

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

OCHRANY PŘI ZEMNÍCH SPOJENÍCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN OSTRUŠKA

BRNO 2015



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

OCHRANY PŘI ZEMNÍCH SPOJENÍCH

EARTH FAULTS PROTECTIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAN OSTRUŠKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAVA ORSÁGOVÁ,
Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Jan Ostruška

ID: 134578

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Ochrany při zemních spojeních

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zemní spojení v kompenzované síti – problematika lokalizace – určení postiženého vývodu, používané principy ochran při zemním spojení.
2. Rešerše současně používaných zemních ochran – výrobci a nabízené funkční principy chránění.
3. Zhodnocení funkčnosti a spolehlivosti vybraných ochran na základě provedených laboratorních testů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 22.5.2015

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

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Práce se zabývá wattmetrickým a konduktančním principem detekce vývodu se zemním spojením v kompenzovaných sítích vysokého napětí. Speciální důraz přitom klade na vysokoodporová zemní spojení a testuje funkčnost zmíněných principů při nich. V první části testování práce využívá stavů sítě se zemním spojením, které byly vypočítány vytvořeným statickým modelem zemního spojení v síti. Druhá část testování používá záznamy vysokoodporových zemních spojení. V obou případech toto testování probíhalo na ochranách ABB REF 615, ABB REM 543 a Protection&Consulting RYo při využití testovacího zařízení OMICRON CMC 256plus. Hlavním výsledkem práce jsou záznamy o detekování zemního spojení uvažovanými ochranami. Tyto záznamy ukazují výraznou závislost funkčnosti ochrany na velikosti netočivé složky napětí a u wattmetrické ochrany také navíc i na hodnotě odporu zemního spojení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Ochrany při zemních spojeních, zemní ochrany, kompenzovaná síť, wattmetrická metoda, wattmetrický princip, admitanční metoda, admitanční princip, konduktanční metoda, konduktanční princip, detekce vývodu se zemním spojením, REF 615, EFPADM, REM 543, DEF2low, RYo, G>, Ifi>, model zemního spojení, OMICRON CMC 256plus

ABSTRACT

The thesis deals with wattmetric and conductance principle of faulted feeder detection in medium voltage compensated distribution networks. These principles are analysed and tested with particular emphasis on high impedance earth faults. The first part of testing utilizes data about state of the system with earth fault, which was determined by designed static model of earth fault. The testing in the second part utilizes real records of high impedance earth faults. In both parts the wattmetric and conductance protections was presented on protective relays ABB REF 615, ABB REM 543 and Protection&Consulting RYo by means of unit OMICRON CMC 256plus. As a major result of performed tests are records of detection of particular earth faults. Based on these records it could be concluded, that functionality of protections is substantially dependent on magnitude of zero sequence voltage. Furthermore the wattmetric protections are dependent on fault resistance as well.

KEYWORDS

Earth fault protections, earth fault protective relays, compensated networks, wattmetric method, wattmetric principle, admittance method, admittance principle, conductance method, conductance principle, faulted feeder detection, REF 615, EFPADM, REM 543, DEF2low, RYo, G>, Ifi>, model of earth fault, OMICRON CMC 256plus

OSTRUŠKA, Jan *Ochrany při zemních spojeních*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2015. 105 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Ochrany při zemních spojení“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucí diplomové práce paní doc. Ing. Jaroslavě Orságové, Ph.D. za odborné pomoc, cenné rady při konzultacích a trpělivost. Děkuji též rodičům za podporu během doby mého studia.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| Seznam symbolů, veličin a zkratk | 12 |
| Úvod | 13 |
| 1 Zemní spojení | 15 |
| 1.1 Odvození vztahů pro zemní spojení v síti vn s obecnou impedancí v uzlu transformátoru vvn/vn | 15 |
| 1.1.1 Výchozí bezporuchová situace | 15 |
| 1.1.2 Situace po vzniku zemního spojení | 18 |
| 1.2 Zemní spojení v kompenzované síti | 24 |
| 1.3 Reálné zemní spojení v kompenzované síti | 28 |
| 2 Ochrany při zemních spojeních | 35 |
| 2.1 Úvod k ochranám při ZS | 35 |
| 2.2 Metody detekce vývodu postiženého zemním spojením | 37 |
| 2.2.1 Měření a výpočet netočivých složek napětí a proudu | 38 |
| 2.2.2 Wattmetrická metoda | 41 |
| 2.2.3 Admitanční metoda | 43 |
| 2.2.4 Metoda první půlperrody | 47 |
| 2.3 Popis uvažovaných zemních ochran | 48 |
| 2.3.1 Ochrana ABB REF 615 | 48 |
| 2.3.2 Ochrana ABB REM 543 | 51 |
| 2.3.3 Ochrana Protection & Consulting RYo | 53 |
| 3 Statický model zemního spojení v síti | 56 |
| 3.1 Vstupní údaje | 56 |
| 3.2 Funkce a výstupy modelu | 57 |
| 3.2.1 Ukázkový příklad | 57 |
| 3.2.2 Ukázka dalších výstupů modelu | 58 |
| 3.3 Předdefinované stavy sítě a výstup modelu ZS | 59 |
| 4 Testování ochranných funkcí při zemních spojeních | 61 |
| 4.1 Testování konduktanční a wattmetrické ochrany na základě výsledků modelu ZS v síti | 61 |
| 4.1.1 Nastavení ochranných funkcí | 61 |
| 4.1.2 Průběh testování | 64 |
| 4.1.3 Shrnutí výsledků testování | 65 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.2 | Testování konduktanční a wattmetrické ochrany průběhy experimentálních vysokoodporových ZS | 67 |
| 4.2.1 | Nastavení ochranných funkcí | 67 |
| 4.2.2 | Průběh testování | 69 |
| 4.2.3 | Shrnutí výsledků testování | 70 |
| 5 | Závěr | 72 |
| | Literatura | 74 |
| | Seznam příloh | 79 |
| A | ANSI kódy a značení dle IEC 60617 a IEC 61850 pro ochranné funkce týkající se zemních spojení | 80 |
| B | Bližší údaje o přístrojovém vybavení testovacího pracoviště | 81 |
| C | Ukázka výstupu statického modelu zemního spojení v síti | 90 |
| D | Výsledky testování konduktanční a wattmetrické ochrany | 98 |
| E | Obsah příloženého CD | 105 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Schéma sítě vn s obecnou impedancí \bar{Z}_N v uzlu transformátoru vvn/vn. | 16 |
| 1.2 | Schéma sítě vn s obecnou impedancí \bar{Z}_N v uzlu transformátoru vvn/vn a se zemním spojením ve fázi L_1 . | 19 |
| 1.3 | Fázorový diagram fázových napětí proti zemi, netočivé složky napětí a jejich změn v mírně překompenzované síti při různých hodnotách odporu ZS. | 22 |
| 1.4 | Zapojení zhášecí tlumivky do uzlu transformátoru vvn/vn a připojení odporu pomocného odporníku. | 25 |
| 1.5 | Fázorový diagram napětí a proudů v místě kovového ZS při kompenzaci zemního kapacitního proudu. | 27 |
| 1.6 | Vliv nesymetrie, rozladění a tlumení na napětí $\bar{u}_{(0)}$. Upraveno z [3] | 28 |
| 1.7 | Reálné ZS: (a) vznik ZS pádem stromu na vedení a (b) destruktivní následky ZS přes konzolu a sloup vedení. Převzato z [17] a [18]. | 30 |
| 1.8 | Průběhy proudů a napětí kovového ZS v kabelovém vývodu městské sítě s celkovým kapacitním proudem $I_C = 302 A$. Zdroj [16] | 31 |
| 1.9 | Průběhy proudů a napětí obloukového ZS v kabelovém vývodu s ukázkou vlivu připnutí pomocného odporníku. Zdroj [16] | 31 |
| 1.10 | Průběhy proudu a napětí odporového ZS s $R_P = 1600 \Omega$ na konci venkovního vedení sítě s kapacitním proudem $I_C = 130 A$. Zdroj [16] | 32 |
| 1.11 | Schéma připínání pomocného odporníku a šentování zemním spojením postižené fáze s časovou sekvencí jednotlivých úkonů. Převzato z [3] | 33 |
| 1.12 | Příklad rezonanční křivky zhášecí tlumivky připojené do venkovní a kabelové sítě. Upraveno z [20] | 34 |
| 2.1 | Indikátory poruch pro venkovní vedení: (a) ukázka montáže indikátoru MEg61 a (b) lokalizace postiženého úseku na základě signalizace indikátorů. Převzato a upraveno z [24] a [25]. | 37 |
| 2.2 | Měření proudu $3\bar{I}_{(0)}$ Holmgreenovým zapojením PTP a měření napětí s odvozením napětí $\bar{U}_{(0)}$ uvnitř ochrany. Příklad zapojení ochrany Siemens 7SA6 [26]. | 39 |
| 2.3 | Citlivější měření proudu $3\bar{I}_{(0)}$ se samostatným kabelovým průvlekovým PTP a měření napětí $3\bar{U}_{(0)}$ PTN zapojenými do otevřeného trojúhelníku. Převzato z [27]. | 39 |
| 2.4 | Rozložení fázorů netočivé složky napětí a proudu ve vývodu se zemním spojením a ve zdravém vývodu. | 42 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.5 | Fázorový diagram netočivé složky napětí a proudu měřeného: (a) na začátku vývodu se ZS a (b) na začátku vývodu bez ZS. (c) Znázornění principu rozhodování na základě směru netočivé složky proudu vývodu se ZS a bez ZS. | 42 |
| 2.6 | Ukázka umístění (a) admitancí a (b) konduktancí zdravého a ZS postiženého vývodu v kompenzované síti. | 44 |
| 2.7 | Příklady charakteristik admitanční metody detekce vývodu se ZS. Přeloženo z [19] | 45 |
| 2.8 | Oscilografický průběh netočivé složky proudu a napětí při ZS na (a) nepostiženém (b) postiženém vývodu. Zdroj [3] | 47 |
| 2.9 | Ochrana REF 615 [28] | 49 |
| 2.10 | Ukázka možností nastavení ochranné funkce EFPADM. Získáno z programu PCM600 | 50 |
| 2.11 | Směrové režimy ochranné funkce EFPADM (a) nesměrový, (b) dopředný a (c) zpětný. Zdroj [27] | 51 |
| 2.12 | Ochrana REM 543 [32] | 52 |
| 2.13 | Ukázka možností nastavení ochranné funkce DEF2low. Získáno z programu CAP 505 | 53 |
| 2.14 | Ochrana RYo [34] | 54 |
| 2.15 | Ukázka možností nastavení ochranné funkce Ifi >. Získáno z programu RYo | 55 |
| 2.16 | Ukázka možností nastavení ochranné funkce Go >. Získáno z programu RYo | 55 |
| 4.1 | Rozložení fázorů $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$ (a) před vznikem ZS (čas cca -600 ms) a (b) po vzniku ZS o hodnotě $R_P = 6,25\text{ k}\Omega$ (čas cca $+2000\text{ ms}$). | 69 |
| B.1 | Svorkovnicový výkres ochrany ABB REF 615. | 82 |
| B.2 | Parametry ochranné funkce EFPADM ochrany ABB REF615 část 1. Zdroj [30]. | 83 |
| B.3 | Parametry ochranné funkce EFPADM ochrany ABB REF615 část 2. Zdroj [30]. | 84 |
| B.4 | Svorkovnicový výkres ochrany ABB REM 543. Zdroj [32]. | 85 |
| B.5 | Technická data k ochranné funkci DEF2low ochrany REM 543. Zdroj [33]. | 86 |
| B.6 | Schéma zapojení, nastavení a technické parametry ochrany RYo. Zdroj [34]. | 87 |
| B.7 | Schéma propojení testovacího zařízení OMICRON CMC 256plus s jednotlivými ochranami. | 88 |
| B.8 | Fotografie zapojení pracoviště. | 89 |

| | | |
|-----|--|-----|
| C.1 | Fázorový diagram napětí při ZS ve fázi 3 o odporu $R_P = 4000 \Omega$, a trajektorie počátku napětí u_0 jako funkce R_P | 92 |
| C.2 | Fázorové diagramy netočivých složek napětí a proudu jednotlivých vývodů za stavů bez ZS a při ZS. | 93 |
| C.3 | Fázorový diagram napětí při ZS v ideálně vykompenzované síti. | 94 |
| C.4 | Fázorový diagram napětí při ZS v podkompenzované síti ($\nu = -10\%$). | 94 |
| C.5 | Fázorový diagram napětí při ZS v překompenzované síti ($\nu = 10\%$). | 95 |
| C.6 | Fázorový diagram napětí při ZS v překompenzované síti ($\nu = 10\%$). | 95 |
| C.7 | Fázorové diagramy netočivých složek napětí a proudu jednotlivých vývodů za stavů: (a) bez ZS, (b) při ZS a (c) při ZS a při připnutém pomocném odporníku. | 96 |
| C.8 | Fázorový diagram napětí při ZS v izolované síti. | 97 |
| C.9 | Závislost velikosti napětí $u_{(0)}$ na odporu ZS R_P pro různé typy a stavy sítě. | 97 |
| D.1 | Printscreen ukázky nastavení testovacího zdroje OMICRON CMC 256plus v PC při testování zmíněných ochran. | 98 |
| D.2 | Průběh vypočítané konduktance během experimentálního ZS s : (a) $R_P = 2 \text{ k}\Omega$, (b) $R_P = 3 \text{ k}\Omega$ a (c) $R_P = 6,25 \text{ k}\Omega$ | 101 |
| D.3 | Průběhy $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$ při experimentálním ZS o $R_P = 2 \text{ k}\Omega$ a sekvence působení jednotlivých ochranných funkcí. | 102 |
| D.4 | Průběhy $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$ při experimentálním ZS o $R_P = 3 \text{ k}\Omega$ a sekvence působení jednotlivých ochranných funkcí. | 103 |
| D.5 | Průběhy $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$ při experimentálním ZS o $R_P = 6,25 \text{ k}\Omega$ a sekvence působení jednotlivých ochranných funkcí. | 104 |

SEZNAM TABULEK

| | | |
|-----|--|-----|
| 3.1 | Zvolené výchozí parametry vývodů V1 a V2. Zdroj [35] | 57 |
| 3.2 | Zvolené výchozí parametry zhášecí tlumivky | 57 |
| 3.3 | Zvolené stavy sítě pro výpočet modelem ZS | 60 |
| 4.1 | Údaje o síti získané modelem ZS v síti (viz část 3.3 | 62 |
| 4.2 | Převody zvolených PTN a PTP pro měření $\bar{U}_{(0)}$ a $3\bar{I}_{(0)}$ | 63 |
| 4.3 | Nastavení konduktanční ochrany v ochranách REF 615 a RYo | 63 |
| 4.4 | Nastavení směrové zemní ochrany v ochraně REM 543 | 64 |
| 4.5 | Nastavení směrové zemní ochrany v ochraně RYo | 64 |
| 4.6 | Stanovené hodnoty konduktancí sítě pro záznamy ZS s různými hodnotami R_p | 68 |
| 4.7 | Nastavení konduktanční ochrany v ochranách REF 615 a RYo | 68 |
| A.1 | ANSI kódy a značení IEC 60617 pro ochranné funkce týkající se zemních spojení. | 80 |
| B.1 | Údaje ze štítku používané ochrany REF 615. | 81 |
| B.2 | Údaje ze štítku používané ochrany REM 543. | 81 |
| B.3 | Údaje ze štítku používané ochrany RYo. | 81 |
| B.4 | Údaje ze štítku testovacího zařízení OMICRON CMC 256plus. | 81 |
| D.1 | Tabulka stavů sítě a výsledků testování konduktanční a wattmetrické ochrany pro tyto stavy. Síť v překompenzovaném stavu o 30% a o 15%. | 99 |
| D.2 | Tabulka stavů sítě a výsledků testování konduktanční a wattmetrické ochrany pro tyto stavy. Síť ve vyladěném a o 15% podkompenzovaném stavu. | 100 |

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

| | |
|-----------|----------------------------------|
| B | Susceptance |
| C | Elektrická kapacita |
| G | Elektrická vodivost, konduktance |
| I | Elektrický proud |
| L | Indukčnost |
| R | Elektrický odpor |
| U | Elektrické napětí |
| Y | Admitance |
| Z | Impedance |
| \bar{a} | Operátor natočení |
| d | Tlumení sítě |
| k | Nesymetrie sítě |
| l | Délka vedení |
| t | Čas, zpoždění působení ochrany |
| ν | Rozladění sítě |
| ω | Úhlová frekvence |
| nn | Nízké napětí |
| PO | Pomocný odporník |
| PTN | Přístrojový transformátor napětí |
| PTP | Přístrojový transformátor proudu |
| vn | Vysoké napětí |
| vvn | Velmi vysoké napětí |
| ZS | Zemní spojení |

ÚVOD

Distribuční síť tvoří poslední a zároveň rozsahově největší část z infrastruktury toku elektrické energie z elektráren přes přenosová vedení ke spotřebitelům. Jsou to sítě, které z více než 90% ovlivňují spolehlivost dodávky elektrické energie k zákazníkovi [1, s. 5]¹. Proto provoz těchto sítí také velkou měrou ovlivňuje i cenu elektrické energie - v roce 2014 tvořila cena za distribuci elektrické energie 33% z celkové ceny elektřiny pro domácnosti [2].

Distribuční sítě vysokého napětí (napěťové hladiny 6, 10, 22 a 35 kV) jsou obvykle provozovány bez přímo uzemněného uzlu transformátoru vvn/vn jako (1) izolované, (2) nepřímo uzemněné přes rezistanci nebo (3) nepřímo uzemněné přes zhášecí tlumivku - též kompenzované sítě [3]. V případě vzniku vodivého spojení jedné fáze vedení se zemí (např. spadlá větev na fázový vodič) se u těchto 3 typů soustav hovoří o zemním spojení. Je na místě uvést, že zemní spojení není totéž co jednofázový zkrat.

Při zemním spojení v nevykompenzované síti je poruchový proud v místě zemního spojení proudem kapacitního charakteru a jeho velikost závisí především na rozsahu této sítě. Norma ČSN 33 3070 s ohledem na krokové a dotykové napětí v okolí zemního spojení připouští mezní hodnotu nevykompenzovaného zemního kapacitního proudu 20 A. Naproti tomu jednofázový zkrat vzniká vodivým spojením jedné fáze vedení se zemí a to v soustavách s přímo uzemněným uzlem transformátoru. Proud jednofázového zkratu je většinou několikanásobně vyšší než provozní proud (nebo srovnatelný) a je induktivního charakteru. Vedení s jednofázovým zkratem je s ohledem na velikost poruchového proudu nutné co nejdříve vypnout. Naopak u vedení se zemním spojením toto není nutné a síť lze dále provozovat, vyhledat zemní spojení a odstranit ho. Vznik druhého zemního spojení už ale znamená dvoufázový zemní zkrat. Zemní spojení se v kompenzovaných sítích 22 kV vyskytují přibližně v 65% případech [5].

Navzdory tomu, že vedení se zemním spojením není nutné vypínat, je stále třeba mít informaci o jeho vzniku a přítomnosti. K tomuto účelu slouží ochrany při zemních spojeních, někdy také zkráceně zemní ochrany. Tyto ochrany v první řadě signalizují vznik zemního spojení a dále pak určují postižený vývod v rozvodně; případně dávají pokyn dalším automatikám, sloužícím ke snazšímu určení vývodu se zemním spojením, k lokalizaci konkrétního místa se zemním spojením nebo k zajištění větší bezpečnosti.

V ČR je převážná část distribučních sítí provozována jako kompenzované [3], proto se text této diplomové práce věnuje zemním spojení a problematice určení

¹Procentuální hodnota ovlivnění spolehlivosti dodávky elektrické energie k zákazníkovi je převzata z americké literatury, lze ale předpokládat, že v ČR je situace podobná

postiženého vývodu převážně u kompenzovaných sítí. Dále je jeho cílem uvést nabízené funkční principy chránění vybraných (současně používaných) ochran, které jsou vhodné pro kompenzované sítě. V neposlední řadě je cílem zhodnotit funkčnost a spolehlivost vybraných ochran na základě provedených laboratorních testů, pro různé stavy sítě a pro různé odpory zemního spojení. Zde je větší důraz kladen na vysokoodporová ZS, která mnohdy ani nemusí být signalizována.

1 ZEMNÍ SPOJENÍ

Zemní spojení (ZS), jak už bylo v úvodní kapitole zmíněno, je případ, kdy dojde k vodivému spojení jedné fáze vedení se zemí, a to v sítích bez přímo uzemněného uzlu transformátoru v_{vn}/v_n . V těchto sítích dochází při vzniku ZS k posunutí nulového bodu zdrojových napětí a poruchový proud je v přijatelných mezích, takže není nutné síť vypínat, což je její hlavní výhodou co se týče spolehlivosti dodávky elektrické energie.

V této kapitole je nejprve odvozen a zmíněn teoretický základ, který bude potřeba pro následné pochopení funkčních principů zemních ochran. Jmenovitě podkapitola 1.1 nejdříve popisuje bezporuchový stav sítě s nepřímo uzemněným uzlem a na něj navazuje část s odvozením toho, jak vypadá situace po vzniku ZS v této síti. Další podkapitola 1.2 využívá poznatků předchozí části a přechází v konkrétní případ - v síť kompenzovanou se ZS. Reálný pohled na zemní spojení v kompenzovaných sítích přináší část 1.3, ve které jsou ukázány průběhy reálných ZS. Dále jsou v této části uvedeny principy, které se v praxi aplikují v kompenzovaných sítích. Tyto principy zlepšují detekci konkrétního vývodu se ZS nebo například zajišťují větší bezpečnost.

Při odvozování poměrů v síti (při ZS ale i bez ZS) bude vždy cílem najít vztah pro napětí mezi uzlem transformátoru a zemí a vztah vyjadřující netočivou složku proudu měřenou na začátku konkrétního vývodu v rozvodně. Tento proud je v případě vývodu se ZS tvořen mimo jiné i poruchovým proudem, proto bude mnohdy úkolem vyjádřit si tento proud. Důvody, proč jsou důležité právě tyto hodnoty, jsou uvedeny v poslední podkapitole 2.2, která uvádí základní principy měření těchto charakteristických veličin a dále některé principy detekce vývodu v rozvodně postiženého ZS.

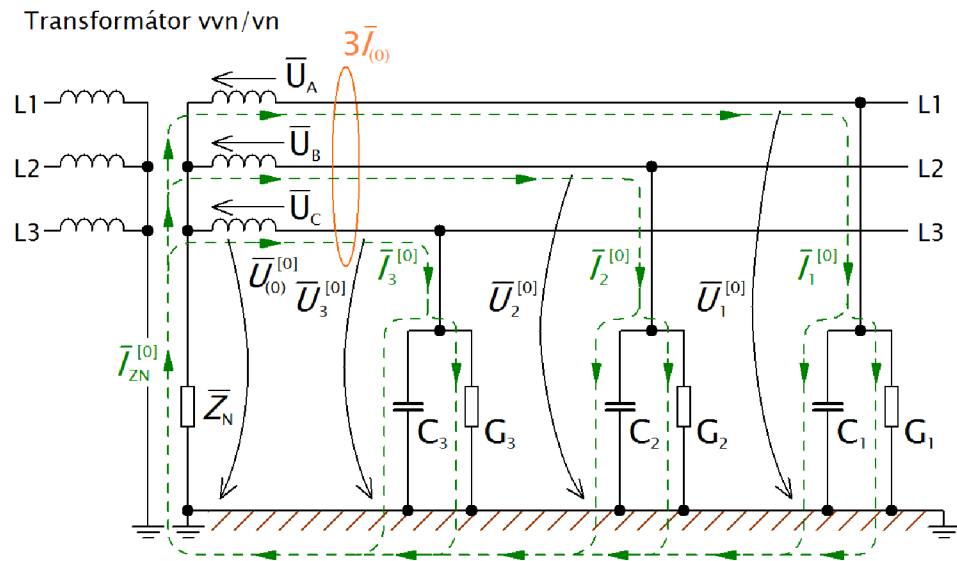
1.1 Odvození vztahů pro zemní spojení v síti v_n s obecnou impedancí v uzlu transformátoru v_{vn}/v_n

1.1.1 Výchozí bezporuchová situace

K odvozování vztahů, které popisují zemní spojení v síti v_n s obecnou impedancí \bar{Z}_N v uzlu transformátoru, bude užitečné nejdříve popsat výchozí (bezporuchový) stav distribuční sítě v_n . Ten je na následujícím obrázku 1.1. Hodnota uzlové impedance \bar{Z}_N se na tomto obrázku liší v závislosti na tom, jestli se jedná o soustavu izolovanou

nebo neúčinně uzemněnou přes rezistanci nebo kompenzovanou ¹.

V tomto základním schéma se soustředěnými parametry neuvažujeme podélné parametry vedení, které pro účel objasnění poměrů při ZS nebudou třeba. Dále pak zanedbáváme mezifázové kapacity (tj. vzájemné kapacity mezi jednotlivými fázemi), protože mají minimální vliv na velikost poruchového proudu při ZS [6]. Často se také můžeme setkat se zanedbáním svodových odporů, které jsou u zdravých fází v rozmezí 20 až 50 násobku kapacitní reaktance fází proti zemi [7]. Dále budeme předpokládat, že zdrojová napětí jsou symetrická a síť je v chodu naprázdno.



Obr. 1.1: Schéma sítě vn s obecnou impedancí \bar{Z}_N v uzlu transformátoru vvn/vn.

Na obrázku 1.1 značí:

- \bar{U}_A , \bar{U}_B a \bar{U}_C elektromotorická napětí na vinutích sekundární strany transformátoru vvn/vn. Zdroj napětí budeme považovat za tvrdý - tedy při poruše na vedení se tato napětí nezmění;
- C_1 , C_2 a C_3 příčné kapacity jednotlivých fází proti zemi ²;
- G_1 , G_2 a G_3 příčné vodivosti, které reprezentují svody soustavy. Paralelní kombinace příčné vodivosti a kapacity tvoří příčný nesymetrický článek, který ve schéma se soustředěnými parametry vyjadřuje parametry vedení proti zemi. Příčný nesymetrický článek je možné reprezentovat jeho příčnou admitancí \bar{Y} ;

¹Impedanci v uzlu transformátoru \bar{Z}_N uvažujeme jako ne-blízkou nule - tedy síť nebude přímo uzemněná.

²Často je známá jediná hodnota a tou je provozní kapacita C_P vedení či kabelu, která se skládá z mezifázové kapacity C_V a kapacity proti zemi C_0 - vztah $C_P = 3C_V + C_0$. Přibližně platí, že $C_0 = (0,45 \div 0,6)C_P$ [6].

- $\bar{U}_1^{[0]}$, $\bar{U}_2^{[0]}$ a $\bar{U}_3^{[0]}$ napětí na příčných nesymetrických člancích - tj. napětí jednotlivých fází proti zemi.
- horní index $^{[0]}$ značí stav před poruchou;
- $\bar{I}_1^{[0]}$, $\bar{I}_2^{[0]}$ a $\bar{I}_3^{[0]}$ proudy tekoucí do příčných nesymetrických článků. Tyto proudy jsou součtem proudů příčnou kapacitou a vodivostí příslušné fáze;
- $\bar{U}_{(0)}^{[0]}$ napětí mezi uzlem vn strany transformátoru a zemí;
- $\bar{I}_{ZN}^{[0]}$ proud tekoucí impedancí \bar{Z}_N mezi uzlem transformátoru a zemí;
- $3\bar{I}_{(0)}^{[0]}$ trojnásobek netočivé složky proudu měřené na začátku vývodu součtovým transformátorem.

V ideálním případě, kdy budeme kromě symetrických napětí zdroje uvažovat i stejné parametry vedení v každé fázi - symetrická síť, je součet proudů $\bar{I}_1^{[0]}$, $\bar{I}_2^{[0]}$ a $\bar{I}_3^{[0]}$ roven nule. Tento součet podle I. Kirchhoffova zákona roven proudu $\bar{I}_{ZN}^{[0]}$ a dále je mimo jiné roven i trojnásobku netočivé složky proudu $3\bar{I}_{(0)}^{[0]}$ odebírané na začátku tohoto vývodu rozvodny (více viz podkap. 2.2). Matematicky zapsáno:

$$\bar{I}_1^{[0]} + \bar{I}_2^{[0]} + \bar{I}_3^{[0]} = \bar{I}_{ZN}^{[0]} = 3\bar{I}_{(0)}^{[0]} = 0 \text{ A.} \quad (1.1)$$

Jelikož v tomto případě mezi uzlem transformátoru a zemí neprotéká žádný proud ($\bar{I}_{ZN}^{[0]} = 0 \text{ A}$), platí i pro napětí $\bar{U}_{(0)}^{[0]}$, že je rovno nule - $\bar{U}_{(0)}^{[0]} = 0 \text{ V}$.

Uvažujme ale případ, kdy parametry vedení nejsou v každé fázi stejné. V tomto případě součet $\bar{I}_1^{[0]}$, $\bar{I}_2^{[0]}$ a $\bar{I}_3^{[0]}$ není nulový a je roven proudu $\bar{I}_{ZN}^{[0]}$, respektive proudu $3\bar{I}_{(0)}^{[0]}$:

$$\bar{I}_1^{[0]} + \bar{I}_2^{[0]} + \bar{I}_3^{[0]} = \bar{I}_{ZN}^{[0]} = 3\bar{I}_{(0)}^{[0]} \neq 0 \text{ A.} \quad (1.2)$$

Dále uvažujme tuto rovnici bez $3\bar{I}_{(0)}^{[0]}$. Za předpokladu, že parametry příčných článků v každé fázi vyjádříme souhrnnými admitancemi \bar{Y}_1 , \bar{Y}_2 , \bar{Y}_3 a současném použití Ohmova zákona k vyjádření proudů těmito příčnými články v rovnici 1.2 můžeme psát:

$$\bar{Y}_1 \bar{U}_1^{[0]} + \bar{Y}_2 \bar{U}_2^{[0]} + \bar{Y}_3 \bar{U}_3^{[0]} = -\frac{\bar{U}_{(0)}^{[0]}}{\bar{Z}_N}. \quad (1.3)$$

Podle II. Kirchhoffova zákona můžeme napětí $\bar{U}_1^{[0]}$, $\bar{U}_2^{[0]}$ a $\bar{U}_3^{[0]}$ vyjádřit jako součet zdrojového napětí příslušné fáze a napětí $\bar{U}_{(0)}^{[0]}$. Aplikováním této úpravy obdržíme:

$$\bar{Y}_1 \left(\bar{U}_A + \bar{U}_{(0)}^{[0]} \right) + \bar{Y}_2 \left(\bar{U}_B + \bar{U}_{(0)}^{[0]} \right) + \bar{Y}_3 \left(\bar{U}_C + \bar{U}_{(0)}^{[0]} \right) = -\frac{\bar{U}_{(0)}^{[0]}}{\bar{Z}_N}. \quad (1.4)$$

Zdrojová napětí v jednotlivých fázích ještě vyjádříme s pomocí referenčního napětí \bar{U} fáze L_1 a operátoru natočení \bar{a} - tj. $\bar{U}_A = \bar{U}$, $\bar{U}_B = \bar{a}^2 \bar{U}$, $\bar{U}_C = \bar{a} \bar{U}$. Dosazením této úpravy do rovnice 1.4 získáme:

$$\bar{Y}_1 \left(\bar{U} + \bar{U}_{(0)}^{[0]} \right) + \bar{Y}_2 \left(\bar{a}^2 \bar{U} + \bar{U}_{(0)}^{[0]} \right) + \bar{Y}_3 \left(\bar{a} \bar{U} + \bar{U}_{(0)}^{[0]} \right) = -\frac{\bar{U}_{(0)}^{[0]}}{\bar{Z}_N}. \quad (1.5)$$

Dalšími úpravami bychom zjistili, že pro napětí $\bar{U}_{(0)}^{[0]}$ platí:

$$\bar{U}_{(0)}^{[0]} = -\frac{\bar{U}(\bar{Y}_1 + \bar{a}^2\bar{Y}_2 + \bar{a}\bar{Y}_3)}{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 + \frac{1}{\bar{Z}_N}}, \quad (1.6)$$

Rovnicí 1.6 si můžeme také ověřit, že při stejných parametrech příčných článku vedení proti zemi (výše uvažovaný zjednodušený případ) platí, že napětí $\bar{U}_{(0)}^{[0]} = 0 \text{ V}$, protože i součet $\bar{Y}_1 + \bar{a}^2\bar{Y}_2 + \bar{a}\bar{Y}_3 = 0 \text{ S}$. Pokud ale není hodnota napětí $\bar{U}_{(0)}^{[0]}$ nulová, platí, že napětí jednotlivých fází proti zemi nejsou shodná se zdrojovými napětími příslušné fáze a můžeme je určit takto:

$$\bar{U}_1^{[0]} = \bar{U}_A + \bar{U}_{(0)}^{[0]}, \quad (1.7)$$

$$\bar{U}_2^{[0]} = \bar{U}_B + \bar{U}_{(0)}^{[0]}, \quad (1.8)$$

$$\bar{U}_3^{[0]} = \bar{U}_C + \bar{U}_{(0)}^{[0]}. \quad (1.9)$$

Nyní se můžeme vrátit zpět k rovnici 1.2, která ukazuje vztah mezi $3\bar{I}_{(0)}^{[0]}$ a svodovými proudy. Přihlédneme-li k úpravě její levé strany (konečná úprava viz rovnice 1.5), můžeme vytvořit vztah pro proud $3\bar{I}_{(0)}^{[0]}$, ve kterém se vyskytuje napětí $\bar{U}_{(0)}^{[0]}$ a následně za něj dosadit podle 1.6. Finální vztah pak je:

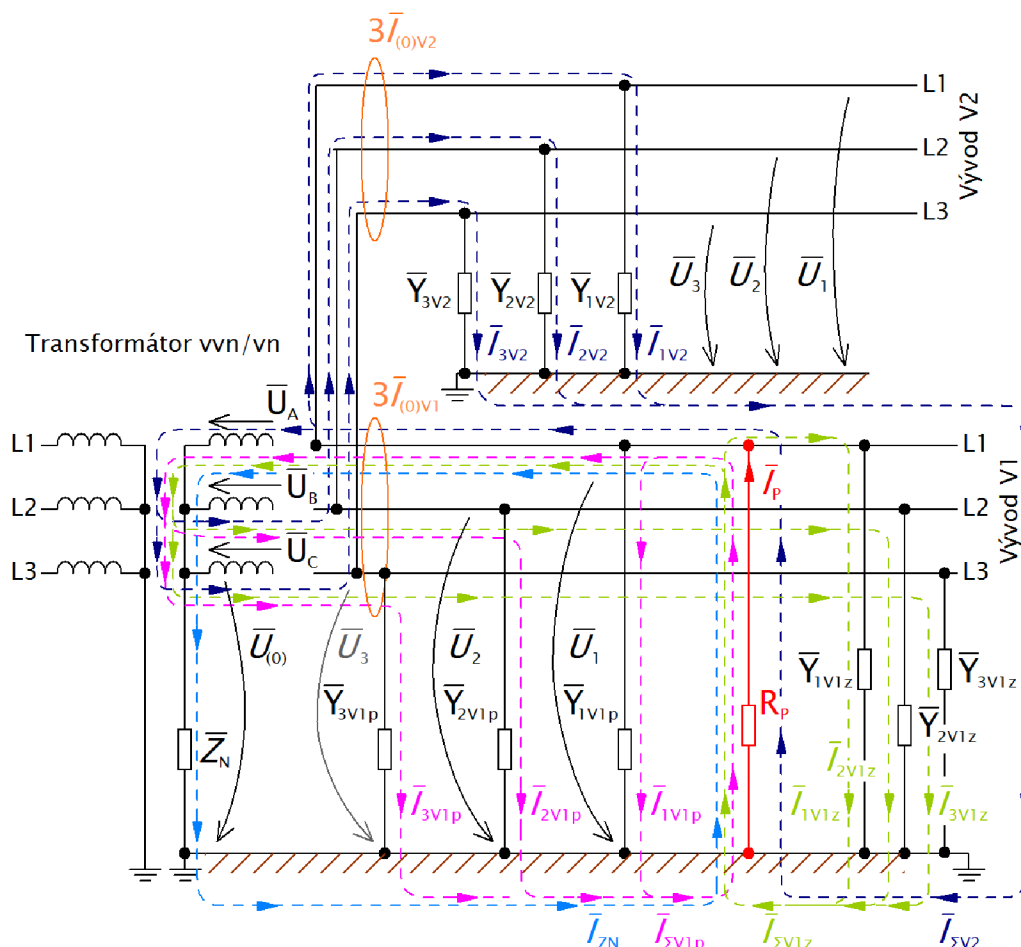
$$3\bar{I}_{(0)}^{[0]} = \bar{U}_{(0)}^{[0]}(\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3) + \bar{U}(\bar{Y}_1 + \bar{a}^2\bar{Y}_2 + \bar{a}\bar{Y}_3). \quad (1.10)$$

Podle toho vztahu můžeme tento proud teoreticky rozdělit na dvě části - levou část způsobenou napětím $\bar{U}_{(0)}^{[0]}$ a pravou část způsobeno nesymetrií svodových admitancí. Ovšem je nutné podotknout, že při symetrii svodových admitancí je $\bar{U}_{(0)}^{[0]} = 0 \text{ V}$ a tedy i $3\bar{I}_{(0)}^{[0]} = 0 \text{ A}$.

1.1.2 Situace po vzniku zemního spojení

Situaci po vzniku ZS ve fázi L_1 na vývodu $V1$ znázorňuje obrázek 1.2, který vznikl úpravou předchozího obrázku 1.1. Nově je na obrázku 1.2 označen vývod $V2$, který reprezentuje ostatní vývody sítě nepostižené ZS. Dále na tomto obrázku značí:

- \bar{Y}_1, \bar{Y}_2 a \bar{Y}_3 příčné admitance odpovídající parametrům příčných článků každé fáze proti zemi;
- R_P odpor poruchy;
- \bar{I}_P poruchový proud při ZS.
- \bar{I}_1, \bar{I}_2 a \bar{I}_3 proudy tekoucí do příčných nesymetrických článků nahrazených jejich příčnou admitancí;
- \bar{I}_Σ celkový proud tekoucí příčnými admitancemi vedení konkrétního vývodu sítě. Platí: $\bar{I}_\Sigma = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3$;



Obr. 1.2: Schéma sítě vn s obecnou impedancí \bar{Z}_N v uzlu transformátoru vvn/vn a se zemním spojením ve fázi L₁.

- dolní index v_1 veličiny a parametry týkající se vývodu V1;
- dolní index v_2 veličiny a parametry týkající se vývodu V2;
- dolní index p veličiny a parametry vedení vývodu V1 před místem ZS.
- dolní index z veličiny a parametry vedení vývodu V1 za místem ZS.

Ostatní veličiny byly už dříve popsány při obr. 1.1.

Při ZS tečou do místa poruchy proudy skrze všechny příčné admittance vedení vývodu se ZS (tzn. proudy příčnými admittancemi před i za místem ZS - $\bar{I}_{\Sigma V1p}$ a $\bar{I}_{\Sigma V1z}$) a také proudy skrze příčné admittance vedení ostatních vývodů této sítě - vyjádřeno celkovým proudem $\bar{I}_{\Sigma V2}$. Dále pak v případě že \bar{Z}_N není blízké nekonečnu (resp. \bar{Z}_N není blízké hodnotě izolačního odporu mezi uzlem transformátoru a zemí) teče do místa poruchy i proud \bar{I}_{ZN} skrze tuto uzlovou impedanci³. Všechny tyto

³Pokud $\bar{Z}_N \rightarrow \infty$ - tzn. jedná se o síť s izolovaným uzlem - tečou do místa poruchy pouze kapacitní proudy příčnými admittancemi celé sítě.

zmíněné proudy dohromady tvoří proud poruchový - \bar{I}_P , který pak teče přes odpor poruchy R_P . Poruchový proud se za místem ZS zmenšuje o proudy svodovými admitancemi postižené fáze před a za místem ZS (\bar{I}_{1V1p} a \bar{I}_{1V1z}), a takto zmenšený dále teče zpátky do uzlu zdrojových napětí. V uzlu zdrojových napětí je nakonec tento zmenšený proud rozložen na zbylé proudy, které jej předtím tvořily a které dále tečou do příslušných fází. Výše uvedenou situaci popíšeme matematicky:

$$\bar{I}_P = \bar{I}_{\Sigma V1p} + \bar{I}_{\Sigma V1z} + \bar{I}_{\Sigma V2} + \bar{I}_{Z_N}. \quad (1.11)$$

Pro další uvažování bude vhodné zavést souhrnné příčné admitance pro každou fázi. Pro tyto admitance bude platit:

$$\bar{Y}_{1S} = \bar{Y}_{1V1p} + \bar{Y}_{1V1z} + \bar{Y}_{1V2}, \quad (1.12)$$

$$\bar{Y}_{2S} = \bar{Y}_{2V1p} + \bar{Y}_{2V1z} + \bar{Y}_{2V2}, \quad (1.13)$$

$$\bar{Y}_{3S} = \bar{Y}_{3V1p} + \bar{Y}_{3V1z} + \bar{Y}_{3V2}. \quad (1.14)$$

Dále podobně jako při předešlém odvozování vyjádříme proudy z rovnice 1.11 pomocí souhrnných příčných admitancí a napětí na nich:

$$-\frac{\bar{U}_1}{R_P} = \bar{Y}_{1S}\bar{U}_1 + \bar{Y}_{2S}\bar{U}_2 + \bar{Y}_{3S}\bar{U}_3 + \frac{\bar{U}_{(0)}}{\bar{Z}_N}. \quad (1.15)$$

Následně můžeme napětí jednotlivých fází proti zemi vyjádřit pomocí zdrojových napětí a napětí $\bar{U}_{(0)}$ stejně jako ve vztahu 1.4 a 1.5:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{R_P} (\bar{U}_A + \bar{U}_{(0)}) &= \bar{Y}_{1S} (\bar{U}_A + \bar{U}_{(0)}) + \bar{Y}_{2S} (\bar{U}_B + \bar{U}_{(0)}) + \\ &+ \bar{Y}_{3S} (\bar{U}_C + \bar{U}_{(0)}) + \frac{\bar{U}_{(0)}}{\bar{Z}_N}, \end{aligned} \quad (1.16)$$

$$\begin{aligned} -\frac{1}{R_P} (\bar{U} + \bar{U}_{(0)}) &= \bar{Y}_{1S} (\bar{U} + \bar{U}_{(0)}) + \bar{Y}_{2S} (\bar{a}^2\bar{U} + \bar{U}_{(0)}) + \\ &+ \bar{Y}_{3S} (\bar{a}\bar{U} + \bar{U}_{(0)}) + \frac{\bar{U}_{(0)}}{\bar{Z}_N}. \end{aligned} \quad (1.17)$$

Po několika úpravách dospějeme k následujícímu vztahu pro napětí $\bar{U}_{(0)}$:

$$\bar{U}_{(0)} = -\frac{\bar{U} \left(\bar{Y}_{1S} + \bar{a}^2\bar{Y}_{2S} + \bar{a}\bar{Y}_{3S} + \frac{1}{R_P} \right)}{\bar{Y}_{1S} + \bar{Y}_{2S} + \bar{Y}_{3S} + \frac{1}{\bar{Z}_N} + \frac{1}{R_P}}. \quad (1.18)$$

Na vztahu 1.18 můžeme také ukázat dva specifické stavy s mezními hodnotami odporu poruchy R_P . Prvním případem je situace kovového ZS, kdy $R_P = 0 \Omega$:

$$\lim_{R_P \rightarrow 0} \bar{U}_0 = \lim_{R_P \rightarrow 0} \left[-\frac{\bar{U} \left(\bar{Y}_{1S} + \bar{a}^2 \bar{Y}_{2S} + \bar{a} \bar{Y}_{3S} + \frac{1}{R_P} \right)}{\bar{Y}_{1S} + \bar{Y}_{2S} + \bar{Y}_{3S} + \frac{1}{\bar{Z}_N} + \frac{1}{R_P}} \cdot \frac{R_P}{R_P} \right] =$$

$$= \lim_{R_P \rightarrow 0} \left\{ -\frac{\bar{U} \left[R_P \left(\bar{Y}_{1S} + \bar{a}^2 \bar{Y}_{2S} + \bar{a} \bar{Y}_{3S} \right) + 1 \right]}{R_P \left(\bar{Y}_{1S} + \bar{Y}_{2S} + \bar{Y}_{3S} + \frac{1}{\bar{Z}_N} \right) + 1} \right\} = -\bar{U}. \quad (1.19)$$

Druhým případem je situace opačná, kdy $R_P \rightarrow \infty$, tzn. síť je ve stavu bez ZS:

$$\lim_{R_P \rightarrow \infty} \bar{U}_0 = \lim_{R_P \rightarrow \infty} \left[-\frac{\bar{U} \left(\bar{Y}_{1S} + \bar{a}^2 \bar{Y}_{2S} + \bar{a} \bar{Y}_{3S} + \frac{1}{R_P} \right)}{\bar{Y}_{1S} + \bar{Y}_{2S} + \bar{Y}_{3S} + \frac{1}{\bar{Z}_N} + \frac{1}{R_P}} \right] =$$

$$= -\frac{\bar{U} \left(\bar{Y}_{1S} + \bar{a}^2 \bar{Y}_{2S} + \bar{a} \bar{Y}_{3S} \right)}{\bar{Y}_{1S} + \bar{Y}_{2S} + \bar{Y}_{3S} + \frac{1}{\bar{Z}_N}} = \bar{U}_{(0)}^{[0]}. \quad (1.20)$$

V první sledované situaci (viz vztah 1.19) je ukázáno, že při kovovém zemním spojení ($R_P = 0 \Omega$) je fázor napětí $\bar{U}_{(0)}$ co do velikosti stejný jako fázové napětí \bar{U} referenční fáze L_1 a co do směru jsou tato napětí opačná. Druhá sledovaná situace (viz vztah 1.20) pak dokazuje, že při $R_P \rightarrow \infty$, reprezentujícím stav bez ZS, je napětí $\bar{U}_{(0)}$ rovno stejnému napětí při stavu bez poruchy $\bar{U}_{(0)}^{[0]}$.

Při již známé hodnotě napětí $\bar{U}_{(0)}$ je možné zjistit hodnoty napětí jednotlivých fází proti zemi tak, že sečteme zjištěné napětí $\bar{U}_{(0)}$ se zdrojovým napětí příslušné fáze. Tedy platí:

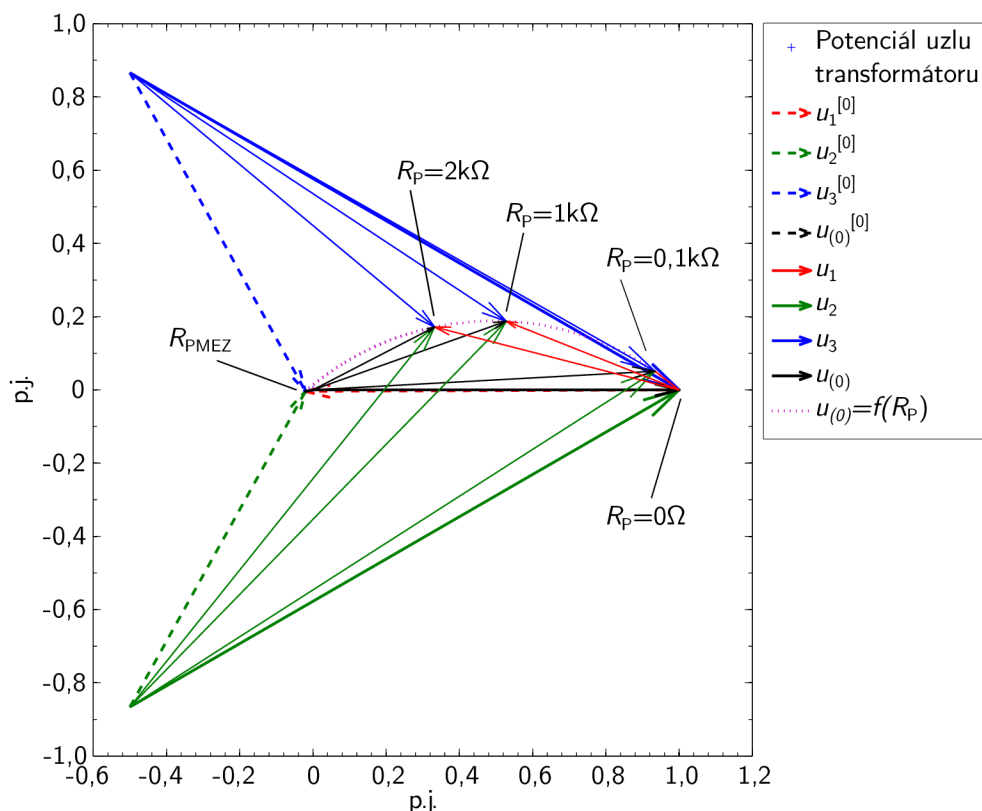
$$\bar{U}_1 = \bar{U}_A + \bar{U}_{(0)} = \bar{U} + \bar{U}_{(0)}, \quad (1.21)$$

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_B + \bar{U}_{(0)} = \bar{a}^2 \bar{U} + \bar{U}_{(0)}, \quad (1.22)$$

$$\bar{U}_3 = \bar{U}_C + \bar{U}_{(0)} = \bar{a} \bar{U} + \bar{U}_{(0)}. \quad (1.23)$$

Příklad změny jednotlivých napětí v závislosti na velikosti odporu poruchy R_P ukazuje fázorový diagram na obrázku 1.3 ⁴.

⁴Fázorový diagram je nakreslený v poměrných jednotkách, tedy i následující text, týkající se tohoto obrázku uvažuje napětí v poměrných jednotkách.



Obr. 1.3: Fázorový diagram fázových napětí proti zemi, netočivé složky napětí a jejich změn v mírně překompenzované síti při hodnotách odporu ZS $R_P = \{0; 0,1; 1; 2\}$ k Ω . Získáno prostřednictvím matematického modelu ZS.

Prvním případem na obrázku 1.3 je kovové ZS ($R_P = 0 \Omega$). Z fázorového diagramu je patrné to, co už bylo popsáno dříve - tj. při kovovém ZS je napětí $\bar{u}_{(0)}$ stejně velké, ale opačného směru než bylo napětí proti zemi $\bar{u}_1^{[0]}$ ve stavu před poruchou. Nově zvýšená hodnota napětí $\bar{u}_{(0)}$ má za následek posun uzlu fázových napětí proti zemi, a tedy dochází ke zvýšení napětí nepostižených fází proti zemi \bar{u}_2 a \bar{u}_3 . Konkrétně v případě kovového ZS to je vždy na jejich sdruženou hodnotu. Napětí fáze postižené ZS \bar{u}_1 je pak rovno nule.

Se zvyšujícím se odporem ZS dochází ke zmenšování velikosti napětí $\bar{u}_{(0)}$ a změně jeho natočení. Uzel fázových napětí proti zemi se tak posouvá po křivce (na obrázku 1.3 je tato křivka znázorněna tečkovaně)⁵ směrem k uzlu fázových napětí při bezporuchovém stavu (tato napětí jsou znázorněna čárkovaně). Při tomto posunu se mění i velikost fázorů napětí \bar{u}_2 a \bar{u}_3 , jejichž velikost klesá. Fázor napětí postižené fáze proti zemi \bar{u}_1 se naopak zvětšuje. Takto je situace ukázána pro ZS o odporu $R_P = 0,1, 1$ a 2 k Ω .

⁵V případě, že se jedná o izolovanou síť, kde $\bar{Z}_N \rightarrow \infty$, je zmíněná křivka Thaletovou kružnicí nad přepónou napětí \bar{u}_1 - tj. napětí té fáze, na které vznikne ZS.

Stavem, kdy napětí jednotlivých fází jsou stejná jako tato napětí při bezporuchovém stavu, je ZS o mezním odporu R_{PMEZ} . V tomto stavu je hodnota napětí $\bar{u}_{(0)}$ minimální (ideálně blízká nule) a odpovídá pouze nesymetrii sítě. Zjišťovat takovou hodnotu R_{PMEZ} , ale nemá praktický význam, protože napětí $\bar{u}_{(0)}$ se neustále mění a v závislosti na změně konfigurace sítě může být jeho hodnota i nad 10% a o ZS v síti se jednat nemusí. Jako smysluplná velikost napětí $u_{(0)}$, od které můžeme uvažovat, že v síti nastalo ZS se pokládá 20% hodnoty fázového napětí u [8]. Starší, ale stále platná norma ČSN 33 3070 dokonce uvažuje hodnotu 33% u . Při těchto vyšších hodnotách napětí může být R_{PMEZ} v řádu jednotek k Ω v závislosti na rozsahu sítě a její konfiguraci.

Jelikož už víme, jak vypadá napětí $\bar{U}_{(0)}$ při ZS, můžeme vytvořit vztah pro poruchový proud \bar{I}_{P} z rovnice 1.11. Při uvažování pouze pravých stran rovnic 1.15 až 1.17 můžeme psát:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{\text{P}} &= \bar{Y}_{1\text{S}} (\bar{U} + \bar{U}_{(0)}) + \bar{Y}_{2\text{S}} (\bar{a}^2 \bar{U} + \bar{U}_{(0)}) + \bar{Y}_{3\text{S}} (\bar{a} \bar{U} + \bar{U}_{(0)}) + \frac{\bar{U}_{(0)}}{\bar{Z}_{\text{N}}} = \\ &= \bar{U}_{(0)} \left(\bar{Y}_{1\text{S}} + \bar{Y}_{2\text{S}} + \bar{Y}_{3\text{S}} + \frac{1}{\bar{Z}_{\text{N}}} \right) + \bar{U} (\bar{Y}_{1\text{S}} + \bar{a}^2 \bar{Y}_{2\text{S}} + \bar{a} \bar{Y}_{3\text{S}}). \quad (1.24)\end{aligned}$$

Nakonec odvodíme vztah i pro netočivou složku proudu $\bar{I}_{(0)}$, kterou měříme jako $3\bar{I}_{(0)}$ na začátku každého vývodu (viz kap. 2.2.1). V případě vzniku ZS na monitorovaném vývodu je tento měřený proud součtem poruchového proudu zmenšeného o svodový proud fáze, ve které je ZS (proud \bar{I}_{P} teče směrem do zdroje napětí) a dále se k němu přičítají svodové proudy zbylých fází vývodu, ve kterém je ZS (resp. odečítají, protože tyto proudy mají směr od zdroje napětí). Tuto situaci je možné vyčíst také z obrázku 1.2. Ve výsledku je měřený proud $3\bar{I}_{(0)\text{V1}}$ roven součtu proudů skrze příčné admitance vedení ostatních vývodů celé sítě a skrz uzlovou impedanci \bar{Z}_{N} . Matematicky to můžeme vyjádřit takto:

$$\begin{aligned}3\bar{I}_{(0)\text{V1}} &= \bar{I}_{\text{P}} - \bar{I}_{1\text{V1p}} - \bar{I}_{1\text{V1z}} - \bar{I}_{2\text{V1p}} - \bar{I}_{2\text{V1z}} - \bar{I}_{3\text{V1p}} - \bar{I}_{3\text{V1z}} = \\ &= \bar{I}_{\text{P}} - \bar{I}_{\Sigma\text{V1p}} - \bar{I}_{\Sigma\text{V1z}} = \bar{I}_{\Sigma\text{V2}} + \bar{I}_{\text{ZN}}, \quad (1.25)\end{aligned}$$

kde $\bar{I}_{\Sigma\text{V2}}$ můžeme vyjádřit obdobně jako proud $3\bar{I}_{(0)}^{[0]}$ ve vztahu 1.10, protože se de facto jedná o vývod bez ZS ale s jinými hodnotami napětí fází proti zemi. Proud \bar{I}_{ZN} zase vyjádříme pomocí \bar{Z}_{N} a $\bar{U}_{(0)}$. Aplikováním těchto úprav pak docílíme finálního vztahu pro proud $3\bar{I}_{(0)\text{V1}}$, který obsahuje napětí:

$$\begin{aligned}3\bar{I}_{(0)\text{V1}} &= \bar{U}_{(0)} (\bar{Y}_{1\text{V2}} + \bar{Y}_{2\text{V2}} + \bar{Y}_{3\text{V2}}) + \bar{U} (\bar{Y}_{1\text{V2}} + \bar{a}^2 \bar{Y}_{2\text{V2}} + \bar{a} \bar{Y}_{3\text{V2}}) + \frac{\bar{U}_{(0)}}{\bar{Z}_{\text{N}}} = \\ &= \bar{U}_{(0)} \left(\bar{Y}_{1\text{V2}} + \bar{Y}_{2\text{V2}} + \bar{Y}_{3\text{V2}} + \frac{1}{\bar{Z}_{\text{N}}} \right) + \bar{U} (\bar{Y}_{1\text{V2}} + \bar{a}^2 \bar{Y}_{2\text{V2}} + \bar{a} \bar{Y}_{3\text{V2}}) \quad (1.26)\end{aligned}$$

Druhý, měřený proud $3\bar{I}_{(0)V2}$ na vývodu V2, který je bez ZS, již není třeba vyjadřovat, protože je stejný jako proud $3\bar{I}_{(0)}^{[0]}$ u vývodu při bezporuchovém stavu. Ten jsme již určili vztahem 1.10, ve kterém dojde akorát k aktualizaci netočivé složky napětí:

$$3\bar{I}_{(0)V2} = \bar{U}_{(0)} (\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3) + \bar{U} (\bar{Y}_1 + \bar{a}^2\bar{Y}_2 + \bar{a}\bar{Y}_3). \quad (1.27)$$

Z porovnání výše uvedených vztahů 1.26 a 1.27 pak plyne, že proud netočivá složka proudu na vývodu se ZS navíc obsahuje část tvořenou proudem impedancí \bar{Z}_N . Tuto odlišnost s výhodou používají zemní ochrany při lokalizaci vývodu se ZS (viz. část 2.2).

1.2 Zemní spojení v kompenzované síti

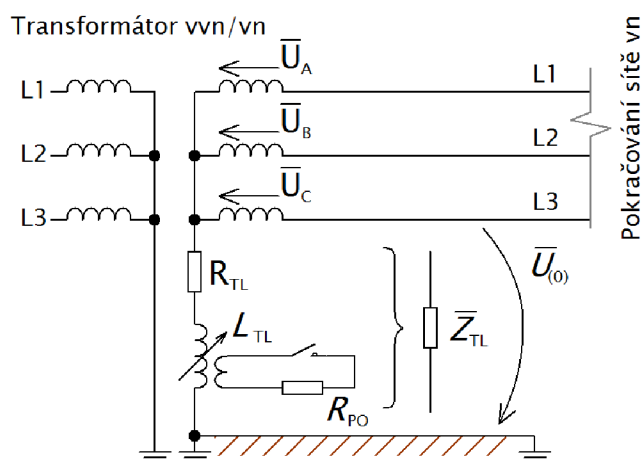
Poruchový proud \bar{I}_P zemního spojení, který jsme v předchozí části odvodili a popsali, je ze své podstaty kapacitního charakteru (je převážně tvořen proudy skrze příčné kapacity sítě). Tohoto faktu lze využít a kapacitní charakter proudu kompenzovat tak, aby proud \bar{I}_P byl minimální - tzn. aby jej tvořila pouze malá činná složka, kterou kompenzovat nelze. Na tomto principu fungují právě kompenzované sítě. V této podkapitole je popsána hlavní výhoda kompenzovaných sítí a dále pak přizpůsobení doposud odvozených vztahů.

Kompenzované sítě mají uzel transformátoru vvn/vn nepřímo uzemněný přes zhášecí tlumivku (viz obrázek 1.4), která je někdy také označována jako rezonanční⁶ nebo Petersenova (podle svého vynálezce⁷). Po úplné kompenzaci pak místem poruchy prochází pouze zbytkový (reziduální) proud \bar{I}_P , který je převážně činného charakteru, protože protéká skrze vodivost sítě a vodivost zhášecí tlumivky. Velikostně je obvykle $3 \div 10\%$ z nekompenzovaného kapacitního proudu [3]. Namísto zhášecí tlumivky lze použít i Bauchův transformátor, který sice nevyžaduje uzemnění, ale za to je nákladnější a v praxi tedy nerozšířený [9].

Kompenzace zemního kapacitního proudu ZS je navíc doporučována podle normy ČSN 33 3070 od jeho hodnoty 10 A [3]. Při zemních kapacitních proudech nad 20 A je podle této normy jejich kompenzace už nutná. Přitom u venkovních vedení sítí 22 kV lze počítat s měrným kapacitním proudem 0,063 A/km délky vedení [4], zatímco u kabelových sítí 22 kV lze orientačně počítat s měrným kapacitním proudem $3,5 \div$

⁶Resonanční tlumivka proto, že plynulou regulací se mění indukčnost tlumivky a ladí se do stavu paralelní resonance s příčnou kapacitou sítě - tedy do stavu, kdy induktivní reaktance je rovna kapacitní reaktanci.

⁷Waldemar Petersen (1880-1946) - německý vědec a profesor na univerzitě v Darmstadtu. Zhášecí tlumivku vynalezl v roce 1917. [10]



Obr. 1.4: Zapojení zhášecí tlumivky do uzlu transformátoru vvn/vn a připojení odporu pomocného odporníku.

4,5 A/km délky vedení [7] v závislosti na průřezu kabelu, jeho konstrukci nebo druhu použité izolace ⁸.

Omezení zemního kapacitního proudu jeho kompenzací má své odůvodnění především ve snížení rizika úrazu nebezpečným krokovým nebo dotykovým napětím v místě ZS. V důsledku toho má své limity také provozování kompenzovaných sítí a to podle výše uvedené normy ČSN 33 3070 až do velikosti zemního kapacitního proudu sítě:

- 100 A v případě venkovních sítí s podílem nejméně 98% v celé síti;
- 300 A v případě sítí smíšených (nejméně 10% venkovního vedení a 2% kabelového vedení);
- 450 A v případě sítí kabelových s podílem nejméně 90% v celé síti. [3]

Právě s ohledem na tato omezení je mnohdy nutné rozdělit síť na více menších oblastí napájených ze samostatných transformátorů, i když by výkonově stačil jen jeden pro celou síť. Na výše uvedená omezení naráží také i rozsáhlé kabelové sítě (například v městských oblastech) a proto bývá výhodnější takové rozsáhlé sítě provozovat jako uzemněné přes rezistanci ⁹, bez výhod kompenzovaných sítí. Bezpečné krokové a

⁸Například pro kabely 22-AXEKCE výrobce NKT Cables vychází měrný kapacitní proud $1,22 \div 3,16$ A/km při průřezech kabelů $35 \div 500$ mm² a při předpokladu že $C_0 = 0,6C_P$. Vypočítáno z údajů z katalogu výrobce NKT Cables [11].

⁹Provozování kabelových sítí jako uzemněné přes rezistanci bylo v minulosti časté i v případě, že zemní kapacitní proud byl nižší než 450 A podle normy ČSN 33 3070. Důvodem bylo, že tehdy používané kabely disponovaly papírovou izolací, která ale rychle degradovala a špatně snášela vysoká napětí (při ZS mohou vzrůst napětí jednotlivých fází proti zemi až na jejich sdruženou hodnotu). Dnešní kabely s kvalitní polyethylenovou izolací již tímto neduhem netrpí, a tedy je možné kabelové sítě při přiměřeném rozsahu provozovat jako kompenzované [12]. I tak je ale v ČR

dotykové napětí při ZS lze v kompenzovaných sítích zajistit také pomocí šentování (více v části 1.3). Bezpečnost tohoto principu se v ČR úspěšně testovala u sítí se zemním kapacitním proudem až 800 A [14].

V návaznosti na dřívější odvozování vztahů při ZS dochází u kompenzovaných sítí ke změně dříve obecné uzlové impedance \bar{Z}_N . Ta nyní přechází v impedanci zhášecí tlumivky \bar{Z}_{TL} tak, jak to je znázorněno na obrázku 1.4. Tato impedance se blíže skládá ze sériové kombinace laditelné zhášecí tlumivky o indukčnosti L_{TL} a odporu jejího vinutí R_{TL} . Do pomocného výkonového vinutí zhášecí tlumivky je pak možnost připínání pomocného odporníku o odporu R_{PO} (více o jeho přínosu viz část 1.3). Celkově tedy můžeme impedanci \bar{Z}_{TL} vyjádřit takto:

$$\bar{Z}_{TL} = \left(\frac{1}{R_{TL} + j\omega L_{TL}} + \frac{1}{R_{PO_{prim}}} \right)^{-1} = \bar{Z}_N, \quad (1.28)$$

kde $R_{PO_{prim}}$ je hodnota připínaného pomocného odporníku vztažená k primárnímu vinutí zhášecí tlumivky.

Kompenzace zemního kapacitního proudu sítě je ukázána na obrázku 1.5, který zjednodušeně vyjadřuje situaci v místě ZS z obrázku 1.2. V tomto fázorovém diagramu značí \bar{I}_{C2} a \bar{I}_{C3} souhrnné proudy skrze příčné kapacity proti zemi fází L_2 a L_3 v celé síti, proud $\bar{I}_{C2,3}$ je jejich součtem. Analogicky \bar{I}_{G2} a \bar{I}_{G3} značí proudy skrze příčné vodivosti výše uvedených fází a proud $\bar{I}_{G2,3}$ je jejich součtem. Součet proudů skrze příčné prvky sítě ($\bar{I}_{C2,3} + \bar{I}_{G2,3}$ ¹⁰) je ale kompenzován proudem \bar{I}_{TL} a výsledkem je poruchový proud \bar{I}_P , který je téměř výhradně činného charakteru¹¹. Proud \bar{I}_{TL} není vzhledem k napětí $\bar{U}_{(0)}$ ryze induktivní, protože uvažujeme i sériový odpor R_{TL} zhášecí tlumivky.

Obdobně můžeme situaci ohledně kompenzace zemního kapacitního proudu ukázat také matematicky. Budeme vycházet ze vztahu 1.24 pro proud \bar{I}_P , ve kterém přechází impedance \bar{Z}_N v impedanci \bar{Z}_{TL} :

$$\bar{I}_P = \bar{U}_{(0)} \left(\bar{Y}_{1S} + \bar{Y}_{2S} + \bar{Y}_{3S} + \frac{1}{\bar{Z}_{TL}} \right) + \bar{U} \left(\bar{Y}_{1S} + \bar{a}^2 \bar{Y}_{2S} + \bar{a} \bar{Y}_{3S} \right) \quad (1.29)$$

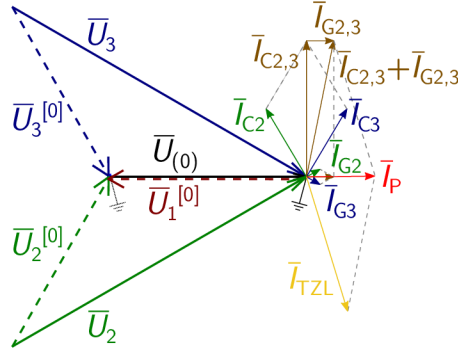
Tuto rovnici zkusíme blíže analyzovat.

V rovnici 1.29 rozepíšeme admittance sítě a převrácenou hodnotu impedance \bar{Z}_{TL} v prvním sčítanci na jejich reálné a imaginární části. Dále budeme předpokládat, že síť je symetrická, a tedy druhý sčítanec ve vztahu 1.29 bude roven nule. Po uvedených

stále velké procento starých kabelů s papírovou izolací. Konkrétně v oblasti Tábora je podle údajů uváděných v roce 2012 60% takovýchto kabelů [13, s. 54]

¹⁰Na obrázku 1.2 to odpovídá součtu proudů $\bar{I}_{\Sigma V1p} + \bar{I}_{\Sigma V1z} + \bar{I}_{\Sigma V2}$

¹¹Proud \bar{I}_P v reálné situaci může být mírně kapacitního nebo indukčního charakteru a to v závislosti v jakém poměru je celková příčná vodivost sítě a vodivost zhášecí tlumivky.



Obr. 1.5: Fázorový diagram napětí a proudů v místě kovového ZS při kompenzaci zemního kapacitního proudu.

úpravách:

$$\bar{I}_P = \bar{U}_{(0)} \left(\operatorname{Re} \left\{ \bar{Y}_{1S} + \bar{Y}_{2S} + \bar{Y}_{3S} + \frac{1}{\bar{Z}_{TL}} \right\} + j \cdot \operatorname{Im} \left\{ \bar{Y}_{1S} + \bar{Y}_{2S} + \bar{Y}_{3S} + \frac{1}{\bar{Z}_{TL}} \right\} \right). \quad (1.30)$$

Jak už bylo dříve řečeno, kompenzace se týká kapacitní části poruchového proudu - tedy té imaginární. Pro úplnou kompenzaci tedy musí platit:

$$\operatorname{Im} \{ \bar{Y}_{1S} + \bar{Y}_{2S} + \bar{Y}_{3S} \} = \operatorname{Im} \left\{ \frac{1}{\bar{Z}_{TL}} \right\}, \quad (1.31)$$

kde namísto imaginárních částí souhrnných příčných admitancí můžeme psát jejich susceptance vyjádřené souhrnnými příčnými kapacitami sítě A namísto imaginární části převrácené hodnoty impedance \bar{Z}_{TL} , můžeme psát převrácenou hodnotu její reaktance za předpokladu, že $\omega L_{TL} \gg R_{TL}$. Po těchto úpravách dostaneme:

$$\omega C_{1S} + \omega C_{2S} + \omega C_{3S} = \frac{1}{\omega L_{TL}}. \quad (1.32)$$

Pro indukčnost zhášecí tlumivky tedy musí platit:

$$L_{TL} = \omega^2 (C_{1S} + C_{2S} + C_{3S}). \quad (1.33)$$

Při dodržení podmínky rovnice 1.33 tedy platí, že imaginární část poruchového proudu \bar{I}_P je nulová. Tento proud tak má pouze složku reálnou, která je malá (obvykle 3 – 10% nekompenzovaného kapacitního proudu [3]), a která je způsobena svodovými vodivostmi jednotlivých fází proti zemi a odporem zhášecí tlumivky.

Pro další práci a popis zemního spojení v sítích vn bude užitečně zde uvést poměrné parametry sítě jako je nesymetrie, rozladění a tlumení. Vztahy pro tyto parametry uvedeme bez dalšího odvozování. Jako zdroj v tomto případě byly použity zdroje [3] a [15]. Na základě vlastních výpočtů pak byly tyto vzorce přizpůsobeny tak, aby uvažovaly impedanci zhášecí tlumivky a odpor ZS.

Nesymetrie \bar{k} :

$$\bar{k} = \frac{\bar{Y}_{1S} + \bar{a}^2 \bar{Y}_{2S} + \bar{a} \bar{Y}_{3S} + \frac{1}{R_P}}{j\omega (C_{1S} + C_{2S} + C_{3S})}. \quad (1.34)$$

Rozladění ν :

$$\nu = \frac{1}{\text{Im} \cdot \{\bar{Z}_{TL}\} \omega (C_{1S} + C_{2S} + C_{3S})} - 1. \quad (1.35)$$

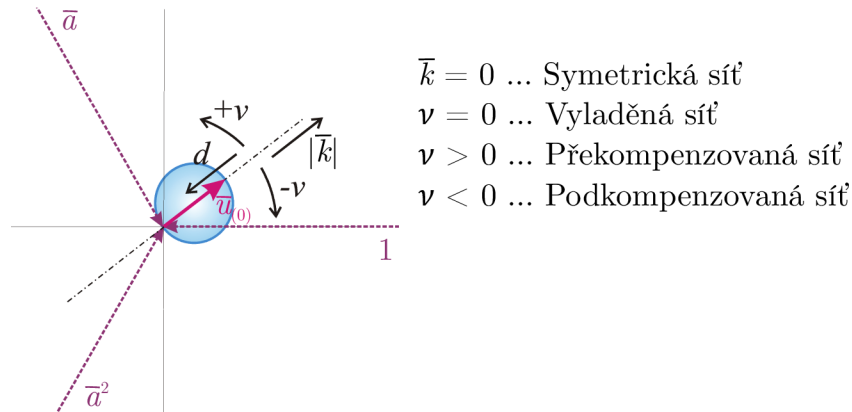
Tlumení d :

$$d = \frac{G_{1S} + G_{2S} + G_{3S} + \text{Re} \left\{ \frac{1}{\bar{Z}_{TL}} \right\} + \frac{1}{R_P}}{\omega (C_{1S} + C_{2S} + C_{3S})}. \quad (1.36)$$

Ve výše uvedených vztazích se vyskytují souhrnné parametry sítě v jednotlivých fázích - tj. příčná admitance, kapacita a konduktance. Dále se ve vztazích 1.34 a 1.36 vyskytuje navíc i převrácená hodnota odporu R_P , která je však při bezporuchovém stavu nulová. Pomocí nesymetrie, rozladění a tlumení sítě pak lze také definovat i poměrnou hodnotu netočivé složky napětí $\bar{u}_{(0)}$ jako:

$$\bar{u}_{(0)} = \frac{\bar{k}}{\nu + jd}. \quad (1.37)$$

Dílčí vliv jednotlivých poměrných parametrů sítě na napětí $\bar{u}_{(0)}$ pak vystihuje následující obrázek 1.6.



Obr. 1.6: Vliv nesymetrie, rozladění a tlumení na napětí $\bar{u}_{(0)}$. Upraveno z [3]

1.3 Reálné zemní spojení v kompenzované síti

Zemní spojení v kompenzované síti bylo doposud popsáno pouze zjednodušeně a z teoretického hlediska. Pohled na reálné ZS je ale víc komplexnější. V praxi se

tak například hodnotí různé typy ZS, které jsou charakteristické svými průběhy netočivých složek proudu a napětí. Tyto průběhy nemusí být vždy takové, jaké jsou ideální z pohledu vyhodnocování vzniku ZS příslušnými ochranami. Proto se v kompenzovaných sítích často používá automatika připínání pomocného odporníku. Dále například z hlediska zajištění větší bezpečnosti při ZS se v rozvodnách vvn/vn zavádí šentování. A v neposlední řadě i samotné kompenzované sítě nemusí být vždy provozovány jako zcela vyladěné s ohledem na možné stavy po vzniku ZS. Všechny tyto výše uvedené pohledy na ZS v kompenzovaných sítích a aplikované principy jsou více rozvedeny právě v této podkapitole.

Rozdělení zemních spojení podle [4]:

- Podle velikosti přechodového odporu v místě ZS na:
 - Kovová ZS - hodnota přechodového odporu $R_P \rightarrow 0 \Omega$;
 - Oblouková ZS - hodnota R_P je v řádu několika jednotek Ω ;
 - Odporová ZS - hodnota R_P je v řádu několika set Ω . ZS s $R_P > 1000 \Omega$ se považují za vysokoodporová ZS;
- Podle doby trvání ZS na:
 - Mžiková ZS - do 0,5 s;
 - Krátkodobá ZS - do 5 min;
 - Přerušovaná ZS - jedná se o mžiková nebo krátkodobá ZS, která se po sobě několikrát opakují;
 - Trvalá ZS - od 5 min až do okamžiku odstranění poruchy (i několik hodin);

Na venkovních vedeních bývají ZS často krátkodobá a rychle zanikají (např. na vedení spadlá větev shoří) [7]. Pokud ale ZS trvá, nebo je přerušovaného typu, je vždy nutné ho vyhledat a odstranit, protože pokud by došlo ke spojení jiné fáze se zemí, vznikl by dvoufázový zemní zkrat. Často takto dochází ke vzniku ZS v obdobích růstu vegetace, která zasahuje do vedení. Podobně tomu je i za bouřek, silných větrů a námrazy (viz ukázka na obrázku 1.7a). V případě přerušovaných ZS navíc vznikají nežádoucí přepětí, která nepřiměřeně namáhají jiná slabá místa v síti, dál je oslabují a pokud na nich nedojde k průrazu, tak je pravděpodobnější vznik příštího ZS právě na těchto místech. Účinky samotného ZS mohou mnohdy být i silně destruktivní - například při ZS přes konzolu a sloup vedení (viz ukázka na obrázku 1.7b). Na rozdíl od venkovních vedení vznikají u kabelových sítí nejčastěji trvalá ZS, která pak ve většině případů přechází ve zkraty [7]. Všeobecně ale platí, že pravděpodobnost vzniku ZS na venkovních vedeních je vždy několikanásobně vyšší než u těch kabelových.

Kovová ZS většinou vznikají v místech s dobrým uzemněním jako jsou například spínací stanice vn nebo trafostanice vvn/vn [16]. Příklad průběhů netočivých složek proudu $I_{(0)}$ a napětí $U_{(0)}$ a poruchového proudu I_f a napětí proti zemi fáze postižené

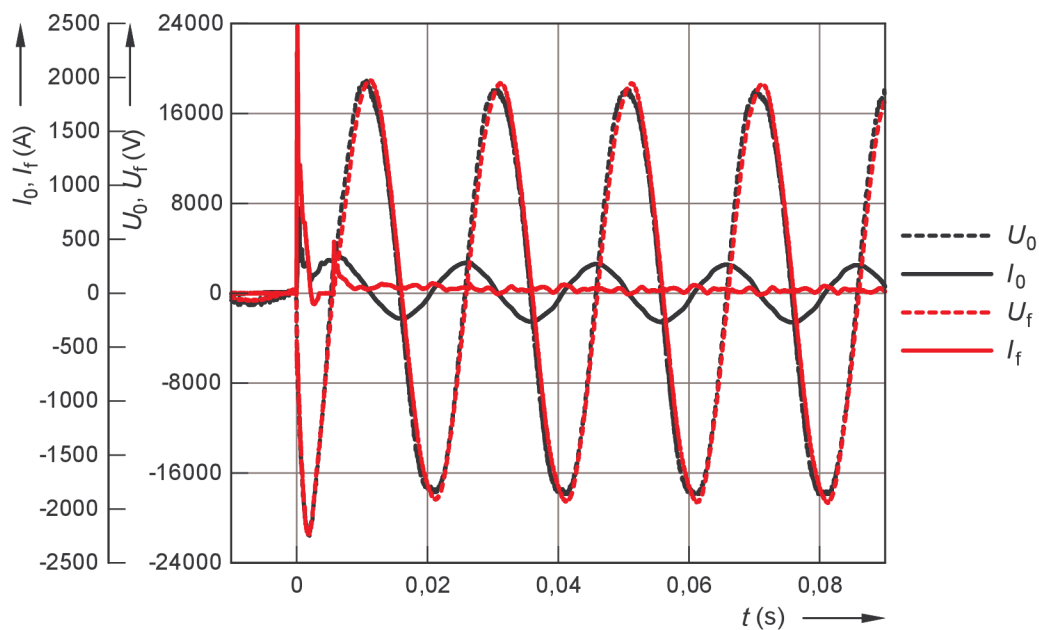


Obr. 1.7: Reálné ZS: (a) vznik ZS pádem stromu na vedení a (b) destruktivní následky ZS přes konzolu a sloup vedení. Převzato z [17] a [18].

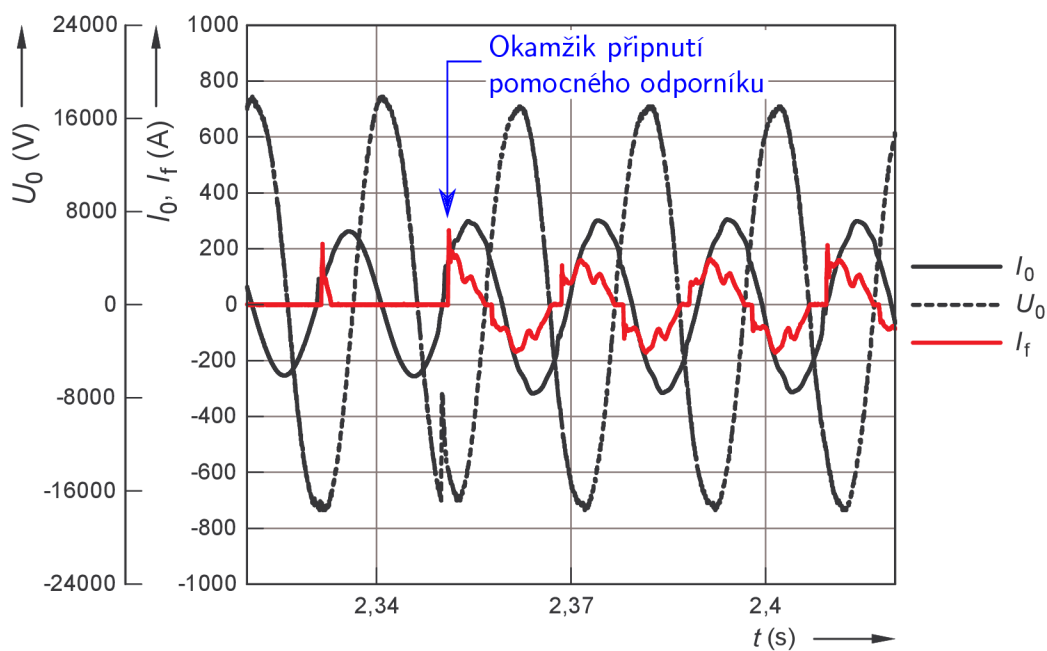
ZS U_f pro kovové ZS v kabelové síti jsou ukázány na obrázku 1.8. Transientní jev proudu I_f při tomto ZS v kabelové síti je jen minimálně tlumený, a proto je tento typ ZS bezproblémově detekovatelný [3]. V případě kovového ZS v síti s venkovním vedením je špička transientního jevu více tlumená díky rezistanci postiženého vývodu [16], ale stále je znatelně velká a rozpoznatelná.

Oblouková ZS jsou charakteristická krátkodobým přerušováním hoření oblouku (přerušované ZS). To následně vede k opakovanému vybíjení kapacit sítě a tedy ke vzniku krátkodobých přepětí v síti. Příklad průběhů netočivých složek proudu $I_{(0)}$ a napětí $U_{(0)}$ a poruchového proudu I_f takového obloukového ZS je ukázán na obrázku 1.9 do času 2,34s. Dále pak dochází k připnutí pomocného odporníku (vysvětleno dále), hoření oblouku je stabilizováno a tedy i podmínky pro spolehlivé detekování vývodu s tímto ZS jsou příhodnější.

Odporová ZS jsou nejčastějším případem ZS ve venkovních vedeních. Hlavním rysem těchto ZS je podstatné tlumení transientních jevů a následně i nízká hodnota poruchového proudu a netočivého napětí, což pak komplikuje detekci ZS. Při vysokoodporových ZS ($R_p > 1000 \Omega$ - tj. např. vodič spadlý na asfaltovou cestu, na betonový povrch nebo kontakt vodiče s větví stromu) dokonce nemusí dojít k překročení nastavené popudové hodnoty netočivé složky napětí (o metodách detekce ZS více v části 2.2). Následně pak nedochází ani k sepnutí automatiky připínání



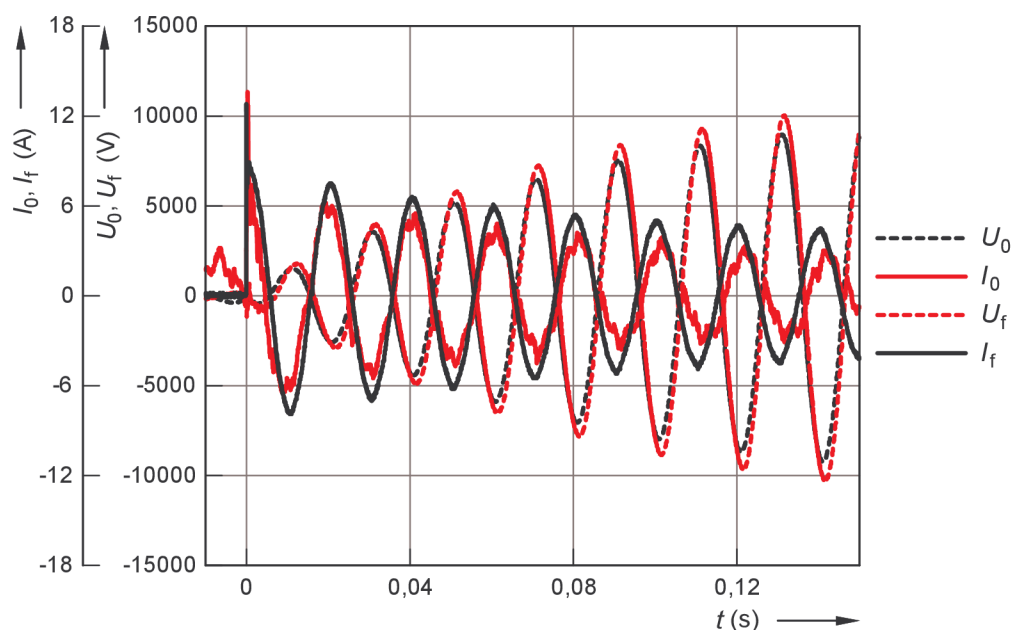
Obr. 1.8: Průběhy proudů a napětí kovového ZS v kabelovém vývodu městské sítě s celkovým kapacitním proudem $I_C = 302$ A. Zdroj [16]



Obr. 1.9: Průběhy proudů a napětí obloukového ZS v kabelovém vývodu s ukázáním vlivu připnutí pomocného odporníku. Zdroj [16]

pomocného odporníku (také viz dále) a celkově nedochází k zaznamenání ZS vůbec [16]. Příklad průběhů netočivých složek proudu $I_{(0)}$ a napětí $U_{(0)}$ a poruchového proudu I_f a napětí proti zemi fáze postižené ZS U_f je ukázán na obrázku 1.10, kde v

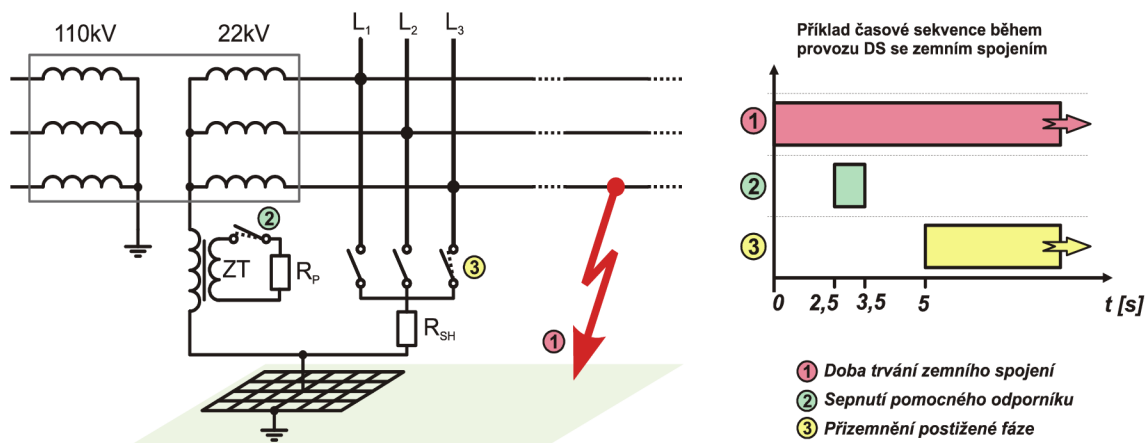
porovnání s obrázky 1.8 a 1.9 lze pozorovat znatelné zmenšení amplitud měřených proudů.



Obr. 1.10: Průběhy proudu a napětí odporového ZS s $R_P = 1600 \Omega$ na konci venkovního vedení sítě s kapacitním proudem $I_C = 130 \text{ A}$. Zdroj [16]

Automatika připínání pomocného odporníku je nástroj, který zvyšuje podíl činné složky poruchového proudu a umožňuje tak snazší detekci vývodu postiženého ZS v kompenzovaných sítích. Pomocný odporník (PO) se připíná paralelně ke zhašecí tlumivce, nejčastěji do pomocného výkonového vinutí této tlumivky. Výsledkem pak je zvýšená vodivost tlumivky a činná složka procházejícího poruchového proudu, tedy i velikost tohoto proudu. V případě bez připnutého PO a ideálně vyladěné zhašecí tlumivky se totiž příčné kapacity sítě kompenzují indukčností tlumivky a velikost poruchového proudu je tak minimální. Automatika připíná PO vždy jen na nezbytnou dobu potřebnou k vyhodnocování ochran - obvykle na 1 s [3]. Schéma připínání PO spolu s příkladem časové sekvence jeho připojení je ukázáno na obrázku 1.11. Ukázka vlivu připojení PO je pozorovatelná na obrázku 1.9.

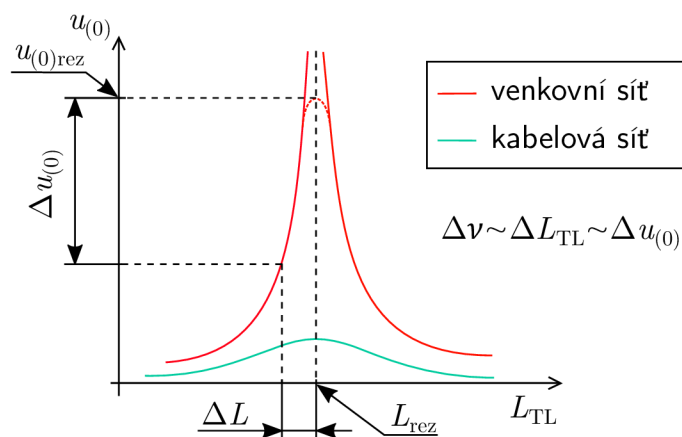
Šentování je přizemnění zemním spojením postižené fáze v místě napájecí rozvodny, což má za následek přenesení podstatné části poruchového proudu z místa poruchy do místa přizemnění v důsledku vytvoření nové paralelní cesty s nižší impedancí pro poruchový proud. Přenesení proudu z místa poruchy do místa přizemnění eliminuje riziko úrazu krokovým a dotykovým napětím a omezuje tepelné účinky



Obr. 1.11: Schéma připínání pomocného odporníku a šentování zemním spojením postižené fáze s časovou sekvencí jednotlivých úkonů. Převzato z [3]

poruchového proudu na prvky v místě ZS [3]. Navíc šentování má pozitivní efekt také v případě obloukových ZS, kdy po přizemnění postižené fáze často dochází k uhasnutí oblouku ZS [14]. K šentování dochází vždy až po detekování postiženého vývodu zemní ochranou - viz ukázka časové sekvence na obrázku 1.11.

Úroveň kompenzace sítě při jejím provozování je určena nastavením indukčnosti zhášecí tlumivky na hodnotu L_{rez} při rezonančním napětí $u_{(0)rez}$ podle rezonanční křivky sítě (viz příklad na obrázku 1.12). Obecně je současným trendem provozovat sítě jako zcela vykompenzované, aby místem ZS procházel co nejmenší proud [3, s. 79]. V případě sítí, které mají velmi strmou rezonanční křivku (tj. nesy-metrické sítě, sítě s venkovními vedeními) je ale výhodné tlumivky rozladit o hodnotu $\pm\Delta L$ a napětí $u_{(0)}$ na tlumivce tak výrazně klesne [7]. Uzel transformátoru proti zemi je pak méně namáhán. Při tomto rozladění však velikost zbytkového proudu má být do 10% celkového zemního kapacitního proudu [4]. To jestli se při tomto rozladění vznikne podkompenzovaný nebo překompenzovaný stav, závisí mnohdy na místních zvyklostech. Někdy bývá žádoucí podkompenzovaný stav, protože při vyhledávání ZS dochází k odpínání částí sítě a po jejich odepnutí se pak síť více blíží ke kom-penzovanému stavu (v opačném případě by síť byla ještě více překompenzovaná než před odepnutím její části a místem ZS by tak procházel větší proud). Naopak pře-kompenzovaný stav eliminuje právě tu možnost, kdy po odepnutí části sítě nastane kompenzovaný stav - rezonance - a napětí $u_{(0)}$ strmě vzroste [19, s. 5]. Úroveň kom-penzace sítě ovlivňuje také fakt, že je možné kompenzovat zemní kapacitní proud pouze základní harmonické [3, s. 79].



Obr. 1.12: Příklad rezonanční křivky zhášecí tlumivky připojené do venkovní a kabelové sítě. Upraveno z [20]

Vliv ZS v síti vn na odběratele připojeného do sítě nn je nulový, protože sdružená napětí sítě vn zůstávají neměnná a transformátor vn/nn je výhradně v zapojení Dyn1. Díky tomu jsou napětí indukovaná na sekundární straně tohoto transformátoru stejná jako v bezporuchovém stavu.

2 OCHRANY PŘI ZEMNÍCH SPOJENÍCH

Z předchozích kapitol jsme se dozvěděli že vznik ZS neznamena nutné vypínání sítě. Stále je ale třeba upozornit na tento mimořádný stav, aby bylo možné zjistit přibližné místo poruchy, vyslat tam technickou obsluhu daného provozovatele distribuční sítě a poruchu opravit. Zemní spojení jiné fáze by totiž znamenalo dvoufázový zemní zkrat, při němž je poruchový proud řádově větší a destruktivní účinky poruchy tak mohou být rozsáhlejší. Zemní ochrany v tomto směru napomáhají tím, že signalizují vznik ZS a detekují konkrétní vývod v rozvodně, ve kterém se ZS vyskytuje.

Tato kapitola přináší v části 2.1 pohled na to, jak dnešní zemní ochrany pracují. Činnost ochran je dále podrobněji rozebrána v části 2.2, která se zabývá metodami detekce vývodu postiženého ZS speciálně v kompenzovaných sítích. Přitom je zvláštní důraz v této podkapitole kladen na měření netočivých složek napětí a proudu (viz část 2.2.1), které jsou charakteristickými vstupními veličinami všech zemních ochran. Poslední část 2.3 se pak věnuje popisu konkrétních zemních ochran, které byly použity v praktické části této práce.

2.1 Úvod k ochranám při ZS

Ochrany při ZS jsou v dnešní době ve většině případů digitální, které od 80. let nahrazují dřívější ochrany elektromechanické [21]¹. Jádrem digitálních ochran je mikroprocesor s naprogramovanými chránícími funkcemi. Dnes se tedy více než o zemních ochranách hovoří o ochranných funkcích při ZS. Mnohdy pak jsou tyto ochranné funkce integrovány jako součást výrobku s širším využitím - například funkce ochrany při ZS jako součást vývodové ochrany. Podobná kompaktní zařízení se označují jako multifunkční nebo také jako IED (podle výrobce ABB z angl. *Intelligent Electronic Device* - inteligentní elektronické zařízení).

Digitální ochrany v porovnání s těmi dřívějšími poskytují lepší přesnost měření a širší nastavení ochranných funkcí, dále pak kompaktnost či integraci s dispečerským řízením a sběrem dat. V neposlední řadě nabízí digitální ochrany také větší bezpečnost zajištěnou vnitřními testy ochrany. Zemní ochrany jsou nejčastěji instalovány přímo v rozvodnách vn.

Bezprostředně po vzniku ZS v síti jsou zahájeny tyto činnosti:

1. Signalizace vzniku ZS;
2. Lokalizace vývodu se ZS;

¹I přes pokročilejší dobu se dřívější analogové ochrany stále vyrábějí a aplikují, i když už nejsou tak rozšířené. Například firma Dohnálek drží tradici výroby těchto ochran již od roku 1943 a z jejího sortimentu ochran při ZS se tak můžeme setkat například s *relé pro hlášení zemního spojení* [22]

3. Lokalizace samotné poruchy.

přičemž první dva body mají většinou na starosti právě zemní ochrany. Třetí bod - lokalizace samotné poruchy - je většinou prací dispečerů distribuční soustavy, nebo případně pokročilejších systémů chránění.

Signalizace vzniku ZS v sítích vn probíhá téměř výhradně na základě monitorování netočivé složky napětí $\bar{U}_{(0)}$ sítě. Směrodatná je v tomto směru určitá popudová hodnota (typicky 20% jmenovitého napětí sítě [8]²), od které směrem výše dochází k signalizaci vzniku ZS.

Lokalizaci vývodu se ZS zajišťují zemní ochrany bezprostředně po signalizaci ZS v síti (tzn. po překročení nastavené popudové hodnoty napětí $\bar{U}_{(0)}$). K určení konkrétního vývodu se ZS je vhodné, aby na začátku každého vývodu v rozvodně byla instalována jedna zemní ochrana. Takto pak může ochrana na základě jisté metody určit zda se ZS vyskytuje právě ve vývodu, na který je připojena nebo mimo něj. Nejpoužívanější z metod, které ochrany používají, jsou uvedeny v následující podkapitole 2.2. Pro zvýšení spolehlivosti ochranných funkcí je v této fázi i připínán pomocný odporník.

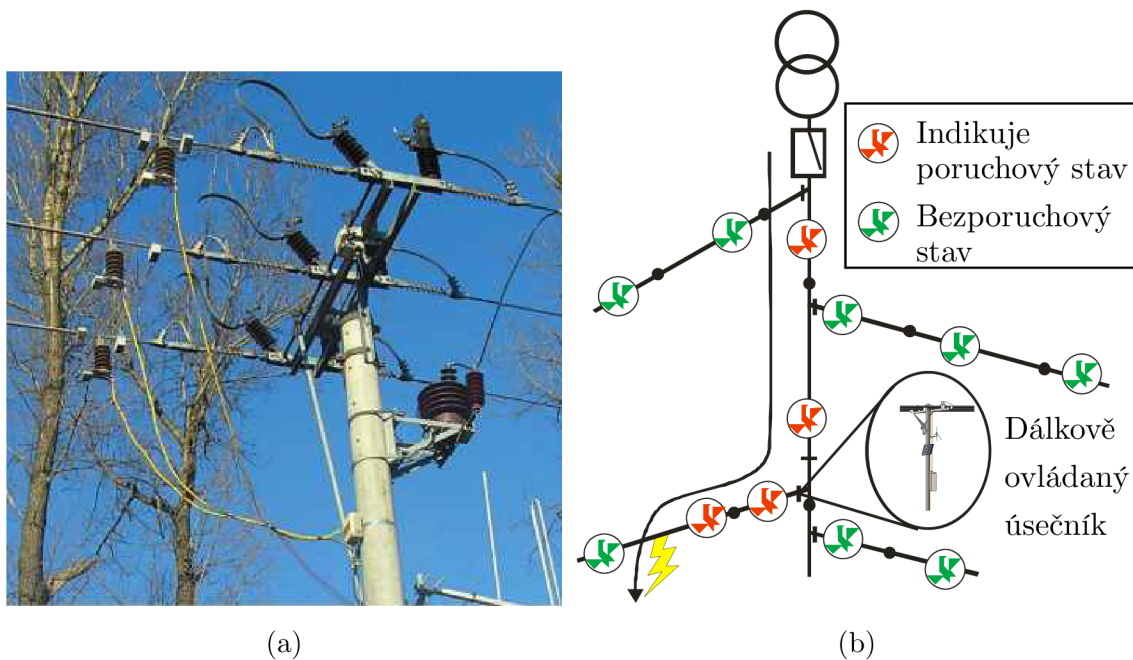
Lokalizace samotné poruchy probíhá již v konkrétním vývodu se ZS, který určily zemní ochrany. Mezi nejdéle používané a také i efektivní prostředky lokalizace poruchy patří odpínání úseků postiženého vedení. Děje se tak prostřednictvím složitých dispečerských manipulací, kterými se odpínají části sítě v konkrétním vývodu. Odpínání pak probíhá až do okamžiku vymanipulování poruchy, čímž se vymezení oblast kam je posléze poslána technická obsluha. Podobně a jednodušeji lze vymezit oblast s poruchou i pomocí spojení zdravého vývodu a vývodu se ZS do kruhu. Podle přerozdělení netočivé složky proudu se poté provede výpočet přibližného místa ZS. Propojení vývodů však nemusí být vždy možné.

Modernější přístup k lokalizaci místa se ZS poskytují indikátory poruch na venkovním vedení (ukázka jejich umístění viz obrázek 2.1a). Ty monitorují netočivé složky $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$, a to buď přímo nebo prostřednictvím změn elektrického a magnetického pole. Na základě toho pak indikují, zdali se v dopředném směru daného vedení vyskytuje ZS. Z rozmístění více indikátorů v celé síti je takto možné zjistit směr poruchy (viz ukázka principu na obrázku 2.1b)³. Navíc pokud indikátory disponují dálkovou komunikací s dispečinkem sítě, je možné vytipovat postižený úsek

²Toto nastavení koresponduje i s hodnotami nastavovanými v ČR, které jsou $U_{(0)} = 20 \div 30 \text{ V}$ [23] s rozdílem, že zde se jedná o napětí indukované na sekundáru PTN, které mívá jmenovité napětí $100 \div 120 \text{ V}$

³Indikátory poruch přitom mohou použít jednu z metod detekce vývodu se ZS - viz část 2.2.

předem, jinak je nutné, aby technická obsluha opticky stopovala indikátory podél vedení až do místa poruchy. S výhodou se proto indikátory poruch instalují v blízkosti dálkově ovládaných úsečnicků, které už funkcí komunikace s dispečinkem disponují. Obdobně jako indikátory pro venkovní vedení se používají i indikátory pro kabelová vedení. Ty bývají konstrukčně jednodušší a i přesnější. Protože je problematika lokalizace místa ZS rozsáhlá a ve většině případů není zahrnuta v zemních ochranách, je dále v této práci kladen důraz zejména na metody detekce vývodu se ZS.



Obr. 2.1: Indikátory poruch pro venkovní vedení: (a) ukázka montáže indikátoru MEg61 a (b) lokalizace postiženého úseku na základě signalizace indikátorů. Převzato a upraveno z [24] a [25].

2.2 Metody detekce vývodu postiženého zemním spojením

V předchozí části textu byla zmínka o metodách detekce vývodu se ZS, které pro tuto činnost využívají zemní ochrany. Tyto metody detekce postiženého vývodu lze podle toho jaké signály k detekci používají rozdělit na *aktivní* a *pasivní*. Zatímco aktivní metody využívají do soustavy injektované signály a na základě odezvy pak rozhodují o postiženém vývodu, pasivní metody využívají signálů, které generuje přímo ZS. Protože aktivní metody vždy vyžadují speciální přídatné zařízení a jsou

více komplexní s ohledem na výpočet odezvy injektovaného signálu, nebudou předmětem této části práce.

Co se týče pasivních metod, tak ty mohou být dále rozděleny na *statické* a *dynamické*. Statické metody většinou porovnávají změřené či vypočítané veličiny různých vývodů při ustáleném stavu po vzniku ZS. A dynamické metody využívají transienčních jevů, které vznikají bezprostředně po vzniku ZS. V kompenzovaných sítích jsou rozšířeny zejména dynamické metody kvůli jejich větší citlivosti [3]. Bohužel oproti metodám statickým mají ty dynamické jen jeden pokus pro správnou lokalizaci, a proto jsou vždy zálohovány metodami statickými. Tato podkapitola zahrnuje následující metody detekce zemním spojením postiženého vývodu:

- Statické metody:
 - Wattmetrická metoda - část 2.2.2;
 - Admitanční a konduktanční metoda - část 2.2.3;
- Dynamické metody:
 - Metoda první půlperrody - část 2.2.4;

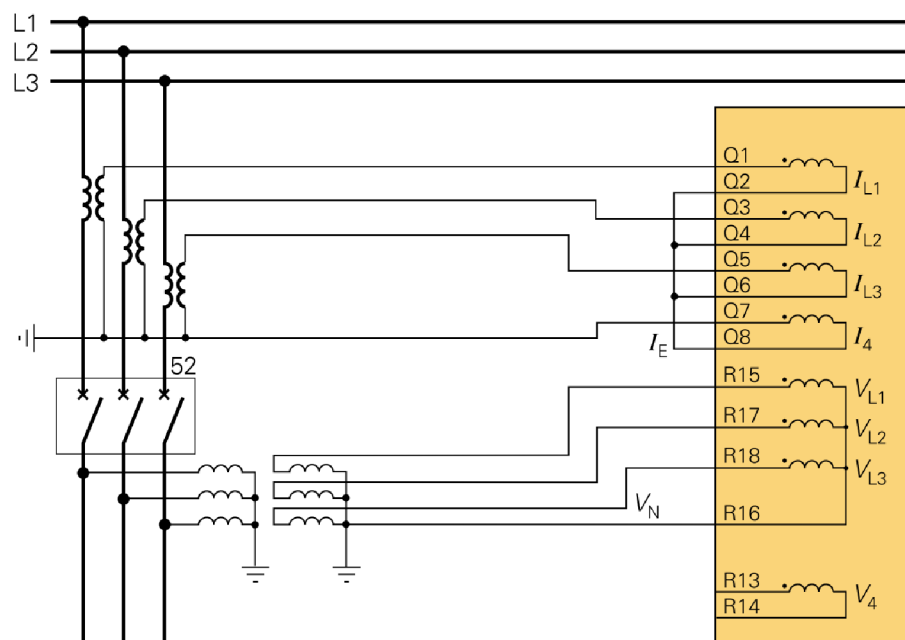
Všechny zmíněné metody vycházejí z naměřených hodnot netočivých složek napětí $\bar{U}_{(0)}$ a proudu $\bar{I}_{(0)}$. Proto se následující první sekce této podkapitoly věnuje právě jejich měření a výpočtu.

2.2.1 Měření a výpočet netočivých složek napětí a proudu

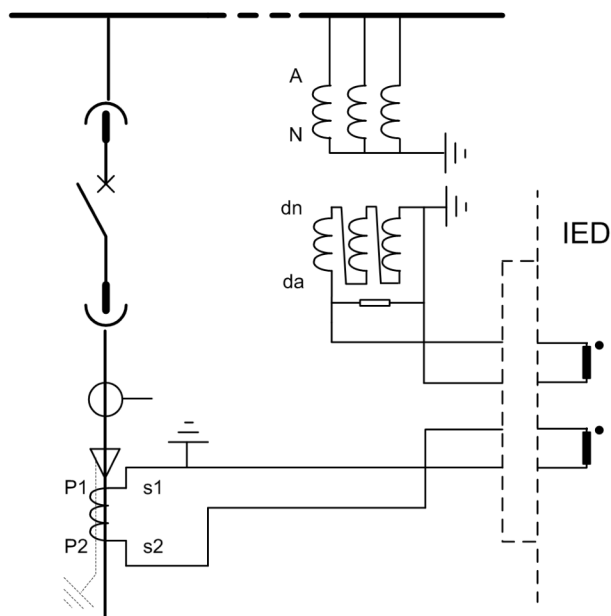
Měření netočivých složek $\bar{U}_{(0)}$ a proudu $\bar{I}_{(0)}$ se provádí na vývodech v napájecí rozvodně na přípojnicích [3], tak aby zemní ochrany mohly na základě změřených hodnot vyselektovat postižený vývod. K měření netočivé složky proudu se standardně používá součtové (paralelní) zapojení přístrojových transformátorů proudu (PTP) tak, jak je ukázáno v horní části obrázku 2.2. Toto zapojení se někdy také nazývá Holmgreenovo zapojení a měří vždy trojnásobek netočivé složky proudu $3\bar{I}_{(0)}$ - odvození proč zrovna trojnásobek je uvedeno dále v této části.

V kompenzovaných sítích, kde je třeba citlivější měření proudu $\bar{I}_{(0)}$, je výhodnější měření průvlekovým transformátorem proudu dle obrázku 2.3 (viz jeho dolní část). Tímto transformátorem jsou provlečeny všechny fáze a v případě, že se jedná o kabel, tak i jeho stínění. Pointa je v tom, že měření tímto způsobem nezahrnuje kumulativní chybu tří PTP v Holmgreenově zapojení. Pro obě uvedená měření (Holmgreenovým zapojením a průvlekovým transformátorem) platí, že pro dosažení vyšší citlivosti by převod použitých PTP měl být co nejmenší [8].

Měření netočivé složky napětí se nejčastěji provádí přístrojovými transformátory napětí (PTN), které jsou zapojeny do otevřeného trojúhelníku. Měří se tak trojnásobek netočivé složky napětí $3\bar{U}_{(0)}$. Zapojení je ukázáno v horní části obrázku 2.3. U kompenzovaných sítí, kde je rozvodna vybavena zhášecí tlumivkou, je možné měřit



Obr. 2.2: Měření proudu $3\bar{I}_{(0)}$ Holmgreenovým zapojením PTP a měření napětí s odvozením napětí $\bar{U}_{(0)}$ uvnitř ochrany. Příklad zapojení ochrany Siemens 7SA6 [26].



Obr. 2.3: Citlivější měření proudu $3\bar{I}_{(0)}$ se samostatným kabelovým průvlekovým PTP a měření napětí $3\bar{U}_{(0)}$ PTN zapojenými do otevřeného trojúhelníku. Převzato z [27].

netočivou složku napětí i přímo mezi uzlem transformátoru a zemnicí soustavou [3]. V tomto případě, ale dochází k měření pouze jednonásobku napětí $\bar{U}_{(0)}$ - vysvětlení viz dále.

Druhou možností jak získat netočivé složky $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$ je matematickým výpočtem uvnitř ochrany. Využívá se k tomu *metoda souměrných složek*, někdy také označována jako *metoda Fortescue*⁴. Z této metody také pochází i pojmenování *netočivá složka*. Metoda je popsána například v [3, kap. 2.2.4] a zde uvedeme pouze závěry této metody, které jsou užitečné z pohledu výpočtu a měření netočivých složek $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$.

Podle metody souměrných složek můžeme pro napětí jednotlivých fází proti zemi psát:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)}, \quad (2.1)$$

$$\bar{U}_2 = \bar{a}^2 \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)}, \quad (2.2)$$

$$\bar{U}_3 = \bar{a} \bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2 \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)}, \quad (2.3)$$

kde index $_{(1)}$ značí napětí sousledné soustavy, $_{(2)}$ napětí zpětné soustavy a $_{(0)}$ napětí netočivé soustavy. Na základě těchto rovnic můžeme zpětně definovat napětí v jednotlivých složkových soustavách. Pro naše účely bude stačit vyjádřit pouze netočivou složku napětí:

$$\bar{U}_{(0)} = \frac{1}{3} (\bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_3). \quad (2.4)$$

Z tohoto vztahu pak jasně vyplývá, jak lze uvnitř ochrany vypočítat hodnotu netočivé složky napětí $\bar{U}_{(0)}$ z napětí měřených mezi fázemi a zemí pomocí PTN - viz případ na obrázku 2.2. Obdobně je možné uvažovat i s proudy, kdy ochrana vypočítává netočivou složku proudu z měřených hodnot proudů, které tečou jednotlivými fázemi:

$$\bar{I}_{(0)} = \frac{1}{3} (\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3). \quad (2.5)$$

Pokud zemní ochrana využívá přímého měření $\bar{U}_{(0)}$ pomocí zapojení PTN do otevřeného trojúhelníku, dochází, jak už bylo dříve zmíněno, k měření trojnásobku netočivé složky napětí. V otevřeném trojúhelníku se totiž napětí indukovaná na sekundárech PTN sčítají. Součet těchto napětí (uvažovaný z pohledu primární strany PTN) pak podle rovnice 2.4 nutně znamená, že na otevřené trojúhelníku se měří $3\bar{U}_{(0)}$. Stejná situace platí i ohledně Holmgreenova zapojení PTP, kde se jednotlivé měřené proudy také sčítají. Výjimkou z tohoto pohledu je případ, kdy je netočivá složka napětí měřena mezi uzlem transformátoru vvn/vn a zemí.

⁴Charles LeGeyt Fortescue (1876–1936) - kanadský inženýr elektrotechniky. Metodu symetrických složek publikoval v roce 1918

Jak je patrné z textu výše, oba způsoby zjišťování netočivých složek napětí a proudu vycházejí z měření PTN a PTP. Toto měření je samozřejmě vždy zatíženo jistou chybou, která může působit problémy zvláště při měření malých hodnot napětí a proudu. Tento problém naštěstí lze často vyřešit sledováním přírůstků změřených hodnot oproti hodnotám předchozím. Toto už ale je záležitostí jednotlivých metod detekce zemního spojení.

Poslední důležitou záležitostí, která se týká obecně zjišťování netočivých složek napětí a proudu a jejich zavádění do ochrany je správná vektorová orientace $\bar{U}_{(0)}$ vzhledem k $\bar{I}_{(0)}$. Při opačném smyslu měřených hodnot $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$ totiž dochází k chybné funkci ochrany. V praxi se proto správné připojení (nafázování) ochrany ověřuje vytvořením experimentálního ZS v síti. Což však může být velmi rizikové. Druhou variantou je použití generátorů netočivých složek napětí $\bar{U}_{(0)}$ a proudu $\bar{I}_{(0)}$, které posléze připojíme na měřicí vstupy ochrany. Výhoda tohoto ověřování je v možnosti použití bez nutnosti vytvářet ZS v síti vn. Nevýhodou pak může být to, že takové generátory bývají drahé. Poslední zmíněnou variantou je využití některé z metod ověřování směřování zemních ochrany, které jsou uvedeny v [6]. Tyto metody vyžadují pouze běžné provozní přístroje a přenosné zařízení s příslušným napájením nn [6].

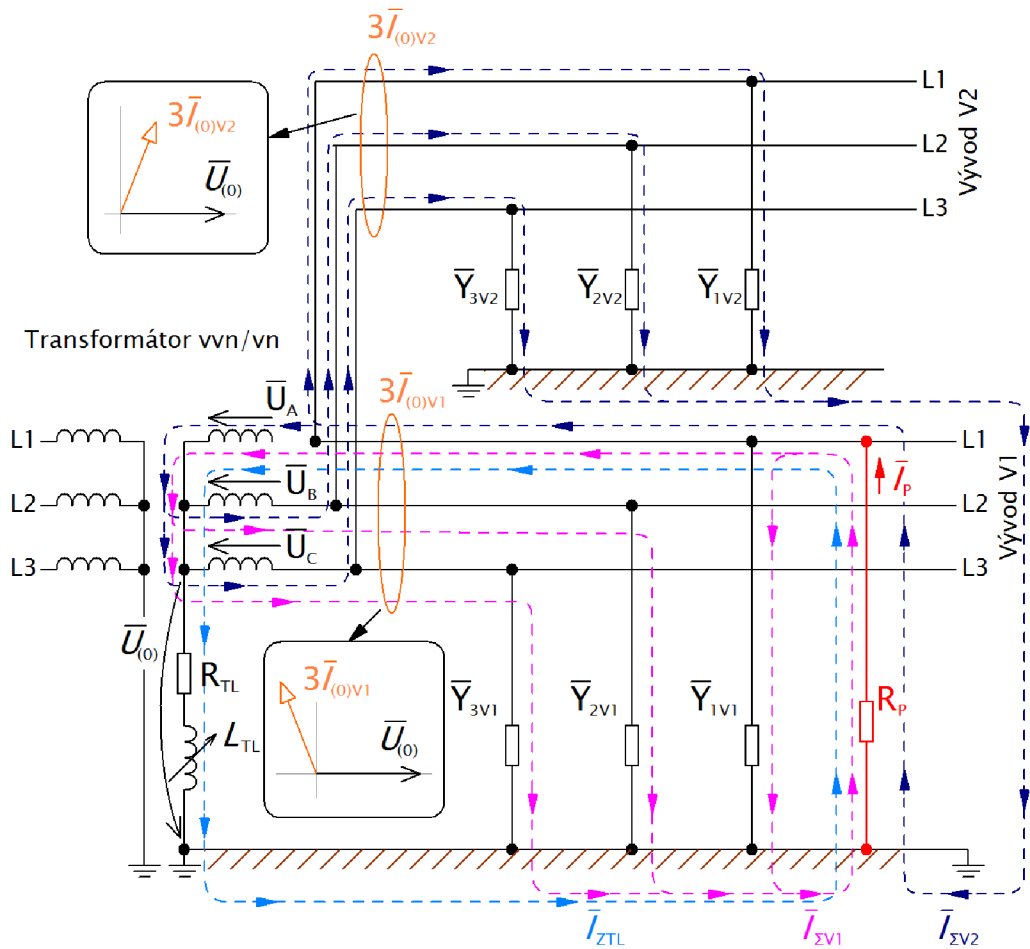
2.2.2 Wattmetrická metoda

Wattmetrická metoda patří k nejdéle používaným metodám v kompenzovaných sítích. Tato metoda je založena na sledování činné části netočivé složky proudu $\bar{I}_{(0)}$, což bylo dříve realizováno prostřednictvím sledování činného výkonu wattmetrickým relé - odtud název této metody. Při sledování proudu $\bar{I}_{(0)}$ se tak využívá faktu, že tyto proudy vypadají jinak na vývodu bez ZS a se ZS. Připomenout si to můžeme pohledem do části 1.1 a nebo také na obrázek 2.4. Tento obrázek ukazuje, že při ZS v kompenzované síti je fázor proudu $\bar{I}_{(0)V2}$ u vývodu bez ZS v I. kvadrantu, při jeho uvažování vzhledem k napětí $\bar{U}_{(0)}$, zatímco u vývodu se ZS se fázor $\bar{I}_{(0)V1}$ nachází ve II. kvadrantu. Na obrázcích 2.5a a 2.5b je tato situace zobrazena více v detailu.

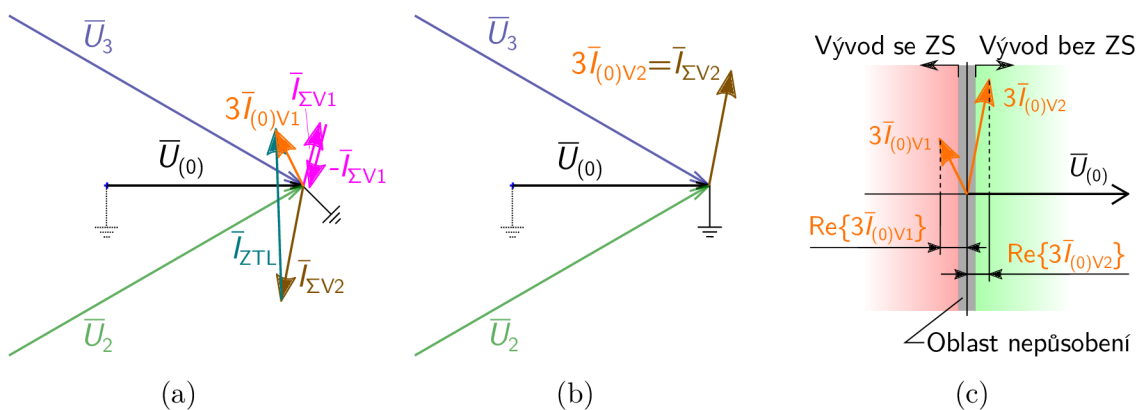
Z výše uvedeného tedy vyplývá, že mezi proudy $\bar{I}_{(0)V1}$ a $\bar{I}_{(0)V2}$ dochází k zásadnímu rozdílu, zvláště mezi jejich činnými složkami⁵. Z tohoto pak vychází i charakteristika wattmetrické metody, jejíž příklad je ukázán na obrázku 2.5c. Kolem středu této charakteristiky pak často bývá svislá oblast nepůsobení, která respektuje možné chyby měření PTP.

Právě přesnost měření proudu $\bar{I}_{(0)}$ na jednotlivých vývodech je klíčová. Je tedy důležité, aby použité PTP byly vhodně navrženy - tzn. aby byly shodné co se týče

⁵Činné složky proudů $\bar{I}_{(0)}$ jsou tvořeny svody skrze vodivosti příčných admitancí, vodivostí zhašecí tlumivky a činným odporem ZS.



Obr. 2.4: Rozložení fázorů netočivé složky napětí a proudu ve vývodu se zemním spojením a ve zdravém vývodu.



Obr. 2.5: Fázorový diagram netočivé složky napětí a proudu měřeného: (a) na začátku vývodu se ZS a (b) na začátku vývodu bez ZS. (c) Znázornění principu rozhodování na základě směru netočivé složky proudu vývodu se ZS a bez ZS.

chyby měření a aby byly schopné detekovat malý reziduální proud. Mnohdy je tedy vhodnější použít jeden průvlekový PTP namísto tří v Holmgreenově zapojení. Dále u této metody bývá často nápomocné zvýšení úrovně činné složky poruchového proudu pomocí automatiky připínání pomocného odporníku (viz část 1.3). Ačkoliv v případech vysokoodporového ZS se $\bar{I}_{(0)}$ při připnutí pomocného odporníku už výrazně nezvyšuje, ba co víc napětí $\bar{U}_{(0)}$ výrazně klesá a může tak dojít k přerušení signalizace ZS, kvůli poklesu $\bar{U}_{(0)}$ pod jeho popudovou hodnotu. Proto je wattmetrická metoda vhodná zejména při nízkoodporových ZS [8].

Protože wattmetrická metoda vychází z fázového posunu mezi $\bar{I}_{(0)}$ a $\bar{U}_{(0)}$ bývá v dnešních digitálních ochranách často integrována jako součást směrové zemní ochrany (67N). U ochran se tak můžeme setkat např. s označením této funkce jako režim *IoCos* nebo jako nastavení charakteristického úhlu ochrany RCA (z anglického *Relay Characteristic Angle*) na hodnotu $RCA = 0^\circ$.

2.2.3 Admitanční metoda

Admitanční metoda patří mezi mladší způsoby jak detekovat vývod postižený ZS. Vyvinuta byla na počátku 80. let v Polsku a díky svým nesporným výhodám je schopna nahradit metodu wattmetrickou. Princip této metody vychází z hodnot netočivé složky admitance $\bar{Y}_{(0)}$, která se počítá z naměřených hodnot $\bar{I}_{(0)}$ a $\bar{U}_{(0)}$ vztahem:

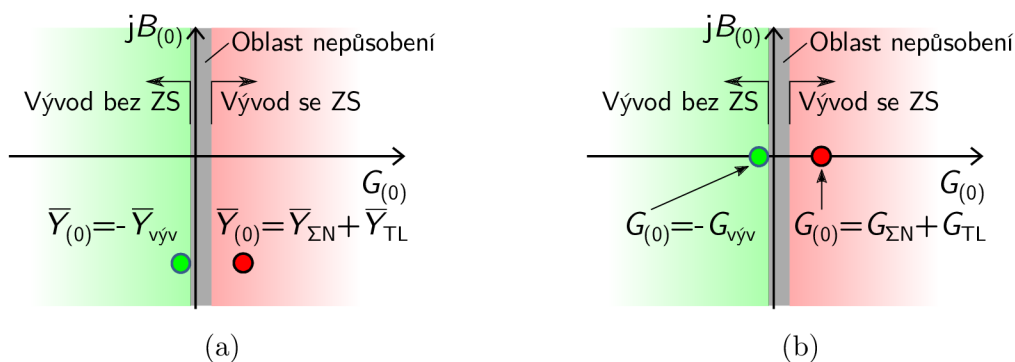
$$\bar{Y}_{(0)} = \frac{\bar{I}_{(0)}}{-\bar{U}_{(0)}} = -(G + jB), \quad (2.6)$$

kde G a B jsou po řadě konduktancí a susceptancí systému, které jsou výsledkem příčné svodové vodivosti a kapacity sítě. Jak uvidíme v následující části, je možné a v kompenzovaných sítích samozřejmě i výhodné sledovat pouze konduktanci systému - konduktanční metoda. Podobně v izolovaných sítích je výhodné sledovat susceptanci systému - susceptanční metoda. Tyto přitom vždy vychází z metody admitanční.

Podle výše uvedeného způsobu výpočtu admitance je její hodnota v případě vývodu nepostiženého ZS rovna záporně vzaté admitanci tohoto vývodu $\bar{Y}_{\text{výv}}$ ⁶ (viz vztah 2.7). U vývodu postiženého ZS je výsledná admitance složena z celkové admitance nepostižených vývodů celé sítě $\bar{Y}_{\Sigma N}$ a admitance zhášecí tlumivky \bar{Y}_{TL} ⁷ - viz vztah 2.8. Fázor této admitance tedy má kladnou reálnou část. Znaménko imaginární části je závislé na tom, jak je síť kompenzovaná. Umístění obou admitancí

⁶Odůvodnění je možné nalézt v tom, jak vypadá proud $\bar{I}_{(0)}$ u nepostiženého vývodu - viz část 1.1.1 nebo obrázek 2.4. Je nutné také započítat zápornou hodnotu napětí $\bar{U}_{(0)}$

⁷Odůvodnění opět můžeme nalézt v tom, jak vypadá proud $\bar{I}_{(0)}$ u vývodu se ZS - viz část 1.1 nebo obrázek 2.4.



Obr. 2.6: Ukázka umístění (a) admitancí a (b) konduktancí zdravého a ZS postiženého vývodu v kompenzované síti.

v komplexní rovině je ukázáno na obrázku 2.6a.

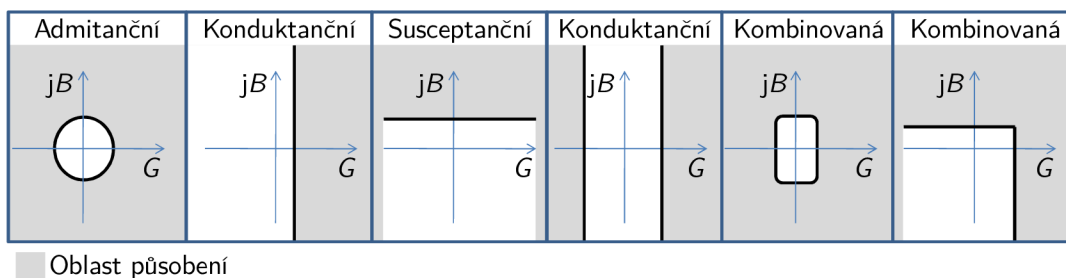
$$\bar{Y}_{(0)} = -\bar{Y}_{\text{výv}}, \quad (2.7)$$

$$\bar{Y}_{(0)} = \bar{Y}_{\Sigma N} + \bar{Y}_{\text{TL}}. \quad (2.8)$$

Jak můžeme z těchto vztahů vidět, nikde v nich nevystupuje hodnota odporu ZS R_P či jiná veličina, která by na něm byla závislá. Hodnoty vypočtených admitancí se tedy z teoretického pohledu nemění v závislosti na odporu R_P . Toto je tedy nespornou výhodou admitanční metody, která tak dokáže detekovat ZS o odporu až $10 \text{ k}\Omega$ [28]. Na druhé straně ale může být pracnější zavést admitanční metodu do praxe z důvodu zjišťování vhodného nastavení této metody. I přes to se v posledním desetiletí tato metoda dostává stále víc do popředí.

Stejně jako v případě wattmetrické metody, i tato metoda reaguje na automatickou připínání pomocného odporníku. Při jeho připnutí dochází ke zvýšení vodivosti zhášecí tlumivky, což se projeví několikanásobným zvýšením reálné části její admitance. Důležité je ale poznamenat, že admitanční metoda připínání PO nevyžaduje a je schopna detekovat vysokoodporová ZS i bez ní. Dochází tak i k rychlejší detekci vývodu se ZS. Navíc, jak již bylo dříve zmíněno, po připnutí PO dochází k poklesu napětí $\bar{U}_{(0)}$, a může tak dojít k ukončení signalizace ZS při poklesu pod jeho popudovou hodnotu. Užitečnost připínání PO při vysokoodporových ZS tak může být kontraproduktivní.

Ochrany, které pracují s admitanční metodou, využívají charakteristiky velmi podobné charakteristikám distančních ochran. Rozdíl přitom je, že pokud se jedná o nepostižený vývod, je vypočtená admitance uvnitř charakteristiky (u charakteristik distančních ochran je to naopak). Samotné admitanční charakteristiky se zakreslují do komplexní roviny a mohou přitom zohledňovat celou admitanci nebo jen její reálnou či imaginární část s ohledem na to, v jakém typu síti je aplikovaná. Jejich příklady jsou ukázány na obrázku 2.7.



Obr. 2.7: Příklady charakteristik admitanční metody detekce vývodu se ZS. Přeloženo z [19]

Na obrázku 2.7 je první kruhová charakteristika zaměřena obecně na admitanci a je vhodná pro síť nepřímo uzemněné přes rezistanci. Následující konduktanční a susceptanční charakteristiky jsou už konkrétněji zaměřeny pouze na reálnou resp. imaginární složku admitance. Poslední dvě charakteristiky na obrázku 2.7, tzv. charakteristiky kombinované, jsou vhodné primárně pro síť kompenzované, ze kterých se vlivem provozních okolností mohou stát síť izolované.

U admitanční metody je možné zvýšit její citlivost zavedením tzv. přírůstkové admitance (resp. konduktance a susceptance), která redukuje vliv nesymetrie sítě (častý případ venkovních vedení) [19]. Přírůstky pak vychází ze stavů před poruchou ($\text{index}_{\text{prefault}}$) a při poruše ($\text{index}_{\text{fault}}$):

$$\bar{Y}_{(0)} = \frac{\Delta \bar{I}_{(0)}}{-\Delta \bar{U}_{(0)}} = \frac{\bar{I}_{(0)\text{fault}} - \bar{I}_{(0)\text{prefault}}}{-\left(\bar{U}_{(0)\text{fault}} - \bar{U}_{(0)\text{prefault}}\right)}. \quad (2.9)$$

Druhou možností, jak zvýšit citlivost admitanční metody, je sledovat admitanci (resp. susceptanci) na vyšších harmonických frekvencích (zejména 5.). Důvod je ten, že zhášecí tlumivka kompenzuje pouze základní frekvenci poruchového proudu. Ten tak může být na základní harmonické zcela vykompenzovaný - tzn. proud bude velikostně minimální na první harmonické, avšak na jiných harmonických bude poruchový proud nekompenzovaný. S výhodou ho tedy můžeme využít pro účely počítání admitance. Navíc při uvažování admitancí vyšších harmonických platí, že kapacitní susceptance roste n-násobně s řádem harmonické a induktivní susceptance zhášecí tlumivky n-násobně klesá. Růst kapacitní susceptance je však mnohem znatelnější. Na základě tohoto faktu je možné pracovat pouze se susceptančními charakteristikami. Dalšího zvýšení citlivosti admitanční metody pak lze dosáhnout sumací admitancí vypočtených na různých frekvencích. [19]

Admitanční metoda detekce vývodu se ZS bývá v zemních ochranách implementovaná pod označením *zemní admitanční ochrana* (21YN). V závislosti na výrobci tato funkce většinou obsahuje několik režimů, které určují, zda je sledována celá admitance, nebo jen její konduktance nebo susceptance a nebo jejich kombinace.

Konduktanční metoda je variantou výše zmíněné admitanční metody, která využívá sledování pouze reálné části vypočtených hodnot netočivé složky admitance - tj. sleduje konduktanci. Proč je v kompenzovaných sítích vhodné sledovat právě konduktanci, je vidět na obrázku 2.6a, kde po vzniku ZS v síti dochází především ke změně reálné části admitance. V tomto oddílu tedy uvedeme konkrétní vztahy tykající se konduktanční metody. Definiční rovnice konduktanční metody tedy je:

$$G_{(0)} = \operatorname{Re} \left\{ \frac{\bar{I}_{(0)}}{-\bar{U}_{(0)}} \right\}. \quad (2.10)$$

Některé literatury (např. [3]) uvádějí trochu odlišný vztah než 2.10, který uvažuje kladnou hodnotu napětí $\bar{U}_{(0)}$ ve jmenovateli. Princip fungování této metody je ale stále tentýž a rozdíl pak nastává pouze v opačných znaménkách konduktance postiženého a zdravého vývodu. V dalším uvažování o konduktanční metodě se budeme držet uvedeného vztahu 2.10, který vychází z admitanční metody. U vývodu bez ZS tak bude vypočtená hodnota konduktance rovna právě jen záporně vzaté konduktanci tohoto vývodu $G_{\text{výv}}$ (viz vztah 2.11). Naopak vypočtená konduktance u vývodu postiženého ZS je kladná a zahrnuje konduktanci všech nepostižených vývodů G_{Σ_n} a konduktanci zhášecí tlumivky G_{TL} (rovnice 2.12). Příklad umístění těchto hodnot v komplexní rovině tvoří základ konduktanční charakteristiky a je vidět na obrázku 2.6b.

$$G_{(0)} = -G_{\text{výv}}, \quad (2.11)$$

$$G_{(0)} = G_{\Sigma_n} + G_{\text{TL}}. \quad (2.12)$$

Jak je vidět, výše uvedené vztahy jsou analogické těm u admitanční metody. I zde platí hlavní výhoda admitanční metody, tedy že vypočtené hodnoty konduktancí nejsou závislé na odporu ZS. Navíc hodnoty vypočítaných konduktancí nepodléhají žádným změnám v případě změny rozladění sítě. Sledovat lze akorát vliv připnutí pomocného odporníku, což se projeví vzrůstem konduktance zhášecí tlumivky a tedy i konduktance vývodu s poruchou. Samotné připínání PO při použití konduktanční metody je ale diskutabilní, protože při vysokoodporových ZS může být kontraproduktivní (více viz stejná diskuze v části 2.2.3).

Stejně tak jako u admitanční metody i zde je možnost zvýšit citlivost metody sledováním vypočtené přírůstkové konduktance. Vychází se přitom stejně jako ve vztahu 2.9 z hodnot $\bar{I}_{(0)}$ a $\bar{U}_{(0)}$ před a po poruše. Zmíněná rovnice tedy bude:

$$G_{(0)} = \operatorname{Re} \left\{ \frac{\Delta \bar{I}_{(0)}}{-\Delta \bar{U}_{(0)}} \right\} = \operatorname{Re} \left\{ \frac{\bar{I}_{(0)\text{fault}} - \bar{I}_{(0)\text{prefault}}}{-\left(\bar{U}_{(0)\text{fault}} - \bar{U}_{(0)\text{prefault}}\right)} \right\}. \quad (2.13)$$

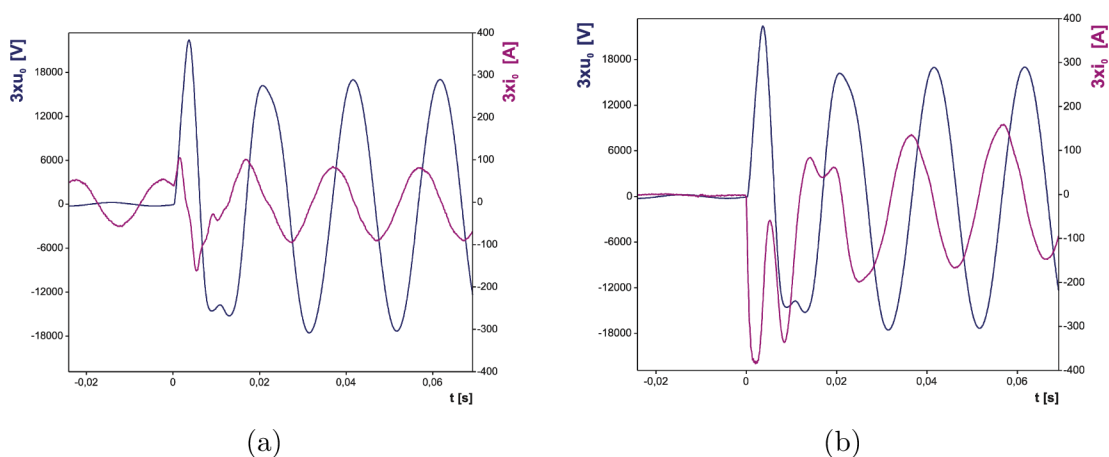
Konduktanční metoda bývá v dnešních zemních ochranách implementována buď jako samostatná ochranná funkce ($G_{0>}$) nebo jako součást admitanční ochrany (21YN). V druhém jmenovaném případě je pak nutné zvolit příslušný režim.

Nutné informace o síti při aplikování admitanční metody je možné shrnout do následujících bodů [27]:

- Jaký je způsob uzemnění sítě;
- Jaká je maximální hodnota napětí $U_{(0)}$ v bezporuchovém stavu sítě (znalost přirozené nesymetrie sítě);
- Jaký je maximální poruchový proud I_P chráněného vývodu při kovovém ZS (v nekompensovaném stavu);
- Jaký je jmenovitý proud pomocného odporníku, resp. hodnota odporu PO;
- Jaká je závislosti napětí $U_{(0)}$ na odporu poruchy, aby bylo možné ověřit citlivost ochrany (z pohledu maximálního zaznamenaného odporu ZS).

2.2.4 Metoda první půlperiody

Metoda první půlperiody je dynamickou metodou, která využívá faktu, že v okamžiku ZS dochází k vybití kapacity postižené fáze a nabití nepostížených fází v celé soustavě. Tento děj je velmi krátký (cca 10 ms [3] - tj. doba půlperiody v 50 Hz sítích) a intenzivní. Metoda využívá zaznamenaných průběhů netočivých složek proudu a napětí, kde v případě, že proudová špička je ve fázi s napětím - jedná se o vývod bez ZS (viz obrázek 2.8a). Opačný případ pak je, kdy špička proudu $\bar{I}_{(0)}$ je v protifázi s napětím $\bar{U}_{(0)}$ - jedná se o vývod postižený ZS (viz obrázek 2.8b nebo také i obrázky 1.8, 1.9 a 1.10).



Obr. 2.8: Oscilografický průběh netočivé složky proudu a napětí při ZS na (a) nepostíženém (b) postiženém vývodu. Zdroj [3]

Co se týče spolehlivosti detekce vývodu postiženého zemním spojením, je tato metoda účinná i při obloukových ZS [3]. Při vysokoodporových ZS není transientní jev už tak výrazný a tato metoda nepodává spolehlivé výsledky [3]. Nevýhodou

této metody je krátký časový interval trvání přechodného jevu a dále závislost na počáteční fázi proudu a napětí, při které ZS vznikne [29].

2.3 Popis uvažovaných zemních ochran

V praktické části této práce jsou používány ochrany, které nabízí ochranné funkce při zemním spojení - tzn. jsou schopné zaznamenat vznik ZS a detekovat konkrétní vývod se ZS. Při výběru těchto ochran byl kladen důraz na ochranné funkce vhodné při vysokoodporovém ZS v kompenzovaných sítích a na dostupnost těchto ochran v laboratoři Ústavu elektroenergetiky na FEKT VUT v Brně. Jmenovitě to jsou ochrany ABB REF 615, ABB REM 543 a ochrana RYo českého výrobce Protection & Consulting. Tato podkapitola se soustředí na letmé seznámení s těmito ochranami a s jejich ochrannými funkcemi, které budou použity v praktické části této práce. V závěru této části pak je srovnání ochranami nabízených ochranných funkcí při zemním spojení.

Informace o jednotlivých ochranách a jejich funkcích jsou čerpány z následujících zdrojů:

- ABB REF 615 - zdroje [27], [30] a [31];
- ABB REM 543 - zdroj [32] a [33];
- Protection & Consulting RYo - zdroj [34];

2.3.1 Ochrana ABB REF 615

Vývodová ochrana ABB REF615 (viz obrázek 2.9) je zařízení, které je určeno pro chránění, ovládání, měření a monitorování vývodů v rozvodně. Toto IED je určeno především k chránění venkovních vedení a kabelových vývodů v sítích izolovaných, nepřímo uzemněných přes odpor nebo přes zhášecí tlumivku, ale také i v přímo uzemněných sítích. Kromě základních nadproudových ochranných funkcí nabízí REF 615 i ochranné funkce při zemních spojeních jako je směrové a nesměrová zemní ochrana, ochrana při přerušovaném/přechodném ZS, admitanční ochrana, zemní ochrana vyhodnocující harmonické složky a wattmetrická ochrana.

Ochrana REF 615 je navržena tak, aby vyhověla standardu IEC 61850, který zajišťuje komunikaci a vzájemnou součinnost zařízení různých výrobců určených pro automatizaci v rozvodně. Společnost ABB nabízí tuto ochranu celkem ve 12 variantách (A až N), kdy jednotlivé varianty se liší kombinací zabudovaných ochranných funkcí. Pro účely kompenzovaných sítí se doporučují varianty A, B, E a J. V závislosti na variantě REF 615 se liší také i počet vstupů a výstupů určených jak pro měření, tak pro ovládání zařízení a ochrany samotné (binární vstupy a výstupy, ethernetové rozhraní). Ochranu je možné plně obsluhovat skrze software PCM600.



Obr. 2.9: Ochrana REF 615 [28]

Tato konkrétní ochrana disponuje z pohledu ochranných funkcí při ZS pouze zemní admitanční ochranou (21YN). Možnosti této funkce popíšeme v následující části.

Zemní admitanční ochrana EFPADM disponuje celkem 3 stupni. Přitom parametry každého ze stupňů je možné samostatně nastavit - viz obrázek 2.10. Popíšeme jednotlivé parametry na tomto obrázku:

- *Operation* - umožňuje aktivovat daný stupeň ochrany;
- *Admittance Calc mode* - výběr způsobu počítání admitance - obvyklým způsobem nebo přírůstkovou metodou;
- *Reset delay time* - nastavení zpoždění resetování funkce po odeznění podmínek, které ji uvedly do činnosti;
- *Pol reversal* - umožňuje změnit polaritu měřeného napětí bez nutnosti přepojování příslušných kontaktů u ochrany;
- *Min operate current* - nastavení minimální hodnoty proudu v jednotlivých fázích, od které ochrana působí;
- *Min operate voltage* - nastavení minimální hodnoty fázového napětí v síti, od které ochrana působí;
- *Io signal Sel* - výběr možnosti jestli je netočivá složka proudu získávána měřením nebo má být vypočítávána z měřených hodnot proudu v jednotlivých fázích;
- *Uo signal Sel* - výběr možnosti jestli je netočivá složka napětí získávána měřením nebo má být vypočítávána z měřených napětí jednotlivých fází proti zemi.

Následuje nastavení charakteristiky funkce EFPADM. Toto nastavení je "zabaleno" do skupiny (*Setting group*), kterých může být v rámci jednoho stupně ochranné funkce až 6. Konkrétní skupina nastavení se aktivuje společně pro celou ochranu. Ve skupině

| Group / Parameter Name | IED Value | PC Value | Unit | Min | Max |
|------------------------|-----------|-------------|------|---------|--------|
| EFPADM1: 1 | | | | | |
| Yo>>(1) | | | | | |
| Operation | | on | | | |
| Admittance Clc mode | | Normal | | | |
| Reset delay time | | 20 | ms | 0 | 60000 |
| Pol reversal | | False | | | |
| Min operate current | | 0,01 | xIn | 0,01 | 1,00 |
| Min operate voltage | | 0,01 | xUn | 0,01 | 1,00 |
| Io signal Sel | | Measured Io | | | |
| Uo signal Sel | | Measured Uo | | | |
| Setting Group 1 | | | | | |
| Voltage start value | | 0,20 | xUn | 0,05 | 5,00 |
| Directional mode | | Forward | | | |
| Operation mode | | Go | | | |
| Operate delay time | | 100 | ms | 60 | 200000 |
| Circle radius | | 1,00 | mS | 0,05 | 500,00 |
| Circle conductance | | 0,00 | mS | -500,00 | 500,00 |
| Circle susceptance | | 0,00 | mS | -500,00 | 500,00 |
| Conductance forward | | 0,28 | mS | -500,00 | 500,00 |
| Conductance reverse | | 0,00 | mS | -500,00 | 500,00 |
| Conductance tilt Ang | | 0 | deg | -30 | 30 |
| Susceptance forward | | 0,00 | mS | -500,00 | 500,00 |
| Susceptance reverse | | 0,00 | mS | -500,00 | 500,00 |
| Susceptance tilt Ang | | 0 | deg | -30 | 30 |

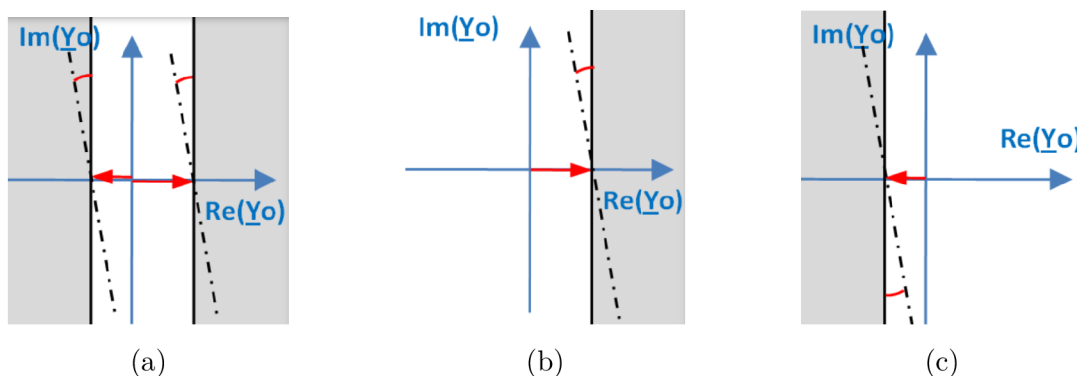
Obr. 2.10: Ukázka možností nastavení ochranné funkce EFPADM. Získáno z programu PCM600

nastavení je možné měnit tyto parametry:

- *Voltage start value* - nastavení popudové hodnoty netočivé složky napětí, od které směrem výše je signalizování ZS;
- *Directional mode* - možnost zvolení směrového režimu ochranné funkce na: (1) nesměrový (*non-directional*), (2) dopředný (*forward*) a (3) zpětný (*reverse*). Nastavením směrového režimu určujeme jestli má funkce reagovat na ZS bez ohledu na to ve kterém vývodu se nachází, nebo na ZS v konkrétním chráněném vývodu a nebo na ZS mimo tento vývod. Ukázka jednotlivých směrových režimů je na obrázku 2.11.
- *Operational mode* - výběr provozního režimu ochranné funkce podle toho jestli je požadavek, aby sledovala admitanci, konduktanci, susceptanci, nebo jejich kombinace. Podle nastavení provozního režimu je pak možné měnit zbývající parametry této skupiny.

- *Operate delay time* - nastavení časového zpoždění signalizace ZS po splnění všech podmínek, které uvádějí admitanční ochranu do činnosti.

Další nastavované parametry již definují samotné charakteristiky. U admitančních charakteristik tak je možné nastavit poloměr admitanční kružnice a i její střed. U charakteristik konduktančních a susceptančních je možné nastavit hodnoty v dopředném i zpětném směru a dokonce i náklon nastavených os. Náklon os může umožnit variabilnější nastavení hraničních hodnot konduktance a susceptance.



Obr. 2.11: Směrové režimy ochranné funkce EFPADM (a) nesměrový, (b) dopředný a (c) zpětný. Zdroj [27]

2.3.2 Ochrana ABB REM 543

Ochrana REM 543 (viz obrázek 2.12 je druhou ochranou od výrobce ABB, která je použita v praktické části této práce. Tato ochrana je především zařízením určeným k chránění, měření, ovládání a monitorování točivých strojů (výrobce pro tuto ochranu používá označení *terminál točivého stroje*) na hladině vn. Z pohledu této práce je ale důležité, že tato ochrana obsahuje směrovou zemní ochranou funkci DEF2. Ochranu REM 543 je možné propojit s PC pomocí programu CAP 505, kterým lze měnit i její nastavení.

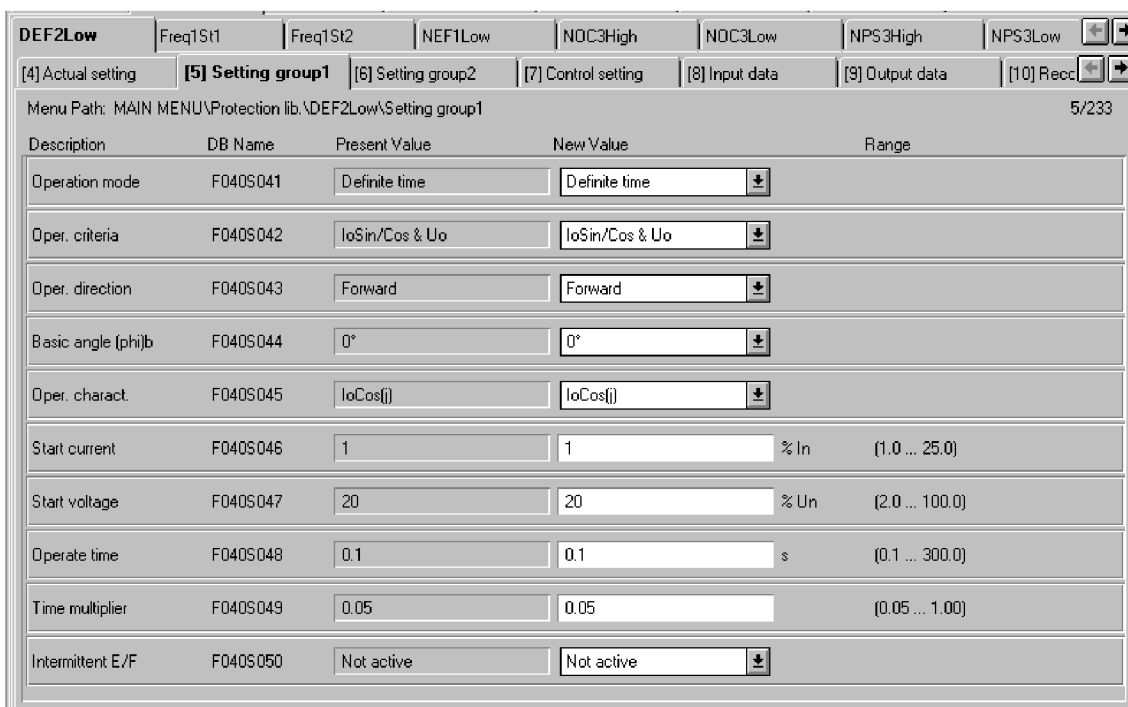
Směrová zemní ochrana DEF2 má celkem 3 stupně, přičemž jednotlivé stupně jsou samostatně nastavitelné. Popíšeme zde parametry prvního stupně DEF2low, jehož příklad nastavení je na obrázku 2.13:

- *Operational mode* - nastavením operačního módu je možné zvolit časově nezávislou charakteristiku, nebo některou z typů časově závislé;
- *Operation criteria* - umožňuje výběr kritéria, na jehož základě bude ochrana vyhodnocovat měřené údaje. Na výběr je několik možností:
 - *BasicAng & U₀* - působení ochrany po překročení nastaveného fázového úhlu φ mezi $\bar{I}_{(0)}$ a $\bar{U}_{(0)}$ a nastavené popudové hodnoty $U_{(0)}$ a $I_{(0)}$;



Obr. 2.12: Ochrana REM 543 [32]

- *BasicAng* - působení ochrany po překročení nastaveného fázového úhlu φ a nastaveného proudu $I_{(0)}$;
- *IoSin/Cos* $\& U_o$ - působení ochrany po překročení nastavené hodnoty proudu $I_{(0)} \sin \varphi$ nebo $I_{(0)} \cos \varphi$ a nastavené popudové hodnoty napětí $U_{(0)}$;
- *IoSin/Cos* - působení ochrany po překročení nastavené hodnoty proudu $I_{(0)} \sin \varphi$ nebo $I_{(0)} \cos \varphi$;
- *Non-dir. Io* - působení po překročení nastavené hodnoty proudu $I_{(0)}$ - nesměrová ochrana;
- *Non-dir. Uo* - působení po překročení nastavené hodnoty napětí $U_{(0)}$ - nesměrová ochrana;
- *Operation direction* - nastavení směrového režimu ochranné funkce (shodné jako v případě ochrany REF 615 - viz část 2.3.1);
- *Basic angle (phi)b* - nastavení charakteristického úhlu ochrany RCA, který se nastavuje podle typu sítě:
 - Kompenzovaná síť - $RCA = 0^\circ$;
 - Izolovaná síť - $RCA = -90^\circ$;
 - Síť uzemněná přes odpor - $RCA = -60^\circ$;
- *Operation characteristic* - volba operační charakteristiky v případě předchozí volby operačního kritéria, které zahrnuje IoSin/Cos. Volba mezi:
 - $I_{(0)} \cos \varphi$ - vhodné pro kompenzované sítě - tzv. wattmetrická metoda;
 - $I_{(0)} \sin \varphi$ - vhodné pro izolované sítě;
- *Start current* - nastavení popudové hodnoty proudu jako procento jmenovitého proudu $I_{(0)}$;
- *Start voltage* - nastavení popudové hodnoty napětí jako procento jmenovitého napětí $U_{(0)}$;
- *Operate time* - nastavení času, po který musí být splněny nastavené podmínky,



Obr. 2.13: Ukázka možností nastavení ochranné funkce DEF2low. Získáno z programu CAP 505

aby ochrana začala působit;

- *Time multiplier* - nastavení koeficientu definujícího časově závislou charakteristiku;
- *Intermittent E/F* - aktivace funkce usnadňující detekci přerušovaných ZS.

2.3.3 Ochrana Protection & Consulting RYo

Ochrana RYo je ochranou specializovanou přímo na indikaci ZS v sítích vn, které jsou provozovány jako izolované, odporově uzemněné i kompenzované. Ochrana (viz obrázek 2.14) obsahuje celkem 7 ochranných funkcí při ZS⁸. Tyto funkce jsou aktivovány podle typu chráněné sítě. Všechny přitom využívají měřených hodnot $U_{(0)}$ a $I_{(0)}$, které jsou také jedinými měřenými veličinami této ochrany. Po překročení nastavených parametrů a odpočítání nastaveného časového zpoždění je signalizováno ZS pomocí LED diody na čelním panelu a případně reagují i příslušná výstupní relé. Ochrana RYo je propojitelná s PC skrze rozhraní RS232 a rozhraní RS485, které slouží k propojení s dalšími ochranami, editaci nastavení a pro centrální zpracovávání dat v rozvodně. Ovládání v PC probíhá prostřednictvím stejnojmenného programu RYo.

⁸Admitanční, konduktanční a suscepanční ochranné funkce výrobce uvažuje zvlášť.



Obr. 2.14: Ochrana RYo [34]

Pro použití v kompenzovaných sítích výrobce doporučuje použít následující funkce (značení výrobce je uvedeno v závorkách):

- Přepětová ochrana vyhodnocující netočivou složku 59G ($U_o >$);
- Nesměrová zemní ochrana 50N ($I_o >$);
- Směrová zemní ochrana 32N ($I_{fi} >$ v zapojení jako činná);
- Zemní admitanční ochrana 21YN (admitanční $Y_o >$ a konduktanční $G_o >$).

Při testování v rámci této práce budou použity funkce 32N ($I_{fi} >$) a 21YN ($G_o >$), u kterých popíšeme jejich nastavení.

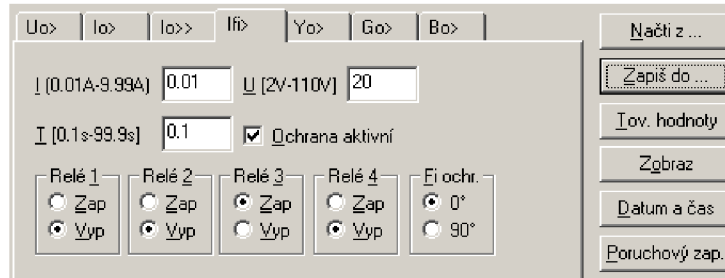
Směrová zemní ochrana $I_{fi} >$ u ochrany RYo má pouze ty nejzákladnější parametry. Je to dáno tím, že již samotná ochrana RYo je úzce profilovaná na oblast signalizace ZS. Ochranná funkce nabízí pouze jeden stupeň a ten obsahuje tato nastavení - pro grafický náhled viz obrázek 2.15:

- Nastavení popudové hodnoty proudu $I_{(0)}$;
- Nastavení popudové hodnoty napětí $U_{(0)}$;
- Nastavení časového zpoždění;
- Políčko aktivace ochranné funkce;
- Nastavení vnitřního úhlu ochrany (též charakteristický úhel ochrany, RCA):
 - 0° - nastavení RCA pro kompenzované sítě;
 - 90° - nastavení RCA pro izolované sítě.

Dále je možné nastavit, na která výstupní relé má ochrana působit v případě překročení výše uvedeného nastavení.

Zemní konduktanční ochrana $G_o >$ disponuje podobně zjednodušeným nastavením:

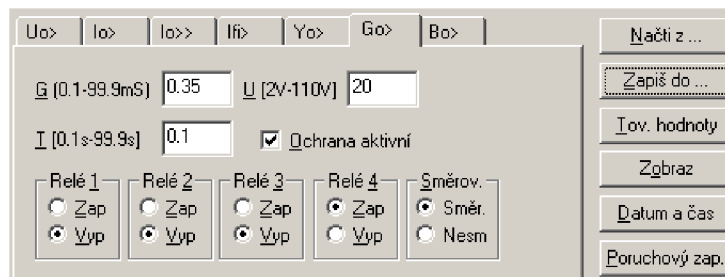
- Nastavení popudové hodnoty konduktance $G_{(0)}$;
- Nastavení popudové hodnoty napětí $U_{(0)}$;



Obr. 2.15: Ukázka možností nastavení ochranné funkce Ifi >. Získáno z programu RYo

- Nastavení časového zpoždění;
- Políčko aktivace ochranné funkce;
- Nastavení směrového režimu ochrany na *směrový* a *nesměrový*⁹.

Stejně jako u předchozí chránicí funkce je i zde možné nastavit výstupní relé, na které má ochrana působit. Závěrem je nutné připomenout, že pro úspěšné nahrání vytvořeného nastavení ochranných funkcí do ochrany je vždy třeba kliknout na tlačítko *Zapiš do* Po zadání hesla (u uvedené ochrany "111") dojde k nahrání nastavení.



Obr. 2.16: Ukázka možností nastavení ochranné funkce Go >. Získáno z programu RYo

⁹Výrobce v materiálu k ochraně [34] neuvádí bližší informace. Lze ale předpokládat, že *směrový* režim detekuje ZS v dopředném směru - tedy v chráněném vývodu.

3 STATICKÝ MODEL ZEMNÍHO SPOJENÍ V SÍTI

Situace po vzniku ZS v síti vn, je kromě parametrů sítě samotné také velmi závislá na odporu vzniklého ZS. Podle toho jsou i zemní ochrany schopné zaznamenat vznik tohoto ZS a detekovat vývod, v němž se nachází. Problémová oblast přitom nastává při vysokoodporových ZS, kdy netočivá složka napětí vzroste na nízkou hodnotu, která nemusí být dostatečná z pohledu nastavené popudové hodnoty $U_{(0)}$. Navíc po připnutí pomocného odporníku dochází k poklesu napětí $U_{(0)}$, což může znemožňovat práci zemních ochran. V návaznosti na tyto nastíněné problémy a s výhledem na nadcházející testování zemních ochran, byl na základě teorie ZS odvozené v předchozích částech této práce vytvořen statický model zemního spojení v síti.

Cílem tohoto modelu je tedy poskytnout nástroj, který by dokázal modelovat ZS a určit tak napěťové a proudové poměry v síti před ZS a po vzniku ZS o zvoleném odporu R_P . Na základě výstupních hodnot pak bude možné zjistit vhodné nastavení wattmetrického a admitančního principu detekce vývodu se ZS a případně pak provést jejich porovnání. V následujícím textu této kapitoly budou stručně popsány vstupní data modelu (část 3.1) a jeho výstupy (část 3.2). Poslední část 3.3 se věnuje aplikaci modelu na několik předdefinovaných stavů sítě, na jejichž základě je možné navrhnout nastavení wattmetrické a admitanční metody detekce vývodu se ZS.

Jako softwarový nástroj pro zmíněný model byl vzhledem k znalostem autora práce zvolen program MATLAB. Všechny soubory vzniklého modelu budou v elektronické formě na CD přiloženy k této práci.

3.1 Vstupní údaje

Statický model ZS uvažuje síť se dvěma vývody, z nichž vždy na jednom z nich nastává ZS. Ve výchozí situaci je reprezentuje vývod V1 vývod s venkovním vedením, na kterém dochází k ZS. Vývod V2 s kabelovým vedením pak reprezentuje zbylou část sítě (všechny ostatní vývody v rozvodně), která je většinovým přispěvatelem celkového zemního kapacitního proudu. Hodnoty parametrů vývodů V1 a V2 jsou zadávány v hlavním skriptu `simulaceZS.m`. Dále je možné nastavit parametry zhášecí tlumivky. Z těchto parametrů je možné v hlavním skriptu zvolit odpor R_{TL} vinutí zhášecí tlumivky a jmenovité napětí U_{nPO} pomocného výkonového vinutí této tlumivky, do kterého je připínán pomocný odporník. Zbylé parametry zhášecí tlumivky, tj. její indukčnost L_{TL} a hodnota odporu R_{PO} připínaného pomocného odporníku, jsou voleny po spuštění skriptu. Přehled zvolených parametrů ve výchozím stavu skriptu je uveden v následujících tabulkách 3.1 a 3.2.

Tab. 3.1: Zvolené výchozí parametry vývodů V1 a V2. Zdroj [35]

| Vývod V1 - venkovní vedení 35 AlFe6 v rovinném uspořádání | | | | |
|--|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| l | $G_1 = G_2 = G_3$ | C_1 | C_2 | C_3 |
| [m] | $[\mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}]$ | $[\text{nF} \cdot \text{km}^{-1}]$ | $[\text{nF} \cdot \text{km}^{-1}]$ | $[\text{nF} \cdot \text{km}^{-1}]$ |
| 100 | 0,625 | 4,65 | 4,07 | 4,65 |
| Vývod V2 - kabelové vedení 22-AXEKCY 1x240 | | | | |
| l | $G_1 = G_2 = G_3$ | $C_1 = C_2 = C_3$ | | |
| [m] | $[\mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}]$ | $[\text{nF} \cdot \text{km}^{-1}]$ | | |
| 20 | 0,625 | 297 | | |

Tab. 3.2: Zvolené výchozí parametry zhášecí tlumivky

| R_{TL} | L_{TL} | U_{nPO} | R_{PO} |
|------------|----------|-----------|------------|
| $[\Omega]$ | [H] | [V] | $[\Omega]$ |
| 10 | -* | 500 | -* |

* Volí po spuštění skriptu

Další vstupní parametry se zadávají až po spuštění hlavního skriptu s názvem `simulaceZS.m` a týkají se již samotného ZS. Konkrétně to je v jakém vývodu nastane ZS, v jaké fázi a s jakou hodnotou odporu. Dále jestli je připnutý pomocný odporník a jaká je jeho hodnota. Poslední dotaz skriptu se týká simulace ZS pro zadané stavy sítě (viz část 3.3). Uvedeme zde příklad zadání těchto parametrů:

```
Vývod se zemním spojením (1 nebo 2): 1
Fáze, ve které vznikne ZS (1, 2, 3): 3
Zadejte hodnotu odporu poruchy R_P [Ohm]: 4000
Připnutý pomocný odporník? (A/N): A
Hodnota odporu pomocného odporníku [Ohm]: 1
Zahájit simulaci ZS pro zadané stavy sítě? (A/N): A
```

3.2 Funkce a výstupy modelu

3.2.1 Ukázkový příklad

Spuštěním hlavního skriptu `simulaceZS.m` modelu ZS se v příkazovém okně programu MATLAB rozvine dialog, který na základě zadaných parametrů zobrazuje počítané hodnoty zvolených parametrů sítě. Ukázka výstupu modelu je uvedena v

příloze C. V této ukázce byly uvažovány parametry sítě a zhášecí tlumivky podle tabulek 3.1 a 3.2 a indukčnost zhášecí tlumivky byla zvolena jako $L_{TL} = 0,5 \text{ H}$ (mírně překompenzovaný stav sítě). Po zadání indukčnosti L_{TL} se zobrazí vypočtené hodnoty provozních parametrů sítě za normálního (bezporuchového) stavu. Konkrétně to je nesymetrie, rozladění a tlumení sítě, nastavená hodnota L_{TL} a hodnota indukčnosti zhášecí tlumivky při vyladěném stavu sítě. Dále pak hodnoty napětí jednotlivých fází proti zemi (v poměrných jednotkách), napětí $u_{(0)}$, celkové svodové proudy jednotlivých vývodů, souhrnný svodový proud od obou vývodů a netočivé složky admitancí jednotlivých vývodů.

V ukázkovém výstupu modelu ZS zobrazeného v příloze C nastalo ZS ve vývodu V1, ve fázi 3 a o hodnotě odporu poruchy $R_P = 4000 \Omega$. Automatika připínání pomocného odporníku byla neaktivní. Po zadání této specifikace ZS následuje výstup vypočtených parametrů sítě po vzniku ZS. Konkrétně to jsou opět napětí jednotlivých fází proti zemi, napětí $u_{(0)}$, celkové svodové proudy jednotlivých vývodů, souhrnný svodový proud od obou vývodů a netočivé složky admitancí jednotlivých vývodů. Netočivé admitance jsou vypočteny obvyklým i přírůstkovým způsobem.

Za zmíněnými výpočty parametrů sítě po vzniku ZS následuje hláška o hodnotě odporu ZS, při kterém je napětí $u_{(0)} = 0,2$ (obvykle nastavovaná popudová hodnota). Dále je zde možnost zahájení aplikování modelu na zadané stavy sítě (podrobněji viz část. 3.3).

Po výpočtu parametrů sítě po vzniku ZS se otevřou okna s fázorovými diagramy, které znázorňují rozložení fázových napětí v síti po vzniku ZS a rozložení netočivých složek napětí a proudu na jednotlivých vývodech. Tyto výstupy jsou ukázány na obrázcích C.1 a C.2 a jsou posledními z výstupů této ukázky.

3.2.2 Ukázka dalších výstupů modelu

Využití modelu ZS je možné i mimo již zmíněnou ukázkou. Například tak můžeme zobrazit rozložení fázorů napětí při ZS a trajektorii koncového bodu napětí $\bar{u}_{(0)}$ v síti, která je různě rozladěná. Dokonce i v izolované síti. Nebo je také možné ukázat si vliv připínání pomocného odporníku (PO) na měřenou netočivou složku proudu vývodu se ZS. Zajímavé mohou být také závislosti napětí $u_{(0)}$ na hodnotě odporu ZS v různě rozladěné kompenzované síti a izolované síti. Pohledy na tyto stavy sítě jsou ukázány v příloze C a popíšeme je v následujících odstavcích.

Rozložení fázorů napětí při vzniku ZS v různě rozladěné síti a v síti izolované je ukázáno na obrázcích C.3, C.4, C.5 a C.8. U kompenzované sítě přitom byl zvolený stav vykompenzovaný, o 10% podkompenzovaný a o 10% překompenzovaný. Na těchto obrázcích si můžeme všimnout hlavního rozdílu v tom, jak se

posouvá koncový bod napětí $\bar{u}_{(0)}$ při rostoucím R_P a při jednotlivých stavech sítě ($u_{(0)} = f(R_P)$). V ideálně kompenzované síti se tento koncový bod posouvá téměř po úsečce. V ostatních případech se pohybuje po křivce, která je u stavů kompenzované sítě blízká kuželosečce. V případě izolované sítě to pak je křivka blízká přímo kružnici. Pozorovat můžeme také změnu směru vypuknutí těchto křivek. Na základě toho pak můžeme vyslovit hypotézu, že směr vypuknutí křivky $u_{(0)} = f(R_P)$ je u podkompenzované sítě shodný jako u sítě izolované, protože postupným snižováním kompenzace sítě zvyšujeme hodnotu indukčnosti zhašecí tlumivky a zvyšujeme tedy i hodnotu uzlové impedance. Za krajní případ tak můžeme pokládat izolovanou síť.

Vliv připínání PO na rozložení fázorů napětí můžeme ukázat na obrázku C.6. Při porovnání s obrázkem C.5 pak vidíme, že dochází nejen k posunu uzlu fázových napětí směrem ke uzlu transformátoru, ale také i ke zploštění křivky $u_{(0)} = f(R_P)$. Připnutý PO totiž snižuje nesymetrii sítě, tedy i $\bar{u}_{(0)}$.

Vliv připínání PO na rozložení $\bar{u}_{(0)}$ a $\bar{i}_{(0)}$ je možné pozorovat na obrázku C.7. Při stejných parametrech ZS, tak dochází v první řadě ke změně fázového rozdílu mezi $\bar{u}_{(0)}$ a $\bar{i}_{(0)}$. Připnutý PO zvětšuje tento fázový rozdíl. Za druhé dochází ke zvýšení proudu $\bar{i}_{(0)}$, patrné to je z měřítek proudů.

Závislosti velikosti $u_{(0)}$ na odporu ZS v síti s izolovaným uzlem a v síti kompenzované při různých stavech je znázorněna na obrázku C.9. Z tohoto obrázku je patrné, že v izolovaných sítích je tato závislost mnohem strmější než v sítích kompenzovaných. Také i mezi různými stavy rozladění v síti kompenzované jsou malé rozdíly. Nejméně strmá závislost $u_{(0)} = f(R_P)$ pak je v případě ideálně vykompenzované sítě. Provozování sítí jako ne zcela vykompenzované však může mít i své výhody - viz část 1.3.

3.3 Předdefinované stavy sítě a výstup modelu ZS

Poslední možností, kterou nabízí vytvořený model ZS je aplikovat jej na soubor předdefinovaných stavů sítě a vypočítat pro ně parametry, které byly uvedeny v části 3.2.1. Tento krok můžeme nazvat simulací ZS. Na základě této simulace pak bude možné zvolit nastavení wattmetrické a konduktanční metody detekce vývodu se ZS a ověřit ho při všech uvažovaných stavech sítě.

Soubor předdefinovaných stavů sítě bude zahrnovat změny v úrovni kompenzace sítě, ZS o různých hodnotách odporu, stav při připnutém PO a změnu konfigurace sítě (realizováno zjednodušeně změnou délky jednotlivých vývodů). Kompletní přehled je rozepsán v tabulce 3.3.

Tab. 3.3: Zvolené stavy sítě pro výpočet modelem ZS

| Stav sítě | R_P | R_{PO} | Popis změn |
|----------------------------|----------------------|------------|--|
| Vykompenzovaný stav | bez ZS | - | Výchozí stav |
| | | - | Změna konfigurace sítě |
| | $0 \div 8000 \Omega$ | - | ZS o různých odporech |
| | | 1Ω | ZS o různých odporech při připnutém PO |
| Překompenzovaný stav o 30% | bez ZS | - | Výchozí stav |
| | | - | Změna konfigurace sítě |
| | $0 \div 8000 \Omega$ | - | ZS o různých odporech |
| | | 1Ω | ZS o různých odporech při připnutém PO |
| Překompenzovaný stav o 15% | bez ZS | - | Výchozí stav |
| | | - | Změna konfigurace sítě |
| | $0 \div 8000 \Omega$ | - | ZS o různých odporech |
| | | 1Ω | ZS o různých odporech při připnutém PO |
| Podkompenzovaný stav o 15% | bez ZS | - | Výchozí stav |
| | | - | Změna konfigurace sítě |
| | $0 \div 8000 \Omega$ | - | ZS o různých odporech |
| | | 1Ω | ZS o různých odporech při připnutém PO |

Vstupní parametry sítě pro její jednotlivé předdefinované stavy z tabulky 3.3 jsou shodné s těmi v tabulkách 3.1 a 3.2. Indukčnost zhášecí tlumivky se přitom vypočítává ze zadané hodnoty rozladění sítě. Hodnota pomocného odporu je zvolena jako 1Ω . Všechny tyto parametry jsou sestaveny do matice, do které se pak připsují nově vypočítané hodnoty ostatních uvažovaných veličin. Struktura této matice je náležitě okomentována v hlavním skriptu `simulaceZS.m` a výchozí hodnoty vstupních parametrů je možné měnit.

Spuštění simulace ZS pro předdefinované stavy sítě se provede volbou po výpočtu parametrů sítě se ZS (viz část 3.2.1). Výsledek je poté zapsán do souboru `simulaceZS.xlsx`, který je uložen v aktuálním workspace programu MATLAB a je možné ho otevřít programem Excel. Taktéž i v tomto souboru jsou náležitě popsány všechny uvažované veličiny.

4 TESTOVÁNÍ OCHRANNÝCH FUNKCÍ PŘI ZEMNÍCH SPOJENÍCH

V předchozích částech této práce byl z teoretického hlediska popsán wattmetrický a admitanční (resp. konduktanční) princip detekce vývodu se ZS. Tyto principy byly v rámci této práce testovány zemními ochranami REF 615, REM 543 a RYO, s důrazem na vysokoodporová ZS v kompenzovaných sítích. Jako první podklad pro testování byly použity ustálené hodnoty netočivých složek napětí a proudu po vzniku ZS v síti, které byly získány simulací modelem ZS v síti (viz kapitola 3). Druhým podkladem pro testování byly průběhy získané z experimentálních měření na vývodu V1273 rozvodny 22 kV, která je součástí napájecí trafostanice 110/22 kV Brno Medlánky (MEY9). Experiment byl prováděn v roce 2012 pracovníky Ústavu elektroenergetiky na FEKT VUT v Brně v součinnosti s provozovatelem distribuční sítě E.ON.

Tato kapitola je rozdělena na tři části. V první podkapitole 4.1 je shrnuto testování na základě výsledků modelu ZS v síti. Druhá část 4.2 shrnuje testování na základě zmíněných experimentálních měření. Ke generování netočivých složek napětí a proudu při všech testování byl použit testovací zdroj OMICRON CMC 256plus, který je k dispozici v laboratořích ÚEEN FEKT VUT v Brně. Jeho podrobnější specifikaci spolu se schéma zapojení pracoviště je možné nalézt v příloze B.

4.1 Testování konduktanční a wattmetrické ochrany na základě výsledků modelu ZS v síti

4.1.1 Nastavení ochranných funkcí

Nastavení konduktanční a wattmetrické metody detekce vývodu se ZS, provedeme na základě stavů vyladěné sítě, které jsme získali simulací modelem ZS v síti (viz část 3.3). Tyto údaje jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Nastavení konduktanční ochrany provedeme s ohledem na stav po vzniku ZS bez připnutého pomocného odporu (viz tabulka 4.1). Zvolíme dopředný směrový režim konduktanční charakteristiky - viz obr. 2.11b. Dopřednou konduktanci $G_{(0)\text{For}}$ vypočítáme z hodnoty konduktance $G_{(0)}$ z tab. 4.1 vynásobením bezpečnostním koeficientem k . Ten zvolíme jako 0,7. Dále je třeba uvažovat, že zemní ochrany počítají tuto konduktanci z měřených hodnot trojnásobku proudu $\bar{I}_{(0)}$ - tzn. počítají hodnotu $3G_{(0)}$. Výpočet $G_{(0)\text{For}}$ tedy provedeme takto:

$$G_{(0)\text{For}} = 3G_{(0)} \cdot k = 3 \cdot 0,133 \text{ mS} \cdot 0,7 = 0,279 \text{ mS}. \quad (4.1)$$

Tab. 4.1: Údaje o síti získané modelem ZS v síti (viz část 3.3)

| Vyladěná síť | | | | | | |
|--------------------------------|-------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------|
| Stav bez ZS | | $ \bar{u}_{(0)}^{[0]} $ | $\arg(\bar{u}_{(0)}^{[0]})$ | $ 3\bar{I}_{(0)}^{[0]} $ | $\arg(3\bar{I}_{(0)}^{[0]})$ | $G_{(0)}^{[0]}$ |
| | | [-] | [°] | [A] | [°] | [mS] |
| | | 0,0311 | 147,88 | 0,352 | 177,61 | -0,258 |
| Při ZS, bez pom. odporníku | R_P | $ \bar{u}_{(0)} $ | $\arg(\bar{u}_{(0)})$ | $ 3\bar{I}_{(0)} $ | $\arg(3\bar{I}_{(0)})$ | $G_{(0)}$ |
| | [Ω] | [-] | [°] | [A] | [°] | [mS] |
| | 500 | 0,7673 | -0,22 | 5,491 | 134,79 | 0,133 |
| | 3000 | 0,3455 | -0,29 | 2,472 | 135,30 | 0,133 |
| | 6000 | 0,2008 | 1,80 | 1,437 | 136,81 | 0,133 |
| | 8000 | 0,1541 | 3,02 | 1,103 | 138,02 | 0,133 |
| Při ZS, $R_{Po} = 1 \Omega$ | 500 | 0,4978 | -0,04 | 12,117 | 168,41 | 0,649 |
| | 3000 | 0,1287 | 1,14 | 3,250 | 169,58 | 0,649 |
| | 6000 | 0,0657 | 2,91 | 1,658 | 171,36 | 0,649 |
| | 8000 | 0,0485 | 4,22 | 1,224 | 172,66 | 0,649 |

Pozn.: při výpočtu konduktance $G_{(0)}$ byla uvažována síť s jmenovitým sdruženým napětím 22kV

Nutno ještě podotknout, že tato hodnota konduktance je vztažená k hodnotám parametrů sítě, ne k sekundární straně PTN a PTP, které transformují $\bar{U}_{(0)}$ a $3\bar{I}_{(0)}$ na ochranami měřitelné hodnoty. Proto při nastavování hodnoty $G_{(0)For}$ je nutné mít informaci o tom, jestli daná konkrétní ochrana zohledňuje převody PTN a PTP (a uvažuje tak hodnoty $\bar{U}_{(0)}$ a $3\bar{I}_{(0)}$ na primární straně PTN a PTP) nebo nikoli. V této práci používané ochrany ABB toto zohledňují, ochrana RYo ne. Před nastavením hodnoty konduktance u ochrany RYo je tedy třeba ji přepočítat podle zvolených převodů PTN a PTP - viz tabulka 4.2. Přepočtená konduktance pak bude:

$$G'_{(0)For} = G_{(0)For} \cdot \frac{1}{\frac{100}{\frac{22000}{\sqrt{3}}}} = 0,279 \text{ mS} \cdot \frac{1}{\frac{100}{\frac{22000}{\sqrt{3}}}} = 0,354 \text{ mS}. \quad (4.2)$$

Na základě výše vypočítaných konduktancí nyní můžeme nastavit konduktanční ochranu v ochranách REF 615 a RYo. Protože ochrana REF 615 disponuje 3 stupni konduktanční (resp. admitanční) ochrany, nastavíme každý jinak. První a druhý stupeň bude mít popudovou hodnotu shodnou popudovou hodnotu $U_{(0)}$ a shodnou $G_{(0)For}$. Lišit se budou akorát ve způsobu výpočtu konduktance - normální, přírůst-

Tab. 4.2: Převody zvolených PTN a PTP pro měření $\bar{U}_{(0)}$ a $3\bar{I}_{(0)}$

| | |
|-----|------------------------------|
| PTN | $\frac{22}{\sqrt{3}}/0,1$ kV |
| PTP | 100/1 A |

kový. Třetí stupeň bude mít nižší popudovou hodnotu $U_{(0)}$, ale zato vyšší hodnotu konduktance v dopředném směru než je hodnota $3G_{(0)}$ bez připnutého PO. Tento stupeň by tak měl mít zvýšenou možnost reagovat při připnutém odporu, kdy napětí $U_{(0)}$ výrazně klesá. Konduktanční ochrana v RY₀ bude nastavena srovnatelně s prvním stupněm v REF 615 s tím rozdílem, že zde musíme uvažovat přepočtenou hodnotu $G'_{(0)\text{For}}$. Čas zpoždění vybavení konduktanční ochrany v obou ochranách bude shodný. U ochrany RY₀ navíc pro účely signalizace funkce zvolíme výstupní relé 4. Volba nastavení je uvedena v tabulce 4.3.

Tab. 4.3: Nastavení konduktanční ochrany v ochranách REF 615 a RY₀

| REF 615 | | | | | | RY ₀ | | |
|---------|-----------------------|------------------|-----------------------------|-----------------|-------------|------------------|------------------------------|-------------|
| Stupeň | <i>Operation mode</i> | $U_{(0)}$ [-] | $G_{(0)\text{For}}$ [mS] | <i>Clc mode</i> | t [ms] | $U_{(0)}$ [-] | $G'_{(0)\text{For}}$ [mS] | t [ms] |
| EFPADM1 | G_o^* | 0,2 | 0,28 | Normal | 100 | 0,2 | 0,35 | 100 |
| EFPADM2 | | 0,2 | 0,28 | Delta | | | | |
| EFPADM3 | | 0,08 | 0,72 | Normal | | | | |

* Protože u ochrany REF 615 je konduktanční ochrana součástí té obecnější admitanční, je nutné zvolit tento provozní režim

Nastavení konduktanční ochrany je možné provést také na stav ZS s připnutým PO. Ovšem zde nastává již několikrát zmiňovaný problém s možným poklesem $U_{(0)}$ pod jeho popudovou hodnotu při nižších hodnotách R_P - jak můžeme vidět v dolní části tabulky 4.1. Proto bylo zvoleno nastavení při nepřipojeném PO.

Nastavení wattmetrické ochrany nebo-li též směrové zemní ochrany provedeme opět na stav při vzniku ZS ve vykompenzované síti bez připnutého PO. Začneme tím, že zvolíme shodnou popudovou hodnotu $U_{(0)}$ jako u prvního stupně konduktanční ochrany - $u_{(0)} = 0,2$. Dále z tabulky 4.1 odečteme pro tuto hodnotu napětí proud $3\bar{I}_{(0)}$ včetně jeho argumentu. Pro nastavení wattmetrické ochrany budeme potřebovat znát hodnotu činné složky tohoto proudu při uvažování napětí $\bar{u}_{(0)}$ v reálné ose (viz obrázek 2.5c). Tu získáme následovně:

$$\begin{aligned} \text{Re} \{3\bar{I}_{(0)}\} &= 3\bar{I}_{(0)} \cdot \cos \varphi = 3\bar{I}_{(0)} \cdot \cos [\arg (3\bar{I}_{(0)}) - \arg (\bar{u}_{(0)})] = \\ &= 1,437 \text{ A} \cdot \cos (136,81 - 1,80) = -1,016 \text{ A}, \end{aligned} \quad (4.3)$$

přičemž tuto hodnotu uvažujeme při nastavování ochrany jako kladnou. Navíc je opět tuto hodnotu nutné přepočítat podle převodu PTP (viz tab . 4.2):

$$Re \{3\bar{I}'_{(0)}\} = 3\bar{I}_{(0)} \cdot \frac{1}{100} = 1,016 \text{ A} \cdot \frac{1}{100} = 0,01 \text{ A} \quad (4.4)$$

Dále bychom měli tuto hodnotu vynásobit bezpečnostním koeficientem ($k < 1$), abychom získali jistou rezervu tohoto nastavení. Protože je hodnota proudu vypočteného ve vztahu 4.4 už tak na dolní hranici nastavení ochran v REM 543 a RYo, nebude bezpečnostní koeficient uvažován. Konečná volba nastavení směrových zemních ochran v REM 543 a RYo je uvedena v tabulkách 4.4 a 4.5. V obou případech přitom uvažujeme stejné zpoždění působení této ochrany a dále se nesmí zapomenout zvolit příslušné režimy této ochrany tak, aby byla nastavena jako ochrana wattmetrická. U ochrany RYo zvolíme pro účely signalizace působení funkce výstupní relé 3.

Tab. 4.4: Nastavení směrové zemní ochrany v ochraně REM 543

| REM 543 | | | |
|-----------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------|
| <i>Operation mode</i> | <i>Oper. Criteria</i> | <i>Basic angle</i> | <i>Oper. Charact.</i> |
| <i>Definite time</i> | <i>IoSin/Cos</i> & <i>Uo</i> | 0° | $I_{(0)} \cos \varphi$ |
| <i>Start current</i> | <i>Satrt voltage</i> | <i>Operate time</i> | <i>Intermittent E/F</i> |
| 1% · In | 20% · Un | 0,1 s | <i>Not active</i> |

Tab. 4.5: Nastavení směrové zemní ochrany v ochraně RYo

| RYo | | | |
|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| <i>U, [V]</i> | <i>I, [A]</i> | <i>t, [s]</i> | <i>Fi ochr.</i> |
| 20 | 0,01 | 0,1 | 0° |

4.1.2 Průběh testování

V této části testování byly nastavovány hodnoty $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$ na výstupech testovacího zařízení OMICRON CMC 256plus. Tyto veličiny jsou přivedeny na příslušné vstupy jednotlivých ochran podle schéma na obrázku B.7. Takto bude možné testovat všechny ochranné funkce najednou a pomocí signálů z binárních výstupů použitých ochran sledovat zpoždění doby působení ochranných funkcí ¹.

¹Binární výstupy pro jednotlivé ochranné funkce je nutné nastavit pomocí softwarů k jednotlivým ochranám.

Nastavované hodnoty $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$ pro jednotlivé stavy sítě jsou zobrazeny v tabulkách D.1 a D.2, které jsou v příloze této práce. Jejich nastavování provedeme v PC pomocí ovládacího softwaru OMICRONU *Test Universe* - modul *QuickCMC*. Ještě před samotným zahájením testování je však nutné: (1) ověřit funkčnost propojení PC a OMICRONu (v softwaru *Test Universe*) a (2) nastavit konfiguraci výstupů testovacího zdroje OMICRON CMC 256plus. V druhém případě je možné postupovat podle [38]. S ohledem na možný vývoj testování byla zvolena tato konfigurace:

- Výstupy napětí: 4x300 V; 85 VA @ 85 V; 1 Arms;
- Výstupy proudu: 6x12,5 A; 70 VA @ 7,5 A; 10 Vrms.

Dále je ještě třeba přiřadit názvy těmto vstupům a zvolit aktivní binární vstupy (1-7).

V průběhu testování byla v modulu *QuickCMC* nastavována velikost i fáze $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$ podle vypočtených hodnot v tabulkách D.1 a D.2. Ukázka z tohoto nastavování je na obrázku D.1. Po spuštění konkrétního testu (sady nastavených hodnot $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$) pak bylo zapsáno, zdali ochranné funkce působily, pokud ano, tak které stupně působily a s jakým zpožděním. Tyto údaje jsou k vidění taktéž v těchto tabulkách.

4.1.3 Shrnutí výsledků testování

Testování v této části bylo provedeno pro 4 stavy sítě:

- Překompensovaná síť o 30%;
- Překompensovaná síť o 15%;
- Vyladěná síť;
- Podkompensovaná síť o 15%;

při uvažování ZS s odpory $R_P = \{0; 500; 3000; 6000; 8000\} \Omega$. Pro každý stav sítě bylo navíc ověřeno, že ochrana nereaguje na ZS v jiném vývodu. Pro tyto případy byly modelem ZS speciálně vypočítány konkrétní hodnoty $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$. Dále byly ještě uvažovány případy, kdy v síti dojde k ZS a dojde k připojení pomocného odporníku $R_{PO} = 1 \Omega$ nebo $R_{PO} = 3 \Omega$. Záznamy o působení či nepůsobení nastavených ochran a zpoždění jejich působení jsou uvedeny v tabulkách D.1 a D.2.

V případě překompensované sítě o 30% (viz tab. D.1) působily všechny uvažované ochrany pouze při ZS s $R_P = 500 \Omega$, protože při ZS s vyššími hodnotami R_P byla hodnota napětí $U_{(0)}$ nižší než ta popudová. Výjimku v tomto směru tvoří 3. stupeň konduktanční ochrany u REF 615 (EFPADM3), který reagoval na ZS o odporu 3000Ω při připnutém PO (v obou případech). Působení tohoto stupně bylo takto zamýšleno, protože měl záměrně nižší popudovou hodnotu napětí $U_{(0)}$. Testování v případě překompensované sítě o 15% bylo velmi podobné předchozím výsledkům s tím rozdílem, že všechny ochrany zaznamenaly i ZS o odporu 3000Ω . Při připnutém

odporníku $R_{PO} = 3 \Omega$ působila ochrana EFPADM3 i při ZS o odporu 6000Ω . Klíčovou roli přitom opět hrála velikost napětí $U_{(0)}$, jehož hodnoty byly větší než při překompenzované síti o 30%. Připnutý pomocný odporník 3Ω pak znamenal menší pokles $U_{(0)}$ než v případě odporníku 1Ω .

Stav vyladěné sítě podle výsledků testování v tabulce D.2 zaručoval nejširší rozsah detekovatelných ZS. A to v případě bez připnutého PO až do hodnot odporu $R_P = 6000 \Omega$ a při připnutém PO 3Ω i pro hodnotu odporu ZS 8000Ω (detekováno 3 stupněm konduktanční ochrany EFPADM3). Wattmetrické ochrany při připnutém PO reagovaly shodně jako 1. a 2. stupeň EFPADM, což může dokazovat to, že tyto dvě ochrany byly nastaveny přibližně stejně. Velký podíl na tom má také shodná popudová hodnota $U_{(0)}$, která těmto funkcím zamezuje působení při nízkém napětí. Jinak by i tyto ochrany mohly při uvedeném testování zaznamenat i další ZS.

U podkompenzované sítě o 15% byl rozsah zaznamenaných ZS opět menší, což lze opět přisoudit strmějšímu poklesu $U_{(0)}$ v závislosti na R_P . Za stavu bez připnutého PO zaznamenaly všechny ochrany ZS o odporu 500Ω . Zajímavý pak byl případ simulovaného ZS s $R_P = 3000 \Omega$, při kterém zapůsobila funkce EFPADM2 a konduktanční i wattmetrická ochrana v RYo. V tomto konkrétním případě je totiž činná složka proudu $3\bar{I}_{(0)} = 0,98 \text{ A}$, což je těsně pod nastavenou hodnotou 1 A (obojí uvažováno na primáru PTP). Z toho tedy vyplývá, že ochrana DEF2low v REM 543 vyhodnotila velikost tohoto proudu přesněji než ochrana RYo. Obě ochrany přitom mají stejnou přesnost měření úhlu ($< 2^\circ$), ale DEF2low je přesnější v měření proudu (DEF2low cca $\pm 2,5\%$ a RYo $\pm 5\%$)². Paradoxně v tomto konkrétním případě byla větší přesnost ochrany DEF2low spíše na škodu, ale teoreticky může nastat i situace opačná. Obdobný případ ohledně méně přesného měření ochrany RYo lze pozorovat také ve stavu s připnutým PO 3Ω a $R_P = 3000 \Omega$. Nepřesnost je ale opět ve prospěch signalizace ZS.

U působení osamocené ochranné funkce EFPADM2 je možné spatřit její výhodnost, protože obvyklé počítání konduktance u REF 615 v tomto případě evidentně selhalo. Při testování dalších stavů s připnutým PO byla situace podobná jako u jinak vyladěných sítí. Zde působil pouze 3. stupeň konduktanční ochrany u REF 615 až do hodnot $R_P = 6000 \Omega$ při PO 3Ω .

Zaznamenané časy působení u obou ochran ABB si byly ve všech měření navzájem velmi blízké a byly nanejvýš +30% nad nastavenou dobu zpoždění působení $t = 100 \text{ ms}$. Zpoždění působení obou ochranných funkcí v ochraně RYo bylo větší a v

²Podrobněji viz příložená technická data k DEF2low - obr. B.5, a k RYo - obr. B.6

některých případech bylo i přes 200 ms - odchylka více než 100%. Z pohledu detekce těchto ZS je ale možné uvažovat jako hlavní to, že ochrana zapůsobila. Celkové lze z měřených zpoždění vysledovat, že s rostoucím odporem ZS, mírně rostlo i zpoždění signalizace vzniku ZS.

4.2 Testování konduktanční a wattmetrické ochrany průběhy experimentálních vysokoodpových ZS

Pro druhou část testování byly vybrány 3 záznamy experimentálních ZS s odpory $R_p = \{2; 3; 6,25\}$ k Ω ve vyladěné síti, které byly získány v rámci výše zmíněného měření pracovníky ÚEEN FEKT VUT v Brně. Z těchto průběhů byly vyfiltrovány průběhy $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$, které byly dále zpracovávány. Soubory těchto průběhů jsou přiloženy na CD k této práci a jejich náhledy jsou zobrazeny spolu s výsledky testování na obrázcích D.3, D.4 a D.5.

4.2.1 Nastavení ochranných funkcí

Nastavování konduktanční a wattmetrické ochrany je provedeno na stav ZS v síti bez připnutého pomocného odporu.

Nastavení konduktanční ochrany provedeme na základě časové závislosti vypočítané konduktance při jednotlivých průbězích (viz obrázek D.2). Data k těmto závislostem se nachází v příslušných souborech na přiloženém CD. Vzhledem k specifickému formátu času v souborech s vypočtenými konduktancemi nejsou na těchto obrázcích uvedeny časové jednotky. Pro účely stanovení přibližné hodnoty konduktance jsou tyto závislosti dostačující. Hodnotu konduktance pak můžeme upřesnit daty ze souborů s vypočtenými konduktancemi. Konečné zjištěné hodnoty konduktancí vidíme v tabulce 4.6.

Jelikož se ve všech případech jedná o tentýž vývod, budeme uvažovat jedinou hodnotu konduktance při ZS (bez připnutého PO) - $G_{(0)} = 0,35$ mS. Hodnotu konduktance při připnutém PO, kterou budeme uvažovat při nastavování 3. stupně admitanční ochrany v REF 615, budeme uvažovat $G_{(0)} = 2,42$ mS. Další postup stanovení konduktance nastavené v ochraně a volba bezpečnostního koeficientu, převodů PTN a PTP a popudových hodnot $U_{(0)}$ jsou shodné jako v části 4.1.1, proto rovnou v tabulce 4.7 uvedeme nastavení konduktanční ochrany pro druhou část testování.

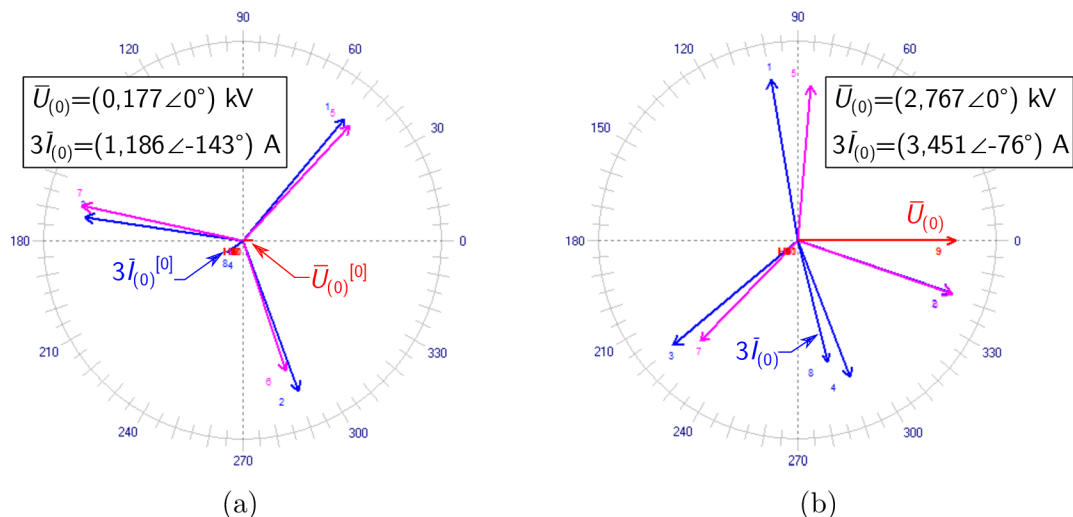
Tab. 4.6: Stanovené hodnoty konduktancí sítě pro záznamy ZS s různými hodnotami R_P

| | Bez ZS | Při ZS | Při ZS a připnutém PO |
|------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------|
| R_P [k Ω] | $G_{(0)}^{[0]}$ [mS] | $G_{(0)}$ [mS] | $G_{(0)}$ [mS] |
| 2 | ≈ -5 | 0,35 | 2,42 |
| 3 | ≈ -5 | 0,29 | 2,42 |
| 6,25 | ≈ -5 | 0,32 | - |

Tab. 4.7: Nastavení konduktanční ochrany v ochranách REF 615 a RY0

| Stupeň | REF 615 | | | | RY0 | | | |
|---------|-----------------------|------------------|----------------------|-----------------|-------------|------------------|-----------------------|-------------|
| | <i>Operation mode</i> | $U_{(0)}$ [-] | $G_{(0)For}$ [mS] | <i>Cle mode</i> | t [ms] | $U_{(0)}$ [-] | $G'_{(0)For}$ [mS] | t [ms] |
| EFPADM1 | G_o * | 0,2 | 0,25 | Normal | 100 | 0,2 | 0,3 | 100 |
| EFPADM2 | | 0,2 | 0,25 | Delta | | | | |
| EFPADM3 | | 0,08 | 1,69 | Normal | | | | |

* Protože u ochrany REF 615 je konduktanční ochrana součástí té obecnější admitanční, je nutné zvolit tento provozní režim



Obr. 4.1: Rozložení fázorů $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$ (a) před vznikem ZS (čas cca -600 ms) a (b) po vzniku ZS o hodnotě $R_P = 6,25$ k Ω (čas cca $+2000$ ms).

Nastavení wattmetrické ochrany provedeme na základě rozboru rozložení fázorů $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$ u průběhu ZS s $R_P = 6,25$ k Ω . U tohoto průběhu očekáváme nejmenší velikost proudu $I_{(0)}$. Rozbor byl proveden v programu Wavewin ABB a jeho výstupem jsou fázorové diagramy $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$ získané ze stavů před a po vzniku ZS v síti (viz obrázek 4.1³).

Z těchto získaných hodnot můžeme opět vypočítat reálnou složku netočivého proudu:

$$\operatorname{Re} \{3\bar{I}_{(0)}\} = \operatorname{Re} \{(3,451 \angle -76^\circ) \text{ A}\} = 0,835 \text{ A}. \quad (4.5)$$

Tuto hodnotu je dále nutné přepočítat podle převodu PTP (viz tab . 4.2):

$$\operatorname{Re} \{3\bar{I}'_{(0)}\} = 3\bar{I}_{(0)} \cdot \frac{1}{100} = 0,835 \text{ A} \cdot \frac{1}{100} = 0,008 \text{ A}. \quad (4.6)$$

Správně by tato hodnota měla být ještě násobena bezpečnostním koeficientem ($k < 1$), ale protože je tato hodnota proudu už tak malá, že je na dolní hranici nastavení v použitých ochranách, nebudeme tuto hodnotu už dále upravovat. Výsledná volba nastavení směrových zemních ochran (tedy wattmetrických) u REM 543 a RYo bude tedy totožná s tou v první části testování - viz tabulky 4.4 a 4.5.

4.2.2 Průběh testování

Testování ochranných funkcí probíhalo přehráváním/generováním průběhů $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$ zmíněných experimentálních ZS. Použit k tomu byl modul *Advanced TransPlay*

³V obou případech má měřené napětí $\bar{U}_{(0)}$ opačnou polaritu.

v programu *Test Universe* k testovacímu zařízení OMICRON CMC 256plus. Generované průběhy poté byly přiváděny na vstupy použitých zemních ochran. Schéma zapojení je přitom stejné jako při předchozím testování - obrázek B.7.

V uvedeném modulu *Advanced TransPlay* je třeba provést konfiguraci napěťových a proudových výstupů, dále přiřadit těmto vstupům názvy a aktivovat binární vstupy. Toto nastavení bylo provedeno stejně jako v při předchozím testování. Po naimportování zvoleného průběhu je pak ještě nutností nastavit měřítko signálu (uvažujeme 100%) a převod PTN a PTP, které napájejí ochrany (zvolené hodnoty viz 4.2).

Po provedení všech potřebných nastavení bylo zahájeno generování jednotlivých průběhů. Výsledky byly následně uloženy a tyto soubory jsou k dispozici na příloženém CD. Zpracování těchto výsledků je na obrázcích D.3, D.4 a D.5.

4.2.3 Shrnutí výsledků testování

Výsledky druhého testování je možné nalézt v příloze na obrázcích D.3, D.4 a D.5. Na těchto obrázcích jsou zobrazeny průběhy generovaných netočivých napětí a proudů a sekvence působení všech výše uvedených ochran. Je na nich také vyznačen okamžik vzniku ZS a doba s připnutým PO, pokud k tomu došlo.

Průběhy ZS o odporu $R_P = 2\text{ k}\Omega$ a $R_P = 3\text{ k}\Omega$ jsou si z vybraných případů ZS velmi podobné co se týče průběhů $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$ i odezvy působení ochranných funkcí (viz obrázky D.3 a D.4). Všechny ochranné funkce kromě EFPADM3 (ta je nastavená na stav s připojeným PO) začaly signalizovat ZS přibližně stejně (nejrychleji DEF2low a nejpozději ochrany v RYo). Tyto ochrany signalizovaly ZS až do okamžiku připojení PO, kdy došlo k poklesu napětí $U_{(0)}$ pod nastavenou popudovou hodnotu. Nebyla tak splněna jedna z nastavených podmínek ochranných funkcí, ačkoliv hodnota konduktance byla výrazně vyšší než v případě bez připnutého PO. Hodnota proudu $I_{(0)}$ by byla pravděpodobně také ještě dostačující.

Po připojení pomocného odporníku zahájil signalizaci ZS 3. stupeň EFPADM3 funkce EFPADM - tedy ZS signalizovala i funkce EFPADM. Pro ostatní ochrany bylo příliš nízké napětí $U_{(0)}$. Po odepnutí PO tento třetí stupeň přestal signalizovat. ZS v síti ale neustalo, a tedy ochrany EFPADM1, Go>, Ifi> a DEF2low začaly znovu signalizovat ZS. Z těchto ochranných funkcí začaly dříve působit ochrany ABB a až poté RYo. Časový rozdíl je však malý. ZS znovu nesignalizovala ochrana EFPADM2, která počítá konduktanci přírůstkovou metodou. Tato ochrana by ale podle všech předpokladů reagovat měla. Důležitý je celkový pohled na ochranné funkce, kde tím, že admitanční ochrana u REF 615 byla nastavena ve třech stupních,

jí bylo umožněno signalizovat ZS bez i s připnutým PO. Jinak lze konstatovat, že konduktanční a wattmetrická ochrana pracovaly při tomto ZS shodně.

Průběh ZS o odporu $R_p = 6,25 \text{ k}\Omega$ je specifický tím, že při něm nedošlo k připnutí PO, protože při reálném provádění tohoto experimentu ochrany nesignalizoval ZS (viz obrázek D.5). Důvodem byla nízká popudová hodnota napětí $U_{(0)}$. Stejná příčina stojí i za nepůsobením námi nastavených ochran při tomto testování. Malou výjimku v tomto tvoří funkce EFPADM3, která je nastavena s nižší popudovou hodnotou $U_{(0)}$. Funkce EFPADM3 působila pouze krátký okamžik po vzniku ZS, kdy konduktance sítě v důsledku přechodného jevu krátkodobě dosahovala hodnot převyšujících její nastavení (viz obrázek D.2c). Po odeznění působení EFPADM3 signalizovala ZS ještě cca 150 ms souhrnná admitanční ochrana EFPAMD, u níž je pravděpodobně továrně nastaveno jisté zpoždění vypnutí. Působení ochranné funkce EFPADM3 v celém rozsahu tohoto zemního spojení by bylo možné v tomto případě realizovat snížením nastavené konduktance na stejnou hodnotu jako u 1. a 2. stupně této ochrany.

5 ZÁVĚR

Požadavek na spolehlivost dodávky elektrické energie k zákazníkovi je důvodem stále větší rozšířené kompenzovaných sítí. Na druhé straně výjimečnost možnosti provozování sítě při zemním spojení je vyžádána nutností signalizace tohoto stavu zemními ochranami a vymezením postiženého úseku vedení, aby mohlo být ZS odstraněno. Přitom snahou zemních ochran je maximalizovat hodnotu odporu signalizovatelného ZS a udělat první krok vymezení poruchy detekováním vývodu se ZS v rozvodně. Za účelem přiblížení byla tato problematika popsána v úvodních kapitolách 1 a 2 této práce.

V kapitole 1 konkrétně bylo odvozeno jak vypadá bezporuchová situace a situace po vzniku ZS v kompenzované síti. Byly také ukázány příklady a důsledky reálných ZS a popsány principy jako je automatika připínání pomocného odporu a šentování a způsob provozování kompenzovaných sítí s ohledem na jejich vyladění. Následující kapitola 2 byla věnována už samotným ochranám při zemních spojeních. Byla popsána jejich práce při ZS a v návaznosti na to, možné metody detekování vývodu se ZS v kompenzovaných sítích. Dále byly popsány již konkrétní ochranné funkce při ZS v ochranách ABB REF 615, ABB REM 543 a Protection&Consulting RYo, které jsou dostupné na ÚEEN FEKT VUT v Brně.

Na přehled studovaných zemních ochran navazuje praktická část, která představuje jeden z hlavních výstupů, této práce. Na základě teorie zemního spojení byl vytvořen statický model ZS v síti. Jak bylo popsáno v kapitole 3 je tento model schopen vypočítat parametry sítě před a po vzniku ZS v kompenzované síti, ale s malými úpravami i v síti izolované nebo odporově uzemněné. Možné je také uvažovat připnutí pomocného odporu o zvoleném odporu. Na základě simulace ZS tímto modelem pro předdefinované stavy sítě bylo provedeno nastavení konduktančních a wattmetrických ochran ve výše uvedených ochranách a jejich testování (viz kap. 4.1). Při tomto testování oba principy ochran reagovaly srovnatelně a lišily se pouze doby zpoždění působení ochran ABB a ochrany RYo. Podrobnější informace o výsledcích tohoto testování je možné nalézt ve shrnutí v části 4.1.3. Vzniklý model ZS v síti by teoreticky bylo možné použít i v praxi na reálnou síť a zjistit tak vhodná nastavení konduktanční ochrany pro jednotlivé vývody v rozvodně.

Druhá část testování konduktančních a wattmetrických ochran (kap. 4.2) byla provedena pomocí záznamů průběhů experimentálních vysokoodporových ZS o hodnotách 2, 3 a 6,25 k Ω . Ze zmíněných ochran v celém sledovaném průběhu ZS o odporu 2 a 3 k Ω reagovala pouze konduktanční ochrana EFPADM ochrany REF 615. Bylo to dáno tím, že tato ochranná funkce disponuje třemi stupni nastavení, z nichž ten 3. byl nastaven i na stav s připojeným pomocným odporu. Právě 3. stupeň funkce EFPADM byl díky svému nastavení jako jediný, ikdyž jen krátkodobě, scho-

pen signalizovat vznik ZS o odporu $6,25 \text{ k}\Omega$. Podrobnější komentář k výsledkům této druhé části testování ochran je možné nalézt v části 4.2.3.

Z výsledků všech testování konduktančních a wattmetrických ochran provedených v rámci této práce je možné uvažovat, že tyto ochrany nejlépe pracují ve vyladěné síti a jsou srovnatelné co se týče úspěšnosti signalizace ZS. Pokud se ale podíváme hlouběji na princip fungování obou ochran, má ta konduktanční jednoznačnou výhodu v nezávislosti detekce na odporu ZS. Nemusí tedy u ní být vyžadováno připínání pomocného odporníku. Detekování vývodu se ZS konduktanční ochranou je prakticky omezené pouze nastavením popudové hodnoty netočivé složky napětí $U_{(0)}$ a minimální měřitelnou netočivou složkou proudu $I_{(0)}$. Do budoucna by bylo zajímavé sledovat spolehlivost detekce vysokoodporových ZS konduktanční ochranou při snížené popudové hodnotě $U_{(0)}$ této ochrany (např. $u_{(0)} = 10\%$).

Při testování byla využita možnost nastavit konduktanční ochranu EFPADM ve třech stupních. V námi uvažovaném testování se lišil způsob výpočtu konduktance a nastavená popudová hodnota $U_{(0)}$. Ukázalo se, že taková možnost nastavení jednotlivých stupňů ochrany rozšiřuje množinu případů, kdy je ochrana schopna signalizovat ZS. Konkrétní ochrana se tak stává více adaptabilní. Extrémem v této oblasti by v budoucnu mohly být třeba „inteligentní“ ochrany, které by vyhodnocovaly vznik ZS na základě dlouhodobých statistik napětí $U_{(0)}$ v bezporuchovém stavu sítě současně s velice nízkou nastavenou popudovou hodnotou napětí $U_{(0)}$ v ochraně.

Co se týče uvažovaných wattmetrických ochran, tak u nich nebyla v testovaných případech jednoznačně prokázána spolehlivější signalizace vysokoodporových ZS při připnutém pomocném odporníku. Důvodem byl značný pokles napětí $U_{(0)}$, jehož hodnota byla pod nastavenou popudovou hodnotou ochrany. Avšak pokles napětí $U_{(0)}$ není tak značný v případě připínání odporníku s odporem 3Ω namísto 1Ω . Možným řešením v této oblasti tedy může být například sofistikovaný odporník, který na základě změřených parametrů sítě vybírá vhodnou velikost připínaného odporu [40].

LITERATURA

- [1] SHORT, T. *Electric power distribution handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004, 773 p. ISBN 08-493-1791-6.
- [2] Tisková zpráva k cenovým rozhodnutím ERÚ č. 5/2013 a č. 6/2013, ze dne 27. listopadu 2013, kterými se stanovují regulované ceny související s dodávkou elektřiny pro rok 2014. In: *Energetický regulační úřad* [online]. 2013 [cit. 2014-12-30]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/477332/131129_TZ_CR2014_elektro-final.pdf/cc37fbfd-8b4a-4be9-904b-1a5e19ad159b
- [3] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [4] ČSN 33 3070. *Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí*. Praha: Český normalizační institut, 1979.
- [5] HODINKA, Miloslav. *Přechodné jevy v elektrizační soustavě*. 3. vyd. Brno: VUT, 1990, 246 s. ISBN 80-214-0083-8.
- [6] LUKÁŠ, Bernard. Ochrany vedení v sítích IT. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. 2008, č. 3 [cit. 2015-01-02]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36857.pdf>
- [7] Zemní spojení v trojfázových soustavách. In: *PowerWiki.cz* [online]. [cit. 2014-12-30]. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf>
- [8] ROBERTS, Jeff, Hector ALTUVE a Daqing HOU. SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, Inc. *Review of ground fault protection methods for grounded, ungrounded, and compensated distribution systems* [online]. 2001, 40 s. [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: www.selinc.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=2604
- [9] *Zemní spojení - opora: Studijní materiál VŠB*. 2006. Dostupné z: https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/zemni_spojzeni/Zemn%ed%20spojen%ed%20-%20opora.pdf
- [10] Geschichte. *Technische Universität Darmstadt* [online]. 2014 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: http://www.wphaus.tu-darmstadt.de/wph_unserhaus/wph_geschichte/index.de.jsp

- [11] *22-AXEKCE: Energetický kabel v základním provedení s PE pláštěm* [online]. 2015 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: http://www.nktcables.com/~media/Files/NktCables/Products/CZ/MV%20cables%20and%20accessories/MV_new%20datasheets/22-AXEKCE.pdf
- [12] TESAŘOVÁ, Miloslava. Průmyslová elektroenergetika: Vliv způsobu provozu uzlu transformátoru na zemní poruchy. *Domovské stránky doc. Ing. Miloslavy Tesařové, Ph.D.* [online]. 2000 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~tesarova/PE/Soubory/Kap6.pdf>
- [13] HADÁČEK, Zdeněk. *Analýza provozu uzlu sítě 22 kV vzhledem k jednofázovým zemním poruchám* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/3944/DP%20Hadacek%20Zdenek%202012%20-%20Analyza%20provozu%20uzlu%20site%2022%20kV%20vzhledem%20k%20jednofazovym%20zemnim%20porucham.pdf?sequence=1>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.
- [14] TOMAN, P., J. DVORAK, J. ORSAGOVA a D. TOPOLANEK. Using of additional earthing of affected phase for limiting of the touch voltage during earth faults in mv large compensated networks. In: *11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012)* [online]. IET, 2012 [cit. 2015-01-07]. ISBN 978-1-84919-620-8. DOI: 10.1049/cp.2012.0101. Dostupné z: <http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2012.0101>
- [15] SCHLABBACH, J a Karl-Heinz ROFALSKI. *Power system engineering: planning, design, and operation of power systems and equipment*. Weinheim: Wiley-VCH, c2008, xii, 337 p. ISBN 35-274-0759-6.
- [16] ORSÁGOVÁ, J., D. TOPOLÁNEK a P. TOMAN. Earth fault analysis using measured data from fault experiments in actual distribution network. *11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012)*. IET, 2012. DOI: 10.1049/cp.2012.0100. Dostupné z: <http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2012.0100>
- [17] PERNICA, Drahomír. *Nekontaktní indikátory poruchových stavů na VN vedení* [online]. Brno, 2011 [cit. 2015-05-01]. 161 s. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=43120. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D..

- [18] VÁPENÍK, René. Rezonanční křivka v kompenzované síti vysokého napětí s nepřímo uzemněným uzlem. *Elektrorevue* [online]. 2014, roč. 16, č. 2 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/download/rezonančni-krivka-v-kompenzovane-siti-vysokeho-napeti-s-neprimo-uzemnenym-uzlem--the-resonance-curve-in-medium-voltage-arc-suppression-coil-earth-system-/>
- [19] WAHLROOS, Ari a Janne ALTONEN. ABB OY DISTRIBUTION AUTOMATION - FINLAND. *Compensated networks and admittance based earth-fault protection* [online]. 2011 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: http://www.cleen.fi/en/SitePages/publicdeliverables.aspx?fileId=1250&webpartid=g_e6ff1fc0_9a94_40af_8aae_e1274f853ff6
- [20] VANIŠOVÁ, Lucie. *Analýza příčných poruch v distribučních soustavách* [online]. Praha, 2012 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: https://dip.felk.cvut.cz/browse/pdfcache/vanisluc_2012bach.pdf. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Jan Švec, Ph.D.
- [21] DOLEŽAL, Jaroslav. ČVUT PRAHA. *Ochrany v průmyslových rozvodech obecně: Studijní opora předmětu Řízení elektroenergetických soustav*. 2010. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/RES/2010_A1M1RES_PR3.pdf
- [22] Výrobky. *Dohnálek: ochrany pro energetiku* [online]. 2012 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.dohnalek.cz/2.html>
- [23] POSPÍŠIL, Jaroslav, Roman MÁLEK, Martin ČECH a Tomáš EFFENBERGER. Inovace systému chránění rozvodů vn při vzniku zemních poruch. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. 2003, č. 7 [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25492
- [24] MEGA. *Indikátor zemních spojení a zkratových proudů MEg61* [online]. 2007 [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.e-mega.cz/doc/meg61.pdf>
- [25] BJERKAN, E. a T. VENSETH. Locating Earth-Faults in Compensated Distribution Networks by means of Fault Indicators. *IPST (International Conference on Power Systems Transients)* [online]. 2005, č. 107 [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2005/05IPST107.pdf
- [26] SIEMENS. *SIPROTEC 4 7SA6: Distance Protection Relay for all Voltage Levels* [online]. 2008 [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: <http://www.hehindia.in/Siemens/Protection%20Relays/Distance%20Protection/Distance%20Protection%207SA6.pdf>

- [27] ABB. *615 series: Technical Manual* [online]. 2014 [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/914248a57c92fc10c1257c6a0048fb6f/RE_615_tech_756887_ENk.pdf?filename=RE_615_tech_756887_ENk.pdf
- [28] WAHLROOS, Ari, Janne ALTONEN a Marek FULCZYK. ABB. *Easy admittance: The ultimate earth-fault protection function for compensated networks* [online]. 2013, 5 s. [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/70e4864e2722af17c1257ba5002842d4/\\$file/24-28%20m310_EN_72dpi.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/70e4864e2722af17c1257ba5002842d4/$file/24-28%20m310_EN_72dpi.pdf)
- [29] XINHUI ZHANG, BINGYIN XU, ZHENCUN PAN a PEIYU WEI. Study on single-phase earthed faulty feeder selection methods in non-solidly grounded systems. *2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies* [online]. IEEE, 2008, s. 1836-1840 [cit. 2015-01-06]. DOI: 10.1109/DRPT.2008.4523705. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4523705>
- [30] ABB. *IED pro chránění a ovládání vývodu REF615: Popis a technická data výroby* [online]. 2012 [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/27e17662c1db7136c1257b5000365436/\\$file/REF615_pg_756625_CZc.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/27e17662c1db7136c1257b5000365436/$file/REF615_pg_756625_CZc.pdf)
- [31] ABB. *Feeder protection and control REF615: Product Guide* [online]. 2014 [cit. 2015-01-08]. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/818f7efb402d8b53c1257cc50023fb97/\\$file/REF615_pg_756379_ENp.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/818f7efb402d8b53c1257cc50023fb97/$file/REF615_pg_756379_ENp.pdf)
- [32] ABB. *Machine Terminals REM 543 and REM 545: Product Guide* [online]. 1999 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/5af37b57b42ddcb7c12577c9002b9411/REM54_tob_751173_ENh.pdf?filename=REM54_tob_751173_ENh.pdf
- [33] ABB. *DEF2_: Directional Earth-Fault Protection* [online]. 2005 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://webhotel2.tut.fi/units/set/research/adine/tiedostot/Manuaalit/DEF2_h.pdf
- [34] PROTECTION & CONSULTING. *RYo – multifunkční zemní ochrana* [online]. 2009 [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: <http://www.protection.cz/obj/99/RYo.pdf>
- [35] KRBAL, Michal a David TOPOLÁNEK. *Výzkumný model části distribuční sítě vysokého napětí*. 2011. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/Produkty/Topol_1/Popis_sestavy.pdf

- [36] MATLAB Documentation. *MathWorks* [online]. 2015 [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/matlab/>
- [37] OMICRON ELECTRONICS GMBH. *CMC 256 Hardware: Referenční příručka*. 2007. Dostupné z: www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/laboratory/laborator-ochrany/Prilohy_testery/Navody_testery/CMC_256_3-CZ.pdf
- [38] HERŮFEK, Radek. *Testování ochrany při zemním spojení* [online]. Brno, 2013 [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64869. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.
- [39] HOLUB, Martin. *Testování zemních směrových ochran pomocí experimentálně získaných poruchových záznamů* [online]. Brno, 2014 [cit. 2015-01-05]. 60 s. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=83579. Diplomová práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.
- [40] Zemní spojení v kompenzovaných sítích. *EGE* [online]. 2015 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://www.ege.cz/cz/vyrobní-sekce-ege/sekce-elektrotechnika/zemni-spojenni-v-kompenzovanych-sitich>
- [41] PREVE, Christophe. *Protection of electrical networks*. Newport Beach, CA: ISTE, 2006, 508 p. ISBN 978-190-5209-064.

SEZNAM PŘÍLOH

| | |
|---|-----|
| A ANSI kódy a značení dle IEC 60617 a IEC 61850 pro ochranné funkce týkající se zemních spojení | 80 |
| B Bližší údaje o přístrojovém vybavení testovacího pracoviště | 81 |
| C Ukázka výstupu statického modelu zemního spojení v síti | 90 |
| D Výsledky testování konduktanční a wattmetrické ochrany | 98 |
| E Obsah přiloženého CD | 105 |

A ANSI KÓDY A ZNAČENÍ DLE IEC 60617 A IEC 61850 PRO OCHRANNÉ FUNKCE TÝKAJÍCÍ SE ZEMNÍCH SPOJENÍ

Tab. A.1: ANSI kódy a značení IEC 60617 pro ochranné funkce týkající se zemních spojení.

| ANSI kód | Označení IEC 60617 | Označení IEC 61850 | Název ochranné funkce |
|----------|-------------------------|--------------------|---|
| 21YN | $Y_0 > \rightarrow$ | EFPADM | Zemní admitanční ochrana |
| 32N | $P_0 > \rightarrow$ | WPWDE | Zemní wattová ochrana |
| 50N | $I_0 >>>$ | EFHPTOC | Nesměrová zemní nadproudová ochrana |
| 51NHA | $I_0 > HA$ | HAEFPTOC | Zemní ochrana vyhodnocující harmonické složky |
| 59G | $U_0 >$ | ROVPTOV | Přepětová ochrana vyhodnocující netočivou složku |
| 67N-1 | $I_0 > \rightarrow$ | DEFLPDEF | Směrová zemní ochrana, stupeň s nižším nastavením. Odpovídá funkci DEF2low u REM 543. |
| 67N-2 | $I_0 >> \rightarrow$ | DEFHPDEF | Směrová zemní ochrana, stupeň s vyšším nastavením |
| 67NIEF | $I_0 > \rightarrow IEF$ | INTRPTEF | Ochrana při přechodné/přerušované zemní poruše |

B BLIŽŠÍ ÚDAJE O PŘÍSTROJOVÉM VYBAVENÍ TESTOVACÍHO PRACOVNÍHO MÍSTA

Tab. B.1: Údaje ze štítku používané ochrany REF 615.

| | |
|---------------|----------------------|
| Označení | REF615E_C |
| Sériové číslo | 1VHR91003652 |
| Objednací kód | HBFFAEAGNBC3BAB1XD * |

* Údaj byl zjištěn prostřednictvím programu PCM600, je správný a neshoduje se štítkem ochrany.

Tab. B.2: Údaje ze štítku používané ochrany REM 543.

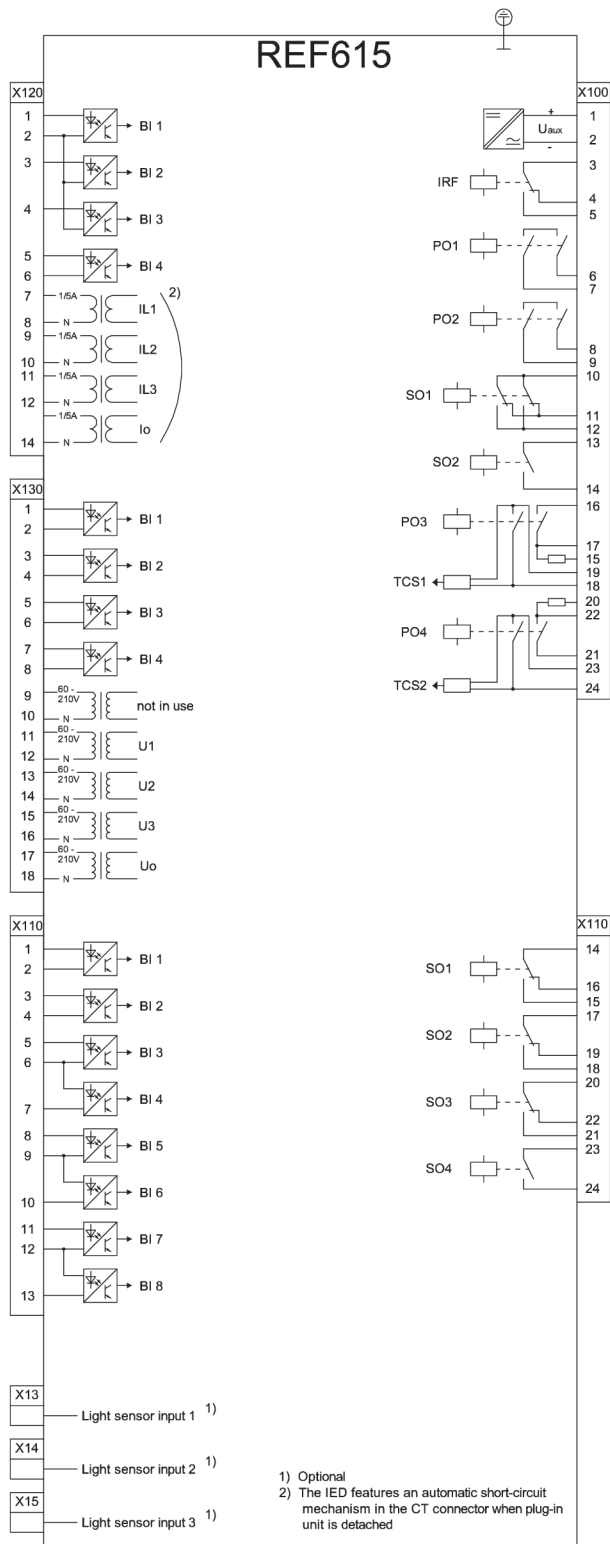
| | |
|----------------|----------------|
| Označení | REM543A 212AAA |
| Revize | B |
| Sériové číslo | ER 107340 |
| Číslo softwaru | 1MRS110010 |

Tab. B.3: Údaje ze štítku používané ochrany RYo.

| | |
|---------------|-------------------|
| U_P | 80 ÷ 250 V AC, DC |
| Výrobní číslo | 0275/01 |

Tab. B.4: Údaje ze štítku testovacího zařízení OMICRON CMC 256plus.

| | |
|-----------------|------------------------------------|
| Provedení | EP1, ELT-1, NET-1B |
| Sériové číslo | ME503L |
| Napájení vstupu | 100 ÷ 240 V / 50/60 Hz / 12 ÷ 10 A |
| Výstup | 4x300 V / 6x12,5 A |



Obr. B.1: Svorkovnicový výkres ochrany ABB REF 615.

| | |
|---|------------------------|
| IED pro chránění a ovládání vývodu REF615 | 1MRS756625 CZ C |
| Verze výrobku: 4.0 | |
| Tento dokument je překladem anglického originálu 1MRS756379 vydaného 11.05.2012, revize L | |

Tabulka 38. Hlavní nastavení ochrany při přechodné / přerušované zemní poruše (INTRPTEF)

| Parametr | Funkce | Hodnota (rozsah) | Krok |
|---|----------|--|------|
| Režim směrového měření (Directional mode) | INTRPTEF | 1 = Non-directional (Nesměřové měření) 2 = Forward (Dopředné měření) 3 = Reverse (Zpětné měření) | - |
| Čas zpoždění vypnutí (Operate delay time) | INTRPTEF | 40...1200000 ms | 10 |
| Popudová hodnota napětí (pro ochranu při přechodné zemní poruše) (Voltage start value) | INTRPTEF | 0,01...0,50 x U _n | 0,01 |
| Provozní režim měření (Operation mode) | INTRPTEF | 1 = Intermittent EF (Přerušovaná zemní porucha) 2 = Transient EF (Přechodná zemní porucha) | - |
| Limit čítače špiček (min. počet špiček potřebných pro popud ochrany v režimu IEF) (Peak counter limit) | INTRPTEF | 2...20 | - |
| Minimální vypínací proud (Min operate current) | INTRPTEF | 0,01...1,00 x I _n | 0,01 |

Tabulka 39. Zemní adimitanční ochrana (EFPADM)

| Charakteristika | Hodnota | | | | | | |
|--|---|-------------------|-----------------|-------------------|-------|-------|-------|
| Přesnost vypnutí ¹⁾ | Při frekvenci $f = f_n$ $\pm 1,0\%$ nebo $\pm 0,01$ mS (v rozsahu 0,5 – 100 mS) | | | | | | |
| Čas popudu ²⁾ | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Minimální hodnota</th> <th>Typická hodnota</th> <th>Maximální hodnota</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>56 ms</td> <td>60 ms</td> <td>64 ms</td> </tr> </tbody> </table> | Minimální hodnota | Typická hodnota | Maximální hodnota | 56 ms | 60 ms | 64 ms |
| Minimální hodnota | Typická hodnota | Maximální hodnota | | | | | |
| 56 ms | 60 ms | 64 ms | | | | | |
| Čas resetu | < 40 ms | | | | | | |
| Přesnost vypínacího času | $\pm 1,0\%$ z nastavené hodnoty nebo ± 20 ms | | | | | | |
| Potlačení harmonických složek (režim měření) ³⁾ | DFT: -50dB při $f = n \times f_n$, kde $n = 2, 3, 4, 5, \dots$ | | | | | | |

¹⁾ U_o = 1,0 x U_n

²⁾ Včetně zpoždění výstupního kontaktu signalizačního relé. Výsledné hodnoty jsou statistickým výsledkem 1000 měření.

³⁾ Režim DFT = číslicově vypočtené základní složky signálu

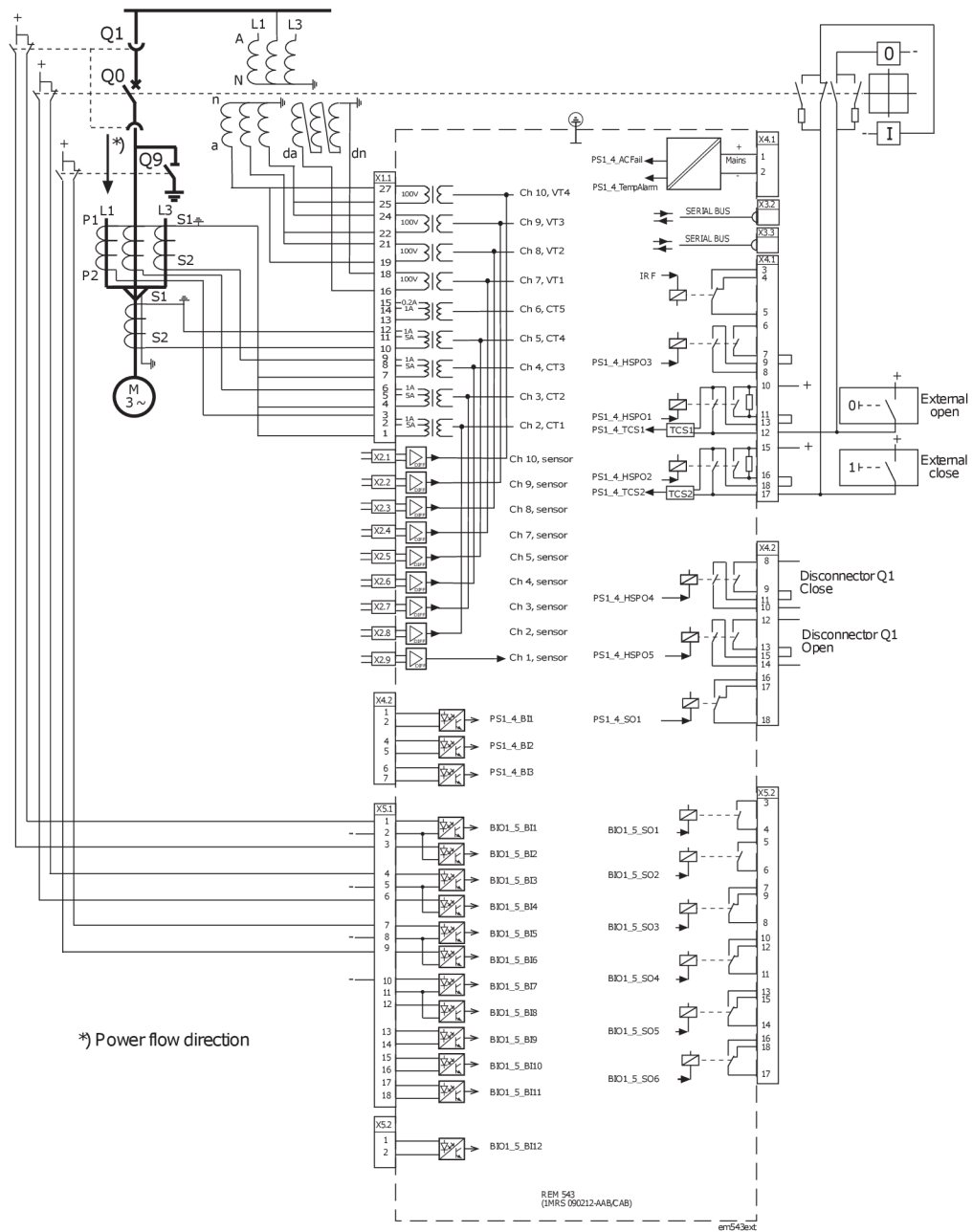
Obr. B.2: Parametry ochranné funkce EFPADM ochrany ABB REF615 část 1. Zdroj [30].

| | |
|---|------------------------|
| IED pro chránění a ovládání vývodu | 1MRS756625 CZ C |
| REF615 | |
| Verze výrobku: 4.0 | |
| Tento dokument je překladem anglického originálu 1MRS756379 vydaného 11.05.2012, revize L | |

Tabulka 40. Hlavní nastavení zemní admitanční ochrany (EFPADM)

| Parametr | Hodnota (rozsah) | Jednotka | Krok | Standardní hodnota | Popis |
|---|--|----------|------|--------------------|---|
| Popudová hodnota napětí (Voltage start value) | 0,05...5,00 | x Un | 0,01 | 0,05 | Popudová hodnota napětí |
| Směrový režim (Directional mode) | 1 = Nondirectional (Nesměr. režim) 2 = Forward (Dopředný směr) 3 = Reverse (Zpětný směr) | | | 2 = Forward | Volba nesměrového / směrového režimu |
| Provozní režim (Operational mode) | 1 = Yo (Kritérium admitance) 2 = Go (Kritérium vodivosti) 3 = Bo (Kritérium jalové vodivosti) 4 = Yo, Go 5 = Yo, Bo 6 = Go, Bo 7 = Yo, Go, Bo | | | 1 = Yo | Volba provozního režimu |
| Čas zpoždění vypnutí (Operate delay time) | 60...200000 | ms | 10 | 60 | Čas zpoždění vypnutí |
| Poloměr kružnice (Circle radius) | 0,05...500,00 | mS | 0,01 | 1,00 | Poloměr admitanční kružnice |
| Kružnice reálné složky admitance (Circle conductance) | -500,00...500,00 | mS | 0,01 | 0,00 | Střed admitanční kružnice, reálná složka admitance |
| Kružnice imaginární složky admitance (Circle susceptance) | -500,00...500,00 | mS | 0,01 | 0,00 | Střed admitanční kružnice, imaginární složka admitance |
| Reálná složka admitance v dopředném směru (Conductance forward) | -500,00...500,00 | mS | 0,01 | 1,00 | Prahová úroveň reálné složky admitance v dopředném směru |
| Reálná složka admitance ve zpětném směru (Conductance reverse) | -500,00...500,00 | mS | 0,01 | -1,00 | Prahová úroveň reálné složky admitance ve zpětném směru |
| Úhel sklonu charakteristiky reálné složky (Conductance tilt Ang) | -30...30 | stupeň | 1 | 0 | Úhel sklonu mezní křivky reálné složky admitance |
| Imaginární složka admitance v dopředném směru (Susceptance forward) | -500,00...500,00 | mS | 0,01 | 1,00 | Prahová úroveň imaginární složky admitance v dopř. směru |
| Imaginární složka admitance ve zpětném směru (Susceptance reverse) | -500,00...500,00 | mS | 0,01 | -1,00 | Prahová úroveň imaginární složky admitance ve zpět. směru |
| Úhel sklonu charakteristiky imaginární složky (Susceptance tilt Ang) | -30...30 | stupeň | 1 | 0 | Úhel sklonu mezní křivky imaginární složky admitance |

Obr. B.3: Parametry ochranné funkce EFPADM ochrany ABB REF615 část 2. Zdroj [30].



Obr. B.4: Svorkovnicový výkres ochrany ABB REM 543. Zdroj [32].

Technical data

| | |
|---|---|
| Operation accuracies | At the frequency $f/f_n = 0.95...1.05$: current $\pm 2.5\%$ of set value $+0.0005 \times I_n$ voltage $\pm 2.5\%$ of set value or $\pm 0.01 \times U_n$ phase angle $\pm 2^\circ$ |
| Start time | Injected neutral current $> 2.0 \times$ start current and residual voltage $> 2.0 \times$ start voltage: $f/f_n = 0.95...1.05$ internal time < 72 ms total time ¹⁾ < 80 ms |
| Reset time | 40...1000 ms (depends on the minimum output pulse width set for the TRIP output) |
| Reset ratio | Typ. 0.95 (range 0.95...0.98) |
| Retardation time | Total retardation time when the current drops below the start value ²⁾ < 50 ms |
| Operate time accuracy at definite-time mode | Depends on the frequency of the current and voltage measured: $f/f_n = 0.95...1.05$: $\pm 2\%$ of set value or ± 20 ms ²⁾ |
| Accuracy class index E at inverse-time mode (DEF2Low) | Depends on the frequency of the current and voltage measured: $f/f_n = 0.95...1.05$: Class index E = 5.0 or ± 20 ms ²⁾ |
| Frequency dependence of the settings and operate times (see above) | Measuring mode Suppression of harmonics 0 No suppression 1 -50 dB at $f = n \times f_n$, where $n = 2, 3, 4, 5, \dots$ |
| Configuration data | Task execution interval (Relay Configuration Tool): 10 ms at the rated frequency $f_n = 50$ Hz |

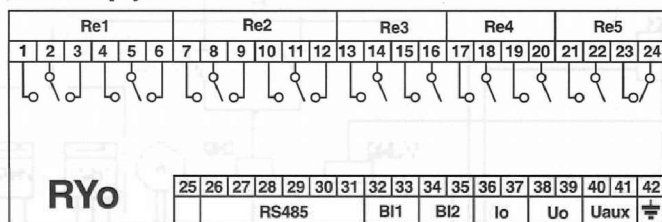
¹⁾ Includes the delay of the signal relay

²⁾ Includes the delay of the heavy-duty output relay

| Technical revision history | |
|----------------------------|---|
| Technical revision | Change |
| B | - |
| C | - |
| D | Basic angle setting step changed to 1 degree; extended start current and angle correction setting ranges. Several new enhancements have been implemented to intermittent earth-fault detector. |
| E | Basic angle setting range changed $-90^\circ...0^\circ \rightarrow -90^\circ...60^\circ$ |

Obr. B.5: Technická data k ochranné funkci DEF2low ochrany REM 543. Zdroj [33].

▼ Schéma zapojení



▼ Nastavení ochrany

| | | | | | | | |
|---|---------------------------------|-----------------------------|--|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------|
| Společné vlastnosti všech ochrany: | Hodnota blokovacího napětí Uo: | 2 až 110 V | Napěťová ochrana Uo> : | Napěťový rozsah: | 10 až 110 V | | |
| | Přídržný poměr: | > 0,95 | Nadproudová ochrana - 1.stupeň Io> i 2. stupeň Io>>: | Přesnost měření napětí: | ±2 % | | |
| | Časové zpoždění působení To: | 50 až 99999 ms | Proudový rozsah: | 10 mA až 9,99 A / 5mA až 2A | Přesnost měření proudu: | < ± 5 % | |
| | Přesnost měření času: | ± 0,05 % +(40 až 100 ms) | Zemní směrová ochrana Ifi>: | Proudový rozsah: | 10 mA až 9,99 A / 5mA až 2A | Nastavení citlivosti úhlu: | 0 nebo 90° |
| | Ochrana působí na zvolené relé: | Re1 až Re4 | Přesnost měření úhlu: | 0 – 359° | Přesnost měření úhlu: | do 2° | |
| | | | Admitanční ochrana Yo>: | Admitanční rozsah: | 0,1 mS až 99,9 mS | Přesnost měření admitance: | < ± 5 % |
| | | | Konduktanční ochrana Go>: | Rozsah konduktance: | 0,1 mS až 99,9 mS | Přesnost měření konduktance: | < ± 5 % |
| | | | Susceptanční ochrana Bo>: | Rozsah susceptance: | 0,1 mS až 99,9 mS | Přesnost měření susceptance: | < ± 5 % |

▼ Technické parametry

Provedení:

| | |
|---------------------|--------------------|
| Krytí | IP 20 |
| Rozměry (š x v x h) | 128 x 138 x 195 mm |
| Váha: | cca 2,3 kg |

Výstupní relé:

| | | |
|----------------|------------|----------|
| typ relé | 2xMZPA4810 | 3xM4-12H |
| počet kontaktů | 2P | 2P |
| trvalý proud | 2 x 10 A | 2 x 2 A |

Provozní parametry:

| | |
|--|--|
| Rozsah analogového vstupu napětí Uo | 5 - 110 V |
| Rozsah analogového vstupu proudu Io | 10 mA – 9,99 A |
| Jmenovité napětí binárních vstupních obvodů: | 20 až 110 V AC/DC |
| Pomocné napětí U _p | univerzální zdroj AC,DC 20 – 80 V nebo 80 – 250 V |
| Spotřeba: | |
| -analogový vstup: | < 0,5 VA |
| -pomocné napájení: | < 8,5 W |
| Teplotní rozsah: | 0°C až +35°C |
| Izolační pevnost: | 2 kV, 50 Hz, 1 min IEC 255-5 |
| Automatika vyhovuje testu EMC dle zkušebních předpisů: | ČSN EN 61000-4-2:1997, ČSN EN 61000-4-3:1997 +změna A1:1991, ČSN EN 61000-4-4:1997, ČSN EN 61000-4-5:1997, ČSN EN 61000-4-6:1997, |

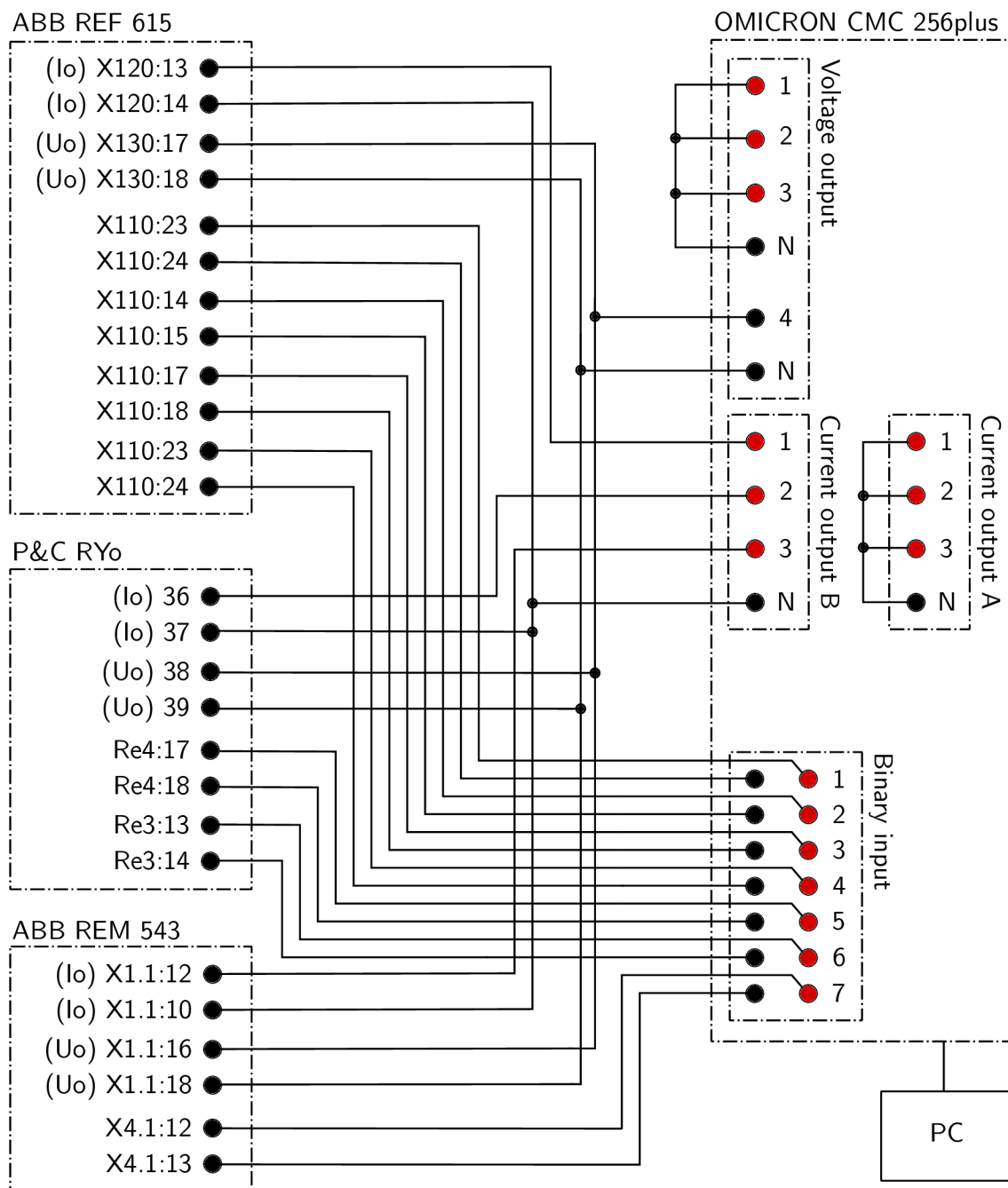
www.protection.cz

Olomoucká 7/9
656 66 Brno
Czech Republic

Tel./ Fax.: 00420 545 103 680
Tel.: 00420 545 103 681
Mobil: 00420 603 228 510

Email: protection@protection.cz

Obr. B.6: Schéma zapojení, nastavení a technické parametry ochrany RYo. Zdroj [34].

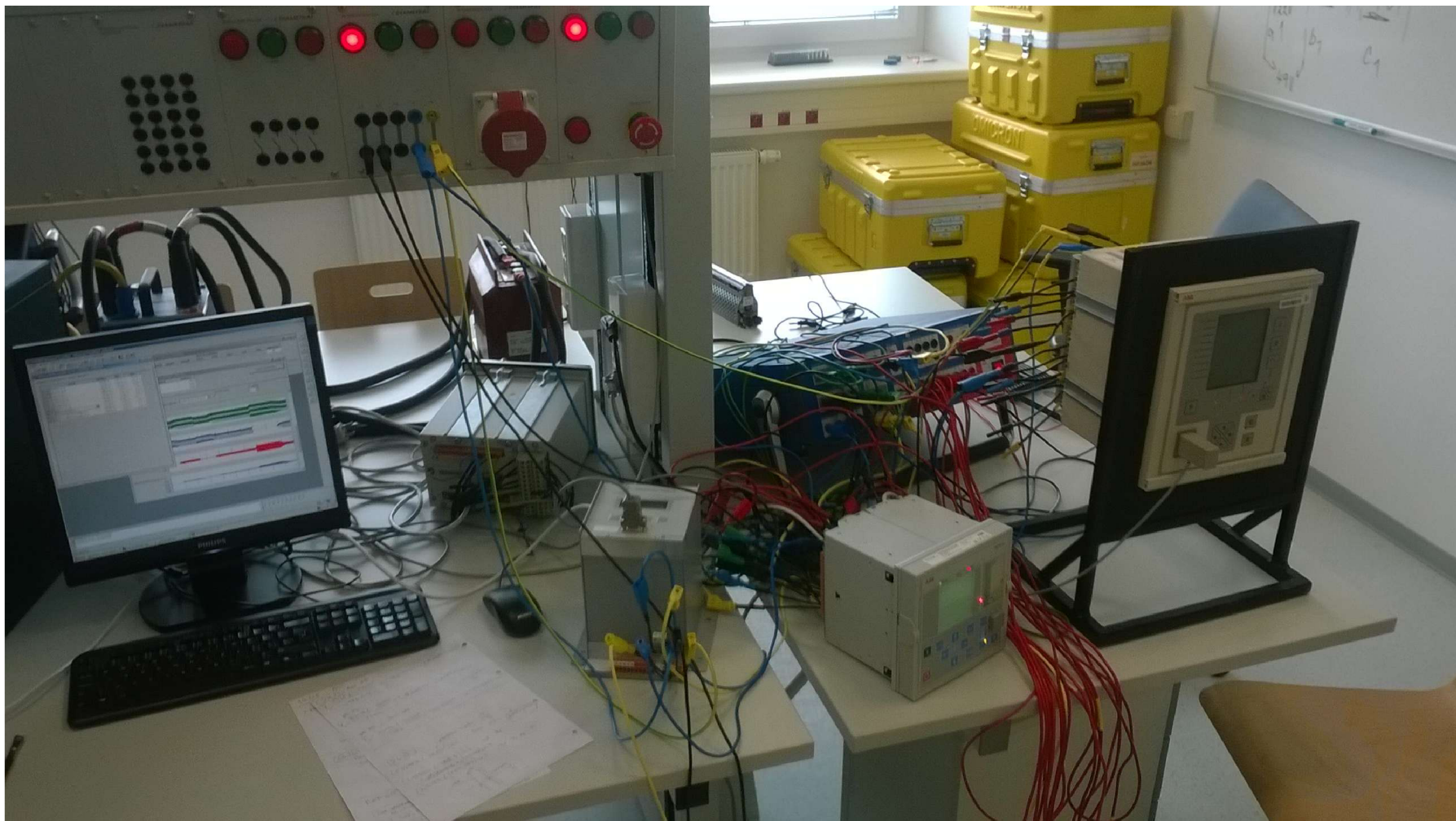


Popis binárních vstupů:

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| 1 - Signalizace vzniku ZS (REF 615) | 5 - Působení $Go >$ (RYo) |
| 2 - Působení EFPADM1 (REF 615) | 6 - Působení $I_{fi} >$ (RYo) |
| 3 - Působení EFPADM2 (REF 615) | 7 - Působení DEF2low (REM 543) |
| 4 - Působení EFPADM3 (REF 615) | |

Pozn.: Je nutné odzkoušet jestli ochrany správně vnímají napětí $\bar{U}_{(0)}$

Obr. B.7: Schéma propojení testovacího zařízení OMICRON CMC 256plus s jednotlivými ochranami.



Obr. B.8: Fotografie zapojení pracoviště.

C UKÁZKA VÝSTUPU STATICKÉHO MODELU ZEMNÍHO SPOJENÍ V SÍTI

Simulace zemního spojení v síti vn se dvěma vývody
a s předem zadanými parametry vedení (viz tento m-file)

Tabulka příkladů nastavení indukčnosti zhášecí tlumivky pro
nastavenou síť

$L = 0.587666 \text{ H} \mid v = -0.1$ Pozn.: Podkompenzovaný stav o 10 procent

$L = 0.528899 \text{ H} \mid v = 0$ Pozn.: Indukčnost cívky při vyladěném stavu
sítě

$L = 0.480817 \text{ H} \mid v = +0.1$ Pozn.: Překompenzovaný stav o 10 procent

Zadejte hodnotu nastavené indukčnosti zhášecí tlumivky L_{TL} [H]
(při bezporuchovém stavu)

Příklady hodnot viz tabulka výše

$L_{TL} = 0.5$

Provozní parametry za normálního stavu bez ZS

$k = 0.0015138 + 0.002622i$

$|k| = 0.00302761$

$v = 0.057798$

$d = 16.6532$

$L_{TL} = 0.5 \text{ H}$

$L_{\text{vyladeno}} = 0.528899 \text{ H}$ Pozn.: Indukčnost cívky při vyladěném stavu
sítě ($v=0$)

$u_{1_bez} = -1.0258 + 0.0012902i$

$|u_{1_bez}| = 1.02576$

$u_{2_bez} = 0.47424 + 0.86732i$

$|u_{2_bez}| = 0.988503$

$u_{3_bez} = 0.47424 - 0.86474i$

```

|u_3_bez| = 0.986239
u_0_bez = -0.025763+0.0012902i
|u_0_bez| = 0.025795
-----
i_0_bez_v1 = -0.26867-0.018654i
|i_0_bez_v1| = 0.26932
i_0_bez_v2 = -0.10402-1.8313i
|i_0_bez_v2| = 1.83428
i_0_bez_tot = -0.37269-1.85i
|i_0_bez_tot| = 1.88715
-----
Y_0_bez_v1 = -0.00027205-3.2626e-05i
|Y_0_bez_v1| = 0.000273999
Y_0_bez_v2 = -1.25e-05-0.0018661i
|Y_0_bez_v2| = 0.00186615
-----

```

Vznik zemního spojení:

Vývod se zemním spojením (1 nebo 2): 1

Fáze, ve které vznikne ZS (1, 2, 3): 3

Zadejte hodnotu odporu poruchy R_P [Ohm]: 4000

Připnutý pomocný odporník? (A/N): N

```

-----
Provozní parametry za stavu se ZS
-----

```

```

u_1 = -1.2242+0.17457i
|u_1| = 1.23661
u_2 = 0.27577+1.0406i
|u_2| = 1.07651
u_3 = 0.27577-0.69146i
|u_3| = 0.744424
u_0 = -0.22423+0.17457i
|u_0| = 0.284167
-----
i_0_v1 = -0.38921-3.0919i
|i_0_v1| = 3.11633
i_0_v2 = -12.5199-15.8612i
|i_0_v2| = 20.2071

```

```

i_0_tot = -12.9091-18.9532i
|i_0_tot| = 22.9318
-----
Y_0_v1 = 0.00014705-0.00024739i
|Y_0_v1| = 0.000287798
Y_0_v2 = -1.25e-05-0.0018661i
|Y_0_v2| = 0.00186615
Y_0_v1_delta = 0.00019229-0.0002385i
|Y_0_v1_delta| = 0.000306362
Y_0_v2_delta = -1.25e-05-0.0018661i
|Y_0_v2_delta| = 0.00186615
-----

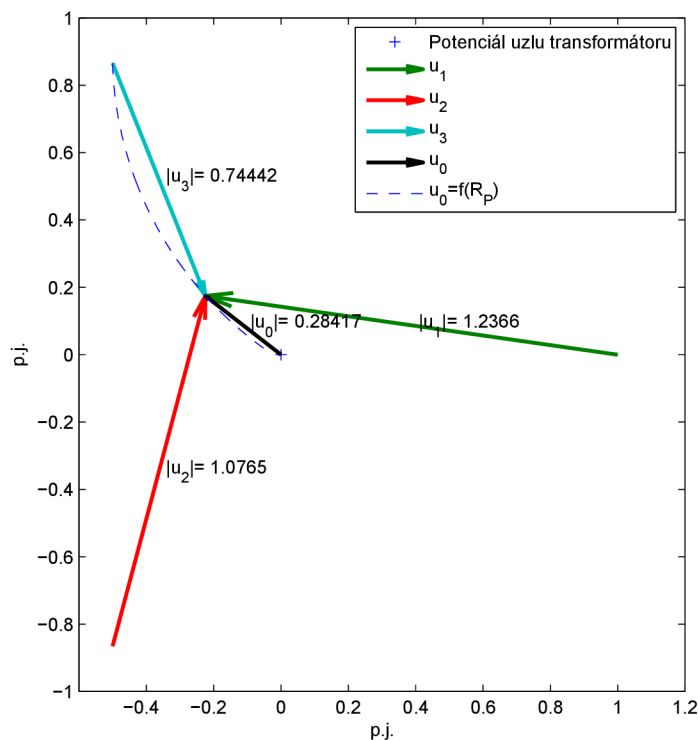
```

Mezní odpor ZS, při kterém je napětí u_0 rovno 0.2 je: 6535 Ohm

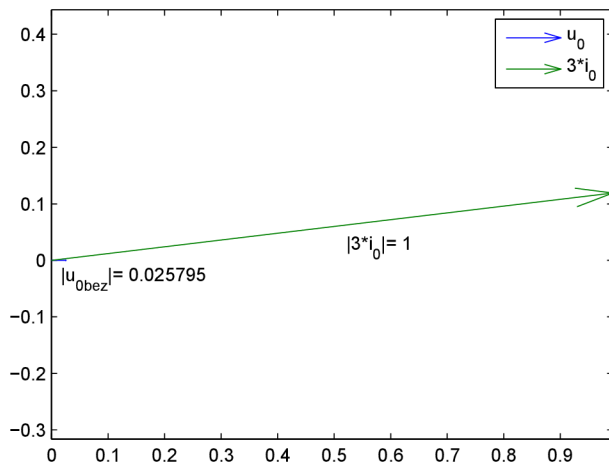
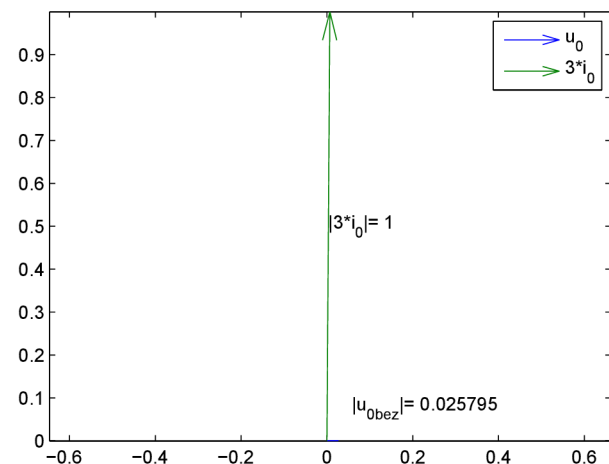
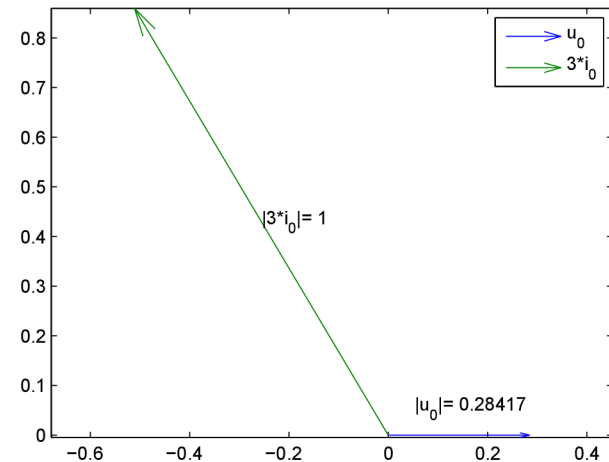
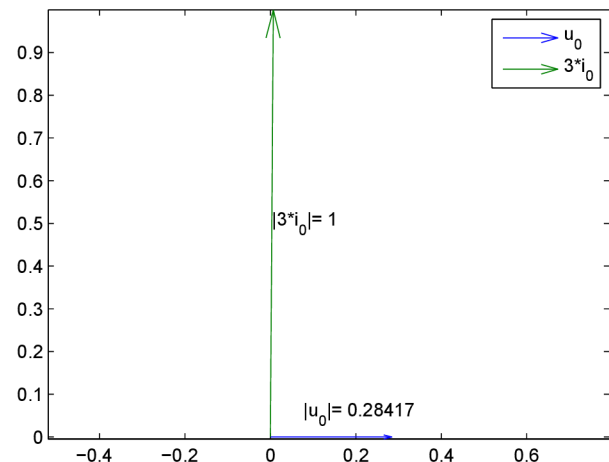
Zahájit simulaci ZS pro zadané stavy sítě? (A/N): A

Výpočet byl úspěšně dokončen a hodnoty jsou uloženy v excelu s názvem "simulaceZS.xlsx" v aktuálním workspace Matlabu.

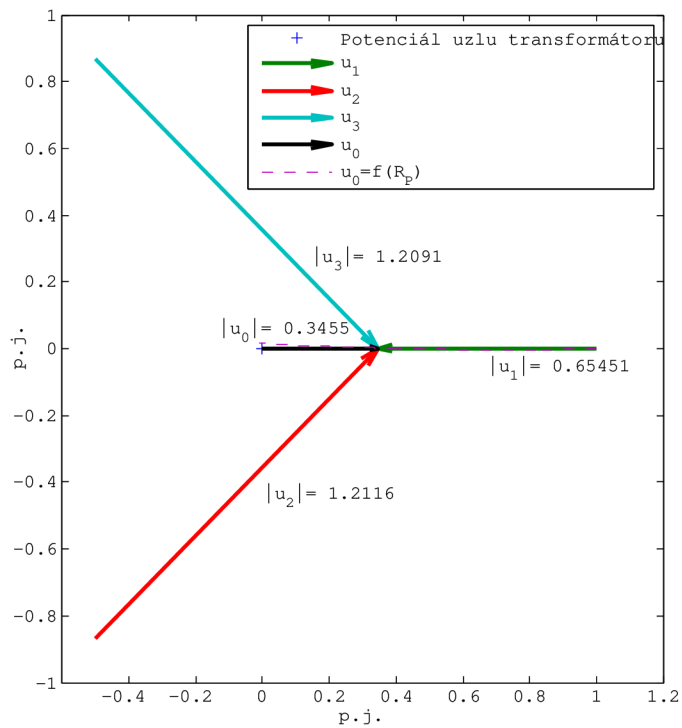
Konec



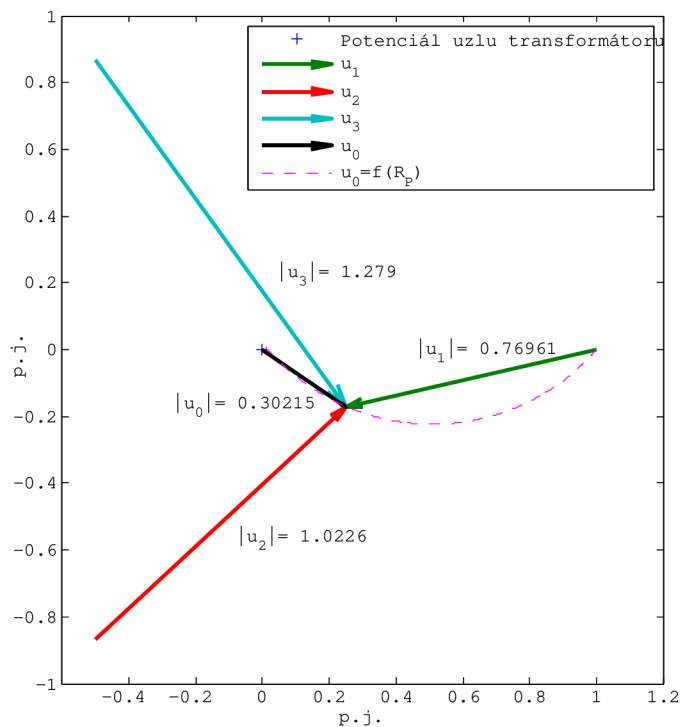
Obr. C.1: Fázorový diagram napětí při ZS ve fázi 3 o odporu $R_P = 4000 \Omega$, a trajektorie počátku napětí u_0 jako funkce R_P . ($m_u = 12701$)

Fázorový diagram u_0 a i_0 vývodu V1 bez ZS. ($m_u=12701$, $m_i=0.28288$)Fázorový diagram u_0 a i_0 vývodu V2 bez ZS. ($m_u=12701$, $m_i=1.8384$)Fázorový diagram u_0 a i_0 vývodu V1 při ZS v tomto vývodu. ($m_u=12701$, $m_i=3.1163$)Fázorový diagram u_0 a i_0 vývodu V2 při ZS v jiném vývodu. ($m_u=12701$, $m_i=20.2071$)

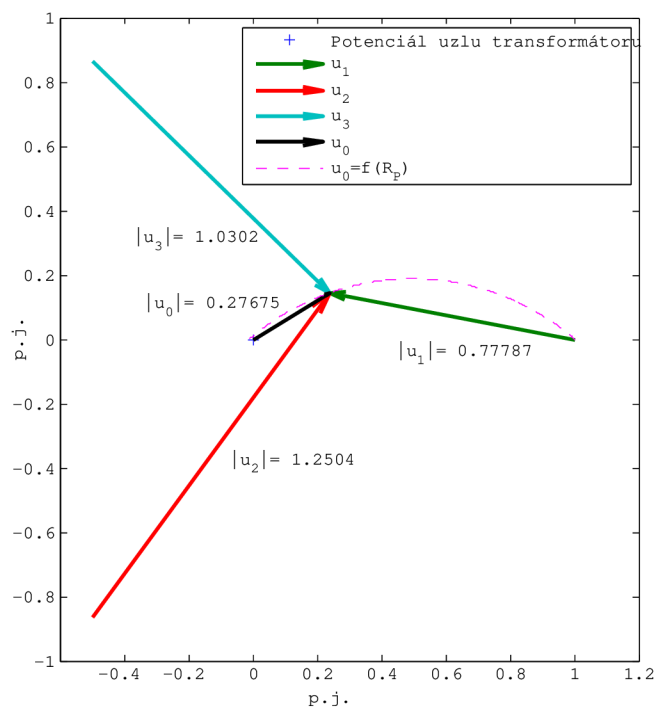
Obr. C.2: Fázorové diagramy netočivých složek napětí a proudu jednotlivých vývodů za stavů bez ZS a při ZS. ZS o odporu $R_P = 4000 \Omega$ nastává ve vývodu V1 ve fázi 3. Měřítko napětí a proudu je zobrazeno v názvu příslušného fázorového diagramu.



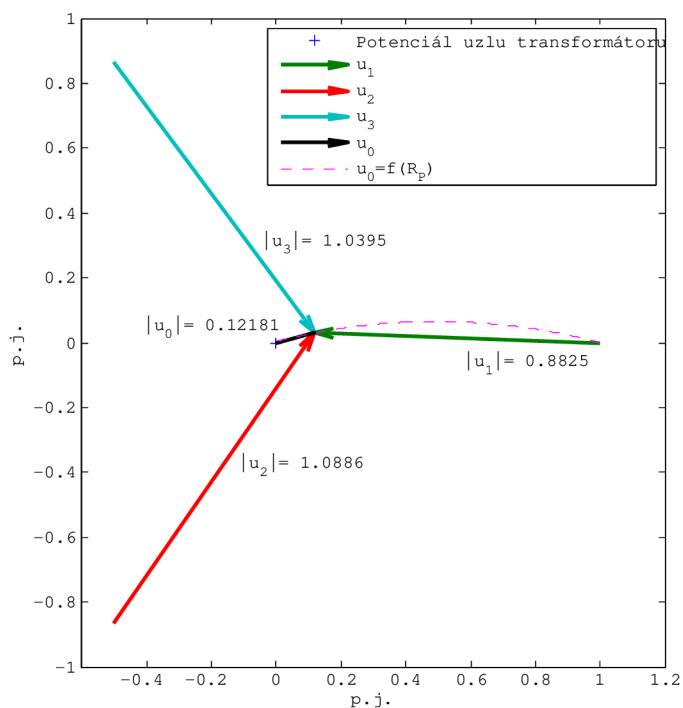
Obr. C.3: Fázorový diagram napětí při ZS v ideálně vykompenzované síti. ZS na vývodu V1 ve fázi 1 o $R_P = 3000 \Omega$. ($m_u = 12701$)



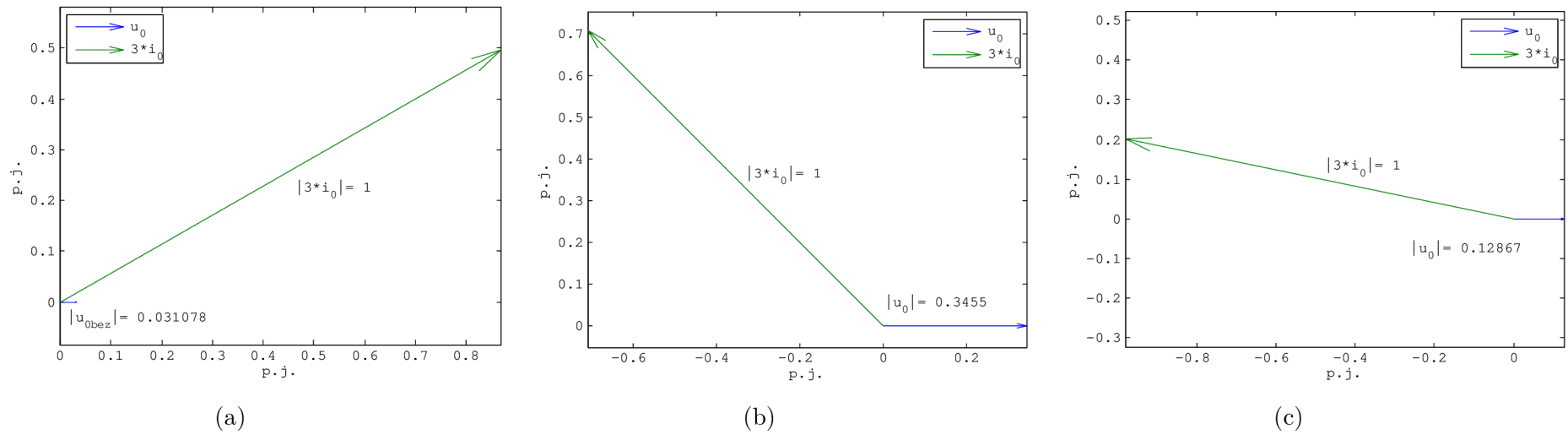
Obr. C.4: Fázorový diagram napětí při ZS v podkompenzované síti ($\nu = -10\%$). ZS na vývodu V1 ve fázi 1 o $R_P = 3000 \Omega$. ($m_u = 12701$)



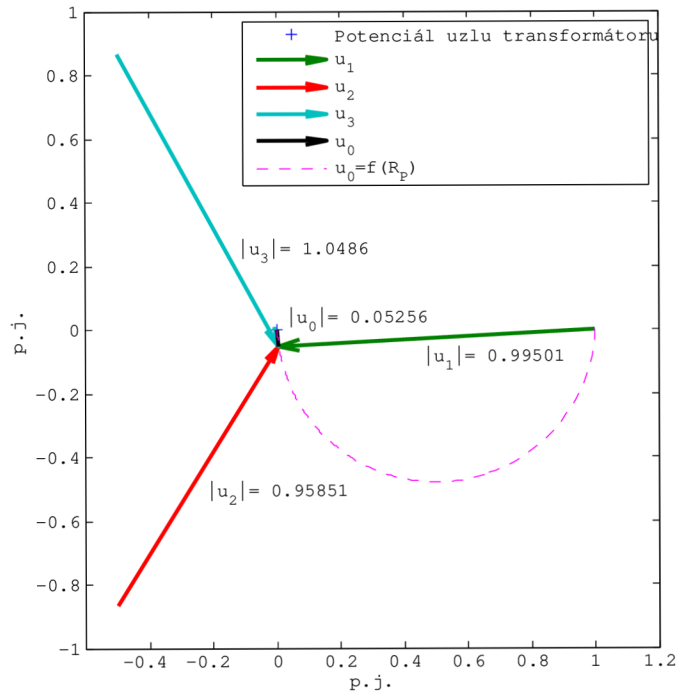
Obr. C.5: Fázorový diagram napětí při ZS v překompenzované síti ($\nu = 10\%$). ZS na vývodu V1 ve fázi 1 o $R_p = 3000 \Omega$. ($m_u = 12701$)



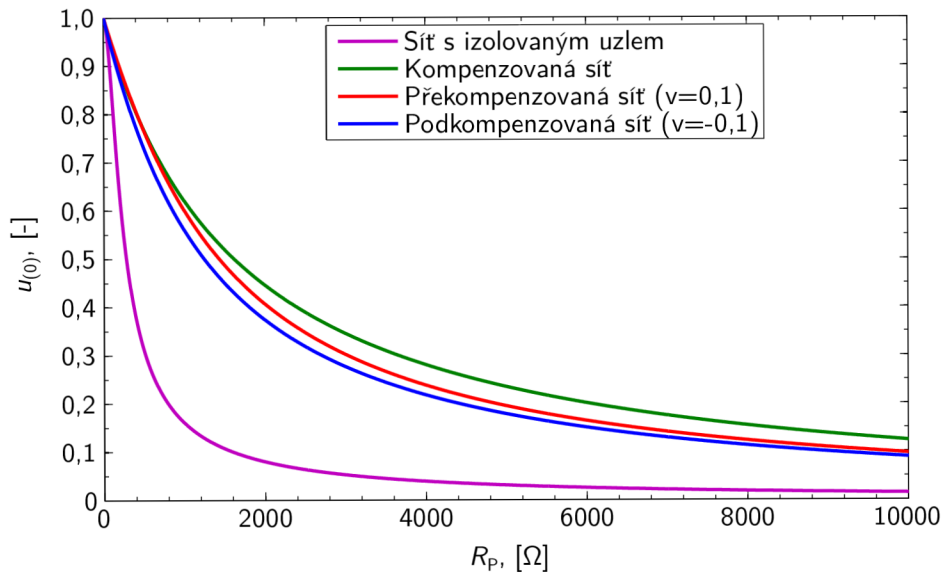
Obr. C.6: Fázorový diagram napětí při ZS v překompenzované síti ($\nu = 10\%$) a při připnutém pomocném odporu 1Ω . ZS na vývodu V1 ve fázi 1 o $R_p = 3000 \Omega$. ($m_u = 12701$)



Obr. C.7: Fázorové diagramy netočivých složek napětí a proudu jednotlivých vývodů za stavů: (a) bez ZS ($m_u = 12701$, $m_i = 0,35159$), (b) při ZS ($m_u = 12701$, $m_i = 2,4723$) a (c) při ZS a při připnutém pomocném odporníku ($m_u = 12701$, $m_i = 3,2496$). Uvažované ZS má odpor $R_P = 3000 \Omega$ nastává ve vývodu V1 ve fázi 1.

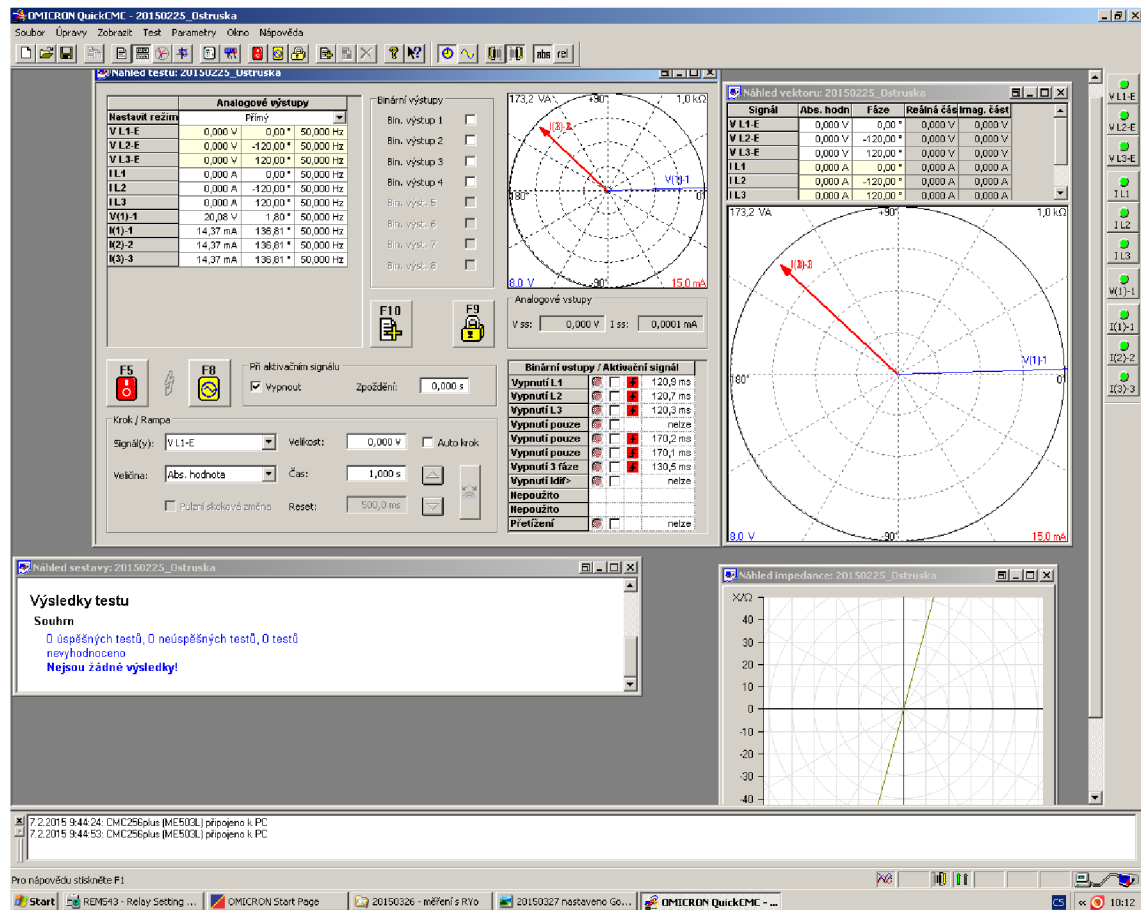


Obr. C.8: Fázorový diagram napětí při ZS v izolované síti. ZS na vývodu V1 ve fázi 1 o $R_P = 3000 \Omega$. ($m_u = 12701$)



Obr. C.9: Závislost velikosti napětí $u_{(0)}$ na odporu ZS R_P pro různé typy a stavy sítě.

D VÝSLEDKY TESTOVÁNÍ KONDUKTANČNÍ A WATTMETRICKÉ OCHRANY



Obr. D.1: Printscreens ukázky nastavení testovacího zdroje OMICRON CMC 256plus v PC při testování zmíněných ochran při vyladěné síti se Z_S s $R_p = 6000 \Omega$ a bez připojeného PO.

Tab. D.1: Tabulka stavů sítě a výsledků testování konduktanční a wattmetrické ochrany pro tyto stavy. Sít v překompenzovaném stavu o 30% a o 15%.

| Hodnoty získané simulací ZS v Matlabu | | | | | | | | Hodnoty - Omicron | | | | EFPADM | | Go> | Ifi> | DEF2low |
|---------------------------------------|------|--------|--------|----------|--------|----------|-------|-------------------|---------|----------|-------|--------|-------|-------|-------|---------|
| R_P | R_po | u_0 | U_0 | arg(U_0) | I_0 | arg(I_0) | U_0 | arg(U_0) | I_0 | arg(I_0) | t | Stupeň | t | t | t | |
| [Ω] | [Ω] | [-] | [V] | [°] | [A] | [°] | [V] | [°] | [A] | [°] | [ms] | | [ms] | [ms] | [ms] | |
| - | - | 0,0094 | 119,0 | -145,37 | 0,200 | 161,98 | 0,94 | -145,37 | 0,00200 | 161,98 | N | N | N | N | N | * |
| 500 | - | 0,5951 | 7558,5 | 32,08 | 3,339 | 94,89 | 59,51 | 32,08 | 0,03339 | 94,89 | N | N | N | N | N | Δ |
| 500 | - | 0,5951 | 7558,5 | 32,08 | 17,171 | 138,60 | 59,51 | 32,08 | 0,17171 | 138,60 | 112,6 | 1,2 | 137,5 | 137,4 | 109,6 | |
| 3000 | - | 0,1506 | 1912,5 | 58,07 | 4,345 | 164,59 | 15,06 | 58,07 | 0,04345 | 164,59 | N | N | N | N | N | |
| 6000 | - | 0,0747 | 949,3 | 63,82 | 2,157 | 170,34 | 7,47 | 63,82 | 0,02157 | 170,34 | N | N | N | N | N | |
| 8000 | - | 0,0547 | 695,3 | 66,17 | 1,579 | 172,69 | 5,47 | 66,17 | 0,01579 | 172,69 | N | N | N | N | N | |
| 500 | 1 | 0,4202 | 5337,0 | 22,12 | 16,505 | 157,35 | 42,02 | 22,12 | 0,16505 | 157,35 | 103,4 | 1,2,3 | 161,6 | 161,5 | 109,4 | |
| 3000 | 1 | 0,0982 | 1247,1 | 34,55 | 3,857 | 169,78 | 9,82 | 34,55 | 0,03857 | 169,78 | 114,6 | 3 | N | N | N | |
| 6000 | 1 | 0,0488 | 620,0 | 38,04 | 1,917 | 173,27 | 4,88 | 38,04 | 0,01917 | 173,27 | N | N | N | N | N | |
| 8000 | 1 | 0,0358 | 454,5 | 39,80 | 1,406 | 175,03 | 3,58 | 39,80 | 0,01406 | 175,03 | N | N | N | N | N | |
| 500 | 3 | 0,5245 | 6662,0 | 27,95 | 16,447 | 146,04 | 52,45 | 27,95 | 0,16447 | 146,04 | 107,3 | 1,2,3 | 159,2 | 159,0 | 111,6 | |
| 3000 | 3 | 0,1305 | 1657,9 | 47,89 | 4,093 | 165,98 | 13,05 | 47,89 | 0,04093 | 165,98 | 111,2 | 3 | N | N | N | |
| 6000 | 3 | 0,0651 | 827,0 | 52,67 | 2,042 | 170,76 | 6,51 | 52,67 | 0,02042 | 170,76 | N | N | N | N | N | |
| 8000 | 3 | 0,0478 | 606,7 | 54,77 | 1,498 | 172,86 | 4,78 | 54,77 | 0,01498 | 172,86 | N | N | N | N | N | |
| - | - | 0,0163 | 207,1 | -158,90 | 0,206 | 174,28 | 1,63 | -158,90 | 0,00206 | 174,28 | N | N | N | N | N | * |
| 500 | - | 0,6991 | 8879,8 | 18,11 | 3,996 | 81,02 | 69,91 | 18,11 | 0,03996 | 81,02 | N | N | N | N | N | Δ |
| 500 | - | 0,6991 | 8879,8 | 18,11 | 12,330 | 129,84 | 69,91 | 18,11 | 0,12330 | 129,84 | 115,9 | 1,2 | 167,5 | 167,4 | 107,8 | |
| 3000 | - | 0,2350 | 2984,6 | 41,68 | 4,144 | 153,42 | 23,50 | 41,68 | 0,04144 | 153,42 | 116,3 | 1,2 | 161,4 | 161,4 | 105,9 | |
| 6000 | - | 0,1230 | 1562,2 | 48,50 | 2,169 | 160,24 | 12,30 | 48,50 | 0,02169 | 160,24 | N | N | N | N | N | |
| 8000 | - | 0,0913 | 1160,1 | 51,22 | 1,611 | 162,96 | 9,13 | 51,22 | 0,01611 | 162,96 | N | N | N | N | N | |
| 500 | 1 | 0,4573 | 5808,0 | 11,83 | 14,135 | 159,82 | 45,73 | 11,83 | 0,14135 | 159,82 | 104,3 | 1,2,3 | 145,4 | 145,3 | 105,2 | |
| 3000 | 1 | 0,1165 | 1479,7 | 20,24 | 3,601 | 168,24 | 11,65 | 20,24 | 0,03601 | 168,24 | 114,2 | 3 | N | N | N | |
| 6000 | 1 | 0,0588 | 747,2 | 23,24 | 1,818 | 171,24 | 5,88 | 23,24 | 0,01818 | 171,24 | N | N | N | N | N | |
| 8000 | 1 | 0,0433 | 550,1 | 24,87 | 1,339 | 172,87 | 4,33 | 24,87 | 0,01339 | 172,87 | N | N | N | N | N | |
| 500 | 3 | 0,5952 | 7560,1 | 15,39 | 12,482 | 144,02 | 59,52 | 15,39 | 0,12482 | 144,02 | 104,5 | 1,2,3 | 137,2 | 137,0 | 110,0 | |
| 3000 | 3 | 0,1786 | 2268,5 | 30,92 | 3,745 | 159,55 | 17,86 | 30,92 | 0,03745 | 159,55 | 111,6 | 3 | N | N | N | |
| 6000 | 3 | 0,0924 | 1174,0 | 35,58 | 1,938 | 164,22 | 9,24 | 35,58 | 0,01938 | 164,22 | 115,9 | 3 | N | N | N | |
| 8000 | 3 | 0,0685 | 869,9 | 37,69 | 1,436 | 166,32 | 6,85 | 37,69 | 0,01436 | 166,32 | N | N | N | N | N | |

N Ochranná funkce nepůsobila

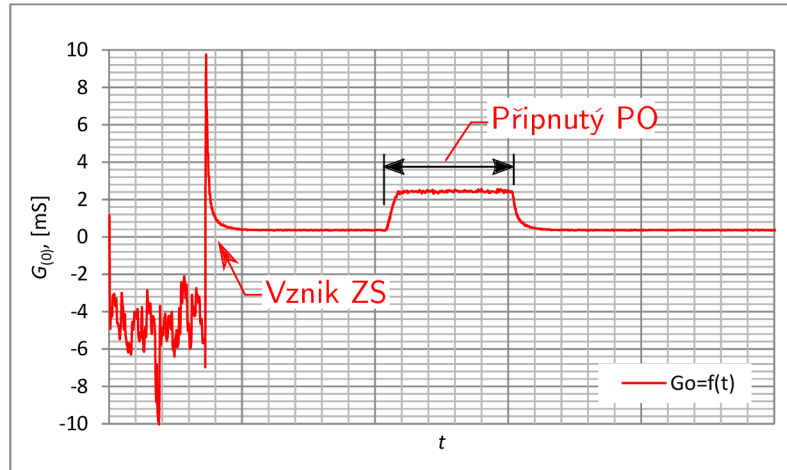
* Stav bez ZS; Δ Případ ZS v jiném vývodu - získáno manuálním zadáním do modelu

Tab. D.2: Tabulka stavů sítě a výsledků testování konduktanční a wattmetrické ochrany pro tyto stavy. Sít ve vyladěném a o 15% podkompenzovaném stavu.

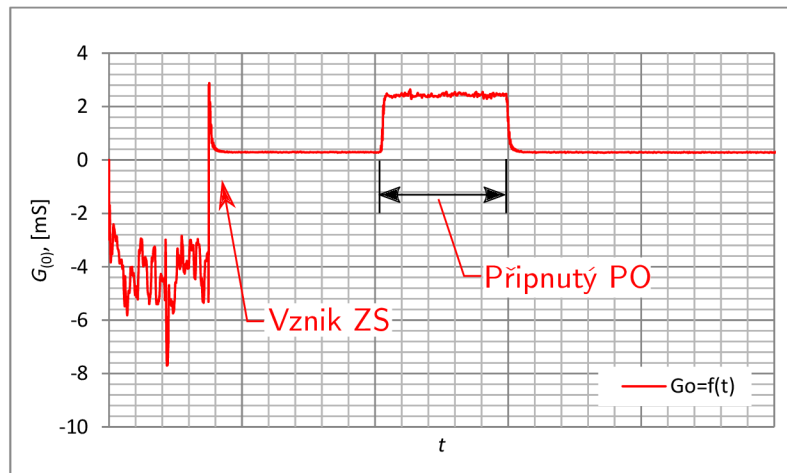
| | Hodnoty získané simulací ZS v Matlabu | | | | | | | Hodnoty - Omicron | | | | EFPADM | | Go> | Ifi> | DEF2low | |
|---------------------------|---------------------------------------|------|--------|--------|----------|--------|----------|-------------------|----------|---------|----------|--------|--------|-------|-------|---------|----------------|
| | R_P | R_po | u_0 | U_0 | arg(U_0) | I_0 | arg(I_0) | U_0 | arg(U_0) | I_0 | arg(I_0) | t | Stupeň | t | t | t | |
| | [Ω] | [Ω] | [-] | [V] | [°] | [A] | [°] | [V] | [°] | [A] | [°] | [ms] | | [ms] | [ms] | [ms] | |
| Vyladěná sít | - | - | 0,0311 | 394,7 | 147,88 | 0,352 | 177,61 | 3,11 | 147,88 | 0,00352 | 177,61 | N | N | N | N | N | N* |
| | 500 | - | 0,7673 | 9746,1 | -0,22 | 4,466 | 62,77 | 76,73 | -0,22 | 0,04466 | 62,77 | N | N | N | N | N | N ^Δ |
| | 500 | - | 0,7673 | 9746,1 | -0,22 | 5,491 | 134,79 | 76,73 | -0,22 | 0,05491 | 134,79 | 114,7 | 1,2 | 158,4 | 158,3 | 113,0 | |
| | 3000 | - | 0,3455 | 4388,5 | 0,29 | 2,472 | 135,30 | 34,55 | 0,29 | 0,02472 | 135,30 | 113,6 | 1,2 | 158,5 | 158,4 | 118,0 | |
| | 6000 | - | 0,2008 | 2550,2 | 1,80 | 1,437 | 136,81 | 20,08 | 1,80 | 0,01437 | 136,81 | 120,9 | 1,2 | 170,2 | 170,1 | 130,5 | □ |
| | 8000 | - | 0,1541 | 1957,3 | 3,02 | 1,103 | 138,02 | 15,41 | 3,02 | 0,01103 | 138,02 | N | N | N | N | N | N |
| | 500 | 1 | 0,4798 | 6094,3 | -0,04 | 12,117 | 168,41 | 47,98 | -0,04 | 0,12117 | 168,41 | 105,2 | 1,2,3 | 156,9 | 156,8 | 107,6 | |
| | 3000 | 1 | 0,1287 | 1634,4 | 1,14 | 3,250 | 169,58 | 12,87 | 1,14 | 0,03250 | 169,58 | 114,8 | 3 | N | N | N | N |
| | 6000 | 1 | 0,0657 | 834,0 | 2,91 | 1,658 | 171,36 | 6,57 | 2,91 | 0,01658 | 171,36 | N | N | N | N | N | N |
| | 8000 | 1 | 0,0485 | 615,8 | 4,22 | 1,224 | 172,66 | 4,85 | 4,22 | 0,01224 | 172,66 | N | N | N | N | N | N |
| | 500 | 3 | 0,6396 | 8123,5 | -0,14 | 8,106 | 156,34 | 63,96 | -0,14 | 0,08106 | 156,34 | 105,0 | 1,2,3 | 163,9 | 163,9 | 103,7 | |
| | 3000 | 3 | 0,2212 | 2810,1 | 0,78 | 2,804 | 157,25 | 22,12 | 0,78 | 0,02804 | 157,25 | 107,5 | 1,2,3 | 161,1 | 161,1 | 104,8 | |
| | 6000 | 3 | 0,1191 | 1512,7 | 2,47 | 1,509 | 158,95 | 11,91 | 2,47 | 0,01509 | 158,95 | 114,4 | 3 | N | N | N | N |
| | 8000 | 3 | 0,0893 | 1134,0 | 3,75 | 1,132 | 160,23 | 8,93 | 3,75 | 0,01132 | 160,23 | 116,3 | 3 | N | N | N | N |
| Podkompenzovaná sít o 15% | - | - | 0,0176 | 223,2 | 87,95 | 0,334 | 151,20 | 1,76 | 87,95 | 0,00334 | 151,20 | N | N | N | N | N | N* |
| | 500 | - | 0,7489 | 9512,7 | -19,97 | 4,437 | 43,08 | 74,89 | -19,97 | 0,04437 | 43,08 | N | N | N | N | N | N ^Δ |
| | 500 | - | 0,7489 | 9512,7 | -19,97 | 5,507 | -141,00 | 74,89 | -19,97 | 0,05507 | -141,00 | 111,4 | 1,2 | 161,6 | 151,6 | 102,9 | |
| | 3000 | - | 0,2585 | 3283,1 | -46,55 | 1,901 | -167,59 | 25,85 | -46,55 | 0,01901 | -167,59 | 117,4 | 2 | 179,3 | 179,3 | N | |
| | 6000 | - | 0,1344 | 1706,9 | -51,08 | 0,988 | -172,11 | 13,44 | -51,08 | 0,00988 | -172,11 | N | N | N | N | N | N |
| | 8000 | - | 0,0995 | 1264,2 | -51,53 | 0,732 | -172,57 | 9,95 | -51,53 | 0,00732 | -172,57 | N | N | N | N | N | N |
| | 500 | 1 | 0,4795 | 6090,3 | -12,53 | 11,654 | -177,50 | 47,95 | -12,53 | 0,11654 | -177,50 | 105,5 | 1,2,3 | 144,1 | 144,1 | 101,9 | |
| | 3000 | 1 | 0,1251 | 1588,7 | -19,50 | 3,040 | 175,53 | 12,51 | -19,50 | 0,03040 | 175,53 | 114,5 | 3 | N | N | N | N |
| | 6000 | 1 | 0,0634 | 805,0 | -19,13 | 1,540 | 175,89 | 6,34 | -19,13 | 0,01540 | 175,89 | N | N | N | N | N | N |
| | 8000 | 1 | 0,0467 | 593,2 | -18,21 | 1,135 | 176,82 | 4,67 | -18,21 | 0,01135 | 176,82 | N | N | N | N | N | N |
| | 500 | 3 | 0,6321 | 8028,6 | -16,70 | 7,660 | -165,38 | 63,21 | -16,70 | 0,07660 | -165,38 | 104,8 | 1,2,3 | 123,7 | 123,5 | 104,3 | |
| | 3000 | 3 | 0,1961 | 2491,1 | -32,80 | 2,377 | 178,53 | 19,61 | -32,80 | 0,02377 | 178,53 | 108,2 | 3 | 202,7 | 202,7 | N | |
| | 6000 | 3 | 0,1018 | 1292,6 | -34,62 | 1,233 | 176,70 | 10,18 | -34,62 | 0,01233 | 176,70 | 118,2 | 3 | N | N | N | N |
| | 8000 | 3 | 0,0754 | 958,2 | -34,32 | 0,914 | 177,00 | 7,54 | -34,32 | 0,00914 | 177,00 | N | N | N | N | N | N |

N Ochranná funkce nepůsobilá

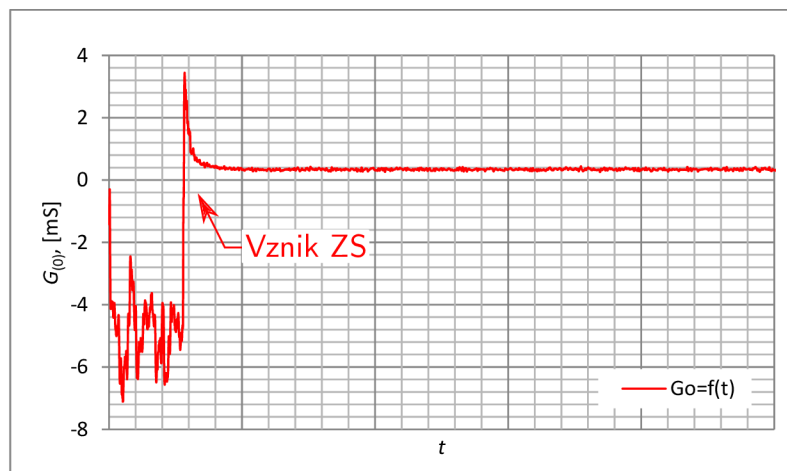
* Stav bez ZS; ^Δ Příklad ZS v jiném vývodu - získáno manuálním zadáním do modelu; [□] Printscreen testování na obrázku D.1



(a)

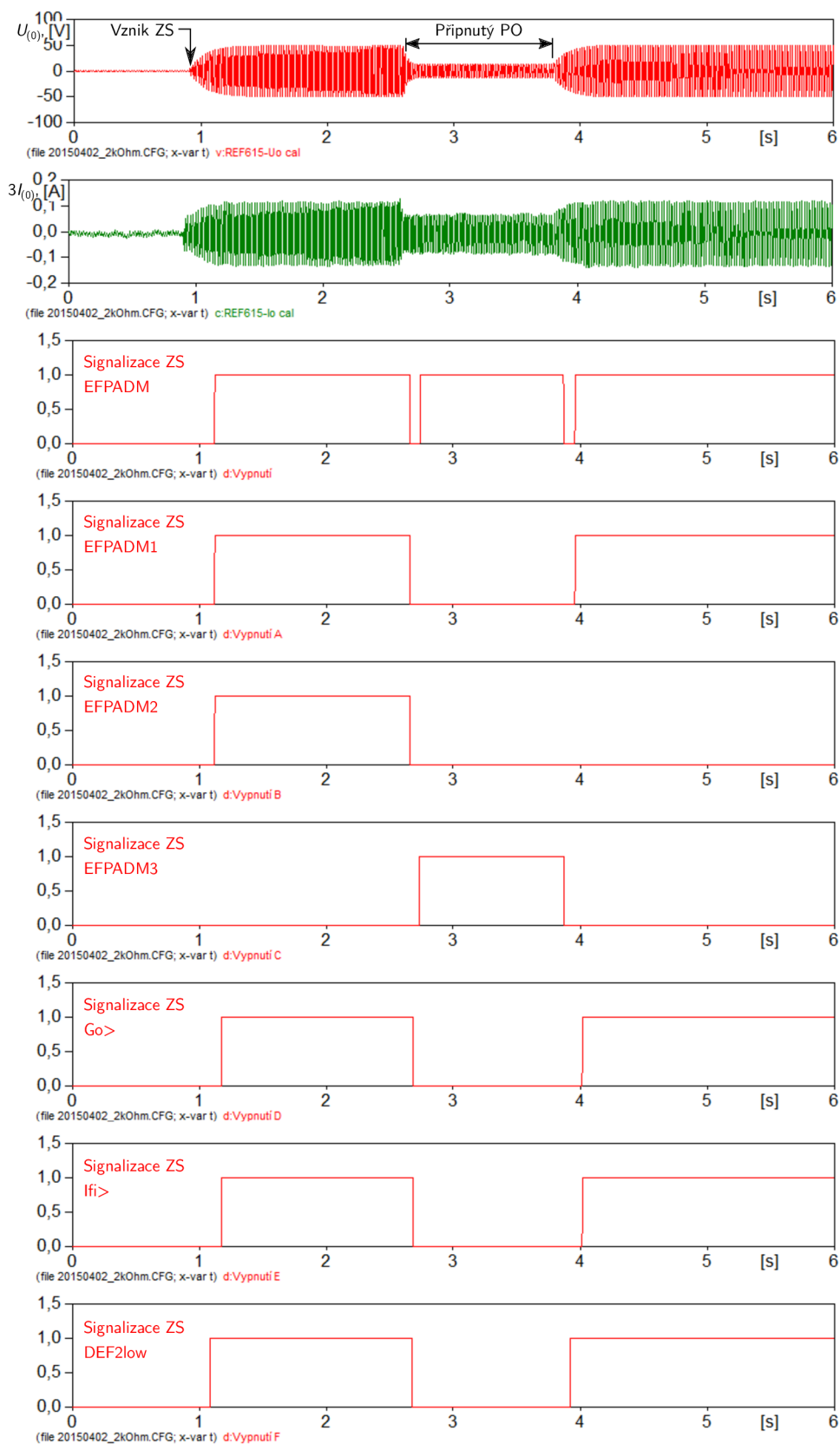


(b)

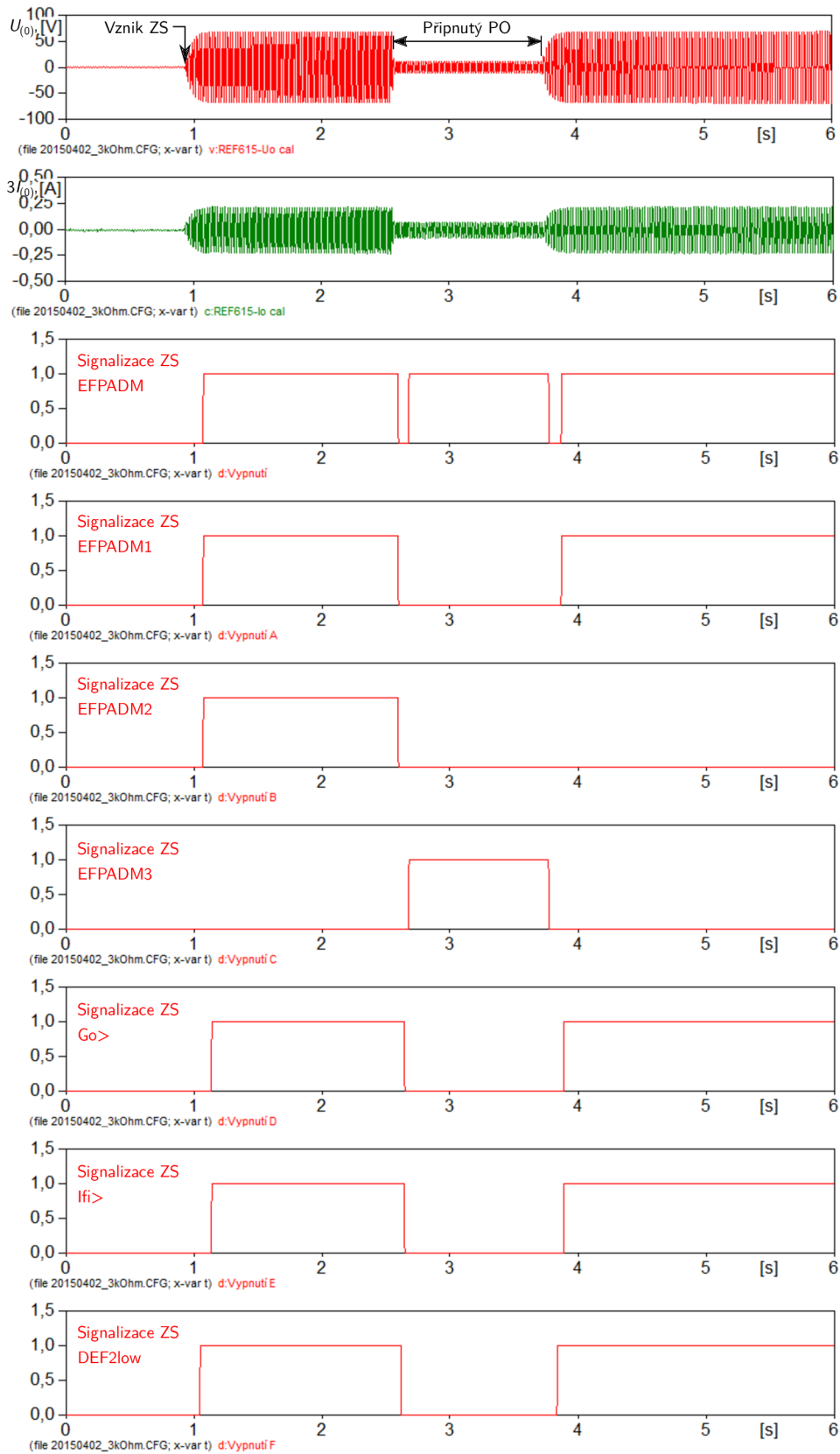


(c)

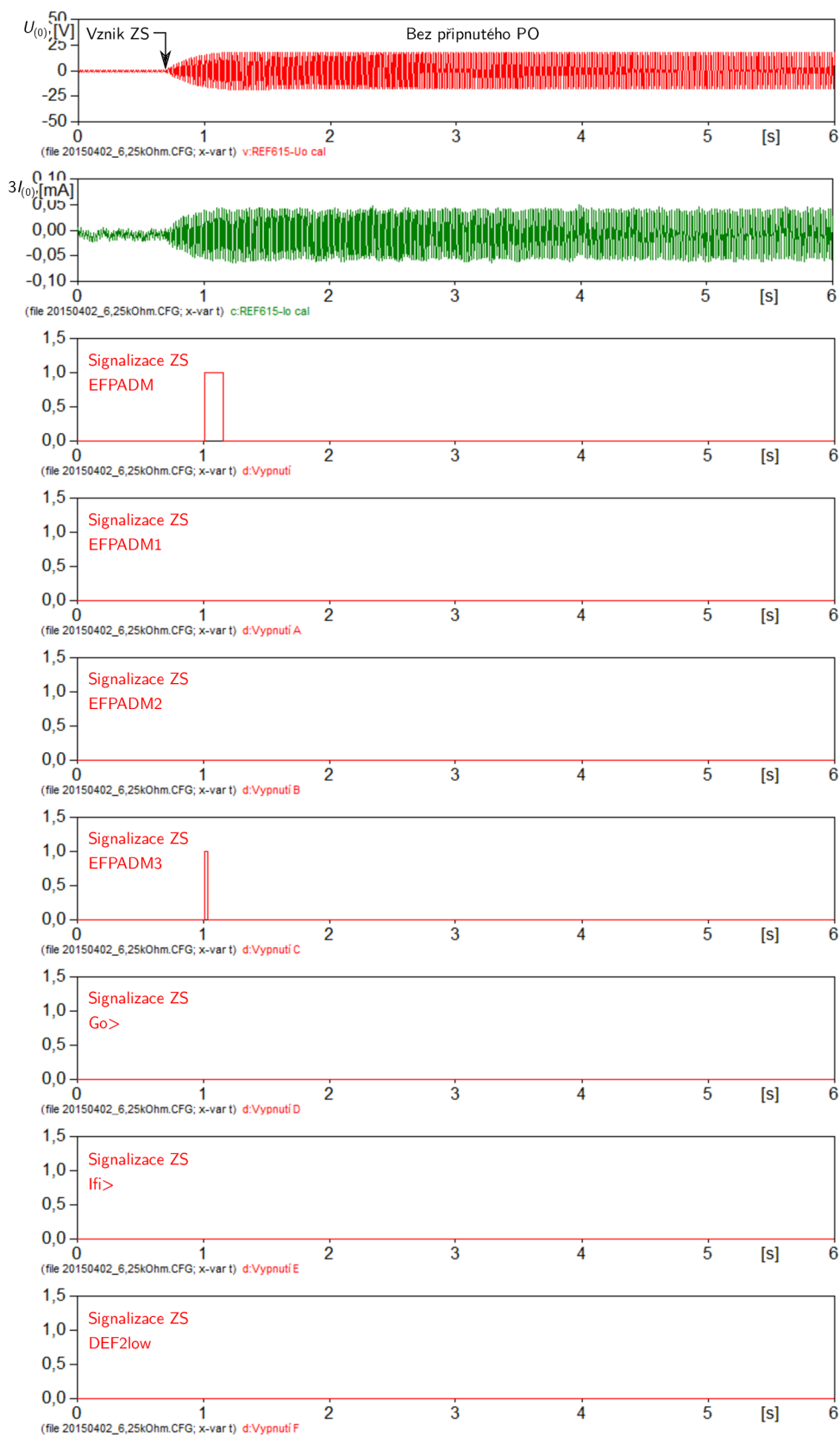
Obr. D.2: Průběh vypočítané konduktance během experimentálního ZS s : (a) $R_P = 2 \text{ k}\Omega$, (b) $R_P = 3 \text{ k}\Omega$ a (c) $R_P = 6,25 \text{ k}\Omega$. Hodnoty konduktance jsou vztaheny k jmenovitým parametrům sítě.



Obr. D.3: Průběhy $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$ při experimentálním ZS o $R_P = 2\text{k}\Omega$ a sekvence působení jednotlivých ochranných funkcí. Napětí a proud jsou uvažovány na sekundární straně PTN a PTP.



Obr. D.4: Průběhy $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$ při experimentálním ZS o $R_P = 3\text{ k}\Omega$ a sekvence působení jednotlivých ochranných funkcí. Napětí a proud jsou uvažovány na sekundární straně PTN a PTP.



Obr. D.5: Průběhy $\bar{U}_{(0)}$ a $\bar{I}_{(0)}$ při experimentálním ZS o $R_P = 6,25 \text{ k}\Omega$ a sekvence působení jednotlivých ochranných funkcí. Napětí a proud jsou uvažovány na sekundární straně PTN a PTP.

E OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

| Název souboru | Popis |
|------------------|--|
| 2k0hm.CFG | Záznam testování ochran při ZS o odporu 2 k Ω - konfigurační soubor |
| 2k0hm.DAT | Záznam testování ochran při ZS o odporu 2 k Ω - datový soubor |
| 2k0hm_Go.xlsx | Soubor s průběhem vypočtených konduktancí pro případ průběhu ZS o odporu 2 k Ω |
| 3k0hm.CFG | Záznam testování ochran při ZS o odporu 2 k Ω - konfigurační soubor |
| 3k0hm.DAT | Záznam testování ochran při ZS o odporu 2 k Ω - datový soubor |
| 3k0hm_Go.xlsx | Soubor s průběhem vypočtených konduktancí pro případ průběhu ZS o odporu 3 k Ω |
| 6,25k0hm.CFG | Záznam testování ochran při ZS o odporu 2 k Ω - konfigurační soubor |
| 6,25k0hm.DAT | Záznam testování ochran při ZS o odporu 2 k Ω - datový soubor |
| 6,25k0hm_Go.xlsx | Soubor s průběhem vypočtených konduktancí pro případ průběhu ZS o odporu 6,25 k Ω |
| doreal.m | Pomocná funkce pro vytvoření fázoru s opačnou fází |
| fazPosun.m | Pomocná funkce počítající rozdíl fází mezi dvěma vektory |
| poZS.m | Pomocná funkce pro výpočet parametrů sítě po vzniku ZS |
| predZS.m | Pomocná funkce pro výpočet parametrů sítě v bezporuchovém stavu |
| Ostruška-DP.pdf | Diplomová práce |
| simulaceZS.m | Hlavní skript, kterým se spouští model ZS v síti |
| simulaceZS.xlsx | Výstupní soubor simulace ZS v síti pro předdefinované stavy sítě |
| Testovani_1.xlsx | Záznam testování na základě výpočtů modelu ZS pro předdefinované stavy sítě |