

**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**

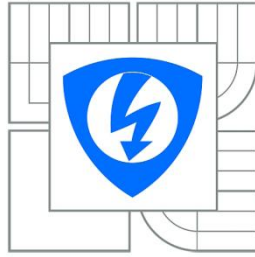
**CHRÁNĚNÍ GENERÁTORU PŘI ZTRÁTĚ  
BUZENÍ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE  
AUTHOR**

**JIŘÍ ČÁSLAVA**

**BRNO 2010**



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

**Student:** Jiří Čáslava  
**Ročník:** 3

**ID:** 106394  
**Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

**Chránění generátoru při ztrátě buzení**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teoretický rozbor asynchronního chodu generátoru
2. Princip ochrany při ztrátě buzení generátoru
3. Konfigurace a nastavení ochrany při ztrátě buzení pro laboratorní generátorové soustrojí
4. Testování ochranné funkce terminálu pomocí laboratorního generátorového soustrojí

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 31.5.2010

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

**doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.**  
*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

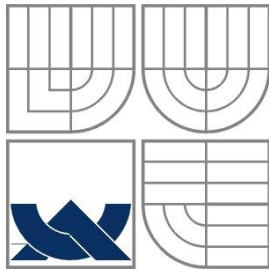
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných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

Bibliografická citace práce:

ČÁSLAVA, J. CHRÁNĚNÍ GENERÁTORU PŘI ZTRÁTĚ BUZENÍ . BRNO: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ, 2010. 55 s. VEDOUcí BAKALÁŘSKÉ PRÁCE DOC. ING. JAROSLAVA ORSÁGOVÁ, PH.D.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**  
**Ústav elektroenergetiky**

**Bakalářská práce**

# **Chránění generátoru při ztrátě buzení**

**Jiří Čáslava**

**vedoucí: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2010**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

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

**Bachelor's Thesis**

# **Loss-of-excitation Protection for Synchronous Generator**

by

**Jiří Čáslava**

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

**Brno University of Technology, 2010**

**Brno**

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych vyjádřil mé poděkování doc. Ing. Jaroslavě Orságové, Ph.D. za odborné rady a vedení při vytváření mé závěrečné práce pro bakalářské studium, zejména za čas, který mi byl věnován.

## ABSTRAKT

Úkolem této práce je vytvoření teoretického rozboru problematiky budících a odbuzovacích soustav synchronních alternátorů, rozbor jejich funkcí, a problematiky jejich poruch, s čímž souvisí následný rozbor asynchronního chodu generátoru, který nastává při velkém poklesu, nebo úplné ztrátě buzení. Dále je nutno provést rozbor mezního zatížení a přechodových stavů při ztrátě buzení s následným shrnutím poznatků a možností diagnostiky ztráty buzení. Dalším úkolem je seznámení se s možnostmi ochrany terminálu točivého elektrického stroje REM 543 vyráběného firmou ABB a jejich následnou konfigurací a testováním, ke kterému využijeme testovací zařízení ochrany TZO 3, které vyrábí firma EGÚ Brno. Primárním cílem této práce je vytvoření podrobného návodu k výpočtu parametrů nutných k nastavení ochranné funkce UE6High terminálu REM 543, dále konfiguraci komunikace ochrany a testovacího zařízení TZO 3 s PC a nastavení terminálu REM 543 včetně nastavení testovacího zařízení TZO 3. Funkce UE6High funguje na principu distanční ochrany, která je nejrozšířenější a nejúčinnější při detekci ztráty buzení synchronního alternátoru. Pomocí vypočítaných hodnot provedeme nastavení vysunutí MHO charakteristiky v impedanční rovině. Práce dále obsahuje naměřené hodnoty vypínací charakteristiky v impedanční rovině pro různá nastavení rychlosti změny provozních veličin buzení, jimiž jsou napětí, proud a fázový posun naměřené ve všech třech fázích.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** synchronní stroj; synchronní alternátor; ztráta buzení; podbuzení; budící systémy; odbuzovače; terminál točivého stroje REM 543; asynchronní chod; UE6High; ochrana při ztrátě buzení; ABB; CAP 505; TZO 3; MHO charakteristika.

**ABSTRACT**

The aim of this work is to create a theoretical analysis of the problem of the exciting and de/exciting systems of synchronous alternators, an analysis of their functions and the problem of their disturbances, in connection with this being the following analysis of the asynchronous operation of the generator which appears with a big drop or with total loss of excitation. Further, it is necessary to carry out an analysis of the marginal loading and of the transient phenomena during the loss of excitation with the following summary of the knowledge and of the possibilities of the excitation loss diagnosis. The next task is to get acquainted with the possibilities how to protect machine protection terminal REM 543 produced by the ABB company, as well as with their following configuration and testing, for which we use the testing equipment of the protections TZO 3 produced by EGÚ Brno company. The primary goal of this work is to create a detailed direction for the calculation of the parameters necessary to put up the protection function UE6High of the REM 543 terminal, further to create the configuration of the protection communication and of the TZO 3 test device with PC, as well as to put up the REM 543 terminal including the putting up of the test TZO 3 device. The UE6High function works on the principle of the distance protection which is the most extended and the most effective to detect the loss of the synchronous alternator excitement. By means of the calculated values we carry out the putting up in order to pull out the MHO characteristic on the impedance level. The work also contains the measured values of the switch characteristic on the impedance level for various putting up of the rapidity of change of the excitement working quantities like voltage, current and phase shift measured within all three phases.

**KEY WORDS:** synchronous machine; alternator; loss of excitation; under excitation; excitation systems; field suppressors; deexciting systems; Machine Protection Terminal REM 543; asynchronous operation; UE6High; protection against loss of excitation; ABB; CAP 505; TZO 3; MHO characteristic.

## OBSAH

|   |           |
|---|-----------|
| <b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>  | <b>10</b> |
| <b>SEZNAM TABULEK .....</b>   | <b>11</b> |
| <b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>                                      | <b>12</b> |
| <b>1 SYNCHRONNÍ STROJE .....</b>  | <b>14</b> |
| <b>1.1 DEFINICE .....</b>   | <b>14</b> |
| <b>1.2 ROZDĚLENÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ .....</b>                            | <b>14</b> |
| 1.2.1 PODLE ZPŮSOBU PROVEDENÍ ROTORU .....                                | 14        |
| 1.2.2 PODLE FUNKCE .....  | 14        |
| <b>1.3 INDUKCE TROJFÁZOVÉ ELEKTROMOTORICKÉ SÍLY.....</b>                  | <b>14</b> |
| <b>1.4 VINUTÍ KOTVY.....</b>  | <b>15</b> |
| 1.4.1 REKCE KOTVY SYNCHRONNÍHO STROJE .....                               | 15        |
| <b>1.5 ŘÍZENÍ NAPĚTÍ SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU .....</b>                    | <b>15</b> |
| 1.5.1 PŘÍMÉ ŘÍZENÍ .....  | 15        |
| 1.5.2 NEPŘÍMÉ ŘÍZENÍ.....   | 16        |
| <b>1.6 MOMENT SYNCHRONNÍHO STROJE .....</b>                               | <b>16</b> |
| <b>1.7 KÝVÁNÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ .....</b>                               | <b>16</b> |
| <b>1.8 KONSTRUKCE SYNCHRONNÍCH STROJŮ S HLADKÝM ROTOREM .....</b>         | <b>18</b> |
| 1.8.1 KONSTRUKCE STATORU .....  | 19        |
| 1.8.2 KONSTRUKCE ROTORU.....  | 19        |
| <b>2 BUDÍCÍ SOUSTAVY ALTERNÁTORŮ.....</b>                                 | <b>20</b> |
| <b>2.1 ROZDĚLENÍ BUDÍCÍCH SOUSTAV SYNCHRONNÍCH ALTERNÁTORŮ .....</b>      | <b>20</b> |
| 2.1.1 BUDÍCÍ SOUSTAVY S TOČIVÝM BUDIČEM.....                              | 21        |
| 2.1.2 STATICKÉ BUDÍCÍ SYSTÉMY S KROUŽKY NA HŘÍDELI .....                  | 21        |
| 2.1.3 BUDÍCÍ SYSTÉMY BEZKARTÁČOVÉ .....                                   | 22        |
| <b>3 ODBUZOVAČE .....</b>   | <b>23</b> |
| <b>3.1 NEJPOUŽÍVANĚJŠÍ ODBUZOVAČÍ SYSTÉMY .....</b>                       | <b>23</b> |
| 3.1.1 ODBUZOVAČE S PARALELNÍM ZHÁŠECÍM ELEKTRICKÝM ODPOREM .....          | 23        |
| 3.1.2 ODBUZOVAČ SE ZHÁŠECÍ KOMOROU .....                                  | 23        |
| 3.1.3 ODBUZENÍ V BUDÍCÍCH SOUSTAVÁCH S TYRISTOROVÝMI SYSTÉMY BUZENÍ.....  | 24        |
| <b>4 CÍLE PRÁCE .....</b>   | <b>25</b> |
| <b>5 ASYNCHRONNÍ CHOD ALTERNÁTORU.....</b>                                | <b>26</b> |
| <b>5.1 MEZNÍ ZATÍŽENÍ PŘI ZTRÁTĚ BUZENÍ .....</b>                         | <b>27</b> |
| <b>5.2 OCHRANA PŘI ZTRÁTĚ BUZENÍ .....</b>                                | <b>32</b> |
| <b>6 PŘIPOJENÍ A KONFIGURACE TERMINÁLU REM543 .....</b>                   | <b>34</b> |
| <b>6.1 NASTAVENÍ TERMINÁLU REM 543 PRO TESTOVÁNÍ FUNKCE UE6HIGH .....</b> | <b>36</b> |
| <b>7 POPIS TESTOVÁNÍ TERMINÁLU REM 543 .....</b>                          | <b>44</b> |

---

|  |           |
|--|-----------|
| 7.1 NAMĚŘENÉ A VYPOČÍTANÉ HODNOTY .....        | 50        |
| <b>8 ZÁVĚR A VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....</b>         | <b>53</b> |
| 8.1 SOUČASNÝ STAV .....                        | 53        |
| 8.2 SHRnutí NOVÝCH POZNATKŮ PRÁCE .....        | 54        |
| 8.3 ZÁVĚRY PRÁCE A JEJÍ PŘÍNOS .....           | 54        |
| 8.4 VÝZNAM A VYUŽITÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ ..... | 54        |
| <b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>                | <b>55</b> |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|  |    |
|--|----|
| <i>Obr. 5-1 Rozdíl v nastavování impedanční ochrany [8].</i>                                       | 27 |
| <i>Obr. 5-2 Provozní diagram synchronního stroje</i>   | 28 |
| <i>Obr. 5-3 Náhradní schéma alternátoru při práci do sítě přes reaktanci <math>x_v</math> [8].</i> | 29 |
| <i>Obr. 5-4 Fázorový diagram pro uvažovaný alternátor s <math>x_d = x_q</math>.</i>                | 29 |
| <i>Obr. 5-5 Fázorový diagram pro hydroalternátor.</i>  | 29 |
| <i>Obr. 6-1 Hlavní obrazovka programu CAP 505.</i>   | 34 |
| <i>Obr. 6-2 Okno „General Object Attributes“</i>   | 35 |
| <i>Obr. 6-3 Okno „System Configuration“</i>  | 35 |
| <i>Obr. 6-4 Okno „Relay Download Tool“</i>   | 36 |
| <i>Obr. 6-5 Vyřazení ochranné funkce.</i>  | 37 |
| <i>Obr. 6-6 Odeslání nastavení do ochrany.</i>   | 38 |
| <i>Obr. 6-7 Zobrazení „Actual Setting“ funkce UE6High.</i>   | 39 |
| <i>Obr. 6-8 Nastavení „Setting group 2“</i>  | 40 |
| <i>Obr. 6-9 Zobrazení „Control setting“</i>  | 41 |
| <i>Obr. 6-10 Zobrazení záložky „Input data“</i>  | 42 |
| <i>Obr. 6-11 Zobrazení záložky „Output data“</i>   | 42 |
| <i>Obr. 6-12 Zobrazení záložky „Recorded data 1“</i>   | 43 |
| <i>Obr. 7-1 Volba typu zkoušky.</i>  | 45 |
| <i>Obr. 7-2 Nastavení veličin pro zkoušku typu trend.</i>  | 45 |
| <i>Obr. 7-3 Schéma propojení REM 543, TZO 3 a PC.</i>  | 46 |
| <i>Obr. 7-4 Schéma zapojení terminálu REM 543[7].</i>  | 47 |
| <i>Obr. 7-5 Volba proměnné veličiny.</i>   | 48 |
| <i>Obr. 7-6 Nastavení proměnné veličiny.</i>   | 48 |
| <i>Obr. 7-7 Nastavení časů testu zkoušky typu zkrat.</i>   | 49 |
| <i>Obr. 7-8 Nastavení veličin zkoušky typu zkrat.</i>  | 49 |
| <i>Obr. 8-1 Vypínací charakteristika ochrany UE6High.</i>  | 53 |

**SEZNAM TABULEK**

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Tabulka 7-1 Horní část charakteristiky.....</i>                           | <i>50</i> |
| <i>Tabulka 7-2 Spodní část charakteristiky.....</i>                          | <i>50</i> |
| <i>Tabulka 7-3 Spodní část charakteristiky.....</i>                          | <i>51</i> |
| <i>Tabulka 7-4 Porovnání vybavení pro různé strmosti změny veličiny.....</i> | <i>52</i> |
| <i>Tabulka 7-5 Čas vybavení při zkoušce typu zkrat.....</i>                  | <i>52</i> |

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Značka           | Veličina   | Značka jednotky                                  |
|------------------|--|--|
| $B$              | tlumící moment na jednotku úhlové rychlosti        | $\text{Nm} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$ |
| $I$              | proud  | A  |
| $I_N$            | jmenovitý proud                                    | A  |
| $J$              | moment setrvačnosti                                | Nm   |
| $M$              | moment   | Nm   |
| $M_1$            | střední moment hnacího stroje                      | Nm   |
| $M_2$            | rušivý moment                                      | Nm   |
| $M_3$            | moment setrvačnosti hmoty v běhu                   | Nm   |
| $M_4$            | tlumící moment                                     | Nm   |
| $M_5$            | synchronizující moment                             | Nm   |
| $M_S$            | synchronizující moment pro $\beta=1$ rad           | Nm   |
| $M_v$            | rušivý moment frekvence $v$                        | Nm   |
| $N$              | počet závitů                                       | -  |
| $Q$              | hmotnost   | kg   |
| $R$              | odpor reostatu                                     | $\Omega$   |
| $R_b$            | odpor budiče                                       | $\Omega$   |
| $U$              | napětí   | V  |
| $U_N$            | jmenovité napětí                                   | V  |
| $X$              | reaktance  | $\Omega$   |
| $X_{P.U.}$       | poměrná reaktance                                  | -  |
| $X_q$            | příčná reaktance                                   | $\Omega$   |
| $Z_N$            | jmenovitá impedance                                | $\Omega$   |
| $Z_{P.U.}$       | poměrná impedance                                  | -  |
| $\bar{Z}_{p.u.}$ | fázor poměrná impedance                            | -  |
| $d$              | průměr   | m  |
| $e$              | indukované budící napětí                           | V  |
| $\bar{e}$        | fázor indukovaného budícího napětí                 | V  |
| $f$              | frekvence  | Hz   |
| $f_v$            | vlastní mechanická frekvence systému               | Hz   |
| $g$              | gravitační zrychlení                               | $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$                   |
| $i$              | okamžitá hodnota proudu                            | A  |
| $\bar{i}$        | fázor okamžité hodnoty proudu                      | A  |
| $i_b$            | okamžitá hodnota budícího proudu                   | A  |
| $\bar{i}_{bmax}$ | fázor okamžité hodnoty maximálního budícího proudu | A  |
| $\bar{i}_{bmin}$ | fázor okamžité hodnoty minimálního budícího proudu | A  |
| $\bar{i}_{max}$  | fázor okamžité hodnoty maximálního proudu          | A  |
| $m$              | počet fází   | -  |
| $n$              | otáčky   | $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$                |
| $n_{max}$        | největší otáčky                                    | $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$                |
| $n_{min}$        | nejmenší otáčky                                    | $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$                |
| $n_S$            | synchronní otáčky                                  | $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$                |
| $p$              | počet pólových dvojic                              | -  |
| $p$              | okamžitý činný výkon                               | W  |
| $q$              | okamžitý jalový výkon                              | Var  |
| $r$              | okamžitá hodnota odporu                            | Var  |
| $t$              | čas  | s  |

|                |                                    |                                  |
|----------------|------------------------------------|----------------------------------|
| $t_v$          | čas vybavení ochrany               | s                                |
| $u$            | okamžitá hodnota napětí            | V                                |
| $\bar{u}$      | fázor okamžité hodnoty napětí      | V                                |
| $u_b$          | okamžitá hodnota napětí budiče     | V                                |
| $\bar{u}_S$    | fázor okamžité hodnoty napětí sítě | V                                |
| $\nu$          | frekvence kyvů                     | Hz                               |
| $x$            | okamžitá hodnota reaktance         | $\Omega$                         |
| $x_d$          | okamžitá hodnota podélná reaktance | $\Omega$                         |
| $x_q$          | okamžitá hodnota příčná reaktance  | $\Omega$                         |
| $\bar{x}_q$    | okamžitá hodnota příčná reaktance  | $\Omega$                         |
| $x_V$          | okamžitá hodnota reaktance vedení  | $\Omega$                         |
| $\bar{x}_V$    | okamžitá hodnota reaktance vedení  | $\Omega$                         |
| $\Phi$         | magnetický tok                     | Wb                               |
| $\beta$        | zátěžný úhel                       | rad                              |
| $\beta_S$      | rozšířený zátěžný úhel             | rad                              |
| $\delta$       | nestejnoměrnost chodu stroje       | -                                |
| $\omega$       | úhlová rychlost                    | $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| $\omega_{max}$ | maximální úhlová rychlost          | $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| $\omega_{min}$ | minimální úhlová rychlost          | $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| $\omega_S$     | synchronní úhlová rychlost         | $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| $\omega_0$     | střední úhlová rychlost            | $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| $\varphi$      | fázový posun                       | rad                              |

# 1 SYNCHRONNÍ STROJE

## 1.1 Definice

Synchronní stroj je elektrický stroj s otáčkami přímo úměrnými frekvenci svorkového napětí, většinou je buzen rotor synchronního stroje stejnosměrným proudem, který budí magnetické pole otáčející se současně s točivým magnetickým polem statoru. Obvykle napájíme u synchronního motoru stator ze střídavé sítě a její kmitočet spolu s počtem pólů udává synchronní otáčky motoru, jak je podle [1] uvedeno ve vztahu (1.1). U synchronního generátoru obvykle budíme rotor a na hřídel přenášíme moment poháněcího stroje, takže magnetické pole statoru se otáčí s otáčkami poháněcího stroje, tímto dochází ke změně magnetického pole a indukuje se elektromotorická síla s frekvencí odpovídající otáčení rotoru. Synchronní generátory jsou výhodné v tom, že jejich svorkové napětí není závislé na zatížení, ale řídí se velikostí budícího proudu, přičemž s vzrůstajícím budícím proudem napětí na svorkách stoupá, kdežto s klesajícím budícím proudem naopak napětí na svorkách klesá. Synchronní stroj lze sestavit i v tzv. reverzním uspořádání, kde stejnosměrné buzení upevníme na stator stroje a trojfázové vinutí vložíme do rotoru. Tento způsob konstrukce se ovšem v praxi často nepoužívá, jelikož je nutno přes kroužky a kartáče stroje přednášet velké provozní výkony.

## 1.2 Rozdělení synchronních strojů

### 1.2.1 Podle způsobu provedení rotoru

Podle [1] rozdělujeme synchronní stroje dle provedení rotoru na:

- 1) S hladkým rotorem (nazývané rychloběžné nebo turboalternátory).
- 2) S vniklými póly (nazývané pomaloběžné nebo hydroalternátory).

### 1.2.2 Podle funkce

Synchronní stroje podle funkce dělí [1] na:

- 1) Synchronní generátory (alternátory).
- 2) Synchronní motory.
- 3) Synchronní kompenzátory.

## 1.3 Indukce trojfázové elektromotorické síly

Na statoru alternátoru bývá navinuto trojfázové vinutí, přičemž každá fáze je navinutá nezávisle a posunuta o jednu třetinu dvou pólových roztečí, otáčením statoru s buzeným stejnosměrným vinutím dojde k vytvoření elektromagnetické síly ve statorovém vinutí. Pro synchronní otáčky podle [1] platí vztah (1.1).

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1.1)$$

V naší elektrizační soustavě se vyskytují nejčastěji turboalternátory se synchronními otáčkami 1500 nebo 3000 otáček za minutu, což odpovídá čtyřem, respektive dvěma pólům.

## 1.4 Vinutí kotvy

U synchronních alternátorů je kotvou, tedy induktem stator, přičemž v závislosti na výkonu stroje používáme buď vkládané, nebo vspávané dvouvrstvé vinutí se stejnými cívkami pro stroje na nižší napětí, případně šablonové vinutí se stejnými cívkami pro stroje na vysoké napětí. Dále může být použito vinutí jednovrstvé se stejnými cívkami nebo vinutí soustředné. Cílem je, aby bylo dosaženo sinusového průběhu indukované elektromotorické síly, díky čemuž můžeme následně zkrátit krok cívek vinutí. S výhodou je využíváno odebrání budícího proudu synchronního alternátoru ze samostatného zdroje, aby nedocházelo ke zbytečnému zatěžování sítě.

### 1.4.1 Reakce kotvy synchronního stroje

Ve vinutí kotvy synchronního alternátoru v nezatíženém stavu neprochází žádný proud a stroj má pouze magnetické pole budiče, který je umístěn na rotoru a obíhá tedy spolu s ním synchronními otáčkami, jakmile je připojena zátěž na svorky alternátoru, začne trojfázovým vinutím kotvy procházet proud budící točivé magnetické pole. Rychlost otáčení magnetického pole je synchronní s rychlostí otáčení pole buzení. Součtem těchto dvou polí vznikne pole, které následně indukuje elektromotorickou sílu ve vinutí kotvy. Mezi magnetickými póly kotvy a budiče je jistý posun, který je dán buzením a momentálním zatížením. Pokud buzení klesá a zatížení stroje se zvětšuje, dochází ke zvětšení tohoto posunu, který nazýváme zátěžným úhlem synchronního stroje a značíme jej řeckým písmenem  $\beta$ . Nejobvyklejším druhem zátěže vyskytující se u synchronního alternátoru je zátěž induktivní, při tomto druhu zatížení působí proti poli kotvy pole budiče, čímž je pole budiče oslabováno, tomuto jevu říkáme reakce kotvy a vzniklé pole nazýváme polem reakčním, kterým se kotva brání indukci elektromotorické síly.

## 1.5 Řízení napětí synchronního generátoru

Napětí na svorkách synchronního alternátoru řídíme změnou buzení. Buzení je závislé na velikosti budícího proudu tekoucího z budiče do magnetů alternátoru. Zde se v široké míře uplatňují polovodičové technologie.

### 1.5.1 Přímé řízení

Nejjednodušším a zároveň nejpřesnějším způsobem řízení napětí na svorkách synchronního alternátoru je zařazení řídicího odporu sériově mezi budící vinutí a budič. Vzhledem k V-A charakteristice odporu je změna budícího proudu lineární. Využití tohoto způsobu regulace je omezeno pouze na stroje menších výkonů, protože u synchronních alternátorů na větší výkony by vyšla regulační soustava značně rozměrná a měla by složitý systém ovládání.

## 1.5.2 Nepřímé řízení

Pro synchronní alternátory vyšších výkonů se využívají k regulaci napětí rychloregulátory zařazené sériově do magnetů budiče, což umožňuje nepřímou změnu budícího proudu alternátoru pomocí změny napětí budiče. S výhodou se zde využívá skutečnosti, že budící proud budiče je malý, a tedy i regulátor vychází s malými rozměry, včetně řídicího mechanismu.

## 1.6 Moment synchronního stroje

Vzhledem k tomu, že otáčky synchronního stroje se nemění se zatížením, můžeme podle [1], při zanedbání ztrát dojít ke vztahu pro moment synchronního stroje daného rovnicí (1.2).

$$M = \frac{m}{\omega} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (1.2)$$

Přičemž v každém bodě momentové charakteristiky je velikost momentu synchronního stroje dána sinusovou funkcí zátěžného úhlu a funkcí reakčního momentu s poloviční délkou vlny. U strojů s hladkým rotorem je příčná i podélná vodivost stejná, nemají proto reakční moment, respektive jejich reakční moment je v součtu roven nule. Toto ovšem neplatí u strojů s vyniklými póly, kde je výsledný moment roven součtu sinusové funkce zátěžného úhlu a reakčního momentu. Moment zvratu je tedy u synchronních strojů s vyniklými póly větší a nastává při zátěžném úhlu menším než  $90^\circ$ . Velikost zátěžného momentu je na buzení závislá, ale reakční moment na buzení nezávisí, proto se vyskytuje i u strojů nebuzených. Tohoto jevu se využívá u tzv. reakčního motoru.

## 1.7 Kývání synchronních strojů

Pokud dochází k periodickému výskytu nerovnoměrnosti v tažné síle, dochází také ke kolísání otáček a úhlové rychlosti, tedy stroj v okamžiku přebytku tažné síly zrychluje a naopak v okamžiku výskytu nedostatku tažné síly zpomaluje. Tuto nerovnoměrnost v chodu synchronního stroje lze podle [3] popsat rovnicí (1.3).

$$\delta = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_s} = \frac{n_{max} - n_{min}}{n_s} \quad (1.3)$$

Pokud by docházelo k přílišnému kolísání otáček, mohlo by dojít k překročení hodnot, jež jsou pro síť přípustné. Z tohoto důvodu musí mít alternátor dostatečně velkou setrvačnost, aby pomocí ní bylo kolísání otáček co nejvíce tlumeno.

$$J = \frac{Q \cdot d^2}{4 \cdot g} \quad (1.4)$$

Snahou konstruktérů je pokud možno započítat co největší setrvačný moment už při projektování rotoru, ten vypočítáme, tak jak uvádí [3], podle rovnice (1.4). Pokud by ovšem nebylo možno dosáhnout požadovaných hodnot setrvačného momentu, je nutné zařadit do soustavy i přídavný setrvačnick určený ke kompenzaci kolísání úhlové rychlosti. Jak uvádí [3], změny úhlové rychlosti ať už periodické nebo neperiodické mohou nastat kromě nestejnomyšernosti poháněcího momentu také změnou zatížení alternátoru na svorkách, díky čemuž působí na rotor následující faktory:

- 1) Střední moment hnacího stroje.
- 2) Rušivé momenty, ty za pomoci na Fourierovu řadu můžeme definovat jako periodické nárazy sinusového průběhu s cizím kmitočtem.
- 3) Moment setrvačné hmoty v běhu.
- 4) Tlumící moment, který představuje asynchronní moment tlumiče nebo odpor vzduchu a tření.
- 5) Synchronizující moment, který působí na vrácení rotoru do rovnovážné polohy.

Následující odvození je převzato z [3]. Jak ukazuje rovnice (1.5), jsou z výše uvedených momentů kladné první dva a zbylé tři jsou záporné, přičemž platí, že jejich součet je roven nule.

$$M_1 + M_2 = M_3 + M_4 + M_5 \quad (1.5)$$

Na vzniku rušivých momentů se nejvíce projevují periodické změny obvodové hnací síly a to zejména u pístových motorů dané rovnicí (1.6).

$$M_2 = \sum M_v \cdot \sin v \cdot \omega_0 \cdot t \quad (1.6)$$

Změnu zátěžného úhlu popisujeme následující rovnicí (1.7).

$$\Delta\beta = \Delta \int \Delta\omega \cdot dt \quad (1.7)$$

Za předpokladu malých výkyvů lze považovat koeficienty za konstantní a můžeme napsat momentovou rovnici (1.8), kde výše vyjmenované momenty jsou reprezentovány jednotlivými jejími členy ve výše uvedeném pořadí.

$$M_1 + \sum M_v \cdot \sin v \omega_0 t = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \Delta\omega + M_s \cdot \beta \quad (1.8)$$

Jak uvádí [3], pokud nastanou nenadále aperiodické změny typu rychlé změny zatížení, nebo změny podobné, začne kmitat systém vlastním mechanickým kmitočtem vyjádřeným pomocí vztahu (1.9).

$$f_v = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{M_s}{J} \cdot \left(1 - \frac{B^2}{4 \cdot M_s \cdot J}\right)} \quad (1.9)$$

Tyto kmity jsou podle [3] tlumeny exponenciálou  $e^{-\frac{B}{J}t}$ . Dojde-li k vnějšímu periodickému kývání, dojde následně ke vzniku změny úhlové rychlosti dané rovnicí (1.10) podle [3].

$$\Delta\omega = \frac{M_v \cdot \sin v \cdot t \cdot \omega_0}{\sqrt{B^2 + \left(v \cdot \omega_0 \cdot J - \frac{M_s}{v \cdot \omega_0}\right)^2}} \quad (1.10)$$

Vypadnutím ze synchronismu jsou více ohroženy stroje pracující paralelně do sítě s ostatními synchronními alternátory, jelikož vzhledem k existenci synchronizujícího momentu bude vychýlení větší.

## 1.8 Konstrukce synchronních strojů s hladkým rotorem

Turboalternátory jsou využívány výhradně tam, kde je k dispozici pro jejich provoz parní nebo plynová turbína, tedy v uhelných, plynových a jaderných elektrárnách. Nejvýznamnějšími faktory limitující jejich konstrukci je mechanická pevnost a odvod ztrátového tepla, tudíž jejich chlazení. Z důvodů co největší mechanické pevnosti využíváme při konstrukci turboalternátorů nejvyšší kvality materiálů jako je např. chromniklová ocel. Mechanickými vlastnostmi konstrukčních materiálů je největší dosažitelná obvodová rychlost rotoru omezena na hodnotu přibližně  $170 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  z čehož vyplývá největší možný průměr rotoru přesahující jeden metr. Aby bylo dosaženo potřebných výkonů, bývá délka železa několik metrů, toto klade při konstrukci, výrobě a následně i provozu vysoké nároky jak na kvalitu, tak i na přesnost zpracování, uložení a vyvážení celého turbosoustrojí. Nejčastěji se setkáme s dvoupólovými turboalternátory s hladkým

rotorem, v případě turboalternátorů na největší výkony ovšem vzhledem k výše zmíněným omezením saháme po čtyřpólové konstrukci.

### 1.8.1 Konstrukce statoru

V případě statorů konstruovaných na nízká napětí se používají vinutí tyčová případně svařovaná. V případě statorů konstruovaných na vysoká napětí je nejčastěji využíváno dvouvrstvé šablonové vinutí skládané jako tzv. permutová tyč. Je zde zapotřebí počítat také s větší tloušťkou izolace, která má ovšem krom elektroizolačních vlastností i vlastnosti tepelně izolační, což způsobuje zhoršení odvodu tepla, které je vytvářeno proudem procházejícím vinutím. Současně s těmito jevy rostou přídatné ztráty ve vinutí, ztráty vířivými proudy a ztráty magnetizační. Všechny tyto ztráty způsobují oteplení stroje a tak musí být kompenzovány chlazením, které je realizováno prouděním vzduchu, případně průtokem vody dutými vodiči ve statorovém vinutí. U nových konstrukcí se využívá chlazení zkapalněným plynem, ke slovu přicházejí také vysokoteplotní supravodiče, kde za pomoci supravodivého jevu dochází k minimalizaci ztrát.

### 1.8.2 Konstrukce rotoru

Při konstrukci turboalternátorů pro vysoké výkony se vzhledem k nutnosti velké mechanické pevnosti využívá rotor vykovaný z jednoho kusu nejkvalitnějších materiálů, často se využívá zušlechtěná chromniklová ocel. U strojů menších výkonů, případně u strojů kde je jinak omezeno mechanické namáhání, jako např. nižší otáčky, využíváme uhlíkovou nebo niklovou ocel. Vinutí v rotoru bývá obvykle tvořeno měděnými nebo hliníkovými pásky, výhodou hliníku v těchto konstrukcích je jeho nižší hmotnost a tedy menší namáhání nemagnetických klínů a obručí, které zabraňují vypadnutí rotorového vinutí z drážek. Při výrobě a následném provozu je nutno dbát na kvalitu uložení rotoru, protože i malá dynamická nerovnováha by měla v provozu za následek poruchu.

## 2 BUDÍCÍ SOUSTAVY ALTERNÁTORŮ

Budící soustava je zdroj budícího proudu, který zajišťuje buzení synchronního stroje a je jeho nedílnou součástí. Hlavní části jsou podle [5]:

- 1) Zdroj budícího napětí tzv. budič.
- 2) Regulátor buzení.
- 3) Odbuzovač.
- 4) Měřicí a ovládací prvky.

Budící soustavy dělíme na závislé a nezávislé. Budící soustava je závislá tehdy, odebírá-li budící energii ze střídavé sítě. Nezávislá je tehdy, jestliže zdroj budící energie není bezprostředně závislý na stavu sítě, na kterou je napojen buzený synchronní alternátor.

U zdroje budícího napětí je požadována minimálně taková provozní spolehlivost, jako u samotného alternátoru. Pokud by došlo k poruše budící soustavy, alternátor ztratí buzení a musí být následně odstaven. Mezi hlavní trendy pro zvyšování spolehlivosti patří zejména snaha o odstranění alternátorů a sběracích kroužků z obvodu buzení, dále také konstrukce strojů s nezávislými budícími soustavami, i když závislé budící soustavy vychází při stavbě ekonomicky výhodněji. Mezi další požadavky kladené na budící soustavy patří plynulá regulace budícího proudu v co nejširším rozmezí a také vysoké stropní napětí, čímž rozumíme maximální hodnotu stejnosměrného napětí na výstupu budiče zatíženého svým vinutím při odpovídající provozní teplotě. Toto by mělo být dvojnásobné oproti běžnému budícímu napětí alternátoru při jmenovitém zatížení. Zároveň je žádoucí, aby byl zdroj schopen co nejrychlejší změny velikosti budícího napětí. Rychlost růstu budícího napětí je definována střední rychlostí změny během počáteční půl sekundy. Obvykle se tato hodnota pohybuje v rozmezí 0,5 až 2s. Odbuzovač je konstruován za účelem co nejrychlejšího odvedení elektromagnetické energie naakumulované ve vinutí stroje.

### 2.1 Rozdělení budících soustav synchronních alternátorů

Podle způsobu regulace příkonu budiče je podle [2]:

- 1) Závislé - odvození budící příkonu vychází z napětí regulovaného stroje.
- 2) Nezávislé - budící příkon není závislý na napětí stroje.
- 3) Kompaundní - budící příkon je závislý na napětí stroje a také např. na proudu.

Podle typu budiče je [2] dělí na:

- 1) Systémy s točivým budičem - využívají komutátorový stejnosměrný motor.
- 2) Statické systémy s kroužky na hřídeli - využívají statický řízený, nebo neřízený usměrňovač.
- 3) Bezkartáčové soustavy s rotujícím řízeným nebo neřízeným usměrňovačem.

Podle rychlosti působení je [2] dělí na:

- 1) Rychlé - mají dobu odezvy budícího napětí menší než 0,1 s.
- 2) Normální - mají dobu odezvy budícího napětí vyšší než 0,1 s.

### 2.1.1 Budící soustavy s točivým budičem

Jde o připojení stejnosměrného derivačního dynamu na společnou hřídel se synchronním alternátorem, které je řízeno derivačním reostatem. Při neúměrném zvyšování odporu reostatu, tudíž snižování proudu buzením, dochází k velmi rychlému poklesu napětí budiče k nule, budič tedy není schopen zajistit plynulou regulaci budícího napětí. Tudíž pracovní bod budiče je definován jako průsečík odporové přímky s vnější magnetizační charakteristikou. Rychlost nárůstu napětí budiče je podle [5] dána diferenciální rovnicí (5.1).

$$u_b = (R_b + R) \cdot i_b + N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (5.1.)$$

Přičemž magnetickým tokem  $\Phi$  rozumíme, tok póly budiče. U pomaloběžných synchronních alternátorů je nárůst budícího napětí pomalejší než u alternátorů rychloběžných. Dále je též možné využít zapojení s pomocným budičem, který je taktéž umístěn na společné hřídeli, u kterého se regulace jeho napětí provádí odporníkem zařazeným do obvodu buzení hlavního budiče, přičemž meze regulace jsou širší než u samostatného budiče.

Dále je také možno použít variantu zapojení s derivačním budičem a přídatným budícím vinutím napájeným z regulátoru napětí, kde je derivační vinutí nastaveno přibližně na buzení naprázdno a změna buzení je prováděna přídatným vinutím. Stejnosměrné budiče jsou používány výhradně pro stroje s malými výkony, vzhledem ke svojí hlavní nevýhodě, kterou je spolehlivost komutátoru. Pro stroje vyšších výkonů využíváme polovodičových budičů.

### 2.1.2 Statické budící systémy s kroužky na hřídeli

Tyto systémy lze rozdělit na dvě základní skupiny a to řízené a neřízené.

Neřízené statické systémy jsou vybaveny výkonovými diodami, které nahrazují stejnosměrný budič na společném hřídeli střídavým budičem (alternátorem), u kterého je daleko vyšší výkon a mnohem jednodušší údržba i konstrukce. Hlavní i pomocný střídavý budič jsou na pomocné hřídeli s alternátorem. Hlavní budič napájí dvě skupiny neřízených usměrňovačů a sám je ovládán a napájen přes tyristorovou soupravu z pomocného budiče. Pomocí fázové proudové kompaudace na pomocném budiči se udržuje konstantní napětí. Napětí hlavního budiče reguluje napětí alternátoru, které závisí na odchylce napětí s proudem a na proudu hlavního budiče. Dynamické vlastnosti této soustavy jsou podobné jako vlastnosti klasického stejnosměrného budiče a tato soustava pracuje velmi spolehlivě. Jelikož nelze změnit polaritu napětí, používáme zde jako odbuzovač zhášecí komoru.

U budících systémů s tyristory se pro napájení budícího vinutí používá trojfázových řízených můstků, které napájecí energii odebírají ze svorek vlastní spotřeby alternátoru, nebo ze střídavého budiče, u kterého napětí udržujeme na konstantní hodnotě fázovou proudovou kompaudací. Napájení budiče může být provedeno usměřňovačem, ale pouze za předpokladu, že je soustrojí v provozu. U hydroalternátorů doplňujeme budící soustavu nezávislým zdrojem, jež použijeme také pro elektrické brzdění hydroalternátoru. I obecně lze říci, že je výhodnější nezávislý zdroj, jelikož u závislých zdrojů zaniká schopnost tyristoru ihned reagovat na změny napětí na svorkách alternátoru při poklesu napětí na tyristorech. Jelikož tyristorový usměřňovač může pracovat v invertorovém režimu, umožní tím okamžité připojení maximálního napětí opačné polaroty pro odbuzení, které tudíž probíhá rychleji než nabuzování, a tento způsob je možno dále kombinovat se zhašecí komorou. Tato rychlost změny buzení je tak velká, že regulátor, jež provozujeme, je možné provozovat i v oblasti umělé stability s úhlem  $\beta$  o velikosti až  $120^\circ$ . Při návrhu je nutno u tyristoru respektovat možnost zkratových proudů, případně výpadku některého z tyristorů a na tyto situace je dimenzovat.

### 2.1.3 Budící systémy bezkartáčové

Výhodou těchto budících systémů je absence pohyblivých kontaktů, což příznivě ovlivňuje spolehlivost a klade pouze malé nároky na údržbu. Tyto budící systémy jsou uspořádány tak, že na společné hřídeli s alternátorem je umístěn jak usměřňovač, tak i jeho napájecí zdroj. Analogicky s výše zmíněnými systémy buzení můžeme i tyto budící systémy rozdělit na systémy s výkonovými diodami a systémy s tyristory.

#### 1) Bezkartáčové systémy s výkonovými diodami

V tomto případě využíváme opět střídavý trojfázový budič, jehož rotorové vinutí napájí usměřňovač uspořádaný v můstkovém zapojení, přičemž jeho výstup je spojkou propojen přímo s budícím vinutím. Pomocný budič s permanentními magnety napájí přes tyristorový usměřňovač stator budiče. Usměřňovač, který se otáčí, by měl být co nejjednodušší, mít velkou proudovou zálohu, aby při poruše jednoho prvku nebylo nutno odstavit celý stroj. Z výše uvedeného vyplývá, že regulací střídavého budiče řídíme napětí alternátoru. Využití tohoto budícího systému je omezeno pouze na menší stroje, protože oproti systému s tyristory je odezva na změnu napětí pomalá, z čehož vyplývá, že je pomalé i odbuzování prováděné odbuzením budiče.

#### 2) Bezkartáčové budící systémy s tyristory

Tak jako v předchozím případě, je opět na společném hřídeli s rotorem alternátoru umístěna tyristorová soustava, kotva střídavého budiče a rotační převodník, který zajišťuje přenos impulsů na tyristory. Informace o aktuálním stavu buzení alternátoru vychází z velikosti napětí budiče a pomocí převodníku se přenáší do regulátoru. Při odbuzování přepojíme tyristorovou soustavu do invertorového režimu a budící vinutí budiče napájíme z nezávislého zdroje. Tento systém nejčastěji využíváme pro alternátory na vysoké výkony, kde je s výhodou používán vzhledem ke své velmi vysoké spolehlivosti, schopnosti plynulé a rychlé regulace a vzhledem ke svému velmi vysokému stropu buzení. Jedinou jeho nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady.

## 3 ODBUZOVAČE

V případě, že dojde při provozu alternátoru k poruše takového charakteru, že je alternátor nutno vypnout, musíme jej odbudit. Odbuzení je prováděno proto, že je potřeba zajistit v budícím vinutí co nejrychlejší pokles proudu na nulovou hodnotu a tím omezit velikost a dobu trvání zkratových proudů, které ve satorovém vinutí mají velmi nepříznivé tepelné a dynamické účinky. Ke splnění tohoto požadavku je nejideálnější skoková změna proudu, jenž však v obvodu obsahujícím indukčnost není dosažitelná. Přechodové děje probíhající během odbuzování jsou značně náročné na popis vzhledem ke své komplexnosti. Účastní se jich všechna vinutí v alternátoru a to budící, satorová i tlumící, přičemž jednotlivé magnetické obvody jsou spřaženy.

### 3.1 Nejpoužívanější odbuzovací systémy

Podle [5] to jsou:

- 1) Odbuzovače s paralelním zhášecím elektrickým odporem
- 2) Odbuzovače se zhášecí komorou
- 3) Odbuzení v budících soustavách s tyristorovými systémy buzení

#### 3.1.1 Odbuzovače s paralelním zhášecím elektrickým odporem

Tyto odbuzovače se u nás velmi často používají s alternátory do výkonu 100 MW. V okamžiku zapůsobení ochrany je připojen do obvodu buzení pomocí kontaktu odbuzovače velký elektrický odpor a budič je ihned poté odpojen. I samotný budič je zároveň odbuzován paralelním připojením velkého odporu. Další velký odpor je ovládán regulátorem buzení.

#### 3.1.2 Odbuzovač se zhášecí komorou

Využívá se alternátorů s výkonem větším než 100 MW, kde již není dostačující rychlost odbuzení odbuzovače s paralelním zhášecím elektrickým odporem. Jeho princip spočívá v tom, že úbytek napětí na krátkém elektrickém oblouku o konstantní délce je téměř nezávislý na velikosti obloukem protékaného proudu. Mezi hlavní prvky zhášecí komory patří zhášecí mříž, která bývá sestavena z měděných destiček, mezi kterými při odbuzování hoří elektrický oblouk, permanentní a cívkové magnety vytvářející vnější magnetické pole, cívkové elektromagnety vytvářející vnitřní magnetické pole, elektrické odpory, které jsou paralelně připojeny k jednotlivým skupinám destiček, tím pomáhají k rovnoměrnému rozložení napětí na jednotlivé destičky, čímž brání předčasnému uhasnutí oblouku. Odbuzovací proces vzniká rozpojením hlavních kontaktů. Elektrický oblouk ještě v tomto okamžiku nehoří, jelikož opalovací kontakty jsou zkratovány. V okamžiku oddálení opalovacích kontaktů vzniká elektrický oblouk, který je vtažen do zhášecí mříže příčným magnetickým polem, kde se rozdělí na několik kratších oblouků. Během tohoto procesu se elektromagnetická energie oblouku přeměňuje na tepelnou,

jež ohřívá jednotlivé měděné destičky. Zajištění rovnoměrného rozvedení tepla je provedeno vnitřním příčným magnetickým polem, které je vyvoláváno cívkami zapojenými sériově s destičkami a které vyvolává otáčení oblouku kolem osy mříže. Destičková mříž bývá konstruována tak, aby se napětí mezi sousedními destičkami pohybovalo kolem 25 až 30 V. U nás se tento typ odbuzovače velmi osvědčil, a proto je hojně využíván u turboalternátorů s výkonem 200 a 500 MW. Dále je možno tento typ odbuzovače použít u hydroalternátorů, synchronních kompenzátorů a velkých stejnosměrných strojů.

### 3.1.3 Odbuzení v budících soustavách s tyristorovými systémy buzení

Klasické odbuzovače, jdou velmi obtížně zapojit do budící soustavy s tyristorovým systémem buzení. Z tohoto důvodu je odbuzování prováděno přechodem tyristorové soupravy do invertorového režimu, u kterého se současným zvýšením budícího napětí velmi rychle obrátí jeho polarita, a tímto způsobem se velmi rychle odbudí, zároveň odpadá nutnost pro změnu polarity přerušit budící obvod, tudíž v tomto obvodu oproti systémům s klasickými odbuzovači nevznikají žádné proudové rázy ani přepětí. Jak již bylo popsáno dříve, je v základním stavu buzení alternátoru napájeno trojfázovým budičem spojeným na společném hřídeli přes soustavu rotujících tyristorů. Ovládání tyristorů prostřednictvím řídicího členu umožňuje regulovat v širokých mezích okamžik zážehu a tím měnit střední hodnotu usměrněného napětí. Pro rostoucí řídicí úhel zážehu střední hodnota napětí klesá, po dosažení nulové hodnoty změny znaménko a stoupá v opačné polaritě. Tímto usměrňovač přechází do invertorového režimu, a tedy dochází k rekuperaci magnetické energie budícího pole cívky do sítě. Změna budícího proudu při odbuzování je podobná proudu odbuzování v zapojení se zhašecí komorou.

## 4 CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je shrnout dosavadní poznatky o asynchronním chodu alternátoru a principy fungování ochran při ztrátě buzení. Dále provést konfiguraci a nastavení terminálu točivého stroje REM 543 pro využití jeho ochranné funkce UE6High, následně budeme s využitím testovacího zdroje TZO 3 a analyzátoru sítě Chauvin Arnoux měřit vypínací MHO charakteristiku funkce UE6High.

## 5 ASYNCHRONNÍ CHOD ALTERNÁTORU

Asynchronní chod je u synchronního alternátoru mimořádným provozním stavem, který vzniká při velkém poklesu nebo úplné ztrátě buzení. Stroj provozovaný v tomto stavu dodává do sítě činný výkon, avšak ze sítě odebírá jalový výkon, který využívá k magnetizaci a přitom vypadne ze synchronismu. Pokud dojde ke ztrátě buzení, začne budící proud a s ním tedy i budící magnetický tok exponenciálně klesat k nule, což způsobí i pokles elektromagnetického momentu. I když stroj ihned odebírá magnetizační proud ze sítě, dojde během tohoto procesu k okamžiku, kdy moment stroje klesne pod mechanický moment turbíny. Rozdílem momentu stroje a turbíny se rotor urychluje do nadsynchronních otáček, tím se statorem vyvolaným vlivem magnetického pole indukují proudy o skluzové frekvenci, které začnou budit pole rotoru. Vzájemným působením obou polí je vyvolán asynchronní brzdý moment, tím se stroj dostane do ustáleného asynchronního chodu, přičemž činný výkon, který je dodáván do sítě je podstatně menší než jmenovitý, protože regulátor během přechodného děje sníží množství dodávané páry do turbíny. Pro velikost indukovaných proudů v rotoru a tedy i momentů je podstatné, zda je budící vinutí rozpojeno nebo zkratováno.

Pokud je budící vinutí rozpojeno stroj se chová podobně jako asynchronní motor s kotvou nakrátko, tudíž jsou proudy vyvolány polem statoru, tečou převážně v povrchové vrstvě rotoru a jejich velikost závisí na příslušné rezistivitě a reaktanci rotoru. S rostoucí tloušťkou povrchové vrstvy, která je nepřímo úměrná skluzu, rezistivita klesá, naopak reaktance je při malém skluzu takřka konstantní a s jeho růstem klesá. Jelikož se pole statoru a rotoru vůči sobě nepohybují, brzdý moment je stálý, kývání rotoru může být způsobeno jedine magnetickou nesymetrií rotoru, a tedy jeho amplituda bude malá.

Pokud je budící vinutí zkratováno z důvodu zamezení vzniku přepětí, je v něm indukován jednofázový proud o skluzové frekvenci, který vytváří pulzní magnetické pole. Pomocí Leblancova teorému lze rozložit jednofázové pulsující magnetické pole na dvě proti sobě se točící magnetická pole s poloviční amplitudou. Pole otáčející se s opačným smyslem než rotor je v klidu vůči statoru, pole otáčející se se stejným smyslem jako rotor se otáčí nadsynchronní rychlostí s frekvencí  $f_s + 2\Delta f$ . Vzájemným působením prvního pole a pole statoru je vytvářen neměnný brzdý moment, vzájemným působením druhého pole rotoru s polem statoru vzniká střídavý moment. Výsledný moment vznikne superpozicí těchto dvou dílčích momentů. Oproti rozpojenému budícímu vinutí je střední asynchronní moment vyšší, tudíž je skluz nižší, ale kývání statorových proudů se zvýší, toto by bylo možno omezit zařazením odporu do budícího vinutí, což je ale nevýhodné z důvodů zvýšení skluzu a snížení střední hodnoty asynchronního momentu.

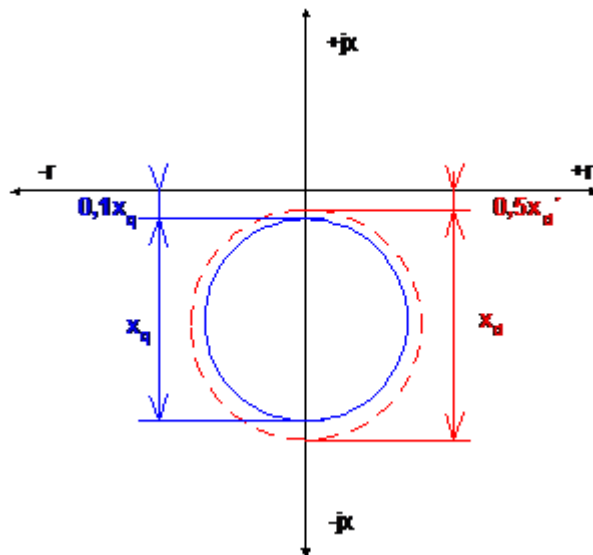
Podle [4] pro dodávání velkých činných výkonů, není přípustný dlouhodobý asynchronní chod alternátoru z následujících důvodů:

- 1) Vlivem indukce proudu je možný vznik lokálního přehřátí některé z částí statoru a rotoru.
- 2) Kýváním stroje v asynchronním chodu je možné vyvolat kývání i ostatních strojů pracujících do společné sítě.
- 3) Odběrem velkého množství jalového výkonu je možné vyvolat pokles napětí v síti, tento jev nehrozí u soustav s automatickou regulací napětí.

Dříve u nás asynchronní chod alternátorů nebyl povolen, ovšem nárůst požadavků na dodávaný výkon do sítě vedl k tomu, že při výpadku většího alternátoru vznikaly nežádoucí narušení výkonové rovnováhy elektrizační soustavy. Z tohoto důvodu byly provedeny ověřovací zkoušky, které měly dát odpovědi na otázky, jestli je možný asynchronní chod alespoň při snížení dodávky činného výkonu do sítě a také k zajištění nejvýhodnějšího postupu odstranění poruchy při zachování klidu v elektrizační soustavě. Měřením na turboalternátorech (nejčastěji o výkonu 200 MW) bylo zjištěno, že pro výkon 30 % až 50 % jmenovitého činného výkonu skluz dosahuje přibližně 0,5 %, lokální přehřátí nenastává, tudíž hlavním omezujícím faktorem je oteplení čelních partií statorového vinutí. Střední proud statoru tudíž nesmí být větší než jmenovitý statorový proud. V současnosti mají elektrárny na turboalternátorech připojeny ochrany proti ztrátě buzení, které při poruše buzení automaticky převedou soustrojí do asynchronního chodu. Pokud by došlo k selhání automatiky, musí být do jedné minuty snížen činný výkon dle tabulek. Je-li obsluhou, nebo automatikou dodržen výkon stroje v daných tolerancích, je možno provozovat asynchronní chod a po odstranění závady je možno resynchronizovat stroj. Nejlépe je provádět resynchronizaci opětným nabuzením při zátěžném úhlu  $\beta = 270^\circ$ . Pokud z nějakého důvodu není možno stroj udržet v předepsaných tolerancích, je nutno jej odstavit. Asynchronní chod není možné provozovat u hydroalternátorů ani při sníženém výkonu a to z důvodu podstatně většího skluzu, větších ztrát a oteplení.

## 5.1 Mezní zatížení při ztrátě buzení

V praxi je využíváno dvou způsobů nastavení ochran při ztrátě buzení, lišících se pouze v parametrech charakteristik tak, jak je vidět na obrázku 5-1.



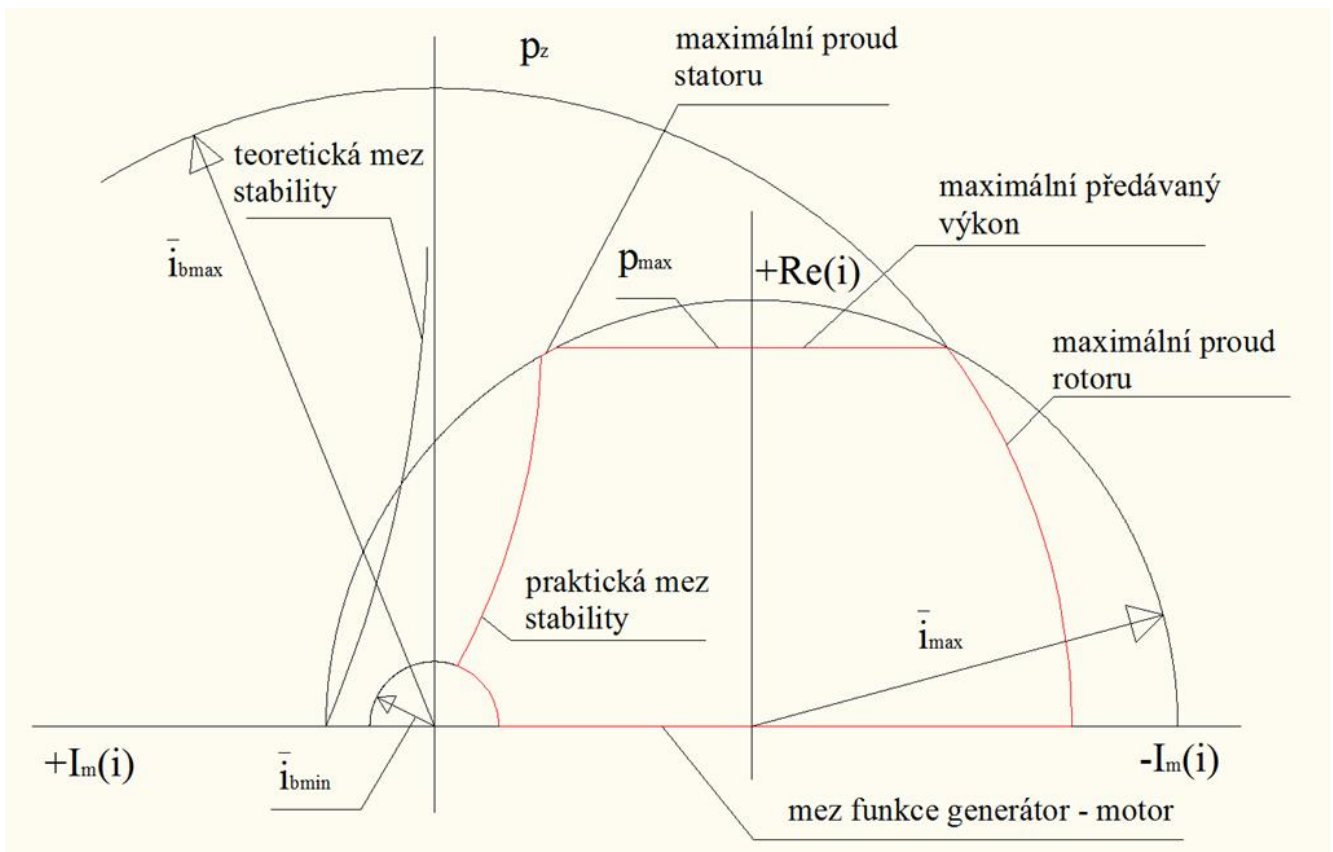
Obr. 5-1 Rozdíl v nastavování impedanční ochrany [8].

V české a slovenské literatuře je uváděno, že velikost vzdálenosti na ose reaktance je 0,1 násobek příčné reaktance (modrá plná čára na obrázku 5-1), ovšem v zahraniční literatuře [7] je uváděno, že jde o 0,5 násobek podélné reaktance stroje (červená čárkovaná čára na Obr. 5-1). Původ těchto rozdílů je v odlišném způsobu odvození mezní křivky při ztrátě buzení synchronního alternátoru, ta je využívána pro určení impedance synchronního alternátoru na mezi statické stability. Základem pro určení mezního zatížení alternátoru je provozní diagram

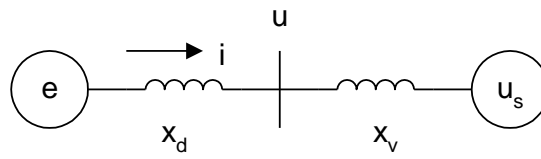
synchronního stroje zobrazený na obrázku 5-2. Křivku mezního zatížení můžeme vyjádřit v rovině zatížení pomocí souřadnic  $p$  a  $q$ , ze kterých můžeme snadno přejít k souřadnicím  $x$  a  $r$  tedy k rovině impedanční, ze které určíme potřebné hodnoty, se kterými jsou potom porovnávány hodnoty měřené na svorkách stroje. Při stanovování mezního zatížení synchronního alternátoru při ztrátě buzení vycházíme z hranice statické stability, jak plyne z dějů při poklesu budícího proudu. Toto lze obecně podle [8] vyjádřit pomocí podmínky vyjádřené vztahem (5.1).

$$\frac{\partial p}{\partial \beta} = 0 \text{ přičemž } p = \frac{u \cdot e}{x_d} \cdot \sin \beta + \frac{u^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \sin 2\beta \quad (5.1.)$$

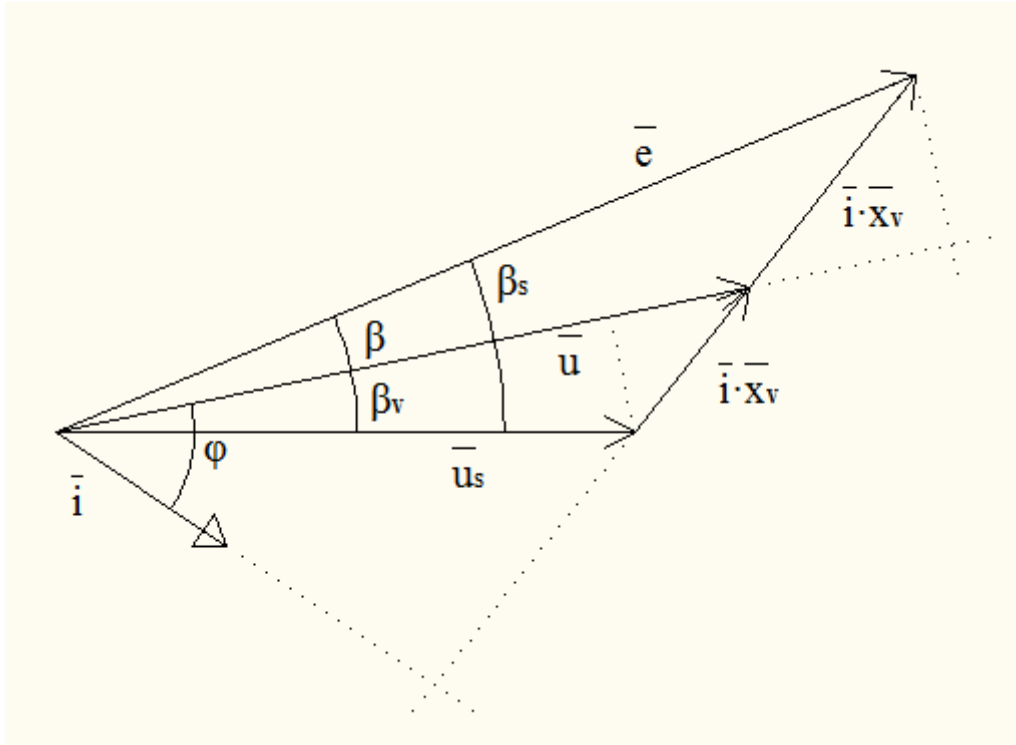
Vzhledem k tomu, že stav stroje na mezi statické stability je dán zátěžným úhlem s velikostí  $\frac{\pi}{2}$ , je nutno pro tuto hodnotu odvodit vztah mezi činným a jalovým výkonem, čímž vyjádříme mezní zatížení při ztrátě buzení. Volba hodnot, ze kterých budeme dále vycházet, je příčinou dvou výše zmíněných odlišných způsobů nastavení ochran. První jmenovaný způsob vychází ze zjednodušení, kdy uvažujeme příčnou i podélnou reaktanci synchronního stroje za stejnou, z čehož vychází schéma na Obr. 5-3 a fázorový diagram na Obr. 5-4, fázorový diagram na Obr. 5-5 nám ukazuje, jak vypadá situace pro hydroalternátor.



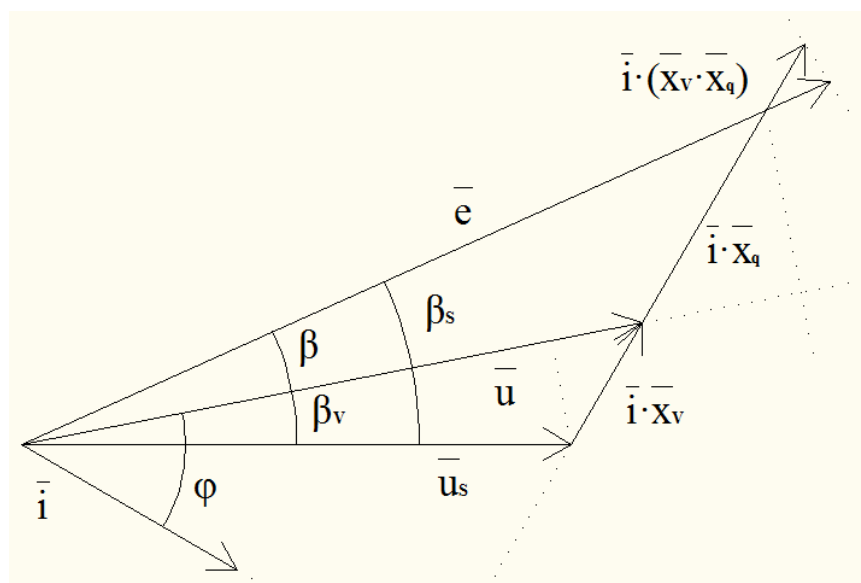
Obr. 5-2 Provozní diagram synchronního stroje



Obr. 5-3 Náhradní schéma alternátoru při práci do sítě přes reaktanci  $x_v$  [8].



Obr. 5-4 Fázorový diagram pro uvažovaný alternátor s  $x_d = x_q$ .



Obr. 5-5 Fázorový diagram pro hydroalternátor.

Z fázorového diagramu na Obr. 5-4 můžeme podle [8] následně odvodit křivku mezního zatížení synchronního alternátoru při ztrátě buzení s využitím funkce rozšířeného zátěžného úhlu  $tg\beta_s$ . Z fázorového diagramu podle [8] vyplývají rovnice (5.2) a (5.3).

$$tg\beta = \frac{x_d \cdot i \cdot \cos \varphi}{u + x_d \cdot i \cdot \sin \varphi} = \frac{x_d \cdot p}{u^2 + x_d \cdot q} \quad (5.2.)$$

$$tg\beta_v = \frac{x_v \cdot i \cdot \cos \varphi}{u - x_v \cdot i \cdot \sin \varphi} = \frac{x_v \cdot p}{u^2 - x_v \cdot q} \quad (5.3.)$$

Přičemž pro  $tg\beta_s$  podle [8] platí rovnice (5.4).

$$tg\beta_s = tg(\beta + \beta_v) \quad (5.4.)$$

Dosažením rovnic (5.2) a (5.3) do vztahu (5.4) dostaneme podle [8] rovnici (5.5) a následnou úpravou získáme rovnici (5.6).

$$tg\beta_s = \frac{tg\beta + tg\beta_v}{1 - tg\beta \cdot tg\beta_v} = \frac{\frac{x_d \cdot p}{u^2 + x_d \cdot q} + \frac{x_v \cdot p}{u^2 - x_v \cdot q}}{1 - \frac{x_d \cdot p}{u^2 + x_d \cdot q} \cdot \frac{x_v \cdot p}{u^2 - x_v \cdot q}} \quad (5.5.)$$

$$tg\beta_s = \frac{p(x_d + x_v)}{u^4 + u^2 q(x_d - x_v) - x_d \cdot x_v \cdot q^2 - x_d \cdot x_v \cdot p^2} u^4 + u^2 q(x_d - x_v) - x_d \cdot x_v (p^2 + q^2) = \frac{p(x_d + x_v)}{tg\beta_s} \quad (5.6.)$$

Pokud uvažujeme  $tg\beta_s = \infty$  pro  $\beta_s = \frac{\pi}{2}$  jak uvádí [8], dostaneme podle [8] úpravou vztahy (5.7) a následně (5.8).

$$p^2 + q^2 - \frac{qu^2(x_d - x_v)}{x_d \cdot x_v} - \frac{u^4}{x_d \cdot x_v} = 0 \quad / + \frac{u^4(x_d - x_v)^2}{4 \cdot x_d \cdot x_v} \quad (5.7.)$$

$$p^2 + \left[ q - \frac{u^2}{2} \left( \frac{1}{x_v} - \frac{1}{x_d} \right) \right]^2 = \left[ \frac{u^2}{2} \left( \frac{1}{x_d} + \frac{1}{x_v} \right) \right]^2 \quad (5.8.)$$

Jelikož odvození vztahu mezi činným a jalovým výkonem bylo provedeno bez ohledu na budící napětí s využitím svorkového napětí, proudu stroje a úbytků napětí na reaktancích, můžeme využít fázorový diagram synchronního alternátoru s nestejnými hodnotami reaktance v příčné a podélné ose zobrazeného na obrázku 5-5, tedy hydroalternátoru a pomocí něj výsledný vztah dále zpřesnit.

Z fázorového diagramu podle [8] odvodíme rovnice (5.9) a (5.10)

$$\operatorname{tg} \beta_v = \frac{x_v \cdot i \cdot \cos \varphi}{u - x_v \cdot i \cdot \sin \varphi} = \frac{x_v \cdot P}{u^2 - x_v \cdot q} \quad (5.9.)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{x_q \cdot i \cdot \cos \varphi}{u + x_q \cdot i \cdot \sin \varphi} = \frac{x_q \cdot P}{u^2 + x_q \cdot q} \quad (5.10.)$$

Úpravou rovnic (5.9) a (5.10) podle [8] získáme rovnici (5.11).

$$p^2 + \left[ q - \frac{u^2}{2} \left( \frac{1}{x_v} - \frac{1}{x_q} \right) \right]^2 = \left[ \frac{u^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_v} \right) \right]^2 \quad (5.11.)$$

Jak při prvním tak při druhém odvození jsme získali rovnice kružnice, které nám spolu se známou velikostí napětí vnější reaktance určují statickou stabilitu ve čtvrtém kvadrantu P-Q diagramu synchronního stroje. Pokud podělíme rovnice  $u^2$  přejdeme do admitanční roviny, tak jak uvádí [8] a je ukázáno na rovnicích (5.12) a (5.13).

$$\frac{p}{u^2} = \frac{u \cdot i \cdot \cos \varphi}{u^2} = g \quad (5.12.)$$

$$\frac{q}{u^2} = \frac{u \cdot i \cdot \sin \varphi}{u^2} = b \quad (5.13.)$$

Provedeme li inverzi rovnic (5.8) a (5.11) podle [8], přejdeme do impedanční roviny.

$$r^2 + j \left( x - \frac{x_d - x_v}{2} \right)^2 = \left( \frac{x_d + x_v}{2} \right)^2 \quad (5.14.)$$

$$r^2 + j \left( x - \frac{x_q - x_v}{2} \right)^2 = \left( \frac{x_q + x_v}{2} \right)^2 \quad (5.15.)$$

Jak rovnice (5.14), tak rovnice (5.15) jsou podle [8] rovnice kružnic se středy danými rovnicemi (5.16) a (5.17).

$$S_d = \left[ 0; -\frac{(x_d - x_v)}{2} \right] \quad (5.16.)$$

$$S_q = \left[ 0; -\frac{(x_q - x_v)}{2} \right] \quad (5.17.)$$

Poloměry kružnic (5.14) a (5.15) jsou podle [8] vyjádřeny v rovnicích (5.18.) a (5.19).

$$r_d = \frac{x_d + x_v}{2} \quad (5.18.)$$

$$r_q = \frac{x_q + x_v}{2} \quad (5.19.)$$

Pokud v rovnicích (5.16), (5.17), (5.18) a (5.19) zanedbáme reaktanci vedení  $x_v$ , tak přejdeme do tvaru odpovídajícího obrázku 5-1, tak jak uvádí [8].

## 5.2 Ochrana při ztrátě buzení

K diagnostice poruchového stavu se v ochranách při ztrátě buzení využívá:

- 1) Zpětná varová ochrana – porovnává směr toku jalového výkonu.
- 2) Proudová – porovnává velikost a směr budícího proudu.
- 3) Impedanční – porovnává velikost impedance obvodu buzení.
- 4) Napětí buzení spolu se směrem otáčení.

Jedním z možných řešení ochrany při ztrátě buzení je využití terminálu točivé stroje REM 543 od firmy ABB, který poskytuje uživateli jak měřicí, tak ochranné a ovládací funkce.

Ochranné funkce terminálu točivého stroje REM 543 jsou dle [6]:

- Třífázová nadproudová ochrana.
- Zemní ochrana  $I_0$ .
- Ochrana při nesymetrii (zpětná složka proudu).
- Třífázová přepět'ová ochrana.
- Třífázová podpět'ová ochrana.
- Zemní ochrana  $U_0$ .
- Podfrekvenční a nadfrekvenční ochrana zahrnující  $df/dt$ .
- Tepelná ochrana.
- Směrová zemní ochrana.
- Diferenciální ochrana generátorů.
- Ochrana při selhání vypínače.
- Ochrana při podbuzení a ztrátě buzení.
- Zpětná wattová ochrana se směrovou výkonovou funkcí.
- Kontrolní funkce startu motoru.
- Podproudová funkce.

Měřicí funkce terminálu točivého stroje REM 543 jsou dle [6]:

- Proud ve všech 3 fázích.
- Zemní proud  $I_0$ .
- Napětí ve všech 3 fázích.
- Nulová složka napětí  $U_0$ .
- Činný výkon.
- Jalový výkon.
- Účinník.
- Frekvence.
- Poruchový zapisovač.
- Elektrické opotřebení vypínače.
- Provozní časový čítač.
- Kontrola vypínacího obvodu.

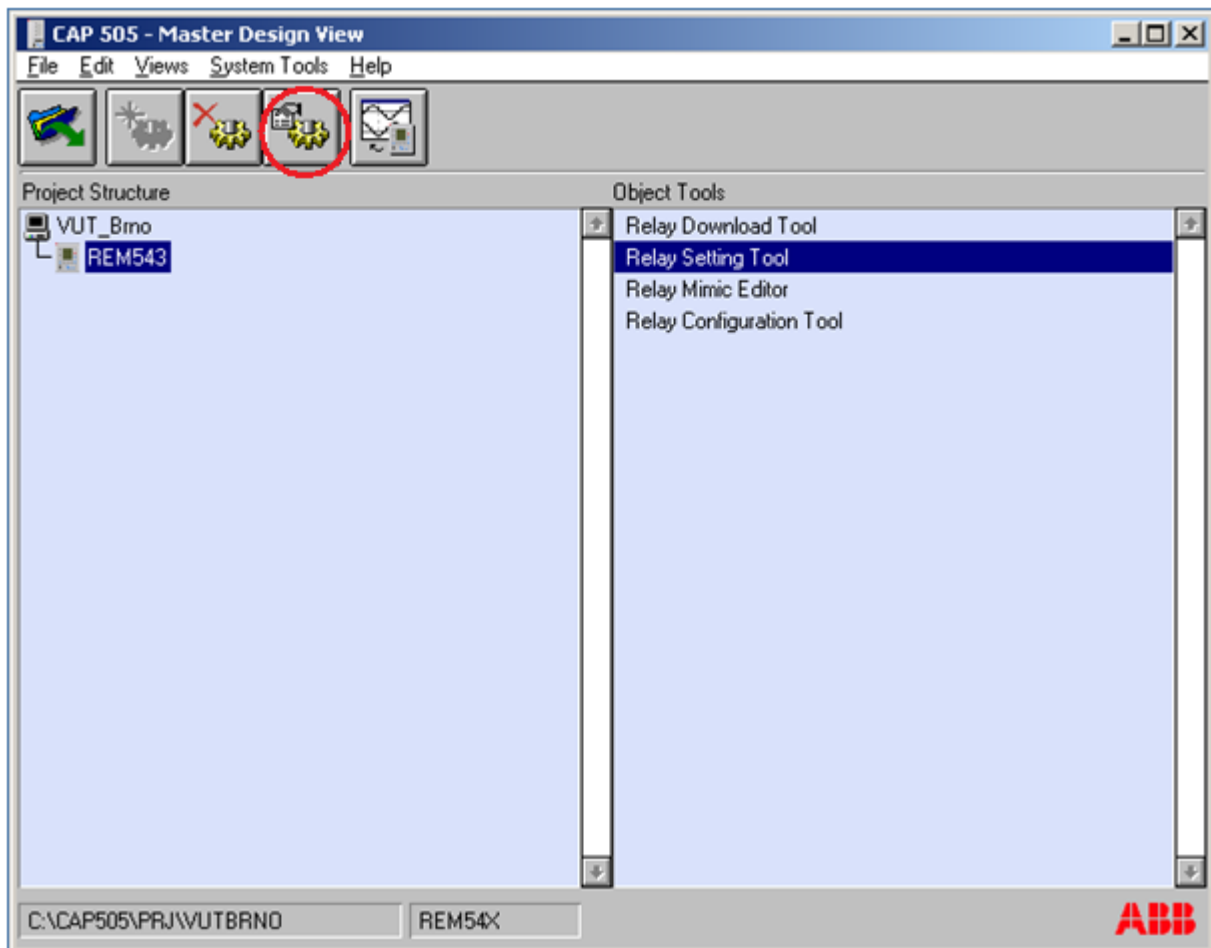
Ovládací funkce terminálu točivého stroje REM 543 jsou dle [6]:

- Vypínač.
- Odpojovač.
- Stavová indikace.

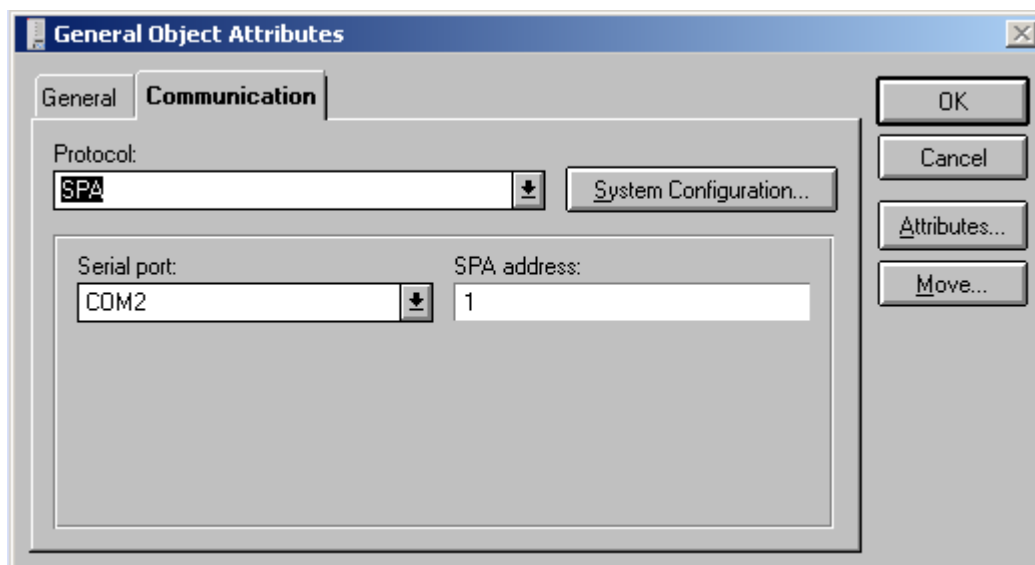
Ochranná funkce při ztrátě buzení terminálu točivého stroje REM 543 se nazývá UE6High případně UE6Low, umožňuje jednofázovou nebo třífázovou ochranu proti podbuzení a ztrátě buzení založené na impedančním principu (viz Obr. 5-1), kdy při ztrátě buzení dojde k odběru jalového výkonu ze sítě a impedance buzení měřená ochranou se zdá být negativní. Tato ochrana má v sobě také zabudovanou blokadu, která vybaví při poklesu napájecího napětí ochrany tak, aby se předešlo nesprávnému vyhodnocení poruchy, dále disponuje vypnutím výstupu k zabezpečení funkce ochrany před selháním vypínače. Ochrana UE6 umožňuje měření proudu fáze buďto přes Rogowského cívku, nebo přes standardní měřicí transformátor proudu, napětí je možno měřit buďto měřicím transformátorem napětí, nebo pomocí napěťového děliče. Ochrana umožňuje dva základní módy nastavení v módu „Low“ je k dispozici poměrně široké časové pásmo umožňující ignorovat krátkodobé výchylky a případně provést korekci, v módu „High“ je časové pásmo menší a ochrana poskytuje rychlé vybavení. Funkce ochrany je založena na zobrazení impedance každé fáze jako fázoru v impedanční rovině (viz Obr. 5-1), řídicí křivka je kružnice popsána posuvem vůči reálné ose (offset), průměrem, jehož velikost odpovídá velikosti  $X_d$  a posunem vůči imaginární ose, kterým se určuje citlivost ochrany. Pokud dojde k překročení nastavené hodnoty impedance, její fázor v impedanční rovině vstoupí do kružnice a zůstane-li uvnitř po nastavený čas, ochrana vybaví. V případě měření všech tří fází je každá měřena nezávisle a jako vztažná se bere nejmenší naměřená hodnota.

## 6 PŘIPOJENÍ A KONFIGURACE TERMINÁLU REM543

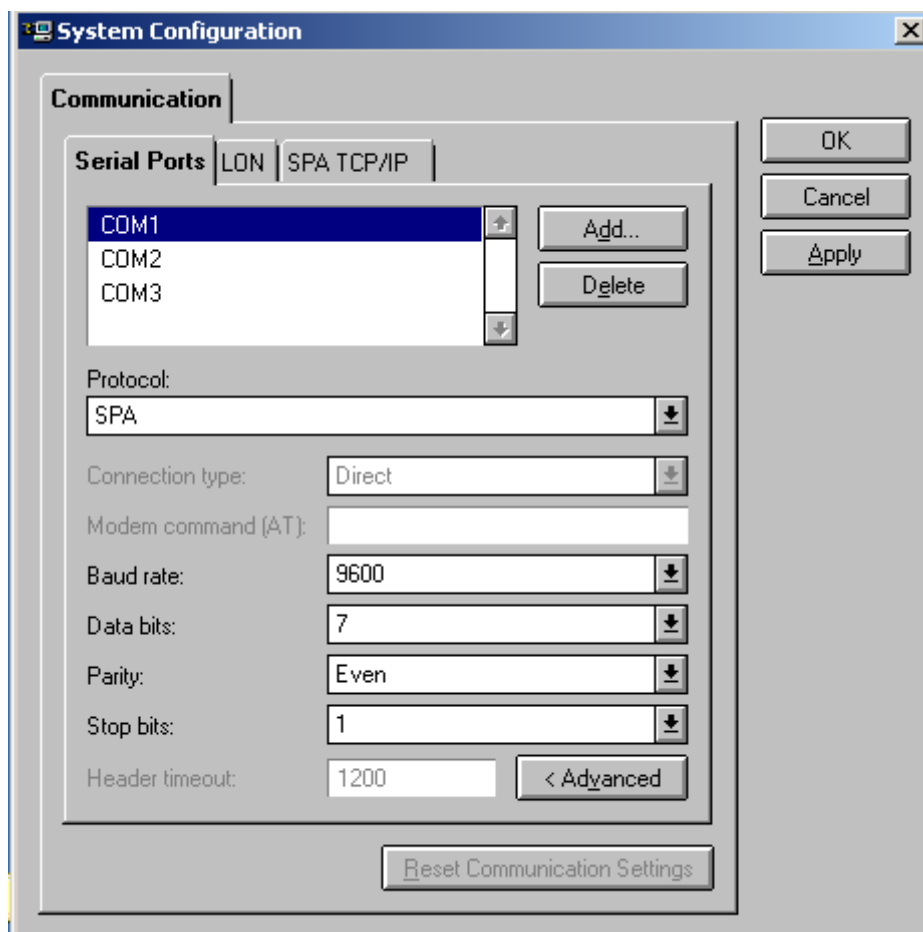
Ke konfiguraci terminálu REM 543 je nejvhodnější využít počítače s příslušným softwarovým vybavením. Pro práci terminálu s počítačem je nutno je propojit přes komunikační kabel s koncovkou kompatibilní s COM portem. Komunikace probíhá na úrovni SPA protokolu s využitím programu CAP 505. Přičemž nastavení komunikačního protokolu stejně jako správného komunikačního COM portu je nutno zkontrolovat v nastavení připojení a případně jej upravit. To provedeme otevřením záložky „General Object Attributes“ klepnutím na tlačítko zvýrazněné na obrázku 6-1. V nově otevřeném okně zvolíme záložku „Communication“, tak jak vidíme na obrázku 6-2, zde můžeme změnit komunikační protokol a nastavení používaného portu, pokud klepneme na tlačítko „System Configuration“, objeví se nám okno znázorněné na obrázku 6-3, kde můžeme provést přidání nebo odebrání COM portu.



Obr. 6-1 Hlavní obrazovka programu CAP 505.



Obr. 6-2 Okno „General Object Attributes“.

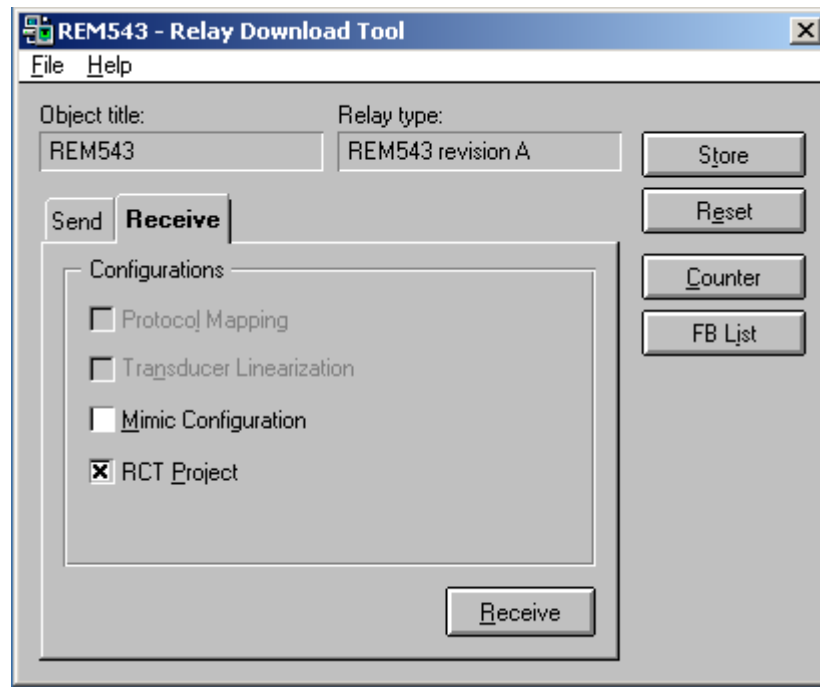


Obr. 6-3 Okno „Systém Configuration“.

Při úspěšném propojení počítače s terminálem REM543 vidíme v hlavním okně programu CAP 505 (Obr. 6-1) v jeho levé části vybranou ochranu, se kterou budeme následně pracovat, v pravé polovině se nachází okno s volbami „Relay Download Tool“ určené ke stažení a odesílání nastavení terminálu, „Relay Setting Tool“ umožňující konfiguraci jednotlivých funkcí terminálu, „Relay Mimic Editor“ určený k úpravě zobrazení displeje terminálu včetně přiřazení funkcí a

popisek LED diodám, „Relay Configuration Tool“ je nástroj určený k práci s funkcemi terminálu na úrovni logických bloků.

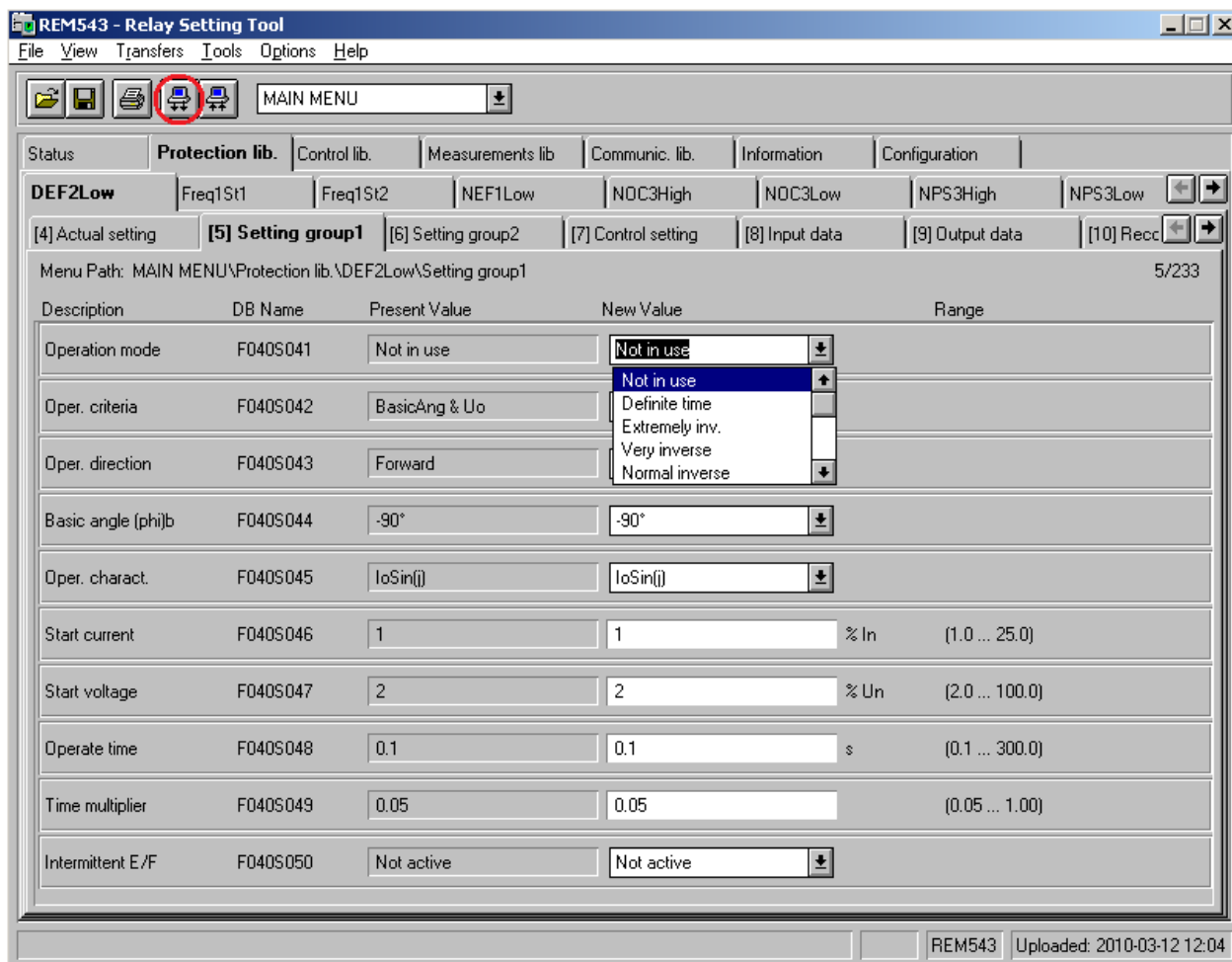
V případě, že chceme stáhnout kompletní nastavení terminálu do počítače, využijeme funkci „Relay Download Tool“ (viz Obr. 6-1), následně se nám zobrazí okno „Relay Download Tool“, vybereme záložku „Receive“ a zvolíme části, které chceme stáhnout, vše potvrdíme tlačítkem „Receive“, tak jak je vidět na obrázku 6-4.



Obr. 6-4 Okno „Relay Download Tool“.

## 6.1 Nastavení terminálu REM 543 pro testování funkce UE6High

Vybereme-li dvojklikem volbu „Relay Setting Tool“ (viz Obr. 6-1) dojde k otevření okna zobrazeného na obrázku 6-7, kde v prvním řádku záložek je členění jednotlivých funkcí terminálu do skupin jako je ovládání (Control lib.), měření (Measurement lib.) atd. V záložce měření můžeme případně změnit převod proudových a napěťových transformátorů, tak aby vyhovoval námi požadované úloze. Po vybrání záložky „Protection lib.“ (knihovna ochrany) můžeme z druhé řady záložek vybrat námi požadovanou ochrannou funkci, následně se nám na třetím řádku záložek zobrazí všechny záložky příslušné funkce. Při testování je vhodné mít všechny ostatní ochrany, které nevyužíváme, vyřazené z provozu. Proto musíme postupně projít všechny ochrany, které nebudeme využívat a u každé zkontrolovat záložky „Setting group 1“, „Setting group 2“ a „Control setting“, zda je v položce „Operation mode“ zvolena volba „Not in use“, tak jak je vidět na obrázku 6-5. Pro odeslání nového nastavení do ochrany, klepneme na tlačítko zvýrazněné na obrázku 6-5, následně se nám zobrazí okno zobrazené na obrázku 6-6, dáme volbu „Current page“ pro odeslání nastavení na aktuální stránce a potvrdíme.



Obr. 6-5 Vyřazení ochranné funkce.

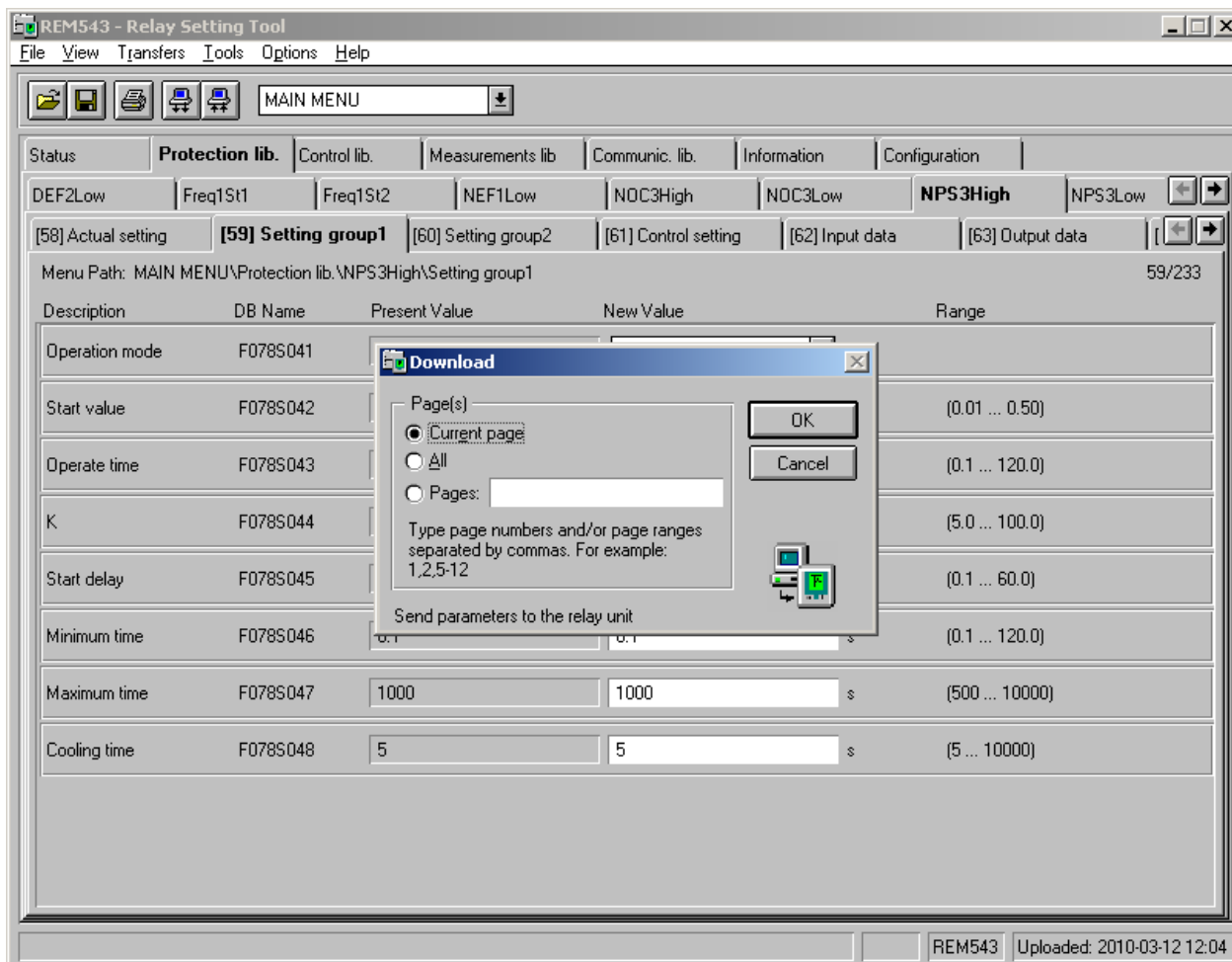
Zvolíme ochrannou funkci UE6High a jak je z obrázku 6-7 patrné, první ze skupiny záložek příslušící funkci je „Actual setting“, vzhledem k tomu, že tato záložka pouze zobrazuje momentálně aktivní nastavení ochrany, nelze zde nic nastavovat, pro její aktualizaci zvolíme tlačítko zvýrazněné na obrázku 6-7, opět využijeme volbu „Current page“ a potvrdíme. Jednotlivé položky z obrázku 6-7 jsou podle [6]:

Circle offset – posun impedanční charakteristiky MHO vůči ose Y v impedančních souřadnicích (rozmezí hodnot -10,00-10,00 p.u.).

Circle diameter – průměr kruhu impedanční charakteristiky MHO (rozmezí hodnot 0,01-60,00 p.u.).

Cir. displacem – circle displacement, posun impedanční charakteristiky MHO vůči ose X v impedančních souřadnicích (rozmezí hodnot -10,00-10,00 p.u.).

Operate time – čas vybavení ochrany (rozmezí hodnot 0,06-10 s).



Obr. 6-6 Odeslání nastavení do ochrany.

Po záložce „Actual setting“ následují záložky „Setting group 1“ a „Setting group 2“, která je znázorněna na obrázku 6-8. Parametry, které se nastavují, jsou pro záložky stejné, toto umožňuje nachystat dva různé režimy chránění. Hodnoty označené „Present Value“ označují aktuální nastavení, které je možno měnit přepsáním políček „New Value“. Veškeré nastavení je nutno provádět v poměrných jednotkách, pro které podle [6] platí vztah (6.1).

$$X_{P.U.} = \frac{X}{Z_N} \quad (6.1.)$$

Hodnoty ochrany budeme nastavovat pro následující alternátor:

Typ: HV 712 512/36

Zdánlivý výkon: 2600 kVA

Činný výkon: 2210 kW

Cos φ: 0,85

Jmenovité napětí: 6300 V

Frekvence: 50 Hz

Jmenovité otáčky: 166,7 ot/min

Jmenovitý proud: 238 A

Jmenovité budící napětí: 58-112 V

Jmenovitý budící proud: 144-232 A

Spojení fází: Y

Počet vyvedených konců: 6

Podélná reaktance: 0,83 p.u.

Příčná reaktance: 0,55 p.u.

Hodnoty pro nastavení ochranné funkce UE6High budou následující:

Circle offset vypočítáme dle vztahu (6.2).

$$offset = -0,1 \cdot X_q \cong -0,06 \text{ p.u.} \quad (6.2.)$$

Circle diameter vypočítáme dle vztahu (6.3).

$$diameter = X_q = 0,55 \text{ p.u.} \quad (6.3.)$$

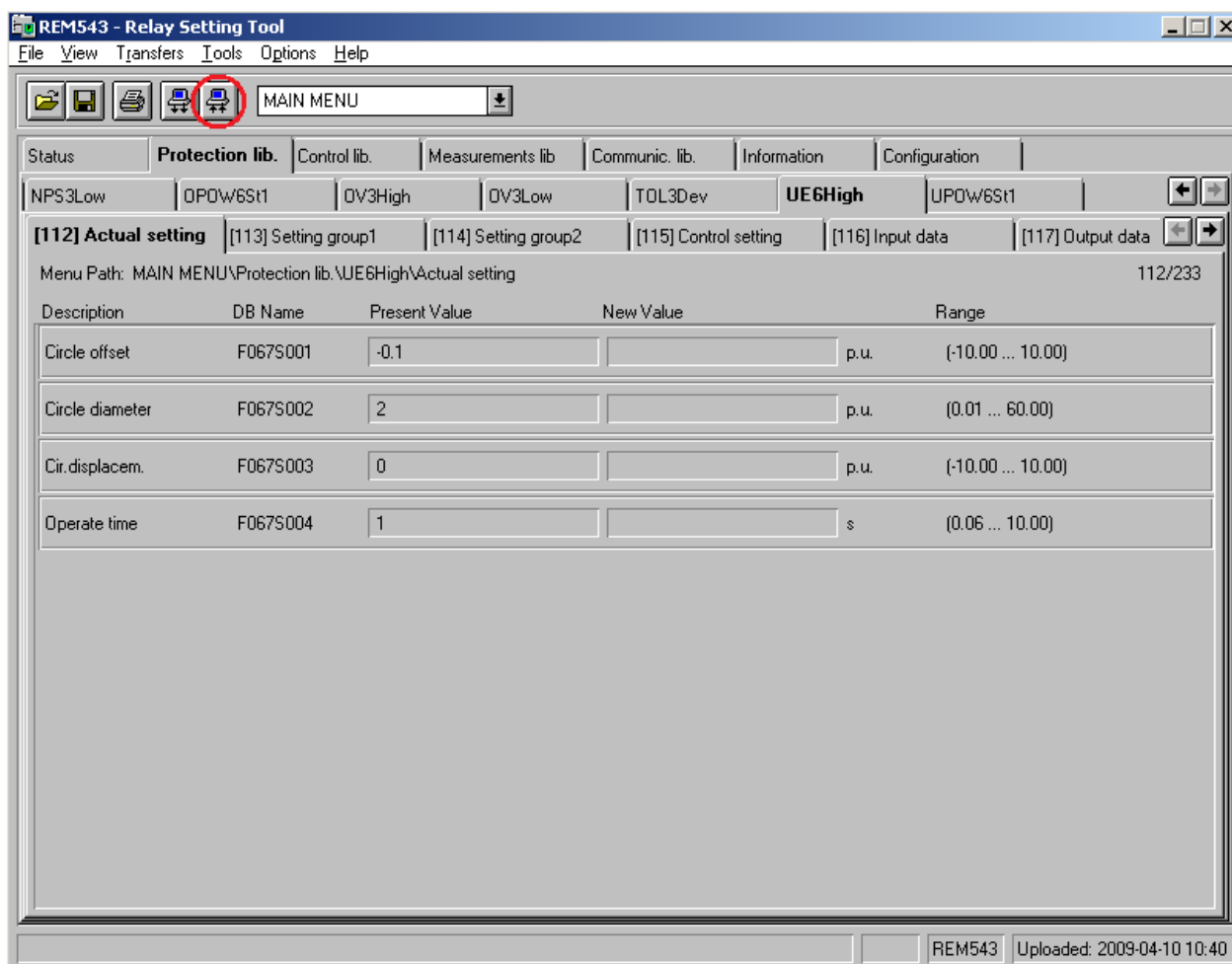
Circle displacement:

Ponecháme nastavený na 0.

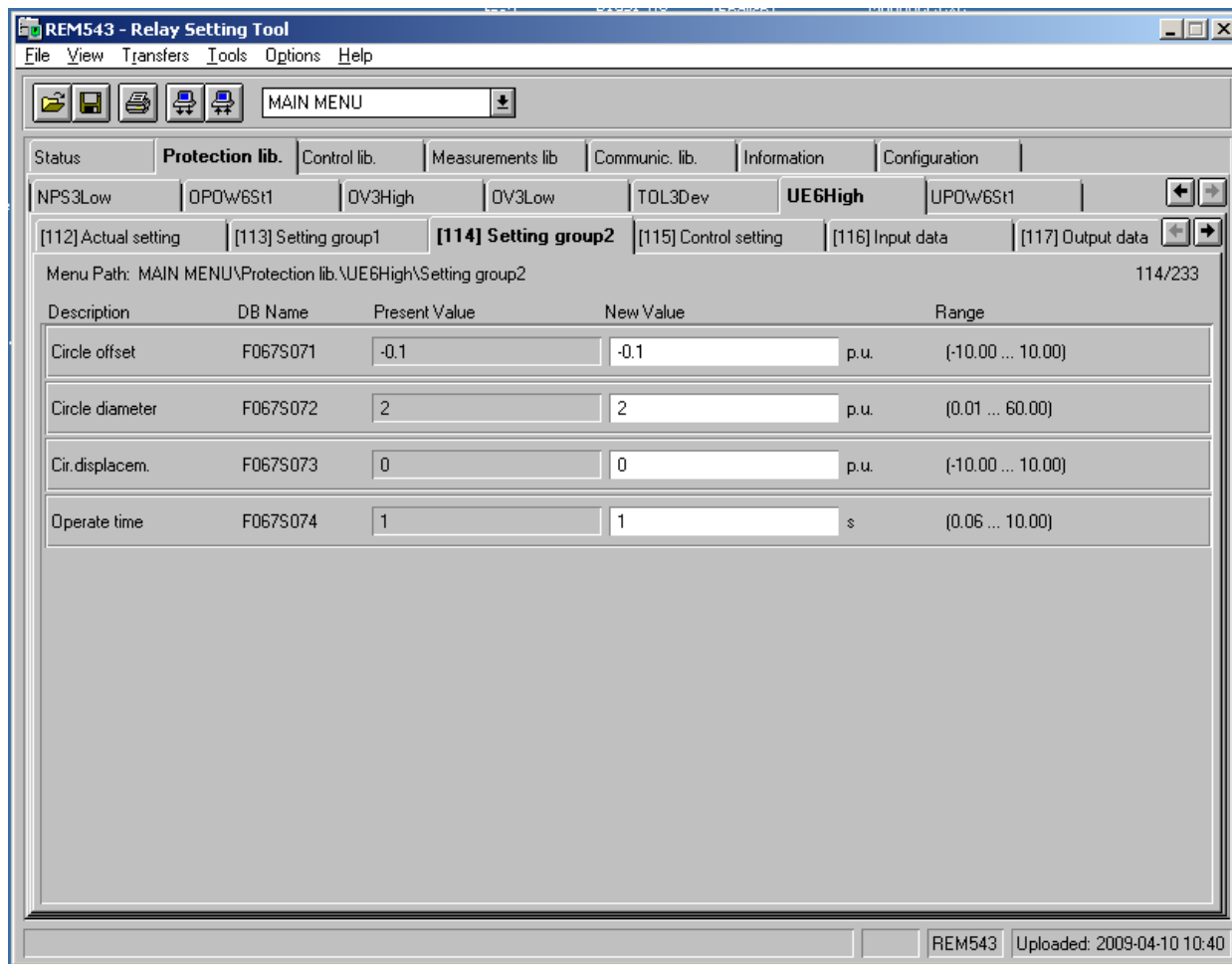
Operate time:

Nastavíme na 0,06 s.

Po provedení nastavení provedeme uložení do ochrany.



Obr. 6-7 Zobrazení "Actual Setting" funkce UE6High.

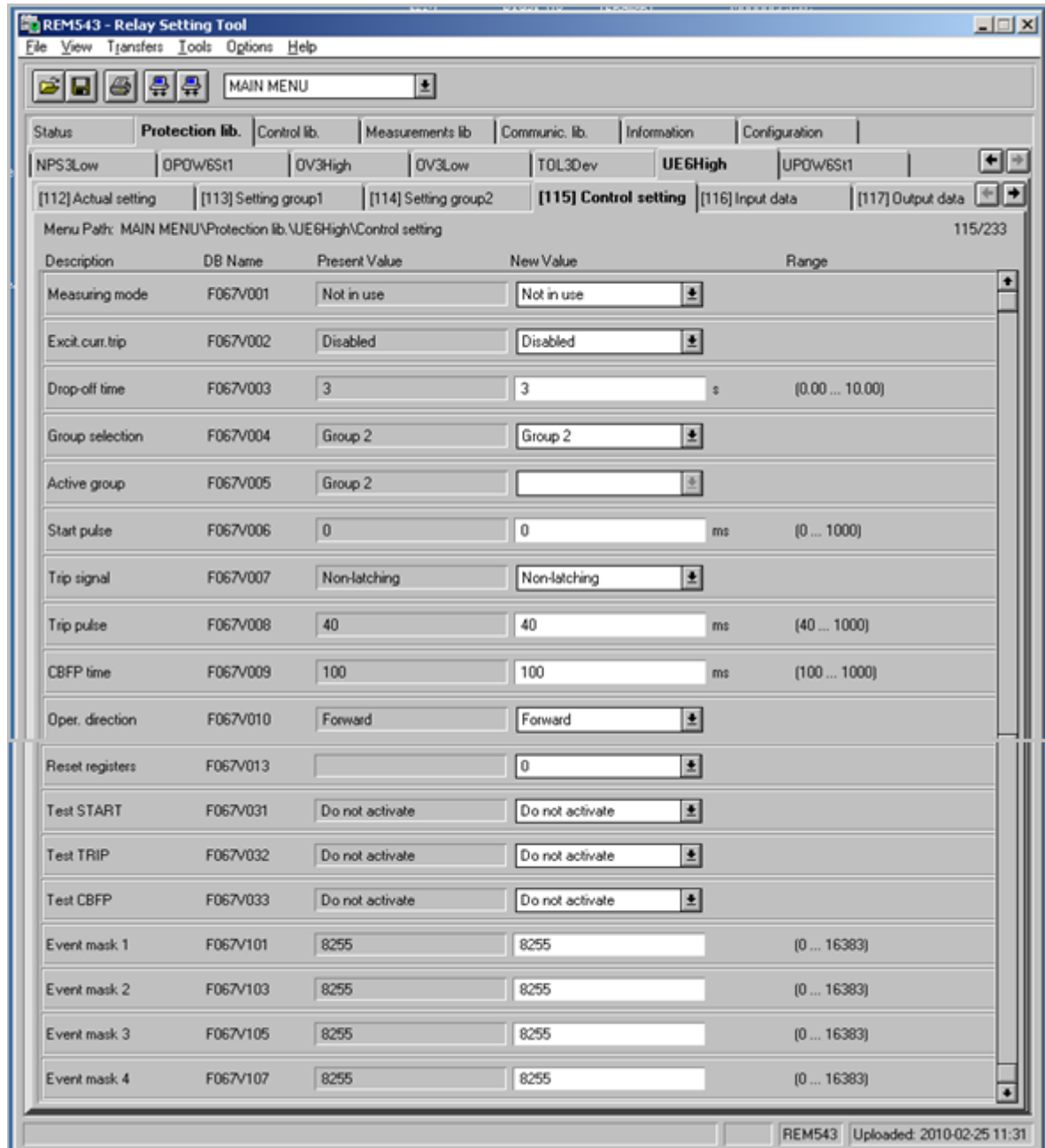


Obr. 6-8 Nastavení „Setting group 2“.

Na obrázku 6-9 je vidět záložka „Control setting“, která umožňuje měnit nastavení jako je momentálně aktivní skupinu nastavení, provádět testování, dočasně vypnout jakékoli chránění, nastavení měřicího módu, který určuje, jakým způsobem bude provedeno měření (které veličiny a fáze budou měřeny) a nastavení délky trvání impulsu k vybavení ochrany.

Pro naše testování změníme nastavení těchto položek:

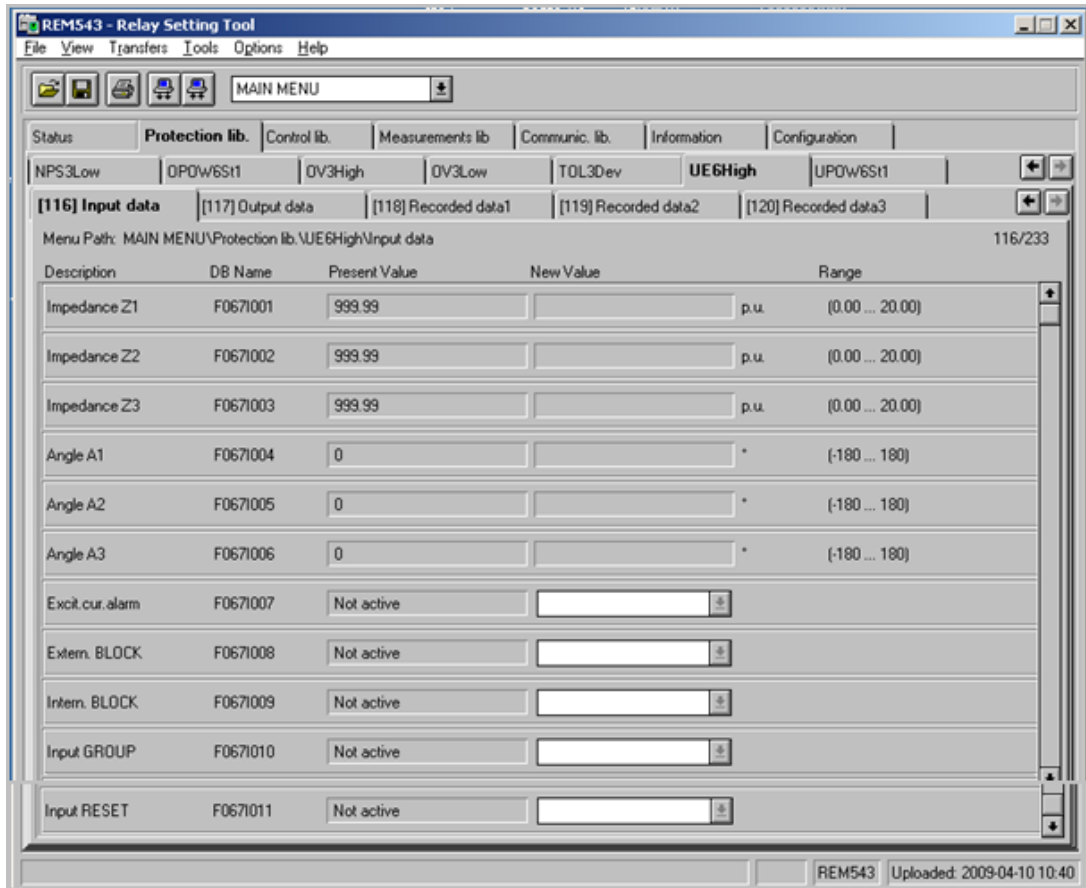
- Measuring mode: 3 phase – phase.
- Group selection: podle toho ve které skupině jsme upravili nastavení.
- Operate direction: můžeme využít k otočení impedanční charakteristiky o 180°.



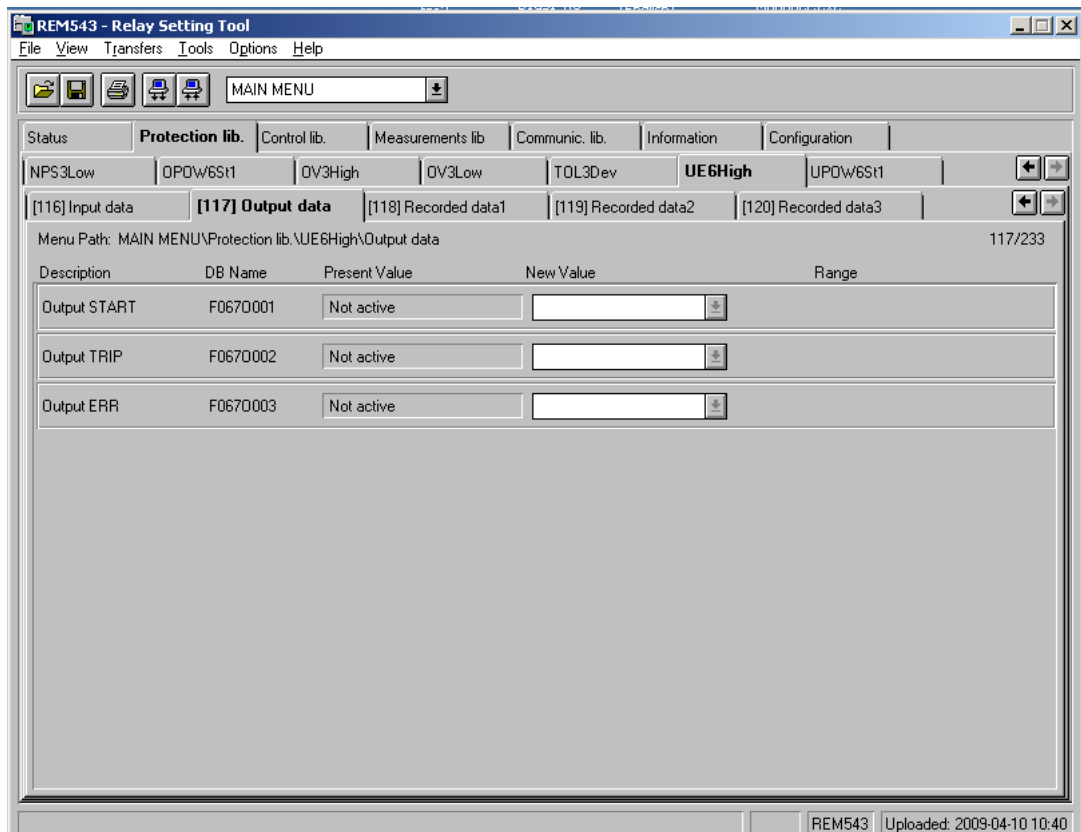
Obr. 6-9 Zobrazení „Control setting“.

Na obrázku 6-10 je vidět záložka „Input data“ zobrazující měřené veličiny, impedanci každé fáze (Z1-Z3), úhel impedance v každé fázi (A1-A3), signál pro interní nebo externí blokování, signál přepínání mezi dvěma nastavitelnými skupinami měření a signál resetování výstupů i registrů.

Na obrázku 6-11 je záložka pro sledování výstupu z ochrany ve formě stavu startovacího, vybavovacího a chybového signálu.

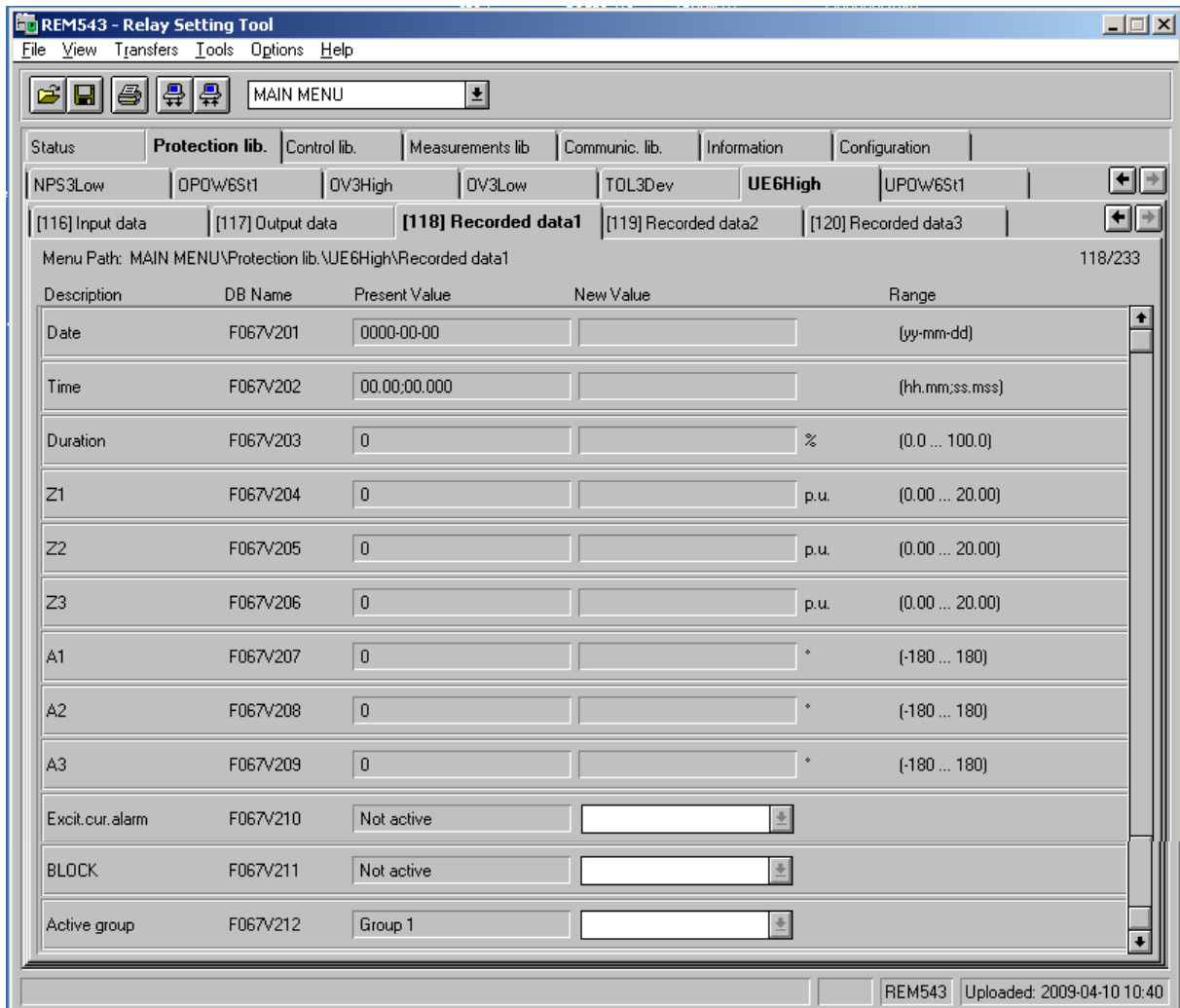


Obr. 6-10 Zobrazení záložky „Input data“.



Obr. 6-11 Zobrazení záložky „Output data“.

Na obrázku 6-12 je vidět první ze tří záložek skupiny zajišťující nahrávání dat pro vyhodnocení působení ochrany a diagnostiku poruchy. V záznamu je datum, čas, trvání, impedance a úhly impedancí v jednotlivých fázích, stav budícího proudu, stav blokovacího vstupního signálu a která ze skupin nastavení „Setting group“ je aktivní.



Obr. 6-12 Zobrazení záložky „Recorded data 1“.

## 7 POPIS TESTOVÁNÍ TERMINÁLU REM 543

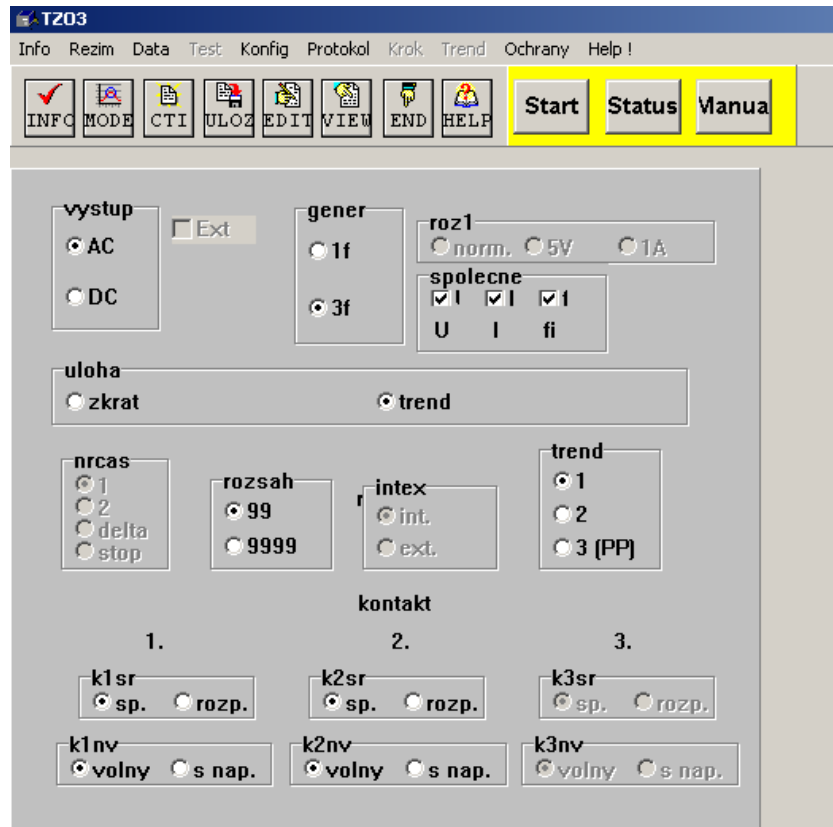
K testování ochranné funkce UE6High terminálu točivého stroje REM 543 využijeme testovacího zařízení ochran TZO 3 vyráběného firmou EGÚ Brno, které budeme ovládat z připojeného PC, je také vhodné připojit analyzátor sítě Chauvin Arnoux C.A. 8334B pro zobrazení okamžitých hodnot proudu a napětí ve formě fázorového diagramu. Nejdříve provedeme zapojení dle obrázku 7-3, které vychází z obrázku 7-4, pro zapojení měřících vstupů využijeme svorkovnici X1.1, pro zapojení signalizace vybavení na testovací zařízení TZO 3 využijeme svorkovnici X5.1 a na ní svorky číslo 4 a 6, které propojíme s logickým vstupem IN1 na TZO 3. Proudové výstupy z TZO 3 zapojíme na proudové vstupy REM 543, pro první fázi použijeme svorky číslo 1 a 2, pro druhou fázi svorky 4 a 5, pro třetí fázi 7 a 8. Napěťové výstupy z TZO 3 zapojíme do trojúhelníka na svorky 27, 25, 24, 22 a 19, 18. Při vytváření popisu obsluhy zařízení TZO 3 byly použity firemní materiály firmy EGÚ Brno [8]. Pro aktivování komunikace mezi zařízením TZO 3 a PC je třeba spustit TZO 3 a zmáčknout tlačítko Rem./Local umístěné na čelním panelu.

První budeme provádět testování postupnou změnou napětí nebo proudu, k tomuto použijeme zkoušku typu trend, tu zvolíme tak, že klepneme na tlačítko MODE a v nabídce, která se objeví, zvolíme zkoušku typu trend, tak jak je zobrazeno na obrázku 7-1. Zkouška typu trend se vyznačuje lineární postupnou změnou zvolené veličiny, jejíž velikost se v průběhu času měnit se zadanou strmostí. Následně zmáčkneme tlačítko EDIT a v okně zobrazeném na obrázku 7-2 nastavíme počáteční hodnoty veličin pro všechny 3 fáze. Následně otevřeme na horní liště menu Trend a zvolíme položku veličina, tak jak je vidět na obrázku 7-2. Tímto se nám otevře okno, jak jej vidíme na obrázku 7-5, kde zvolíme právě jednu veličinu, která se bude měnit. Dalším krokem je nastavení strmosti, tedy rychlosti změny, měněné veličiny včetně koncové hodnoty, po jejímž dosažení již nedochází k dalším změnám. Na závěr nastavíme časy, podle [7] platí:

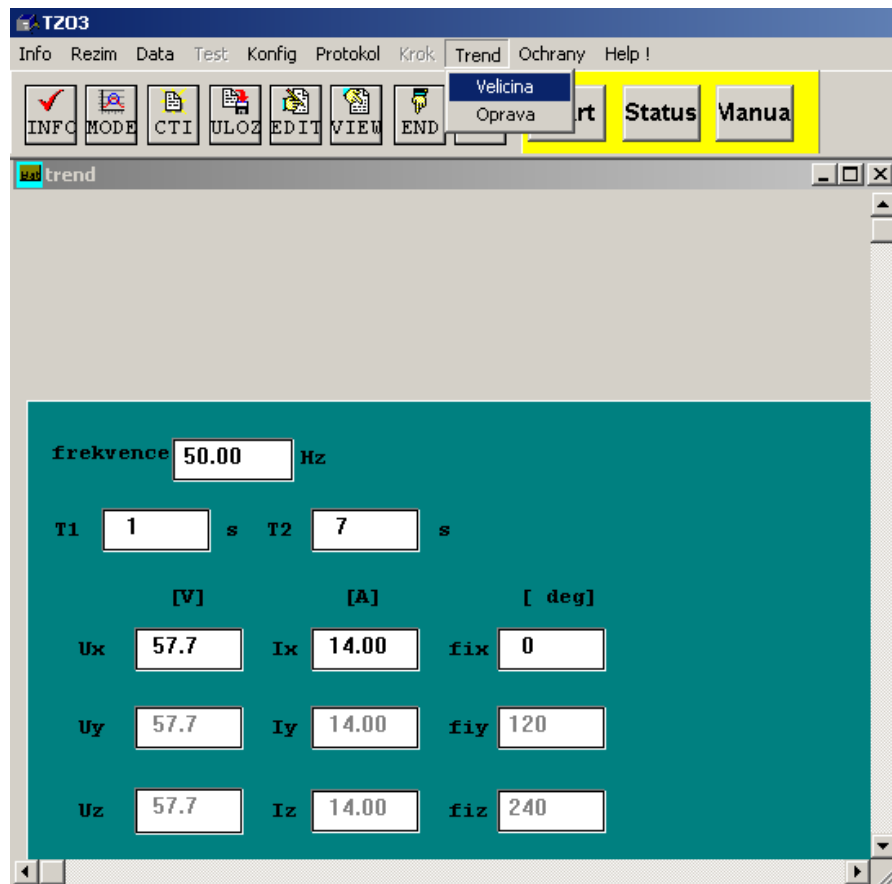
$T_1$  – v této etapě se všechny výstupy vynulují po stanovenou dobu.

$T_2$  – v této etapě probíhá nastavování počátečních požadovaných hodnot.

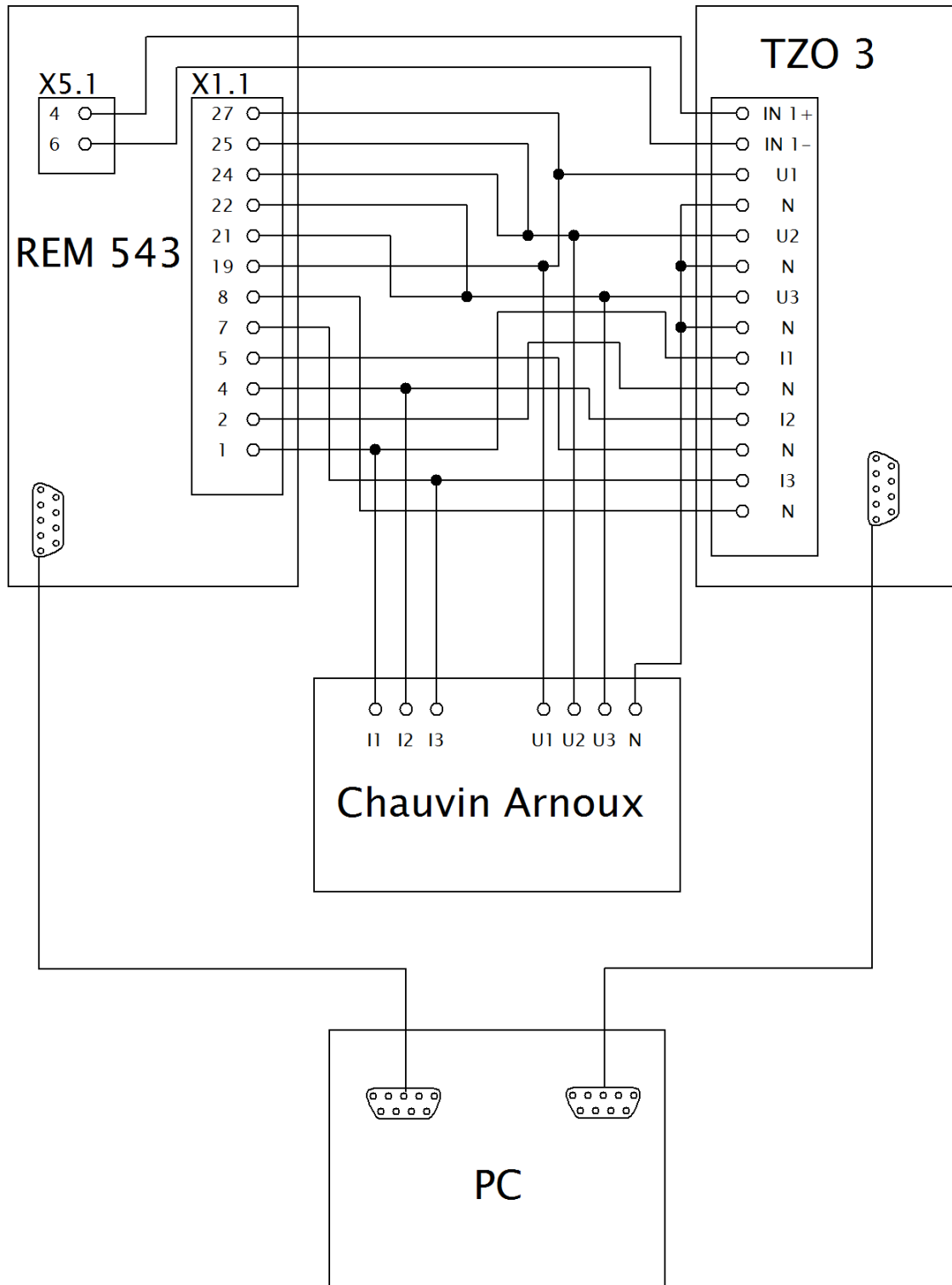
$T_3$  – v této etapě se zadaná veličina mění stanovenou rychlostí po zadaný čas, dokud nezapůsobí ochrana, případně do dosažení limitní hodnoty, čímž je pokus ukončen.



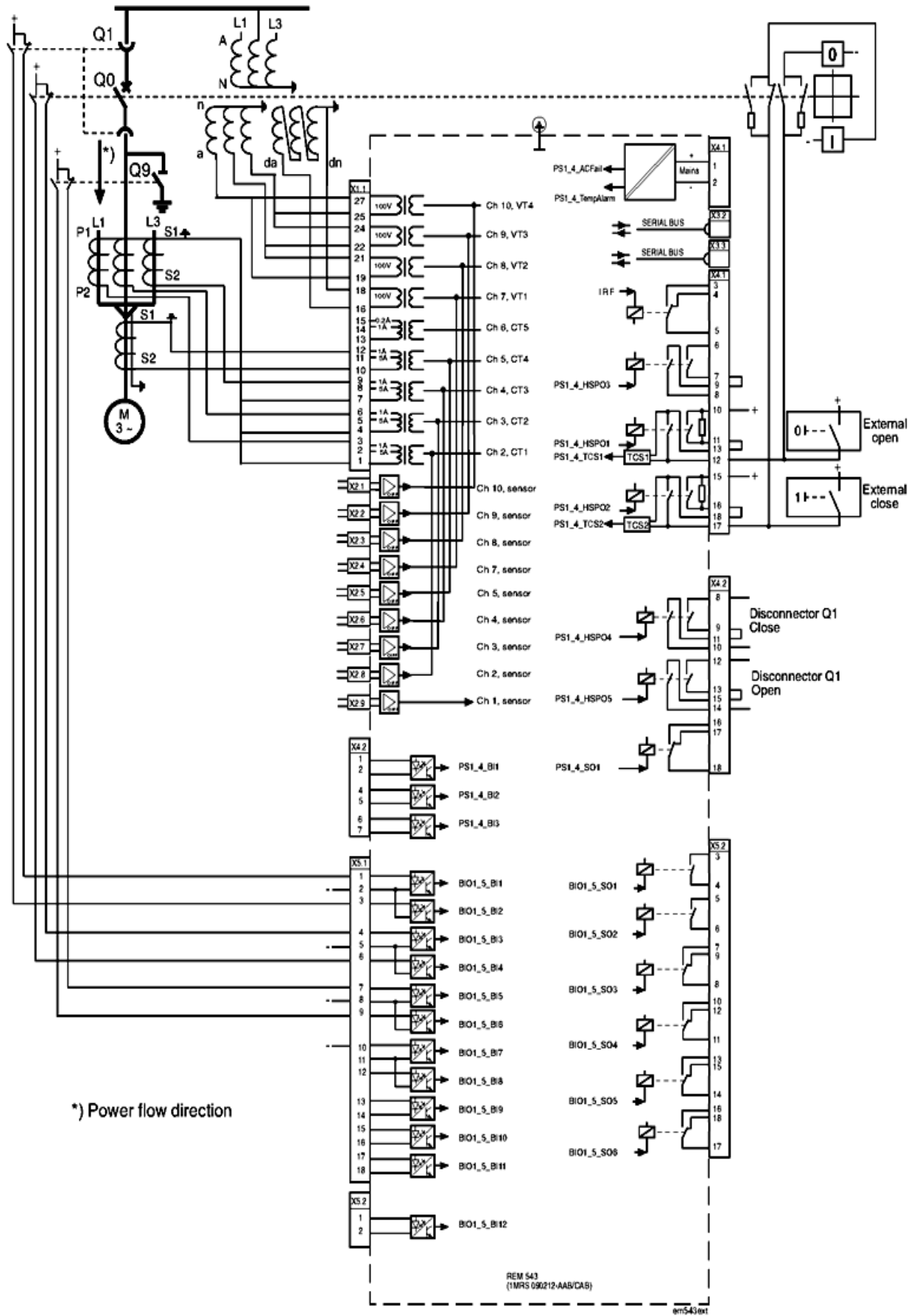
Obr. 7-1 Volba typu zkoušky.



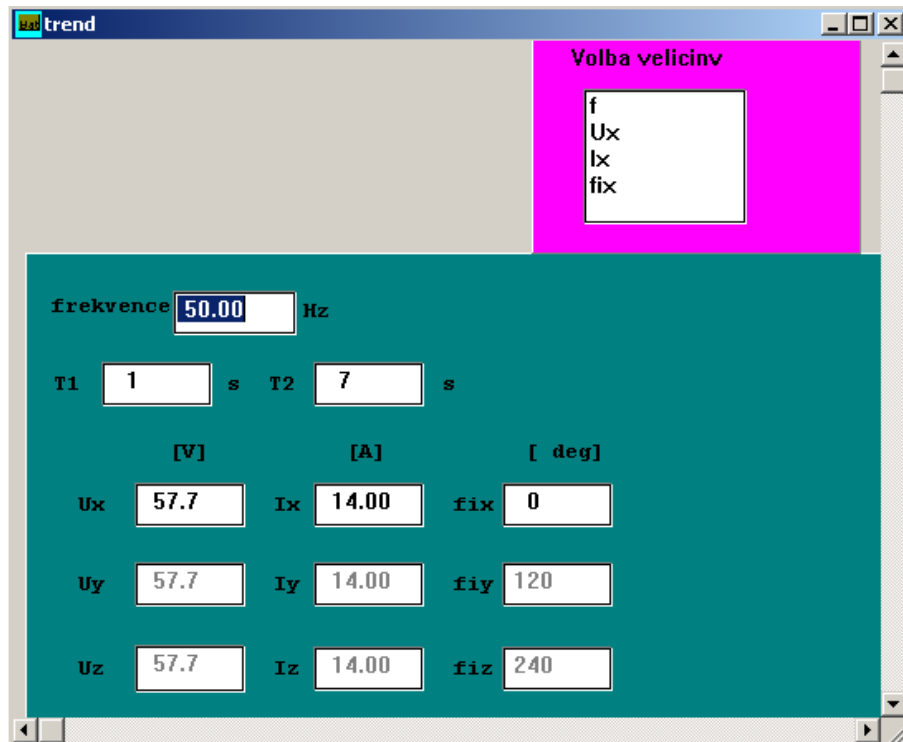
Obr. 7-2 Nastavení veličin pro zkoušku typu trend.



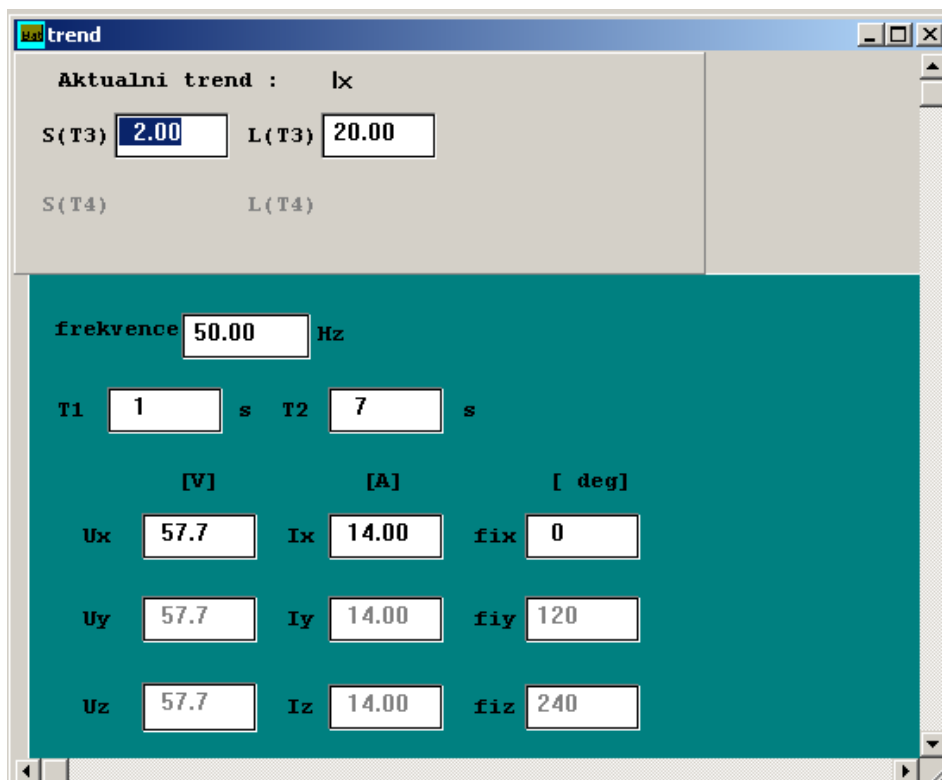
Obr. 7-3 Schéma propojení REM 543, TZO 3 a PC.



Obr. 7-4 Schéma zapojení terminálu REM 543[7].



Obr. 7-5 Volba proměnné veličiny.



Obr. 7-6 Nastavení proměnné veličiny.

Druhým prováděným druhem testu je test zkouškou typu zkrat, po jejím zvolení se nám otevře okno, jak jej vidíme na obrázku 7-7, kde zadané časy podle [7] znamenají:

$T_0$  – doba, po kterou jsou veličiny vynulovány.

$T_{K-}$  – čas určený k nastavování požadovaných hodnot veličin.

$T_K$  – v této etapě dochází k simulaci zkratu.

$T_{K+}$  – v této etapě se nastavují veličiny tak, aby odpovídaly reálným veličinám v obvodu po skončení zkratového děje.

Na obrázku 7-8 vidíme okno nastavování veličin zkoušky typu zkrat, kde označení „fi00“ podle [7] reprezentuje fázový posun počátku zkratu na křivce napětí, „Tss0“ podle [7] reprezentuje časovou konstantu zanikání stejnosměrné složky (pokud je hodnota nastavena na 0, výpočet stejnosměrné složky se nepoužívá). Zkoušku zahájíme zmáčknutím tlačítka start.

| obecne    |       | Tk- | Tk | Tk+ |
|-----------|-------|-----|----|-----|
| frekvence | 50.00 |     |    |     |
| cas etap: |       |     |    |     |
| T0        | 1     |     |    |     |
| Tk-       | 8     |     |    |     |
| Tk        | 25    |     |    |     |
| Tk+       | 6     |     |    |     |

Obr. 7-7 Nastavení časů testu zkoušky typu zkrat.

| obecne |       | Tk-  | Tk    | Tk+       |
|--------|-------|------|-------|-----------|
|        | [V]   |      | [A]   | [deg]     |
| Ux     | 57.7  | Ix   | 14.00 | fix 30    |
| Uy     | 57.7  | Iy   | 14.00 | fiy 150   |
| Uz     | 57.7  | Iz   | 14.00 | fiz 270   |
|        | [deg] |      | [s]   | [Hz/s]    |
| fi00   | 0     | Tss0 | 0.00  | df/dt 0.0 |

Obr. 7-8 Nastavení veličin zkoušky typu zkrat.

## 7.1 Naměřené a vypočítané hodnoty

Jmenovitou impedanci vypočítáme z hodnot fázového napětí (57,7V) a proudu (5A) sekundární strany přístrojových transformátorů ze vztahu (7.1).

$$Z_N = \frac{U_N}{I_N} \quad (7.1)$$

$$Z_N = \frac{57,7 \text{ V}}{5 \text{ A}}$$

$$\underline{Z_N = 11,54 \Omega}$$

Pro hodnoty v tabulce 7-1 jsme využili zkoušku typu trend s napětím nastaveným na 9V a nastavili jsme pokles proudu z 15 A se strmostí  $-1 \text{ A} \cdot \text{s}^{-1}$ . Pro hodnoty v tabulce 7-2 jsme nastavili hodnotu proudu na 5 A, měnili jsme hodnotu napětí z 57,5 V se strmostí  $-2 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Tabulka 7-1 Horní část charakteristiky.

| $\varphi$ [°] | U [V] | I [A] | Z <sub>p.u.</sub> | $\bar{Z}_{p.u.}$ |
|---------------|-------|-------|-------------------|------------------|
| 220           | 9     | 6,66  | 0,117             | -0,09-0,075i     |
| 230           | 9     | 9,04  | 0,086             | -0,055-0,066i    |
| 240           | 9     | 10,74 | 0,073             | -0,036-0,063i    |
| 250           | 9     | 11,94 | 0,065             | -0,022-0,061i    |
| 260           | 9     | 12,66 | 0,062             | -0,011-0,061i    |
| 270           | 9     | 12,88 | 0,061             | -0,061i          |
| 280           | 9     | 12,62 | 0,062             | 0,011-0,061i     |
| 290           | 9     | 11,90 | 0,066             | 0,022-0,062i     |
| 300           | 9     | 10,72 | 0,073             | 0,036-0,063i     |
| 310           | 9     | 9,00  | 0,087             | 0,056-0,066i     |
| 320           | 9     | 6,58  | 0,119             | 0,091-0,076i     |

Tabulka 7-2 Spodní část charakteristiky

| $\varphi$ [°] | U [V] | I [A] | Z <sub>p.u.</sub> | $\bar{Z}_{p.u.}$ |
|---------------|-------|-------|-------------------|------------------|
| 220           | 18,1  | 5     | 0,314             | -0,24-0,202i     |
| 230           | 24,6  | 5     | 0,426             | -0,274-0,327i    |
| 240           | 29,3  | 5     | 0,508             | -0,254-0,44i     |
| 250           | 32,6  | 5     | 0,565             | -0,193-0,531i    |
| 260           | 34,5  | 5     | 0,598             | -0,104-0,589i    |
| 270           | 35,2  | 5     | 0,610             | -0,61i           |
| 280           | 34,5  | 5     | 0,598             | 0,104-0,589i     |
| 290           | 32,6  | 5     | 0,565             | 0,193-0,531i     |
| 300           | 29,3  | 5     | 0,508             | 0,254-0,44i      |
| 310           | 24,7  | 5     | 0,428             | 0,275-0,328i     |
| 320           | 18,1  | 5     | 0,314             | 0,24-0,202i      |

Příklad výpočtu  $Z_{P.U.}$  ze vztahu (7.2) pro první řádek tabulky 7-1 a 7-2.

$$Z_{P.U.} = \frac{U}{I} \quad (7.2)$$

$$Z_{P.U.} = \frac{9 \text{ V}}{6,66 \text{ A}}$$

$$\underline{Z_{P.U.} = 0,117}$$

$$Z_{P.U.} = \frac{18,1 \text{ V}}{5 \text{ A}}$$

$$\underline{Z_{P.U.} = 0,314}$$

Pro měření hodnot v tabulce 7-3 jsme nastavili napětí na 57,7 V a proud jsme zvětšovali z hodnoty 5 A se strmostí  $0,2 \text{ A} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Tabulka 7-3 Spodní část charakteristiky.

| $\varphi$ [°] | U [V] | I [A] | $Z_{p.u.}$ | $\bar{Z}_{p.u.}$ |
|---------------|-------|-------|------------|------------------|
| 220           | 57,7  | 15,82 | 0,316      | -0,242-0,203i    |
| 230           | 57,7  | 11,64 | 0,430      | -0,276-0,329i    |
| 240           | 57,7  | 9,84  | 0,508      | -0,254-0,44i     |
| 250           | 57,7  | 8,84  | 0,566      | -0,193-0,532i    |
| 260           | 57,7  | 8,34  | 0,600      | -0,104-0,59i     |
| 270           | 57,7  | 8,20  | 0,610      | -0,61i           |
| 280           | 57,7  | 8,34  | 0,600      | 0,104-0,59i      |
| 290           | 57,7  | 8,84  | 0,566      | 0,193-0,532i     |
| 300           | 57,7  | 9,84  | 0,508      | 0,254-0,44i      |
| 310           | 57,7  | 11,68 | 0,428      | 0,275-0,328i     |
| 320           | 57,7  | 15,92 | 0,314      | 0,241-0,202i     |

Příklad výpočtu  $Z_{P.U.}$  ze vztahu (7.2) pro druhý řádek tabulky 7-3.

$$Z_{P.U.} = \frac{57,7 \text{ V}}{11,64 \text{ A}}$$

$$\underline{Z_{P.U.} = 0,430}$$

V tabulce 7-4 jsme měnili strmost změny napětí. Počáteční hodnota napětí byla 57,7 V a nastavená hodnota proudu byla 5 A, fázor impedance byl nastaven v úhlu 260°.

Tabulka 7-4 Porovnání vybavení pro různé strmosti změny veličiny.

| S [V/s] | $\varphi$ [°] | U [V] | I [A] | $Z_{p.u.}$ | $\bar{Z}_{p.u.}$ |
|---------|---------------|-------|-------|------------|------------------|
| -10     | 260           | 34,0  | 5     | 0,589      | -0,102-0,58i     |
| -20     | 260           | 34,4  | 5     | 0,596      | -0,104-0,587i    |
| -30     | 260           | 33,1  | 5     | 0,574      | -0,1-0,565i      |
| -40     | 260           | 32,3  | 5     | 0,560      | -0,097-0,551i    |
| -50     | 260           | 32,1  | 5     | 0,556      | -0,097-0,548i    |
| -57,7   | 260           | 31,8  | 5     | 0,551      | -0,096-0,543i    |

Příklad výpočtu  $Z_{p.u.}$  ze vztahu (7.2) pro první řádek tabulky 7-4.

$$Z_{p.u.} = \frac{34 \text{ V}}{5 \text{ A}} = 11,54 \Omega$$

$$\underline{Z_{p.u.}} = 0,589255$$

Hodnoty v tabulce 7-5 byly naměřeny pomocí zkoušky typu zkrat, vždy dvojice hodnot pro stejný úhel natočení fázoru impedance, jednou pro změnu proudu při plném napětí (57,7 V) a podruhé pro změnu napětí při plném proudu (5 A) v dolní části charakteristiky. Pro fázory impedancí v horní části charakteristiky bylo možno hodnoty naměřit pouze se sníženým napětím na 9 V. Čas  $T_{k0}$  byl nastaven na 1 s, čas  $T_{K-}$  na 8 s, čas  $T_K$  na 25 s a čas  $T_K$  na 6 s. Při změně napětí nastavíme koncovou hodnotu na 10 V, při změně proudu nastavíme koncovou hodnotu na 15 A.

Tabulka 7-5 Čas vybavení při zkoušce typu zkrat.

| $\varphi$ [°] | U [V] | I [A] | $Z_{p.u.}$ | $\bar{Z}_{p.u.}$ | $t_v$ [ms] |
|---------------|-------|-------|------------|------------------|------------|
| 250           | 32,6  | 5,00  | 0,565      | -0,193-0,531i    | 70         |
| 250           | 57,7  | 8,86  | 0,564      | -0,193-0,53i     | 63         |
| 290           | 32,6  | 5,00  | 0,565      | 0,193-0,531i     | 72         |
| 290           | 57,7  | 8,86  | 0,564      | 0,193-0,53i      | 61         |
| 250           | 9,0   | 11,94 | 0,065      | -0,022-0,061i    | 67         |
| 290           | 9,0   | 11,90 | 0,066      | 0,022-0,062i     | 66         |

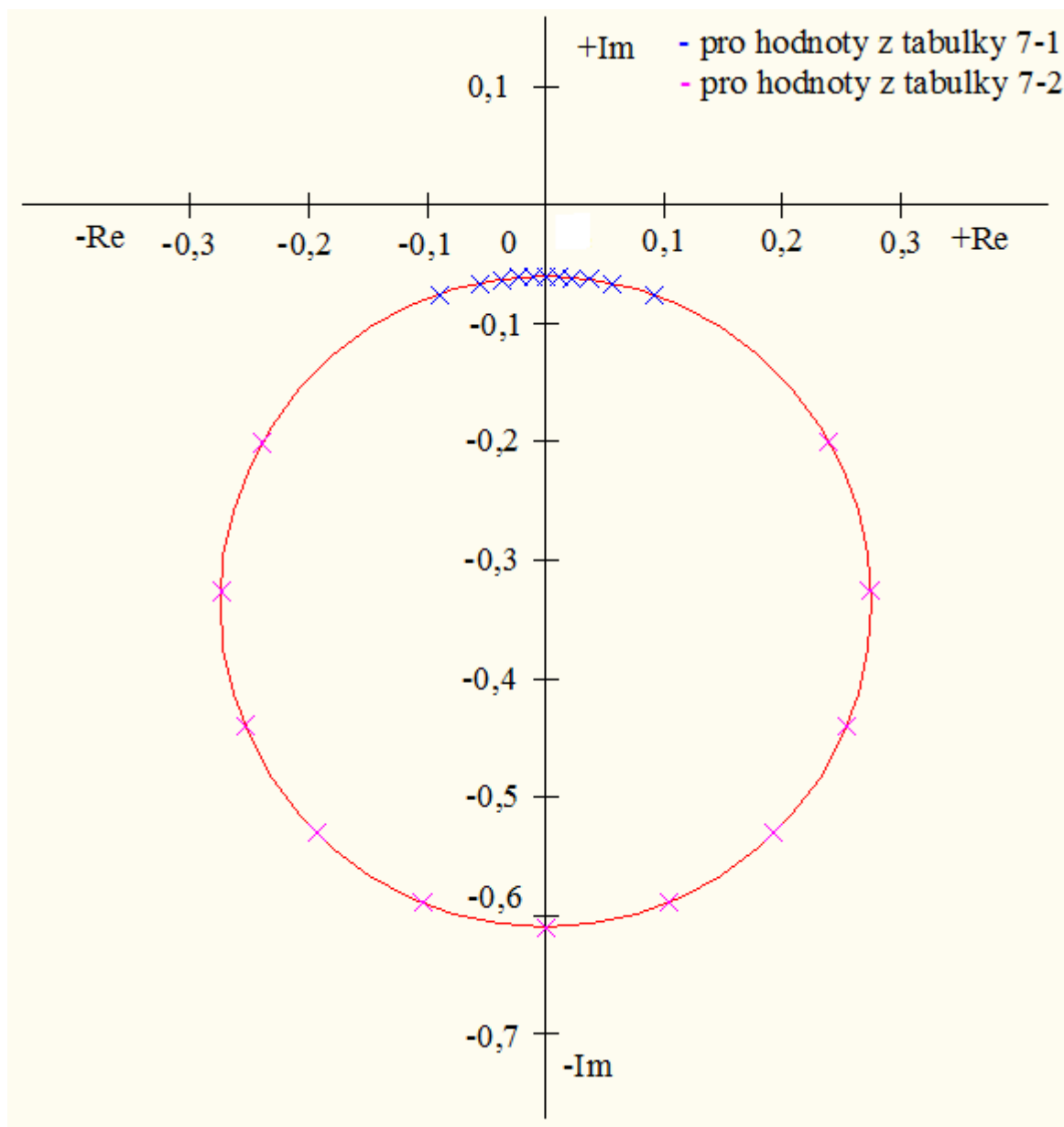
Příklad výpočtu  $Z_{p.u.}$  ze vztahu (7.2) pro třetí řádek tabulky 7-5.

$$Z_{p.u.} = \frac{32,6 \text{ V}}{5 \text{ A}} = 11,54 \Omega$$

$$\underline{Z_{p.u.}} = 0,564991$$

## 8 ZÁVĚR A VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Hodnoty poměrné impedance vypočítané v tabulkách 7-1 a 7-2 jsou znázorněny a proloženy na obrázku 8-1. Z hodnot v tabulce 7-5 vyplývá, že při nastavení zpoždění ochrany na 0,06 s se vypínací čas ochrany pohybuje v rozmezí 61 až 72 ms. Podle tabulky 7-4 je rozdíl impedancí při vybavení ochrany pro různou strmost měněné veličiny zanedbatelná.



Obr. 8-1 Vypínací charakteristika ochrany UE6High.

### 8.1 Současný stav

Mezi laboratorními úlohami v laboratořích ústavu elektroenergetiky VUT v Brně nebyla zatím zahrnuta úloha obsahující problematiku diagnostiky ztráty buzení synchronního alternátoru ani měření vypínací charakteristiky této ochrany založené na principu funkce distanční ochrany a zpětného toku jalového proudu. Realizaci laboratorní úlohy zabývající se ochranou při ztrátě

buzení omezovala skutečnost, že nebyly zpracovány vhodné studijní podklady v českém jazyce pro konfiguraci ochrany její zapojení a následné naměření hodnot.

## 8.2 Shrnutí nových poznatků práce

V průběhu vytváření této práce bylo navrženo a odzkoušeno zapojení pro testování ochranné funkce UE6High a měření její vypínací charakteristiky s využitím testovacího zařízení ochran TZO 3 a analyzátoru sítě Chauvin Arnoux. V návaznosti byl vytvořen návod pro konfiguraci terminálu točivého stroje REM 543, tak, aby bylo zajištěno naměření požadované vypínací charakteristiky.

## 8.3 Závěry práce a její přínos

Z naměřených hodnot je patrné, že i při velké rychlosti změny měřených veličin je citlivost ochrany dostatečně vysoká, takže poloha koncového bodu fázoru impedance uvnitř MHO charakteristiky při vybavení je závislá zejména na nastaveném časovém zpoždění vybavení ochranné funkce UE6High terminálu točivého stroje REM 543.

## 8.4 Význam a využití dosažených výsledků

Práce obsahuje kompletní shrnutí nezbytné teorie týkající se problematiky ztráty buzení a jejího chránění včetně podrobného návodu na zapojení, provedení komunikace mezi PC a terminálem točivého stroje REM 543 a také mezi PC a testovacím zařízením ochran TZO 3, dále návod obsahuje podrobný popis nastavení terminálu REM 543 včetně nastavení převodů proudových a napěťových transformátorů, popis testování vybavení ochrany a měření vypínací charakteristiky pomocí testeru TZO 3.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Bauer, M.; Cigánek, L.; Elektrické stroje a přístroje. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955
- [2] Bouček, S.; Dočekal, A.; Elektrárny II: přednášky. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN: 80-01-01279-4
- [3] Cigánek, L.; Elektrické stroje. 6. vyd. Praha: Technicko-vědecké nakladatelství, 1951
- [4] Ondrášek, M.; Elektrárny II. 2. vyd. Brno: VUT, 1988
- [5] Trojánek, Z.; Elektrická část elektráren. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1975
- [6] Firemní materiály ABB; [on line]; 1998;  
[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/913b8418ff2a20d1c12575610025bf60/\\$File/REM54\\_tech\\_750915\\_ENk.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/913b8418ff2a20d1c12575610025bf60/$File/REM54_tech_750915_ENk.pdf)
- [7] Firemní materiály EGÚ Brno
- [8] ORSÁGOVÁ, J.; Odvození vypínací charakteristiky ochrany při ztrátě buzení. *Energyspectrum*. 2005. 2005(0)(1). p.1-6. ISSN 1214-7044