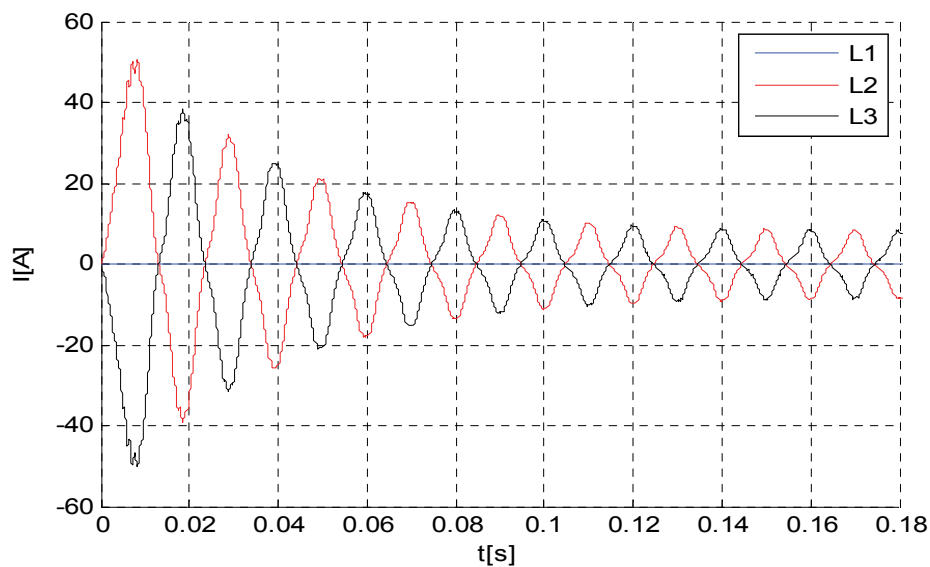
$$X_2 = \frac{U_s}{I''} - X_d'' = \frac{117 \cdot \sqrt{3}}{73,37} - 1,567 = 2,339 \Omega \quad (6.40)$$

Tato reaktance se přepočte na poměrné hodnoty.

$$x_2 = \frac{X_2}{X_n} \cdot 100 = \frac{2,339}{23} \cdot 100 = 10,17 \% \quad (6.41)$$

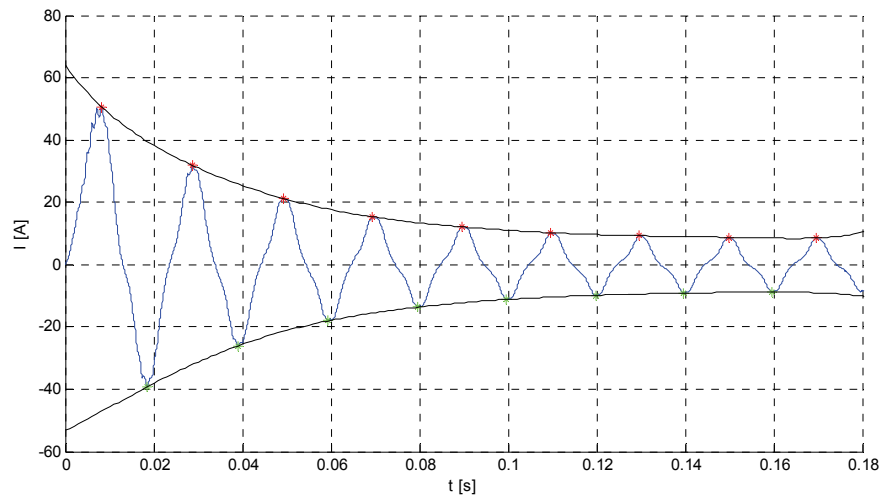
6.5.3 Časový průběh dvoufázového zkratového proudu při napětí naprázdno 92 V a zkratovaných fázích L2 a L3

Na Obr.6-28 je zobrazen časový průběh dvoufázového zkratového proudu při vykrácení fází L2 a L3 statorového vinutí. Před zkratem pracoval stroj naprázdno a byl nabuzen na svorkové fázové napětí 117 V.

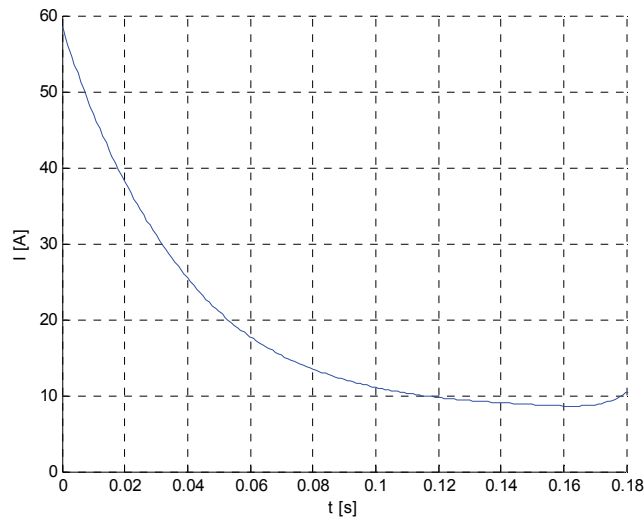


Obr. 6-31 Časový průběh dvoufázového zkratového proudu při $U_0 = 92 \text{ V}$ a zkratovaných fázích L2 a L3

Ze zaznamenaného oscilografu se podle kapitoly 5.4.1 může určit zpětná reaktance. K tomuto výpočtu je potřeba vykreslit obalovou křivku zkratového proudu fáze L2 a sestrojít z ní časový průběh periodické složky zkratového proudu, který se sestrojí, jako při určování reaktancí u trojfázového zkratu.



Obr. 6-32 Obalové křivky dvoufázového zkratového proudu při $U_0 = 92 \text{ V}$ a zkratovaných fázích L2 a L3



Obr. 6-33 Časový průběh periodické složky dvoufázového zkratového proudu při $U_0 = 92 \text{ V}$ a zkratovaných fázích L2 a L3

Z Obr.6-33 se dá určit velikost počáteční základní periodické složky proudu kotvy při dvoufázovém zkratu, která je rovna $I'' = 58,55 \text{ A}$. Nyní se bude vycházet ze vztahu (5.9) a vypočítá se zpětná reaktance.

$$X_2 = \frac{U_s}{I''} - X_d'' = \frac{92 \cdot \sqrt{3}}{58,55} - 1,567 = 2,281 \Omega \quad (6.42)$$

Tato reaktance se přepočte na poměrné hodnoty.

$$x_2 = \frac{X_2}{X_n} \cdot 100 = \frac{2,281}{23} \cdot 100 = 9,92 \% \quad (6.43)$$

6.5.4 Vyhodnocení veličin získaných z časového průběhu dvoufázového zkratového proudu

Vyhodnocení veličin získaných z časového průběhu dvoufázového zkratového proudu se provede tak, že se srovnají vypočtené hodnoty s hodnotami, které udává výrobce zkoušeného synchronního stroje. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty vypočtených zpětných reaktancí, které byly vypočteny v předchozích odstavcích.

Tab. 6-10 Vyhodnocení veličin získaných z časového průběhu dvoufázového zkratového proudu

veličina	jednotka	vypočtená hodnota	hodnota udaná výrobcem
x_2	[%]	10,67	6,7

Jak je zřejmé z Tab.6-10, tak vypočtená hodnota zpětné reaktance se značně liší od hodnoty udávané výrobcem. Tato zkouška by se správně měla provést tak, aby se maximálně vyvinula aperiodická složka zkratového proudu, což v našem případě nebylo možné.

7 SIMULACE ZKRATOVÉHO PROUDU

Simulace proběhla v programu Matlab/Simulink. Matlab je v podstatě vysoce výkonný programovací jazyk pro technické výpočty. Má integrované výpočetní, vizualizační a programovací prostředí, ve kterém jsou situace a řešení vyjádřeny ve známém matematickém zápisu. Matlab je moderní programovací jazykové prostředí, má sofistikované datové struktury, obsahuje vestavěné editační a ladící nástroje a podporu objektově orientovaného programování. Tyto faktory dělají Matlab vynikajícím nástrojem pro výuku a výzkum. Matlab podporuje analýzu dat získaných z externích databází. Specifické aplikace jsou shromažďovány v balíčcích zvaných jako toolbox. K dispozici jsou panely nástrojů pro zpracování signálů, symbolických výpočtů, teorie řízení a několik dalších oblastí aplikované vědy a techniky.

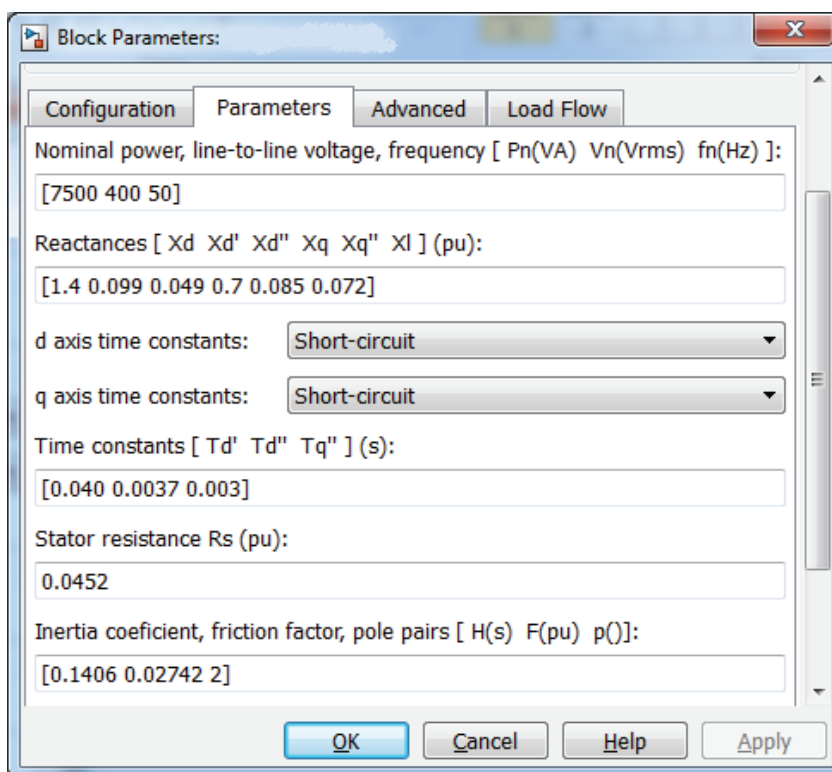
Simulink je program, který je integrován v Matlabu a složí k simulaci různých dynamických systémů. K modelování byl požit toolbox SimPowerSystems. Tento toolbox spolupracuje spolu se Simulinkem a složí k modelování elektrických systémů. SimPowerSystem je moderní nástroj, který umožňuje rychle a snadno vytvářet modely, které simulují elektrické systémy. SimPowerSystems používá prostředí Simulink, které umožňuje vytvořit model pomocí jednoduchého postupu. To je možné proto, že všechny části elektrických simulací spolupracují s rozsáhlou modelovou knihovnou Simulinku. Zjednodušeně řečeno, tento toolbox v sobě obsahuje hotové modely všech druhů točivých strojů, přenosových vedení, transformátorů a všech zařízení, které spadají do oblasti energetiky. Díky tomuto dobrému základu není problém vytvořit jakoukoli část např. přenosové, nebo distribuční sítě a simulovat na nich různé situace.

7.1 Porovnání naměřených časových průběhů zkratového proudu se simulací.

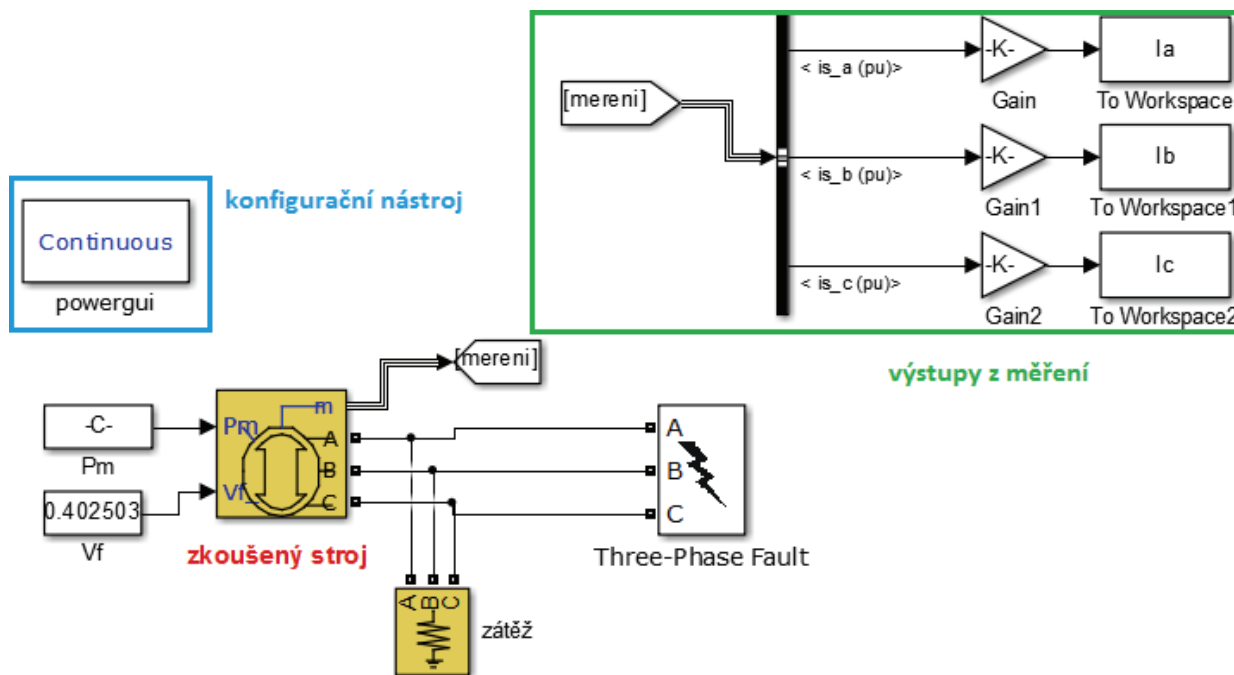
V předchozí kapitole jsou uvedeny naměřené grafické závislosti trojfázového a dvoufázového zkratového proudu zkoušeného synchronního stroje. Tyto závislosti budou porovnány se závislostmi získanými simulací za pomoci programu Matlab Simulink.

Pro sestavení modelu byl použit toolbox SymPowerSystem. V knihovně byl vybrán model synchronního stroje Synchronous Machine pu Standard. Tento model je potřeba nastavit tak, aby odpovídal zkoušenému synchronnímu stroji. Hodnoty získané z dokumentace výrobce stroje

vedeny v tabulce 6-1 a 6-2 byly nastaveny jako parametry modelu. Chybějící údaje byly převzaty z přednastaveného modelu synchronního stroje o výkonu 8500 VA. Nastavení těchto parametrů je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 7-1 Nastavení parametrů synchronního stroje pro simulaci



Obr. 7-2 Schéma simulace průběhu zkratového proudu testovaného synchronního stroje

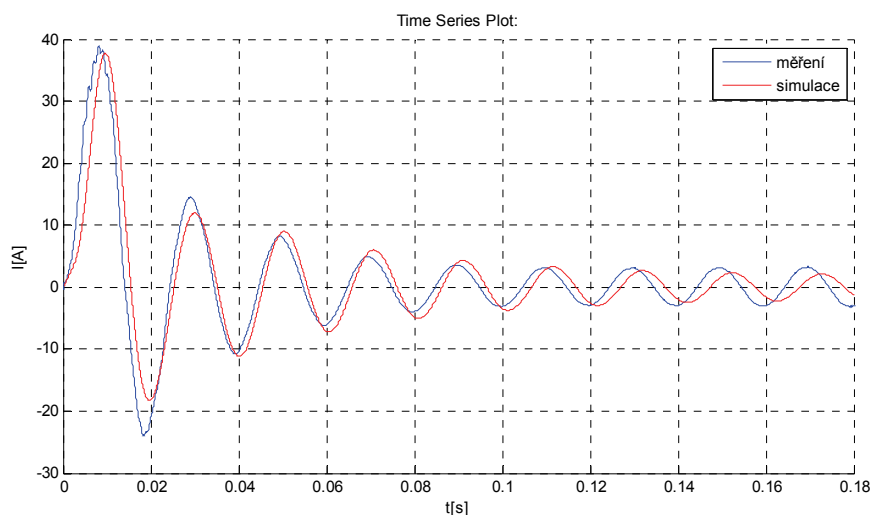
Obr.9-2 znázorňuje schéma simulace v prostředí Matlab/Simulink. Je zde zobrazen model synchronního stroje na jehož svorky je připojeno zkratovací zařízení a zátěž, která je nastavena na nulovou hodnotu. Zkratovací zařízení umožňuje nastavit trojfázový, dvoufázový a

jednofázový zkrat v závislosti na požadavcích simulace. V zeleně vyznačeném prostoru jsou zobrazeny výstupy z měření na synchronním stroji, které jsou exportovány do pracovního prostoru programu MATLAB. Zde se s těmito daty dá dále pracovat, analyzovat je a sestavit z nich grafické závislosti naměřených veličin.

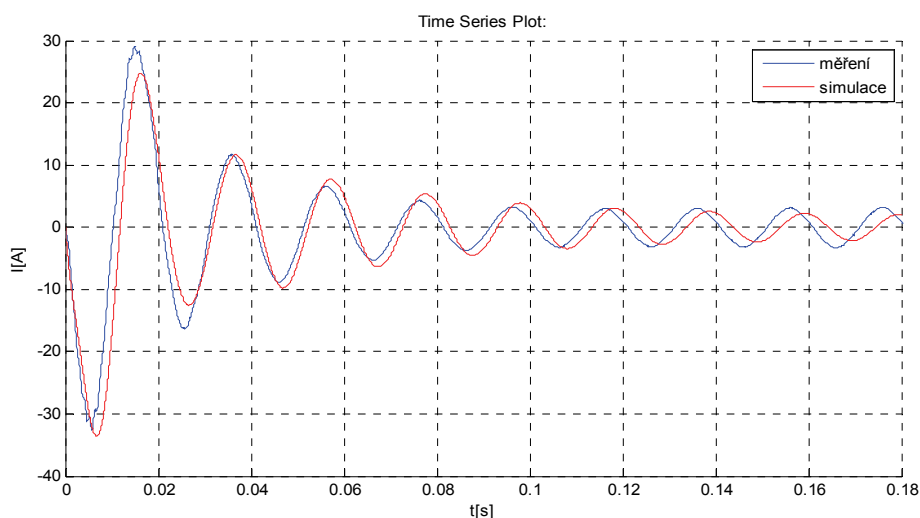
7.1.1 Trojfázový zkrat

Simulace je prováděna pro trojfázový zkrat na svorkách synchronního stroje, který pracuje před zkratem naprázdno. Po roztočení stroje na jmenovité otáčky se provede trojfázový zkrat na svorkách stroje. Porovnají se nasimulované časové průběhy zkratových proudů v jednotlivých fázích synchronního stroje s průběhy získanými měřeními na zkoušeném synchronním stroji. Simulace jsou provedeny při různých velikostech napětí naprázdno před vykrácením statorového vinutí.

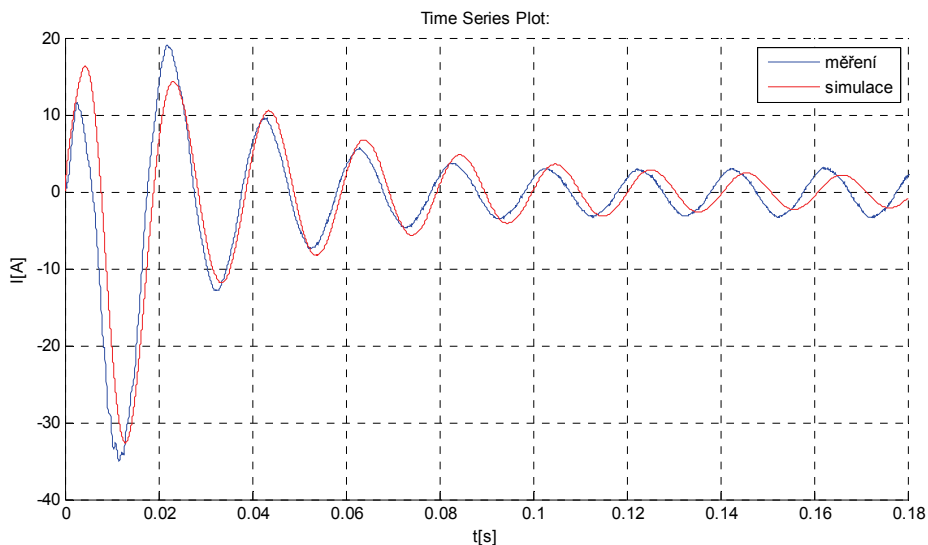
7.1.1.1 Srovnání trojfázového zkratového proudu získaného měřením a simulací při napětí naprázdno 67 V



Obr. 7-3 Srovnání zkratového proudu ve fázi L1 získaného měřením a simulací při $U_0 = 67$ V a trojfázovém zkratu

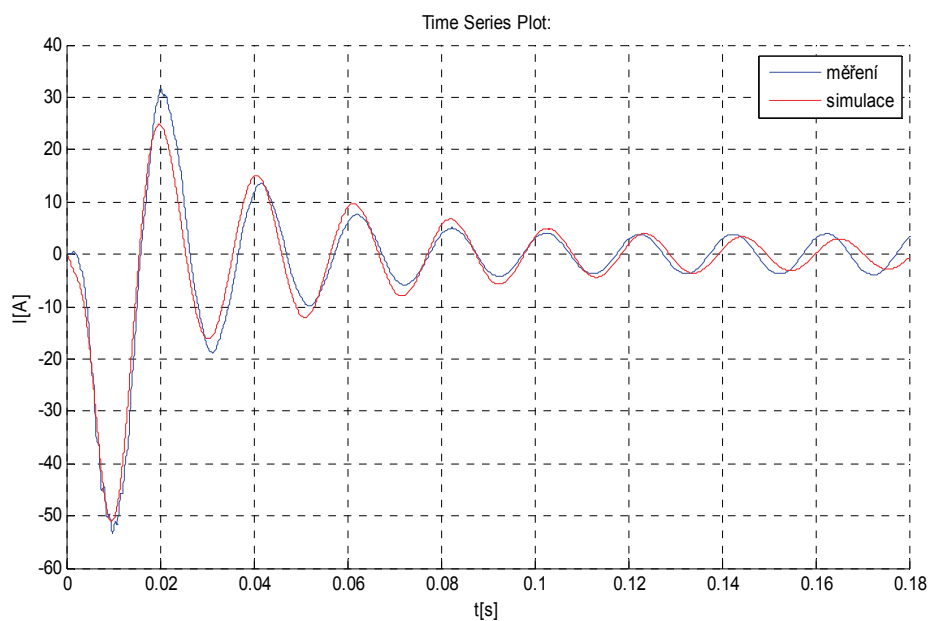


Obr. 7-4 Srovnání zkratového proudu ve fázi L2 získaného měřením a simulací při $U_0 = 67$ V a trojfázovém zkratu

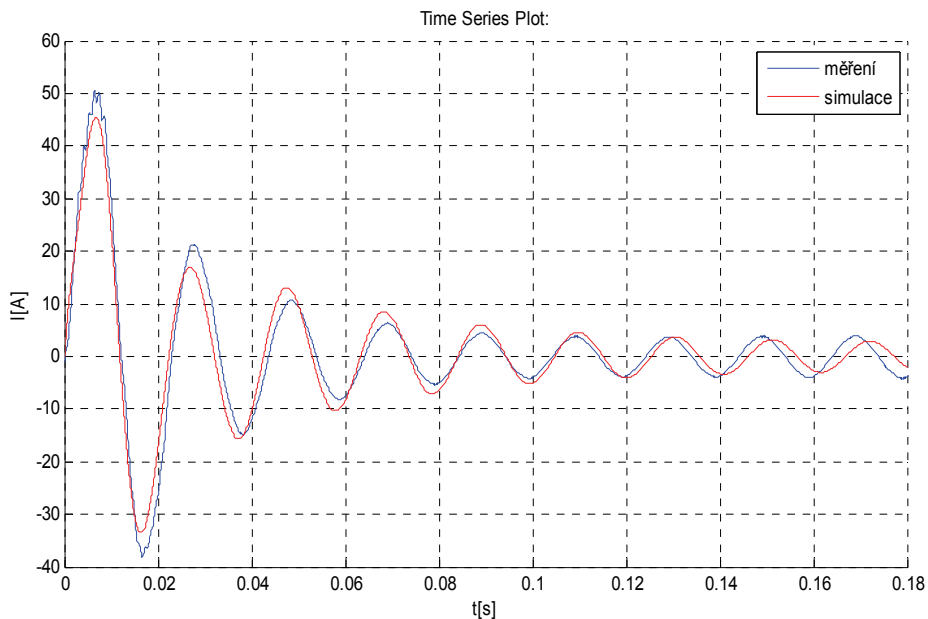


Obr. 7-5 Srovnání zkratového proudu ve fázi L3 získaného měřením a simulací při $U_0 = 67 V$ a trojfázovém zkratu

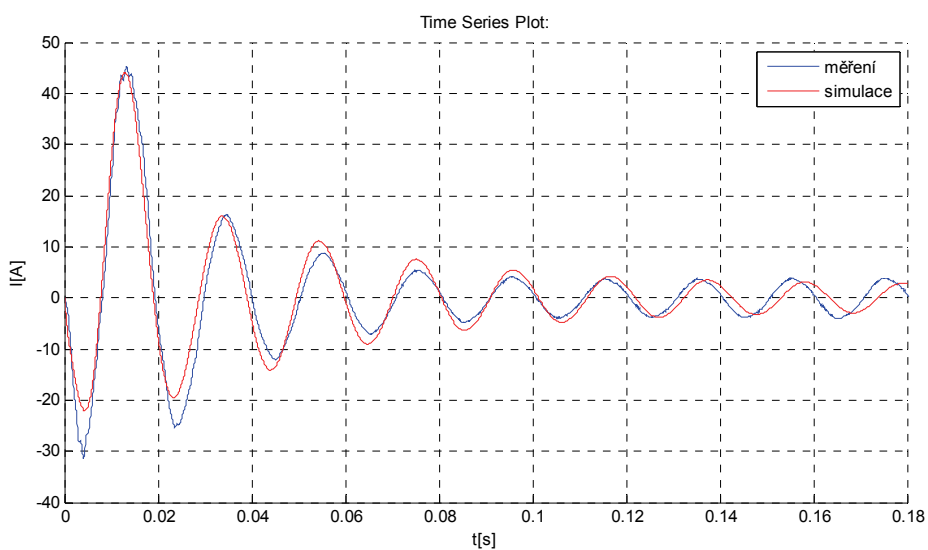
7.1.1.2 Srovnání trojfázového zkratového proudu získaného měřením a simulací při napětí naprázdno 91 V



Obr. 7-6 Srovnání zkratového proudu ve fázi L1 získaného měřením a simulací při $U_0 = 91 V$ a trojfázovém zkratu



Obr. 7-7 Srovnání zkratového proudu ve fázi L2 získaného měřením a simulací při $U_0 = 91 V$ a trojfázovém zkratu

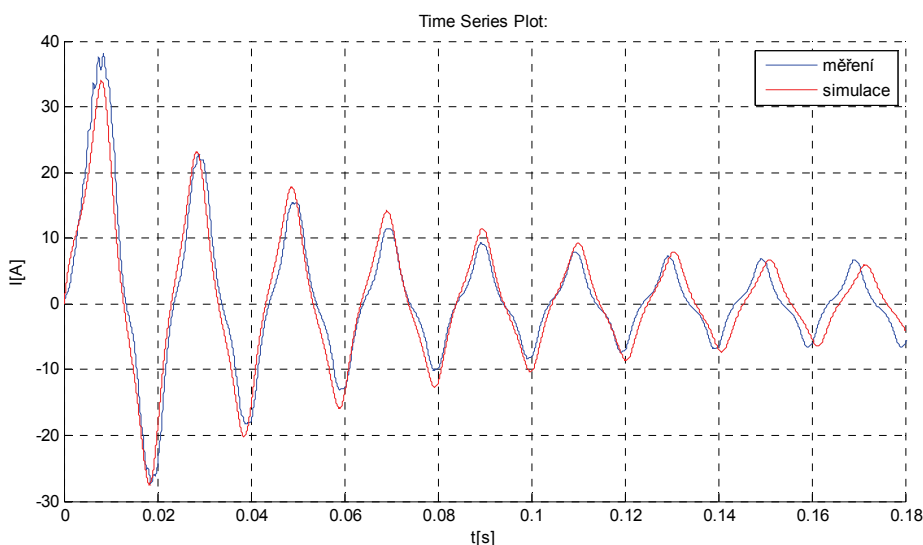


Obr. 7-8 Srovnání zkratového proudu ve fázi L3 získaného měřením a simulací při $U_0 = 91 V$ a trojfázovém zkratu

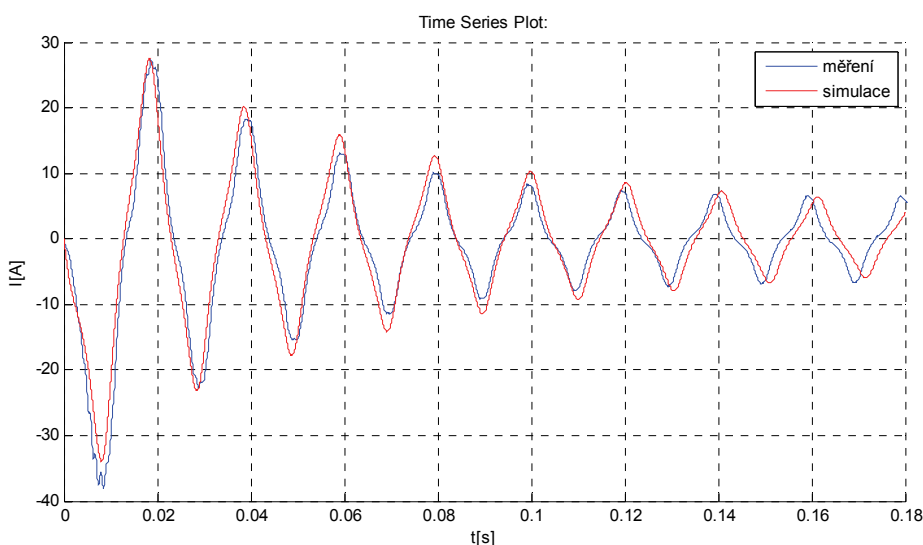
7.1.2 Dvoufázový zkrat

Simulace je prováděna pro dvoufázový zkrat na svorkách synchronního stroje, který pracuje před zkratem naprázdno. Po roztočení stroje na jmenovité otáčky se provede dvoufázový zkrat na svorkách stroje. Nyní se již dají porovnat časové průběhy nasimulovaných časových průběhů zkratových proudů v jednotlivých fázích synchronního stroje s průběhy získanými měřeními na zkoušeném synchronním stroji. Simulace byla provedena při různé velikosti napětí před zkratem.

7.1.2.1 Srovnání dvoufázového zkratového proudu získaného měřením a simulací při napětí naprázdno 69 V a zkratovaných fázích L1 a L2

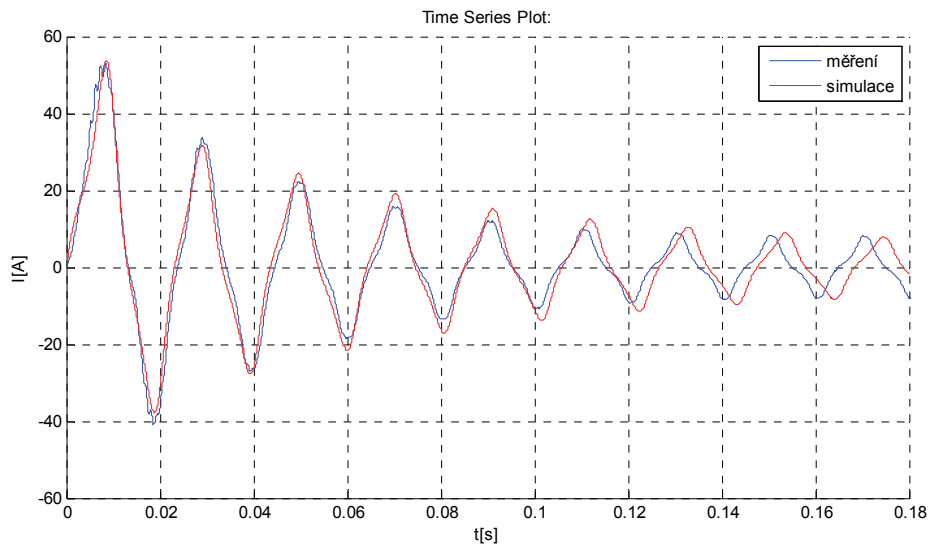


Obr. 7-9 Srovnání zkratového proudu ve fázi L1 získaného měřením a simulací při $U_0 = 69 V$ a dvoufázovém zkratu

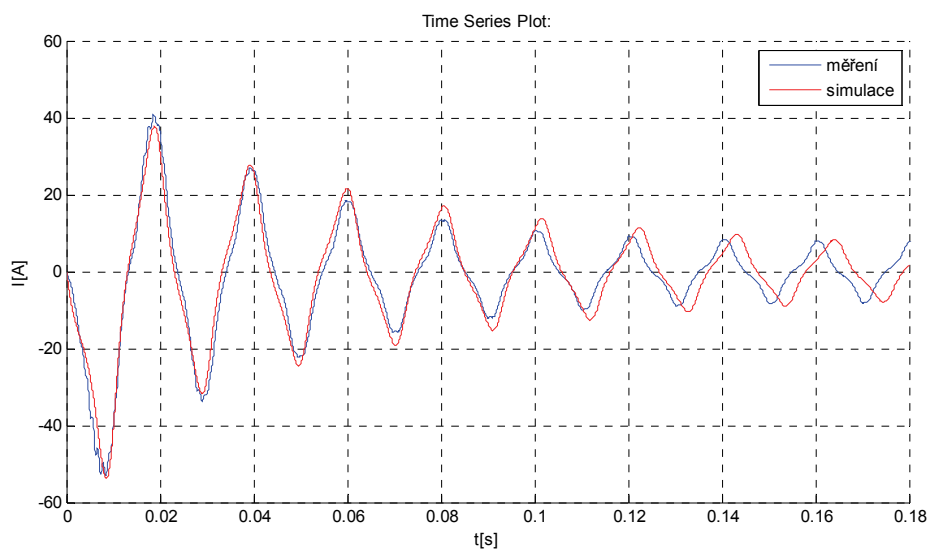


Obr. 7-10 Srovnání zkratového proudu ve fázi L2 získaného měřením a simulací při $U_0 = 69 V$ a dvoufázovém zkratu

7.1.2.2 Srovnání dvoufázového zkratového proudu získaného měřením a simulací při napětí naprázdno 94 V a zkratovaných fázích L1 a L2



Obr. 7-11 Srovnání zkratového proudu ve fázi L1 získaného měřením a simulací při $U_0 = 94 V$ a dvoufázovém zkratu



Obr. 7-12 Srovnání zkratového proudu ve fázi L1 získaného měřením a simulací při $U_0 = 94 V$ a dvoufázovém zkratu

8 ZÁVĚR

Hlavním cílem první části práce bylo detailní seznámení se s průběhem zkratových proudů synchronního stroje obecně. Jsou zde uvedeny zjednodušení, která se zavádějí při výpočtu elektromagnetických přechodných jevů a je zde podrobně rozebrána problematika trojfázového zkratu na svorkách nezátíženého generátoru. V prvních okamžicích přechodného jevu se synchronní alternátor nahrazuje reaktancemi. Zkratová porucha je doprovázena přechodným jevem v níž dochází k plynulým změnám reaktancí. Je zde popsáno, jaké reaktance a časové konstanty se uplatňují v jednotlivých částech přechodného jevu a jak se tyto veličiny vypočítají. Dále je zde popsán časový průběh zkratového proudu ve vinutí statoru synchronního stroje a z jakých složek se tento zkratový proud skládá. Jednotlivé složky jsou popsány matematickými vztahy, kterými se dají vypočítat. Závěr teoretické části diplomové práce se věnuje určení reaktancí synchronního stroje ze zkoušek podle normy ČSN EN 60034-4 ed.2. Této problematice se věnují kapitoly 3-5.

Cílem druhé části práce bylo měření zkratového proudu konkrétního synchronního stroje. Této části práce se věnuje kapitola 6. Tento stroj je zde popsán a jsou zde uvedeny jeho parametry. Byla provedena zkouška synchronního stroje naprázdno a nakrátko, ze které byla určena podélná synchronní a netočivá reaktance. Netočivá reaktance byla dále určena ze zkoušky při dvoufázovém spojení kotvy nakrátko s uzlem vinutí. Dále byl naměřen časový průběh trojfázového zkratového proudu pro různé hodnoty napětí naprázdno, před provedením zkratu. Tyto průběhy byly zanalyzovány a byly z nich vypočteny hodnoty podélné synchronní, rázové a přechodné reaktance. Jako poslední bylo provedeno měření časového průběhu dvoufázového zkratového proudu. Z takto získaných časových průběhů byla vypočtena hodnota zpětné reaktance. U jednotlivých zkoušek a naměřených časových průběhů zkratových proudů je provedeno jejich vyhodnocení.

Poslední část diplomové práce je věnována simulaci časového průběhu zkratového proudu. K simulaci byl použit program Matlab/Simulink, jehož funkce zde byly popsány. Byl vybrán model synchronního stroje z knihovny SimPowerSystem, který byl nastaven tak, aby co nejvíce odpovídal zkoušenému synchronnímu stroji. Jsou zde provedena srovnání mezi naměřeným trojfázovým časovým průběhem zkratového proudu, který byl naměřen pro různá napětí naprázdno a nasimulovanými průběhy pro stejnou situaci. Toto porovnání bylo provedeno i pro dvoufázový zkrat. Této problematice se věnuje kapitola 7. Z porovnání plyne, že model synchronního stroje, který byl vybrán z knihovny SimPowerSystem je dostačující k přesné simulaci, jelikož nasimulované průběhy zkratových proudů se od naměřených časových průběhů zkratových proudů zkoušeného synchronního stroje liší jen minimálně.

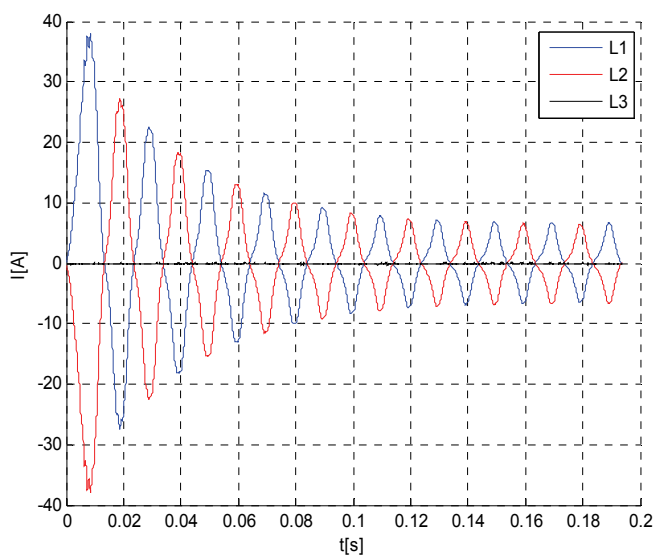
POUŽITÁ LITERATURA

- [1] DOLEŽAL, Jaroslav, Jiří ŠŤASTNÝ, Jan ŠPETLÍK, Stanislav BOUČEK a Zbyněk BRETTSCHEIDER. *Jaderné a klasické elektrárny*. vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 259 s. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [2] DOHNÁLEK, P. *Ochrany pro průmysl a energetiku*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1991, 340 s.
- [3] PETROV, G. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje-synchronní stroje*. 1. vyd. Praha: Academia, 1982, 728 s.
- [4] Z. Trojánek, J. Hájek, P. Kvasnica: *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*, SNTL, Praha 1987
- [5] HODINKA, Miloslav. *Přechodné jevy v elektrizační soustavě*. 3. vyd. Brno: VUT, 1990, 246 s. ISBN 80-214-0083-8.
- [6] REVÁKOVÁ, Daniela, Žaneta ELESCHOVÁ a Anton BELÁŇ. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. 1. vyd. V Bratislavě: Vydavateľstvo STU, 2008, 180 s. ISBN 978-80-227-2868-3.
- [7] ČSN EN 60034-4 ed.2 *Točivé elektrické stroje - Část 4: Metody určování veličin synchronních strojů ze zkoušek*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [8] BAŠTA, Jan, Eduard KABRNA, Vojtěch KULDA, Jaroslav ZAJÍČEK a Zdeněk ZOUBEK. *Měření na elektrických strojích: 5. Měření na synchronních strojích*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1964, 305 s
- [9] ALTERNATORS LSA 37- 4 Pole, Electrical and Mechanical data,
http://www.grafmotoren.eu/technik/ls_ lsa_ 4p.pdf

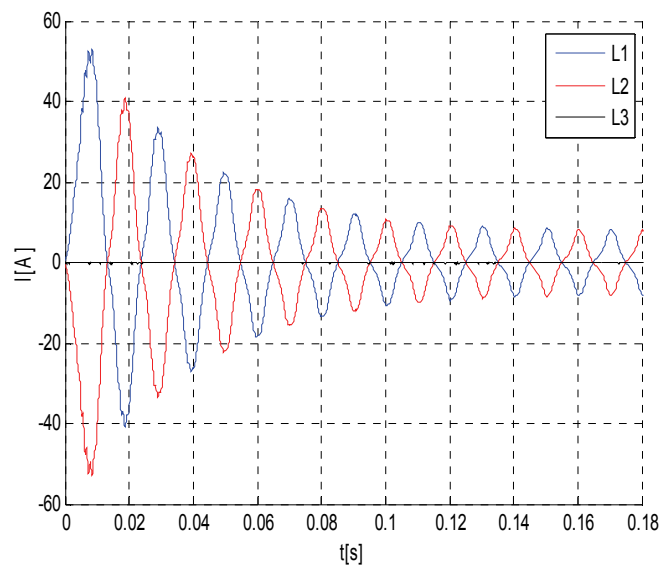
PŘÍLOHA A PRŮBĚHY NAMĚŘENÉHO DVOUFÁZOVÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU

Na následujících obrázcích jsou znázorněny časové průběhy dvoufázového zkratového proudu, které byly naměřeny pro různé hodnoty napětí kotvy před zkratem a různé vykrácené fáze statorového vinutí.

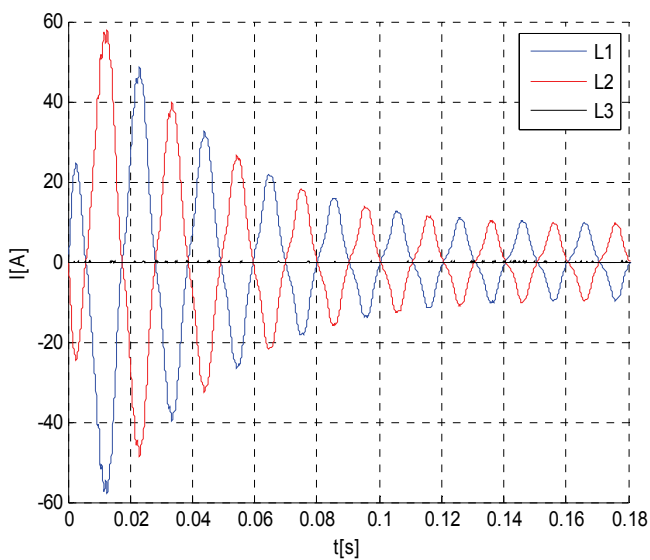
Zkrat mezi fázemi L1 a L2:



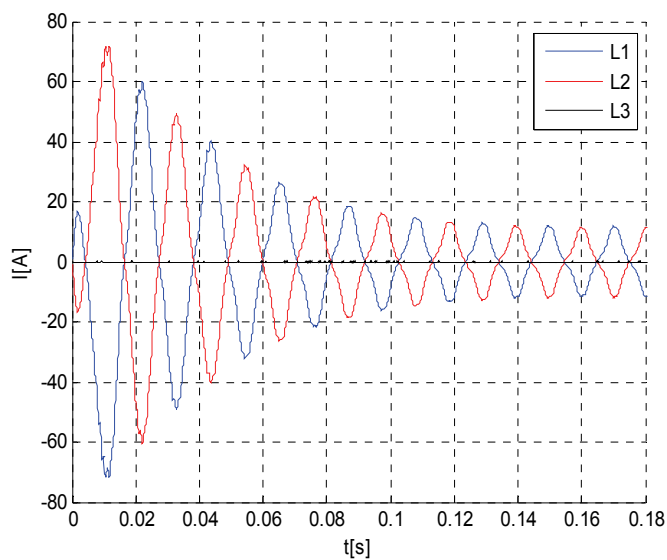
$$U_0 = 69 \text{ V}$$



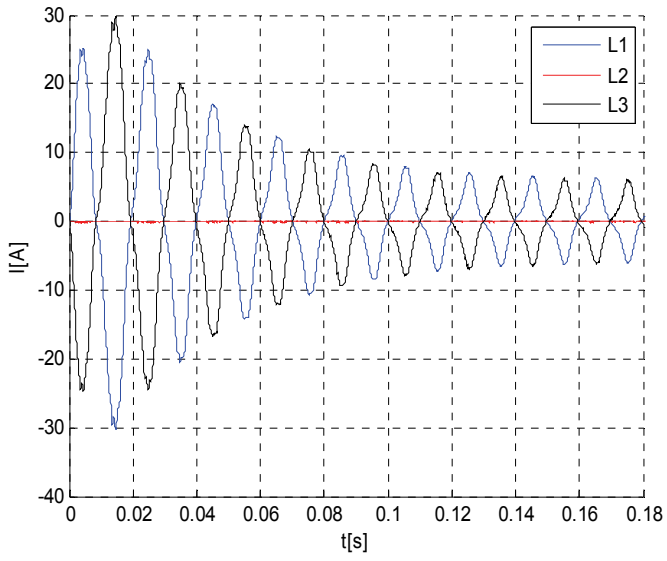
$$U_0 = 94 \text{ V}$$



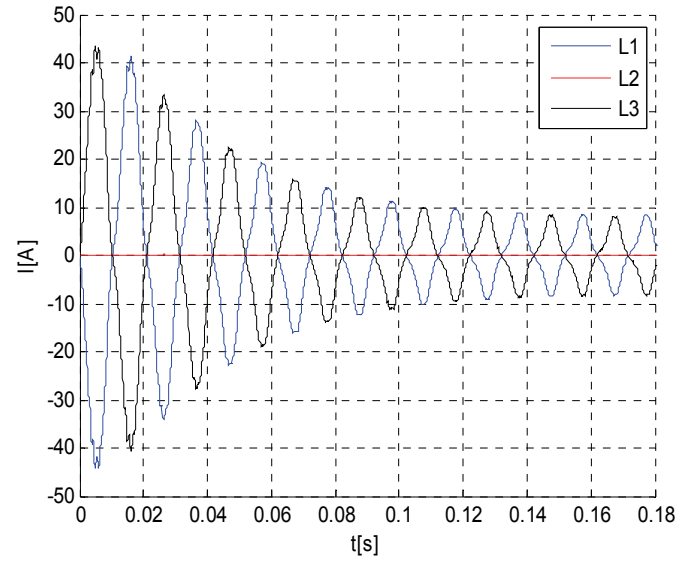
$$U_0 = 118 \text{ V}$$



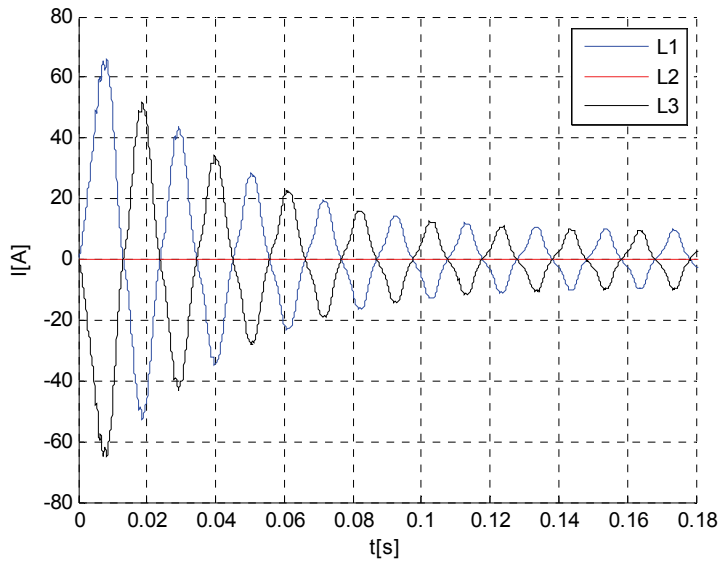
$$U_0 = 140 \text{ V}$$

Zkrat mezi fázemi L1 a L3:

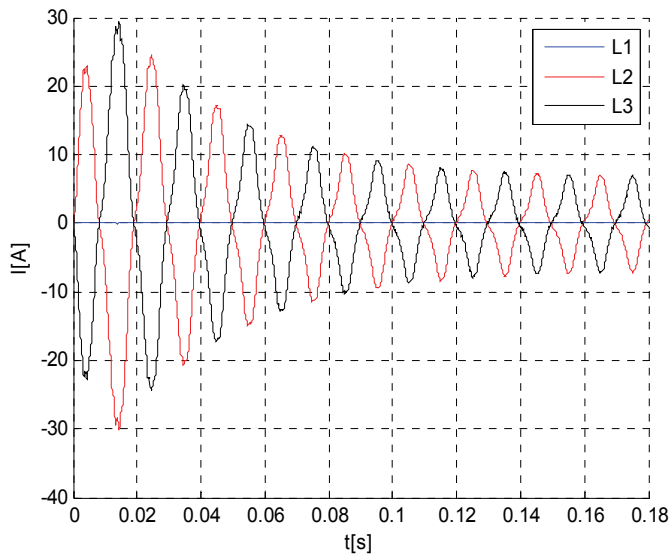
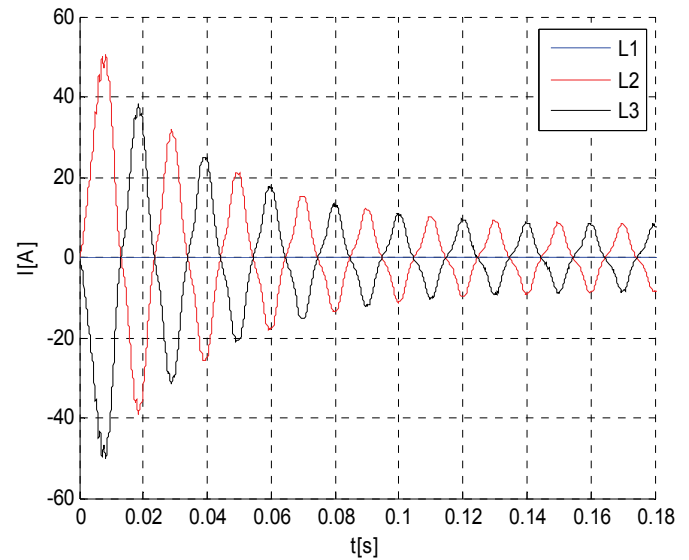
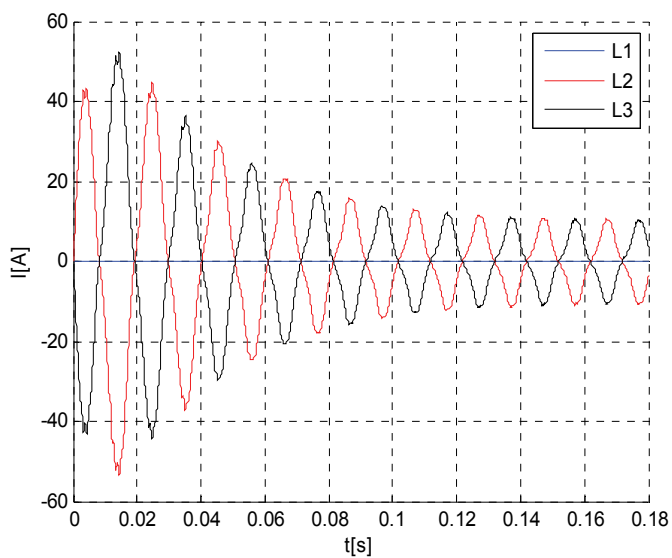
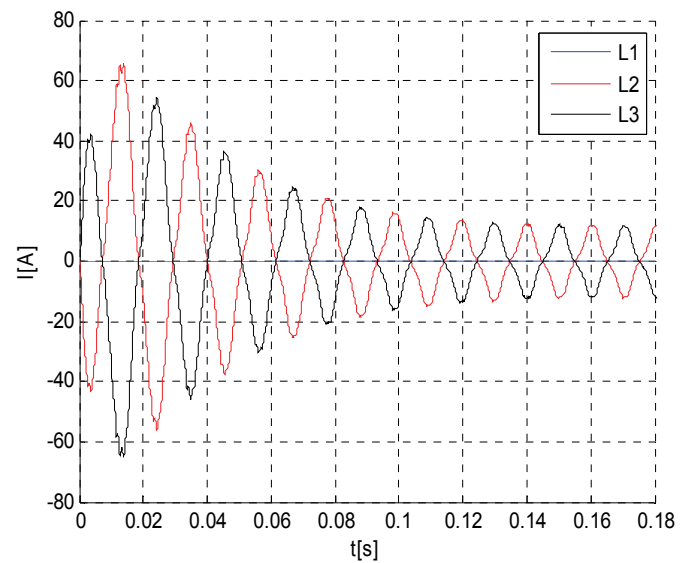
$$U_0 = 70 V$$



$$U_0 = 96 V$$



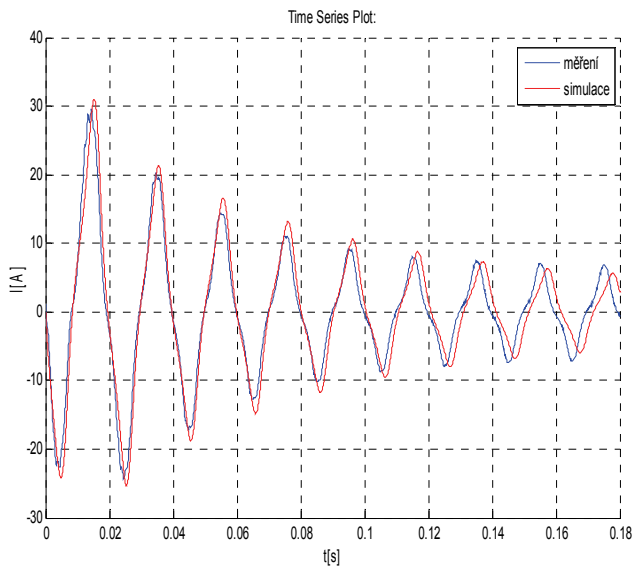
$$U_0 = 117 V$$

Zkrat mezi fázemi L2 a L3: $U_0 = 68 V$  $U_0 = 92 V$  $U_0 = 118 V$  $U_0 = 140 V$

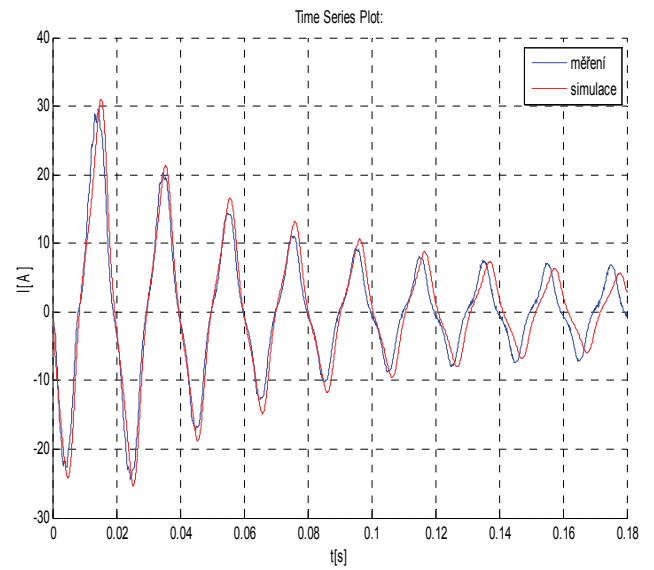
PŘÍLOHA B SROVNÁNÍ NAMĚŘENÉHO A NASIMULOVANÉHO DVOUFÁZOVÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU

Na následujících obrázcích jsou znázorněny časové průběhy, které srovnávají naměřený a nasimulovaný průběh zkratového proudu. Srovnání je provedeno pro různá napětí kotvy naprázdno a dané zkratované fáze.

Zkratovaná fáze L2 a L3 při $U_0 = 68 V$

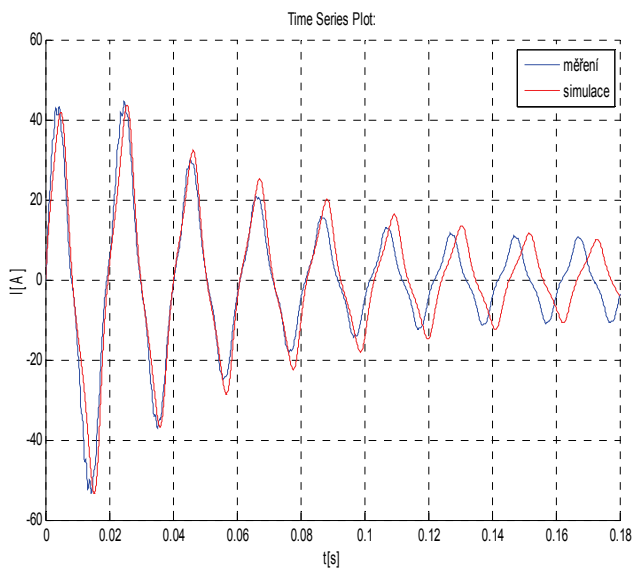


fáze L_2

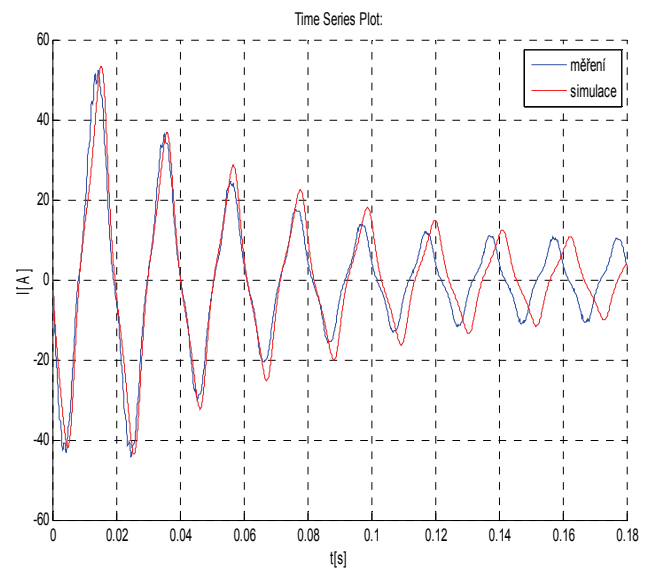


fáze L_3

Zkratovaná fáze L2 a L3 při $U_0 = 118 V$



fáze L_2

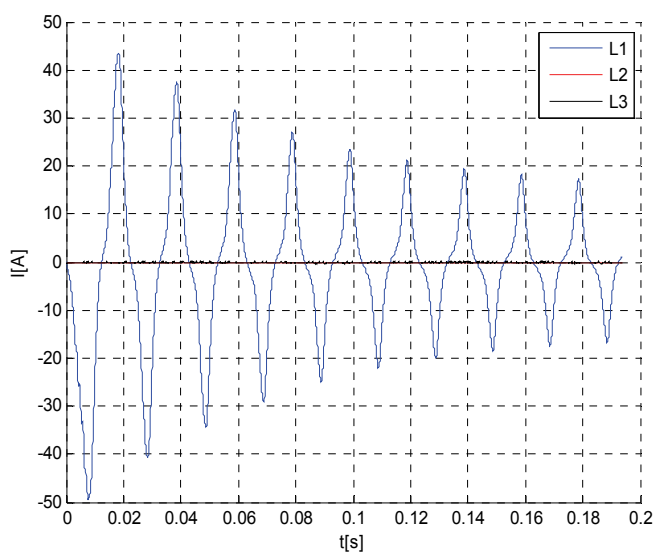


fáze L_3

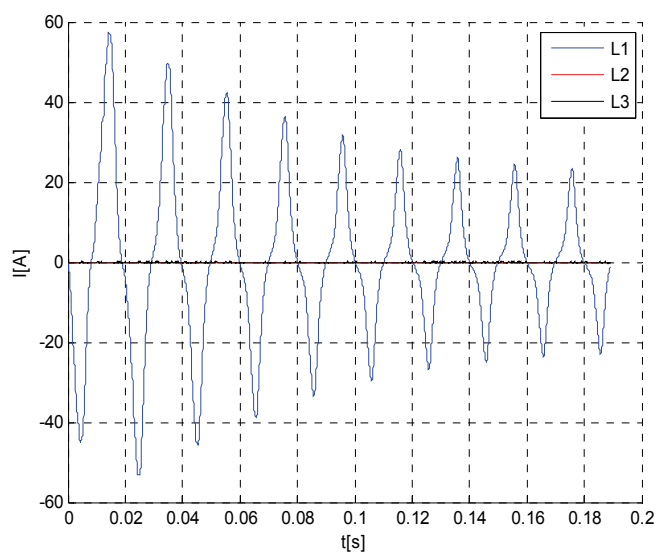
PŘÍLOHA C PRŮBĚHY NAMĚŘENÉHO JEDNOFÁZOVÉHO ZKRATOVÉHO PROUDU

Na následujících obrázcích jsou znázorněny časové průběhy naměřeného jednofázového zkratového proudu, které byly naměřeny pro různé hodnoty napětí kotvy před zkratem a postupně zkratované všechny tři fáze statorového vinutí.

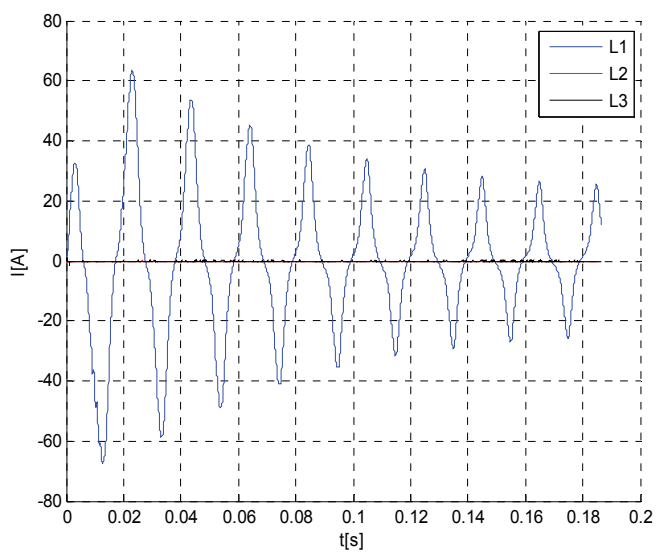
Zkratovaná fáze L1 s uzlem vinutí:



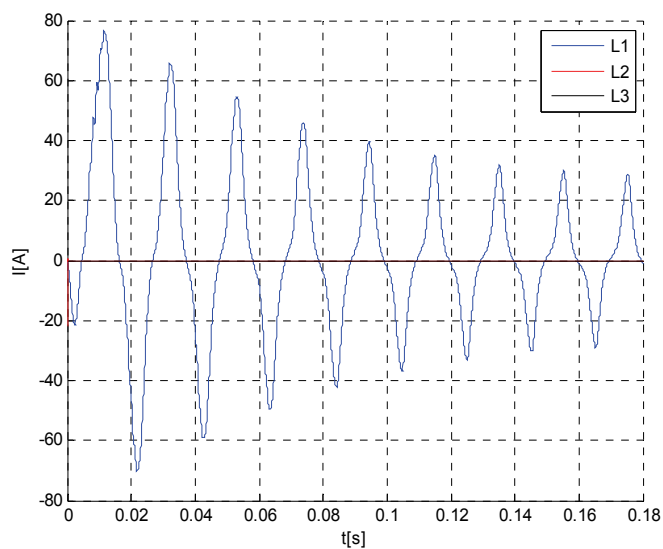
$$U_0 = 69 V$$



$$U_0 = 92 V$$

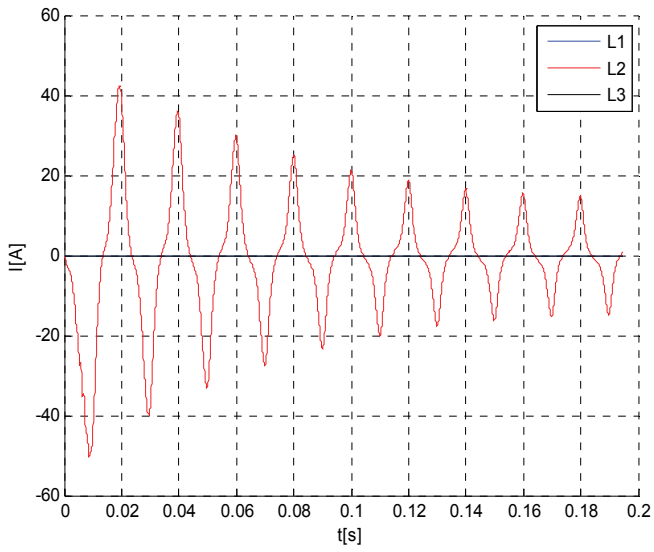


$$U_0 = 106 V$$

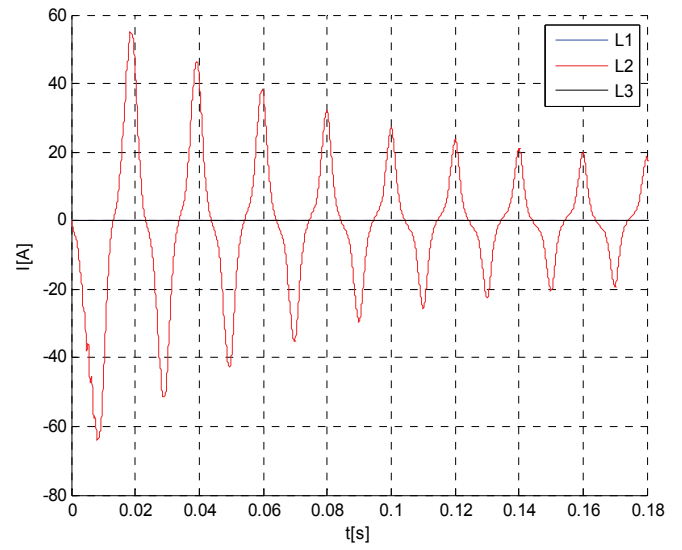


$$U_0 = 117 V$$

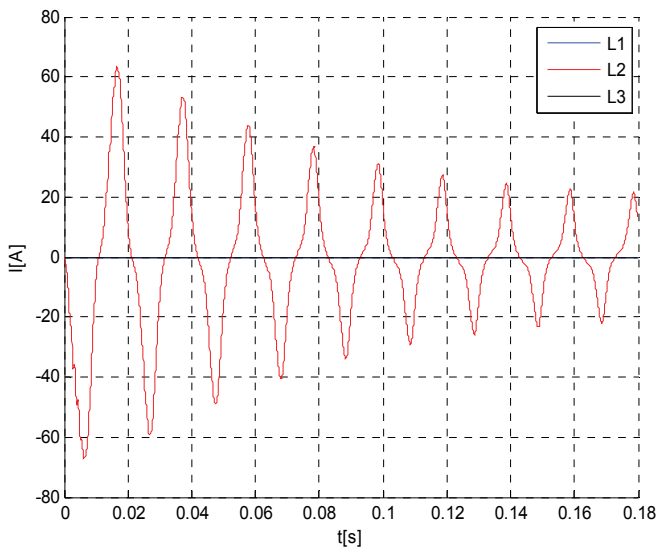
Zkratovaná fáze L2 s uzlem vinutí:



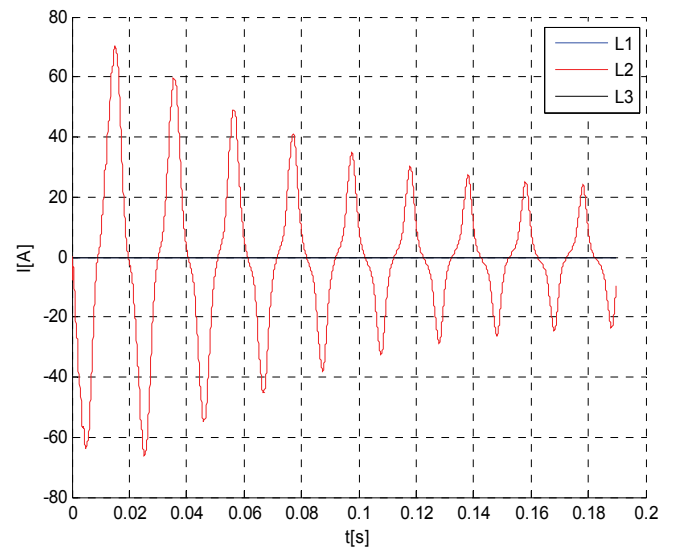
$$U_0 = 69 V$$



$$U_0 = 92 V$$

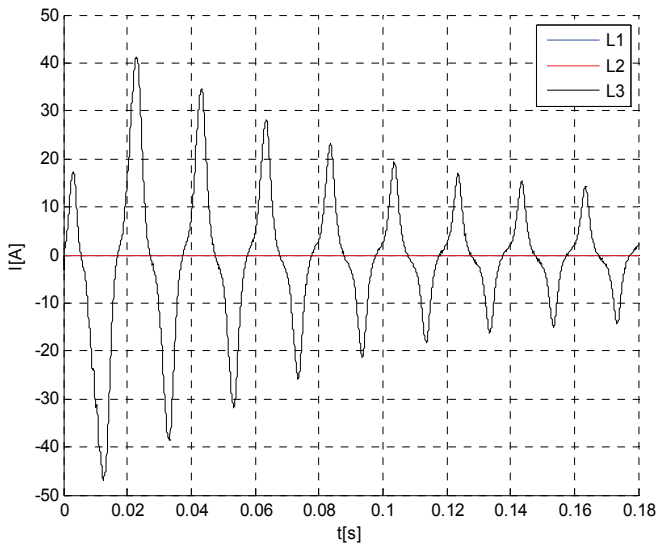


$$U_0 = 106 V$$

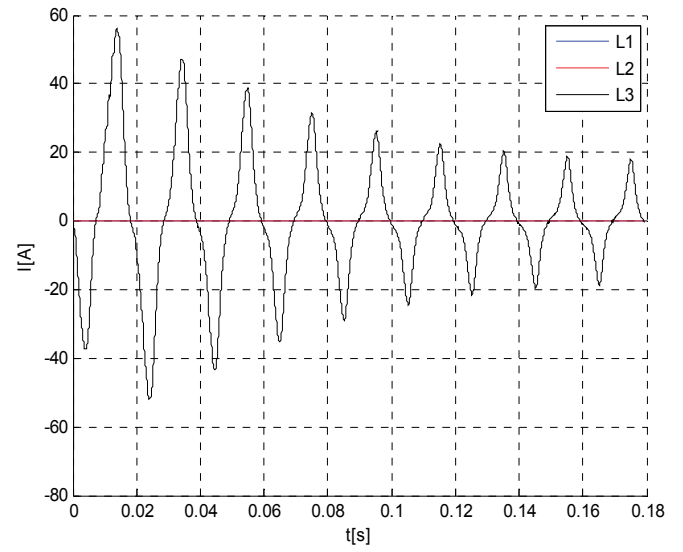


$$U_0 = 118 V$$

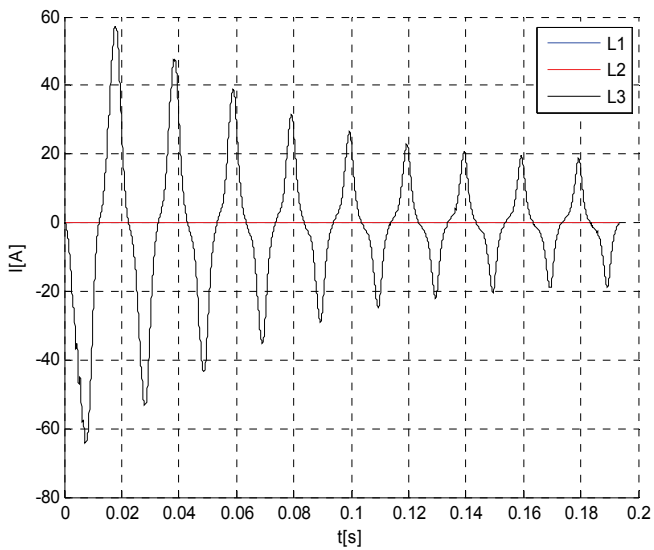
Zkratovaná fáze L3 s uzlem vinutí:



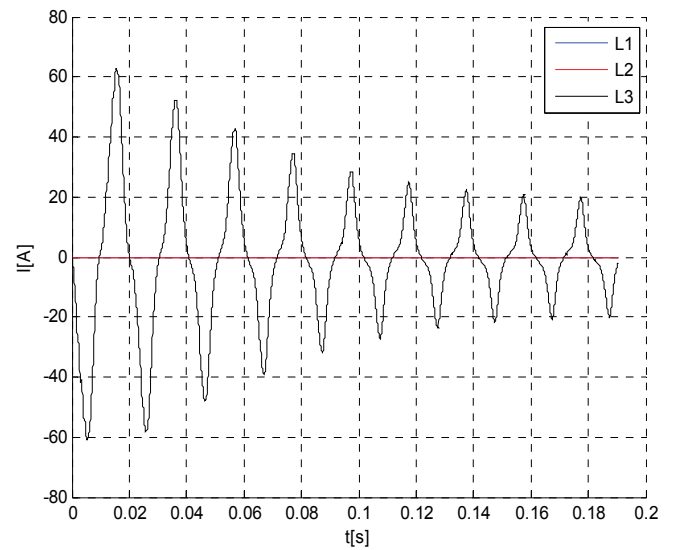
$$U_0 = 71 V$$



$$U_0 = 92 V$$



$$U_0 = 106 V$$



$$U_0 = 118 V$$