

**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**

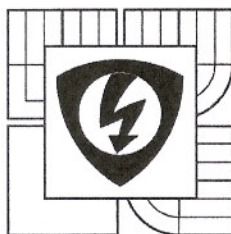
**NÁVRH CHRÁNĚNÍ MALÉ VODNÍ  
ELEKTRÁRNY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE  
AUTHOR**

**JIŘÍ HUDEC**

**BRNO 2011**



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

**Student:** Jiří Hudec

**Ročník:** 3

**ID:** 106482

**Akademický rok:** 2010/11

**NÁZEV TÉMATU:**

**Návrh chránění malé vodní elektrárny**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Poruchy a základní typy ochran.
2. Chránění generátorů.
3. Návrh ochran pro zadanou malou vodní elektrárnu.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 26.5.2011

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

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

*předseda oborové rady*



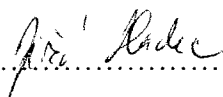
**UPOZORNĚNÍ:**

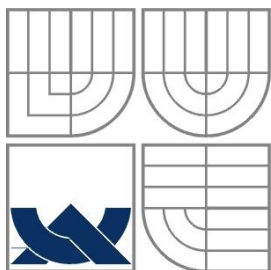
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných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

Bibliografická citace práce:

HUDEC, J. *Návrh chránění malé vodní elektrárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 56 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Toman, 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**

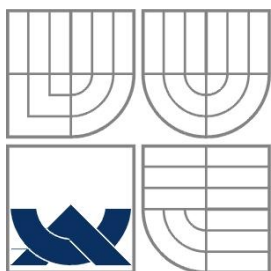
# **Návrh chránění malé vodní elektrárny**

**Jiří Hudec**

**vedoucí: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2011**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**



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

**Bachelor's Thesis**

# **Proposal of small hydro power station protection**

**by**

**Jiří Hudec**

**Supervisor: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

**Brno University of Technology, 2011**

**Brno**

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem chránění malé vodní elektrárny. V první části je zaměřena na poruchy a základní typy ochran. V následující části se zabývá chráněním generátorů. A v poslední části řeší samotný návrh chránění malé vodní elektrárny.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** malá vodní elektrárna, poruchové stavy, ochrany, generátor, terminál

## **ABSTRACT**

This Bachelor thesis deals with proposal of small hydro power station protection. The first part focuses on failure states and basic types of protection. The next part explains protection of generators. The last part provides a particular solution of small hydro power station protection.

**KEY WORDS:** small hydro power station, failure states, protections, generator, terminal

## 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 ÚVOD .....</b>                                                      | <b>13</b> |
| <b>2 CÍLE PRÁCE .....</b>                                                | <b>14</b> |
| <b>3 PORUCHOVÉ STAVY .....</b>                                           | <b>15</b> |
| <b>4 ELEKTRICKÉ OCHRANY .....</b>                                        | <b>17</b> |
| 4.1 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY NA ELEKTRICKÉ OCHRANY .....                       | 18        |
| 4.2 ZÁKLADNÍ ČLENY OCHRAN .....                                          | 19        |
| 4.3 DRUHY OCHRAN .....                                                   | 20        |
| 4.4 ŘÍDÍCÍ SYSTÉMY .....                                                 | 21        |
| <b>5 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY .....</b>                                | <b>23</b> |
| 5.1 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY NAPĚTÍ (PTN) .....                        | 23        |
| 5.1.1 NAPĚŤOVÉ SENZORY .....                                             | 24        |
| 5.2 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU (PTP).....                         | 25        |
| 5.2.1 ROZDĚLENÍ PTP .....                                                | 25        |
| 5.2.2 PROUDOVÉ SENZORY .....                                             | 27        |
| <b>6 OCHRANY VEDENÍ.....</b>                                             | <b>28</b> |
| 6.1 OCHRANY NADPROUDOVÉ .....                                            | 29        |
| 6.1.1 ČASOVĚ NEZÁVISLÉ NADPROUDOVÉ OCHRANY .....                         | 30        |
| 6.1.2 PODPĚŤOVÉ ODBLOKOVÁNÍ NADPROUDOVÝCH OCHRAN.....                    | 31        |
| 6.1.3 ČASOVĚ ZÁVISLÉ NADPROUDOVÉ OCHRANY .....                           | 31        |
| 6.1.4 SMĚROVÉ NADPROUDOVÉ OCHRANY .....                                  | 32        |
| 6.2 DISTANČNÍ (IMPEDANČNÍ) OCHRANY .....                                 | 32        |
| <b>7 OCHRANY TRANSFORMÁTORŮ .....</b>                                    | <b>35</b> |
| 7.1 ROZDÍLOVÁ OCHRANA TRANSFORMÁTORU .....                               | 35        |
| 7.2 ZEMNÍ KOSTROVÁ (NÁDOBOVÁ OCHRANA).....                               | 36        |
| <b>8 OCHRANA GENERÁTORU.....</b>                                         | <b>37</b> |
| <b>9 NÁVRH CHRÁNĚNÍ .....</b>                                            | <b>38</b> |
| 9.1 ZADANÉ PARAMETRY.....                                                | 38        |
| 9.2 VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ.....                                       | 39        |
| 9.2.1 VELIKOSTI ZKRATOVÝCH PROUDŮ PŘI GENERÁTORU PŘIPOJENÉM K SÍTI.....  | 40        |
| 9.2.2 VELIKOSTI ZKRATOVÝCH PROUDŮ PŘI GENERÁTORU ODPOJENÉM OD SÍTĚ ..... | 42        |
| 9.3 VÝBĚR TERMINÁLU .....                                                | 43        |
| 9.4 NASTAVENÍ TERMINÁLŮ .....                                            | 46        |

---

|                                                |           |
|------------------------------------------------|-----------|
| 9.4.1 TERMINÁL 1 .....                         | 46        |
| 9.4.2 TERMINÁL 2 .....                         | 49        |
| 9.4.3 TERMINÁL 3 .....                         | 50        |
| <b>9.5 VÝBĚR OSTATNÍCH PRVKŮ CHRÁNĚNÍ.....</b> | <b>54</b> |
| <b>10 ZÁVĚR.....</b>                           | <b>55</b> |
| <b>11 POUŽITÁ LITERATURA .....</b>             | <b>56</b> |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|                                                                                                    |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Obrázek 5.1 Kapacitní transformátor .....</i>                                                   | <i>24</i> |
| <i>Obrázek 5.2 Přístrojový transformátor proudu .....</i>                                          | <i>25</i> |
| <i>Obrázek 5.3 Sčítací PTP .....</i>                                                               | <i>26</i> |
| <i>Obrázek 5.4 a) Dvou jádrový PTP, b) PTP s pomocným autotransformatorem.....</i>                 | <i>26</i> |
| <i>Obrázek 5.5 Rogowského cívka.....</i>                                                           | <i>27</i> |
| <i>Obrázek 6.1 Příklad časového nastavení nadproudových ochran .....</i>                           | <i>28</i> |
| <i>Obrázek 6.2 Charakteristiky nadproudových ochran .....</i>                                      | <i>30</i> |
| <i>Obrázek 6.3 Vypínací plán nadproudových časově nezávislých ochran.....</i>                      | <i>31</i> |
| <i>Obrázek 6.4 Chránění radiálního vedení časově závislými nadproudovými ochranami.....</i>        | <i>31</i> |
| <i>Obrázek 6.5 Ukázka směrové nadproudové ochrany.....</i>                                         | <i>32</i> |
| <i>Obrázek 6.6 Vypínací plán distančních ochran .....</i>                                          | <i>33</i> |
| <i>Obrázek 6.7 Amplitudový komparátor .....</i>                                                    | <i>34</i> |
| <i>Obrázek 7.1 Rozdílová ochrana dvouvinutového transformátoru v zapojení Yd .....</i>             | <i>35</i> |
| <i>Obrázek 7.2 Zemní kostrová ochrana .....</i>                                                    | <i>36</i> |
| <i>Obrázek 9.1 Schéma malé vodní elektrárny.....</i>                                               | <i>38</i> |
| <i>Obrázek 9.2 Zkrat v místě TA4.....</i>                                                          | <i>40</i> |
| <i>Obrázek 9.3 Zkrat v místě TA2.....</i>                                                          | <i>41</i> |
| <i>Obrázek 9.4 Zkrat v místě TA3.....</i>                                                          | <i>41</i> |
| <i>Obrázek 9.5 Zkrat v místě TA2.....</i>                                                          | <i>42</i> |
| <i>Obrázek 9.6 Zkrat v místě TA3.....</i>                                                          | <i>42</i> |
| <i>Obrázek 9.7 Zkrat v místě TA4.....</i>                                                          | <i>43</i> |
| <i>Obrázek 9.8 Hlavní části terminálu REF 542plus .....</i>                                        | <i>44</i> |
| <i>Obrázek 9.9 Schéma zapojení terminálů REF 542plus.....</i>                                      | <i>45</i> |
| <i>Obrázek 9.10 Tabulka parametrů rozdílové ochrany terminálu REF 542plus.....</i>                 | <i>46</i> |
| <i>Obrázek 9.11 Vypínací charakteristika rozdílové ochrany v REF 542plus .....</i>                 | <i>46</i> |
| <i>Obrázek 9.12 Ukázka vypínací charakteristiky ochrany proti nesouměrnosti v REF 542plus.....</i> | <i>53</i> |

## SEZNAM TABULEK

|                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Tabulka 5.1 Třídy přesnosti PTN .....</i>                                          | <i>24</i> |
| <i>Tabulka 5.2 Třídy přesnosti PTP .....</i>                                          | <i>25</i> |
| <i>Tabulka 9.1 Nastavení parametrů rozdílové ochrany terminálu 1 .....</i>            | <i>48</i> |
| <i>Tabulka 9.2 Nastavení parametrů nadproudové ochrany terminálu 1 .....</i>          | <i>49</i> |
| <i>Tabulka 9.3 Nastavení parametrů nadpětíové ochrany terminálu 2.....</i>            | <i>49</i> |
| <i>Tabulka 9.4 Nastavení parametrů nadpětíové ochrany terminálu 2.....</i>            | <i>49</i> |
| <i>Tabulka 9.5 Nastavení parametrů podpětíové ochrany terminálu 2.....</i>            | <i>50</i> |
| <i>Tabulka 9.6 Nastavení parametrů rozdílové ochrany terminálu 3 .....</i>            | <i>50</i> |
| <i>Tabulka 9.7 Nastavení parametrů nadproudové ochrany terminálu 3 .....</i>          | <i>51</i> |
| <i>Tabulka 9.8 Nastavení parametrů ochrany proti přetížení terminálu 3.....</i>       | <i>51</i> |
| <i>Tabulka 9.9 Nastavení parametrů ochrany proti přetížení terminálu 3.....</i>       | <i>52</i> |
| <i>Tabulka 9.10 Nastavení parametrů ochrany proti nesouměrnosti terminálu 3 .....</i> | <i>53</i> |

**SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**

|            |                                                     |
|------------|-----------------------------------------------------|
| $u$        | Napětí                                              |
| $i$        | Proud                                               |
| $p$        | Výkon                                               |
| $v$        | Teplota                                             |
| $v_{max}$  | Maximální teplota                                   |
| $i_m$      | Magnetizační proud                                  |
| $i_r$      | Proud rotoru                                        |
| $i_s$      | Proud statoru                                       |
| $Z_b$      | Sekundární zátěž                                    |
| $U_b$      | Sekundární proud                                    |
| $n$        | Nadproudový činitel                                 |
| $I_0$      | Nulový proud                                        |
| $I_k$      | Zkratový proud                                      |
| $t$        | Čas                                                 |
| $R1$       | Ochrana 1                                           |
| $R2$       | Ochrana 2                                           |
| $R3$       | Ochrana 3                                           |
| $\Delta t$ | Časový koordinační interval                         |
| $S_o$      | Řídící signál                                       |
| $S_r$      | Omezovací signál                                    |
| $k_1$      | Převod napět'ového transformátoru v součtovém členu |
| $k_2$      | Převod napět'ového transformátoru v součtovém členu |
| $Z$        | Impedance                                           |
| $P_1$      | Plovák                                              |
| $P_2$      | Plovák                                              |
|            |                                                     |
| $ES$       | Elektrizační soustava                               |
| $TN$       | Transformátor napětí                                |
| $TP$       | Transformátor proudu                                |
| $PTN$      | Přístrojový transformátor napětí                    |
| $PTP$      | Přístrojový transformátor proudu                    |
| $nn$       | Nízké napětí                                        |
| $vn$       | Vysoké napětí                                       |
| $vvn$      | Velmi vysoké napětí                                 |
| $zvn$      | Zvlášť vysoké napětí                                |
| $ss$       | Stejnoseměrný                                       |

# 1 ÚVOD

Neustále rostoucí požadavky na bezpečný a spolehlivý provoz elektrických částí elektráren, transformátoroven, přenosových a distribučních vedení a ostatních elektrických zařízení včetně vlastní spotřeby, kladou zvýšené nároky na elektrické ochrany. Zatím nejsme schopni provozovat elektrické zařízení tak, aby na nich nevznikali poruchy. Přestože projektování, výroba, provoz, i spolehlivost těchto zařízení je vysoká, jsou tato zařízení ohrožována vnitřními a venkovními poruchami.

Na světě existuje několik stovek vynikajících systémů chránění prvků elektrizační soustavy (ES) a několik tisíc druhů autonomních ochran. Systémy chránění, resp. samotné ochrany jsou založeny na různých principech a využívají matematické, genetické a fyzikální modely. Nejpodstatnější vlastností těchto systémů je spolehlivě a bezpečně chránit každý prvek elektrizační soustavy a jejich funkce vychází ze znalostí vztahů mezi vstupními a výstupními veličinami. Následně jejich zpracováním a vysláním informace je možné vyřešit libovolný stav prvků elektrizační soustavy, resp. jejich podsystémů.

Elektrizační soustava zahrnuje prvky na výrobu, transformaci, přenos, rozvod a spotřebu elektrické energie. Z hlediska zabezpečení spolehlivosti provozu je systém chránění důležitou součástí elektrizační soustavy. Elektrická ochrana je jedna ze součástí systému chránění. Úlohou elektrické ochrany je na základě vstupních informací a nastavených parametrů rozhodnout, jestli se jedná o poruchový nebo dovolený provozní stav. Na základě identifikace poruchového stavu uvnitř chráněného objektu musí zajistit její odstranění např. vypnutí, snížení zatížení, odbuzení synchronního stroje apod., resp. musí signalizovat abnormální provozní stav obsluze. Od elektrických ochran se žádá, aby přesně působili ve vymezených zónách tak, aby bezporuchové části elektrizační soustavy zůstali v provozu, resp., aby následky poruch byly eliminovány na co nejmenší míru.

Obecně může dojít v elektrizační soustavě k následujícím poruchovým stavům: zkraty, proudové přetížení, nadpětí, podpětí, nesymetrie proudů a napětí, zemní spojení, špatný tok výkonu, kývání synchronních strojů, asynchronní chod, změna frekvence apod.

## 2 CÍLE PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je seznámení se s poruchovými stavy v elektrizační soustavě. Dále systémy chránění obecně a poté jednotlivými ochranami. Následuje samotný návrh chránění konkrétní zadané malé vodní elektrárny.

### 3 PORUCHOVÉ STAVY

V elektrických soustavách jsou nebezpečné tyto stavy:

**Zkrat** je vzájemné spojení dvou nebo více fází. Způsobuje elektrické poškození dielektrik a izolátorů, tepelná poškození vodičů (tavení) a nakonec i mechanická poškození vlivem zkratových sil. Poněvadž impedance zkratové smyčky je převážně indukční, dochází při zkratu ke zmenšení činného výkonu a tím k odlehčení stroje. Současně klesá napětí. To má za následek zmenšení synchronizačního momentu a ztrátu stability. Zkrat může být způsoben únavou izolace, vlivem počasí, mechanickým poškozením, špatnou manipulací apod.

**Přetížení** je průchod příliš velké energie zařízením. Způsobuje především tepelná poškození. Dále mechanická, a to i na pohonných strojích. Podstatně urychluje stárnutí izolací. Přetížení je nejčastěji způsobeno nedostatkem instalovaného činného elektrického výkonu, který neodpovídá okamžité spotřebě. Důsledkem přetížení bývá obvykle přehřátí objektu nebo jeho části nad dovolenou mez  $v > v_{max}$ . Míra poškození nakonec závisí na teplotě nebo jejím časovém integrálu.

$$I(v) = \int_0^t v(\tau) d\tau \quad (3.1)$$

Ten určuje míru poškození s přihlédnutím k době působení  $t$  zvýšené teploty  $v$ .

**Nadpětí** (zvýšení napětí nad dovolenou mez) způsobuje poškození a stárnutí izolace, přídavné ztráty a zvětšení nebezpečí zkratu. Přepětí může být způsobeno poruchou regulace napětí, překompenzováním nebo kapacitní zátěží.

**Podpětí** má za následek především proudové přetěžování, odebírá-li připojené zařízení konstantní výkon

$$i = \frac{p}{u} \quad (3.2)$$

Při snížení napětí  $u$  dochází ke zvětšení  $i$  a tím i k proudovému přetížení. Podpětí může být způsobeno nedostatečnou kompenzací, přetížením nebo poruchou regulace napětí.

**Snížení kmitočtu** má za následek zvětšení magnetizačních proudů, tím zvětšení ztrát a oteplení.

$$i_m = \frac{u}{2\pi f l_b} \quad (3.3)$$

Snížení kmitočtu nastává přetížením zdrojů energie v síti.

**Zvýšení kmitočtu** působí především mechanicky, a to jak na chráněné zřízení, tak na připojené stroje. Zvýšení kmitočtu bývá způsobeno poruchou regulace výkonu.

**Nesouměrnost proudu** je nebezpečná zvláště u synchronních a asynchronních točivých strojů. Ty jsou konstruovány tak, že pole statoru se otáčí ve stejném smyslu jako rotor. Nesouměrnost proudu statoru je stav, kdy  $i_R \neq a^2 \cdot i_S \neq a \cdot i_T$ , způsobí vznik zpětné složky proudu  $i_2$ . Zpětná složka  $i_2$  vytváří magnetické pole, které se otáčí v opačném smyslu, tj. dvojnásobnou synchronní rychlostí  $2\omega_n$  proti rotoru. Tak vznikají v rotoru přídavné vířivé ztráty a

rotor se může nebezpečně zahřívat. Nesouměrnost proudu může být způsobena přerušením vodičů nebo nesouměrností zátěže.

**Nesouměrnost napětí** má za následek nesouměrnost proudu. Příkladem je chod motoru na dvě fáze. Vlivy, které způsobují nesouměrnost napětí, jsou tytéž jako nesouměrnosti proudu.

**Zemní spojení** je galvanické spojení jedné fáze se zemí v síti, kde je izolovaný nebo kompenzovaný uzel. Je nebezpečné především pro velkou pravděpodobnost následného zkratu. Může být způsobeno stejnými vlivy jako zkrat.

**Zpětný tok výkonu** je porucha nebezpečná pro točivé stroje. Zpětný výkon může poškodit připojené mechanické stroje, tj. přenos energie z generátoru do turbíny, nebo z motoru do sítě. Zpětný tok výkonu je způsoben buď chybnou regulací výkonu, nebo špatnou energetickou bilancí sítě.

**Ztráta buzení** synchronních točivých strojů je zmenšení budícího proudu pod mez statické stability. Má za následek jednak snížení napětí, což ohrožuje stabilitu sítě, jednak asynchronní chod stroje. Při ztrátě buzení stroj s vyniklými póly ztratí synchronismus. To může dále způsobit mechanická i elektrická poškození. Stroj s hladkým rotorem přejde do asynchronního chodu. Velmi nepatrně změní otáčky, neboť velké stroje pracují s malým skluzem. Motor zpomalí, generátor zrychlí. Vznikne stav podobný jako při proudové nesouměrnosti. Točivé pole statoru se neotáčí synchronně s rotorem, vznikají přídavné vířivé ztráty a rotor se otepluje. Ztráta buzení a asynchronní chod může nastat při podpětí a poruchou budících obvodů.

**Ložiskové proudy** působí přídavné oteplení a tím i mechanické poškození ložisek točivých strojů. Vznikají při magnetických nesouměrnostech ve statoru i rotoru stroje.

**Kývání synchronního stroje** se pro distanční (impedanční) ochrany jeví jako cestující zkrat.

## 4 ELEKTRICKÉ OCHRANY

Elektrické ochrany můžeme rozdělit podle více kritérií:

a) Rozdělení podle typu chráněného objektu na ochranu:

- generátoru,
- motoru,
- transformátoru,
- přípojnic,
- vedení,
- kabelu,
- troleje,
- vypínače,
- (lokomotivní)

b) Rozdělení ochrany podle druhu poruchy, kterou mají identifikovat:

- zkratové,
- při přetížení,
- napět'ové,
- při zemním spojení,
- při špatném výkonu,
- při ztracení buzení,
- při nesymetrii (proudů a napětí),
- frekvenční.

c) Podle principu činnosti ochrany dělíme na:

- proudové,
- distanční,
- napět'ové,
- srovnávací,
- wattové,
- jalové,
- reaktanční,
- frekvenční,
- při nesymetrii (nesouměrné zátěži).

d) Podle času působení rozdělujeme elektrické ochrany na:

- okamžitě působící (mžikové),
- časově nezávislé,
- časově závislé.

e) Podle konstrukce rozdělujeme elektrické ochrany na:

- elektromechanické,
- elektronické,
- digitální (číslicové).

U elektrické ochrany hodnotíme objektivnost chránění. Autonomní ochrany (elektromechanické, elektronické) působí správně jen z pohledu jednoho chráněného objektu.

Objektivní ochrany vyhodnocují poruchový stav z pohledu celé elektrizační soustavy nebo její části.

Poruchy vznikají v jednotlivých prvcích elektrizační soustavy zpravidla nahodile. Úkolem ochrany je jejich rychlá likvidace. Musí rozlišit, zda jde o poruchu např. zkrat či přetížení nebo o dovolený provozní stav.

#### 4.1 Základní požadavky na elektrické ochrany

Elektrické ochrany jsou složitá elektrická zařízení, která jsou důležitou součástí elektrizační soustavy. Kladou se na ně následující požadavky:

**Spolehlivost funkce elektrické ochrany** je definována jako schopnost vykonávat operace podle daného algoritmu elektrické ochrany ve stanoveném čase s požadovanými parametry a splnit všechny technické podmínky z pohledu chráněného objektu.

Vysoká spolehlivost funkce chránění může být zabezpečena např.:

- vysokou technickou kvalitou všech komponent (elektrických ochrany, přístrojových transformátorů, zdroje napájení pomocných obvodů ochrany, komunikačních kanálů, vypínačů a jejich mechanismů a všech vnitřních propojení mezi těmito částmi),
- optimální konstrukcí schématu chránění (např. zabezpečení chránění zdvojením ochranných zařízení pro některé důležité části elektrizační soustavy),
- nepřetržitou automatickou kontrolou jednotlivých obvodů a funkčních celků ochrany atd.

**Selektivita** je schopnost elektrické ochrany vypnout pouze poškozenou část elektrizační sítě tak, aby zařízení bez poruchy zůstala nadále nerušeně v provozu. Tato podmínka může být zabezpečena jednou z níže uvedených metod:

- časovým odstupňováním, tzn. elektrická ochrana nejbližší k místu poruchy, působí nejrychleji a všechny ostatní ochrany působí postupně s nastaveným časovým zpožděním. Časové zpoždění je pevně dané anebo čas je daný inverzně ve vztahu k poměru poruchového proudu (aplikováno v nadproudových a imedančních ochranách),
- amplitudové anebo fázové porovnání proudů na obou koncích chráněného úseku (aplikováno v rozdílových a porovnávacích ochranách),
- určení směru toku výkonu během poruchy na obou koncích chráněného úseku (aplikováno ve směrových porovnávacích ochranách a v distančních ochranách s komunikačním kanálem),
- kombinace výše uvedených metod, která vede ke snížení vypínacích časů.

**Rychlost působení elektrické ochrany** je doba zapůsobení elektrické ochrany od identifikace poruchy až po vyslání vypínacího povelu na výkonový vypínač.

Doby působení elektrických ochrany:

- pro elektromechanické ochrany je minimální doba působení 40 až 60 ms,
- pro elektrické ochrany je doba působení od 10 do 60 ms,
- pro digitální ochrany je doba působení 40 až 50 ms. Skutečná hodnota závisí na použitém výpočtovém programu a technickém vybavení ochrany.

Z důvodu spolehlivé identifikace poruchy je tendence zpomalovat činnost ochrany. Doby působení ochrany jsou závislé na jejich konstrukci.

Vypnutí poruchových stavů, např. zkratů, v co nejkratším čase je důležité z následujících důvodů:

- zachování dynamické stability ES,
- zmenšení rozsahu poškození zařízení,
- zkrácení času provozu spotřebičů při sníženém napětí v neporušených částech ES,
- zmenšení nebezpečí úrazu osob nacházejících se v blízkosti poškozených zařízení.

**Citlivost** je definována jako nejmenší hodnota stavové veličiny, při které ochrana spolehlivě působí. Jde o schopnost ochrany reagovat na poruchy i bezvýznamného narušení normálního provozu. Proto je pro zaručení bezpečnosti elektrická ochrana nastavena na nižší hodnotu stavové veličiny, než jaká je hodnota při poruchovém stavu.

Naopak, jsou situace, kdy je požadavek, aby elektrická ochrana zůstala necitlivá, tzn., nezapůsobila, např. při přechodných jevech v elektrizační soustavě anebo při poruchách v těch částech ES, které nejsou v její zóně chránění.

**Přesnost** je dána vztahem:

$$p = \left| \frac{x - x_b}{x_a} \right| \cdot 100 [\%] \quad (4.1)$$

kde,  $p$  – přesnost elektrické ochrany,

$x$  – nastavená citlivost ochrany,

$x_a$  – rozsah možného nastavení ochrany,

$x_b$  – skutečná citlivost ochrany.

## 4.2 Základní členy ochran

Ochrana se skládá z několika základních členů. Elektrická ochrana nemusí obsahovat všechny tyto členy. Jejich počet a druh závisí na druhu ochrany. Základními členy jsou:

1. vstupní člen,
2. rozběhový (popudový) člen,
3. měřicí člen,
4. logický člen,
5. časový člen,
6. koncový člen,
7. napájecí člen.

Vstupní člen

Jmenovité vstupní hodnoty jsou 100 V, 5 A nebo 1 A. Úkolem vstupního členu je převést vstupní veličiny úroveň voltů a miliampérů, pomocí bočníků, děličů a transformátorů. Tím umožňuje miniaturizaci dalších členů ochrany.

Rozběhový člen

Úkolem rozběhového členu je uvedení ochrany do činnosti v případě poruchy. Musí mít co největší citlivost na kontrolovanou veličinu. Předává signál logickému a měřicímu členu.

Měřicí člen

Rozhoduje o poruše v objektu.

Logický člen

Zpracovává signál z rozběhového členu a určuje funkci měřicího členu.

Časový člen

Prodluhuje dobu působení ochrany. Důvodem jeho použití je:

- a) zajištění selektivity,
- b) možné využití akumulace energie v objektu,
- c) vyloučení chybného působení ochrany.

Koncový člen

Je nejčastěji elektromagnetické relé s výkonnými kontakty. Smyslem koncového členu je upravit přicházející signál tak, aby byl schopen předání ovládacím zařízením.

Napájecí člen

Napájí obvody dílčích částí ochran, které pro svoji činnost potřebují pomocný zdroj energie. Napájení těchto obvodů může být realizováno mnoha způsoby:

- a) ochrany bez napájení,
- b) přímé napájení ze staniční baterie,
- c) napájení ze střídavé sítě,
- d) napájení z přístrojových transformátorů,
- e) napájení přes akumulátor.

## 4.3 Druhy ochran

Rozdělení podle konstrukce a použitých prvků, ze kterých jsou vyrobené:

### Elektromechanické ochrany

Jsou vývojově nejstarší analogové ochrany. Konstrukčně jsou řešené pomocí elektromagnetických relé. Elektromechanická ochrana je soubor jistících relé, která spolupracují elektricky a mechanicky. Elektromechanické ochrany jsou řešené tak, že každá z nich vykonává pouze jednu funkci. Podle principu činnosti je dělíme na:

- elektromagnetické,
- jednosměrné,
- elektrodynamické,
- indukční,
- polarizační.

### Elektronické ochrany

Jedná se o analogové ochrany, které pracují na bázi integrovaných obvodů (polovodičové součástky). Elektronické ochrany jsou sestaveny z funkčních jednotek, které samostatně tvoří standardní moduly. Neobsahují žádné pohyblivé části, a proto jsou často nazývány statickými ochranami. V porovnání s elektromechanickými ochranami mají několik výhod:

- kratší operační časy,
- vyšší přesnost,
- lepší přizpůsobení charakteristiky k potřebám chráněných objektů,
- menší požadavky na údržbu,
- umožňují realizaci složitějších algoritmů,
- nižší vlastní spotřebu, protože obsahují pouze minimální počet mechanických částí.

Mají, ale i nevýhody:

- nízká odolnost polovodičových součástek proti indukovaným napětím, které vznikají při poruchách silnoproudých zařízení,
- potřeba tepelné stabilizace elektronických obvodů,
- nutnost napájení.

Vysoká citlivost a rychlost působení elektronické ochrany může mít negativní vliv v případě, když ochrana zapůsobí na rušivé jevy, které se vyskytují v elektrizační soustavě nejen během poruchy, ale i během běžných provozních stavů.

Základní jednotky jsou obvykle následující:

1. vstupní obvod elektronické ochrany představují transformátory TN a TP,
2. operační charakteristiky nastavené v ochraně,
3. časový člen,
4. logická jednotka ochrany,
5. koncové relé,
6. blok signalizace,
7. zdroj stabilizovaného jednosměrného napětí,
8. testovací modul.

Vstupní proměnné (napětí  $u(t)$  a proud  $i(t)$ ) vstupují do vstupní jednotky, která upravuje signály pro proces v elektronických obvodech a zabezpečuje galvanické oddělení vnitřních obvodů ochrany. Upravené signály jsou porovnávány s referenčními hodnotami (blok 2). Pokud jsou hodnoty signálů v oblasti působení ochrany, uvádí se do činnosti časový člen. Logická jednotka (blok 4) během nastaveného času ověřuje, zdali stále platí podmínka pro působení elektronické ochrany. Po uplynutí nastaveného času dává ochrana povel na vypnutí pomocí bloku 5. Činnost ochrany je signalizována obsluze blokem 6. Stabilizovaný zdroj napětí (blok 7) vytváří požadované napětí pro napájení integrovaných obvodů elektronické ochrany. Blok 8 zabezpečuje test funkčnosti ochrany za pomoci interních nebo externích zařízení.

### Digitální ochrany

Hlavním důvodem pro použití mikropočítačů není jen spolehlivé plnění úloh běžně žádaných od klasických ochrany, ale hlavně zdokonalení jejich funkčnosti pro uživatele. Jako např. přesnost, selektivita, komplexnější zpracování vstupních veličin a zvýšení uživatelského komfortu. Velmi důležitou funkcí je automatická kontrola digitální ochrany, což umožňuje prodloužit interval mezi ručně vykonanými revizemi až na roky. Digitální ochrany mohou plnit i další úlohy, čímž přispívají k monitorování, ovládání a řízení provozu elektrizační sítě a jejich prvků v reálném čase.

Společnou nevýhodou elektronických a digitálních ochrany oproti základním elektromechanickým ochranám je potřeba napájení.

## 4.4 Řídící systémy

Během provozu elektrizační soustavy je potřebné vykonávat velký počet funkcí (regulace napětí a frekvence, ovládání a blokování vypínačů, ochrana zařízení nn, vn, vnn, zvn ad.). V konvenčních systémech jsou tyto operace vykonávány individuálními zařízeními a početným personálem. Nové moderní systémy využívají digitální technologie při zachování kompatibility s klasickými zařízeními.

### **Konvenční řídicí systém**

Konvenční vybavení pro řízení, monitorování a chránění v elektrických stanicích obvykle tvoří samostatné statické a elektromechanické zařízení obsahující velké množství podsystémů. Ovládání vypínačů, blokování, signalizace, zaznamenávání poruch, chránění, měření jsou realizovány pomocí navzájem spojených podsystémů.

Nevýhody:

- nižší spolehlivost daná strukturou systému a velkým počtem komponentů,
- větší podíl lidských omylů,
- složitější postup při údržbě a kontrole zařízení.

### **Moderní řídicí systém**

Moderní vybavení elektrických stanic umožňuje plnění těchto základních funkcí:

- řízení elektrické stanice,
- komunikace s vnějším prostředím,
- chránění elektrických zařízení,
- sebemonitorování a sebekontrola.

Výhody:

- nižší cena projektu, instalace i technického vybavení,
- menší prostor potřebný pro stanici,
- nižší provozní náklady,
- zvýšená spolehlivost,
- větší životnost.

## 5 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY

Použití přístrojových transformátorů napětí a proudu umožňuje:

- transformaci jmenovitých napětí a proudů na jednotné normalizované hodnoty ( 100V, 5A nebo 1A ) vhodné k napájení měřících a jistících přístrojů,
- izolují obvody ochrany od obvodů vn a vvn. Tím je zajištěna bezpečnost obsluhy i ochrany,
- umístění ochrany z dosahu silných elektrických a magnetických polí,
- soustředit ochrany v dozornách (přehledné řízení celého objektu).

Podle připojených zařízení na sekundární vinutí přístrojových transformátorů je dělíme na:

- **měřicí**, určené pro měřicí přístroje. Musí být přesné především v pracovní oblasti, která je v okolí jmenovitých hodnot. Rychlost odezvy není vyžadována,
- **jistící**, které jsou určeny pro ochrany. Jistící transformátory musí zajišťovat požadovanou přesnost při velkých nadproudech a nízkých napětích.

### 5.1 Přístrojové transformátory napětí (PTN)

Přístrojové transformátory napětí jsou určeny na napájení měřících a jistících napěťových systémů a regulačních přístrojů. Jejich primární strana je připojena paralelně k obvodu, kde se sleduje velikost napětí. Na sekundární stranu se připojí potřebné, měřicí přístroje.

Podle způsobu transformace se PTN dělí na:

- **indukční** - primární a sekundární vinutí jsou navzájem zpraženy pomocí magnetického obvodu a má převod:

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (5.1)$$

- **kapacitní** – v principu se nejedná o transformátor, ale kapacitní dělič. Skládá se z kapacitního děliče C1, C2, kompenzační tlumivky L a izolačního indukčního transformátoru T. Kapacitní PTN (viz. Obrázek 5.1 [3]) je používán pouze z ekonomických důvodů.

$$p = \frac{U_1}{U_2} = (C_1 + C_2) \cdot \frac{N_1}{N_2 \cdot C_2} \quad (5.2)$$

Podle počtu fází a podle izolace primárního vinutí může být:

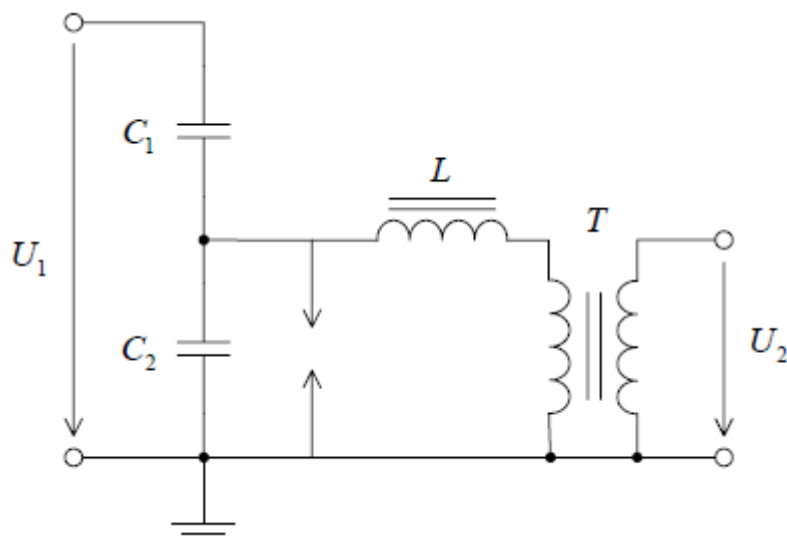
- jednofázový jednopólový izolovaný PTN,
- jednofázový dvoupólový izolovaný PTN,
- trojfázový plně izolovaný PTN,
- trojfázový uzemněný PTN.

Na sekundární straně PTN může být jeden a více výstupů.

Třídy přesnosti PTN, při zatížení v rozsahu 25 až 100% jmenovité zátěže a při jmenovitém účinníku 0,8, jsou 3P a 6P a uvádí je tabulka 5.1 [3].

| Třída přesnosti  | 3P        | 6P        |
|------------------|-----------|-----------|
| Chyba napětí [%] | $\pm 3$   | $\pm 6$   |
| Chyba úhlu [min] | $\pm 120$ | $\pm 240$ |

Tabulka 5.1 Třídy přesnosti PTN



Obrázek 5.1 Kapacitní transformátor

Přístrojové transformátory napětí mají malou rozptylovou reaktanci a jejich provozní oblast se blíží chodu naprázdno. Proto je nebezpečné zkratování sekundárního vinutí. Pro jistění sekundární strany se užívá speciálních rychlých jističů s pomocným kontaktem pro rozpojení obvodů při ztrátě napětí.

### 5.1.1 Napět'ové senzory

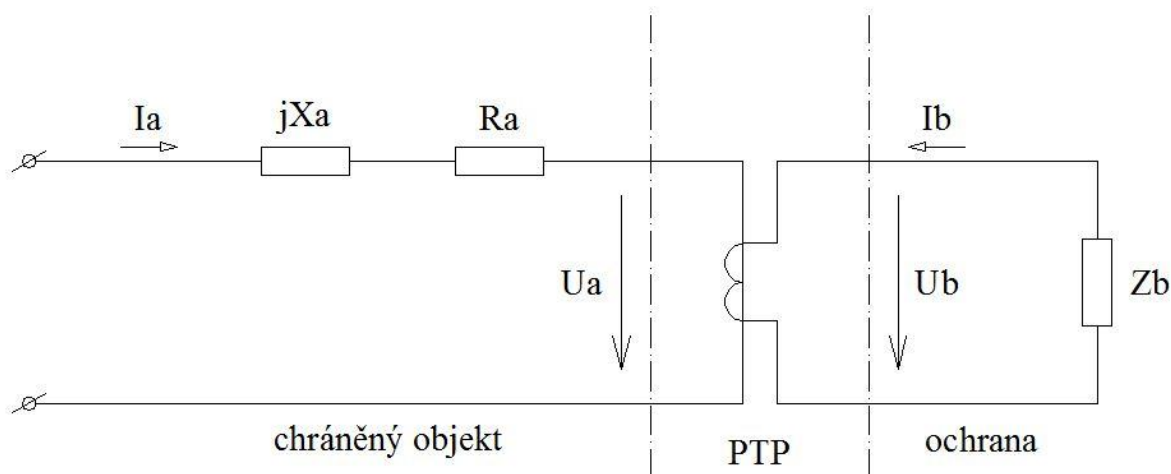
Napět'ový senzor je konstrukčně řešený jako odporový dělič s velmi velkou rezistivitou. Výstupní napětí je úměrné vstupnímu primárnímu napětí v poměrně širokém měřicím rozsahu. Jelikož napět'ový senzor neobsahuje feromagnetické jádro, nemůže dojít k jeho přesycení. Mají malé rozměry a nízkou hmotnost. Vysoká linearita napět'ového převodu umožňuje redukovat typy vyráběných senzorů, protože stejný typ senzoru může být použit pro rozsah několika jmenovitých fází napětí. Frekvenční rozsah měření napět'ového senzoru je několik kHz. Tento frekvenční rozsah je dostačující pro měření kvality elektrické energie. [1]

Výhody napět'ových senzorů oproti PTN: [5]

- daný transformační poměr,
- standardní parametry,
- není třeba pokaždé navrhovat design na dané parametry,
- přesnost je lineární v širokém rozsahu napětí (žádné nasycení),
- přesné pro široký rozsah frekvencí (nemá hysterezní ztráty),
- nízká hmotnost (bez feromagnetického jádra a velkých vinutí),
- velmi nízké ztráty během provozu = úspora energie.

## 5.2 Přístrojové transformátory proudu (PTP)

Přístrojové transformátory proudu jsou stejně jako PTN určeny pro napájení měřících a jistících napěťových systémů a regulačních přístrojů. Jejich primární strana je připojena do série k obvodu, kde se sleduje velikost proudu. Na sekundární stranu se připojí potřebné, měřicí přístroje.



Obrázek 5.2 Přístrojový transformátor proudu

Přístrojový transformátor proudu musí zaručit konstantní poměr primárního a sekundárního vedení. Primární proud PTP je nezávislý na velikosti sekundární zátěže  $Z_b$ . Nesmí nikdy dojít k rozpojení sekundárního proudového obvodu. Pokud by k tomu došlo,  $U_b \rightarrow \infty$ , a to by mohlo ohrozit ochranu, obsluhu i samotný transformátor (viz. Obrázek 5.2).

Třída přesnosti 5Pn nebo 10Pn. Písmeno P (protection - ochrana) značí, že jde o jistící transformátory. Chyby proudu a úhlu PTP nesmí překročit v rozsahu 50 až 100% jmenovité zátěže a při jmenovitém primárním proudu hodnoty, které ukazuje tabulka 5.2 [3], kde „n“ je tzv. nadproudový činitel a bývá obvykle 5,10,15,20,30.

| Třída přesnosti                                   | 5P       | 10P      |
|---------------------------------------------------|----------|----------|
| Chyba proudu při jmenovitém primárním proudu [%]  | $\pm 1$  | $\pm 3$  |
| Chyba úhlu při jmenovitém primárním proudu [min]  | $\pm 60$ | -        |
| Chyba proudu při n násobku jmenovitého proudu [%] | $\pm 5$  | $\pm 10$ |

Tabulka 5.2 Třídy přesnosti PTP

### 5.2.1 Rozdělení PTP

PTP rozdělujeme dle několika hledisek. Podle vyhotovení, počtu primárních a sekundárních vinutí, podle počtu závitů primárního vinutí, podle rozptylové reaktance a tzv. speciální jistící PTP.

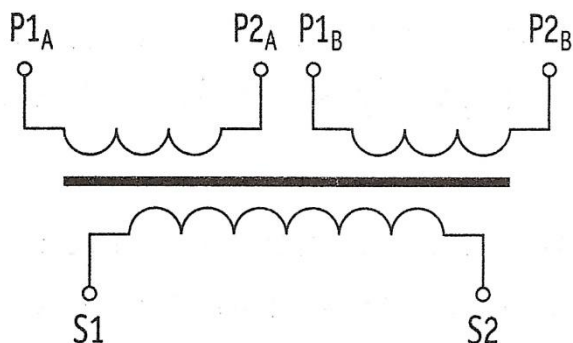
Podle vyhotovení: [1]

- **Podpěrný PTP,**
- **Průchozí PTP,**

- **Průchodkový PTP,**
- **Tyčový PTP,**
- **Násuvný PTP,**
- **Prstencový PTP.**

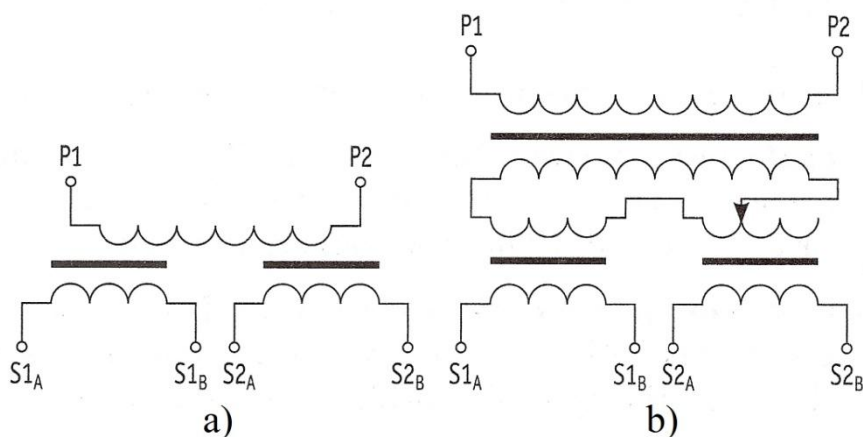
Rozdělení podle počtu primárních a sekundárních vinutí: [1]

- **Sčítací PTP** – má několik vstupních vinutí a jedno sekundární vinutí.



Obrázek 5.3 Sčítací PTP

- **PTP s několika sekundárními vinutími** – může být více jádrový, nebo řešený s pomocnými autotransformatory.



Obrázek 5.4 a) Dvou jádrový PTP, b) PTP s pomocným autotransformatorem

- **Kaskádní PTP**

Rozdělení podle počtu závitů primárního vinutí: [1]

- **Jednozávitový PTP**
- **Vícezávitový PTP**

Rozdělení podle rozptylové reaktance: [1]

- **Nízkoreaktanční PTP**
- **Vysokoreaktanční PTP**

Speciální jistící PTP se dělí: [1]

- **PTP pro distanční ochrany** – PTP pro napájení distančních ochran
- **PTP pro rozdílové ochrany** – PTP s vhodnou nadproudovou charakteristikou (tj. závislost sekundárního proudu na proudu primárním v nadproudové oblasti PTP), pro napájení rozdílových ochran.
- **PTP pro jištění při zemních spojeních** – PTP s charakteristikou vhodnou pro funkci filtru netočivé složky proudu, která slouží na identifikaci zemních poruch.

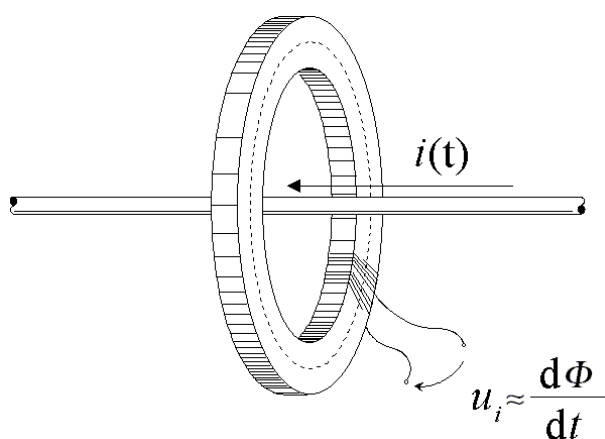
### 5.2.2 Proudové senzory

Proudový senzor se sestává z Rogowského cívky, která je rovnoměrně navinutá bez magnetického jádra. Proudový senzor se skládá z toroidního vinutí a proudového vodiče procházejícího středem toroidu. [1]

Jelikož proudový senzor neobsahuje feromagnetické jádro, nemůže dojít k jeho přesycení stejně jako u napěťových senzorů. Takovýto proudový senzor má velký dynamický rozsah a garantovanou vysokou linearitu proudu na výstupu v širokém frekvenčním pásmu, řádově až několik MHz. Protože v proudovém senzoru nedochází k nelineárním jevům, může být použitý na měření proudů od několika ampérů do stovek kiloampérů. Nejnížší a nejvyšší hodnota je převážně závislá na měřicí elektronice, která je součástí digitální ochrany. [1]

Výhody proudových senzorů oproti PTP: [5]

- vždy pouze 1 jádro,
- standardní parametry,
- není třeba pokaždé navrhovat design RC na dané parametry,
- široký dynamický proudový rozsah,
- přesnost je lineární v širokém rozsahu proudu (žádné nasycení),
- přesné pro široký rozsah frekvencí (nemá hysterezní ztráty),
- nízká hmotnost (bez feromagnetického jádra a velkých vinutí),
- velmi nízké ztráty během provozu = úspora energie.



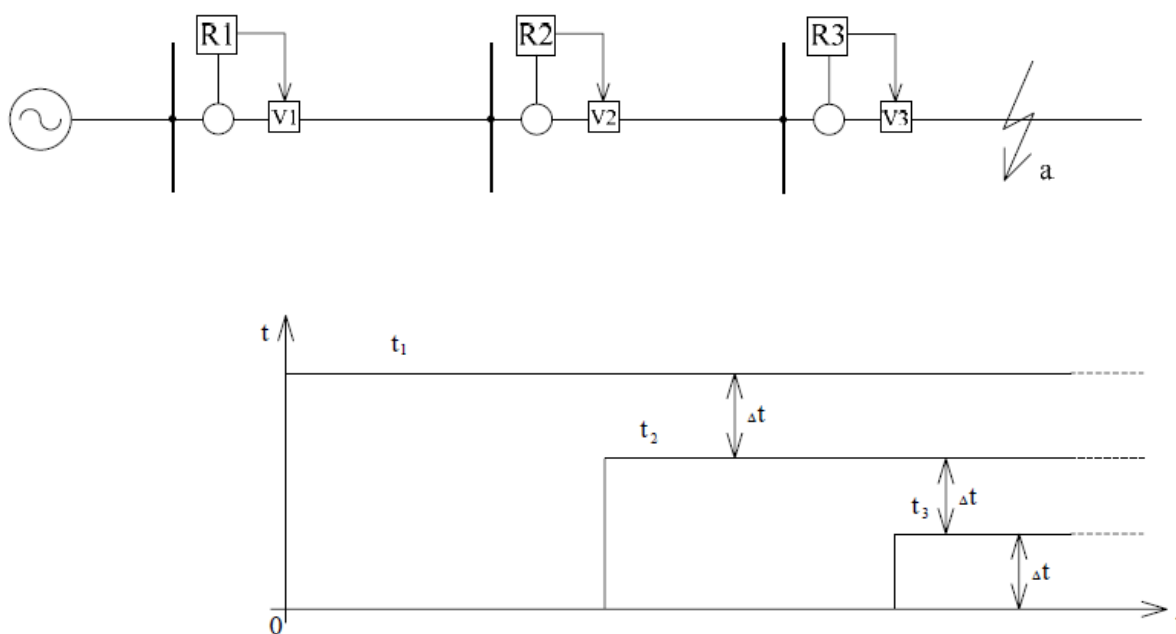
Obrázek 5.5 Rogowského cívka

## 6 OCHRANY VEDENÍ

Ochrany vedení dělíme do dvou základních skupin:

### a) Ochrany stupňovité

Patří sem všechny ochrany, které pro získání selektivního působení a vzájemného zálohování potřebují časové zpoždění, vhodně odstupňované. Obsahují tedy vstupní popudový člen (nadproudový anebo impedanční) a časový člen, které po případě s členem měřicím a směrovým stanoví, má-li se vedení odpojit a v jakém čase. Při zkratu na vedení se uvede do chodu celá řada ochran ležících mezi zdrojem a místem zkratu. Musí vypnout ten vypínač, který je nejbližší místu zkratu. Na obrázku 6.1 [3] je příklad časového nastavení stupňové nadproudové ochrany. Pokud nastane v místě *a* zkrat, vzniklým nadproudem se rozběhnou ochrany *R1, R2, R3*. Podle vypínacího plánu, podle kterého jsou ochrany nastaveny, dá ochrana *R3* impuls v čase  $t_3$  k vypnutí vypínače *V3*, který je nejbližší zkratu. Vzdálenější ochrany místa zkratu mají nastaven čas delší, lišící se o jistou hodnotu  $\Delta t$  (koordinační časový interval), zajišťující selektivní působení ochran. Selže-li vypínač či ochrana, která měla zkrat odpojit (v tomto případě ochrana *R3* či vypínač *V3*), převezme vypínání nejbližší sousední ochrana (*R2* a vypínač *V2*). Jako záložní ochrana působí v delším čase. Takto nastaveným časovým odstupňováním je zajištěna selektivita vypínání poruch a zálohování ochran.



Obrázek 6.1 Příklad časového nastavení nadproudových ochran

Ke stupňovitým ochranám patří nadproudové a distanční ochrany.

### b) Ochrany srovnávací

Ochrany srovnávací pracující na principu srovnání daných fyzikálních veličin na vstupu a výstupu chráněného objektu (fázory proudů, výkon, fázový posun mezi proudy). U těchto ochran se srovnávají měřené veličiny mezi dvěma místy, obvykle na začátku a na konci chráněného objektu (vedení, transformátor, generátor apod.). Aby si srovnávací (rozdílová) relé mohly porovnat oba údaje mezi vstupem a výstupem, musí být obě místa spojena pomocným vedením. Je-li chráněný objekt uvnitř bez poruchy, jsou hodnoty srovnávaných veličin stejné a není důvod

k vypnutí. Při vyhodnocení rozdílu porovnávaných hodnot vyhodnocuje tato ochrana, zda jde o poruchu uvnitř chráněného objektu. A při vnitřní poruše dává impuls k vypnutí. Vypnutí bývá provedeno okamžitě, či s předem nastaveným zpožděním. Srovnávací ochrany se starají pouze o svůj chráněný objekt, a proto nepotřebují časové přizpůsobení dalším ochranám. Ochrany srovnávací patří do kategorie základních rychlých ochran.

Pro případ závady na srovnávací ochraně a spojovacím vedení, je nutno ji doplnit záložní ochranou, např. ochranu nadproudovou či distanční.

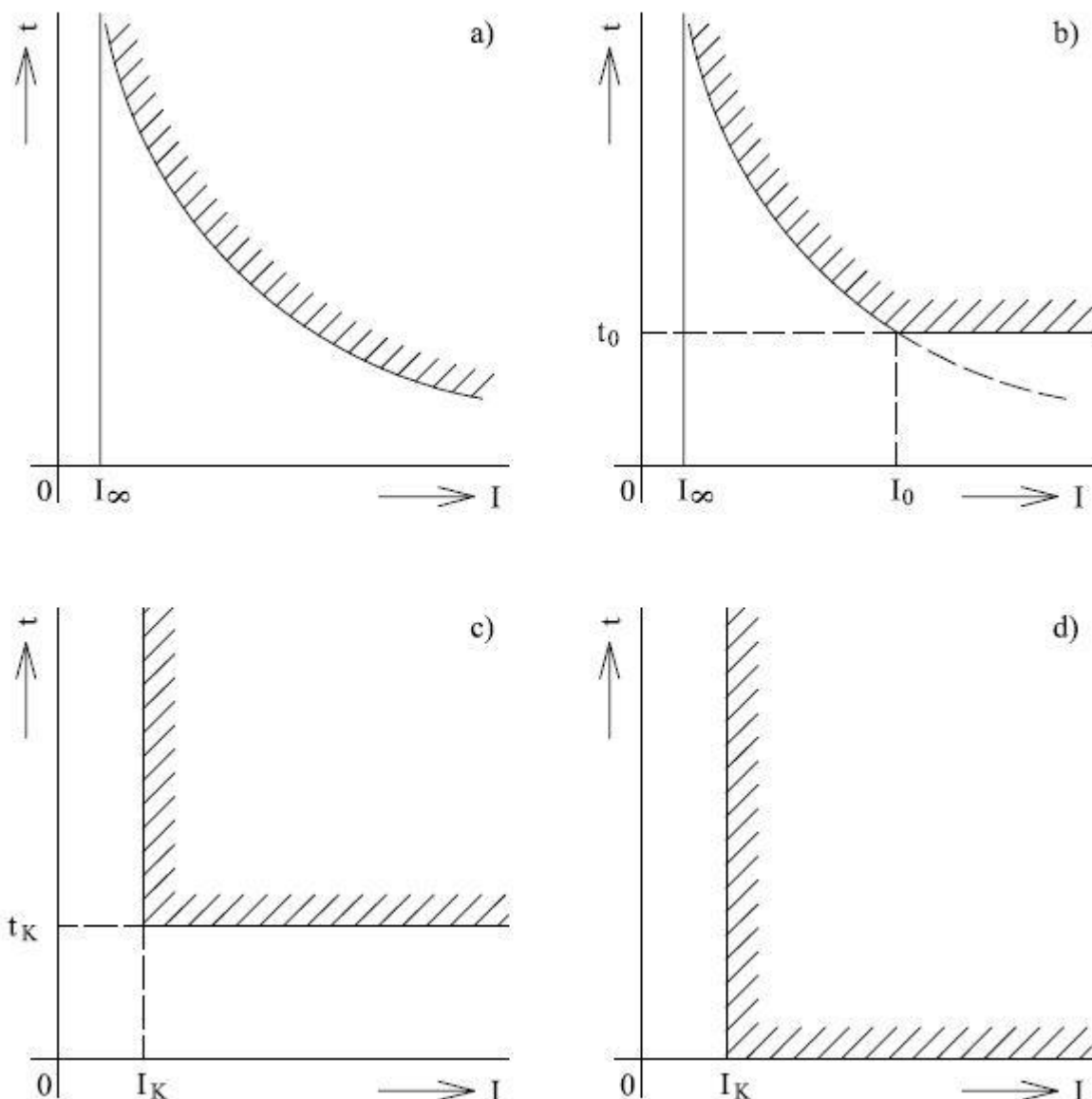
## 6.1 Ochrany nadproudové

Nadproudové ochrany jsou používány především pro svou jednoduchost a projektují se u méně důležitých vedení, případně jako záložní ochrany. Princip působení je odvozen od zvýšeného proudu při přetížení nebo zkratu. Z hlediska rychlosti působení, v závislosti na nadproudu a času, rozeznáváme několik typických charakteristik:

- a) **časově závislá**, kterou lze popsat rovnicí:

$$t = \frac{K}{(I - I_{\infty})} \text{ pro } I > I_{\infty} \text{ a } t = \infty \text{ pro } I \leq \infty, \quad (5.1)$$

- b) **polozávislá**, která má charakteristiku působení definovanu stejně jako závislá ochrana pouze do velikosti  $I_0$ . Pro větší proudy  $I > I_0$  má konstantní dobu působení. Působí tedy podobně jako časově nezávislá nadproudová ochrana,
- c) **časově nezávislá nadproudová ochrana**, která působí, v pevně nastaveném čase  $t_k$  při dosažení proudu  $I_k$ . Při proudu  $I > I_k$  je doba působení konstantní a nezávisí na velikosti proudu  $I$ ,
- d) **mžiková nadproudová ochrana** působí při překročení nastaveného proudu  $I_k$  prakticky bez zpoždění. Zpoždění je dáno vlastním časem ochrany, který bývá u moderních ochran do 10 ms.



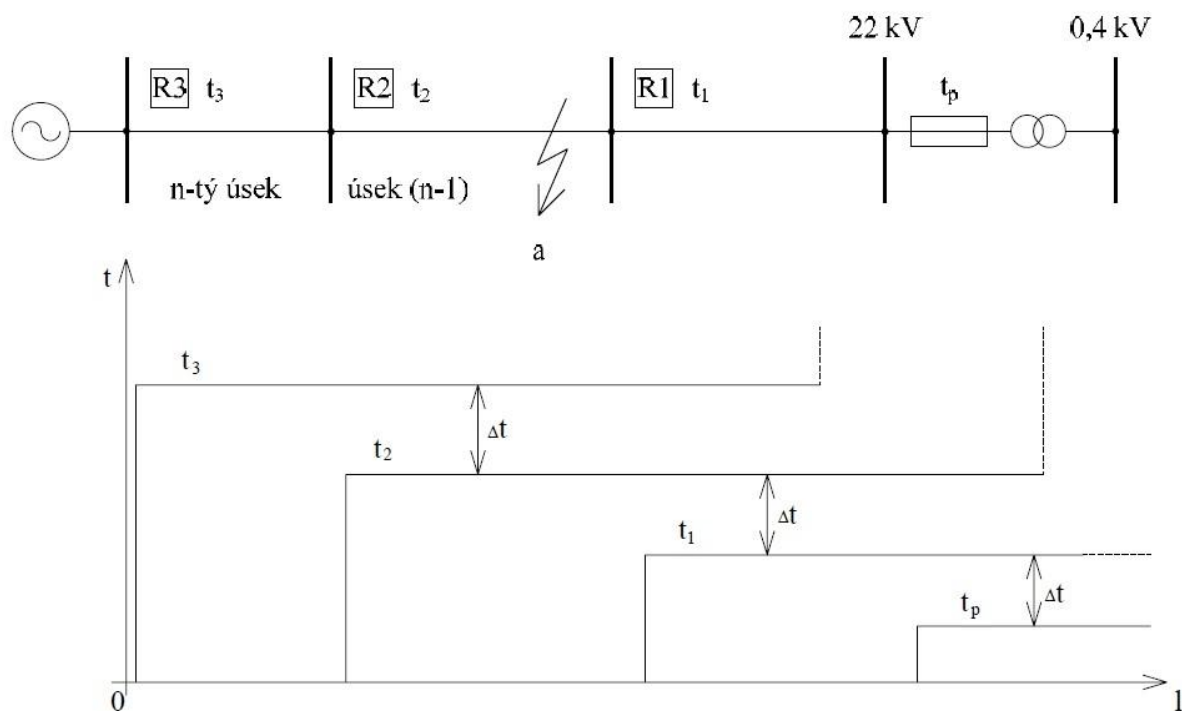
Obrázek 6.2 Charakteristiky nadproudových ochran

### 6.1.1 Časově nezávislé nadproudové ochrany

Nezávislé nadproudové ochrany jsou nejčastěji používány v radiálních sítích vn, kde je řada úseků vedení spojena v sérii. Ochrana ležící nejdále od zdroje má nařízen nejkratší čas  $t_1$ . Nicméně musí být tak dlouhý, aby v další části rozvodné sítě např. nn nepůsobily pojistky a přitom ochrana  $R1$  nepůsobila (viz. Obrázek 6.3 [3]). Ochranu ležící blíže ke zdroji (relé  $R2$ ) je nařízena na čas  $t_2 = t_1 + \Delta t$  a obdobně ochrana  $R3$  je nařízena na čas  $t_3 = t_2 + \Delta t$  atd. Koordinační časový interval  $\Delta t$  závisí na provedení časového relé a vypínače a v praxi bývá 0,2 až 0,5 s.

Proudové nastavení relé je nutno seřadit tak, aby se ochrany vzájemně zálohovaly. Při časovém odstupňování ochran podle obrázku 6.3. Po vzniku zkratu se současně rozběhne ochrana  $R2$  a  $R3$ . Selektivní vypnutí provádí ochrana  $R2$ , která nejbližší zkratu, v čase  $t_2$ . Teprve při jejím selhání by měla vypnout ochrana  $R3$  v delším čase  $t_3$ .

Nevýhodou časově nezávislých nadproudových ochran je, že zkraty nejbližze zdroji, s největšími zkratovými proudy, jsou vypínány nejpozději. Naopak výhodou je, že vhodným proudovým a časovým nastavením se vzájemně zálohují.



Obrázek 6.3 Vypínací plán nadproudových časově nezávislých ochran

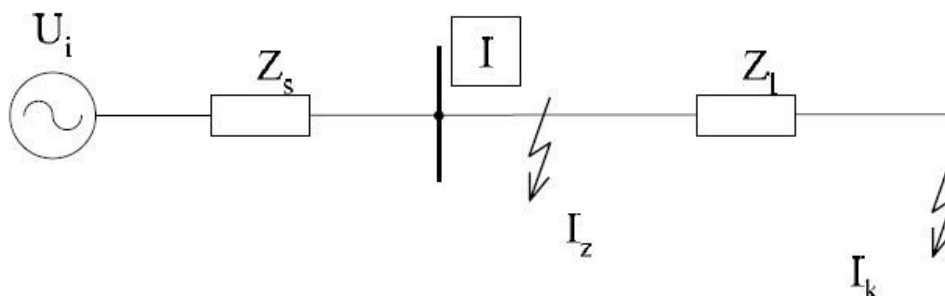
### 6.1.2 Podpět'ové odblokování nadproudových ochran

Selektivitu nadproudových ochran lze zlepšit odblokováním při náběhu podpět'ového relé. Znamená to, že nadproudová ochrana vypíná tehdy, klesne-li napětí v místě jejího připojení pod nastavenou hodnotu. Pokles napětí je závislý na vzdálenosti zkratu.

V praxi je vhodné použití podpět'ového odblokování pro elektricky krátká, silně zatížená vedení (převážně kabelové průmyslové rozvody vn).

### 6.1.3 Časově závislé nadproudové ochrany

Výhoda časově závislé nadproudové ochrany je v tom, že zkracuje dobu vypnutí při zkratu na začátku vedení. Toto platí však pouze tehdy, je-li  $Z_l \geq Z_s$ . V opačném případě, je-li  $Z_l < Z_s$  (impedančně krátké vedení), se poměr  $t_z/t_k$  blíží jedné a použití časově závislé ochrany nemá žádný efekt. (viz. Obrázek 6.4 [3])



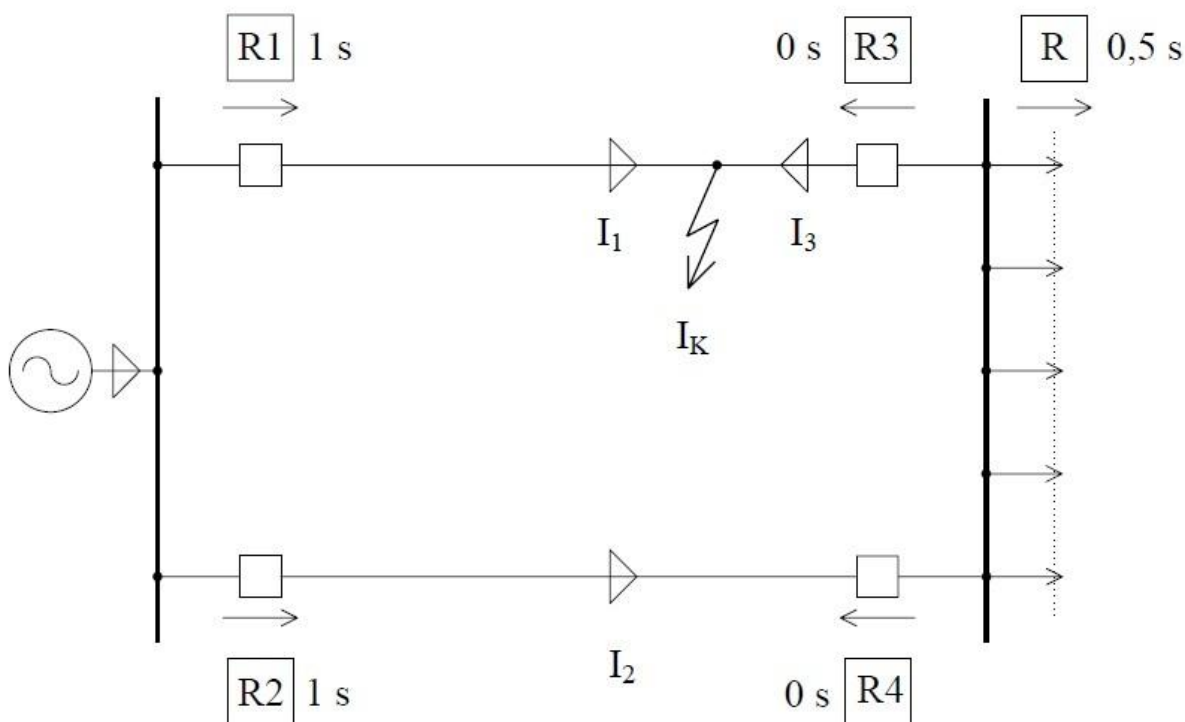
Obrázek 6.4 Chránění radiálního vedení časově závislými nadproudovými ochranami

U časově závislé nadproudové ochrany musíme, stejně jako u časově nezávislé nadproudové ochrany, dodržet časové odstupňování ochran o interval  $\Delta t$ , abychom dosáhli požadované selektivity a vzájemného zálohování ochran.

#### 6.1.4 Směrové nadproudové ochrany

Směrové nadproudové ochrany se používají v sítích, kde místo zkratu může být napájeno ze dvou stran. Pokud by byly nadproudové ochrany pouze na začátcích paralelních vedení (ochrany  $R1$  a  $R2$ ), došlo by při zkratu k vypnutí i neporušeného vedení. Proto doplníme konce paralelních vedení nadproudovými relé  $R3$  a  $R4$  vybavené směrovým článkem. Jde o zvláštní případ distančního členu s přímkovou charakteristikou. Taková ochrana působí pouze v jednom směru zkratového proudu, pokud je zkrat před ochranou. Směrový článek působí a uvolňuje vypnutí, je-li tok zkratového proudu ve směru šipky. Jinak blokuje vypínací impuls od nadproudového článku.

Při vzniku zkratu ochrana  $R3$  vybaví svůj vypínač v čase  $0\text{ s}$ , přičemž působení ochrany  $R4$  je blokováno směrovým článkem. Ochrany  $R2$  a  $R4$  přechází do klidového stavu, neboť z jejich pohledu zkratový proud  $I_2$  zanikl. Zkrat pak definitivně vypne ochrana  $R1$  v čase  $1\text{ s}$ . Zkratem nepostižené vedení zůstává v provozu. (viz. Obrázek 6.5 [3])

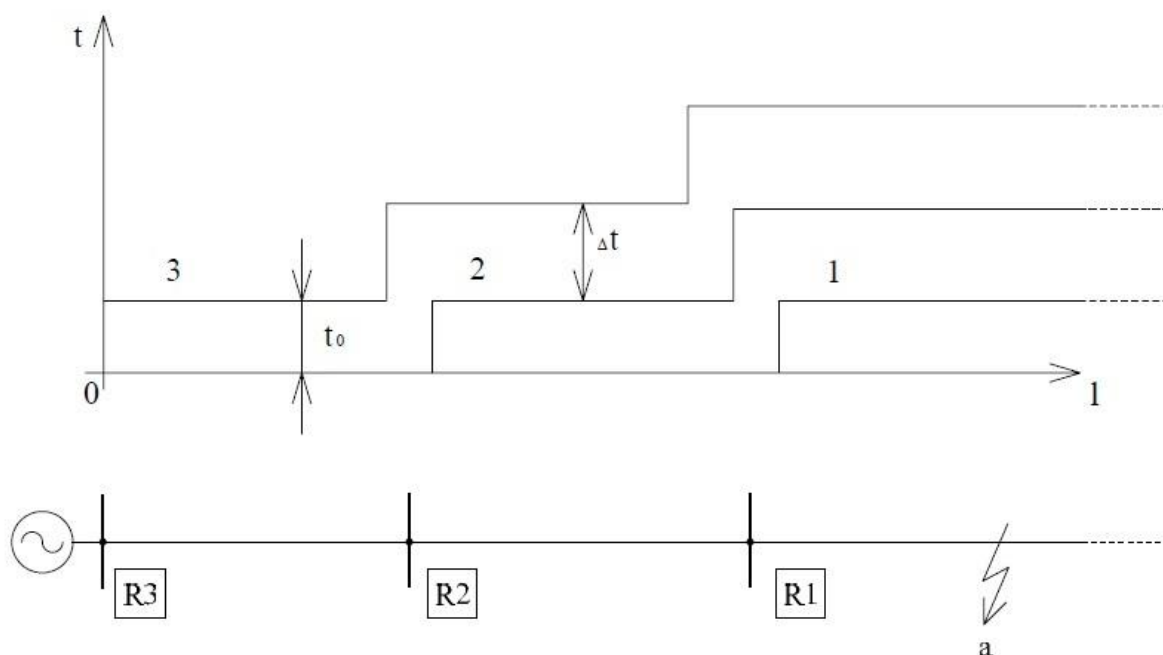


Obrázek 6.5 Ukázka směrové nadproudové ochrany

## 6.2 Distanční (impedanční) ochrany

Patří mezi ochrany stupňovité, které se vzájemně zálohují podobně jako ochrany nadproudové. Jejich princip je založen na tom, že vyhodnocují impedanci (vzdálenost místa poruchy). Vypínací charakteristiku nám ukazuje obrázek 6.6 [3].  $t_0$  určuje vlastní čas působení ochrany a v praxi bývá u moderních ochran 10 až 50 ms.  $\Delta t$  je časový koordinační interval, který se určuje analogicky jako u nadproudových časově nezávislých ochran. Vznikne-li zkrat v místě  $a$ , nabíhají ochrany  $R1$ ,  $R2$ , případně  $R3$ . Ochrana  $R1$  vybaví zkrat v čase  $t_0$ . Při jejím selhání

působí v delším čase ochrana R2, případně R3. Takto se navzájem zálohují. Vypínací časy pro poruchy v chráněných úsecích směrem ke zdroji se neprodlužují jako u nadproudových ochran, což je základní výhoda při použití distančních ochran.



Obrázek 6.6 Vypínací plán distančních ochran

Činnost ochrany je dána funkcí jednotlivých členů kterými je nejčastěji vybavena:

- popudový člen, který zjišťuje, že vznikl v chráněné soustavě zkrat. Popudový člen je impedanční nebo nadproudový,
- měřicí člen, který je realizován jako amplitudový či fázový komparátor nebo číslicově u digitálních ochran,
- směrový člen, který určuje zda zkrat leží ve směru působnosti ochrany,
- časový člen,
- logika která rozhoduje o vypnutí.

Amplitudový komparátor

Schéma ukazuje obrázek 6.7 [3]. Amplitudový komparátor se skládá ze součtového členu, na jehož vstup jsou přivedeny napětí a proud z jisticích transformátorů napětí a proudu. V součtovém členu se pomocí bočníků, předřadných odporů a sčítacích transformátorů vytváří výstupní signály a to řídící  $S_o$

$$S_o = k_1 \cdot U + Z_1 \cdot I \quad (6.2)$$

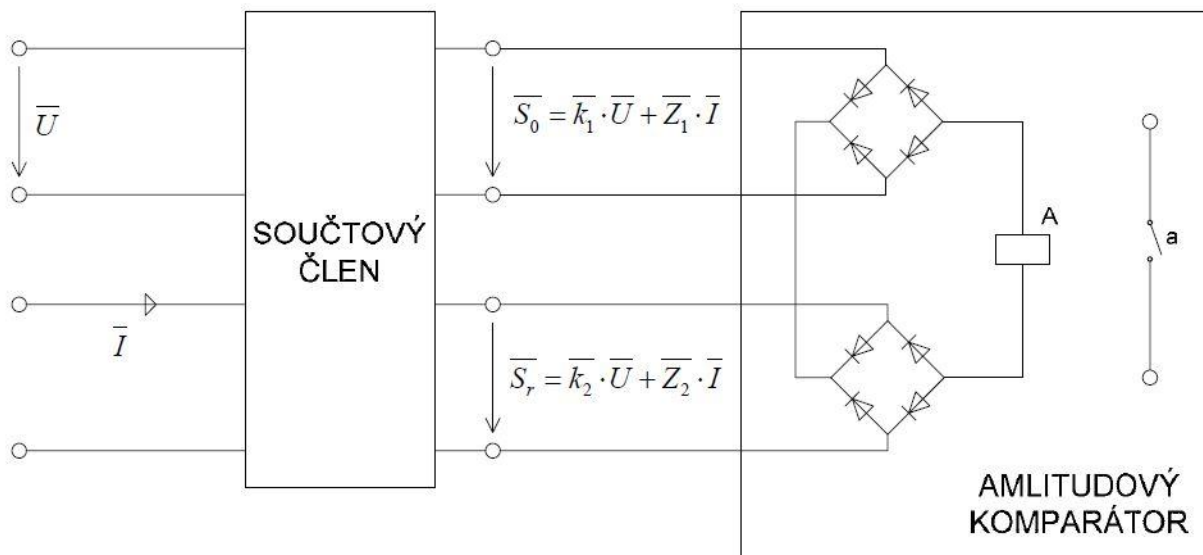
a omezovací signál  $S_r$

$$S_r = k_2 \cdot U + Z_2 \cdot I \quad (6.3)$$

kde  $k_1$  a  $k_2$  jsou převody napěťových transformátorků v součtovém členu.  $Z_1$  a  $Z_2$  jsou impedance zapojené v obvodu proudových transformátorů. Vlastní komparátor pak porovnává po usměrnění absolutní hodnoty signálů  $S_o$  a  $S_r$  a citlivé stejnosměrné relé A působí, je-li:

$$S_o \geq S_r \quad (6.4)$$

Distanční ochrany jsou jedny z nejvíce používaných ochran. Jsou jimi vybaveny vedení vysokého a velmi vysokého napětí a u transformátorů a generátorů velkých výkonů se tato ochrana používá jako záložní.



Obrázek 6.7 Amplitudový komparátor

Hlavními výhodami distančních ochran je:

- poměrně dobrá selektivnost působení,
- malé zpoždění při likvidaci zkratů, což příznivě přispívá k udržení stability chodu elektrizační soustavy,
- vyšší citlivost při zkratech než u nadproudových ochran.

Mezi částečné nevýhody patří:

- složitost ochrany a tím i vysoká cena,
- reagují na kývání a přetížení. Nutno je vybavit závorou proti kývání či vhodnou konstrukcí charakteristik měřících členů,
- možnost chybné činnosti při ztrátě měřeného napětí. Nutno je vybavit dodatečným blokováním při poruše jistícího transformátoru napětí,
- při nastavení dosahu jednotlivých stupňů je přesnost měření částečně ovlivňována příčnými admitancemi vedení.
- potíže při nastavování druhého a dalšího stupně při složitějších zapojeních sítě.

## 7 OCHRANY TRANSFORMÁTORŮ

Poruchy u transformátorů je možno rozdělit na vnitřní a na poruchy způsobené tokem proudu přes transformátor. Vnitřní poruchy můžeme rozdělit do dvou skupin:

- poruchy s možností okamžité detekce,
- poruchy vznikající postupně.

Mezi okamžitě detekovatelné poruchy patří:

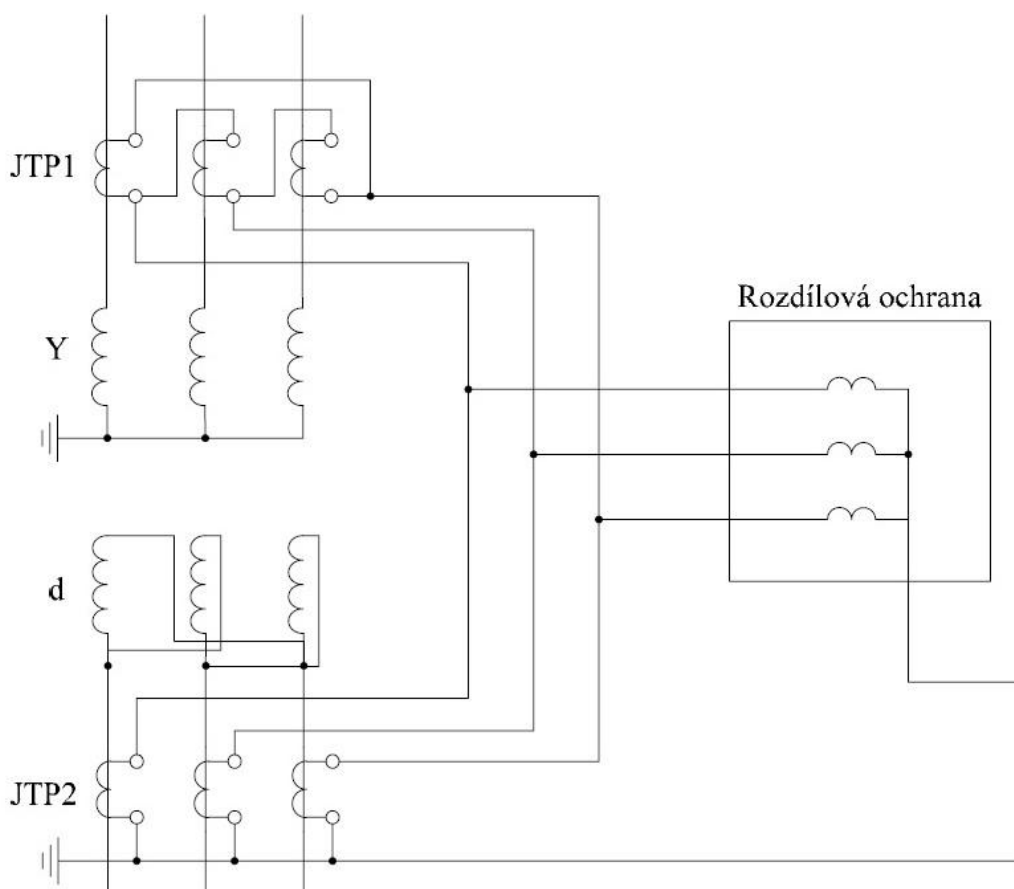
- zkraty na svorkách,
- zkraty na vinutí transformátoru,
- zkraty mezi vinutími,
- zemní poruchy, závitové zkraty terciárních vinutí.

Mezi poruchy vznikající postupně patří:

- špatná izolace,
- poruchy chlazení,
- chybná regulace napětí.

### 7.1 Rozdílová ochrana transformátoru

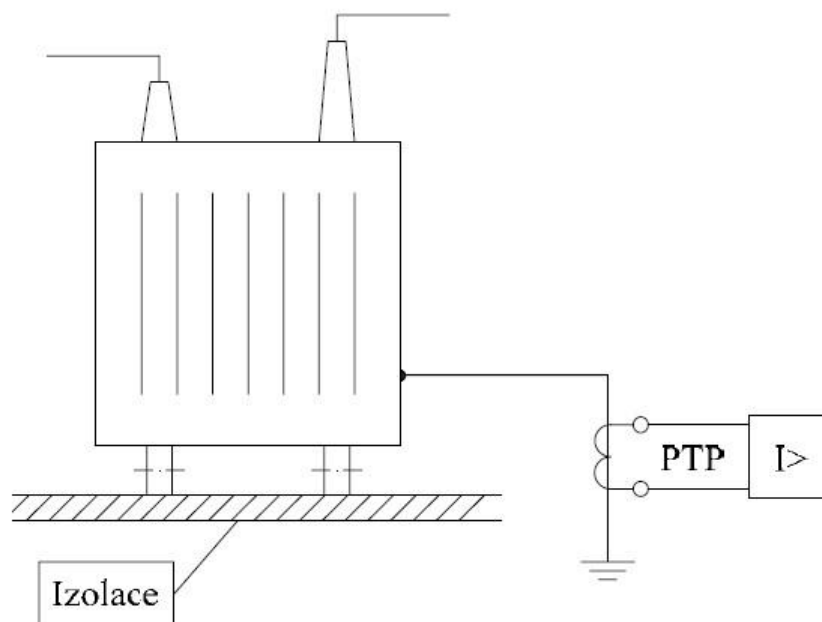
Skupina PTP na jedné straně má stejné spojení stran jako protějšší vinutí stroje. Konfigurace PTP na straně druhé je zrcadlovým obrazem spojení protějšších vinutí stroje. (viz. Obrázek 7.1 [3])



Obrázek 7.1 Rozdílová ochrana dvouvinutového transformátoru v zapojení Yd

## 7.2 Zemní kostrová (nádobová ochrana)

Při zkratu, při které prochází zemní proud kostrou transformátoru nebo přeskočků na průchodkách, ochrana působí. Aby ochrana chybně nepůsobila na zkraty v pomocných obvodech, musí všechny kabely pomocných obvodů (ventilátor, osvětlení, regulace) procházet přes průvlekový PTP. (viz. Obrázek 7.2 [3])



Obrázek 7.1 Zemní kostrová ochrana

## 8 OCHRANA GENERÁTORU

Na výkon od 1MVA do 5MVA je potřeba použít ochrany:

### **Rozdílová**

### **Zkratová nadproudová**

### **Zemní ochrana rotoru**

Skládá se z transformátoru, dvou kondenzátorů a střídavého proudového relé, které detekuje poruchu. Vznikem zemního spojení se uzavře obvod pomocného střídavého proudu přes zem, na které proudové relé nabíhá a signalizuje vznik zemního spojení v rotoru. První zemní spojení se pouze signalizuje. Značné škody by mohly vzniknout až při druhém zemním spojení, proti kterému slouží jako záloha ochrana proti ztrátě buzení.

### **Při přetížení**

Využívá se nadproudová ochrana závislá nebo nezávislá podle velikosti výkonu generátoru.

### **Při nadpětí**

Dále se doporučuje použít následující ochrany:

### **Při nesouměrnosti**

Za normálního provozu jsou proudy a napětí symetrické. Při nesymetrickém zatížení, kdy se liší proudy jednotlivých fází, se nejčastěji používá ochrana pracující na principu vyhodnocení velikosti zpětné složky proudu statoru a doby působení. Ochrana při nesymetrickém zatížení generátoru působí jako záloha ostatních zkratových ochran, protože reaguje na všechny nesymetrické zkraty. Generátor není potřeba odstavit, protože porucha není v něm.

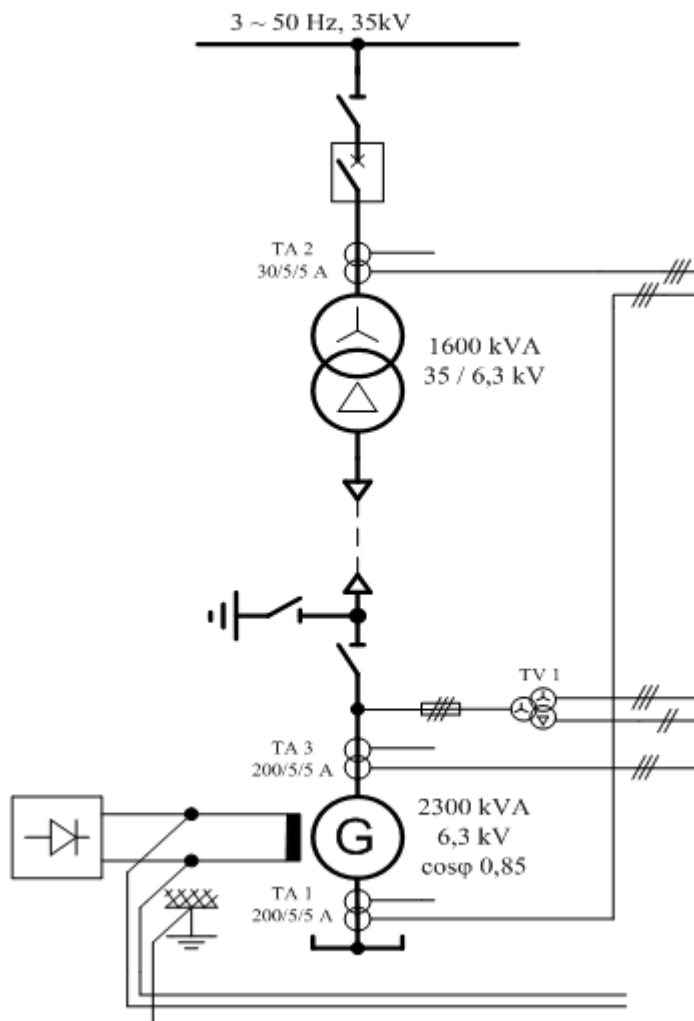
### **Při ztrátě buzení**

Při ztrátě buzení generátoru se používá impedanční ochrana. Pro kontrolu stability se ochrana připojuje k PTP v uzlu a PTN umístěných na svorkách generátoru. Ochrana při ztrátě buzení hydrogenerátoru ihned odstavuje generátor z provozu, aby nepřešel do asynchronního chodu, kde by proudy mohly dosáhnout až hodnot trojfázového zkratu na svorkách generátoru. [2] [7]

## 9 NÁVRH CHRÁNĚNÍ

K vlastnímu chránění malé vodní elektrárny bude využito proudových a napěťových transformátorů, jejichž výstupní signál bude veden do terminálů, které poté vybaví příslušnou ochranu.

### 9.1 Zadané parametry



Obrázek 9.1 Schéma malé vodní elektrárny

#### Parametry jednotlivých komponentů elektrárny:

##### Generátor:

$$S_{gn} = 2,3 \text{ MVA}$$

$$U_{gn} = 6,3 \text{ kV}$$

$$\cos \varphi = 0,85$$

$$I_{gn} = 211 \text{ A}$$

$$X_d'' = 16 \%$$

**Transformátor:**

Olejový distribuční transformátor podle DIN/IEC v hermetickém provedení, pro venkovní a vnitřní instalaci, max. teplota okolí + 40°C, max. instalační výška nad mořem 1000 m, kusové zkoušky dle IEC 76, rázové napětí 190 kV, olej Addinol TRF-H, materiál VN a NN měď.

|                          |                             |
|--------------------------|-----------------------------|
| Typ                      | DOT 1600/30                 |
| Výkon                    | 1600 kVA                    |
| Primár                   | 35 kV $\pm 2 \times 2,5 \%$ |
| Sekundár                 | 6300 kV                     |
| Vinutí                   | Cu                          |
| Frekvence                | 50 Hz                       |
| Skupina zapojení         | YNd1                        |
| Napětí nakrátko          | 6%                          |
| Ztráty naprázdno         | 2200 W                      |
| Ztráty nakrátko při 75°C | 17000 W                     |
| Rozměry (dxšxv)          | 2100x1240x1900              |
| Hmotnost celkem          | 3960 kg                     |
| Hmotnost oleje           | 1000 kg                     |

**Kabel:**

35AXEKCXY 120 mm<sup>2</sup> - 50 m, způsob uložení .

**Převody transformátorů proudu:**

$$\text{TA1 (6,3 kV)} \quad 200/5 \text{ A} \quad , \quad p_i = \frac{200}{5} = 40$$

$$\text{TA2 (35 kV)} \quad 30/5 \text{ A} \quad , \quad p_{ic} = \frac{30}{5} = 6$$

$$\text{TA3 (6,3 kV)} \quad 200/5 \text{ A} \quad , \quad p_{ia} = \frac{200}{5} = 40$$

**Převod transformátoru napětí:**

$$\text{TV1} \quad 6000/100 \text{ V} \quad , \quad p_u = \frac{6000}{100} = 60$$

**Napájecí síť**

$$S_{ks}^{3p} = 61 \text{ MVA}$$

**9.2 Výpočet zkratových poměrů**

Hodnoty zkratových proudů potřebujeme znát z důvodu dimenzování jednotlivých prvků obvodu a nastavení parametrů jednotlivých ochran.

Výpočty reaktancí jednotlivých částí elektrárny:

$$X_G = x_d'' \cdot \frac{U_{gn}^2}{S_{gn}} = 0,16 \cdot \frac{6300^2}{2300000} = 2,761 \Omega \quad (9.1)$$

$$X_T = u_k \cdot \frac{U_T^2}{S_{nT}} = 0,06 \cdot \frac{6300^2}{1600000} = 1,488\Omega \quad (9.2)$$

$$X_S = \frac{c \cdot U_{gn}^2}{S_{Kg}} = \frac{1 \cdot 6300^2}{61000000} = 0,651\Omega \quad (9.3)$$

$X_K = 0,01265\Omega$  z katalogu

$X_G$  Reaktance generátoru

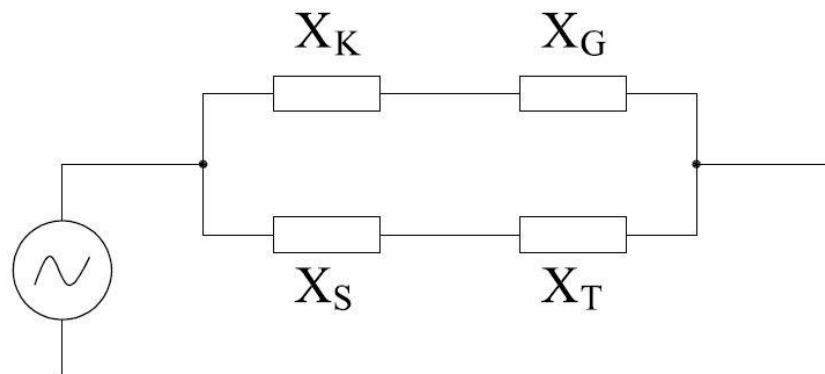
$X_T$  Reaktance transformátoru

$X_S$  Reaktance sítě

$X_K$  Reaktance kabelu

### 9.2.1 Velikosti zkratových proudů při generátoru připojeném k síti

Zkrat v místě TA4



Obrázek 9.2 Zkrat v místě TA4

3. fázový zkrat

$$X = \frac{(X_K + X_G) \cdot (X_S + X_T)}{X_K + X_G + X_S + X_T} = \frac{(0,01265 + 2,761) \cdot (0,651 + 1,488)}{0,01265 + 2,761 + 0,651 + 1,488} = 1,208\Omega \quad (9.4)$$

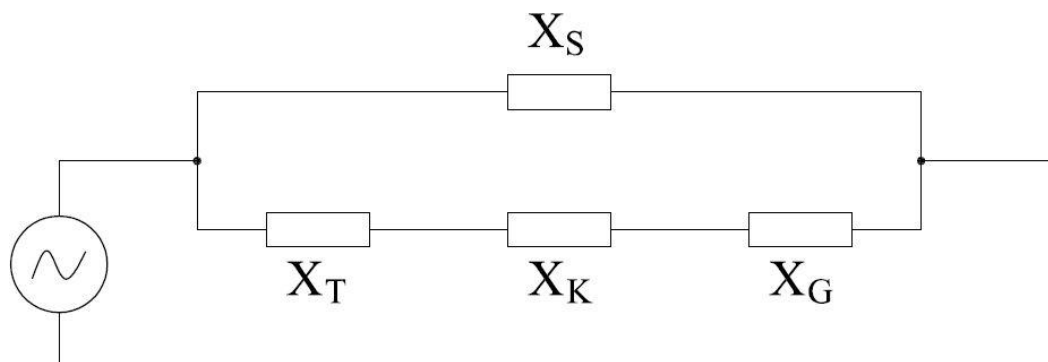
$$I_k = \frac{c \cdot U_{gn}}{\sqrt{3} \cdot X} = \frac{1 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot 1,208} = 3011,015A \quad (9.5)$$

2. fázový zkrat

$$X = 2 \cdot \frac{(X_K + X_G) \cdot (X_S + X_T)}{X_K + X_G + X_S + X_T} = 2 \cdot \frac{(0,01265 + 2,761) \cdot (0,651 + 1,488)}{0,01265 + 2,761 + 0,651 + 1,488} = 2,416\Omega \quad (9.6)$$

$$I_k = \frac{c \cdot U_{gn}}{X} = \frac{1 \cdot 6300}{2,416} = 2607,616A \quad (9.7)$$

Zkrat v místě TA2



Obrázek 9.3 Zkrat v místě TA2

3. fázový zkrat

$$X = \frac{X_S \cdot (X_T + X_K + X_G)}{X_K + X_G + X_S + X_T} = \frac{0,651 \cdot (1,488 + 0,01265 + 2,761)}{0,01265 + 2,761 + 0,651 + 1,488} = 0,565\Omega \quad (9.8)$$

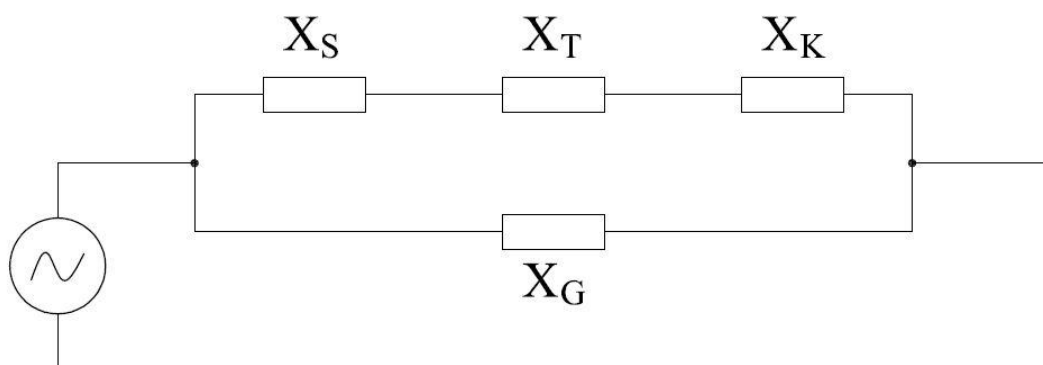
$$I_k = \frac{c \cdot U_{gn}}{\sqrt{3} \cdot X} = \frac{1 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot 0,565} = 2055,078A \quad (9.9)$$

2. fázový zkrat

$$X = 2 \cdot \frac{X_S \cdot (X_T + X_K + X_G)}{X_K + X_G + X_S + X_T} = 2 \cdot \frac{0,651 \cdot (1,488 + 0,01265 + 2,761)}{0,01265 + 2,761 + 0,651 + 1,488} = 1,13\Omega \quad (9.10)$$

$$I_k = \frac{c \cdot U_{gn}}{X} = \frac{1 \cdot 6300}{1,13} = 5575,221A \quad (9.11)$$

Zkrat v místě TA3



Obrázek 9.4 Zkrat v místě TA3

3. fázový zkrat

$$X = \frac{(X_S + X_T + X_K) \cdot X_G}{X_K + X_G + X_S + X_T} = \frac{(0,651 + 1,488 + 0,01265) \cdot 2,761}{0,01265 + 2,761 + 0,651 + 1,488} = 1,209\Omega \quad (9.12)$$

$$I_k = \frac{c \cdot U_{gn}}{\sqrt{3} \cdot X} = \frac{1 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot 1,209} = 3008,525A \quad (9.13)$$

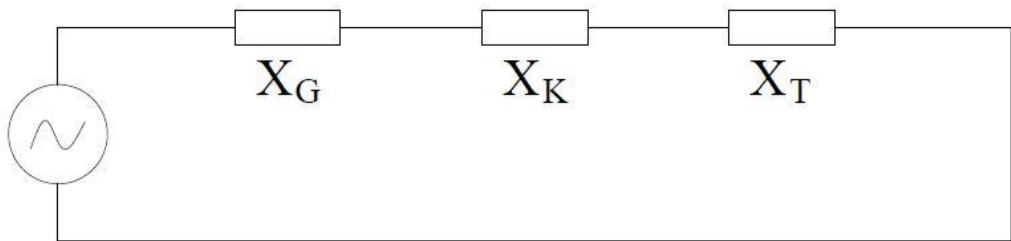
2. fázový zkrat

$$X = 2 \cdot \frac{(X_S + X_T + X_K) \cdot X_G}{X_K + X_G + X_S + X_T} = 2 \cdot \frac{(0,651 + 1,488 + 0,01265) \cdot 2,761}{0,01265 + 2,761 + 0,651 + 1,488} = 2,418\Omega \quad (9.14)$$

$$I_k = \frac{c \cdot U_{gn}}{X} = \frac{1 \cdot 6300}{2,418} = 2605,459A \quad (9.15)$$

### 9.2.2 Velikosti zkratových proudů při generátoru odpojeném od sítě

Zkrat v místě TA2



Obrázek 9.5 Zkrat v místě TA2

3. fázový zkrat

$$X = (X_K + X_G + X_T) = (0,01265 + 2,761 + 1,488) = 4,262\Omega \quad (9.16)$$

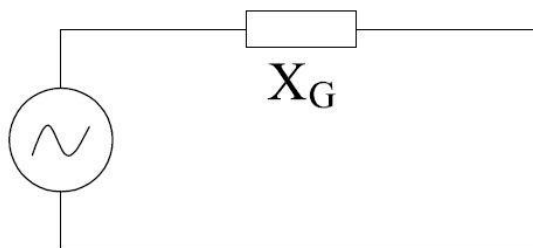
$$I_k = \frac{c \cdot U_{gn}}{\sqrt{3} \cdot X} = \frac{1 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot 4,262} = 853,427A \quad (9.17)$$

2. fázový zkrat

$$X = 2 \cdot (X_K + X_G + X_T) = 2 \cdot (0,01265 + 2,761 + 1,488) = 8,523\Omega \quad (9.18)$$

$$I_k = \frac{c \cdot U_{gn}}{X} = \frac{1 \cdot 6300}{8,523} = 739,176A \quad (9.19)$$

Zkrat v místě TA3



Obrázek 9.6 Zkrat v místě TA3

3. fázový zkrat

$$X = X_G = 2,761\Omega \quad (9.20)$$

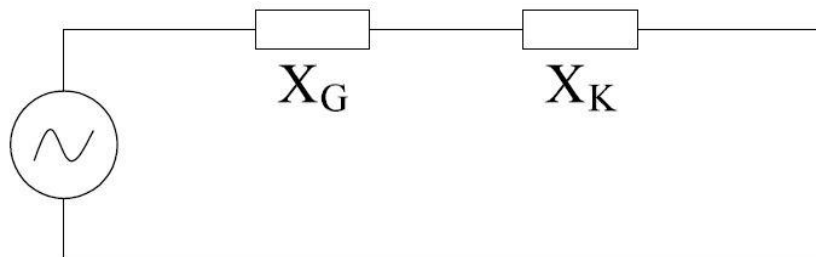
$$I_k = \frac{c \cdot U_{gn}}{\sqrt{3} \cdot X} = \frac{1 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot 2,761} = 1317,387A \quad (9.21)$$

2. fázový zkrat

$$X = 2 \cdot X_G = 2 \cdot 2,761 = 5,522\Omega \quad (9.22)$$

$$I_k = \frac{c \cdot U_{gn}}{X} = \frac{1 \cdot 6300}{5,522} = 1140,890A \quad (9.23)$$

Zkrat v místě TA4



Obrázek 9.7 Zkrat v místě TA4

3. fázový zkrat

$$X = X_G + X_K = 2,761 + 0,01265 = 2,774\Omega \quad (9.24)$$

$$I_k = \frac{c \cdot U_{gn}}{\sqrt{3} \cdot X} = \frac{1 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot 2,774} = 1311,214A \quad (9.25)$$

2. fázový zkrat

$$X = 2 \cdot (X_G + X_K) = 2 \cdot (2,761 + 0,01265) = 5,547\Omega \quad (9.26)$$

$$I_k = \frac{c \cdot U_{gn}}{X} = \frac{1 \cdot 6300}{5,547} = 1135,749A \quad (9.27)$$

## 9.3 Výběr terminálu

Jako terminál chránění byl vybrán terminál REF 542plus do firmy ABB, který spojuje v jedné jednotce soubor všech funkcí, které jsou určeny pro rozvodny nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí, a to chránění, řízení a ovládání, měření, monitorování, diagnostiku a komunikaci. Má v sobě integrováno množství ochranných funkcí, např.:

- Proudové ochrany (nadproudová ochrana, zemní)
- Napěťové ochrany (ochrana proti přepětí, podpětí)
- Ochrany vedení (distanční, vzdálenostní)
- Diferenciální ochrany
- Tepelné ochrany
- Specifické funkce a ochrany motoru (např. čítač počtů rozběhů motoru)
- Funkce a ochrany zajištění kvality elektrické energie (regulátor účinníku)

Terminál REF 542plus se skládá ze dvou hlavních částí (viz. Obrázek 9.8 [6]):

- Základní jednotka
- Jednotka pro místní ovládání HMI

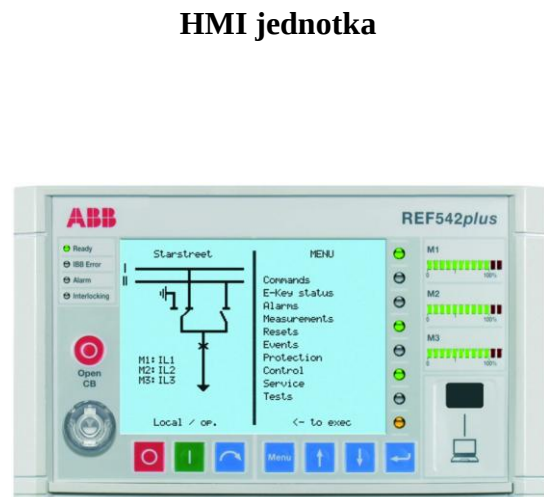
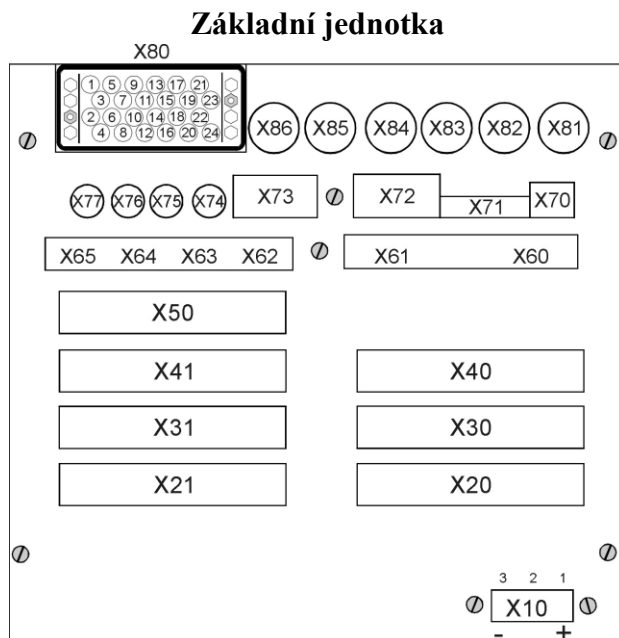
### Základní jednotka

Základní jednotka REF 542plus je mikroprocesorové zařízení, složené z několika vyjímatelných modulů, které pracuje v reálném čase.

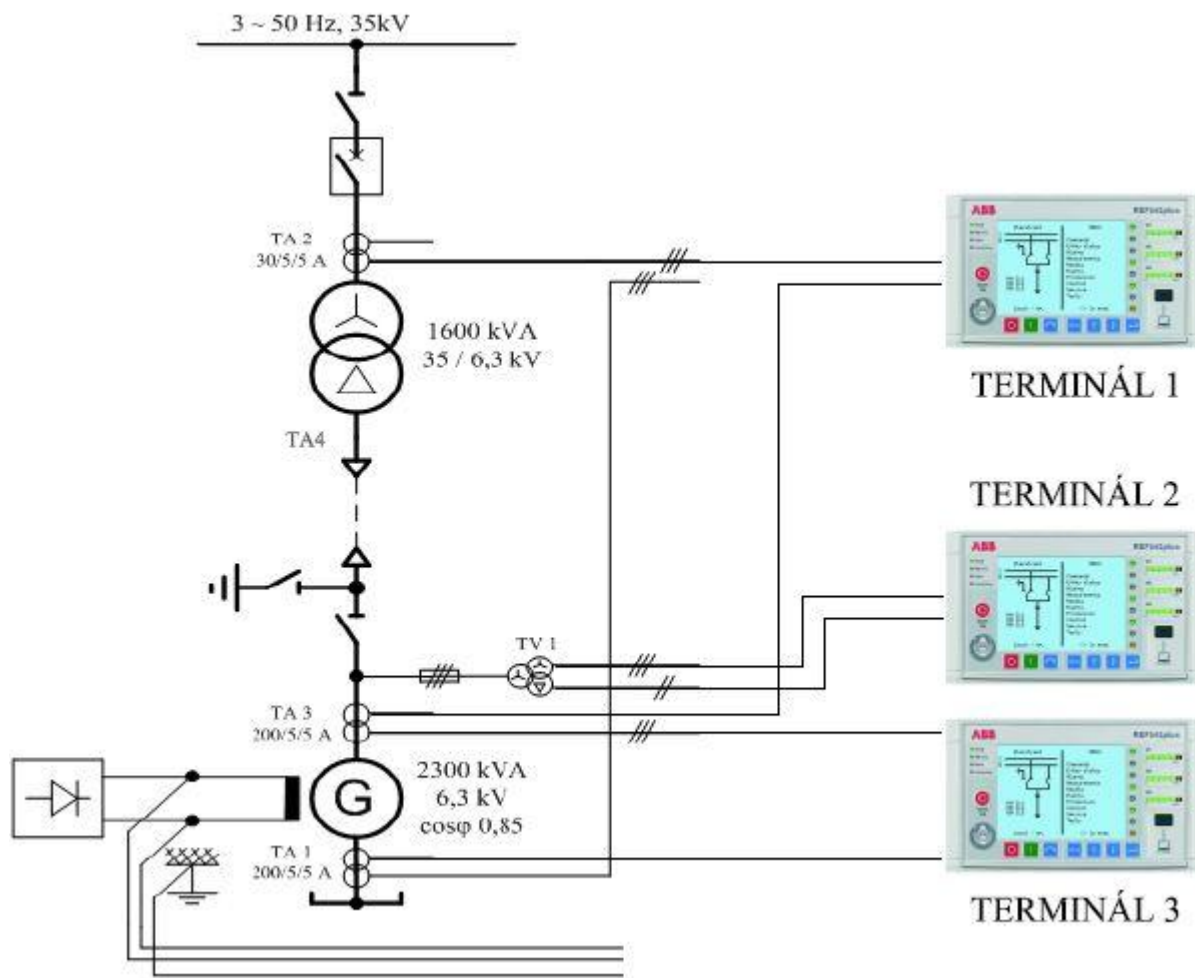
### HMI jednotka

HMI jednotka je systém určený pro místní ovládání pole rozvodny. Tato jednotka umožňuje nastavovat ochranné funkce, ovládat primární prvky, vizualizovat měřené hodnoty, změnové stavy, resetovat výstražná hlášení a měnit pracovní režim terminálu.

Vzhledem k omezenému počtu vstupů, každý terminál jich má 6, použijeme 3 terminály REF 542plus. Způsob zapojení je znázorněn na obrázku 9.9 [6]. V případě zájmu investora je možné u vybraného typu terminálu místo proudových a napěťových přístrojových transformátorů použít senzory, které jsou dělány přímo tento terminál. Stačí pouze vyměnit modul základní jednotky měřících transformátorů za modul určený pro senzory.



Obrázek 9.8 Hlavní části terminálu REF 542plus



Obrázek 9.9 Schéma zapojení terminálů REF 542plus

Terminál REF542plus bude zajišťovat a vybavovat následující ochrany:

Terminál transformátoru:

- Rozdílová
- Zkratová nadproudová

Terminál přístrojového napěťového transformátoru:

- Při nadpětí
- Při podpětí

Terminál generátoru:

- Rozdílová
- Zkratová nadproudová
- Zemní ochrana rotoru
- Při tepelnému přetížení
- Při nesouměrnosti

Jednotlivé ochrany byly vybrány s ohledem na normy a zadané parametry malé vodní elektrárny.

## 9.4 Nastavení terminálů

Cílem této bakalářské práce není seznámení se s nastavováním a ovládáním terminálu. Zajímá nás nastavení potřebných parametrů pro vybavení jednotlivých ochran.

Na následujícím obrázku 9.10 [6] je pro znázornění tabulka nastavení parametrů rozdílové ochrany terminálu REF 542plus. Obdobná tabulka s parametry je potřebná pro každou jednotlivou ochranu.

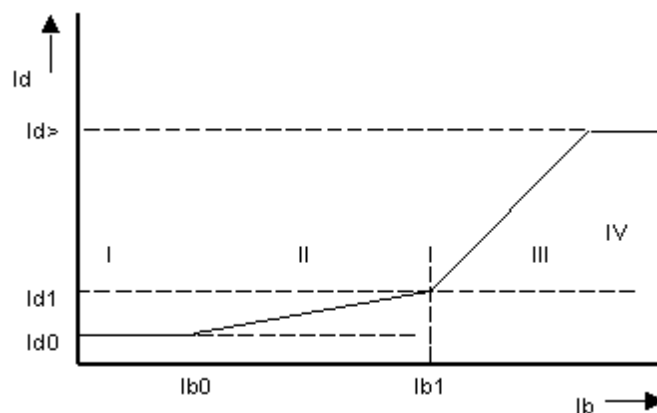
| Parameter Set                    | Set 1  | Set 2  | Range                               |
|----------------------------------|--------|--------|-------------------------------------|
| Primary nominal current          | 192.00 | 100.00 | 10.00 .. 100000.00 A                |
| Secondary nominal current        | 962.00 | 100.00 | 10.00 .. 100000.00 A                |
| Threshold current                | 0.20   | 0.20   | 0.10 .. 0.50 I <sub>r</sub> (p.u.)  |
| Unbiased region limit            | 0.50   | 0.50   | 0.50 .. 5.00 I <sub>r</sub> (p.u.)  |
| Slightly biased region threshold | 0.34   | 0.60   | 0.20 .. 2.00 I <sub>r</sub> (p.u.)  |
| Slightly biased region limit     | 2.00   | 1.00   | 1.00 .. 10.00 I <sub>r</sub> (p.u.) |
| Heavily biased slope             | 1.00   | 1.00   | 0.40 .. 1.00                        |
| Trip by I <sub>d</sub>           | 6.40   | 8.00   | 5.00 .. 40.00 I <sub>r</sub> (p.u.) |

Obrázek 9.10 Tabulka parametrů rozdílové ochrany terminálu REF 542plus

### 9.4.1 Terminál 1

#### Nastavení rozdílové ochrany

Vypínací charakteristika diferenciální ochrany v REF542plus znázorněna na obrázku 9.11 [6] je rozdělena do čtyř oblastí v závislosti na velikosti protékajícího stabilizačního proudu.



Obrázek 9.11 Vypínací charakteristika rozdílové ochrany v REF 542plus

**Oblast I:**

Oblast I je určena pro malá proudová zatížení chráněného objektu a je charakterizována body  $[0, I_{d0}]$  a  $[I_{b0}, I_{d0}]$ .

**Oblast II:**

Oblast II detekuje rozdílové proudy pro normální až středně těžká zatížení chráněného objektu a je určena body  $[I_{b0}, I_{d0}]$  a  $[I_{b1}, I_{d1}]$ .

**Oblast III:**

Oblast III slouží ochraně k detekování rozdílových proudů při velmi těžkých zatíženích chráněného objektu a je definována body  $[I_{b1}, I_{d1}]$  strmostí  $S$  a proudem  $I_{d>}$ .

**Oblast IV:**

Oblast IV definuje tvar vypínací charakteristiky diferenciální ochrany pomocí nastaveného proudu  $I_{d>}$  v případě překročení povoleného zatíženého proudu  $I_b$  protékajícího chráněným objektem.

Všechny hraniční proudy definující vypínací charakteristiku rozdílové ochrany se nastavují v poměrných jednotkách a jsou vztaženy k jmenovitému proudu transformátoru (primárního  $I_{1r}$  nebo sekundárního  $I_{2r}$ ).

Výpočet jednotlivých parametrů pro nastavení rozdílové ochrany transformátoru:

Jmenovitý proud  $I_{1r}$  strany 35 kV výkonového transformátoru je:

$$I_{1r} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1n}} = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3} = 26,393A \quad (9.28)$$

Jmenovitý proud  $I_{2r}$  strany 6,3 kV výkonového transformátoru je:

$$I_{2r} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1n}} = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 146,628A \quad (9.29)$$

$$I(\text{vnější porucha}) = \frac{100\%}{6\%} = 17xI_r \quad (9.30)$$

Prahová hodnota rozdílového proudu:

$$I_d \geq 0,8x17I_n = 13,6I_r \quad (0,8 - \text{bezpečnostní koeficient}) \quad (9.31)$$

Prahová hodnota proudu:

$$I_{d0} = 2x(0,05 + 0,03)x1,2xI_r = 0,192xI_r \quad (\text{vybraná hodnota} = 0,2xI_r) \quad (9.32)$$

Nezkreslený stabilizační proud:

$$I_{b0} = 0,5xI_r \quad (9.33)$$

Diferenciální proud:

$$I_{d1} = (2xI_r - 0.5I_r)x0.12x1.2 + 0x12xI_r = 0.336xI_r \approx 0.34I_r \quad (9.34)$$

Stabilizační proud:

$$I_{b1} = 2xI_r \quad (9.35)$$

Aby se zabránilo nežádoucímu vybavení v případě poruchy vzhledem k nasycení proudového transformátoru, je strmost přímky rozdílového proudu nastavena na nejvyšší možnou hodnotu ( $S = 1.0$ ).

|                                    | Nastavení | Rozsah nastavení    |
|------------------------------------|-----------|---------------------|
| Primární jmenovitý proud           | 26        | 10.00 - 100000.00 A |
| Sekundární jmenovitý proud         | 147       | 10.00 - 100000.00 A |
| Prahová hodnota proudu             | 0.2       | 0.10 - 0.50 $I_r$   |
| Nezkreslený stabilizační proud     | 0.5       | 0.50 - 5.00 $I_r$   |
| Diferenciální proud                | 0.34      | 0.20 - 2.00 $I_r$   |
| Stabilizační proud                 | 0.2       | 1.00 - 10.00 $I_r$  |
| Strmost přímky rozdílového proudu  | 1.0       | 0.40 - 1.00         |
| Prahová hodnota rozdílového proudu | 13.6      | 5.00 - 40.00 $I_r$  |

Tabulka 9.1 Nastavení parametrů rozdílové ochrany terminálu 1

Všechny hodnoty v tabulkách reprezentující nastavení jsou uváděny s desetinnou tečkou stejně jako v samotných terminálech.

### Nastavení zkratové nadproudové ochrany

Podle normy ČSN 60255-27 [11] se nejčastěji používá 1.2 až dvacetinásobek hodnoty jmenovitého proudu. Norma uvádí, že výrobce musí stanovit a uvést bezpečné výdržné hodnoty, výdržný nadproud a trvalou výdrž. Trvalá výdrž by měla být nejméně čtyřnásobek jmenovitého proudu a přístroj by měl vydržet stonásobek jmenovitého proudu minimálně po dobu 1s.

Rozběhový proud relé  $I_r$  musí být větší než dovolené proudové zatížení  $I_n$  chráněného transformátoru.

$$I_r \geq I_n \cdot \frac{k_b}{k_p} \geq 146,628 \cdot \frac{1,2}{1} \geq 175,95A \quad (9.36)$$

$k_b$  je koeficient bezpečnosti a volí se v rozmezí 1,1 až 1,3

$k_p$  je přídržný poměr relé a bývá udáván výrobcem v rozmezí 0,85 až 0,95; u digitálních ochran se rovná 1

Rozběhový proud nadproudového relé musí být menší než minimální vypočtený zkratový proud  $I_{kmin}$  na konci zálohovaného úseku.

$$I_r \leq I_{kmin} \cdot \frac{1}{k_c} \leq 739,176 \cdot \frac{1}{1,6} \leq 461,985A \quad (9.37)$$

$k_c$  je koeficient citlivosti a volí se na základě praktických zkušeností větší než 1,5

Tuto ochranu nastavíme ve dvou stupních. Startovní hodnota 1. stupně byla nastavena na 1.3 násobek jmenovitého proudu s operačním časem 5 sekund. Startovní hodnota 2. stupně byla nastavena na 2.5 násobek jmenovitého proudu s operačním časem 0.02 sekundy.

| 1. stupeň         |           |                  |
|-------------------|-----------|------------------|
| Parametr          | Nastavení | Rozsah nastavení |
| Startovní hodnota | 1.3       | 0.05 - 40 $I_n$  |
| Operační čas      | 5         | 0.015 - 300 s    |
| 2. stupeň         |           |                  |
| Parametr          | Nastavení | Rozsah nastavení |
| Startovní hodnota | 2.5       | 0.05 - 40 $I_n$  |
| Operační čas      | 0.02      | 0.015 - 300 s    |

Tabulka 9.2 Nastavení parametrů nadproudové ochrany terminálu 1

Startovní hodnota – prahová hodnota proudu pro vybavení ochrany

Operační čas – čas vybavení ochrany v nastavenou dobu

## 9.4.2 Terminál 2

### Nastavení ochrany při nadpětí

Při ochraně proti napětí použijeme dvojí nastavení. Jedno při odpojení malé vodní elektrárny od distribuční sítě a další při jejím připojení k distribuční síti. Jednotlivé parametry jsou zvoleny dle normy ČSN 60255-151 [10]. [4]

Nastavení parametrů při připojení k distribuční síti.

| Parametr                       | Hodnota | Jednotka | Výchozí | Rozsah nastavení |
|--------------------------------|---------|----------|---------|------------------|
| Startovní hodnota $U > U_{>>}$ | 1.1     | $U_n$    | 0.50    | 0.1 - 3.0        |
| Čas                            | 100     | ms       | 80      | 40 – 30000       |
| Startovní hodnota $U >>>$      | 1.1     | $U_n$    | 0.50    | 0.1 - 3.0        |
| Čas                            | 100     | ms       | 80      | 15 – 300000      |

Tabulka 9.3 Nastavení parametrů nadpětové ochrany terminálu 2

Nastavení parametrů při odpojení od distribuční sítě.

| Parametr                       | Hodnota | Jednotka | Výchozí | Rozsah nastavení |
|--------------------------------|---------|----------|---------|------------------|
| Startovní hodnota $U > U_{>>}$ | 1.15    | $U_n$    | 0.50    | 0.1 - 3.0        |
| Čas                            | 30000   | ms       | 80      | 40 – 30000       |
| Startovní hodnota $U >>>$      | 1.3     | $U_n$    | 0.50    | 0.1 - 3.0        |
| Čas                            | 100     | ms       | 80      | 15 – 300000      |

Tabulka 9.4 Nastavení parametrů nadpětové ochrany terminálu 2

### Nastavení ochrany při podpětí

Při ochraně při podpětí použijeme nastavení pouze při připojení malé vodní elektrárny k distribuční síti. Jednotlivé parametry jsou zvoleny dle normy ČSN 60255-151 [10]. [4]

| Parametr                       | Hodnota | Jednotka | Výchozí | Rozsah nastavení |
|--------------------------------|---------|----------|---------|------------------|
| Startovní hodnota $U < U_{<<}$ | 0.9     | $U_n$    | 0.50    | 0.1 - 1.2        |
| Čas                            | 100     | ms       | 80      | 40 – 30000       |
| Startovní hodnota $U < <<<$    | 0.9     | $U_n$    | 0.50    | 0.1 - 1.2        |
| Čas                            | 100     | ms       | 80      | 15 – 300000      |

Tabulka 9.5 Nastavení parametrů podpěťové ochrany terminálu 2

### 9.4.3 Terminál 3

Generátor malé vodní elektrárny nebyl přímo specifikován a jsou známy pouze základní údaje. Vzhledem k neznalosti potřebných parametrů není možné spočítat přesné nastavení některých ochran, a proto jsou nastaveny výchozí hodnoty, které se nastaví až dle přesných parametrů. Postup výpočtů přesných hodnot je u jednotlivých ochran uveden a popsán.

#### Nastavení rozdílové

Rozdílový proud se nejčastěji nastavuje v rozmezí 20 až 30%.

| Parametr        | Hodnota | Jednotka | Výchozí | Rozsah nastavení |
|-----------------|---------|----------|---------|------------------|
| Rozdílový proud | 20      | %        | 0.5     | 0.5 - 50         |
| Operační čas    | 0.05    | s        | 0.03    | 0.03 – 0.5       |

Tabulka 9.6 Nastavení parametrů rozdílové ochrany terminálu 3

#### Nastavení zkratové nadproudové ochrany

Podle normy ČSN 60255-27 [11] se nejčastěji používá 1.2 až dvacetinásobek hodnoty jmenovitého proudu.

Rozběhový proud relé  $I_r$  musí být větší než dovolené proudové zatížení  $I_n$  chráněného generátoru.

$$I_r \geq I_n \cdot \frac{k_b}{k_p} \geq 211 \cdot \frac{1,2}{1} \geq 253,2A \quad (9.38)$$

$k_b$  je koeficient bezpečnosti a volí se v rozmezí 1,1 až 1,3

$k_p$  je přídržný poměr relé a bývá udáván výrobcem v rozmezí 0,85 až 0,95; u digitálních ochran se rovná 1

Rozběhový proud nadproudového relé musí být menší než minimální vypočtený zkratový proud  $I_{kmin}$  na konci zálohovaného úseku.

$$I_r \leq I_{kmin} \cdot \frac{1}{k_c} \leq 739,176 \cdot \frac{1}{1,6} \leq 461,985A \quad (9.39)$$

$k_c$  je koeficient citlivosti a volí se na základě praktických zkušeností větší než 1,5

Tuto ochranu nastavíme ve dvou stupních. Nastavení 1. stupně bude sloužit jako záložní ochrana transformátoru. Startovní hodnota 1. stupně byla nastavena na 0.9 násobek jmenovitého proudu s operačním časem 10 sekund. Startovní hodnota 2. stupně byla nastavena na 1.6 násobek jmenovitého proudu s operačním časem 0.02 sekundy.

| 1. stupeň         |           |                          |
|-------------------|-----------|--------------------------|
| Parametr          | Nastavení | Rozsah nastavení         |
| Startovní hodnota | 0.9       | 0.05 - 40 I <sub>n</sub> |
| Operační čas      | 10        | 0.015 - 300 s            |
| 2. stupeň         |           |                          |
| Parametr          | Nastavení | Rozsah nastavení         |
| Startovní hodnota | 1.6       | 0.05 - 40 I <sub>n</sub> |
| Operační čas      | 0.02      | 0.015 - 300 s            |

Tabulka 9.7 Nastavení parametrů nadproudové ochrany terminálu 3

Startovní hodnota – prahová hodnota proudu pro vybavení ochrany

Operační čas – čas vybavení ochrany v nastavenou dobu

### Nastavení zemní ochrany rotoru

Ochrana je připojena na injektážní jednotku REK 510 od firmy ABB. Tato jednotka v bezporuchovém stavu injektuje do obvodu rotoru malý proud (řádově miliampéry), který závisí na velikosti kapacity proti zemi. V případě vzniku poruchy začne obvodem protékat proud až 130 mA, který jednotka zesílí 10 x a přivádí jej na vstup do ochrany.

| Parametr                | Nastavení | Jednotka       |
|-------------------------|-----------|----------------|
| Jmenovitý proud ochrany | 1         | A              |
| I <sub>r</sub>          | 0.2       | I <sub>n</sub> |
| Operační čas            | 1         | s              |

Tabulka 9.8 Nastavení parametrů ochrany proti přetížení terminálu 3

### Nastavení ochrany při tepelném přetížení

Výpočet hodnot pro skutečný generátor lze provést dle následujícího výpočtu, pro který jsou nutné přesné údaje daného stroje.

$$T = T_f \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + T_{ini} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9.40)$$

$$T_f = T_{Mn} = \Delta T_n - T_{env} \quad (9.41)$$

$$\Delta T = \Delta T_n \cdot \frac{I^2}{I_{Mn}^2} \quad (9.42)$$

$$T = T_{env} + (T_{ini} - T_{env}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + (T_{Mn} - T_{env}) \cdot \left(\frac{I}{I_{Mn}}\right)^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (9.43)$$

T<sub>ini</sub> Počáteční teplota motoru  
T<sub>f</sub> Asymptotická konečná teplota  
T<sub>env</sub> Teplota okolí

|              |                                           |
|--------------|-------------------------------------------|
| $T_{Mn}$     | Jmenovitá teplota motoru                  |
| $\Delta T_n$ | Jmenovitý asymptotický teplotní přírůstek |
| $T_{warm}$   | Varovná teplota                           |
| $T_{Trip}$   | Prahová hodnota teploty                   |
| $I$          | Proud tekoucí generátorem                 |
| $I_{Mn}$     | Jmenovitý proud generátoru                |
| $\tau$       | Časová konstanta                          |
| $t$          | Čas                                       |

Pokud by se nepodařilo zjistit potřebné hodnoty, použila by se místo ochrany při tepelném přetížení závislá nadproudová ochrana.

| Parametr                           | Výchozí nastavení | Rozsah nastavení |
|------------------------------------|-------------------|------------------|
| Jmenovitá teplota motoru $T_{Mn}$  | 100               | 50 - 400°C       |
| Prahová hodnota teploty $T_{Trip}$ | 100               | 50 - 400°C       |
| Varovná teplota $T_{warm}$         | 100               | 50 - 400°C       |
| Teplota okolí $T_{env}$            | 20                | 10 - 50°C        |
| Počáteční teplota motoru $T_{ini}$ | 50                | 10 - 400°C       |

Tabulka 9.9 Nastavení parametrů ochrany proti přetížení terminálu 3

### Nastavení ochrany při nesouměrnosti

U generátoru s výkonem 2,3 MVA není tato ochrana nutná, ale doporučuje se ji použít. Jelikož nejsou známy přesné parametry generátoru, je níže naznačen postup pro výpočet parametrů.

$$t = \frac{K}{I_2^2 - I_s^2} \quad (9.44)$$

$t$  - vypínací doba odvozená od výše oteplovací konstanty

$K$  - oteplovací konstanta (poměrné teplo akumulované v rotoru)

Hodnota  $K$  se odvíjí od výkonu generátoru a je jiná u každého výrobce.

$I_2$  – nerovnoměrný zatěžovací proud

$I_s$  - počáteční hodnota proudu vztažená k jmenovitému proudu proudového transformátoru nebo proudového senzoru

$$K = t_{AUS} \cdot \left[ \left( \frac{I_{Mn}}{I_n} \cdot \frac{I_2}{I_n} \right)^2 - \left( \frac{I_{Mn}}{I_n} \cdot \frac{I_s}{I_n} \right)^2 \right] \quad (9.45)$$

$I_{Mn}$  - jmenovitý proud generátoru

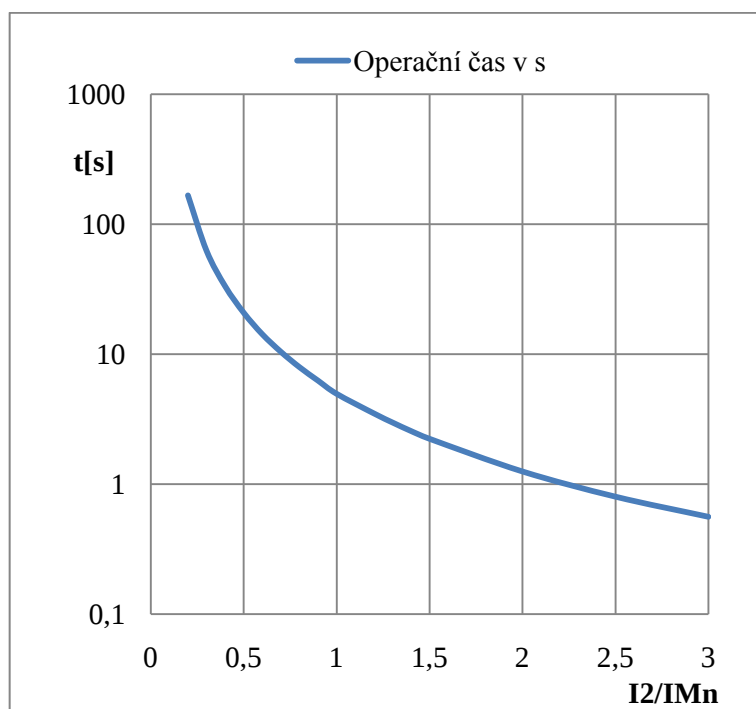
$I_n$  - jmenovitý proud proudového transformátoru

| Parametr | Výchozí nastavení | Rozsah nastavení |
|----------|-------------------|------------------|
| $I_s$    | 0.1               | $0.05 - 0.3 I_n$ |
| K        | 10.0              | 2.0 – 30.0       |
| Reset    | 60                | 0 – 2000 s       |
| Vybíjení | 10                | 0 – 100%         |

Tabulka 9.10 Nastavení parametrů ochrany proti nesouměrnosti terminálu 3

Reset - čas až do úplného vymazání tepelného obsahu paměti

Vybíjení - snížení doby resetu v procentech



Obrázek 9.12 Ukázka vypínací charakteristiky ochrany proti nesouměrnosti v REF 542plus

Dále terminál obsahuje funkci *Synchronism check* (synchronizace generátoru). Jedná se o speciální logickou funkci terminálu REF 542plus, která povoluje sepnout vypínač v případě, kdy jsou generátor a síť ve fázi. Tuto logickou funkci není třeba nastavovat, ani pro ni zadávat žádné parametry.

## 9.5 Výběr ostatních prvků chránění

Předmětem této práce je pouze návrh nastavení parametrů terminálů pro vybavování jednotlivých ochran. Dále by bylo třeba vybrat přesný typ rozvaděče, proudové a napěťové transformátory a jednotlivé členy chránění (např. vypínač, odpojovač).

Jednotlivé komponenty by se vybíraly od společnosti ABB, která nabízí komplexní řešení a kompatibilitu jednotlivých komponent.

## 10 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se nejprve zabývá elektrickými ochranami jako celkem. Shrnuje nejdůležitější poruchy, které se mohou v elektrizační soustavě vyskytnout a nejhlavnější způsoby, jak jim předejít, nebo aspoň zmírnit jejich důsledky na elektrizační soustavu. V další části je zmínka o ochranách generátoru a poté pokračuje samotným návrhem chránění konkrétní zadané malé vodní elektrárny.

Chránění malé vodní elektrárny je řešeno terminály, které slouží k chránění, řízení a ovládání, měření, monitorování, diagnostice a komunikaci. Jako terminály chránění jsou vybrány REF 542plus od firmy ABB, které jsou určeny pro rozvodny nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí. Mají v sobě integrováno množství ochranných funkcí. Celkem jsou použity 3 tyto terminály z důvodu omezení množství vstupů.

Hlavním cílem této bakalářské práce byl výběr jednotlivých ochran a nastavení jednotlivých parametrů potřebných pro správnou funkci terminálů. Ochrany byly vybrány a nastaveny v souladu s normami ČSN 333051 [7], ČSN IEC 60076-7 [8], ČSN EN 60255-151 [9], ČSN EN 60255-27 [10].

Terminál 1 obsahuje rozdílovou a dvoustupňovou zkratovou nadproudovou ochranu transformátoru. Terminál 2 obsahuje ochranu při nadpětí a podpětí a je napojen na napěťový měřicí transformátor. Terminál 3 chrání generátor a obsahuje rozdílovou a dvoustupňovou zkratovou nadproudovou ochranu, zemní ochranu rotoru, ochranu při tepelném přetížení a při nesouměrnosti. 1. stupeň zkratové nadproudové ochrany slouží jako záloha pro transformátor. Pro nastavení ochran při tepelném přetížení a nesouměrnosti nejsou známy potřebné parametry, proto byly nastaveny výchozí hodnoty a byl uveden postup jak potřebné parametry vypočítat.

## 11 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] JANÍČEK, F., CHLADNÝ, V., BELÁŇ, A., ELESCHOVÁ, Ž. *Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave*. STU Bratislava 2004, 360 stran, ISBN 80-227-2135-2
- [2] DOHNÁLEK, P. *Ochrany pro průmysl a energetiku*. SNTL/ALFA Praha 1978, 374 stran
- [3] HALUZÍK, E., WEIDINGER, L., KRÁTKÝ, M. *Ochrany a jištění energetických zařízení*. VUT Brno
- [4] GABRIEL, P., ČIHÁK, F., KALANDRA, P. *Malé vodní elektrárny*. ČVUT Praha 1998, 321 stran
- [5] JAVORA, R., *Senzorové technologie pro měření napětí a proudů*. TC Brno 2008
- [6] Manuály k terminálu REF 542plus firmy ABB [online].  
Dostupný z WWW: <http://www.abb.com/>.
- [7] ČSN 333051:1992. *Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení*.
- [8] ČSN IEC 60076-7:2005. *Výkonové transformátory – Část 7: Směrnice pro zatěžování olejových výkonových transformátorů*. idt IEC 60076-7:2005
- [9] ČSN EN 60255-151:2009. *Měřicí relé a ochranná zařízení - Část 151: Funkční požadavky pro nadproudovou/podproudovou ochranu*. idt IEC 60255-151:2009
- [10] ČSN EN 60255-27:2005. *Měřicí relé a ochranná zařízení - Část 27: Požadavky na bezpečnost výrobku*. idt IEC 60255-27:2005