

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ**



**DISERTAČNÍ
PRÁCE**

2017

**JAKUB
EHRENBERGER**

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

OCHRANA SÍTÍ S DECENTRALIZOVANOU VÝROBOU ENERGIE

Disertační práce

Ing. Jakub Ehrenberger

Praha, Říjen, 2017

Doktorský studijní program: *Elektrotechnika a informatika (P 2612)*
Studijní obor: *Elektroenergetika (3907V001)*

Školitel: *Ing. Jan Švec, Ph.D.*

Školitel specialista: *Ing. Radek Hanuš, Ph.D.*

Anotace

Ochrana sítí s decentralizovanou výrobou energie je v posledních letech stále častěji diskutovaným tématem. Připojením zdroje do distribuční soustavy jsou ovlivněny nejenom podmínky provozní, ale také podmínky poruchové. Stávající koncepce chránění distribučních sítí se tak postupně stávají nepoužitelné a stále více jsou nahrazovány koncepcemi známými ze sítí přenosových.

Práce se zabývá nastavením nadproudových směrových ochran s časově závislou inverzní charakteristikou a jejich použitím pro sítě s decentralizovanou výrobou energie. Výhoda tohoto typu ochran spočívá především v jejich jednoduchosti a soběstačnosti v rámci chránění celé sítě. Klíčovým úkolem návrhu nastavení je správná volba koeficientů charakteristik jednotlivých ochran tak, aby byla zaručena jejich správná selektivní reakce v kombinaci s co možná nejrychlejším odpojením postižené části sítě. U klasických radiálních sítí bez decentralizované výroby je možno použít ochran nesměrových a nastavení provést „ručně“. Přidáním decentralizované výroby však výrazně narůstá počet podmínek, které musí nastavení splňovat, ochrany musí být směrové a i pro malé sítě se pak z tohoto úkolu stává značně komplikovaný problém. V rámci práce byla pro tento účel navržena metodika a následně vytvořen algoritmus schopný toto nastavení zprostředkovat. Pro pohodlnější aplikaci algoritmu byl vytvořen program umožňující nejenom automatický návrh, ale také ověření nastavení téměř libovolné síťové konfigurace. V Programu byl proveden návrh nastavení několika testovacích sítí s decentralizovanou výrobou energie a následně proveden rozbor jejich chování při různých změnách vstupních parametrů nastavení.

Klíčová slova: ochrana sítě, směrová nadproudová ochrana, decentralizovaná výroba energie, rozptýlená výroba energie, časově závislé inverzní charakteristiky, optimalizace nastavení ochran

Abstract

Nowadays, protection of distributed generation systems has increasingly been a discussed topic. By the connection of source to the distributed system, not only the nominal, but also the fault conditions are affected. Therefore, the topical concept of distributed system protection has gradually been becoming inapplicable, and concepts taken from the transmission system protection have increasingly been used.

This thesis deals with the protection scheme of distributed generation systems, based on directional overcurrent protections with inverse time characteristics. The main advantage of this type of protections is their simplicity and self-sufficiency as a part of entire system protection. The key question of network protection, realized by directional overcurrent protections, is a correct setting of the inverse time characteristics coefficients. The coefficients must be properly chosen due to correct tripping times, and selectivities of all the protections must be met for all possible failure cases. In ordinary networks without distributed generation, non-directional protections can be used, and it is possible to determine setting manually. However, with the addition of distributed generation, the number of conditions that must be met increases significantly, protections must be directional, and even in small networks, the task becomes to a very complex problem one. As part of the dissertation, the setting methodology has been proposed, and subsequently, an automatic setting algorithm has been created. For a transparent setting algorithm application, a programme allowing for the automatic setting and verification of almost any network configuration has been developed. A setting of several distributed generation system protections has been designed and analysed for various input parameters.

Keywords: power system protection, directional overcurrent protection, distributed generation, inverse time characteristics, protection setting optimization

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Ing. Janu Švecovi Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu celého mého doktorského studia věnoval. Nemalý dík pak patří také mé rodině za podporu a zázemí, které mi po celou tuto dobu poskytovala.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

.....
Ing. Jakub Ehrenberger

1 Obsah

1	Obsah	7
2	Úvod	9
2.1	Současný stav problematiky	9
2.2	Cíle disertační práce.....	11
3	Časově závislé inverzní charakteristiky	12
4	Nastavení charakteristik nadproudových ochran v konvenční distribuční síti	16
4.1	Teoretický rozbor nastavení.....	16
4.2	Ukázka nastavení v programu SimPoruchy	20
4.3	Změna rozdílu zkratových proudů na konci a na začátku chráněného úseku.....	26
5	Nastavení charakteristik nadproudových ochran v síti s decentralizovanou výrobou energie	28
5.1	Nastavení charakteristik ochran oboustranně napájené sítě.....	28
5.2	Připojení zdroje do oboustranně napájené sítě	29
5.3	Vliv polohy a velikosti připojovaného zdroje.....	30
5.4	Připojení distribuované výroby do konvenční distribuční sítě a nechtěná reakce ochrany	34
6	Optimalizace nastavení ochran	35
6.1	Optimalizace nastavení ochran s inverzní charakteristikou.....	35
6.2	Určení typů zkratových příspěvků	39
6.3	Popudové proudy	43
6.4	Optimalizace časových multiplikátorů ochran za pomoci lineárního programování	43
6.5	Optimalizace koeficientů pomocí SOMA metody.....	44
6.6	Porovnání optimalizačních metod.....	47
7	Metoda simultánních poruch	49
7.1	Metoda injektovaných proudů	49
7.2	Metoda simultánních poruch pro trojfázové poruchy.....	51
7.3	Metoda simultánních poruch pro jednofázové poruchy.....	53
7.4	Štěpení poruch	58
7.5	Poruchová impedanční matice	60
7.6	Alokace proudů z bran poruch do všech uzlů sítě	65
7.7	Náhradní články vedení a transformátoru.....	66
8	Program SimPoruchy	69
8.1	V jednotlivých verzích program umožňuje:	69
8.2	Rozpoznání směru poruchového výkonu.....	70

8.3	Tvorba poruchových a pomocných cest	71
8.4	Optimalizace nastavení ochran	75
9	Rozbor nastavení nadproudových ochran programem SimPoruchy 3.0	78
9.1	Minimální požadovaná hodnota selektivního času	79
9.2	Změna průměru celkového distribuovaného výkonu.....	81
9.3	Změna průměru celkového distribuovaného výkonu pro jedno dané nastavení.....	83
9.4	Poloha zkratu v rámci celé chráněné sekce.....	86
9.5	Uvažování většího počtu síťových konfigurací	88
10	Závěr	90
10.1	Přehled výsledků a přínosů disertace	90
10.2	Závěry pro další rozvoj práce.....	92
11	Použitá označení	93
12	Literatura	97
13	Seznam publikací disertanta	102
13.1	Publikace vztahující se k tématu disertační práce.....	102
13.2	Ostatní publikace.....	103
14	Přílohy	104
14.1	Schémata testovaných sítí	104
14.2	Ukázka výpočtu simultánních poruch pro trojfázové poruchy	109
14.3	Ukázka výpočtu simultánních poruch pro jednofázové poruchy	112
14.4	Obsah příloženého CD	117

2 Úvod

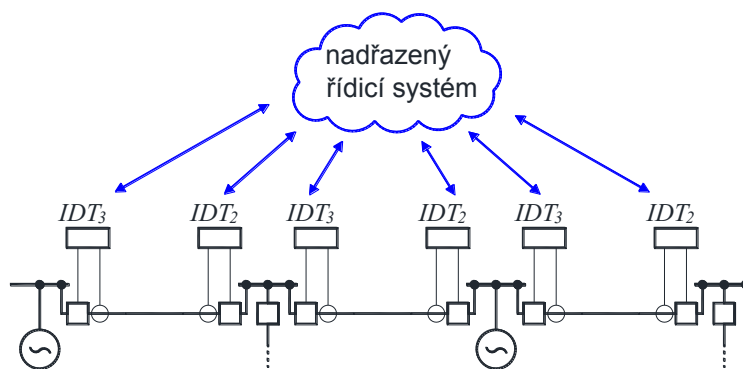
2.1 Současný stav problematiky

V posledních letech prochází energetický systém značnými změnami. Do distribuční soustavy je postupně připojováno stále více a více menších výrobních zdrojů a klasická (konvenční) koncepce sítě tak přechází v koncepci sítě s rozptýlenou (decentralizovanou) výrobou energie. Připojení těchto zdrojů sebou přináší řadu výhod [1]–[3]. Vzhledem k hustšímu rozmístění výrobních zdrojů a zkrácení vzdálenosti mezi zdrojem a spotřebičem, je tyto možno lépe zálohovat, dochází ke značnému zvýšení spolehlivosti celého systému a současně s tím pak ke zvýšení kvality dodávané elektřiny. V případě, kdy je valná část těchto malých výrobních zdrojů zprostředkována obnovitelnými zdroji energie, dochází zároveň ke snížení emisí uhlíku a omezení obav spojených s použitím tradičních fosilních paliv.

Na druhou stranu, různá připojení zdrojů a různé konfigurace sítě způsobují různé toky výkonů v jejich větvích, různá uzlová napětí a v případě poruchy také různé poruchové proudy [4]–[6], [A2]. Pro správné řízení a chránění takové sítě je pak zapotřebí stále více a více nových měřících, komunikačních a ochranných technologií [7]. Konvenční topologie sítě, kdy jsou velké výkonové zdroje připojovány do sítě přenosové a odběry naopak do sítě distribuční, poskytuje v případě poruchy v distribuční síti pouze jeden směr toku poruchového proudu, ze sítě přenosové do sítě distribuční¹. Tato skutečnost pak silně ulehčuje chránění takové sítě a použitý ochranný systém nepotřebuje informaci o směru poruchového proudu. V případě sítí s decentralizovanou výrobou energie, či sítí typu Smart Grid, kde je připojení zdrojů značně variabilní, se mohou případné zkratové proudy uzavírat po různých cestách a jejich velikost vždy závisí na aktuální síťové konfiguraci. Tato skutečnost pak musí být respektována při návrhu chránění takové sítě.

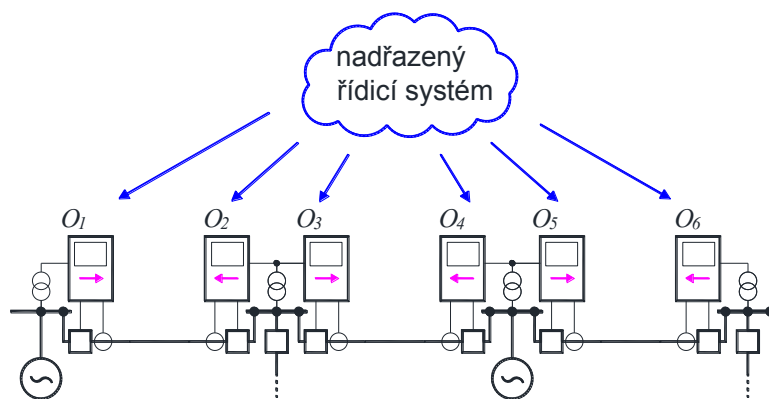
Jednou z často diskutovaných možností, jak sítě s decentralizovanou výrobou chránit je použití rozdílových ochranných [8]–[12]. Základní princip rozdílové ochrany, založený na porovnávání vstupních a výstupních proudů chráněného objektu, je pro tento účel velice vhodný. Ukázka části sítě s decentralizovanou výrobou je zobrazena na Obr. 1. Síť je rozdělena do několika úseků (chráněných sekcí) spojujících jednotlivé rozvodny a každému úseku náleží dvojice IDT (Intelligent Distributed Terminal). Ke každému IDT je připojen proudový transformátor, vypínač a volitelně také napěťový transformátor. Napěťového transformátoru je pak možno s výhodou využít k lokalizaci poruchy v rámci chráněného úseku [12]. Všechna IDT jsou propojena s nadřazeným řídicím systémem, který obsahuje potřebnou ochrannou logiku [13]. Řídicí systém přijímá signály od jednotlivých IDT a vyhodnocuje různé poruchové oblasti. V případě poruchy některého IDT je použito sousední IDT pro odpojení postižené sekce a dochází tak k vzájemnému zálohování. Nevýhodou této ochranné koncepce je nutnost propojení často velmi vzdálených míst komunikační cestou. Protože všechna data vyhodnocuje jeden nadřazený řídicí systém (nebo více menších vzájemně propojených systémů [10]) je zde nutnost přenášet velké množství dat (hodnoty proudů v reálném čase) do jednoho místa, kde dochází k jejich vyhodnocení.

¹ V případě zanedbání zkratového příspěvku zátěže



Obr. 1: koncepce chránění sítě s decentralizovanou výrobou energie pro rozdílové ochrany.

Další možností, vynikající oproti ostatním ochranným systémům především svou jednoduchostí, je použití směrových nadproudových ochran s časově závislou inverzní charakteristikou [14]–[31] zobrazené na Obr. 2. Obdobně, jako v případě rozdílových ochran je síť rozdělena do několika chráněných sekcí. Každé sekci náleží dvě nadproudové ochrany vybavené kromě transformátoru proudového také transformátorem napěťovým. Ochrana má tedy nejenom informaci o velikosti protékajícího proudu, ale také o jeho směru. Jak bude podrobně probráno v následujících kapitolách, ochrany jsou nastaveny tak, aby působily pouze pro jeden směr poruchové proudu (směr proudu, pro který ochrana reaguje je v Obr. 2 naznačen fialovou šipkou). Časová charakteristika těchto ochran svým tvarem napodobuje přirozenou charakteristiku pojistky, kdy při vyšší hodnotě proudu dochází k rychlejší reakci (tripu) a naopak při jeho nižší hodnotě dochází k reakci delší. Zatímco směrovost ochrany je důležitá ke správné lokalizaci poruchy, inverzní charakteristika je důležitá pro správné selektivní spínání na sebe navazujících ochran.



Obr. 2: koncepce chránění sítě s decentralizovanou výrobou energie pro nadproudové směrové ochrany.

Značnou výhodou tohoto typu ochran, oproti ochranám rozdílovým, je z hlediska komunikace jejich nezávislost na ostatních ochranách. Samotná komunikace není pro reakci ochrany nutná a v případě poruchy komunikační vazby pak není ochrana sítě ohrožena. Naopak jistou nevýhodou je závislost správné reakce ochran na aktuálně připojeném výkonu a dané síťové konfiguraci. Při malých změnách sítě, kdy jsou zkratové proudy systému jen velice málo ovlivněny, je nastavení do jisté míry variabilní. Při větších změnách však může docházet ke špatnému rozpoznání postižené sekce a je nutno vytvořit nové nastavení. V případě, kdy je síť provozována pouze v malém počtu konfigurací, mohou být tato nastavení předpočítána a

následně volena dle aktuální síťové konfigurace. Při vyšším počtu konfigurací je nutno operaci nastavení automatizovat a vytvořit algoritmus schopný toto nastavení zprostředkovat. Datová komunikace je tedy použita pouze v případě velkých změn v konfiguraci sítě, kdy nadřazený řídicí systém přenastavuje ochrany dle aktuálních zkratových podmínek. Základní podmínkou, nutnou pro správnou funkci nadproudových ochrany, je dostatečně velký rozdíl mezi předporuchovými a zkratovými proudy. Do sítě musí být připojen zdroj, schopný zprostředkovat dostatečně velkou hodnotu zkratového proudu a umožnit tak správné nastavení popudových proudů ochrany. U sítí, u nichž není možno tuto podmínku splnit, mohou být kromě výše zmíněných ochrany rozdílových použity také ochrany distanční. Připojením distribuovaného zdroje jsou však ovlivněny impedance viděné distanční ochranou a ochranný systém tak musí být, stejně jako u ochrany nadproudových, adaptivní [32]–[40].

2.2 Cíle disertační práce

Disertační práce je zaměřena na ochranu sítí s decentralizovanou výrobou energie pomocí nadproudových ochrany s časově závislou inverzní charakteristikou. Cíle práce je možno rozdělit do následujících bodů:

- Shrnout vlastnosti nastavení tohoto typu ochrany a porovnat jejich chování pro různé topologie sítě.
- Vytvořit metodiku návrhu nastavení tohoto typu ochrany.
- Sestavit algoritmus schopný zprostředkovat jejich automatické nastavení.
- Vytvořit program umožňující průzkum již navrženého nastavení a implementovat do něj výše zmíněný algoritmus automatického nastavení.
- Popsat vytvořený program včetně použitých metod a výpočtů.

Vytvořený program bude následně použit k rozboru nastavení a následujícím citlivostním analýzám:

- Minimální požadovaná hodnota selektivního času (subkapitola 9.1),
- Změna průměru celkového distribuovaného výkonu (subkapitola 9.2),
- Změna průměru celkového distribuovaného výkonu pro jedno dané nastavení (subkapitola 9.3),
- Poloha zkratu v rámci celé chráněné sekce (subkapitola 9.4).

Pro účely práce pak budou použity následující síťové konfigurace:

- radiální síť,
- IEEE 3-bus power system [25],
- IEEE 4-bus power system [25],
- IEEE 6-bus power system [25],
- IEEE 14-bus power system [25].

Schémata těchto sítí jsou uvedena v příloze na Obr. 59 - Obr. 63.

3 Časově závislé inverzní charakteristiky

V praxi jsou nejčastěji používány časově závislé inverzní charakteristiky (dále pouze inverzní charakteristiky) [41] dvou standardů tzv. IEC a ANSI standardu. Tyto charakteristiky se svým tvarem snaží napodobit klasické charakteristiky pojistky, nebo jističe a poskytují tedy proměnlivou závislost času vybavení ochrany (v anglické literatuře označovanou jako tzv. trip) t_{tripOi} na velikosti poruchového proudu I_{pOi} . Charakteristiku IEC standardu lze dle [42] zapsat jako:

$$t_{tripOi} = M_{Oi} \cdot \frac{K_{Oi}}{\left(I_{pOi} / I_{pcOi}\right)^{E_{Oi}} - 1} \quad (3.1)$$

kde koeficienty K_{Oi} a E_{Oi} jsou tabelované hodnoty zobrazené v Tab. 1 určující typ dané charakteristiky, M_{Oi} je časový multiplikátor nastavovaný v ochraně a I_{pcOi} je popudový proud (v anglické literatuře označovaný jako pickup current), po jehož překročení ochrana za čas t_{tripOi} vybaví. Ukázka nejběžněji používaných IEC charakteristik je pak pro $M_{Oi} = 1$ a $I_{pcOi} = 1$ zobrazena na Obr. 4. Po výběru charakteristiky (konstanty K_{Oi} a E_{Oi} dle Tab. 1) a stanovení hodnoty I_{pcOi} (viz subkapitola 4.1) je dle (3.1) možno při znalosti poruchového proudu I_{pOi} pro požadovaný čas vybavení t_{tripOi} stanovit hodnotu M_{Oi} jako:

$$M_{Oi} = \frac{\left(I_{pOi} / I_{pcOi}\right)^{E_{Oi}} - 1}{K_{Oi}} \cdot t_{tripOi} \quad (3.2)$$

Závislost „Normal inverse“ charakteristiky typu IEC je pro různé hodnoty M_{Oi} vykreslena na Obr. 3.

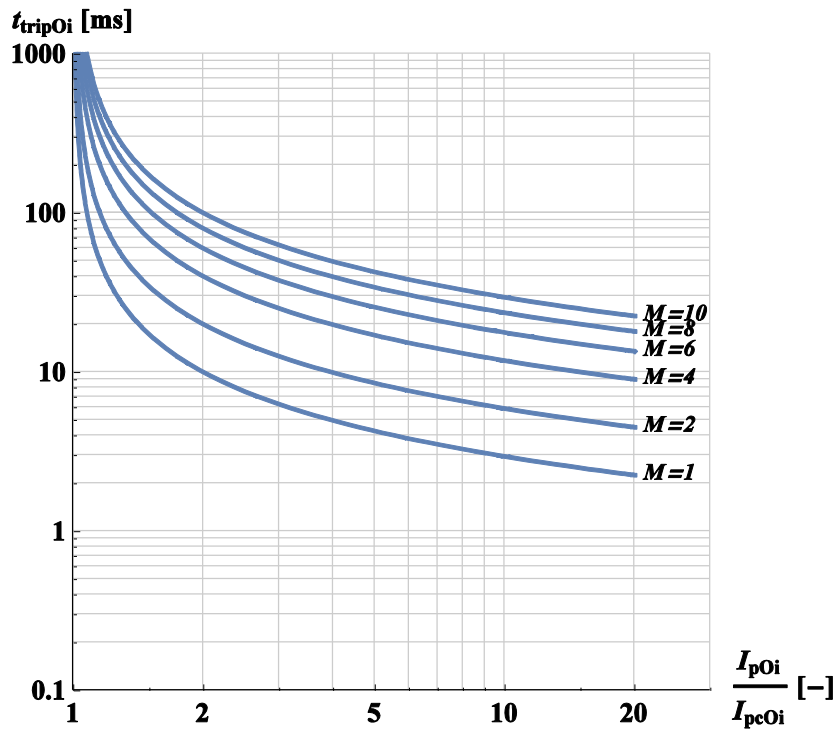
Tab. 1: přehled koeficientů IEC a ANSI standardu [42].

	IEC		ANSI		
	K_{Oi}	E_{Oi}	K_{Oi}	E_{Oi}	X_{Oi}
<i>Normal inverse</i>	0.14	0.02	8.9341	2.0938	0.17966
<i>Very inverse</i>	13.5	1	3.922	2	0.0982
<i>Extremely inverse</i>	80	2	5.64	2	0.02434
<i>Long time inverse</i>	120	1	5.6143	1	2.18592

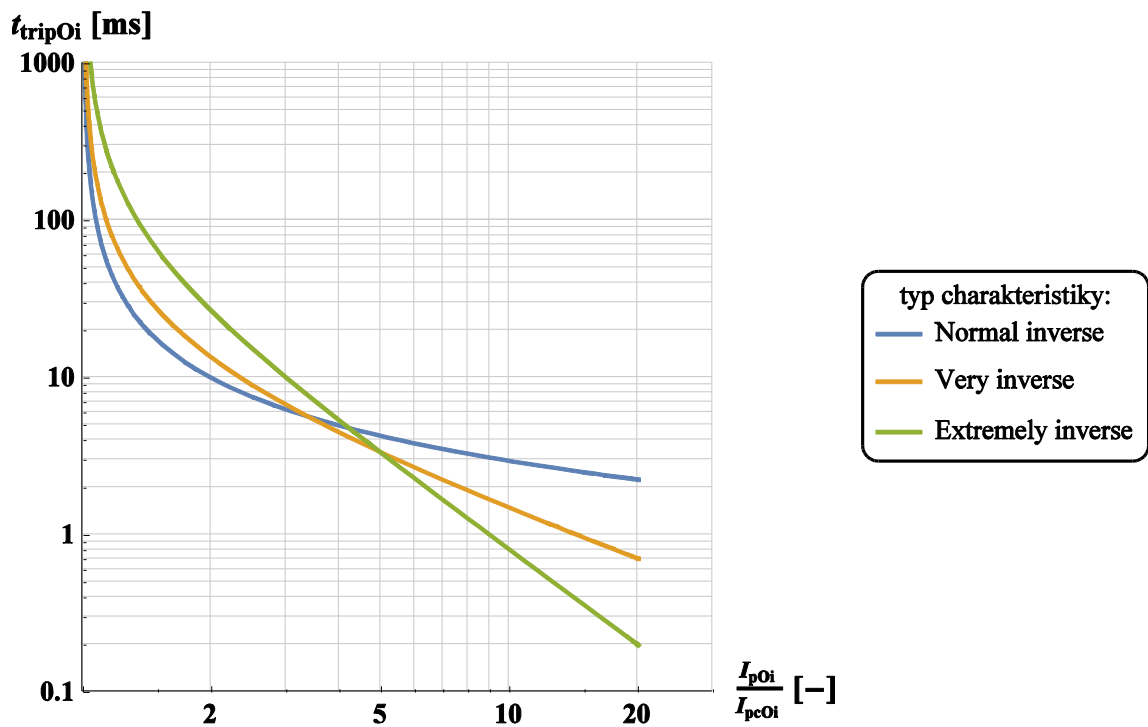
Čas vybavení dle ANSI standardu lze dle [42] vyjádřit jako:

$$t_{tripOi} = M_{Oi} \cdot \left(\frac{K_{Oi}}{\left(I_{pOi} / I_{pcOi}\right)^{E_{Oi}} - 1} + X_{Oi} \right) \quad (3.3)$$

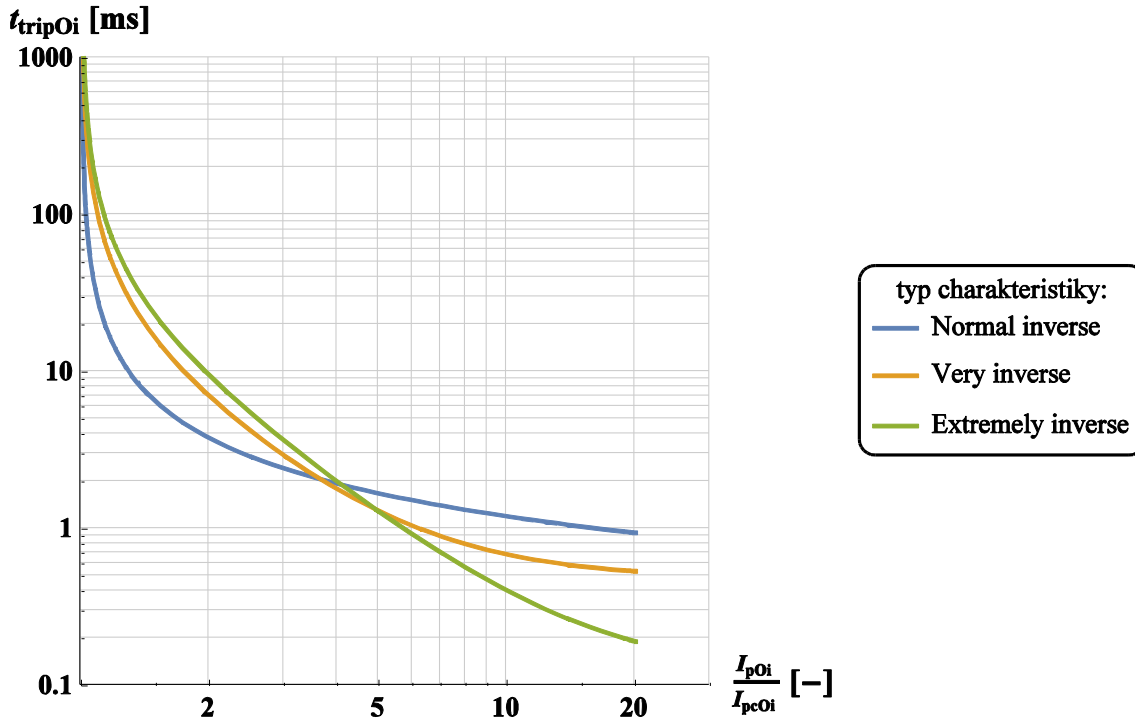
kde X_{Oi} je další koeficient určující tvar charakteristiky dle Tab. 1. Multiplikátor M_{Oi} pak můžeme získat pomocí (3.3) obdobným způsobem jako pro charakteristiky IEC. Ukázka nejběžněji používaných ANSI charakteristik je pak pro hodnotu multiplikátoru $M_{Oi} = 1$ a $I_{pcOi} = 1$ zobrazena na Obr. 5.



Obr. 3: Závislost charakteristiky IEC-Normal inverse na hodnotě multiplikátoru M_{Oi} .



Obr. 4: Nejběžnější typy IEC charakteristik pro $M_{Oi} = 1$ a $I_{pcOi} = 1$.



Obr. 5: Nejběžnější typy ANSI charakteristik pro $M_{Oi} = 1$ a $I_{pcOi} = 1$.

Výše uvedené vztahy (3.1) a (3.3) jsou použitelné pouze v případě, kdy ochranou po celý čas t_{tripOi} prochází hodnota poruchového proudu $I_{pOi} > I_{pcOi}$. V případě, kdy je poruchový proud I_{pOi} proměnlivý, můžeme vycházet z definičního vztahu charakteristik uvedeného v [41]. Například pro IEC standard můžeme napsat:

$$\int_0^{t_{tripOi}} \frac{1}{M_{Oi} \cdot K_{Oi}} \left(\left(\frac{I_{pOi}}{I_{pcOi}} \right)^{E_{Oi}} - 1 \right) dt = 1 \quad (3.4)$$

Uvažujme dále zjednodušený případ, kdy ochranou po čas t'_{Oi} prochází poruchový proud I'_{pOi} . Tento proud je vyšší, než popudový proud I_{pcOi} a pokud by tedy ochranou procházel po dostatečnou dobu t'_{tripOi} , došlo by k reakci ochrany. Pro náš případ však budeme předpokládat, že $t'_{Oi} < t'_{tripOi}$ a k reakci ochrany tedy nedojde. Po již zmíněném čase t'_{Oi} začne ochranou skokově procházet jiná hodnota proudu $I_{pOi} > I_{pcOi}$. Pro získání celkového času vybavení ochrany t_{tripOi} můžeme za pomoci (3.4) získat:

$$\frac{1}{M_{Oi} \cdot K_{Oi}} \cdot \left\{ \int_0^{t'_{Oi}} \left[\left(\frac{I'_{pOi}}{I_{pcOi}} \right)^{E_{Oi}} - 1 \right] dt + \int_{t'_{Oi}}^{t_{tripOi}} \left[\left(\frac{I_{pOi}}{I_{pcOi}} \right)^{E_{Oi}} - 1 \right] dt \right\} = 1 \quad (3.5)$$

Výsledný čas vybavení ochrany pak můžeme pomocí (3.5) vyjádřit jako:

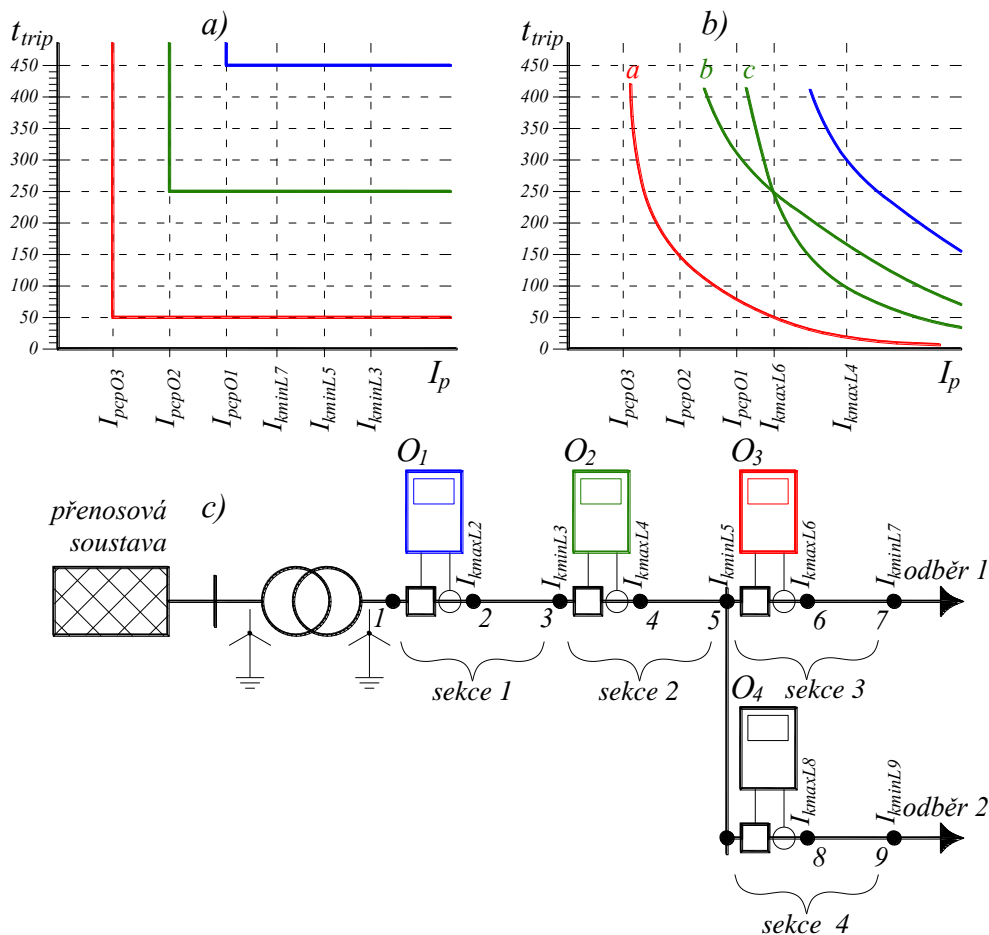
$$t_{tripOi} = \frac{K_{Oi} \cdot M_{Oi} + \left[\left(\frac{I'_{pOi}}{I_{pcOi}} \right)^{E_{oi}} - \left(\frac{I_{pOi}}{I_{pcOi}} \right)^{E_{oi}} \right] \cdot t'_{Oi}}{\left(\frac{I_{pOi}}{I_{pcOi}} \right)^{E_{oi}} - 1} \quad (3.6)$$

Hodnota získaná dle vztahu (3.6) je však pouze orientační a musí být brána s jistou rezervou. Pro získání přesnější hodnoty vybavovacího času t_{tripOi} je nutno uvažovat přímo konkrétní princip vyhodnocení dané ochrany.

4 Nastavení charakteristik nadproudových ochran v konvenční distribuční síti

4.1 Teoretický rozbor nastavení

U konvenčního typu sítě zobrazeného na Obr. 6 jsou majoritní zdroje elektrické energie připojovány do soustavy přenosové a spotřebiče elektrické energie naopak do soustavy distribuční. Tato koncepce sítě tak zprostředkovává vždy pouze jeden směr toku výkonů ze sítě



Obr. 6: nastavení selektivity nadproudových ochran konvenční distribuční sítě
a) časově nezávislou charakteristikou b) časově závislou inverzní charakteristikou.

přenosové do sítě distribuční. Při zanedbání zkratového příspěvku zátěže, která by do případného zkratu v distribuční soustavě přispívala určitou hodnotou zkratového proudu tekoucího do zkratu ze směru zátěže, můžeme říci, že i zkratový proud bude do místa poruchy v distribuční síti téci pouze ze soustavy přenosové do soustavy distribuční. Tato skutečnost nám pak umožňuje použít ochrany nesměrové vyhodnocující pouze velikost poruchového proudu.

Ukázku nastavení konvenčního typu sítě, současně s jejím teoretickým rozбором, provedeme na síti zobrazené na Obr. 6. Naším úkolem je správně nastavit jednotlivé ochrany této sítě tak, aby byla při případné poruše odepnuta pouze nezbytná část vedení a ostatní odběry, které se mohou nalézat v uzlech 3, 5, 7 a 9, zůstaly dále napájeny. Síť je rozdělena do 4 sekcí, z nichž každá obsahuje dva uzly a jednu ochranu. V každém z těchto uzlů jsou vypočteny hodnoty zkratových proudů tekoucích z levé strany (značeny L). Uzel blíže ochraně je použit

pro výpočet maximálního zkratového proudu a naopak uzel dále ochraně pro výpočet minimálního zkratového proudu. Pro výpočet maximálního zkratového proudu je dle [43] nutno uvažovat konfiguraci sítě zaručující maximální zkratové proudy. Pro výpočet minimálního zkratového proudu musíme naopak uvažovat konfiguraci sítě zaručující minimální zkratové proudy. Pro daný j -tý uzel je maximální a minimální zkratový proud označen jako I_{kmaxLj} , respektive I_{kminLj} . Oba proudy lze stanovit jako příslušné maximální a minimální hodnoty všech uvažovaných proudů respektovaných vektorem ξ_j^{max} respektive ξ_j^{min} . Oba vektory lze zapsat jako:

$$\begin{aligned}\xi_j^{max} &= (I_{k3,j}^{max}, I_{k2n,j}^{max}, I_{k2,j}^{max}, I_{k1,j}^{max})^T \\ \xi_j^{min} &= (I_{k3,j}^{min}, I_{k2n,j}^{min}, I_{k2,j}^{min}, I_{k1,j}^{min})^T\end{aligned}\quad (4.1)$$

kde $I_{k3,j}^{max}, I_{k2n,j}^{max}, I_{k2,j}^{max}, I_{k1,j}^{max}$ a $I_{k3,j}^{min}, I_{k2n,j}^{min}, I_{k2,j}^{min}, I_{k1,j}^{min}$ jsou velikosti trojfázového, dvoufázového zemního, dvoufázového a jednofázového zkratového proudu v uzlu j pro konfiguraci sítě zaručující maximální, respektive minimální hodnoty zkratových proudů. Jak bylo uvedeno výše, hodnotu maximálního a minimálního zkratového proudu v j -tém uzlu určíme jako:

$$\begin{aligned}I_{kminLj} &= \text{Min}\{\xi_j\} \\ I_{kmaxLj} &= \text{Max}\{\xi_j\}\end{aligned}\quad (4.2)$$

Uvažujme například zkrat v uzlu 6. Při tomto zkratu začne skrze ochrany O_1 až O_3 protékat zkratový proud I_{kminL6}^2 . Náš požadavek je, aby při této poruše zareagovala jako první ochrana O_3 a s určitým časovým zpožděním (selektivně za ní) ochrana O_2 . Pro tento požadavek jsou celkem dva důvody. Prvním je záloha ochrany O_3 ochranou O_2 . Tedy, nedojde-li z nějakého důvodu k reakci ochrany O_3 , bude zpožděně reagovat ochrana O_2 a porušenou část vedení odpojí. Druhým důvodem je pak jistá časová rezerva potřebná ke správnému pořadí spínání ochran. Neboli, musíme zamezit možnosti reakce ochrany O_2 před ochranou O_3 tak, aby nebyl odpojen nepoškozený úsek sítě (dle Obr. 6 se jedná o sekci 4 a odběr 2 chráněný ochranou O_4).

Ukažme si nyní nastavení distribuční sítě z Obr. 6 pro dva základní typy charakteristik. První, v dnešní době běžně používaný, typ charakteristiky je zobrazen na Obr. 6 a). Jedná se o použití proudově nezávislých charakteristik (v anglické literatuře označovaných jako definite time), které po překročení poruchového proudu reagují vždy za stejný čas. Chceme-li nastavit charakteristiky ochrany, musíme vždy nejprve zjistit minimální možné zkratové proudy tekoucí skrze příslušnou ochranu do příslušného uzlu. Hodnota popudového proudu I_{pcOi} tekoucí i -tou ochranou, při níž je tento proud vyhodnocen jako poruchový, musí splňovat následující podmínku:

$$I_{nOi} < I_{pcOi} \leq I_{kminOi} \quad (4.3)$$

kde I_{nOi} je proud tekoucí ochranou v předporuchovém stavu a I_{kminOi} je nejmenší možný poruchový proud při kterém ochrana musí reagovat. Například pro ochranu O_3 je tímto proudem nejmenší možný zkratový proud tekoucí ochranou při zkratu v uzlu 7. Zdroj zkratového proudu

² Skrze O_1 až O_3 prochází stejný proud pouze v případě, kdy je zanedbán odběr 2. Pokud tento nemůže být zanedbán, musí být použit postup, který bude podrobně popsán v subkapitole 6.2.

je v případě dle Obr. 6 c) pouze nadřazená přenosová soustava. Protože impedance mezi tímto zdrojem a místem zkratu se zvyšuje se vzdáleností od sítě (s délkou vedení), bude se zkratový proud se vzdáleností od sítě snižovat.

$$I_{kminL7} < I_{kminL5} < I_{kminL3} \quad (4.4)$$

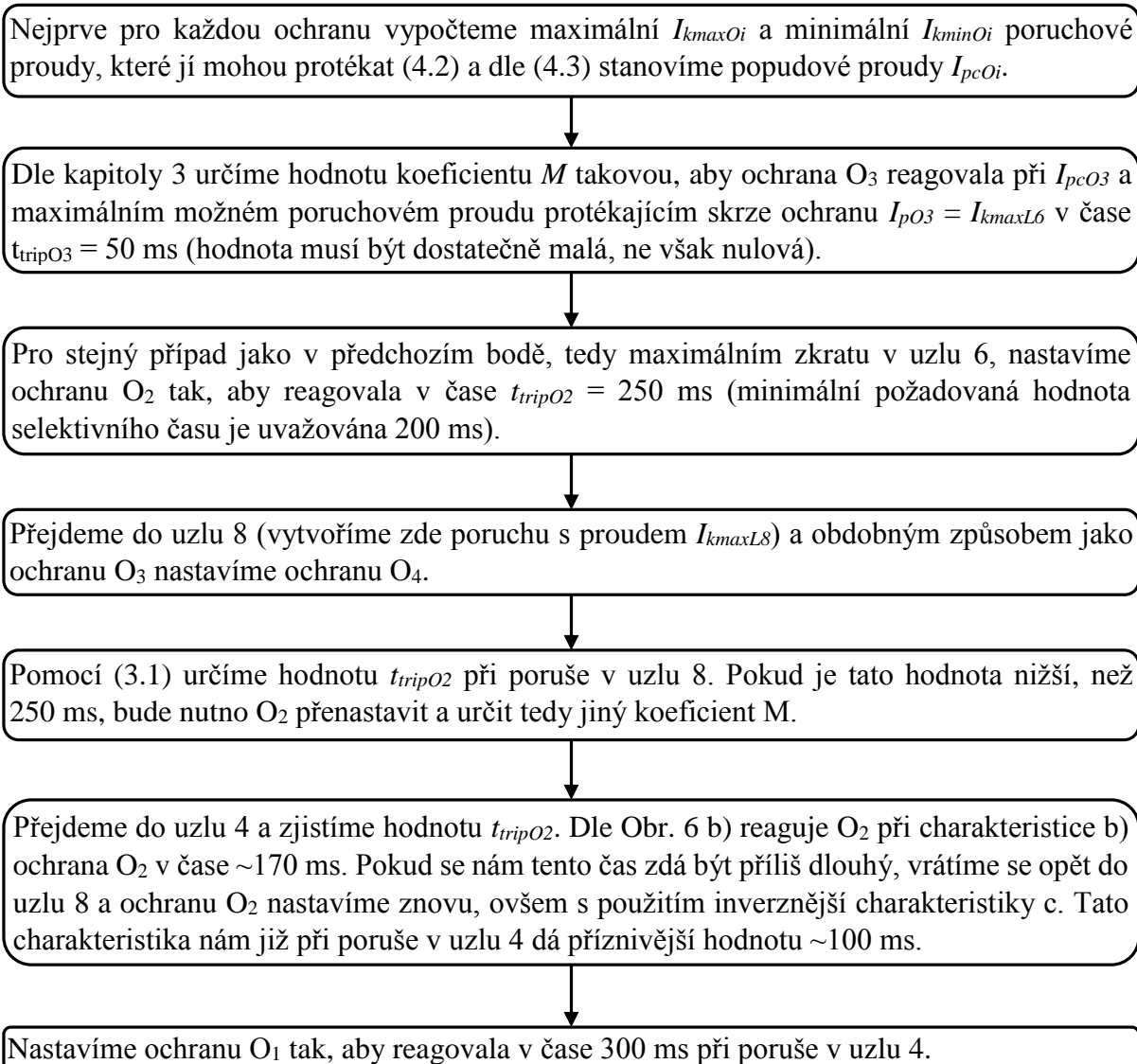
$$I_{kminL9} < I_{kminL5} < I_{kminL3} \quad (4.5)$$

Pro ochranu O_3 je tedy možno uvažovat $I_{kminO3} = I_{kminL7}$ a v krajním případě je tedy možno zvolit $I_{pcO3} = I_{kminL7}$. Jak bylo uvedeno výše, jednotlivé ochrany musí být nastaveny selektivně za sebe a v případě poruchy O_3 musí s určitým zpožděním reagovat O_2 . Ochrana O_2 tedy musí reagovat, jak pro poruchu v uzlu 5, tak pro poruchu v uzlu 7 a 9³. Vzhledem k (4.4) pak bude možno nastavit ochranu O_2 maximálně na $I_{pcO2} = \text{Min}\{I_{kminL7}, I_{kminL9}\}$. Pokud budeme dále uvažovat přípustný požadavek zálohy pouze dvou na sebe navazujících ochran (O_3 - O_2 , O_2 - O_1 a O_4 - O_2), lze obdobně nastavit také zbývající popudové proudy ochran O_1 a O_4 maximálně na I_{kminL5} , respektive na I_{kminL9} . Vzhledem k (4.4) a $I_{pcO1} = I_{kminL5}$ pak při zkratu v uzlu 7 a selhání jak O_3 , tak O_2 , nemusí O_1 reagovat⁴. Výsledné nastavení časově nezávislých charakteristik je pak možno provést dle Obr. 6 a). Ochrany O_3 a O_4 jsou nastaveny na hodnotu 50 ms pro zkrat v uzlu 7, respektive 9, a ochrana O_2 selektivně za ně na čas 250 ms. Při zkratu v uzlu 5 lze obdobně nastavit O_1 na 450 ms. Dochází zde tedy k prodlužování doby reakce ochrany v závislosti na počtu za sebou jdoucích ochran.

Problém navyšování času reakce ochrany t_{tripOi} lze částečně omezit, či úplně odstranit použitím časově závislých charakteristik. Časově závislé inverzní charakteristiky (v anglické literatuře označované jako inverse time characteristics) jsou zobrazené na Obr. 6 b). Tyto charakteristiky, probrané v kapitole 3, umožňují proměnlivou reakci ochrany v závislosti na velikosti protékajícího proudu (čas t_{tripOi} mezi rozpoznáním poruchy, tedy překročením I_{pcOi} , a její reakcí). Při využití skutečnosti (4.4) lze tyto charakteristiky nastavit dle diagramu na Obr. 7.

³ V případě poruchy O_4 musí s určitým zpožděním reagovat O_2 .

⁴ Přepokládáme tedy, že současné selhání ochran O_3 a O_2 je velice málo pravděpodobné a tento jev je možno vyloučit. Obdobný předpoklad uvažujeme také pro ochrany O_4 a O_2 .



Obr. 7: Postup nastavení nadproudových ochran s inverzní časovou charakteristikou pro síť na Obr. 6.

Selektivitu ochran nastavujeme vždy pro maximální poruchový proud tekoucí ochranou. Vzhledem k tvaru charakteristik z Obr. 6 b) je patrné, že při nižší hodnotě poruchového proudu dojde k prodloužení selektivního času a naopak při jeho vyšší hodnotě k jeho zkrácení. Tato úvaha je však obecně platná pouze za předpokladu, že zkratové příspěvky tekoucí skrze prvně a selektivně reagující ochrany jsou stejné a zároveň se popudové proudy ochran směrem k poruše snižují. Protože pro radiální síť bez distribuované výroby jsou velikosti zkratových proudů tekoucích skrze prvně a selektivně reagující ochrany téměř stejné, zbývá splnit podmínku popudových proudů. Pro schéma z Obr. 6 musí tedy platit:

$$I_{pcO3} \leq I_{pcO2} \leq I_{pcO1} \quad (4.6)$$

V dalším textu budeme prvně reagující a selektivně reagující ochrany označovat jako primární a sekundární označené písmenem i , respektive j . Obecný zápis podmínky (4.6) pak můžeme zapsat jako:

$$I_{pcOi} \leq I_{pcOj} \quad (4.7)$$

Pro síť s distribuovanou výrobou energie, či síť zasmyčkováná, kdy mohou být zkratové příspěvky tekoucí ochranami značně rozdílné, není nastavení selektivity pro maximální zkratové proudy dostatečné. Nastavení ochran těchto sítí pak musí respektovat všechny uvažované typy zkratových proudů v celé chráněné sekci. Podrobněji bude tento problém diskutován v subkapitole 6.2.

4.2 Ukázka nastavení v programu SimPoruchy

Podívejme se nyní na ukázkové „ruční“ nastavení konvenční distribuční sítě na Obr. 8 a) dle subkapitoly 4.1. Jako nástroj pro toto nastavení použijeme program SimPoruchy. Síť je složena z nadřazené přenosové sítě S_1 , vedení V_1 až V_{10} a obecných odběrů Z_1 a Z_2 (bez zkratového příspěvku). Jak bylo uvedeno v subkapitole 4.1, jsou pro každou chráněnou sekci vedení vytvořeny dva pomocné uzly a pro proudové transformátory ochran pomocné úseky vedení V_1, V_3, V_5, V_7 a V_9 . Tyto úseky mají vzhledem k chráněným úsekům V_2, V_4, V_6, V_8 a V_{10} zanedbatelnou délku (10 m) a mají pouze informativní charakter.

Nejprve je nutno stanovit hodnotu popudových proudů I_{pcOi} tak, aby byla splněna podmínka (4.3). Výpočtem ustáleného stavu sítě stanovíme proudy protékající každou ochranou v předporuchovém stavu I_{nOi} . Popudové proudy I_{pcOi} pak získáme jako:

$$I_{pcOi} = 1.2 \cdot I_{nOi} \quad (4.8)$$

Protože naše síť neobsahuje distribuované zdroje, je vzhledem k závěrům uvedeným v předchozí subkapitole vhodné, aby se hodnoty popudových proudů směrem k poruše snižovaly (4.7). V tomto případě bude možno použít pouze maximální hodnoty zkratových proudů. Vzhledem k topologii naší sítě je tento požadavek při použití (4.8) automaticky splněn. Předporuchové a výsledné popudové proudy všech ochran jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2: Předporuchové a popudové proudy všech ochran.

	O1	O2	O3	O4	O5
$I_{nOi} [A]$	781.61	781.61	578.57	203.13	203.13
$I_{pcOi} [A]$	937.93	937.93	694.28	243.76	243.76

Pro splnění podmínky (4.3) musí být splněno $I_{pcOi} < I_{kminOi}$. Nejmenší možný proud, pro který musí ochrana reagovat, je v našem případě patrný z Obr. 8 a). Na obrázku jsou vypsané všechny uvažované hodnoty zkratových proudů (vektory ξ_j) pro každý uzel sítě, kde pro jednoduchost uvažujeme $\xi_j = \xi_j^{max} = \xi_j^{min}$. Například nejmenší hodnota zkratového proudu, pro který musí reagovat ochrana O_5 je vyvolána jednofázovým zkratem v uzlu 10.

$$I_{kminO5} = \text{Min}\{\xi_{10}\} = 917.14 \text{ A} \quad (4.9)$$

Vzhledem k požadavku zálohy pouze dvou na sebe navazujících ochran, uvedenému v subkapitole 4.1, lze uvažovat $I_{kminO4} = I_{kminO5}$. Obdobným způsobem by mělo dojít také k záloze ochrany O_4 ochranou O_2 . V případě jednofázového zkratu v uzlu 8 a poruchy O_4 by tedy měla s určitým zpožděním reagovat O_2 . Vzhledem k délce chráněného úseku náležícího vedení V_8 (10 km) je však hodnota zkratového proudu tekoucího ochranou O_2 velice blízká jejímu popudovému proudu⁵ a pro tento případ tedy není tato záloha možná. Pro všechny ostatní ochrany jsou příslušné nejmenší hodnoty zkratových proudů spolu s uzly, ve kterých je porucha uvažována uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3: Minimální zkratové proudy ochran

	O ₁	O ₂	O ₃	O ₄	O ₅
<i>uvažovaný poruchový uzel</i>	6	5	5	10	10
<i>hodnota minimálního zkratového proudu [kA]</i>	1.98	1.79	1.79	0.92	0.92
<i>hodnota minimálního zkratového proudu ponížena bezpečnostním koeficientem [kA]</i>	1.58	1.43	1.43	0.73	0.73

Uvažován bezpečnostní koeficient $k_{min} = 0.8$.

Po zvolení správných hodnot popudových proudů můžeme přejít k návrhu samotného nastavení. Nejprve je dle (4.2) nutno zjistit maximální zkratové proudy v uzlech 1, 3, 4, 7 a 9. Při výše zmíněném zjednodušení $\xi_j = \xi_j^{max} = \xi_j^{min}$ pak časy vybavení ochran zobrazené na Obr. 8 b), c), d) a e) spolu s vyobrazenými proudy větvemi přímo odpovídají našemu nastavení. Z Obr. 8 a) je patrné, že nejvyšších hodnot zde dosahují proudy trojfázové. Vytvoříme tedy nejprve trojfázový zkrat v uzlu 9, zvolíme tvar charakteristiky (volíme IEC-very inverse) a dle subkapitoly 4.1 určíme hodnotu multiplikátoru ochran O_5 a O_4 tak, aby pro tuto poruchu ochrana O_5 vybavila v čase 50 ms a ochrana O_4 v čase 250 ms, jak je zobrazeno na Obr. 8 b). Dále se přesuneme do uzlu 7, jak je zobrazeno na Obr. 8 c). V tomto případě reaguje ochrana O_4 v čase 116 ms a ochranu O_2 tedy pro tento případ nastavíme, se stejným selektivním časem jako v předchozím případě, na 316 ms. Vzhledem ke stejné impedanci pomocných úseků V_5 a V_7 , nastavíme pro stejný poruchový proud také ochranu O_3 tak, aby vybavila v čase 50 ms. Dále přejdeme do uzlu 3. V tomto případě reaguje ochrana O_2 v čase 165 ms a ochranu O_1 tedy nastavíme na reakci v čase 365 ms. Nakonec se přesuneme do uzlu 1 a zjistíme, že ochrana O_1 zde reaguje v čase 237 ms dle Obr. 8 d). Charakteristiky všech ochran a jejich reakce pro maximální zkratové proudy jsou patrné z Obr. 9.

Jak je patrné z Obr. 8 a), mají chráněné úseky různé délky, konkrétně 2, 4, 1, 10 a 0.5 km. Těmto délkám jsou pak úměrné rozdíly zkratových proudů před a na konci úseku. Například úsek vedení V_{10} má pro trojfázový zkrat rozdíl $\Delta I_{kv10} = 1.46 - 1.43 = 0.03$ kA a úsek vedení V_8 pak $\Delta I_{kv8} = 2.85 - 1.46 = 1.39$ kA. Protože zdroj zkratového proudu je v tomto případě pouze síť, bude tento rozdíl vždy úměrný délce vedení (jeho impedanci). Tato skutečnost má pak výrazný vliv na zvyšování doby reakce ochrany. Jak je patrné z Obr. 8, dojde-li ke zkratu v uzlu 9, je ochrana O_2 nastavena na 250 ms, dojde-li ke zkratu v uzlu 7, reaguje ochrana v čase

⁵ hodnota popudového proudu ochrany O_2 je dle Tab. 2 stanovena na hodnotu $I_{pcO2} = 937.93$ A a hodnota minimálního protékajícího zkratového proudu při poruše v uzlu 8 je dle Obr. 8 a) $I_{k1} = 941.72$ A.

116 ms. Došlo zde tedy k poklesu času vybavení o $\Delta t_{V8} = 250 - 116 = 134$ ms. Obdobně lze získat pokles času vybavení všech zbývajících ochran.

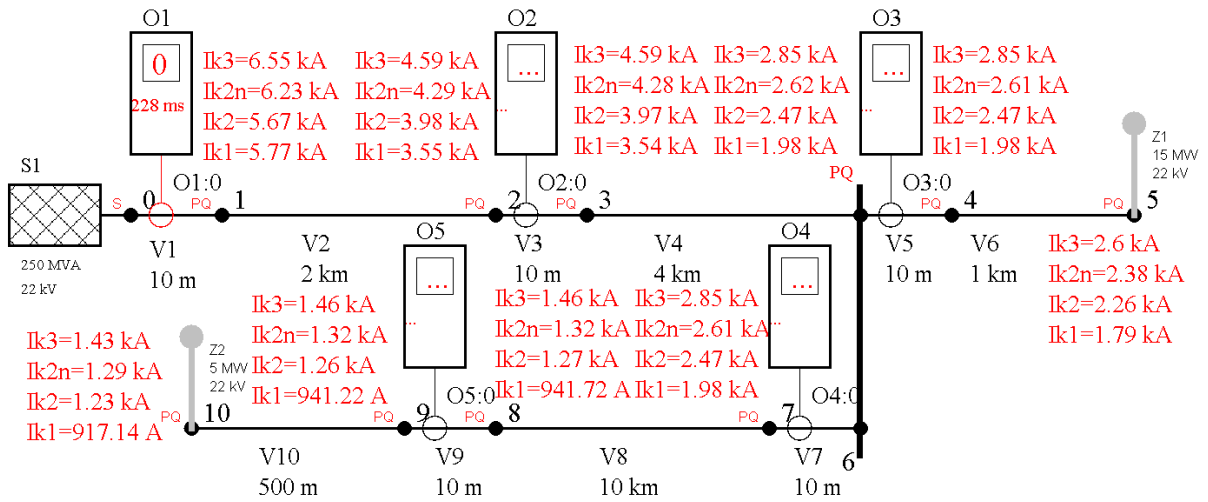
Zaměříme se nyní na nastavení ochrany O_1 . U této ochrany dosáhl její vybavovací čas pro poruchu v uzlu 1 hodnoty 237 ms. Pokud chceme tento čas snížit a zvýšit tedy hodnotu Δt_{V2} , musíme charakteristiku O_1 upravit tak, aby příslušnému rozdílu zkratových proudů ΔI_{kV2} přidělila vyšší rozdíl časů. Jinými slovy, musíme zvýšit strmost charakteristiky. Pro ochranu O_1 tedy zvolíme charakteristiku IEC-extremely inverse. Z Obr. 9 je pak patrné zlepšení vybavovacího času na hodnotu 175 ms. Toto snížení vybavovacího času pro poruchu v uzlu 1 však sebou přináší jisté nevýhody. Jak je z obrázku dále patrné, dohází nyní ke křížení charakteristik ochran O_1 a O_2 . Pro proud vyšší než 12.0574 kA tedy sepne O_1 dříve než O_2 a dojde k nesprávnému odepnutí postiženého úseku. Protože žádné zkratové proudy v našem obvodu takovéto hodnoty nedosahují (selektivita je nastavována pro nejvyšší možné zkratové proudy), je toto křížení přípustné. V případě zvýšení zkratového výkonu nadřazené sítě však musí být nastavení překontrolováno⁶. Další nevýhoda je patrná z Obr. 10, kde jsou uvedeny vybavovací časy ochran pro minimální zkratové proudy při hodnotě koeficientu $k_{min} = 1$. Zatímco pro původní charakteristiku (IEC-very inverse) vybaví ochrana O_1 v čase 510 ms, pro strmější charakteristiku (IEC-extremely inverse) vybaví až v čase 629 ms.

Další možností zvýšení hodnoty Δt_{V2} je zvýšení popudového proudu I_{pcO1} a posunutí charakteristiky do její strmější části. Minimální zkratový proud, na který musí O_1 reagovat, je dle Tab. 3 1.58 kA pro poruchu v uzlu 6. Vzhledem k (4.3) tedy nastavíme popudový proud například na hodnotu $I_{pcO1} = 1.3$ kA. V tomto případě by ochrana O_1 při maximálním zkratovém proudu pro poruchu v uzlu 1 reagovala v čase 228 ms a při minimálním zkratovém proudu pro poruchu v uzlu 2 v čase 534 ms. Porovnání všech variant je shrnuto v Tab. 4. Z tabulky je patrné, že každé zvýšení strmosti charakteristiky v našem zkoumaném intervalu mezi minimálním a maximálním zkratovým proudem sice vždy vede ke snížení vybavovacího času pro proudy maximální, avšak také vždy ke zvýšení pro proudy minimální. Protože každá změna strmosti charakteristiky sebou může přinášet také nechtěné křížení charakteristik, je z tohoto hlediska výhodnější použití pouze jedné strmosti charakteristik pro všechny uvažované ochrany v kombinaci s co možná nejmenším rozdílem popudových proudů na sebe navazujících ochran (při zachování podmínky (4.7)).

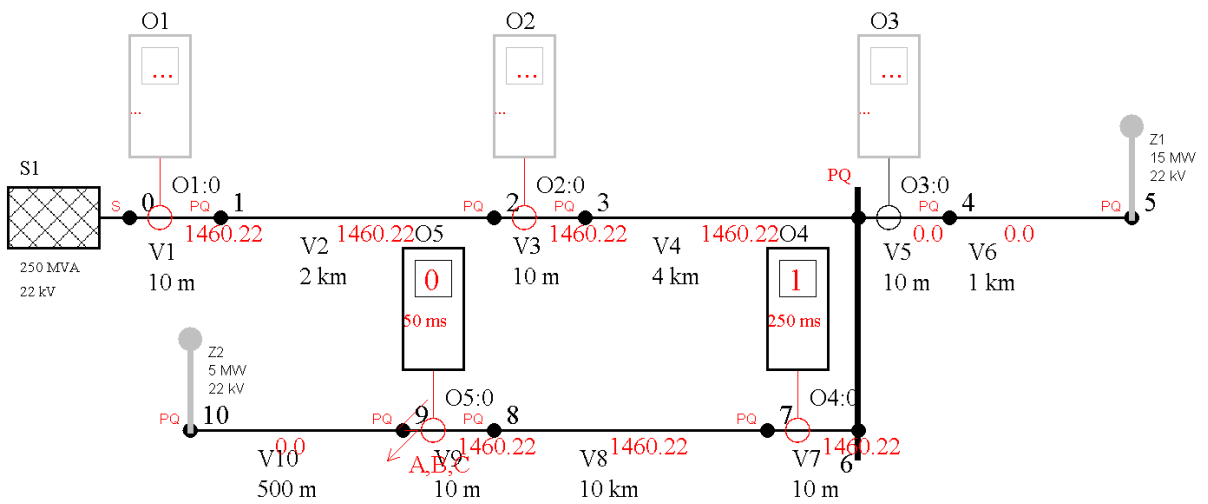
Tab. 4: Vybavovací časy ochrany O_1 pro různé strmosti charakteristik a popudové proudy.

charakteristika IEC	very inverse	extremely inverse	very inverse	extremely inverse
I_{pcO1} [A]	937.932	937.932	1300	1300
vybavovací čas pro zkrat v uzlu 1 a maximální zkratový proud [ms]	237	175	228	171
vybavovací čas pro zkrat v uzlu 2 a minimální zkratový proud [ms]	510	629	534	648

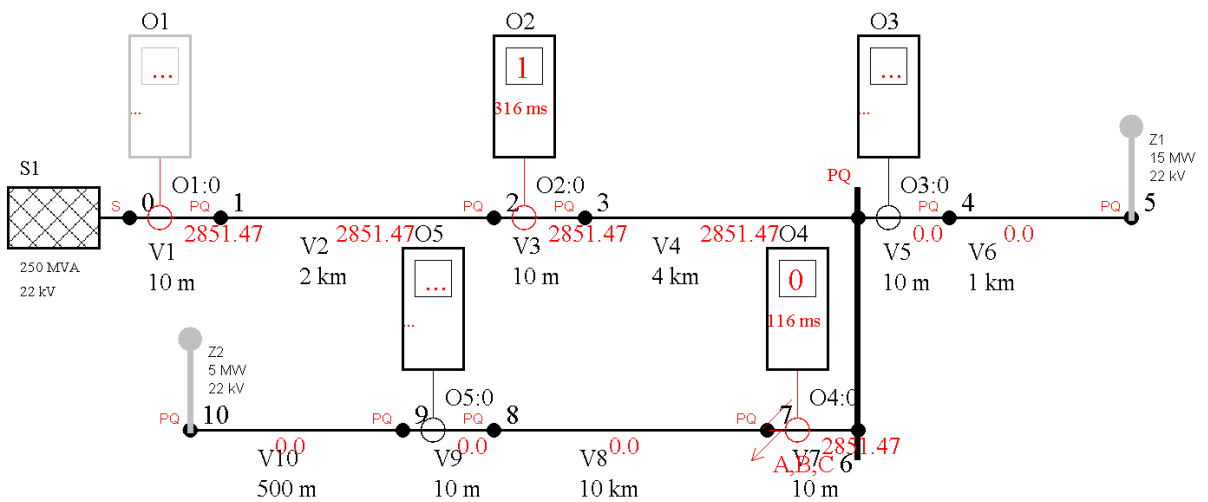
⁶ Již pro poruchové proudy vyšší než 6574 A dohází ke snížení selektivního času ochran O_1 a O_2 .



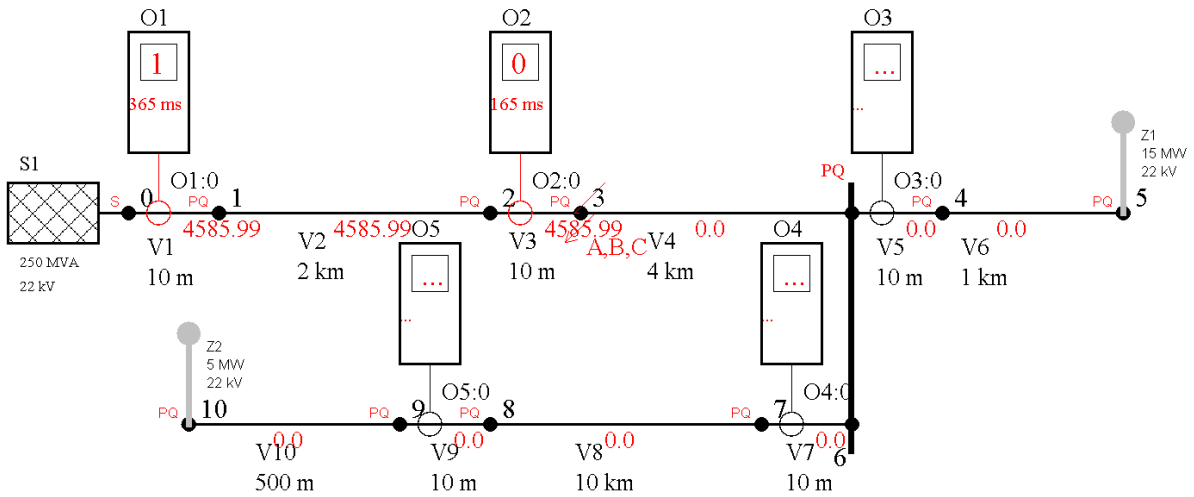
a) Zkratové proudy ve všech uzlech (vektory $\xi_j = \xi_j^{max} = \xi_j^{min}$)



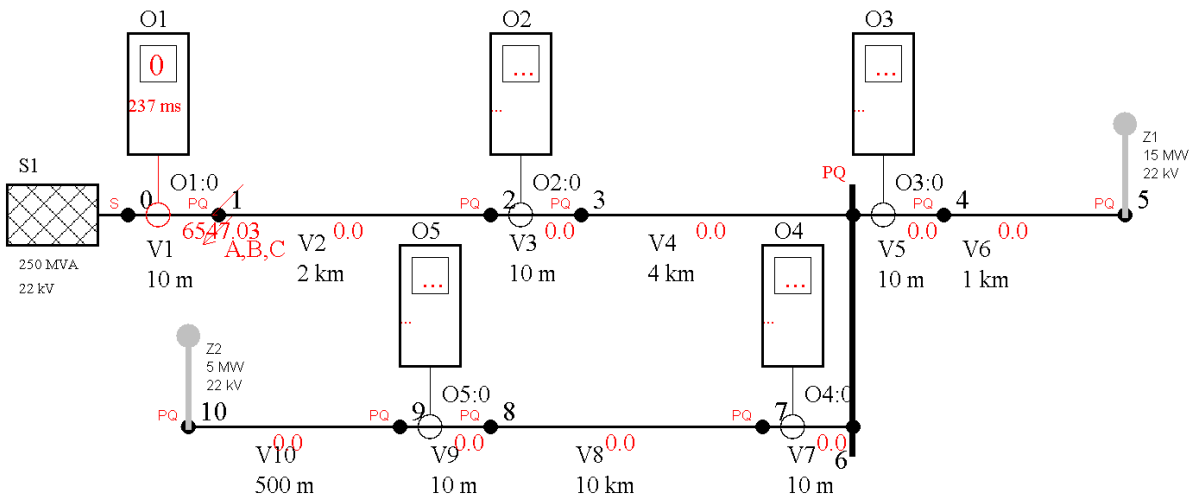
b) Trojfázový zkrat v uzlu 9 (ochrana O5 nastavena na 50 ms a O4 na 250 ms).



c) Trojfázový zkrat v uzlu 7 (ochrana O4 vybaví v čase 116 ms a O2 nastavena na 316 ms).

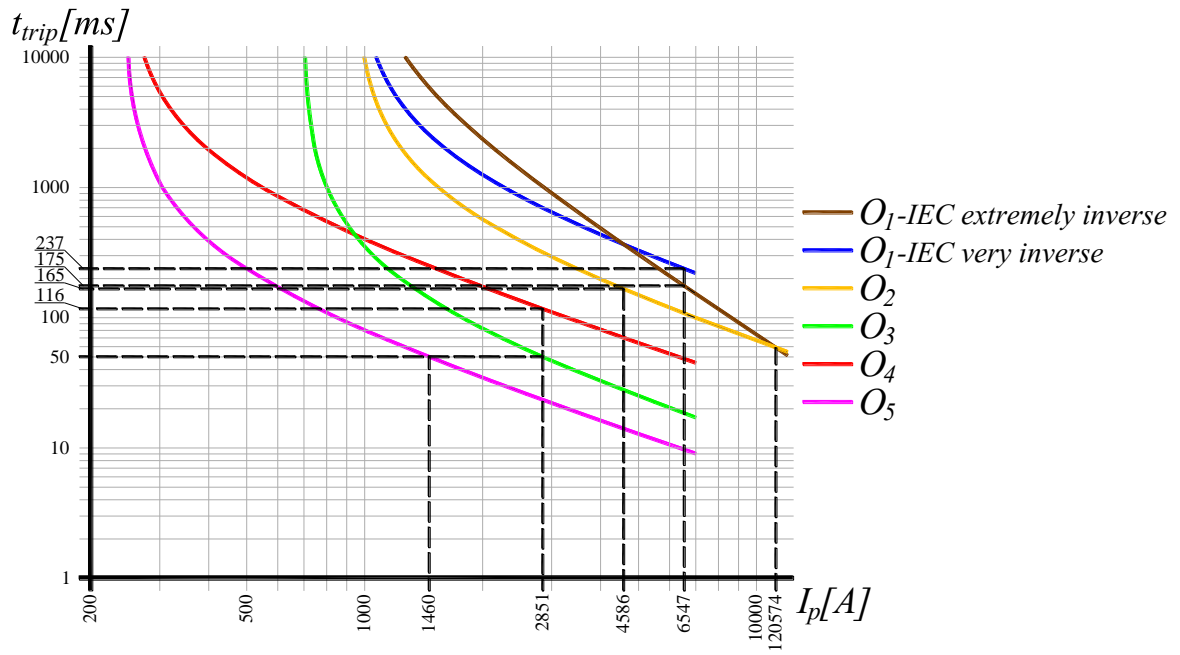


d) Trojfázový zkrat v uzlu 3 (ochrana O_2 vybaví v čase 165 ms a O_2 nastavena na 365 ms).

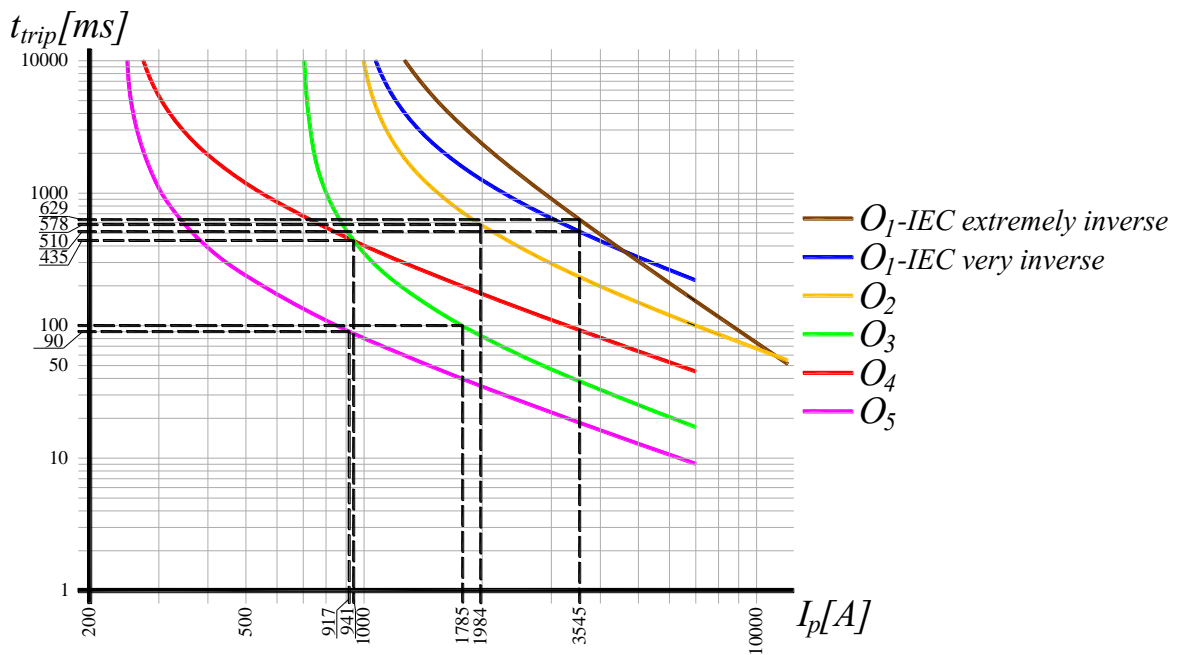


e) Trojfázový zkrat v uzlu 1 (ochrana O_1 vybaví v čase 237 ms).

Obr. 8 Nastavení ukázkové sítě v programu SimPoruchy



Obr. 9: Charakteristiky ochran O_1 , O_2 , O_3 , O_4 a O_5 s vyznačenými časy reakci pro maximální zkratové proudy.



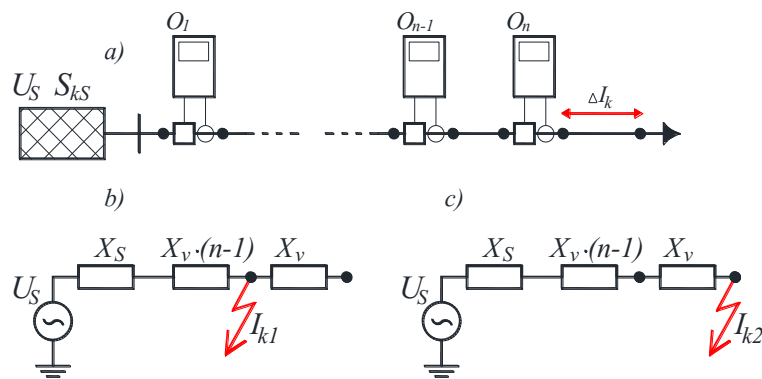
Obr. 10: Charakteristiky ochran O_1 , O_2 , O_3 , O_4 a O_5 s vyznačenými časy reakci pro minimální zkratové proudy.

4.3 Změna rozdílu zkratových proudů na konci a na začátku chráněného úseku

V předchozí subkapitole 4.2 bylo provedeno ukázkové nastavení konvenční distribuční sítě v programu SimPoruchy. Ve výsledném nastavení si bylo možno povšimnout rozdílné hodnoty vybavovacího času pro poruchu v uzlu nejbližše ochraně. Například pro poruchu v uzlu 9 ochrana O_5 vybaví v čase 50 ms, pro poruchu v uzlu 7 vybaví O_4 v čase 116 ms. Toto navyšování vybavovacího času je způsobeno kombinací dvou faktorů:

- Pro ochrany uvažujeme pouze jeden typ charakteristiky (IEC-very inverse), případně z předem definovaných typů charakteristik vybíráme charakteristiky různých strmostí.
- Různá hodnota rozdílů zkratových proudů konců a začátků chráněných sekcí.

Podívejme se nyní blíže na druhý z výše uvedených faktorů. Uvažujme konvenční distribuční síť zobrazenou na Obr. 11 a). Tato síť je složena z $1, 2, \dots, n$ stejně dlouhých úseků, kde je každý reprezentován reaktancí vedení X_v , a ochrany O_1, O_2, \dots, O_n určených pro jejich chránění. Zdroj působící do případného zkratu je pak reprezentován nadřazenou sítí o napětí U_S a zkratovém výkonu S_{kS} .



Obr. 11: Náhradní schéma výpočtu zkratového proudu na začátku a na konci chráněné sekce.

Pro nastavení charakteristiky ochrany je důležitý rozdíl zkratových proudů na začátku a na konci chráněné sekce ΔI_k . V nejjednodušším případě je možno vyjádřit stav při zkratu na začátku a na konci poslední sekce pomocí zjednodušených náhradních obvodů na Obr. 11 b) respektive Obr. 11 c), kde X_v je reaktance jedné sekce a $n-1$ je počet sekcí nalézajících se před poslední sekcí. Reaktanci sítě X_S lze vyjádřit jako:

$$X_S = \frac{U_S^2}{S_{kS}} \quad (4.10)$$

Dle schémat na Obr. 11 b) a c) bude zkratový proud na začátku I_{k1} respektive na konci I_{k2} poslední sekce:

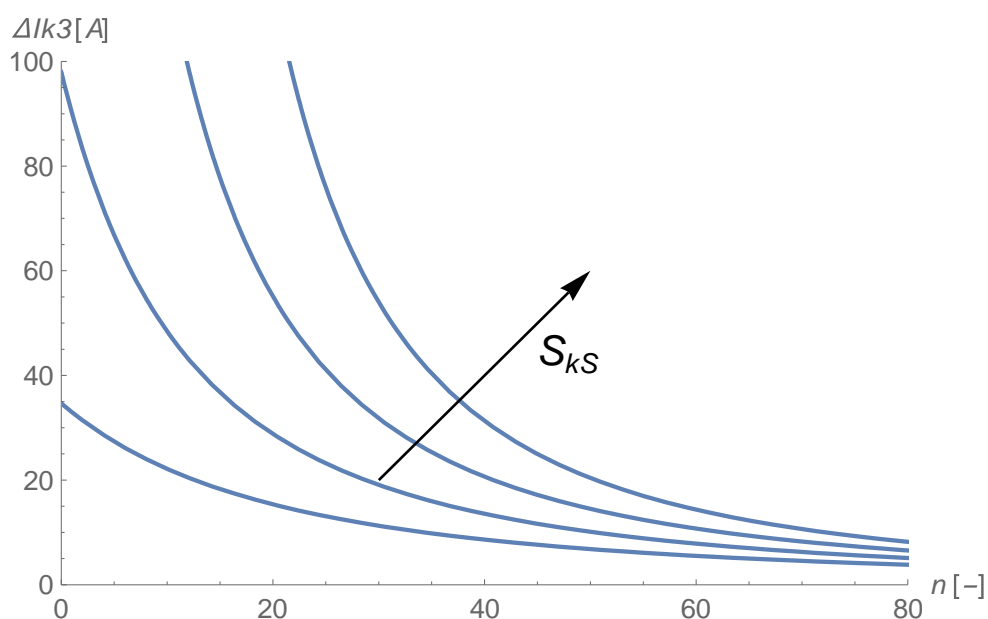
$$I_{k1} = \frac{U_S}{X_S + X_v \cdot (n-1)} \quad (4.11)$$

$$I_{k2} = \frac{U_S}{X_S + X_v \cdot n}$$

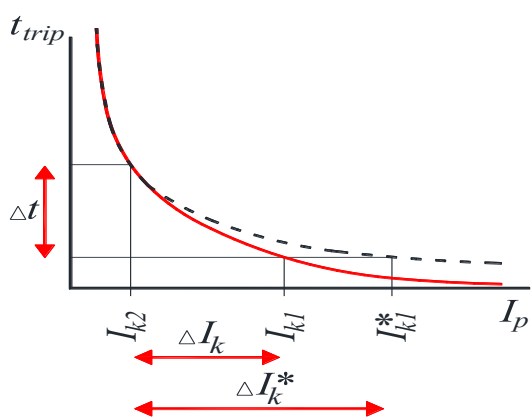
Rozdíl zkratových proudů na začátku a na konci poslední chráněné sekce je pak:

$$\Delta I_k = I_{k1} - I_{k2} \quad (4.12)$$

Vyčíslením (4.12) a dosazením $U_S = 22 \text{ kV}$ a $X_V = 0.4 \ \Omega$ lze pro různé hodnoty zkratového výkonu sítě $S_{kS} = 30, 50, 100$ a 500 MVA získat průběhy na Obr. 12. Z průběhů je patrné, že s větším počtem na sebe navazujících sekcí dochází ke snížení hodnoty ΔI_k . Jak je tento pokles významný pak závisí na zkratovém výkonu sítě a impedanci mezi chráněnou sekcí a sítí $jX_V \cdot (n-1)$. Menší hodnota ΔI_k se projeví v nutnosti použít strmější charakteristiky, jak je zobrazeno na Obr. 13. Každou změnou strmosti charakteristik však riskujeme možné problémy popsané v předchozí subkapitole.



Obr. 12 Závislost rozdílu zkratových proudů na začátku a na konci poslední chráněné sekce na počtu předchozích sekcí (délce vedení před touto sekcí)

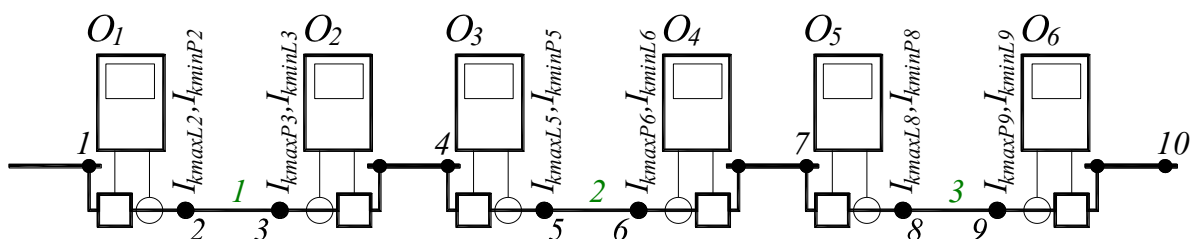


Obr. 13 Změna strmosti charakteristiky při změně rozdílu zkratových proudů na konci a na začátku chráněné sekce z ΔI_k na ΔI_k^* .

5 Nastavení charakteristik nadproudových ochran v síti s decentralizovanou výrobou energie

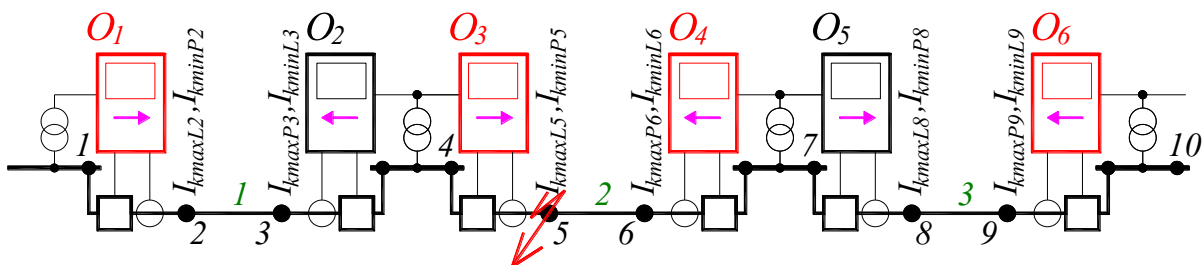
5.1 Nastavení charakteristik ochran oboustranně napájené sítě

Pokusme se nejprve rozebrat nastavení části oboustranně napájené distribuční sítě bez distribuované výroby zobrazené na Obr. 14, přičemž předpokládáme, že za uzly 1 a 10 síť pokračuje a je zde libovolně propojena. Síť nejprve, obdobným způsobem jako u konvenční distribuční sítě, rozdělíme na několik sekcí (čísla sekcí jsou na Obr. 14 označena zeleně). Předpokládejme, že dojde k poruše v uzlu 5. V tomto případě chceme, aby byla postižená sekce 2 odpojena ochranou O_3 a O_4 . V případě jejich selhání by pak mělo se selektivním časem dojít k odpojení ochranami následujícími. Například ochraně O_3 je z levé strany nejbližší ochrana O_2 a při prvním pohledu by se mohlo zdát, že při poruše O_3 by měla selektivně reagovat právě O_2 . Ochrana O_2 však musí primárně chránit sekci 1. Protože zkratové proudy nyní do místa poruchy tečou z obou stran a proudy z levé a pravé strany mohou být značně rozdílné, bylo by v tomto případě obtížné/nemožné správně stanovit hodnotu I_{pcO2} .



Obr. 14 Oboustranně napájená síť.

Z tohoto důvodu jsou ochrany nastaveny tak, aby reagovaly pouze ve směru chráněné sekce. Ochrany O_2 , O_4 a O_6 tedy reagují pouze pro proudy tekoucí z pravé strany a naopak O_1 , O_3 a O_5 pouze pro proudy ze strany levé. Aby mohl být tento požadavek splněn, musí být ochrany schopny rozpoznat směr poruchového proudu a musí být tedy vybaveny napěťovým transformátorem. Výsledné použití směrových nadproudových ochran pro poruchu v uzlu 5 je pak zobrazeno na Obr. 15. Směrnost ochran, tedy směry, ve kterých mohou ochrany reagovat, jsou zde znázorněny fialovou šipkou a ochrany, které v tomto případě mohou reagovat, jsou pak znázorněny červenou barvou. V případě poruchy O_3 nebo O_4 tedy reagují selektivně ochrany O_1 respektive O_6 .



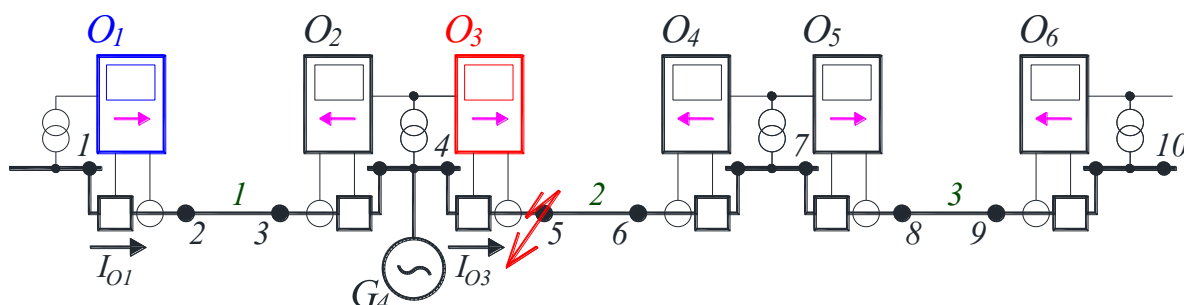
Obr. 15 Oboustranně napájená síť chráněná pomocí směrových nadproudových ochran

Obdobně jako v kapitole 4 je pro nastavení nutno zjistit maximální a minimální možné poruchové proudy procházející skrz každou ochranu. Například minimální poruchový proud pro ochranu O_3 je I_{kminL9} (O_3 by měla být schopna reakce jak v sekci 2, tak v sekci 3 jako záloha

ochrany O_5). Maximální možný proud pro O_3 je pak I_{kmaxL5} , na který musí být nastavena selektivita ochran O_3 a O_1 . V případě, kdy do výše uvedené části sítě není připojen distribuovaný zdroj (či další část sítě), který by vytvořil rozdíl mezi zkratovým příspěvkem tekoucím primární a sekundární ochranou, bude nastavení ochran velice podobné již probranému nastavení klasické radiální distribuční sítě.

5.2 Připojení zdroje do oboustranně napájené sítě

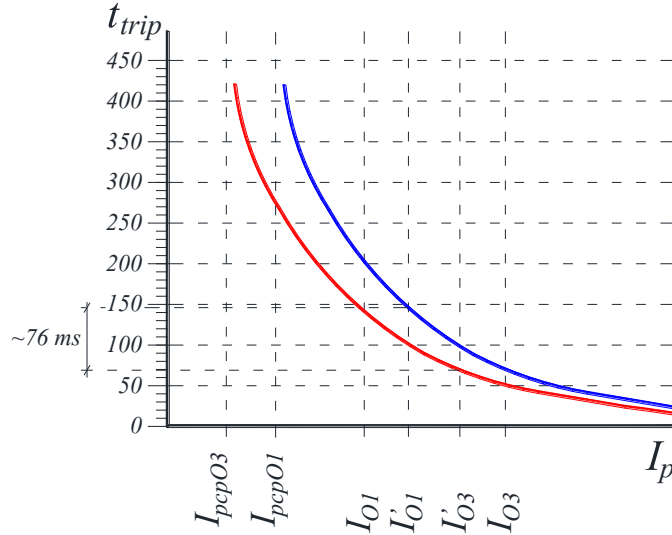
Připojme nyní do uzlu 4 generátor G_4 , tak jak je zobrazeno na Obr. 16 a opět předpokládejme poruchu v uzlu 5. Naším úkolem bude nastavení charakteristik ochran O_3 a O_1 . U předchozí úlohy z Obr. 15 (bez připojeného G_4), protékal při poruše v uzlu 5 oběma ochranami stejný maximální zkratový příspěvek, na který byla posléze nastavena jejich selektivita. Nyní prochází každou ochranou příspěvek jiný. Skrze O_1 prochází zkratový příspěvek zdrojů nacházejících se ve zbývajících (zde nezobrazené) částí sítě na levé straně a skrze O_3 prochází proud navýšený o zkratový příspěvek G_4 ⁷. Na obrázku Obr. 16 jsou pak tyto proudy označeny jako I_{O1} a I_{O3} .



Obr. 16 Připojení generátoru G_4 do oboustranně napájené sítě

Pokusme se obě ochrany nastavit obdobným způsobem jako radiální síť bez distribuované výroby. V uzlu číslo 5 tedy vypočteme všechny uvažované typy zkratů a popudové proudy nastavíme dle (4.7) tak, aby platilo $I_{pcO3} \leq I_{pcO1}$. Protože zkratové příspěvky obou ochran nyní nejsou stejné, vybereme pro naše nastavení ten typ zkratového proudu, pro který je zkratový příspěvek tekoucí primární ochranou nejvyšší. Výsledné nastavení je patrné z Obr. 17, kdy je pro tento typ selektivita mezi ochranami O_3 a O_1 nastavena na 200 ms. Naše nastavení by však tuto hodnotu selektivního času mělo zaručit pro všechny uvažované typy zkratového proudu. V případě, kdy se v sekci 2 objeví jiný typ zkratu o zkratových příspěvcích I'_{O3} a I'_{O1} je však z Obr. 17 patrný pokles selektivního času na hodnotu 76 ms. Pro síť s distribuovanou výrobou energie tedy musíme vždy uvažovat všechny typy zkratů, jenž se mohou v chráněné sekci nalézat. U složitějších sítí je dále téměř znemožněno stanovit hodnoty popudových proudů dle (4.7). Podrobněji bude tento problém diskutován v subkapitole 6.2.

⁷ Tato úvaha není plně korektní, síť je možno dle principu superpozice rozložit na jednotlivé zdroje a zkoumat jejich zkratové příspěvky do uzlu 5 každý zvlášť. Pokud bychom G_4 nahradili proudovým zdrojem a zkoumali příspěvek libovolného zdroje nacházejícího se v části sítě na levé straně (za uzlem 1) musel by být zdroj nahrazující G_4 odpojen a v uzlu 4 by zůstala připojena pouze jeho náhradní impedance. Část poruchového proudu tekoucího do uzlu 5 by se pak v uzlu 4 přes tuto impedanci odklonila a výsledný příspěvek od sítě na levé straně do uzlu 5 protékající ochranou O_3 by byl snížen. Pro jednoduchost je tato skutečnost v textu zanedbána a bude hlouběji probrána v subkapitole 5.3. Výše uvedený program SimPoruchy, vyvinutý pro samotné nastavení ochran, pak tuto skutečnost respektuje.



Obr. 17: Změna selektivního času při použití jiného typu zkratu

5.3 Vliv polohy a velikosti připojovaného zdroje

Jak bylo uvedeno v předchozí subkapitole, připojení zdroje do soustavy sebou vždy přináší změnu proudů, které v případě zkratu ochranami prochází. Pokusme se nyní tuto skutečnost hlouběji prozkoumat, jak bylo zjednodušeně provedeno například v [44] a [45]. Pro zpřesnění obdržných výsledků budeme však na rozdíl od výše uvedených publikací uvažovat pro každou hodnotu výkonu zdroje jiný předporuchový stav (při každé změně výkonu zdroje provedeme výpočet ustáleného stavu). Uvažujme jednoduchý úsek sítě zobrazený na Obr. 18 a) popsaný náhradním schématem na Obr. 18 b). Vedení V_2 uvažujeme naprázdno a v předporuchovém stavu je tedy napětí v uzlu 2 rovno napětí v uzlu 3. V případě, kdy jsou známy hodnoty výkonu P_2 a Q_2 vstřikovaných do uzlu 2 generátorem G_1 a zároveň je známa hodnota napětí sítě $\hat{U}_s = \hat{U}_1$, můžeme napsat:

$$\begin{aligned} P_2 &= \text{Re}\{\hat{S}_2(U_G, \varphi_G)\} \\ Q_2 &= \text{Im}\{\hat{S}_2(U_G, \varphi_G)\} \end{aligned} \quad (5.1)$$

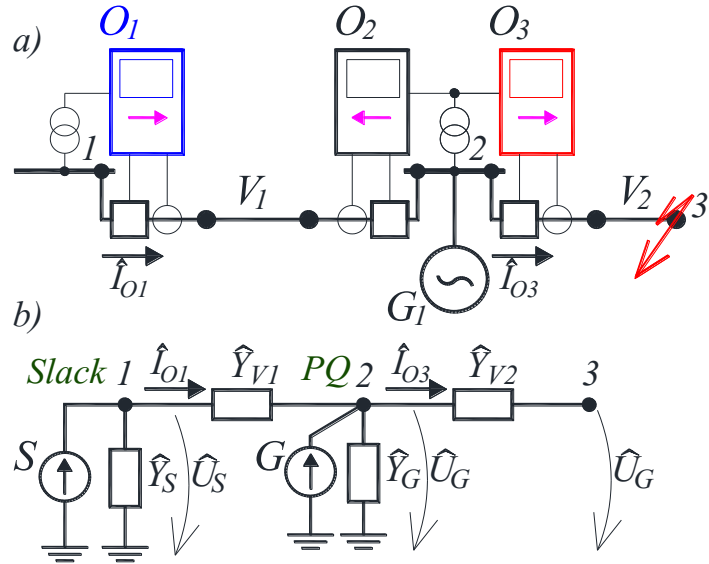
kde lze výkon \hat{S}_2 vyjádřit jako:

$$\hat{S}_2(U_G, \varphi_G) = \frac{U_G \cdot e^{-j\varphi_G} - U_s \cdot e^{-j\varphi_s}}{Z_{V1} \cdot e^{-j\delta_{V1}}} \cdot U_G \cdot e^{j\varphi_G} \quad (5.2)$$

kde φ_G , φ_s a δ_{V1} jsou úhly příslušných napětí \hat{U}_G , \hat{U}_s a impedance vedení V_1 . Pomocí výše uvedených vztahů a některé z běžně používaných metod výpočtu ustáleného stavu sítě je možno získat napětí generátoru \hat{U}_G jako funkci výkonů P_2 a Q_2 .

Pro náhradní schéma z Obr. 18 b) můžeme sestavit admitanční matici sousledné složky jako:

$$[\hat{\mathbf{Y}}_1] = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{Y}}_S + \hat{\mathbf{Y}}_{V1} & -\hat{\mathbf{Y}}_{V1} & 0 \\ -\hat{\mathbf{Y}}_{V1} & \hat{\mathbf{Y}}_G + \hat{\mathbf{Y}}_{V1} + \hat{\mathbf{Y}}_{V2} & -\hat{\mathbf{Y}}_{V2} \\ 0 & -\hat{\mathbf{Y}}_{V2} & \hat{\mathbf{Y}}_{V2} \end{pmatrix} \quad (5.3)$$



Obr. 18 Vliv velikosti generátoru G_1 na směr a velikost proudu ochranou O_1 .

Zjednodušenou metodou simultánních poruch⁸, která bude podrobně popsána v subkapitole 7.2, můžeme dle (7.12) získat vektor napětí při poruše v uzlu 3 jako:

$$\hat{\mathbf{U}}_1 = \hat{\mathbf{U}}_1^{\otimes} + [\hat{\mathbf{Z}}_1] \cdot \hat{\mathbf{I}}_1^{\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\hat{U}_S, \hat{U}_G, \hat{U}_G)^T + [\hat{\mathbf{Z}}_1] \cdot \left(0, 0, -\frac{\hat{U}_G}{\sqrt{3} \cdot \hat{\mathbf{Z}}_{1(3,3)}} \right)^T \quad (5.4)$$

Proudy tekoucí ochranami O_1 a O_3 pak získáme jako:

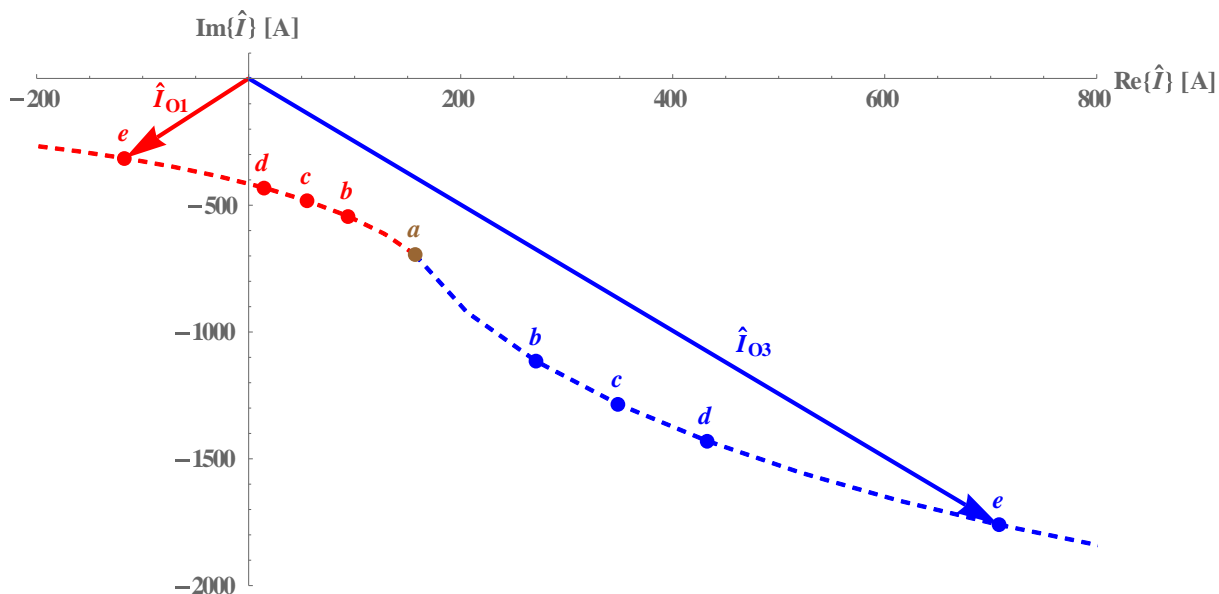
$$\begin{aligned} \hat{I}_{O1} &= (\hat{\mathbf{U}}_{1(1)} - \hat{\mathbf{U}}_{1(2)}) \cdot \hat{\mathbf{Y}}_{V1} \\ \hat{I}_{O3} &= \hat{\mathbf{U}}_{1(2)} \cdot \hat{\mathbf{Y}}_{V2} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Pro následující parametry sítě:

generátor:	vedení V_1 :	vedení V_2 :	síť:
$U_{GN} = 10.5 \text{ kV}$	$R_{V1} = 0.125 \Omega$	$R_{V2} = 0.125 \Omega$	$U_{SN} = 10.5 \text{ kV}$
$x_d'' = 15 \%$	$X_{V1} = 0.407 \Omega$	$X_{V2} = 0.407 \Omega$	$S_{KS}'' = 50 \text{ MVA}$
$\cos \varphi = 0.9$	$l_{V1} = 10 \text{ km}$	$l_{V2} = 5 \text{ km}$	

Výše zmíněným postupem, při předpokladu $\hat{U}_S = U_{SN}$, můžeme získat fázory proudů tekoucích ochranou O_1 a O_3 . Koncové body těchto fázorů jsou pak pro různé hodnoty výkonu připojovaného zdroje vykresleny na Obr. 19. Z průběhů je patrný již zmíněný nárůst proudu

⁸ Uvažujeme pouze trojfázový zkrat s nulovou vloženou poruchovou impedancí.



Obr. 19: Koncové body fázorů proudu \hat{I}_{O1} (červeně) a \hat{I}_{O3} (modře) pro různé výkony připojovaného zdroje ($a - 0 \text{ MW}$, $b - 2 \text{ MW}$, $c - 3 \text{ MW}$, $d - 4 \text{ MW}$, $e - 7 \text{ MW}$). Pro názornost jsou zde vykresleny fázory proudů obou ochran pro výkon zdroje 7 MW .

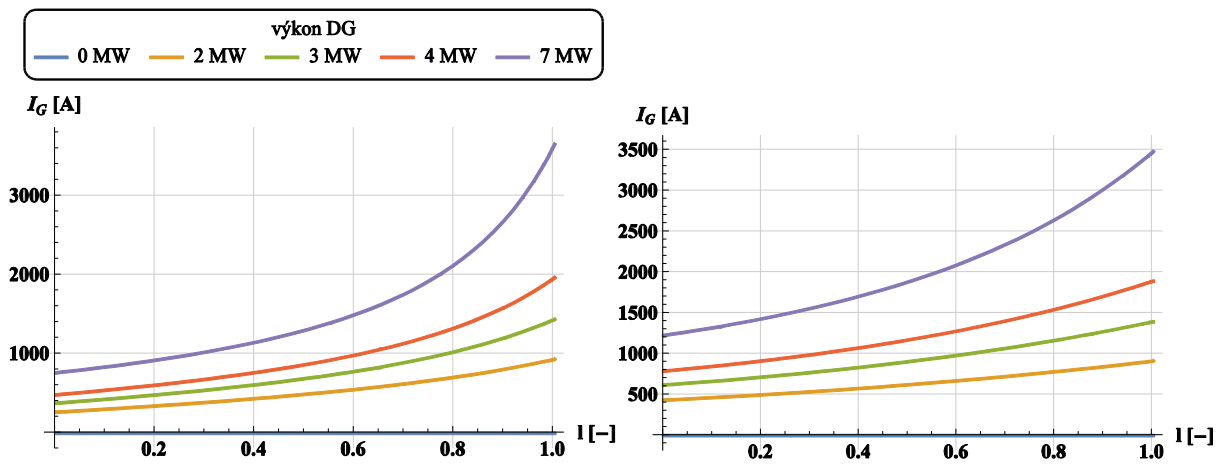
ochranou O_3 a zároveň pokles proudu ochranou O_1 . Pokud provedeme nastavení selektivity ochran O_1 a O_3 bez připojeného zdroje, jak bylo ukázáno v předchozí subkapitole, je nutno překontrolovat hodnotu popudového proudu I_{pcO1} (jeho hodnota musí být vždy nižší, než hodnota minimálního možného poruchového proudu tekoucího skrze O_1). V anglické literatuře je tato skutečnost, ve spojitosti s konvenční distribuční soustavou, označována jako „Blinding of protection“, případně „Fail-to-trip“ [5], [44]–[48]. V případě velké hodnoty výkonu připojovaného zdroje by mohlo dále docházet ke změně směru proudu protékajícího skrze ochranu O_1 . U obou výše zmíněných případů pak není možno O_1 použít jako zálohu O_3 a postižená sekce tedy v případě poruchy O_3 nebude odpojována. Ochrana generátoru G (v obrázku Obr. 18 a) není zakreslena) pak musí být nastavena selektivně za ochrany O_3 a O_2 . V případě poruchy O_3 je následně odpojen generátor G , proud ochranou O_1 se zvýší a může dojít ke správnému selektivnímu odepnutí postižené sekce ochranou O_1 .

Chování jednotlivých zkratových příspěvků pro zkrat v uzlu 3 v závislosti na poloze generátoru G je zobrazen na Obr. 20, Obr. 21 a Obr. 22. Na levé straně jsou vždy zobrazeny průběhy získané pro výše zmíněné parametry vedení V_1 a V_2 . Na pravé straně jsou pak průběhy pro vedení kabelové, kde uvažujeme pouze třetinu výše zmíněné reaktance. Pro délky úseků vedení V_1 a V_2 v tomto případě volíme:

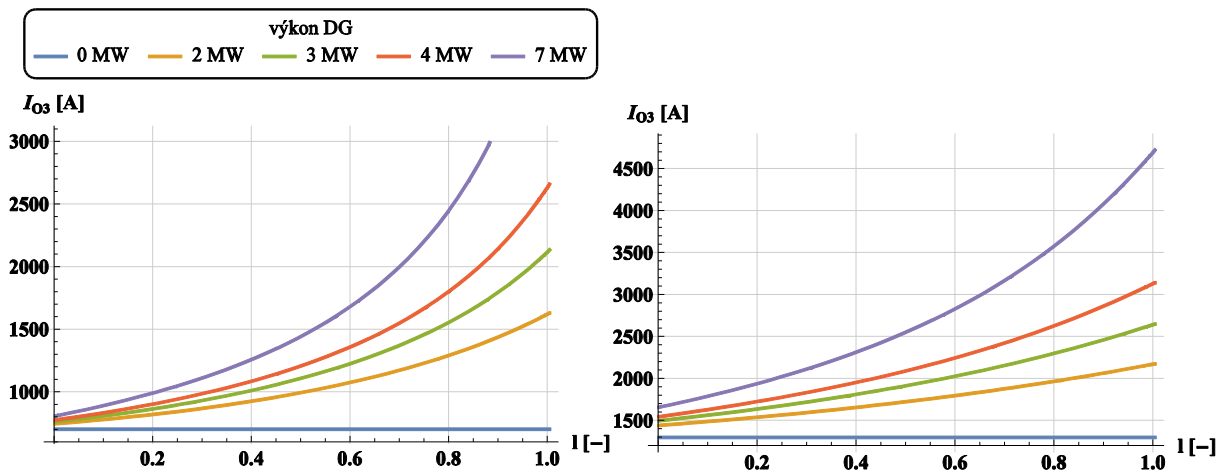
$$\begin{aligned} l_{V1} &= 15 \cdot l \\ l_{V2} &= 15 \cdot (1 - l) \end{aligned} \quad (5.6)$$

kde l je poměrná vzdálenost generátoru G od soustavy S . Pro $l = 1$ je tedy generátor připojen přímo do místa zkratu a naopak pro $l = 0$ je připojen do stejného uzlu jako soustava. Z Obr. 20 a Obr. 21 je patrné výrazné zvýšení zkratového příspěvku generátoru I_G , respektive celkového zkratového proudu tekoucího skrze ochranu O_3 . Rozdílem obou proudů pak získáme průběhy na Obr. 22. Z levého obrázku, kde je závislost vykreslena pro výše zmíněné parametry vedení, je patrné výrazné snížení zkratového příspěvku tekoucího ze sítě (tedy skrze O_1). K nejnižší

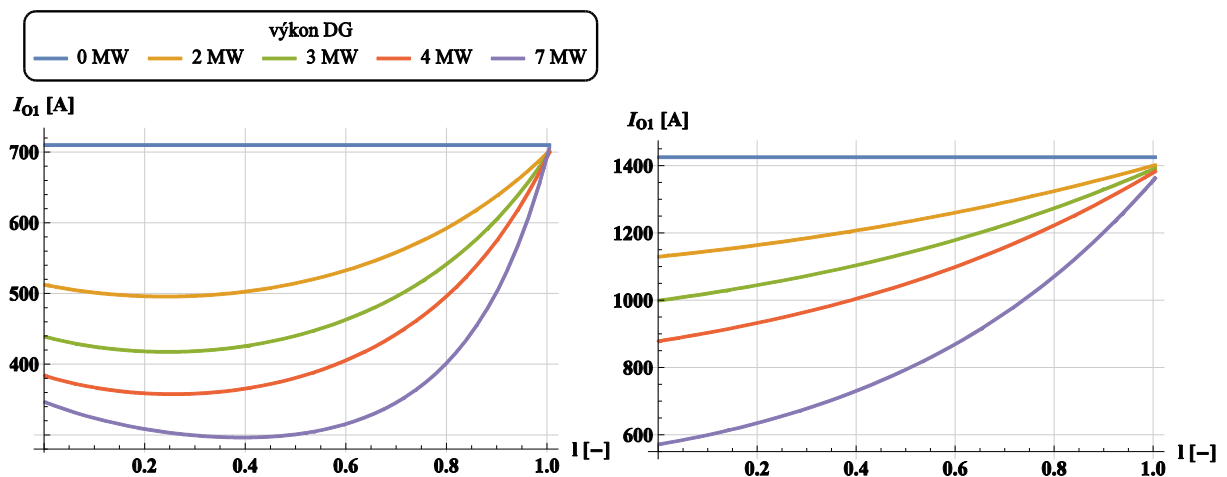
hodnotě tohoto příspěvku pak dochází dle výkonu generátoru a jeho umístění na různých místech podél vedení. V případě kabelového vedení pak k nejnižší hodnotě dochází vždy pro umístění generátoru nejbližší soustavě.



Obr. 20: Zkratový příspěvek generátoru G_1 v závislosti na jeho poloze.



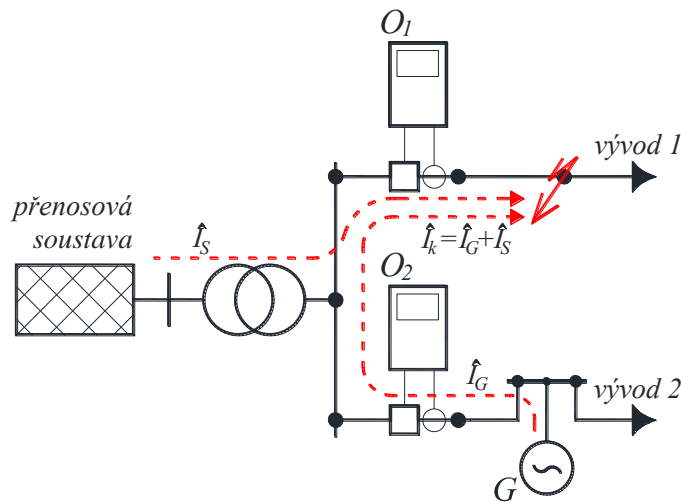
Obr. 21: Zkratový proud tekoucí ochranou O_3 ($\hat{I}_{O3} = \hat{I}_{O1} + \hat{I}_G$) v závislosti na poloze generátoru G_1 .



Obr. 22: Zkratový příspěvek tekoucí ochranou O_1 v závislosti na poloze generátoru G_1 .

5.4 Připojení distribuované výroby do konvenční distribuční sítě a nechtěná reakce ochrany

Předpokládejme konvenční distribuční síť, tak jak byla popsána v kapitole 4, všechny zdroje případného zkratového proudu jsou tedy umístěny v přenosové soustavě a chránění je zprostředkováno pomocí směrových nadproudových ochran. Nastavení těchto ochran provedeme dle subkapitoly 4.1, bez předpokladu výskytu distribuované výroby. V případě, kdy do naší sítě připojíme distribuovaný zdroj dle Obr. 23 a dojde ke zkratu na vývodu 1, začne ochranou O_2 protékat příspěvek zkratového proudu generátoru \hat{I}_G . Výsledný zkratový proud $\hat{I}_k = \hat{I}_{O1}$ protékající skrze ochranu O_1 bude součtem zkratového příspěvku generátoru \hat{I}_G a sítě \hat{I}_S . Protože ochrana O_2 je předpokládána jako nesměrová, může vlivem příliš vysoké hodnoty (vyšší než popudový proud I_{pcO2}) zkratového příspěvku I_G dojít až k její reakci. V tomto případě bude odpojen nepostižený úsek vývodu 2 a dojde tedy ke špatné reakci ochrany. V anglické literatuře je tento jev označován jako „False tripping“, „sympathetic tripping“, případně „Mal-trip“ [5], [44]–[48].



Obr. 23: nechtěná reakce ochrany (false tripping, sympathetic tripping, mal-trip)

V případě připojení distribuovaného zdroje do konvenční distribuční sítě je tedy, vzhledem k jeho výkonu, nutno zvážit použití směrových nadproudových ochran tak, aby reagovaly pouze ve směru svého vývodu, tedy přechod na koncepci chránění oboustranně napájené sítě popsanou v subkapitole 5.1.

6 Optimalizace nastavení ochran

Klíčovou otázkou v nastavení nadproudových směrových ochran je správné určení všech potřebných veličin a koeficientů vyskytujících se v popisu jejich charakteristik. Tyto musí být určeny tak, aby při případné poruše došlo k jejímu co možná nejrychlejšímu odstranění a zároveň byla odpojena pouze nezbytná postižená část sítě. V kapitole 4 byl proveden rozbor a ukázkové nastavení ochran klasické radiální distribuční sítě bez distribuované výroby. Pro účely nastavení těchto sítí bylo při správné volbě popudových proudů možno využít pouze jeden typ zkratového proudu, který vytvořil nejvyšší hodnoty zkratových příspěvků tekoucích skrze ochrany. Návrh nastavení byl tak značně ulehčen a bylo možno ho provést „ručně“. V kapitole 5 byl následně proveden rozbor nastavení oboustranně napájené sítě s decentralizovanou výrobou energie. V tomto případě vyvstala nutnost použít pro nastavení všechny zkratové typy, které se mohou v chráněné sekci vyskytovat (všechny uvažované typy zkratu). Návrh nastavení byl tak zobtížněn a jeho „ruční“ nastavení tak téměř nemožné.

Jako řešení tohoto problému se ukazuje použití vhodně navržené optimalizace, zaručující co možná nejrychlejší odepnutí postižené sekce v kombinaci se splněním všech selektivit pro všechny uvažované typy zkratu. Nutností splnit mezi všemi páry ochran selektivitu, jsou mezi sebou charakteristiky všech ochran vzájemně ovlivňovány a v případě změny nastavení jedné ochrany, musí být prověřeno a případně přenastaveno také nastavení všech ostatních ochran. Možné řešení výše zmíněných problémů spočívá v následující optimalizační úloze:

$$\boldsymbol{\psi}^* = \arg\left(\min_{\boldsymbol{\psi} \in D} \Phi(\boldsymbol{\psi})\right) \quad (6.1)$$

kde $\boldsymbol{\psi}$ je vektor všech hledaných koeficientů ochranných charakteristik všech příslušných ochran⁹, jejichž nastavení chceme optimalizovat, $\Phi(\boldsymbol{\psi})$ je cílová funkce a D je množina přípustných řešení. Cílem naší optimalizační úlohy je najít takový vektor $\boldsymbol{\psi}^*$, pro který je hodnota cílové funkce minimální¹⁰. Přípustná množina D může být definována jako:

$$D = \{\boldsymbol{\psi} \in \mathbb{R}^n : \mathbf{g}(\boldsymbol{\psi}) \geq \mathbf{0}\} \quad (6.2)$$

Kde \mathbf{g} jsou pomocné podmínky typu nerovnosti, které musí jednotlivé koeficienty splňovat¹¹.

6.1 Optimalizace nastavení ochran s inverzní charakteristikou

V případě použití ochran s inverzní charakteristikou dle IEC standardu můžeme pro každou ochranu hledat celkem tři koeficienty. Dle (3.1) se jedná o koeficient strmosti charakteristiky E_{Oi} , časový multiplikátor M_{Oi} a popudový proud I_{pcOi} . Zbývající koeficient K_{Oi} je pouhým násobkem časového multiplikátoru M_{Oi} a dle Tab. 1 je jeho hodnota pevně spjata s hodnotou koeficientu E_{Oi} . Pro účely optimalizace přepíšeme (3.1) do tvaru:

$$t_{tripOi} = t_{tripOi} \left(M_{Oi}, E_{Oi}, I_{pcOi}, I_{pOi} \right) = \frac{MK_{Oi}}{\left(I_{pOi} / I_{pcOi} \right)^{E_{Oi}} - 1} \quad (6.3)$$

⁹ V případě inverzních charakteristik dle IEC standardu se tedy může jednat o popudový proud I_{pcOi} , multiplikátor M_{Oi} , případně o koeficient E_{Oi} .

¹⁰ Případně v lokálním minimu.

¹¹ Například v případě optimalizace popudového proudu I_{pcOi} se jedná o podmínku (4.3).

kde MK_{O_i} je násobek koeficientu M_{O_i} a K_{O_i} . V případě optimalizace všech tří koeficientů pak můžeme vektor ψ napsat jako:

$$\psi = (MK_{O_1}, MK_{O_2}, \dots, MK_{O_i}, \dots, MK_{O_n}, E_{O_1}, E_{O_2}, \dots, E_{O_i}, \dots, E_{O_n}, I_{pcO_1}, I_{pcO_2}, \dots, I_{pcO_i}, \dots, I_{pcO_n}) \quad (6.4)$$

kde n je počet všech ochran, jejichž nastavení optimalizujeme. Mnoho publikací se zabývá optimalizací pouze některých z těchto koeficientů. Například v [16]–[24] jsou pro předem stanovené hodnoty I_{pcO_i} a E_{O_i} určeny hodnoty časových multiplikátorů M_{O_i} (MK_{O_i}). Pro každou ochranu je pak hledán pouze jeden koeficient určující tvar výsledné charakteristiky a optimalizační úloha může být velice rychlá a efektivní. Vzhledem k umístění MK_{O_i} v (6.3), může být cílová funkce lineární a pro nalezení jejího minima je tedy možno použít lineárního programování. Další publikace [25]–[31] jsou zaměřeny na optimalizaci popudových proudů I_{pcO_i} a časových multiplikátorů M_{O_i} pro předem stanovené hodnoty koeficientů E_{O_i} . Tato optimalizace již není lineární a pro každou ochranu musí být nyní stanoveny dva koeficienty.

Zaměříme se nyní na sestavení cílové funkce dle schématu na Obr. 24, kde je vyobrazena část sítě s decentralizovanou výrobou energie. Obdobně jako v kapitole 5 je síť rozdělena na několik sekcí, tedy úseků vedení spojující jednotlivé přípojnice. Do každé z těchto přípojníc je pak možno připojit distribuovaný zdroj, odběr, či další část sítě. Námi vytvořená cílová funkce musí respektovat všechny ochrany sítě, v našem případě se však pro jednoduchost omezíme pouze na část příslušící ochraně O_1 . Předpokládejme nejprve zkrat v uzlu $n_1 = 1$ (uzel n_1 budeme dále označovat jako primární uzel ochrany O_1), ochranou O_1 začne protékat příspěvek zkratového proudu $Ik_{1,1}$ a ochranami O_2 a O_3 příspěvek $Ik_{1,2}$, respektive $Ik_{1,3}$ ¹² (ochranu O_1 označujeme jako primární, značenou i a ochrany O_2 a O_3 jako ochrany sekundární, značeny j). Takto vzniknou dvě tzv. poruchové cesty¹³, tedy páry ochran O_1 - O_2 a O_1 - O_3 . Jak bude ukázáno dále, splnění selektivity mezi primární a sekundární ochranou musí být zaručeno pro všechny uvažované typy zkratů. V uzlu n_1 tedy musíme uvažovat všechny tyto typy a naše zkratové příspěvky $Ik_{1,1}$, $Ik_{1,2}$ a $Ik_{1,3}$ tak budeme zapisovat ve formě vektorů $Ik_{1,1}$, $Ik_{1,2}$ a $Ik_{1,3}$. Tyto vektory tedy budou obsahovat všechny příslušné typy zkratových příspěvků, pro něž musí být zaručena selektivita mezi primární a sekundární ochranou. Jako typ zkratu v tomto případě nemusíme uvažovat pouze základní rozdělení zkratů na jednofázový, dvoufázový a trojfázový, ale také jejich kombinace s různými síťovými konfiguracemi.

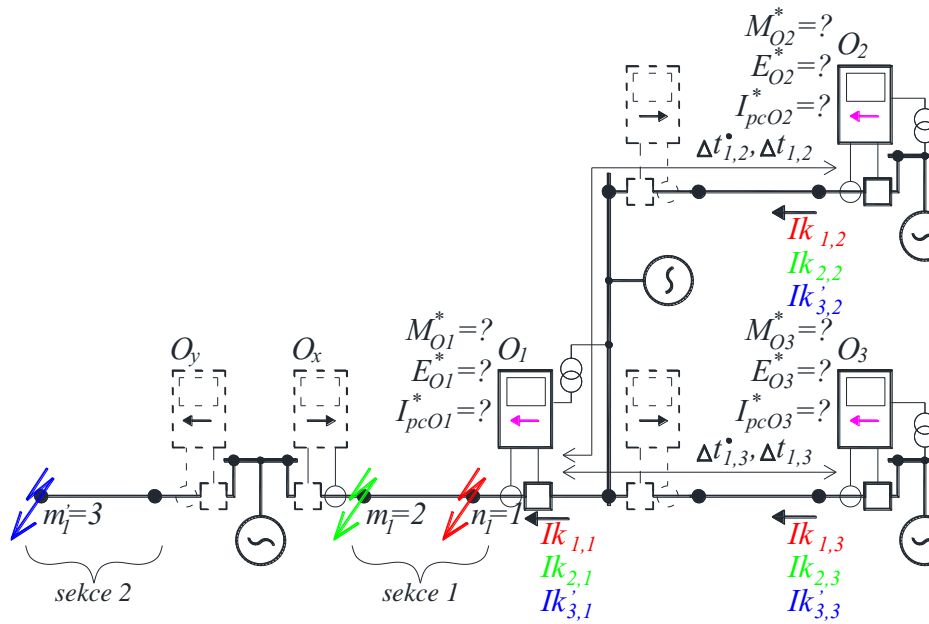
U některých kombinací primární a sekundární ochrany mohou být s výhodou přidány typy, u kterých je odpojen pomocný úsek vedení náležící ochraně O_x . S výjimkou radiálních částí může být u sítě s decentralizovanou výrobou energie odpojení tohoto pomocného úseku klíčové. V případě poruchy v naší chráněné sekci mezi uzly m a n mohou nastat dva případy¹⁴. V závislosti na poloze zkratu v rámci chráněné sekce vždy vybaví nejprve ochrana O_x , nebo ochrana O_1 . Uvažujme nyní, že jako první vybavila ochrana O_x . Protože schéma na Obr. 24 je pouhou částí větší, vzájemně propojené, sítě, dojde po vybavení ochrany O_x k nárůstu zkratových příspěvků tekoucích ochranami O_1 , O_2 a O_3 . Aby došlo ke správnému odpojení postižené sekce, musí být i v tomto případě zaručena selektivita mezi ochranami O_1 - O_2 a O_1 - O_3 . Protože před odpojením pomocného úseku ochrany O_x protékaly ochranami O_1 , O_2 a O_3 zkratové příspěvky vyšší, než jejich popudové proudy, je již jistá část selektivního času mezi

¹² Druhé číslo označuje ochranu, kterou zkratový příspěvek protéká a první číslo pak uzel, v němž k poruše došlo. $Ik_{1,3}$ je tedy příspěvek zkratového proudu protékající ochranou O_3 při poruše v uzlu 1.

¹³ Podrobněji bude pojem poruchové cesty probrán v subkapitole 8.3.

¹⁴ Pokud neuvažujeme selhání některé ochrany.

ochranami O_1-O_2 a O_1-O_3 splněna. Po odpojení pomocného úseku již tedy není nutno požadovat plnou hodnotu původního selektivního času, ale pouze určitou nízkou hodnotu zaručující, že i při takto zvýšeném proudu nebude ochrana sekundární reagovat před ochranou primární¹⁵. Všechny výše zmíněné publikace [16]–[31] uvažují pouze jeden typ zkratových příspěvků¹⁶ vypočtených pro poruchu v primárním (n), respektive sekundárním (m) uzlu a odpojení pomocného úseku ochrany O_x (případně informaci o získání použitých hodnot zkratových příspěvků vůbec neuvádějí). Protože většina těchto publikací se zabývá právě optimalizací ochranného nastavení okružních sítí s decentralizovanou výrobou energie, nemusí za určitých podmínek dojít ke správnému odpojení postižené sekce, či jimi uváděná hodnota minimálního selektivního času nemusí být splněna. Obdobným způsobem, jako příspěvky v primárním uzlu n_1 , vypočteme také příspěvky v sekundárním uzlu m_1 : $I_{k_{2,1}}$, $I_{k_{2,2}}$, $I_{k_{2,3}}$.



Obr. 24: Schéma pro sestavení cílové funkce

Selektivní čas ochrany O_1-O_2 a O_1-O_3 musí být vždy vyšší než minimální požadovaná hodnota selektivního času $\Delta t_{1,2}^*$, respektive $\Delta t_{1,3}^*$. Musí tedy platit:

$$\begin{aligned} \Delta t_{1,2}(k_{1,2}) &\geq \Delta t_{1,2}^*(k_{1,2}), \\ \Delta t_{1,3}(k_{1,3}) &\geq \Delta t_{1,3}^*(k_{1,3}), \quad k_{1,3} = 1, 2, \dots, n_{1,2} \end{aligned} \quad (6.5)$$

Kde $n_{1,2}$ a $n_{1,3}$ jsou počty uvažovaných typů zkratu a $\Delta t_{1,2}$ a $\Delta t_{1,3}$ jsou vektory selektivních časů mezi ochranami O_1-O_2 , respektive O_1-O_3 získané pomocí aktuálních hodnot všech optimalizovaných koeficientů příslušné všem uvažovaným typům zkratových příspěvků. Vztahy (6.5) musí být splněny pro všechny přípustné zkraty v sekci mezi uzly n_1 a m_1 . Pro další úvahy budeme předpokládat, že je-li selektivita mezi primární a sekundární ochranou splněna v primárním n_1 i sekundárním m_1 uzlu, je splněna i v celé chráněné sekci¹⁷. Vektory selektivních časů $\Delta t_{1,2}$ a $\Delta t_{1,3}$ můžeme pro poruchu v primárním uzlu $n_1 = 1$ získat jako:

¹⁵ Jinými slovy, případné křížení charakteristik musí být povoleno až za tímto proudem.

¹⁶ Případně dva (minimální a maximální).

¹⁷ Ověření tohoto předpokladu bude provedeno v subkapitole 9.4.

$$\begin{aligned}\Delta t_{prim_{1,2}} &= t_{1,2} - t_{1,1} \\ \Delta t_{prim_{1,3}} &= t_{1,3} - t_{1,1}\end{aligned}\quad (6.6)$$

Nebo pro poruchu v sekundárním uzlu $m_l = 2$ jako:

$$\begin{aligned}\Delta t_{sek_{1,2}} &= t_{2,2} - t_{2,1} \\ \Delta t_{sek_{1,3}} &= t_{2,3} - t_{2,1}\end{aligned}\quad (6.7)$$

kde například $t_{2,2}$ a $t_{1,2}$ jsou vektory vybavovacích časů ochrany O_2 při poruše v uzlu 2, respektive 1 pro vektory zkratových příspěvků $Ik_{2,2}$, respektive $Ik_{1,2}$.

Z výše uvedených úvah sestavíme část cílové funkce náležící ohraně O_1 :

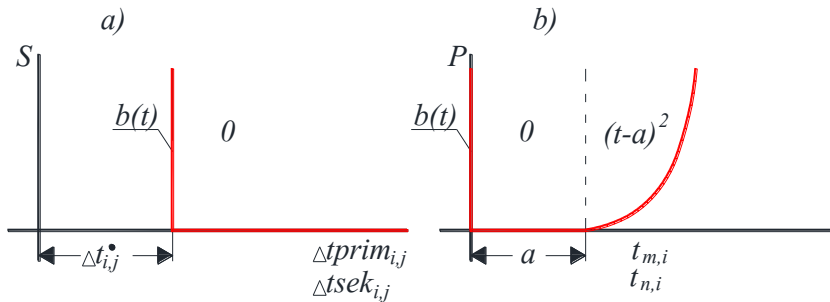
$$\begin{aligned}\Phi(\psi) &= \sum_{k_{1,2}=1}^{n_{1,2}} S(\Delta t_{prim_{1,2}}(k_{1,2}) - \Delta t_{1,2}^*(k_{1,2})) + \sum_{k_{1,2}=1}^{n_{1,2}} S(\Delta t_{sek_{1,2}}(k_{1,2}) - \Delta t_{1,2}^*(k_{1,2})) + \\ &\sum_{k_{1,3}=1}^{n_{1,3}} S(\Delta t_{prim_{1,3}}(k_{1,3}) - \Delta t_{1,3}^*(k_{1,2})) + \sum_{k_{1,3}=1}^{n_{1,3}} S(\Delta t_{sek_{1,3}}(k_{1,3}) - \Delta t_{1,3}^*(k_{1,2})) + \\ &\sum_{t \in t_{2,1}} P(t) + \sum_{t \in t_{1,1}} P(t)\end{aligned}\quad (6.8)$$

kde S je pomocná penalizační funkce zaručující splnění podmínek (6.5) a P je pomocná funkce zaručující nízkou hodnotu vybavovacího času pro poruchu v chráněné sekci. Funkce S a P pro tento účel definujeme jako:

$$S(t) = \begin{cases} b(t) & , t < 0 \\ 0 & , t \geq 0 \end{cases}\quad (6.9)$$

$$P(t) = \begin{cases} b(t) & , t < 0 \\ 0 & , 0 \leq t < a \\ (t-a)^2 & , t \geq a \end{cases}\quad (6.10)$$

kde $b(t)$ je bariérová funkce. Obě penalizační funkce jsou pak zobrazeny na Obr. 25. Zatímco funkce S je pouhým omezením zaručujícím minimální požadovanou hodnotu selektivního času $\Delta t_{1,2}^*$, funkce P pro vybavovací čas zaručuje zároveň přídavnou penalizaci $(t-a)^2$ pro jeho příliš vysoké hodnoty.



Obr. 25: Pomocné penalizační funkce: a) funkce S zaručující minimální povolenou hodnotu selektivního času $\Delta t_{i,i}$, b) funkce P zaručující nízkou hodnotu vybavovacího času pro poruchy v chráněné sekci.

Dle předchozích úvah nyní můžeme sestavit obecný zápis cílové funkce:

$$\begin{aligned} \Phi(\boldsymbol{\psi}) = & \sum_{i \in \mathbf{I}} \sum_{j \in \mathbf{J}_i} \sum_{k_{i,j}=1}^{n_{i,j}} S(\Delta t_{prim_{i,j}}(k_{i,j}) - \Delta t_{i,j}^{\bullet}(k_{i,j})) + \sum_{i \in \mathbf{I}} \sum_{j \in \mathbf{J}_i} \sum_{k_{i,j}=1}^{n_{i,j}} S(\Delta t_{sek_{i,j}}(k_{i,j}) - \Delta t_{i,j}^{\bullet}(k_{i,j})) \\ & + \sum_{i \in \mathbf{I}} \sum_{k \in \mathbf{K}_i} P(t_{m_i,i}(k)) + P(t_{n_i,i}(k)) \end{aligned} \quad (6.11)$$

kde \mathbf{J}_i je vektor všech sekundárních ochran, které musí být s i -tou ochranou selektivní, \mathbf{I} je vektor všech ochran primárních a \mathbf{K}_i je vektor všech typů příslušných i -té ochraně. Hodnoty vektoru \mathbf{J}_i jsou závislé nejenom na aktuální konfiguraci sítě, ale také na aktuálně zvolených hodnotách popudových proudů. Pro jeden pár ochran¹⁸ můžeme v obecném zápisu napsat také podmínky selektivit (6.5), (6.6) a (6.7) jako:

$$\begin{aligned} \Delta t_{prim_{i,j}}(k_{i,j}) = t_{n_i,j}(k_{i,j}) - t_{n_i,i}(k_{i,j}) & \geq \Delta t_{i,j}^{\bullet}(k_{i,j}), \\ \Delta t_{sek_{i,j}}(k_{i,j}) = t_{m_i,j}(k_{i,j}) - t_{m_i,i}(k_{i,j}) & \geq \Delta t_{i,j}^{\bullet}(k_{i,j}), \quad k_{i,j} = 1, 2, \dots, n_{i,j} \end{aligned} \quad (6.12)$$

Pro část cílové funkce (6.8) ochrany O_1 můžeme napsat:

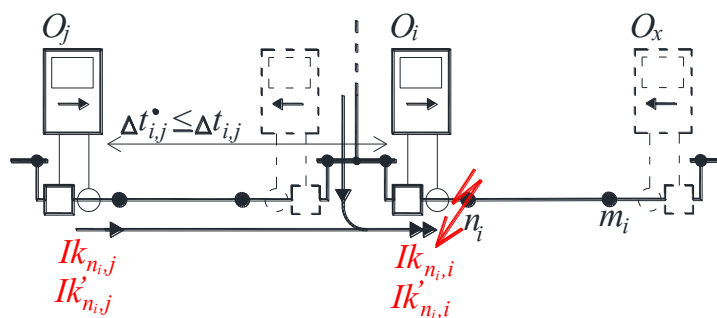
$$\begin{aligned} \mathbf{I} = (1) \quad \mathbf{J}_1 = (2, 3)^T \\ n_1 = 1 \quad m_1 = 2 \end{aligned} \quad (6.13)$$

6.2 Určení typů zkratových příspěvku

Jedním z velice důležitých kroků, nutným pro korektní optimalizaci koeficientů charakteristik, je určení typů zkratů použitých pro získání zkratových příspěvků tekoucích skrze primární a sekundární ochranu. Všechny publikace uvedené v subkapitole 6.1 [16]–[31] při návrhu nastavení uvažují pouze typy zkratů produkující maximální a minimální zkratové proudy. Jak bude ukázáno, uvažování pouze těchto typů může vést u sítí s decentralizovanou výrobou energie k nesplnění podmínky minimálního selektivního času u typů ostatních. Pro různé typy zkratů se příspěvky tekoucí primární a sekundární ochranou mohou lišit jednak velikostí, ale také jejich poměrem. Jak je patrné na Obr. 26, v obecném případě může být do přípojnice náležící primární ochraně připojen další úsek sítě¹⁹. V případě poruchy v uzlu n_i , či m_i pak mohou být zkratové příspěvky tekoucí primární (i) a sekundární (j) ochranou různé. Primární ochrana (společně s ochranou O_x na druhé straně) má vždy za cíl chránit úsek sítě mezi uzly n_i a m_i . Pro tento účel musí být vždy splněna selektivita primární a sekundární ochrany pro všechny uvažované typy zkratů v obou uzlech (a pro všechny případné poruchy mezi nimi). Ukazuje se, že je pro dané popudové proudy možno v každém uzlu nalézt takový typ zkratového proudu, pro který bude nastavení „nejcitlivější“. Neboli typ, pro nějž bude-li splněna selektivita mezi primární a sekundární ochranou, bude tato dodržena i pro všechny ostatní uvažované typy.

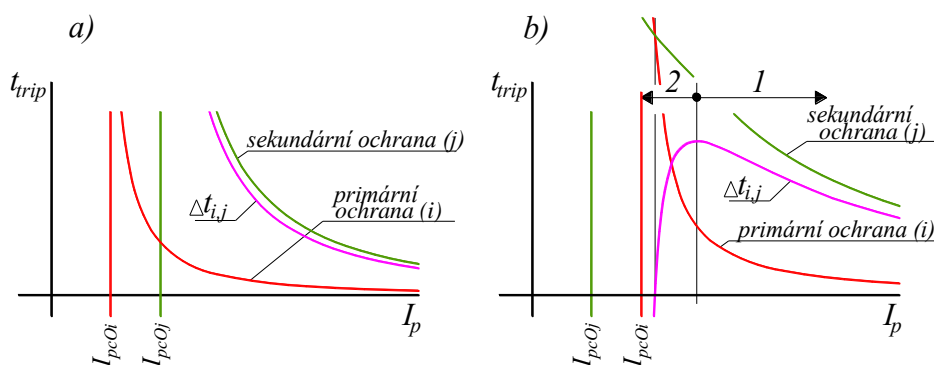
¹⁸ Primární i a sekundární j ochrany.

¹⁹ Případně zdroj/spotřebič



Obr. 26 Určení typů nejcitlivějších zkratových příspěvků jedné poruchové cesty.

Podívejme se nejprve na nejjednodušší případ, kdy do uzlu náležícího primární ochraně není připojen další úsek sítě a oba příspěvky jsou tedy stejné. Na Obr. 27 jsou zobrazeny závislosti selektivního času mezi primární a sekundární ochranou pro různé hodnoty zkratového příspěvku $I_p = I_{pOi} = I_{pOj}$ tekoucího skrze obě ochrany. Jak je patrné na Obr. 27 a), pro $I_{pcOi} \leq I_{pcOj}$, dochází se snižujícím se proudem I_p vždy k nárůstu selektivního času²⁰. Na Obr. 27 b), pro $I_{pcOi} > I_{pcOj}$, můžeme naši závislost rozdělit na dvě části, v první části 1 dochází se snižujícím proudem I_p , obdobně jako v předchozím případě, k nárůstu selektivního času. Pro druhou část 2 však dochází naopak ke snížení selektivního času a pod určitou hodnotou I_p pak sekundární ochrana reaguje dříve než primární. V případě, kdy je zkratový příspěvek tekoucí primární i sekundární ochranou stejný a zároveň platí $I_{pcOi} \leq I_{pcOj}$ je tedy nastavení nejcitlivější pro takový typ zkratového proudu, který vyvolá nejvyšší hodnotu zkratového příspěvku (pro jakýkoliv nižší zkratový příspěvek je selektivní čas $\Delta t_{i,j}$ vždy vyšší). V případě, kdy $I_{pcOi} > I_{pcOj}$, závisí citlivost nastavení na velikosti zkratového příspěvku I_p a tvarech obou charakteristik. Protože před samotnou optimalizací nejsou tyto tvary známy (jejich získání je cílem optimalizace), není při znalosti popudových proudů obou ochrany a velikosti zkratového příspěvku obecně možno nejcitlivější typ zkratu určit. Při nastavení tedy musí být uvažovány dva typy zkratů, jak pro maximální, tak minimální zkratové příspěvky. Pokud je selektivita pro oba tyto typy zaručena, je následně zaručena i pro všechny ostatní typy.

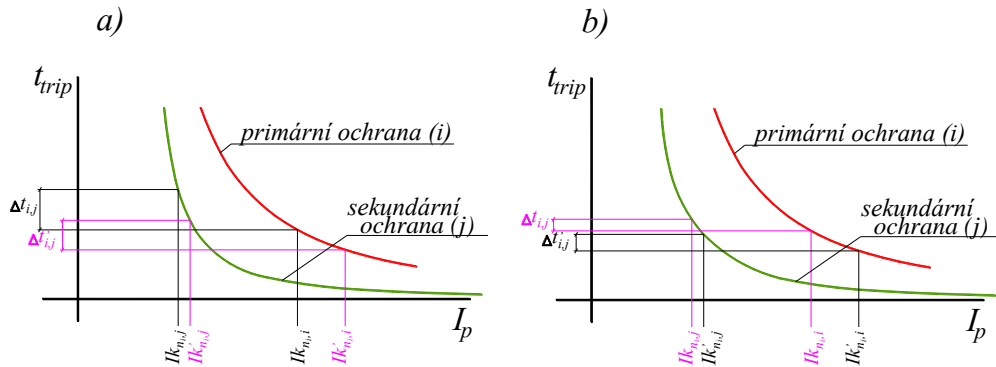


Obr. 27: Závislost selektivního času $\Delta t_{i,j}$ mezi primární (i) a sekundární (j) ochranou pro různé popudové proudy: a) $I_{pcOi} \leq I_{pcOj}$, b) $I_{pcOi} > I_{pcOj}$.

Dále se podívejme na případ, kdy je do přípojnice náležící primární ochraně připojen další úsek sítě a zkratový příspěvek tekoucí primární ochranou $I_{k_{n,i}}$ je tedy od příspěvku tekoucího sekundární ochranou $I_{k_{n,j}}$ různý. Za předpokladu, že příspěvek připojené části sítě zvyšuje

²⁰ Za předpokladu, že se charakteristiky nekříží.

zkratový příspěvek tekoucí primární ochranou (jak je popsáno v kapitole 5.3, zároveň také snižuje příspěvek tekoucí ochranou sekundární), bude platit $I_{k_{n_i,i}} > I_{k_{n_i,j}}$. Na Obr. 28 jsou uvedeny dvě vybrané varianty rozložení zkratových příspěvků primární a sekundární ochranou $I_{k_{n_i,i}}, I_{k_{n_i,j}}$ a $I_{k'_{n_i,i}}, I_{k'_{n_i,j}}$. Pro volbu charakteristik z Obr. 28 a) je patrna vyšší citlivost zkratových příspěvků $I_{k'_{n_i,i}}, I_{k'_{n_i,j}}$. Při mírné změně hodnoty časového multiplikátoru sekundární ochrany, je z Obr. 28 b) patrna změna citlivosti a vyšší citlivosti je následně dosaženo naopak u příspěvků $I_{k_{n_i,i}}, I_{k_{n_i,j}}$. Stejně jako pro případ z Obr. 27 b) tedy není při znalosti popudových proudů obou ochran a příslušných zkratových příspěvků obecně možno určit nejcitlivější typ zkratu.

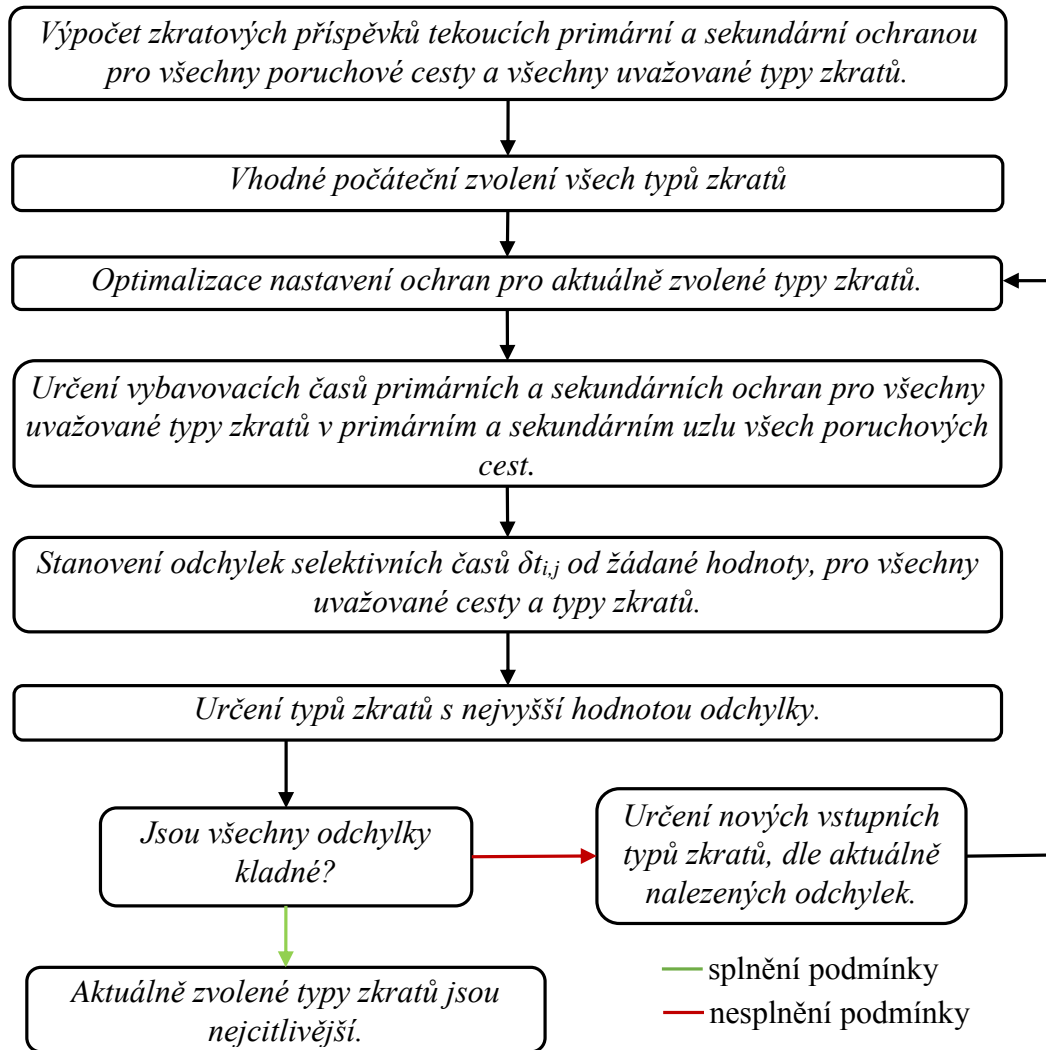


Obr. 28 Citlivost charakteristik na různé hodnoty zkratových příspěvků tekoucích primární (i) a sekundární (j) ochranou.

Jak bylo zmíněno v úvodu této subkapitoly, přes všechna fakta, uvedená v předchozích odstavcích, se ukazuje, že v každém uzlu existuje typ zkratového proudu, pro nějž je dané nastavení selektivity primární a sekundární ochrany nejcitlivější. Možný způsob, jak tento typ získat, je uveden na Obr. 29. Před samotným procesem nalezení nejcitlivějších typů zkratových proudů je pro všechny poruchové cesty třeba předpočítat zkratové příspěvky tekoucí primární a sekundární ochranou při poruše v primárním a sekundárním uzlu a zvolit vhodné počáteční odhady nejcitlivějších typů. Jako vhodné počáteční odhady je pro primární n_i a sekundární m_i uzel možno s výhodou volit trojfázový, respektive jednofázový zkrat. Po optimalizaci nastavení pro takto zvolené odhady docílíme splnění selektivit pro výše uvedený trojfázový a jednofázový zkrat v primárním, respektive sekundárním uzlu, avšak pro ostatní typy zkratů být splněna nemusí. Pro všechny uvažované typy zkratů tedy zjistíme odchylky selektivit od její minimální požadované hodnoty $\Delta t_{i,j}^*$ jako:

$$\delta t_{i,j} = \Delta t_{i,j} - \Delta t_{i,j}^* \quad (6.14)$$

V případě, kdy jsou všechny odchylky $\delta t_{i,j}$ všech poruchových cest kladné, jsou všechny selektivity splněny a aktuální typy zkratových proudů jsou typy nejcitlivějšími. V případě, kdy je pro některou poruchovou cestu a v některém z jí příslušných uzlů některá z odchylek záporná, vyměníme aktuální typ zkratu v tomto uzlu za ten, který má nejnižší hodnotu $\delta t_{i,j}$. S takto zvolenými typy zkratů následně opakujeme proces optimalizace. Celý proces je následně opakován, dokud není dosaženo kladné hodnoty odchylky $\delta t_{i,j}$. Koeficienty charakteristik získané poslední optimalizací následně zaručují dodržení minimální požadované hodnoty selektivního času pro všechny uvažované typy zkratových proudů.



Obr. 29 Blokový diagram procesu zjištění nejcitlivějších typů zkratových proudů.

Poznámka 1:

Obdobného výsledku, tedy získání koeficientů všech charakteristik zaručující selektivitu pro všechny uvažované typy zkratových proudů, by bylo možno dosáhnout pouze jednou optimalizací zahrnující podmínky selektivit pro všechny tyto typy. V této optimalizaci by však musely být uvažovány všechny podmínky selektivit pro všechny uvažované typy zkratových proudů. Celkový počet těchto podmínek je možno určit jako:

$$\text{počet_podmínek} = \text{uvažované_typy} \cdot (\text{akt_cesty_sek} + \text{akt_cesty_prim}) \quad (6.15)$$

Kde *uvažované_typy* představují počet všech uvažovaných typů zkratu a *akt_cesty_prim* a *akt_cesty_sek* představují počet všech aktivních cest pro poruchu v primárním, respektive sekundárním uzlu. Například pro IEEE 6-bus power system (schéma uvedeno v příloze) to při uvažování aktivity všech cest a 5 typů zkratů znamená celkem $5 \cdot (25+25) = 250$ podmínek. Při uvažování výše zmíněného principu nalezení nejcitlivějších typů je optimalizace složena z několika suboptimalizací každá s $1 \cdot (25+25) = 50$ podmínkami. Počet těchto suboptimalizací je maximálně roven počtu uvažovaných typů zkratu, přičemž se ukazuje, že pro většinu sítí je

dostatečný počet 2–3. Pro větší sítě o větším počtu poruchových cest, či zkratových typů a z nich vyplývajících podmínek pak může být výsledná optimalizace značně urychlena.

Poznámka 2:

Jak již bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, princip nalezení nejcitlivějších typů zkratu lze aplikovat pouze v případě, kdy jsou předem určeny hodnoty popudových proudů všech ochran. Pro optimalizace, mající za cíl určení také popudových proudů ochran je tak tento postup nepoužitelný a musí být uvažovány všechny podmínky selektivit pro všechny uvažované typy zkratu.

6.3 Popudové proudy

Další důležitou částí optimalizace je stanovení popudových proudů všech ochran. Jak bylo zmíněno v subkapitole 4.1, popudové proudy se mohou dle požadavků kladených na výsledné nastavení pohybovat pouze v předem stanovených mezích (4.3). V případě, kdy **neuvažujeme poruchy primárních ochran** a uvažujeme pouze nutnou podmínku minimální požadované hodnoty selektivního času $\Delta t_{i,j}^*$, musí se náš popudový proud pohybovat v následujících mezích:

$$k_{bn} \cdot I_{nOi} < I_{pcOi} < k_{bk} \cdot \text{Min}\{\mathbf{Ik}_{m_i,i}\} \quad (6.16)$$

kde I_{nOi} je jmenovitý proud tekoucí ochranou v předporuchovém stavu a k_{bn} a k_{bk} jsou bezpečnostní koeficienty. Ilustrujme si tento případ na naší ochraně O_1 z Obr. 24. V tomto případě předpokládáme, že při splnění (6.16) a zkratu v sekci 1 dojde vždy k jejímu správnému odpojení. V případě, kdy **uvažujeme možnou poruchu primárních ochran**, nemusí vzhledem k (6.16) dojít ke správnému selektivnímu odepnutí postižené sekce. Předpokládejme nyní zkrat v sekci 2, nejmenší zkratový příspěvek, který v tomto případě může procházet ochranou O_1 je $\text{Min}\{\mathbf{Ik}'_{m_i,i}\}$. Jelikož lze předpokládat $\text{Min}\{\mathbf{Ik}'_{m_i,i}\} < \text{Min}\{\mathbf{Ik}_{m_i,i}\}$, nemusí při špatné volbě popudového proudu I_{pcOi} a selhání ochrany O_y dojít k selektivnímu odpojení pomocí O_1 . Pokud chceme zajistit nejenom splnění podmínky minimální hodnoty $\Delta t_{i,j}^*$, ale chceme mezi sebou jednotlivé ochrany vzájemně zálohovat, musíme původní meze (6.16) zpřísnit:

$$k_{bn} \cdot I_{nOi} < I_{pcOi} < k_{bk} \cdot \text{Min}\{\mathbf{Ik}'_{m_i,i}\} \quad (6.17)$$

V případě, kdy $\text{Min}\{\mathbf{Ik}'_{m_i,i}\} \leq I_{nOi}$ a nelze tedy stanovit hodnotu vybavovacího proudu dle (6.17), není možno uvažovat poruchu primárních ochran a v případě poruchy O_y pak nebude O_1 reagovat.

6.4 Optimalizace časových multiplikátorů ochran za pomoci lineárního programování

Jak již bylo zmíněno v subkapitole 4.1, je možno se při optimalizaci omezit pouze na některé koeficienty vektoru ψ . Výsledek optimalizace pak sice neposkytuje tak dobré výsledky jako v případě optimalizace většího množství koeficientů, sama optimalizace však může být jednodušší a její průběh rychlejší. Nejjednodušší princip optimalizace, při němž jsou optimalizovány pouze časové multiplikátory M_{Oi} všech vybraných ochran a ostatní koeficienty

vyskytující se ve vztahu (6.3) jsou vhodně zvoleny, nám dává následující tvar vektoru všech hledaných koeficientů $\boldsymbol{\psi}_L$:

$$\boldsymbol{\psi}_L = (M_{O_1}, M_{O_2}, \dots, M_{O_i}, \dots, M_{O_n}) \quad (6.18)$$

Vybavovací čas ochrany (6.3) můžeme pro tento případ přepsat do tvaru:

$$t_{tripO_i} = t_{tripO_i}(M_{O_i}) = M_{O_i} \cdot k_{LO_i} \quad , \quad k_{LO_i} = \frac{K_{O_i}}{\left(\frac{I_{pO_i}}{I_{pcO_i}}\right)^{E_{O_i}} - 1} \quad (6.19)$$

Z Tab. 1 vybereme jednu z uvedených charakteristik a získáme tak koeficienty K_{O_i} a E_{O_i} . Dle předchozí subkapitoly 6.3, stanovíme hodnoty popudových proudů jako hodnoty minimálních zkratových příspěvků $\text{Min}\{\mathbf{I}k_{m_i,i}\}$, případně $\text{Min}\{\mathbf{I}k'_{m'_i,i}\}$ ponížené bezpečnostním koeficientem $k_{min} < 1$ tak, aby byly splněny podmínky (6.16), případně (6.17). Jak bylo uvedeno v subkapitole 6.2, optimalizaci lineárním programováním je možno s výhodou využít při hledání nejcitlivějšího typu zkratu dle Obr. 29. Pro danou iteraci a danou poruchovou cestu je tak pro každý uzel (n_i a m_i) uvažován pouze jeden typ zkratu a pro optimalizaci jsou z vektorů $\mathbf{I}k_{n_i,i}$, $\mathbf{I}k_{n_i,j}$, $\mathbf{I}k_{m_i,i}$ a $\mathbf{I}k_{m_i,j}$ vybrány pouze příslušné aktuální zkratové příspěvky. Cílovou funkci můžeme napsat ve tvaru:

$$\Phi_L(\boldsymbol{\psi}_L) = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} M_{O_i} \cdot \frac{K_{O_i}}{\left(\frac{\mathbf{I}k_{m_i,i}(k_{i,j}^A)}{I_{pcO_i}}\right)^{E_{O_i}} - 1} + M_{O_i} \cdot \frac{K_{O_i}}{\left(\frac{\mathbf{I}k_{n_i,i}(k_{i,j}^A)}{I_{pcO_i}}\right)^{E_{O_i}} - 1} \quad (6.20)$$

kde $k_{i,j}^A$ označuje aktuální typ zkratu příslušný páru ochran O_i a O_j (poruchové cestě). Optimalizace má tedy za úkol minimalizovat vybavovací časy v sekundárním a primárním uzlu všech uvažovaných typů zkratu. Kromě minimalizace cílové funkce (6.20) musí naše optimalizace zaručovat také splnění minimální požadované hodnoty selektivního času mezi primární a sekundární ochranou a to jak pro poruchu v uzlu primárním, tak sekundárním. Podmínku selektivity (6.12) můžeme upravit jako:

$$\begin{aligned} \Delta t_{prim_{i,j}}(k_{i,j}^A) &= t_{n_i,j}(k_{i,j}^A) - t_{n_i,i}(k_{i,j}^A) \geq \Delta t_{i,j}^*(k_{i,j}^A), \\ \Delta t_{sek_{i,j}}(k_{i,j}^A) &= t_{m_i,j}(k_{i,j}^A) - t_{m_i,i}(k_{i,j}^A) \geq \Delta t_{i,j}^*(k_{i,j}^A), \quad k_{i,j}^A = 1, 2, \dots, n_{i,j} \end{aligned} \quad (6.21)$$

Výše uvedená cílová funkce (6.20) a podmínky typu nerovnosti (6.21) jsou jakožto lineární funkce vhodné pro úlohu lineárního programování.

6.5 Optimalizace koeficientů pomocí SOMA metody

V případě, kdy chceme dosáhnout lepších výsledků²¹ optimalizovaných koeficientů i za cenu delšího výpočetního času, můžeme přejít k některé ze sofistikovanějších optimalizačních metod. V našem případě pro tyto účely použijeme tzv. Self-Organizing Migrating Algorithm, neboli Samo-Organizující se Migrační Algoritmus (SOMA) [49]. Algoritmus této metody si

²¹ nižší hodnotu cílové funkce

můžeme představit jako kooperaci množiny inteligentních jedinců při řešení společného optimalizačního problému. V našem případě je tímto optimalizačním problémem nalezení vektoru koeficientů ψ , pro nějž je hodnota cílové funkce $\Phi(\psi)$ co nejmenší. Jednotliví jedinci (vektory optimalizovaných koeficientů ψ) postupně prohledávají přípustný prostor a hledají nejnižší hodnotu cílové funkce. Po skončení jednoho cyklu (iterace) si navzájem předají informaci o nejnižší nalezené hodnotě cílové funkce (nejlepším jedinci) a pomocí této informace upraví svůj směr hledání. Všichni jedinci (kromě nejlepšího jedince) jsou během své cesty náhodně rušeny, čímž dochází k lepšímu prozkoumání prohledávané oblasti a tedy ke zvýšení pravděpodobnosti nalezení globálního minima. Základní princip SOMA je patrný z blokového diagramu na Obr. 30. V první fázi je nutno vygenerovat předem stanovený počet jedinců (populaci), definovaný parametrem p . Každý jedinec je definovaný svou maximální max_i a minimální min_i hodnotou. Jednotlivé proměnné jedince jsou následně generovány jako:

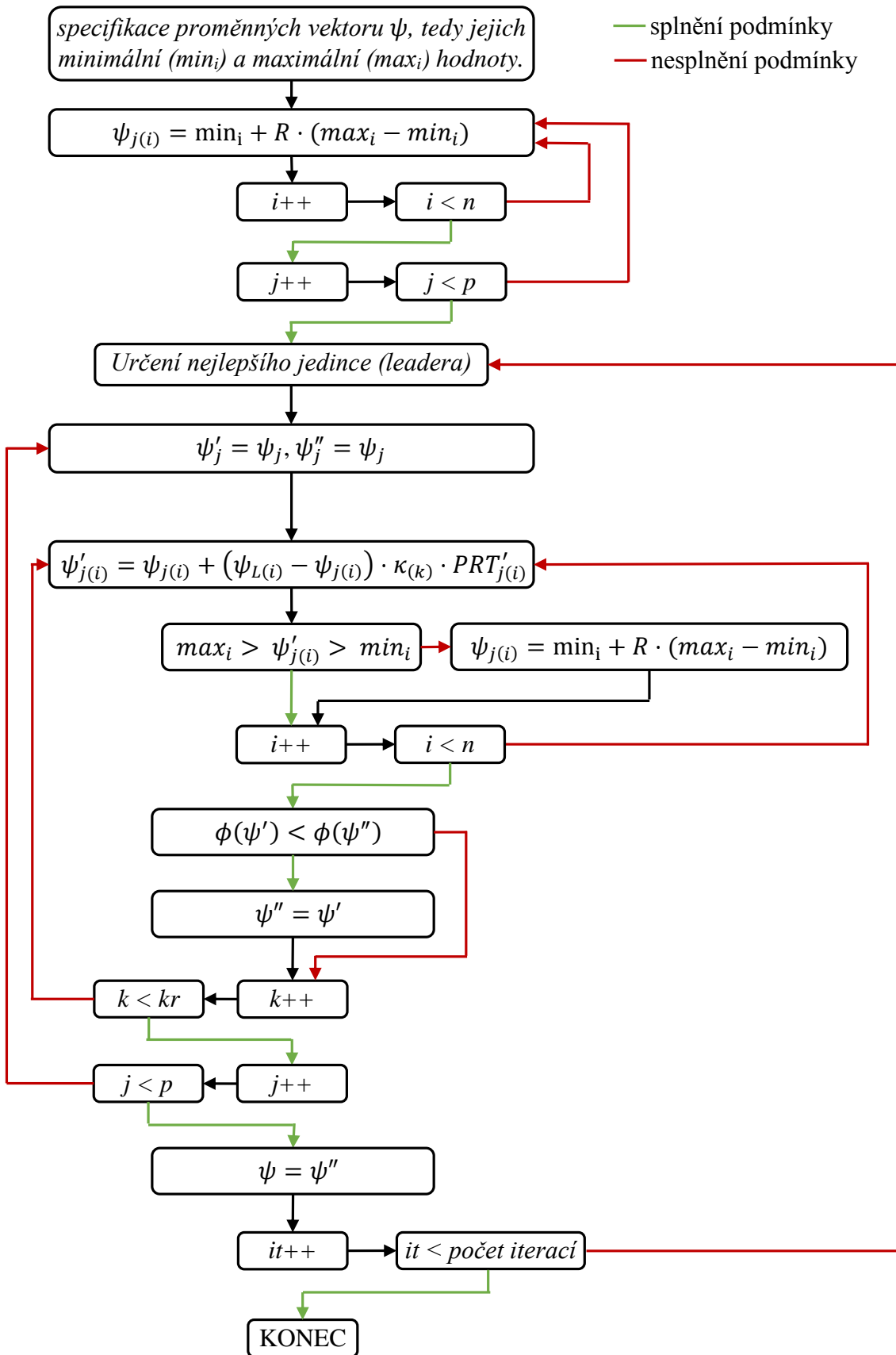
$$\psi_{j(i)} = min_i + R \cdot (max_i - min_i) \quad (6.22)$$

kde R je náhodně generované číslo v intervalu $\langle 0,1 \rangle$. Z vygenerované populace je následně vybrán nejlepší jedinec a jeho index je v rámci populace označen jako L (Leader). V další fázi jsou vytvořeny dva pomocní jedinci ψ'_j a ψ''_j , kopie původního jedince ψ_j . Pomocný jedinec ψ'_j putuje ze své startovní pozice ψ_j po krocích, definovaných vektorem κ , směrem k nejlepšímu jedinci ψ_L .

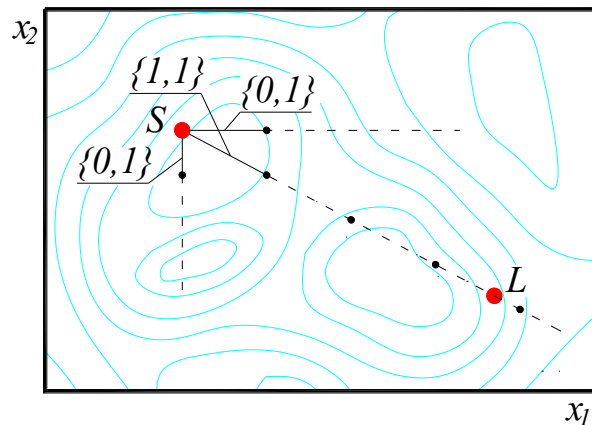
$$\psi'_{j(i)} = \psi_{j(i)} + (\psi_{L(i)} - \psi_{j(i)}) \cdot \kappa_{(k)} \cdot PRT'_{j(i)} \quad (6.23)$$

Během své cesty může být některá z proměnných jedince rušena pomocí pomocného vektoru PRT'_j . Hodnota proměnných vektoru PRT'_j nabývá hodnot 1, nebo 0 a je určena porovnáním předem nastavené hodnoty proměnné PRT (Perbutace) s náhodnou proměnnou R . V případě, kdy je $R < PRT$, pak $PRT'_{j(i)} = 1$, v opačném případě $PRT'_{j(i)} = 0$. V případě vyšších hodnot zvoleného parametru PRT klesá stochastická složka algoritmu. V případě, kdy $PRT = 1$, stochastická část putování zaniká a algoritmus je téměř deterministický. Každá nově vygenerovaná proměnná jedince je prověřena z hlediska výše uvedených minimálních min_i a maximálních max_i hodnot. V případě, kdy tento parametr není splněn, dochází dle (6.22) k nové generaci příslušné proměnné a tedy k dalšímu nárůstu stochastické části algoritmu. Po posunu všech n proměnných pomocného jedince ψ'_j o jeden krok následuje porovnání obou pomocných jedinců. V případě, kdy $\phi(\psi'_j) < \phi(\psi''_j)$ je pomocný jedinec ψ''_j nahrazen ψ'_j . Po průchodu všemi kroky kr (celým vektorem κ), je tedy nejlepší jedinec cesty uchován v pomocném jedinci ψ''_j . Výše uvedený postup je proveden pro všech p jedinců populace. V další iteraci it je opět nalezen index nejlepšího jedince L a po provedení všech iterací algoritmus ukončen.

Základní princip SOMA metody pro proměnné x_1 a x_2 je patrný z Obr. 31. Do prostoru je vygenerována populace o dvou jedincích, z nichž jeden je označen jako L (Leader) a druhý jako S (Start). Při prvním kroku se cesta jedince S může pohybovat, dle hodnot vektoru PRT'_j po různých, na obrázku vyznačených, cestách.



Obr. 30 Blokový diagram SOMA.



Obr. 31: Princip SOMA metody (ve složených závorkách jsou uvedeny možné hodnoty vektoru \mathbf{PRT}'_j)

6.6 Porovnání optimalizačních metod

Výše uvedené metody byly použity při řešení následujících optimalizačních úloh:

- stanovení vektoru časových multiplikátorů \mathbf{M}_{O_i} charakteristik ochran sítě za pomoci lineárního programování (LP),
- stanovení vektorů časových multiplikátorů \mathbf{M}_{O_i} a popudových proudů \mathbf{I}_{pcO_i} charakteristik ochran sítě za pomoci SOMA,
- stanovení vektorů časových multiplikátorů \mathbf{M}_{O_i} a koeficientů strmosti \mathbf{E}_{O_i} ochran sítě za pomoci SOMA, kde $\mathbf{E}_{O_i} \in \{\mathbf{E}_{O_i} \in \mathbb{R}; \mathbf{E}_{O_i} > 0\}$,
- stanovení vektorů časových multiplikátorů \mathbf{M}_{O_i} a koeficientů strmosti \mathbf{E}_{O_i} ochran sítě za pomoci SOMA, kde $\mathbf{E}_{O_i} \in \{0.02, 1, 2\}$.

Metody byly postupně použity pro optimalizaci nastavení ochran následujících sítí:

- radiální síť,
- IEEE 3-bus power system,
- IEEE 4-bus power system,
- IEEE 6-bus power system,
- IEEE 14-bus power system.

Schémata těchto sítí je možno nalézt v příloze na

Obr. 59–Obr. 63. Pro jednoduchost byl pro tyto účely uvažován pouze jeden typ zkratových proudů (trojfázový). U každé optimalizace byly sledovány dvě hodnoty:

- dosažené minimum cílové funkce a
- čas potřebný k jeho nalezení.

U první úlohy, kdy je naším úkolem získat pouze časové multiplikátory charakteristik ochran můžeme postupovat dle subkapitoly 6.4. Pro jednoduchost zvolíme pro všechny ochrany pouze jeden typ charakteristiky (IEC Very inverse) a popudové proudy stanovíme jako poloviny minimálních zkratových příspěvků $\mathbf{I}_{pcO_i} = 0.5 \cdot \mathbf{I}_{kmin_{mi,i}}$ daných ochran. U zbylých úloh je naším

cílem stanovit vždy dva parametry charakteristik každé ochrany a můžeme tedy postupovat dle subkapitoly 6.5. V tomto případě, výše zmíněným zjednodušením, zbývá stanovit pouze jeden parametr (I_{pcO_i} nebo E_{O_i}). Před samotnou optimalizací je však velice důležité stanovit správné odhady hledaných parametrů. Pro tento účel je možno s výhodou využít lineárního programování, kdy je počáteční populace získána sérií optimalizací s náhodně zvolenou hodnotou zbývajícího parametru. Například v případě, kdy je naším cílem stanovit parametry M_{O_i} a I_{pcO_i} , vygenerujeme nejprve potřebný počet náhodných vektorů popudových proudů I_{pcO_i} , pro všechny ochrany zvolíme jeden typ charakteristiky a lineárním programováním pak získáme příslušné vektory časových multiplikátorů M_{O_i} . Obdobným způsobem pak můžeme postupovat u posledních dvou úloh, kdy jsou náhodně generovány vektory koeficientů strmosti E_{O_i} .

Nalezená minima cílových funkcí spolu s potřebným časem výpočtu jsou uvedeny v Tab. 5. Optimalizace pomocí lineárního programování se ukázala jako velice rychlá a efektivní metoda. Nalezená minima cílové funkce jsou ze všech použitých metod nejvyšší, avšak čas potřebný k jejich nalezení je velice krátký. SOMA pak za cenu delšího výpočetního času dosahuje mírně lepších hodnot.

Tab. 5 porovnání rychlosti a efektivity použitých optimalizačních metod

název sítě	nalezené minimum cílové funkce				čas výpočtu (ms)			
	LP (M_{O_i})	SOMA ¹ (M_{O_i}, I_{pcO_i})	SOMA ² (M_{O_i}, E_{O_i})	SOMA ³ (M_{O_i}, E_{O_i})	LP (M_{O_i})	SOMA ¹ (M_{O_i}, I_{pcO_i})	SOMA ² (M_{O_i}, E_{O_i})	SOMA ³ (M_{O_i}, E_{O_i})
radiální síť	10645	10428	10607	10663	30	1034	1344	696
IEEE-3 bus power system	6971	6234	6090	7003	28	362	470	243
IEEE-4 bus power system	11800	11091	11623	11814	32	551	716	371
IEEE-6 bus power system	11519	10886	11378	11567	46	1388	1803	933
IEEE-14 bus power system	34942	26215	34541	35245	156	13453	17472	9048

$$LP - IEC \text{ Very inverse}, I_{pcO_i} = 0.5 \cdot I_{kmin_{m,i}}; \text{ SOMA}^1 - IEC \text{ Very inverse};$$

$$\text{SOMA}^2 - I_{pcO_i} = 0.5 \cdot I_{kmin_{m,i}}, E_{O_i} \in \{E_{O_i} \in \mathbb{R} : E_{O_i} > 0\};$$

$$\text{SOMA}^3 - I_{pcO_i} = 0.5 \cdot I_{kmin_{m,i}}, E_{O_i} \in \{0.02, 1, 2\}$$

Vektor koeficientů strmosti obdrženy jako výsledek poslední úlohy, kdy mohou koeficienty dosahovat pouze předem zadaných hodnot $E_{O_i} \in \{0.02, 1, 2\}$, obsahoval u všech testovaných sítí pouze jednu hodnotu $E_{O_i} = 1$. Takto nalezená minima cílových funkcí pak byla téměř totožná s výsledky získanými pomocí lineárního programování, avšak s podstatně delším časem výpočtu. Do vyvíjeného programu SimPoruchy byly z tohoto důvodu implementovány pouze první tři metody.

Poznámka:

Do časů výpočtů uvedených v Tab. 5 je započítán i čas nutný pro tvorbu příslušných vektorů, matic a odhadů potřebných k samotné optimalizaci.

7 Metoda simultánních poruch

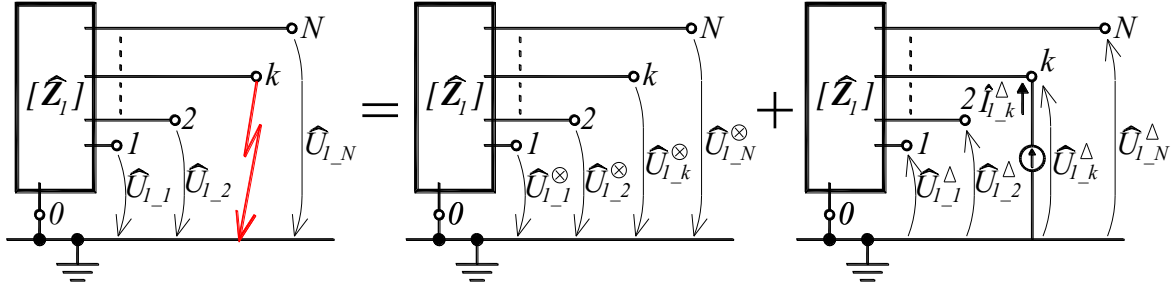
Jedná se o metodu určenou pro výpočet poruchových a provozních stavů elektrizační soustavy [50]. Jak již sám název napovídá, metoda se neomezuje pouze na výpočet jedné osamocené poruchy, ale na výpočet více současných (simultánních) poruch v různých místech sítě. Protože se jedná o ne příliš rozšířenou metodu, je součástí této práce také její detailní popis. Porucha je zde definována jako vodivé spojení dvou libovolných uzlů sítě přes danou hodnotu poruchové impedance. Správným vytvořením poruchy je tak možno simulovat nejenom klasické poruchy mezi uzlem a zemí, ale také případné změny v konfiguraci sítě (rozpojení). Výstupem metody jsou pak vektory obsahující napětí všech uzlů sítě v poruchovém stavu. Dostaneme tak tedy nejenom informaci o velikosti poruchového proudu, ale také informaci o případném poklesu napětí v ostatních uzlech sítě. Z napěťových vektorů poruchového stavu a znalosti konfigurace sítě lze následně pomocí jednoduchého výpočtu získat proudy protékající všemi větvemi sítě.

Odvození metody je možno provést pro všechny typy poruch, avšak chceme-li dosáhnout co možná nejvyšší variability daného algoritmu, je nejlépe použít algoritmus pro výpočet metody jednofázové. Správným kombinováním více simultánních poruch pak můžeme docílit téměř jakéhokoli typu poruchy (tzv. štěpení poruch). Princip metody vychází z jednoduchého algoritmu metody injektovaných proudů, popsáno v následující kapitole.

7.1 Metoda injektovaných proudů

Metoda injektovaných proudů, nebo též metoda superpozice, vychází z jednoduchého předpokladu, že každý poruchový stav je možno rozložit na dva stavy a to stav předporuchový a stav dodatkový. Princip metody je patrný z Obr. 32. Provedme rozbor metody pro její nejjednodušší podobu, kdy uvažujeme pouze jednu trojfázovou poruchu s nulovou impedancí vloženou do poruchy. Předporuchová napětí mohou být získána například pomocí některé z následujících běžně používaných metod:

- Metody výpočtu ustáleného stavu sítě pomocí Newton-Raphsonovy, či Gaus-Seidelovy metody. Jedná se o iterační metody respektující výkonové toky a ztráty sítě. Takto získaný předporuchový stav je tak velice přesný.
- Metoda redukované admitanční matice. Jedná se o jednoduchou metodu respektující pouze hodnoty svorkových napětí ve zdrojových uzlech sítě. Admitanční matice je redukována a je získán vztah mezi vektory napětí a proudů ve zdrojových uzlech sítě. Při známých hodnotách svorkových napětí zdrojů je tak možno získat potřebné proudy. Tyto proudy jsou následně injektovány do příslušných zdrojových uzlů a je tak získán vektor napětí předporuchového stavu. Napětí ve zdrojových uzlech jsou pak přesně rovny jejich zadaným svorkovým hodnotám. Metoda poskytuje pouze hrubý odhad napěťových poměrů v síti bez respektování výkonových toků a ztrát v síti, pro výpočet poruch je však tento odhad dostatečný.
- Injektáž proudů do zdrojových uzlů. Metoda předpokládá provoz všech zdrojů naprázdno. Proud injektovaný do zdrojových uzlů je získán ze štítkových hodnot stroje a v případě nízkého zatížení sítě je získané napětí velice blízké hodnotě jmenovité. Metoda opět nerespektuje výkonové toky v síti a jedná se tak pouze o velice hrubý odhad, pro výpočet poruch však dostatečný.



Obr. 32 Schéma metody injektovaných proudů

Předpokládejme tedy, že vektor předporuchových napětí sousledné složky \hat{U}_1^{\otimes} již známe. Samotný vektor napětí při poruše \hat{U}_1 stanovíme jako:

$$\hat{U}_1 = \hat{U}_1^{\otimes} + \hat{U}_1^{\Delta} \quad (7.1)$$

kde \hat{U}_1^{Δ} je vektor dodatkových napětí sousledné složky. Předpokládáme-li dále poruchu v k -tém uzlu soustavy s nulovou hodnotou impedance vložené do poruchy, bude v tomto uzlu při poruše nulové napětí a musí tedy platit:

$$\hat{U}_{1-k}^{\Delta} = -\hat{U}_{1-k}^{\otimes} \quad (7.2)$$

kde \hat{U}_{1-k}^{\otimes} a \hat{U}_{1-k}^{Δ} je předporuchová, respektive dodatková hodnota napětí v k -tém uzlu. V ostatních uzlech soustavy bude napětí poníženo o úbytky způsobené průchodem zkratového proudu soustavou. Naším úkolem je získat hodnotu dodatkového proudu \hat{I}_{1-k}^{Δ} injektovaného do k -tého uzlu takového, aby zde vytvořil dodatkové napětí odpovídající rovnici (7.2). Ze znalosti vlastností prvků impedanční matice sítě $[\hat{Z}_1]$ můžeme napsat:

$$\hat{I}_{1-k}^{\Delta} = \frac{\hat{U}_{1-k}^{\Delta}}{\hat{Z}_{1(k,k)}} = \frac{-\hat{U}_{1-k}^{\otimes}}{\hat{Z}_{1(k,k)}} \quad (7.3)$$

kde $\hat{Z}_{1(k,k)}$ označuje k -tý prvek na diagonále impedanční matice $[\hat{Z}_1]$. Jak je zobrazeno na Obr. 32, proud \hat{I}_{1-k}^{Δ} injektujeme do k -tého uzlu a vytvoříme v něm tak požadované napětí \hat{U}_{1-k}^{Δ} . V ostatních uzlech soustavy tento proud vyvolá příslušná dodatková napětí:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{1-1}^{\Delta} \\ \hat{U}_{1-2}^{\Delta} \\ \vdots \\ \hat{U}_{1-k}^{\Delta} \\ \vdots \\ \hat{U}_{1-N}^{\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{1(1,1)} & \hat{Z}_{1(1,2)} & \cdots & \hat{Z}_{1(1,k)} & \cdots & \hat{Z}_{1(1,N)} \\ \hat{Z}_{1(2,1)} & \hat{Z}_{1(2,2)} & \cdots & \hat{Z}_{1(2,k)} & \cdots & \hat{Z}_{1(2,N)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{Z}_{1(k,1)} & \hat{Z}_{1(k,2)} & \cdots & \hat{Z}_{1(k,k)} & \cdots & \hat{Z}_{1(k,N)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{Z}_{1(N,1)} & \hat{Z}_{1(N,2)} & \cdots & \hat{Z}_{1(N,k)} & \cdots & \hat{Z}_{1(N,N)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \hat{I}_{1-k}^{\Delta} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{1(1,k)} \\ \hat{Z}_{1(2,k)} \\ \vdots \\ \hat{Z}_{1(k,k)} \\ \vdots \\ \hat{Z}_{1(N,k)} \end{bmatrix} \cdot \hat{I}_{1-k}^{\Delta} \quad (7.4)$$

Z definice dodatkového proudu (7.3) je zřejmé, že jeho hodnota je číselně rovna záporné hodnotě zkratového proudu v k-tém uzlu:

$$\hat{I}_{3f_k} = -\hat{I}_{1_k}^{\Delta} \quad (7.5)$$

Dodatková napětí (7.4) tedy přesně respektují úbytky napětí způsobené průchodem zkratového proudu \hat{I}_{3f_k} soustavou a vektor \hat{U}_1 získaný pomocí (7.1) představuje všechna uzlová napětí soustavy při poruše v jejím k-tém uzlu.

7.2 Metoda simultánních poruch pro trojfázové poruchy

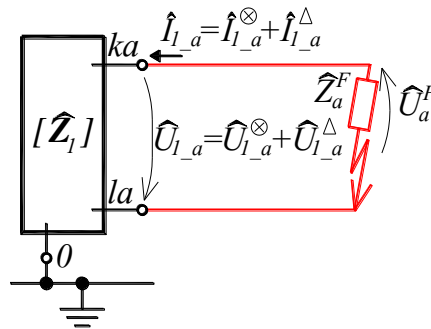
Základní úvahy uvedené v subkapitole 7.1 mohou být rozšířeny tak, aby bylo možno řešit nejenom poruchy v jednom uzlu sítě, ale více současných (simultánních) poruch s vloženou poruchovou impedancí do poruchy. Pro jednoduchost budeme nejprve uvažovat pouze trojfázovou poruchu. V případě, kdy dále předpokládáme symetrický předporuchový stav pak můžeme uvažovat pouze schéma sousledné složky. Na Obr. 33 je zobrazeno schéma trojfázové poruchy na bráně²² a mezi uzly ka a la s vloženou poruchovou impedancí do poruchy \hat{Z}_a^F . Poruchový proud \hat{I}_{1_a} protéká poruchovou impedancí \hat{Z}_a^F a vytvoří tak napětí \hat{U}_a^F . Toto napětí je co do velikosti stejné jako napětí poruchové \hat{U}_{1_a} , avšak opačně orientované:

$$\hat{U}_{1_a} = -\hat{U}_a^F \quad (7.6)$$

Úpravou (7.6) získáme:

$$\hat{U}_{1_a}^{\otimes} + \hat{Z}_a^F \cdot \hat{I}_{1_a}^{\otimes} + (\hat{Z}_{(a,a)}^P + \hat{Z}_a^F) \cdot \hat{I}_{1_a}^{\Delta} = 0 \quad (7.7)$$

kde $\hat{Z}_{(a,a)}^P$ je viděná impedance v bráně a (neboli prvek poruchové impedanční matice, viz. subkapitola 7.5).



Obr. 33 Schéma trojfázové poruchy v bráně a .

Pro větší množství poruch přepíšeme (7.7) do vektorové formy zápisu:

$$\hat{U}_1^{\otimes P} + [\hat{Z}_{\%}^{FP}] \cdot \hat{I}_1^{\otimes P} + ([\hat{Z}_1^P] + [\hat{Z}_{\%}^{FP}]) \cdot \hat{I}_1^{\Delta P} = \mathbf{0} \quad (7.8)$$

²² Libovolná dvojice uzlů sítě, mezi kterými dojde k poruše (podrobněji bude probrána v subkapitole 7.5).

kde $[\hat{\mathbf{Z}}_1^P]$ označuje poruchovou impedanční matici a $[\hat{\mathbf{Z}}_{\%}^{FP}]$ pak matici vložených poruchových impedancí. Poruchová impedanční matice zprostředkovává převodní vztah mezi napětími a proudy na branách poruch, její diagonální prvky jsou viděnými impedancemi na branách poruch a mimodiagonální prvky pak viděnými impedancemi mezi nimi. Matici vložených poruchových impedancí definujeme jako následující diagonální matici:

$$[\hat{\mathbf{Z}}_{\%}^{FP}] = \begin{bmatrix} \hat{Z}_1^F & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \hat{Z}_2^F & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \hat{Z}_N^F \end{bmatrix} \quad (7.9)$$

Rovnici (7.6) můžeme obdobně přepsat do vektorové formy zápisu jako:

$$-\hat{\mathbf{U}}^{FP} = \hat{\mathbf{U}}_1^P \quad (7.10)$$

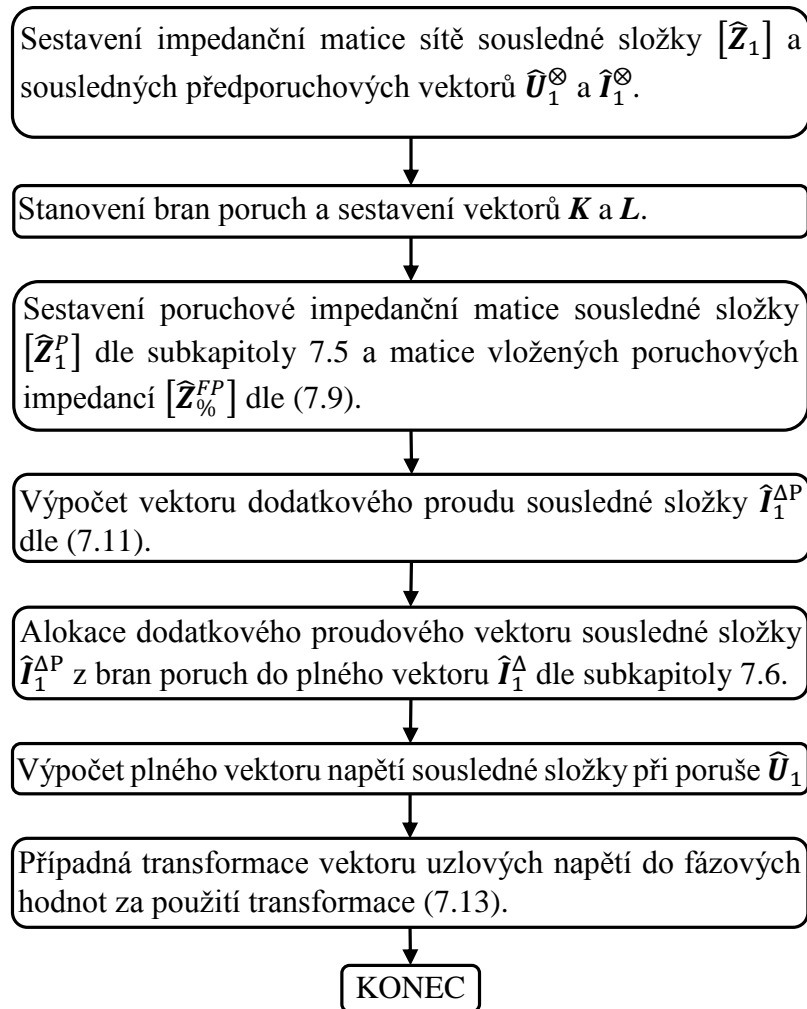
Z rovnice (7.8) můžeme vyjádřit vektor dodatkových proudů:

$$\begin{aligned} [\hat{\mathbf{Z}}_1^P] \cdot \hat{\mathbf{I}}_1^{\Delta P} + [\hat{\mathbf{Z}}_{\%}^{FP}] \cdot \hat{\mathbf{I}}_1^{\Delta P} &= -\hat{\mathbf{U}}_1^{\otimes P} - [\hat{\mathbf{Z}}_{\%}^{FP}] \cdot \hat{\mathbf{I}}_1^{\otimes P} \\ \hat{\mathbf{I}}_1^{\Delta P} &= -\left([\hat{\mathbf{Z}}_1^P] + [\hat{\mathbf{Z}}_{\%}^{FP}]\right)^{-1} \cdot \left(\hat{\mathbf{U}}_1^{\otimes P} + [\hat{\mathbf{Z}}_{\%}^{FP}] \cdot \hat{\mathbf{I}}_1^{\otimes P}\right) \end{aligned} \quad (7.11)$$

Nyní musíme dodatkové proudy v branách poruch respektované vektorem $\hat{\mathbf{I}}_1^{\Delta P}$ rozmístit do příslušných uzlů. Algoritmem tzv. alokace (bude popsán v subkapitole 7.6) tak získáme plný vektor dodatkových proudů $\hat{\mathbf{I}}_1^{\Delta}$. Plný vektor napětí při poruše pak získáme jako:

$$\hat{\mathbf{U}}_1 = \hat{\mathbf{U}}_1^{\otimes} + [\hat{\mathbf{Z}}_1] \cdot \hat{\mathbf{I}}_1^{\Delta} \quad (7.12)$$

Celkový postup výpočtu je patrný z diagramu na Obr. 34.



Obr. 34 Postup při výpočtu trojfázových příčných poruch metodou simultánních poruch.

7.3 Metoda simultánních poruch pro jednofázové poruchy

Obdobným způsobem jako pro trojfázovou poruchu probranou v subkapitole 7.2 je možno sestavit také algoritmus pro řešení poruch jednofázových. Výhoda modelu umožňujícího řešit jednofázové poruchy spočívá v jeho snadné použitelnosti pro ostatní typy poruch. Vytvořením několika současných poruch můžeme sestavit téměř kteroukoliv z běžně potřebných poruch. Odvození základních vztahů pro výpočet jednofázové poruchy vychází z následující transformace do složkových proudů:

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \\ \hat{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_A \\ \hat{I}_B \\ \hat{I}_C \end{bmatrix} \quad (7.13)$$

Kde \hat{I}_1 , \hat{I}_2 a \hat{I}_0 jsou proudy v sousledné, zpětné a netočivé složce, \hat{I}_A , \hat{I}_B a \hat{I}_C jsou proudy ve fázových hodnotách a \hat{a} je pomocná komplexní proměnná zprostředkávající fázový posuv o 120° .

$$\hat{a} = e^{i\frac{2\pi}{3}} \quad (7.14)$$

V případě jednofázové příčné poruchy ve fázi A budou příčné proudy zbývajících fází nulové $\hat{I}_B = 0$ a $\hat{I}_C = 0$. Ze vztahu (7.13) pak získáme pro složkové proudy brány a:

$$\hat{I}_{1_a} = \hat{I}_{2_a} = \hat{I}_{0_a} = \frac{1}{3} \cdot \hat{I}_A \quad (7.15)$$

Obdobným způsobem získáme závislosti složkových proudů pro poruchu ve fázích B a C jako:

$$\begin{aligned} \hat{a}^2 \hat{I}_{1_a} = \hat{a} \hat{I}_{2_a} = \hat{I}_{0_a} &= \frac{1}{3} \cdot \hat{I}_B \\ \hat{a} \hat{I}_{1_a} = \hat{a}^2 \hat{I}_{2_a} = \hat{I}_{0_a} &= \frac{1}{3} \cdot \hat{I}_C \end{aligned} \quad (7.16)$$

Ze vztahů (7.15) a (7.16) můžeme vytvořit obecné schéma jednofázové poruchy pro jakoukoliv poruchovou fázi zobrazené na Obr. 35. Do klasického schématu jednofázové poruchy, sestavovaného většinou pro poruchovou fázi A, musí být přidány pomocné transformátory zajišťující příslušná fázová natočení. Ze vztahů (7.15) a (7.16) je možno získat hodnoty pomocných proměnných $\hat{\varepsilon}_1$, $\hat{\varepsilon}_2$ a $\hat{\varepsilon}_0$ uvedené v Tab. 6. Obecný zápis (7.15) a (7.16) pak bude:

$$\hat{\varepsilon}_1 \cdot \hat{I}_{1_a} = \hat{\varepsilon}_2 \cdot \hat{I}_{2_a} = \hat{I}_{0_a} \quad (7.17)$$

V případě většího množství poruch přejde vztah (7.17) do maticové formy zápisu:

$$\begin{bmatrix} \hat{\varepsilon}_{1\%}^P \end{bmatrix} \cdot \hat{I}_1^P = \begin{bmatrix} \hat{\varepsilon}_{2\%}^P \end{bmatrix} \cdot \hat{I}_2^P = \hat{I}_0^P \quad (7.18)$$

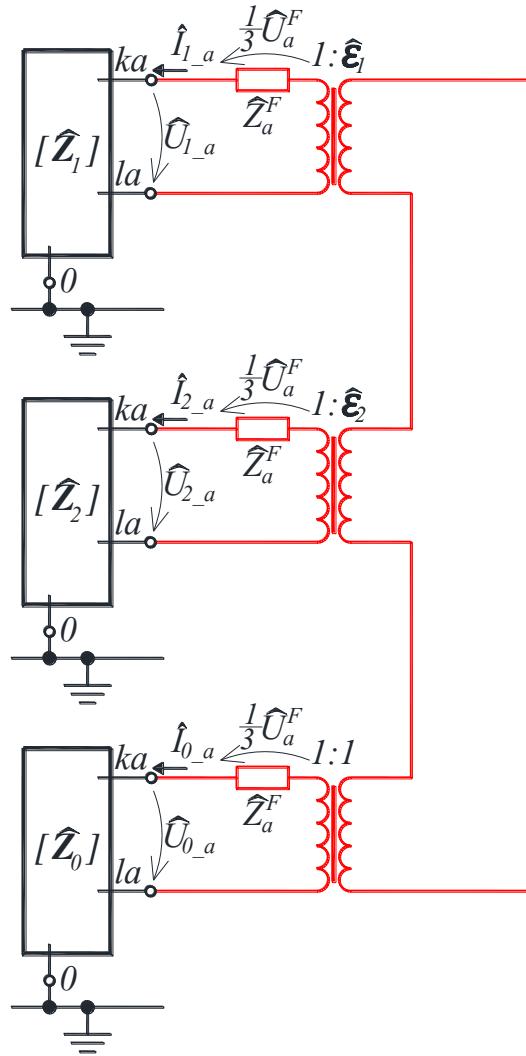
kde $\begin{bmatrix} \hat{\varepsilon}_{1\%}^P \end{bmatrix}$ a $\begin{bmatrix} \hat{\varepsilon}_{2\%}^P \end{bmatrix}$ jsou diagonální matice pomocných proměnných a \hat{I}_1^P , \hat{I}_2^P a \hat{I}_0^P jsou vektory složek poruchových proudů do bran poruch. Vektory složek poruchových proudů můžeme vyjádřit pomocí předporuchových a dodatkových vektorů. Výraz (7.18) pak přejde do tvaru:

$$\begin{bmatrix} \hat{\varepsilon}_{1\%}^P \end{bmatrix} \cdot (\hat{I}_1^{\otimes P} + \hat{I}_1^{\Delta P}) = \begin{bmatrix} \hat{\varepsilon}_{2\%}^P \end{bmatrix} \cdot (\hat{I}_2^{\otimes P} + \hat{I}_2^{\Delta P}) = \hat{I}_0^{\otimes P} + \hat{I}_0^{\Delta P} \quad (7.19)$$

Pomocí (7.19) si vyjádříme dodatkový vektor sousledné a zpětné složky jako funkci vektoru složky netočivé:

$$\begin{aligned} \hat{I}_1^{\Delta P} &= \begin{bmatrix} \hat{\varepsilon}_{1\%}^P \end{bmatrix}^{-1} \cdot (\hat{I}_0^{\otimes P} + \hat{I}_0^{\Delta P}) - \hat{I}_1^{\otimes P} \\ \hat{I}_2^{\Delta P} &= \begin{bmatrix} \hat{\varepsilon}_{2\%}^P \end{bmatrix}^{-1} \cdot (\hat{I}_0^{\otimes P} + \hat{I}_0^{\Delta P}) - \hat{I}_2^{\otimes P} \end{aligned} \quad (7.20)$$

Na pravých stranách (7.20) se vyskytují pouze předporuchové vektory sousledné a zpětné složky a dodatkový vektor složky netočivé. Protože předporuchové vektory všech složek jsou známy, můžeme po vyjádření dodatkového vektoru netočivé složky určit dodatkové vektory složky sousledné a zpětné.



Obr. 35 Schéma jednofázové poruchy s vloženou poruchovou impedancí do poruchy

Tab. 6 Vyjádření pomocných proměnných pro všechny fáze

		Pomocné proměnné		
		$\hat{\epsilon}_1$	$\hat{\epsilon}_2$	$\hat{\epsilon}_0$
poruchová fáze	A	1	1	1
	B	\hat{a}^2	\hat{a}	1
	C	\hat{a}	\hat{a}^2	1

Za pomoci Obr. 35 můžeme (7.10) přepsat jako:

$$\left[\hat{\epsilon}_{1\%}^P \right] \cdot \hat{U}_1^P + \left[\hat{\epsilon}_{2\%}^P \right] \cdot \hat{U}_2^P + \hat{U}_0^P = -\hat{U}^{FP} \quad (7.21)$$

Jednotlivé části těchto výrazů si můžeme vyjádřit pomocí vztahů (7.20) a poruchových impedančních matic jako:

$$\begin{aligned} [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P] \cdot \hat{\boldsymbol{U}}_1^P &= [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P] \cdot (\hat{\boldsymbol{U}}_1^{\otimes P} + \hat{\boldsymbol{U}}_1^{\Delta P}) = [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P] \cdot \hat{\boldsymbol{U}}_1^{\otimes P} + [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P] \cdot [\hat{\boldsymbol{Z}}_1^P] \cdot \hat{\boldsymbol{I}}_1^{\Delta P} \\ &= [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P] \cdot \hat{\boldsymbol{U}}_1^{\otimes P} + [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P] \cdot [\hat{\boldsymbol{Z}}_1^P] \cdot \left([\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P]^{-1} \cdot (\hat{\boldsymbol{I}}_0^{\otimes P} + \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\Delta P}) - \hat{\boldsymbol{I}}_1^{\otimes P} \right) \end{aligned} \quad (7.22)$$

$$[\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P] \cdot \hat{\boldsymbol{U}}_2^P = [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P] \cdot \hat{\boldsymbol{U}}_2^{\otimes P} + [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P] \cdot [\hat{\boldsymbol{Z}}_2^P] \cdot \left([\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P]^{-1} \cdot (\hat{\boldsymbol{I}}_0^{\otimes P} + \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\Delta P}) - \hat{\boldsymbol{I}}_2^{\otimes P} \right) \quad (7.23)$$

$$\hat{\boldsymbol{U}}_0^P = \hat{\boldsymbol{U}}_0^{\otimes P} + [\hat{\boldsymbol{Z}}_0^P] \cdot \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\Delta P} \quad (7.24)$$

Vložení (7.22), (7.23) a (7.24) do (7.21) a osamostatněním částí násobených dodatkovým vektorem netočivé složky získáme:

$$\begin{aligned} & [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P] \cdot \left(\hat{\boldsymbol{U}}_1^{\otimes P} + [\hat{\boldsymbol{Z}}_1^P] \cdot [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P]^{-1} \cdot \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\otimes P} + [\hat{\boldsymbol{Z}}_1^P] \cdot \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\Delta P} \right) \\ & + [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P] \cdot \left(\hat{\boldsymbol{U}}_2^{\otimes P} + [\hat{\boldsymbol{Z}}_2^P] \cdot [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P]^{-1} \cdot \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\otimes P} + [\hat{\boldsymbol{Z}}_2^P] \cdot \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\Delta P} \right) + \hat{\boldsymbol{U}}_0^{\otimes P} + \\ & + \left([\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P] \cdot [\hat{\boldsymbol{Z}}_1^P] \cdot [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P]^{-1} + [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P] \cdot [\hat{\boldsymbol{Z}}_2^P] \cdot [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P]^{-1} + [\hat{\boldsymbol{Z}}_0^P] \right) \cdot \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\Delta P} \\ & = -\hat{\boldsymbol{U}}^{FP} \end{aligned} \quad (7.25)$$

Dále si definujeme několik nových veličin. Rezultující vektor napětí jako:

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{U}}_{120}^P &= [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P] \cdot \left(\hat{\boldsymbol{U}}_1^{\otimes P} + [\hat{\boldsymbol{Z}}_1^P] \cdot [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P]^{-1} \cdot \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\otimes P} + [\hat{\boldsymbol{Z}}_1^P] \cdot \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\Delta P} \right) \\ & + [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P] \cdot \left(\hat{\boldsymbol{U}}_2^{\otimes P} + [\hat{\boldsymbol{Z}}_2^P] \cdot [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P]^{-1} \cdot \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\otimes P} + [\hat{\boldsymbol{Z}}_2^P] \cdot \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\Delta P} \right) + \hat{\boldsymbol{U}}_0^{\otimes P} \end{aligned} \quad (7.26)$$

Rezultující poruchovou impedanční matici jako:

$$[\hat{\boldsymbol{Z}}_{120}^P] = [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P] \cdot [\hat{\boldsymbol{Z}}_1^P] \cdot [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P]^{-1} + [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P] \cdot [\hat{\boldsymbol{Z}}_2^P] \cdot [\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P]^{-1} + [\hat{\boldsymbol{Z}}_0^P] \quad (7.27)$$

Výraz (7.25) pak přejde do zjednodušeného tvaru:

$$\hat{\boldsymbol{U}}_{120}^P + [\hat{\boldsymbol{Z}}_{120}^P] \cdot \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\Delta P} = -\hat{\boldsymbol{U}}^{FP} \quad (7.28)$$

Rezultující vektor napětí i rezultující poruchová impedanční matice jsou složeny pouze z vektorů předporuchového stavu, poruchových impedančních matic a matic pomocných proměnných. Všechny tyto veličiny jsou známy a z rovnice (7.28) může být vyjádřen hledaný vektor dodatkových proudů netočivé složky.

V případě, že je do některé poruchy vložena také poruchová impedance a vektor $\hat{\boldsymbol{U}}^{FP}$ je tedy nenulový, musíme výraz (7.28) dále upravit. Napětí ve vektoru $\hat{\boldsymbol{U}}^{FP}$ mohou být získána

jako násobek příslušné poruchové impedance \hat{Z}_a^F a poruchového proudu. Úpravou maticové rovnice (7.13) můžeme získat vyjádření poruchových fázových proudů jako:

$$\begin{aligned}\hat{I}_A &= \hat{I}_1 + \hat{I}_2 + \hat{I}_0 \\ \hat{I}_B &= \hat{a}^2 \cdot \hat{I}_1 + \hat{a} \cdot \hat{I}_2 + \hat{I}_0 \\ \hat{I}_C &= \hat{a} \cdot \hat{I}_1 + \hat{a}^2 \cdot \hat{I}_2 + \hat{I}_0\end{aligned}\quad (7.29)$$

Pomocí Tab. 6 pak získáme obecný zápis pro vektor poruchových proudů jako:

$$\hat{\mathbf{I}}_F^P = \left[\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P \right] \cdot \hat{\mathbf{I}}_1^P + \left[\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P \right] \cdot \hat{\mathbf{I}}_2^P + \hat{\mathbf{I}}_0^P \quad (7.30)$$

Použitím (7.18) a rozložením vektoru proudů netočivé složky na předporuchovou a dodatkovou část pak získáme:

$$\hat{\mathbf{I}}_F^P = 3 \cdot \hat{\mathbf{I}}_0^P = 3 \cdot \left(\hat{\mathbf{I}}_0^{\otimes P} + \hat{\mathbf{I}}_0^{\Delta P} \right) \quad (7.31)$$

Pomocí (7.31) pak můžeme upravit rovnici (7.28):

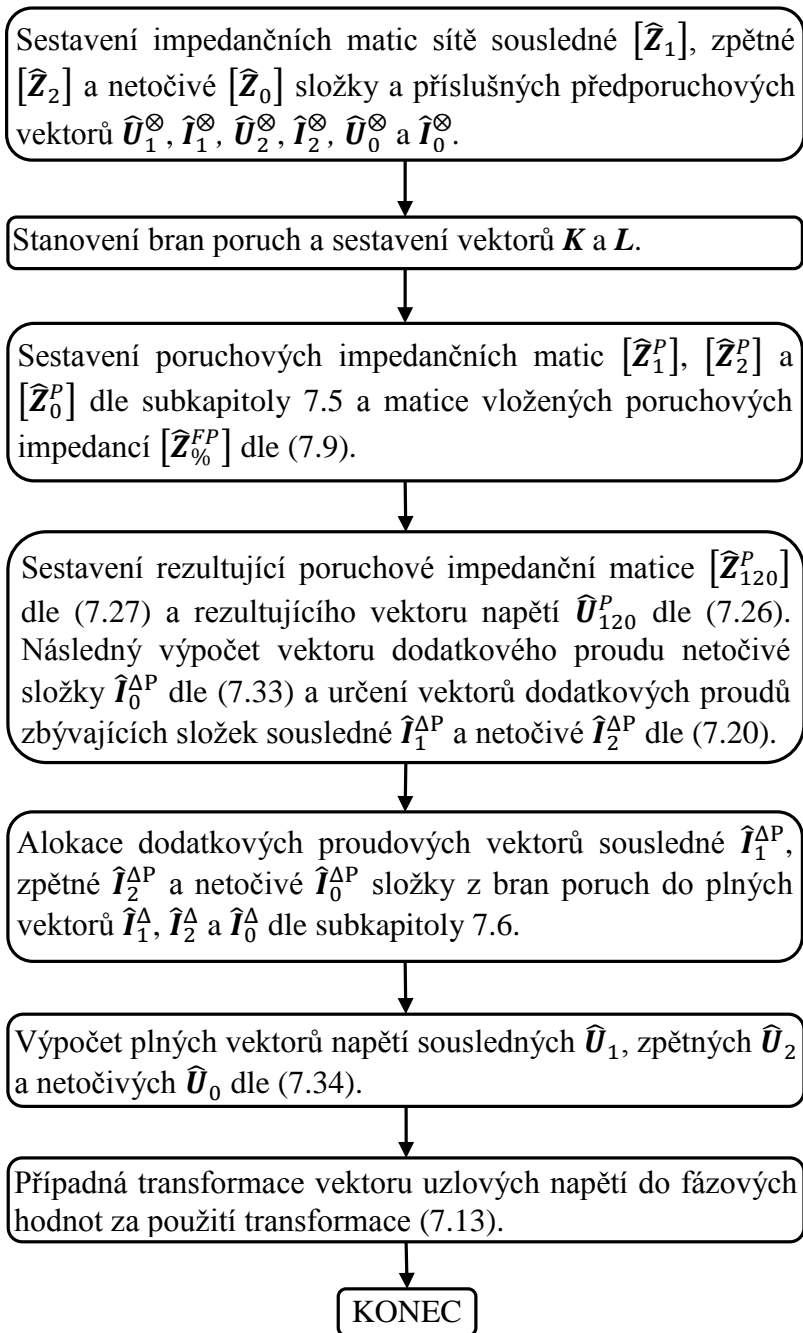
$$\hat{\mathbf{U}}_{120}^P + \left[\hat{\mathbf{Z}}_{120}^P \right] \cdot \hat{\mathbf{I}}_0^{\Delta P} = -3 \cdot \left[\hat{\mathbf{Z}}_{\%}^{FP} \right] \cdot \left(\hat{\mathbf{I}}_0^{\otimes P} + \hat{\mathbf{I}}_0^{\Delta P} \right) \quad (7.32)$$

kde $\left[\hat{\mathbf{Z}}_{\%}^{FP} \right]$ je diagonální matice vložených poruchových impedancí (7.9). Z rovnice (7.32) můžeme vyjádřit vektor dodatkových proudů netočivé složky:

$$\begin{aligned}\left(\left[\hat{\mathbf{Z}}_{120}^P \right] + 3 \cdot \left[\hat{\mathbf{Z}}_{\%}^{FP} \right] \right) \cdot \hat{\mathbf{I}}_0^{\Delta P} &= -3 \cdot \left[\hat{\mathbf{Z}}_{\%}^{FP} \right] \cdot \hat{\mathbf{I}}_0^{\otimes P} - \hat{\mathbf{U}}_{120}^P \\ \hat{\mathbf{I}}_0^{\Delta P} &= - \left(\left[\hat{\mathbf{Z}}_{120}^P \right] + 3 \cdot \left[\hat{\mathbf{Z}}_{\%}^{FP} \right] \right)^{-1} \cdot \left(\hat{\mathbf{U}}_{120}^P + 3 \cdot \left[\hat{\mathbf{Z}}_{\%}^{FP} \right] \cdot \hat{\mathbf{I}}_0^{\otimes P} \right)\end{aligned}\quad (7.33)$$

Použitím (7.20) získáme také vektory složek zpětné $\hat{\mathbf{I}}_2^{\Delta P}$ a netočivé $\hat{\mathbf{I}}_0^{\Delta P}$. Obdobně jako u zkratu trojfázového získáme algoritmem tzv. alokace popsaným v subkapitole 7.6 plné vektory dodatkových proudů $\hat{\mathbf{I}}_1^{\Delta}$, $\hat{\mathbf{I}}_2^{\Delta}$ a $\hat{\mathbf{I}}_0^{\Delta}$. Plné vektory složkových napětí při poruše pak získáme jako:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{U}}_1 &= \hat{\mathbf{U}}_1^{\otimes} + \left[\hat{\mathbf{Z}}_1 \right] \cdot \hat{\mathbf{I}}_1^{\Delta} \\ \hat{\mathbf{U}}_2 &= \hat{\mathbf{U}}_2^{\otimes} + \left[\hat{\mathbf{Z}}_2 \right] \cdot \hat{\mathbf{I}}_2^{\Delta} \\ \hat{\mathbf{U}}_0 &= \hat{\mathbf{U}}_0^{\otimes} + \left[\hat{\mathbf{Z}}_0 \right] \cdot \hat{\mathbf{I}}_0^{\Delta}\end{aligned}\quad (7.34)$$



Obr. 36 Postup při výpočtu jednofázových příčných poruch metodou simultánních poruch.

7.4 Štěpení poruch

Postup uvedený v subkapitole 7.3, umožňující výpočet jednofázové poruchy pro jakoukoliv poruchovou fázi, může být použit k výpočtům následujících poruchových stavů:

- Dvofázová příčná porucha – dvě současné jednofázové poruchy v příslušných fázích.
- Dvofázová příčná nezemní porucha (spojení dvou fází) – dvě současné jednofázové poruchy v příslušných fázích. Všechny uzlové admittance netočivé složky musí být nastaveny na nulu.
- Trojfázová příčná porucha – tři současné jednofázové poruchy ve všech fázích.

- Podélné rozpojení libovolné fáze – do vybrané brány umístíme poruchu s vloženou impedancí do poruchy. Hodnotu této impedance nastavíme na hodnotu záporně vzaté impedance rozpojovaného úseku sítě.

V případě dvou současných jednofázových poruch ve fázi B a C může být dle schématu z Obr. 35 vytvořeno schéma na Obr. 37 a). Klasické schéma dvoufázové příčné poruchy je pak zobrazeno na Obr. 37 b). Ze schématu na Obr. 37 a) jsou patrné následující vztahy:

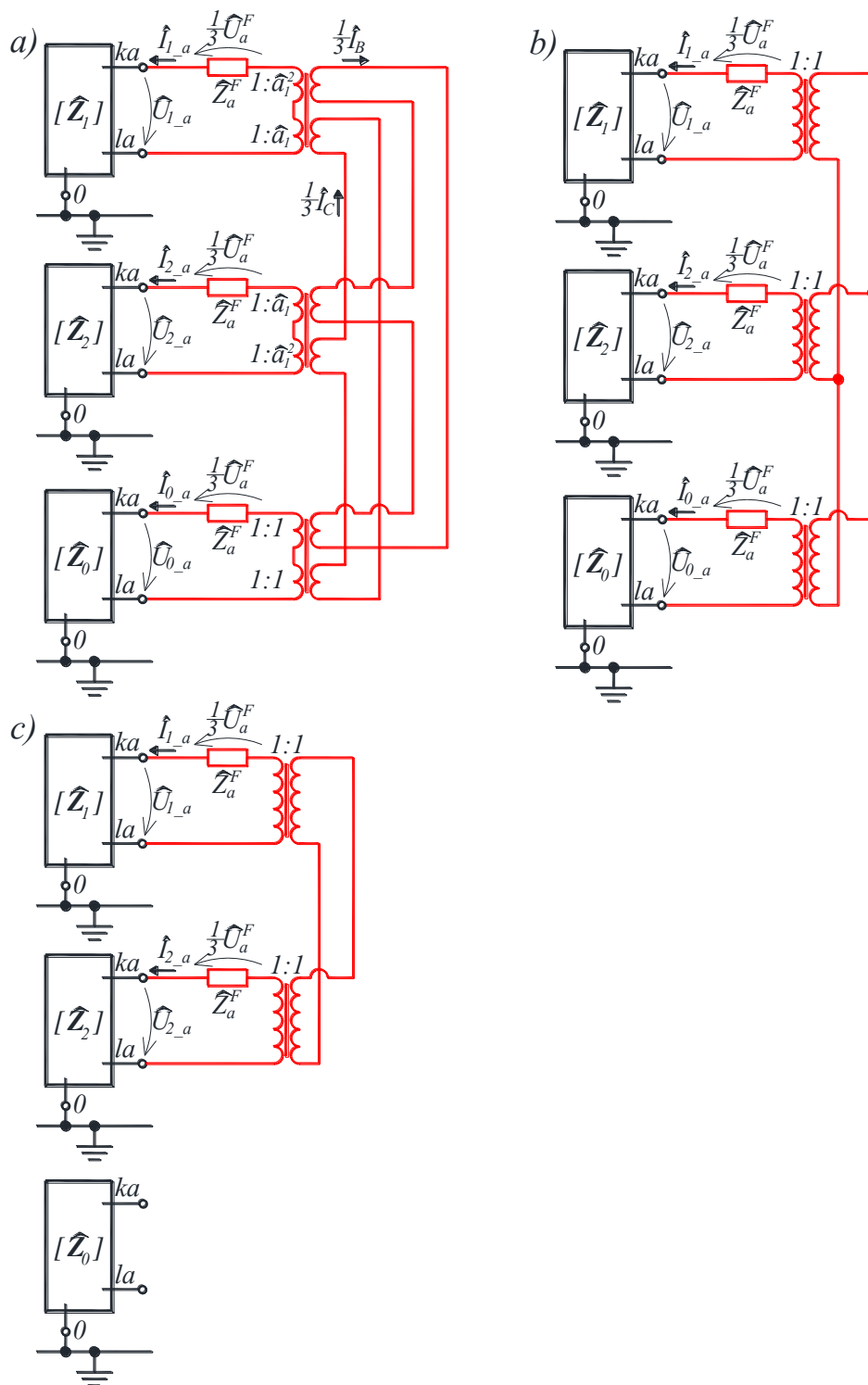
$$\begin{aligned}\hat{I}_{1_a} &= \frac{1}{3} \cdot (\hat{a} \cdot \hat{I}_B + \hat{a}^2 \cdot \hat{I}_C) \\ \hat{I}_{2_a} &= \frac{1}{3} \cdot (\hat{a}^2 \cdot \hat{I}_B + \hat{a} \cdot \hat{I}_C) \\ \hat{I}_{0_a} &= \frac{1}{3} \cdot (\hat{I}_B + \hat{I}_C)\end{aligned}\tag{7.35}$$

Ze schématu na Obr. 37 b) je patrné, že součet sousledné a zpětné složky proudu se musí rovnat záporné hodnotě složky proudu netočivého. Z (7.35) tedy vyjádříme:

$$\begin{aligned}\hat{I}_{1_a} + \hat{I}_{2_a} &= \frac{1}{3} \cdot (\hat{I}_B \cdot \hat{a}^2 + \hat{I}_C \cdot \hat{a}) + \frac{1}{3} \cdot (\hat{I}_B \cdot \hat{a} + \hat{I}_C \cdot \hat{a}^2) \\ &= \frac{1}{3} \cdot \hat{I}_B \cdot \underbrace{(\hat{a}^2 + \hat{a})}_{-1} + \frac{1}{3} \cdot \hat{I}_C \cdot \underbrace{(\hat{a}^2 + \hat{a})}_{-1} \\ &= -\frac{1}{3} \cdot (\hat{I}_B + \hat{I}_C) = -\hat{I}_{0_a}\end{aligned}\tag{7.36}$$

Obě schémata jsou tedy ekvivalentní.

Na Obr. 37 c) je zobrazeno schéma dvoufázové příčné nezemní poruchy ve fázích B a C . Z porovnání schémat na Obr. 37 b) a c) je patrné, že jediným rozdílem mezi dvoufázovou příčnou zemní a nezemní poruchou je přítomnost netočivého proudu u poruchy zemní. Pokud chceme provést výpočet síťových poměrů při spojení dvou fází, neboli při dvoufázové příčné nezemní poruše, musíme zamezit průchodu netočivé složky obvodem. Zamezení průtoku netočivého proudu obvodem je možno provést jednoduchou úpravou admitanční matice netočivé složky, kdy všechny uzlové admitance uvažujeme jako nulové. Obě schémata na Obr. 37 b) a c) pak budou ekvivalentní a budeme tedy moci i tento typ poruchy simulovat pomocí dvou současných jednofázových příčných poruch.

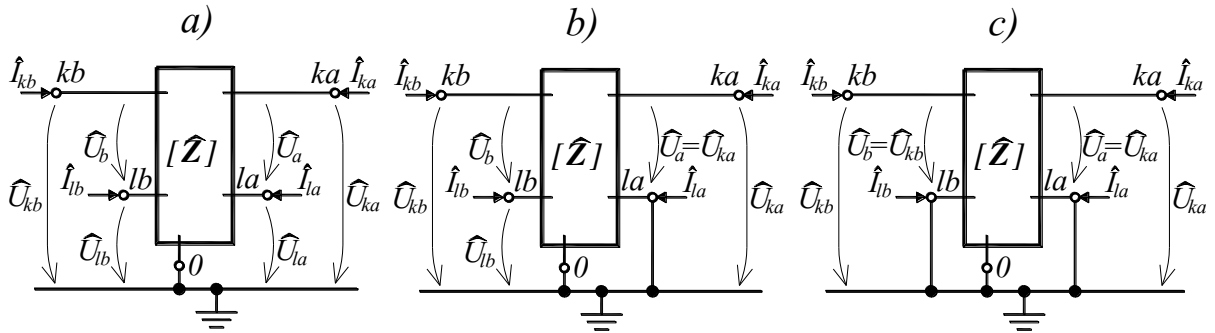


Obr. 37 Štěpení poruch: a) dvě současné jednofázové příčné poruchy ve fází B a C, b) dvoufázová příčná porucha ve fázích B a C. c) schéma dvoufázové příčné nezemní poruchy ve fázích B a C.

7.5 Poruchová impedanční matice

Jak bylo popsáno v subkapitole 7.1, můžeme osamocené poruchy v jednom daném k -tém uzlu sítě řešit injektáží vhodně zvoleného dodatkového proudu $\hat{I}_{1_k}^\Delta$ tak, aby v tomto uzlu vytvořil přesně opačnou hodnotu napětí předporuchového. Proud $\hat{I}_{1_k}^\Delta$ je možno získat

pomocí předporuchového napětí a viděné impedance v k -tém uzlu dle (7.3) a je číselně roven záporné hodnotě zkratového proudu v k -tém uzlu (7.5). Pokud chceme naše výpočty rozšířit o více míst poruch a zároveň rozšířit definici poruchy na spojení jakýchkoli dvou uzlů soustavy²³, je nutno vytvořit převodní vztah mezi vektorem předporuchových napětí v místech poruch a vektorem příslušných dodatkových proudů. Pro tento účel definujeme tzv. bránu poruchy, jako libovolnou dvojici uzlů sítě, mezi kterými dojde k poruše, z nichž libovolný uzel může být označen jako zem. Požadovaný převodní vztah je pak zprostředkován tzv. poruchovou impedanční maticí sítě. Na Obr. 38 a) je vyobrazen obecný případ, kdy v síti dojde ke dvěma současným poruchám v branách a a b . Každá z těchto bran obsahuje uzly k a l , pro bránu a se jedná o uzly ka a la a pro bránu b o uzly kb a lb . Síť popíšeme pomocí impedanční matice $[\hat{\mathbf{Z}}]$ a vyjádříme vztahy mezi napětími a proudy výše uvedených uzlů. Obdobně jako v subkapitole 7.1, uvažujeme pasivní síť a všechny nebránové uzlové proudy jsou pro nás tedy nulové.



Obr. 38 Definice brány poruchy: a) brána a i b jsou typu uzel-uzel, b) brána a je typu uzel-zem a brána b je typu uzel-uzel, c) brána a i b jsou typu uzel-zem

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \\ \vdots \\ \hat{U}_{ka} \\ \hat{U}_{la} \\ \hat{U}_{kb} \\ \hat{U}_{lb} \\ \vdots \\ \hat{U}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{(1,1)} & \hat{Z}_{(1,2)} & \cdots & \hat{Z}_{(1,ka)} & \hat{Z}_{(1,la)} & \hat{Z}_{(1,kb)} & \hat{Z}_{(1,lb)} & \cdots & \hat{Z}_{(1,N)} \\ \hat{Z}_{(2,1)} & \hat{Z}_{(2,2)} & \cdots & \hat{Z}_{(2,ka)} & \hat{Z}_{(2,la)} & \hat{Z}_{(2,kb)} & \hat{Z}_{(2,lb)} & \cdots & \hat{Z}_{(2,N)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{Z}_{(ka,1)} & \hat{Z}_{(ka,2)} & \cdots & \hat{Z}_{(ka,ka)} & \hat{Z}_{(ka,la)} & \hat{Z}_{(ka,kb)} & \hat{Z}_{(ka,lb)} & \cdots & \hat{Z}_{(ka,N)} \\ \hat{Z}_{(la,1)} & \hat{Z}_{(la,2)} & \cdots & \hat{Z}_{(la,ka)} & \hat{Z}_{(la,la)} & \hat{Z}_{(la,kb)} & \hat{Z}_{(la,lb)} & \cdots & \hat{Z}_{(la,N)} \\ \hat{Z}_{(kb,1)} & \hat{Z}_{(kb,2)} & \cdots & \hat{Z}_{(kb,ka)} & \hat{Z}_{(kb,la)} & \hat{Z}_{(kb,kb)} & \hat{Z}_{(kb,lb)} & \cdots & \hat{Z}_{(kb,N)} \\ \hat{Z}_{(lb,1)} & \hat{Z}_{(lb,2)} & \cdots & \hat{Z}_{(lb,ka)} & \hat{Z}_{(lb,la)} & \hat{Z}_{(lb,kb)} & \hat{Z}_{(lb,lb)} & \cdots & \hat{Z}_{(lb,N)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{Z}_{(N,1)} & \hat{Z}_{(N,2)} & \cdots & \hat{Z}_{(N,ka)} & \hat{Z}_{(N,la)} & \hat{Z}_{(N,kb)} & \hat{Z}_{(N,lb)} & \cdots & \hat{Z}_{(N,N)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \hat{I}_{ka} \\ \hat{I}_{la} \\ \hat{I}_{kb} \\ \hat{I}_{lb} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.37)$$

Napětí na obou branách poruch \hat{U}_a a \hat{U}_b vyvolají v síti příslušné bránové proudy \hat{I}_a a \hat{I}_b . Při uvažování zdrojové orientace proudů vtékajících do uzlů definujeme bránové proudy jako:

$$\begin{aligned} \hat{I}_a &= \hat{I}_{ka} = -\hat{I}_{la} \\ \hat{I}_b &= \hat{I}_{kb} = -\hat{I}_{lb} \end{aligned} \quad (7.38)$$

²³ Nejenom uzel-zem

Napětí na branách poruch pak můžeme pomocí (7.37) vyjádřit jako:

$$\begin{aligned}
\hat{U}_a = \hat{U}_{ka} - \hat{U}_{la} &= \underbrace{\left(\hat{Z}_{(ka,ka)} - \hat{Z}_{(ka,la)} \right) \cdot \hat{I}_a + \left(\hat{Z}_{(ka,kb)} - \hat{Z}_{(ka,lb)} \right) \cdot \hat{I}_b}_{\hat{U}_{ka}} - \\
&\quad - \underbrace{\left(\hat{Z}_{(la,ka)} - \hat{Z}_{(la,la)} \right) \cdot \hat{I}_a - \left(\hat{Z}_{(la,kb)} - \hat{Z}_{(la,lb)} \right) \cdot \hat{I}_b}_{\hat{U}_{la}} = \\
&= \underbrace{\left(\hat{Z}_{(ka,ka)} - \hat{Z}_{(ka,la)} - \hat{Z}_{(la,ka)} + \hat{Z}_{(la,la)} \right) \cdot \hat{I}_a}_{\hat{Z}_{(a,a)}^P} + \\
&\quad + \underbrace{\left(\hat{Z}_{(ka,kb)} - \hat{Z}_{(ka,lb)} - \hat{Z}_{(la,kb)} + \hat{Z}_{(la,lb)} \right) \cdot \hat{I}_b}_{\hat{Z}_{(a,b)}^P} \\
&= \hat{Z}_{(a,a)}^P \cdot \hat{I}_a + \hat{Z}_{(a,b)}^P \cdot \hat{I}_b \\
\hat{U}_b = \hat{U}_{kb} - \hat{U}_{lb} &= \underbrace{\left(\hat{Z}_{(kb,ka)} - \hat{Z}_{(kb,la)} - \hat{Z}_{(lb,ka)} + \hat{Z}_{(lb,la)} \right) \cdot \hat{I}_a}_{\hat{Z}_{(b,a)}^P} + \\
&\quad + \underbrace{\left(\hat{Z}_{(kb,kb)} - \hat{Z}_{(kb,lb)} - \hat{Z}_{(lb,kb)} + \hat{Z}_{(lb,lb)} \right) \cdot \hat{I}_b}_{\hat{Z}_{(b,b)}^P} \\
&= \hat{Z}_{(b,a)}^P \cdot \hat{I}_a + \hat{Z}_{(b,b)}^P \cdot \hat{I}_b
\end{aligned} \tag{7.39}$$

Poruchovou impedanční matici pak můžeme napsat jako:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{(a,a)}^P & \hat{Z}_{(a,b)}^P \\ \hat{Z}_{(b,a)}^P & \hat{Z}_{(b,b)}^P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \end{bmatrix} \tag{7.40}$$

Ve zjednodušené formě zápisu pak:

$$\hat{U} = \left[\hat{Z}^P \right] \cdot \hat{I} \tag{7.41}$$

Pomocí (7.39) a (7.40) tak obdržíme předpis pro získání prvků poruchové impedanční matice $\left[\hat{Z}^P \right]$ z prvků plné síťové matice $\left[\hat{Z} \right]$ jako:

$$\begin{aligned}
\hat{Z}_{(x,x)}^P &= \hat{Z}_{(kx,kx)} - \hat{Z}_{(kx,lx)} - \hat{Z}_{(lx,kx)} + \hat{Z}_{(lx,lx)} \\
\hat{Z}_{(x,y)}^P &= \hat{Z}_{(kx,ky)} - \hat{Z}_{(kx,ly)} - \hat{Z}_{(lx,ky)} + \hat{Z}_{(lx,ly)}
\end{aligned} \tag{7.42}$$

Tento předpis je však použitelný pouze pro brány typu uzel-uzel z Obr. 38 a). V případě, že je jedna z bran umístěna mezi uzel a zem, tedy typu uzel-zem zobrazeném na Obr. 38 b), musí dojít k odstranění příslušného řádku v matici (7.37). Pro situaci zobrazenou na Obr. 38 b), kdy je uzemněn uzel la , musí být řádek, příslušný tomuto uzlu, odstraněn. Vyznačená část v maticové rovnici (7.37) tedy přejde na:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{ka} \\ \hat{U}_{kb} \\ \hat{U}_{lb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{(ka,ka)} & \hat{Z}_{(ka,kb)} & \hat{Z}_{(ka,lb)} \\ \hat{Z}_{(kb,ka)} & \hat{Z}_{(kb,kb)} & \hat{Z}_{(kb,lb)} \\ \hat{Z}_{(lb,ka)} & \hat{Z}_{(lb,kb)} & \hat{Z}_{(lb,lb)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_{ka} \\ \hat{I}_{kb} \\ \hat{I}_{lb} \end{bmatrix} \quad (7.43)$$

Obdobným vyjádřením jako v (7.39) získáme napětí na branách poruch \hat{U}_a a \hat{U}_b jako:

$$\begin{aligned} \hat{U}_a = \hat{U}_{ka} &= \underbrace{\hat{Z}_{(ka,ka)}}_{\hat{Z}_{(a,a)}^P} \cdot \hat{I}_a + \underbrace{(\hat{Z}_{(ka,kb)} - \hat{Z}_{(ka,lb)})}_{\hat{Z}_{(a,b)}^P} \cdot \hat{I}_b \\ &= \hat{Z}_{(a,a)}^P \cdot \hat{I}_a + \hat{Z}_{(a,b)}^P \cdot \hat{I}_b \\ \hat{U}_b = \hat{U}_{kb} - \hat{U}_{lb} &= \underbrace{(\hat{Z}_{(kb,ka)} - \hat{Z}_{(lb,ka)})}_{\hat{Z}_{(b,a)}^P} \cdot \hat{I}_a + \\ &+ \underbrace{(\hat{Z}_{(kb,kb)} - \hat{Z}_{(kb,lb)} - \hat{Z}_{(lb,kb)} + \hat{Z}_{(lb,lb)})}_{\hat{Z}_{(b,b)}^P} \cdot \hat{I}_b \\ &= \hat{Z}_{(b,a)}^P \cdot \hat{I}_a + \hat{Z}_{(b,b)}^P \cdot \hat{I}_b \end{aligned} \quad (7.44)$$

Obecný předpis pro prvky poruchové impedanční matice sítě $[\hat{Z}^P]$ z prvků plné síťové matice $[\hat{Z}]$ bude:

$$\begin{aligned} \hat{Z}_{(x,x)}^P &= \hat{Z}_{(kx,kx)} \\ \hat{Z}_{(x,y)}^P &= \hat{Z}_{(kx,ky)} - \hat{Z}_{(kx,ly)} \\ \hat{Z}_{(y,x)}^P &= \hat{Z}_{(ky,kx)} - \hat{Z}_{(ly,kx)} \end{aligned} \quad (7.45)$$

kde uzel lx brány x je uzemněn. Zbývající prvek $\hat{Z}_{(y,y)}^P$ získáme pomocí předpisu (7.42).

Pro poslední případ na Obr. 38 c), kdy jsou oba uzly la i lb uzemněny přejde vyznačená část (7.37) na:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{ka} \\ \hat{U}_{kb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{(ka,ka)} & \hat{Z}_{(ka,kb)} \\ \hat{Z}_{(kb,ka)} & \hat{Z}_{(kb,kb)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_{ka} \\ \hat{I}_{kb} \end{bmatrix} \quad (7.46)$$

Napětí na branách budou:

$$\begin{aligned}
 \hat{U}_a = \hat{U}_{ka} &= \hat{Z}_{(ka,ka)} \cdot \hat{I}_a + \hat{Z}_{(ka,kb)} \cdot \hat{I}_b \\
 &= \hat{Z}_{(a,a)}^P \cdot \hat{I}_a + \hat{Z}_{(a,b)}^P \cdot \hat{I}_b \\
 \hat{U}_b = \hat{U}_{kb} &= \hat{Z}_{(kb,ka)} \cdot \hat{I}_a + \hat{Z}_{(kb,kb)} \cdot \hat{I}_b \\
 &= \hat{Z}_{(b,a)}^P \cdot \hat{I}_a + \hat{Z}_{(b,b)}^P \cdot \hat{I}_b
 \end{aligned} \tag{7.47}$$

A obecný předpis pro prvky poruchové impedanční matice sítě $[\hat{\mathbf{Z}}^P]$ z prvků plné síťové matice $[\hat{\mathbf{Z}}]$ bude:

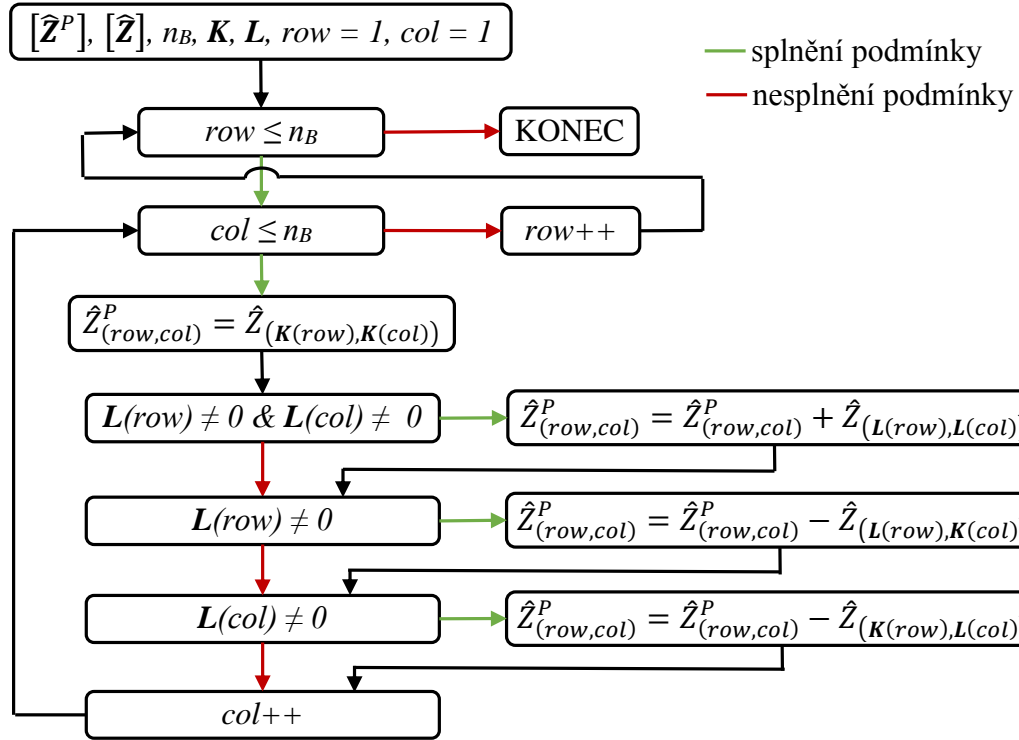
$$\hat{Z}_{(x,y)}^P = \hat{Z}_{(kx,ky)} \tag{7.48}$$

Z výše uvedených vztahů (7.42), (7.45) a (7.48) můžeme vytvořit algoritmus pro tvorbu poruchové impedanční matice sítě $[\hat{\mathbf{Z}}^P]$ z plné síťové matice $[\hat{\mathbf{Z}}]$. Jeden z možných algoritmů je zobrazen na Obr. 39. Nejprve je nutno vytvořit pomocné vektory \mathbf{K} a \mathbf{L} definující páry uzlů každé brány. V případě, kdy je jeden uzel brány spojen se zemí, je tento označen jako 0. Například definice vektorů \mathbf{K} a \mathbf{L} pro tři brány poruchy a, b a c , kde brány a a c jsou typu uzel-uzel a brána b je typu uzel-zem bude následující:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{K} &= (ka, kb, kc)^T \\
 \mathbf{L} &= (la, 0, lc)^T
 \end{aligned} \tag{7.49}$$

Dále je třeba definovat proměnou n_B určující výslednou velikost poruchové matice, pro příklad (7.49) tedy platí $n_B = 3$. Dále je poruchová matice iterována přes všechny své řádky *row* a sloupce *col* a dojde k naplnění příslušných pozic dle vztahů (7.42), (7.45) a (7.48). Aplikací výše zmíněného algoritmu pro úlohu (7.49) tak dostaneme poruchovou matici $[\hat{\mathbf{Z}}^P]$ jako:

$$\begin{bmatrix}
 \hat{Z}_{(ka,ka)} - \hat{Z}_{(ka,la)} - \hat{Z}_{(la,ka)} + \hat{Z}_{(la,la)} & \hat{Z}_{(ka,kb)} - \hat{Z}_{(la,kb)} & \hat{Z}_{(ka,kc)} - \hat{Z}_{(ka,lc)} - \hat{Z}_{(la,kc)} + \hat{Z}_{(la,lc)} \\
 \hat{Z}_{(kb,ka)} - \hat{Z}_{(kb,la)} & \hat{Z}_{(kb,kb)} & \hat{Z}_{(kb,kc)} - \hat{Z}_{(kb,lc)} \\
 \hat{Z}_{(kc,ka)} - \hat{Z}_{(kc,la)} - \hat{Z}_{(lc,ka)} + \hat{Z}_{(lc,la)} & \hat{Z}_{(kc,kb)} - \hat{Z}_{(lc,kb)} & \hat{Z}_{(kc,kc)} - \hat{Z}_{(kc,lc)} - \hat{Z}_{(lc,kc)} + \hat{Z}_{(lc,lc)}
 \end{bmatrix} \tag{7.50}$$



Obr. 39 Blokový diagram algoritmu pro tvorbu poruchové impedanční matice

7.6 Alokace proudů z bran poruch do všech uzlů sítě

Většina všech výpočtů při řešení poruch metodou simultánních poruch je vždy omezena pouze na brány poruchy. Všechny základní operace jsou prováděny s vektory o rozměrech ($n_B \times 1$) a s maticemi o rozměrech ($n_B \times n_B$), kde n_B je počet bran poruch. Tyto vektory a matice jsou pak označeny jako poruchové a odlišeny od plných vektorů pomocí značky P v jejich horním indexu. Jednou ze závěrečných operací metody je získání plného vektoru napětí při poruše \hat{U} příslušných složkových soustav jako součet plného vektoru předporuchových napětí \hat{U}^\otimes a plného vektoru napětí dodatkových \hat{U}^Δ . Dodatková napětí jsou vždy získána jako násobek plné síťové matice $[\hat{Z}]$ s plným vektorem dodatkových proudů \hat{I}^Δ :

$$\hat{U} = \hat{U}^\otimes + \hat{U}^\Delta = \hat{U}^\otimes + [\hat{Z}] \cdot \hat{I}^\Delta \quad (7.51)$$

Plný vektor dodatkových proudů \hat{I}^Δ je možno získat z vektoru dodatkových proudů v branách poruch $\hat{I}^{\Delta P}$ za pomoci algoritmu alokace. Blokový diagram algoritmu je zobrazen na Obr. 40. Pozice ve vektorech K a L , obsahující počáteční a koncové uzly jednotlivých bran poruch, musí být postupně iterovány skrze všechny brány poruchy $1, 2, \dots, i_f, \dots, n_B$. Vyplnění příslušných pozic plného vektoru \hat{I}^Δ musí být provedeno v souvislosti se zvolenou definicí bránových proudů (7.38).

V případě brány a typu uzel-zem je na příslušné pozici ve vektoru K umístěno číslo počátečního uzlu ka a na příslušnou pozici ve vektoru L umístěn uzel $la = 0$ (0 zde značí zem). V tomto případě umístíme na pozici ka vektoru \hat{I}^Δ příslušný proud z pozice if vektoru $\hat{I}^{\Delta P}$.

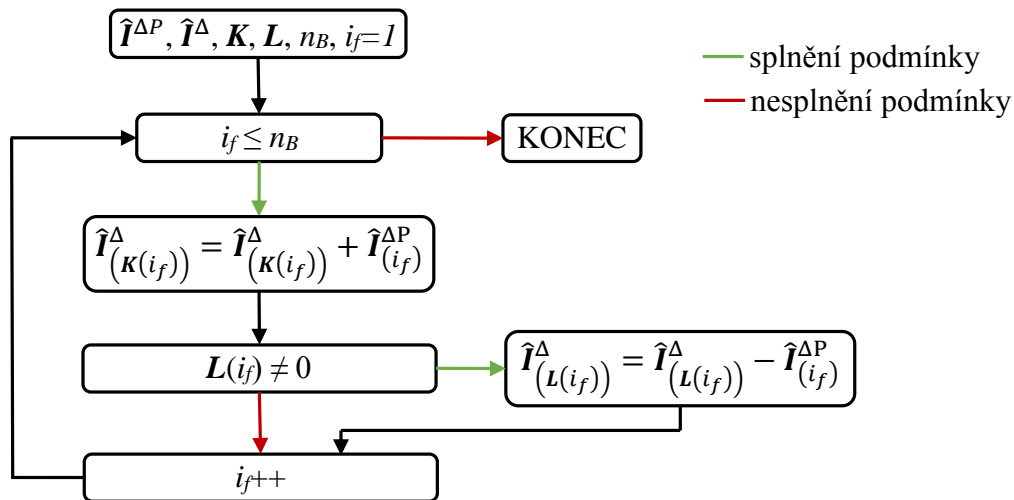
V případě brány a typu uzle-uzel je na příslušné pozici ve vektoru \mathbf{K} a \mathbf{L} umístěno číslo počátečního ka , respektive koncového la uzlu. V tomto případě umístíme na pozici ka vektoru $\hat{\mathbf{I}}^\Delta$ příslušný proud z pozice i_f vektoru $\hat{\mathbf{I}}^{\Delta P}$. V souvislosti s definicí (7.38) pak umístíme na pozici ka vektoru $\hat{\mathbf{I}}^\Delta$ zápornou hodnotu proudu z pozice i_f vektoru $\hat{\mathbf{I}}^{\Delta P}$.

Předpokládejme síť o 10 uzlech a následující uspořádání vektorů \mathbf{K} , \mathbf{L} a $\hat{\mathbf{I}}^{\Delta P}$:

$$\begin{aligned}\mathbf{K} &= (1, 7, 2)^T \\ \mathbf{L} &= (5, 0, 9)^T \\ \hat{\mathbf{I}}^{\Delta P} &= (\hat{i}_a^\Delta, \hat{i}_b^\Delta, \hat{i}_c^\Delta)^T\end{aligned}\quad (7.52)$$

Algoritmus alokace Obr. 40 nám jako výstup poskytne plný vektor dodatkových proudů jako:

$$\hat{\mathbf{I}}^\Delta = (\hat{i}_a^\Delta, \hat{i}_c^\Delta, 0, 0, -\hat{i}_a^\Delta, 0, \hat{i}_b^\Delta, 0, -\hat{i}_c^\Delta, 0)^T \quad (7.53)$$



Obr. 40 Blokový diagram algoritmu alokace

7.7 Náhradní články vedení a transformátoru

Výše uvedený popis metody simultánních poruch předpokládá popis sítě pomocí admitanční matice. Všechny prvky sítě jsou tedy reprezentovány pomocí obecného π -článku na Obr. 41 a). Tento článek je použitelný pro popis vedení, kdy může být podélná admittance $\hat{Y}_{km} = \hat{Y}_{mk}$ jednoduše odvozena z podélných parametrů vedení a příčné admittance \hat{Y}_{k0} a \hat{Y}_{m0} z parametrů příčných (kapacita a svod). Pro obecný popis prvků s převodem (transformátorů) je však tento článek nedostačující. V případě, kdy jsou velikosti nominálních napětí \hat{U}_k a \hat{U}_m různé, ale jejich fázové natočení je stejné, je možno správnou volbou vztažných napětí v uzlech k a m docílit převodu $p = 1$. V tomto případě je možno použít obecný článek z Obr. 41 a) také pro popis transformátoru. V případě, kdy se jedná o transformátor s nenulovým hodinovým úhlem, a nominální napětí \hat{U}_k a \hat{U}_m jsou tedy obecně různá, můžeme použít některý ze článků s převodem na Obr. 41 b), c) nebo d). Náhradní parametry obecného π -článku pak mohou být určeny ekvivalencí s příslušným článkem.

Pro ilustraci uvedeme ekvivalenci obecného π -článku z Obr. 41 a) s π -článkem s převodem z Obr. 41 b). Nejprve definujeme převod jako:

$$\hat{p} = \frac{\hat{U}_k}{\hat{U}_t} \quad (7.54)$$

Protože výkony na obou stranách pomocného transformátoru musí být zachovány, musí platit:

$$\hat{S}_k = \hat{U}_k \cdot \hat{I}_k^* = -\hat{U}_t \cdot \hat{I}_t^* \quad (7.55)$$

$$\hat{I}_k^* \cdot \frac{\hat{U}_k}{\hat{U}_t} = -\hat{I}_t^* \quad (7.56)$$

$$\hat{I}_k \cdot \hat{p}^* = -\hat{I}_t \quad (7.57)$$

Pro proudy vstupující do π -článku mohou být sestaveny následující rovnice:

$$\hat{I}_k = -\frac{1}{\hat{p}} \cdot [(\hat{U}_m - \hat{U}_t) \cdot \hat{Y}_T - \hat{U}_t \cdot \hat{Y}_1] = \hat{U}_m \cdot \left(-\frac{\hat{Y}_T}{\hat{p}} \right) + \hat{U}_k \cdot \left(\frac{\hat{Y}_T + \hat{Y}_1}{\hat{p} \cdot \hat{p}^*} \right) \quad (7.58)$$

$$\hat{I}_m = (\hat{U}_m - \hat{U}_t) \cdot \hat{Y}_T + \hat{U}_m \cdot \hat{Y}_2 = \hat{U}_m \cdot (\hat{Y}_T + \hat{Y}_2) + \hat{U}_k \cdot \left(-\frac{\hat{Y}_T}{\hat{p}} \right) \quad (7.59)$$

Obdobné rovnice mohou být sestaveny také pro obecný π -článek:

$$\hat{I}_k = (\hat{U}_k - \hat{U}_m) \cdot \hat{Y}_{km} + \hat{U}_k \cdot \hat{Y}_{k0} = \hat{U}_m \cdot (-\hat{Y}_{km}) + \hat{U}_k \cdot (\hat{Y}_{k0} + \hat{Y}_{km}) \quad (7.60)$$

$$\hat{I}_m = (\hat{U}_m - \hat{U}_k) \cdot \hat{Y}_{mk} + \hat{U}_m \cdot \hat{Y}_{m0} = \hat{U}_m \cdot (\hat{Y}_{m0} + \hat{Y}_{mk}) + \hat{U}_k \cdot (-\hat{Y}_{mk}) \quad (7.61)$$

Ekvivalenci (7.58) s (7.60) a (7.59) s (7.61) získáme:

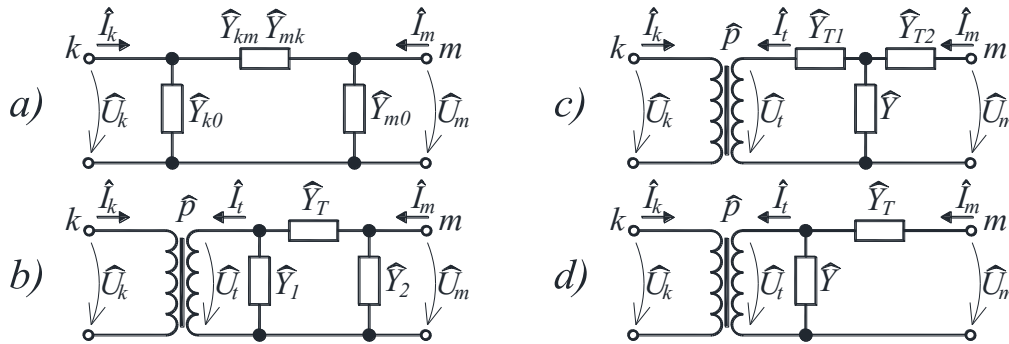
$$\boxed{\hat{Y}_{km} = \frac{\hat{Y}_T}{\hat{p}^*}} \quad (7.62)$$

$$\begin{aligned} \hat{Y}_{k0} + \hat{Y}_{km} &= \frac{\hat{Y}_T + \hat{Y}_1}{\hat{p} \cdot \hat{p}^*} \\ \hat{Y}_{k0} &= \frac{\hat{Y}_T + \hat{Y}_1}{\hat{p} \cdot \hat{p}^*} - \hat{Y}_{km} = \frac{\hat{Y}_T + \hat{Y}_1}{\hat{p} \cdot \hat{p}^*} - \frac{\hat{Y}_T}{\hat{p}} \Rightarrow \boxed{\hat{Y}_{k0} = \hat{Y}_T \cdot \left(\frac{1 - \hat{p}}{\hat{p}^2} \right) + \frac{\hat{Y}_1}{\hat{p}^2}} \end{aligned} \quad (7.63)$$

$$\boxed{\hat{Y}_{mk} = \frac{\hat{Y}_T}{\hat{p}}} \quad (7.64)$$

$$\hat{Y}_{m0} = \hat{Y}_T + \hat{Y}_2 - \hat{Y}_{mk} = \hat{Y}_T + \hat{Y}_2 - \frac{\hat{Y}_T}{\hat{p}} \Rightarrow \boxed{\hat{Y}_{m0} = \hat{Y}_T \cdot \left(1 - \frac{1}{\hat{p}} \right) + \hat{Y}_2} \quad (7.65)$$

Obdobným způsobem můžeme získat ekvivalence i pro ostatní typy článků. Vztahy pro výpočet parametrů obecného π -článku ze článků na Obr. 41 b), c) a d) jsou pro obě možnosti volby převodu \hat{p} shrnuty v Tab. 7.



Obr. 41 Ekvivalence článků s převodem a obecného π -článku: a) obecný π -článek, b) π -článek s převodem, c) T-článek s převodem, d) Γ -článek s převodem.

Tab. 7 Vztahy pro výpočet parametrů obecného π -článku ze článků s převodem.

\hat{p}	\hat{Y}_{k0}	\hat{Y}_{m0}	\hat{Y}_{km}	\hat{Y}_{mk}
π -článek s převodem				
$\frac{\hat{U}_k}{\hat{U}_t}$	$\hat{Y}_T \cdot \left(\frac{1-\hat{p}}{p^2} \right) + \frac{\hat{Y}_1}{p^2}$	$\hat{Y}_T \cdot \left(1 - \frac{1}{\hat{p}} \right) + \hat{Y}_2$	$\frac{\hat{Y}_T}{\hat{p}^*}$	$\frac{\hat{Y}_T}{\hat{p}}$
$\frac{\hat{U}_t}{\hat{U}_k}$	$\hat{Y}_T \cdot (p^2 - \hat{p}^*) + \hat{Y}_1 \cdot p^2$	$\hat{Y}_T \cdot (1 - \hat{p}) + \hat{Y}_2$	$\hat{p}^* \cdot \hat{Y}_T$	$\hat{p} \cdot \hat{Y}_T$
T-článek s převodem				
$\frac{\hat{U}_k}{\hat{U}_t}$	$\frac{\hat{Y}_{T1}(\hat{Y} + \hat{Y}_{T2} - p \cdot \hat{Y}_{T2})}{p^2(\hat{Y} + \hat{Y}_{T1} + \hat{Y}_{T2})}$	$\frac{\hat{Y}_{T2} \cdot (\hat{p} \cdot (\hat{Y} + \hat{Y}_{T1}) - \hat{Y}_{T1})}{\hat{p} \cdot (\hat{Y} + \hat{Y}_{T1} + \hat{Y}_{T2})}$	$\frac{\hat{Y}_{T1} \cdot \hat{Y}_{T2}}{(\hat{Y} + \hat{Y}_{T1} + \hat{Y}_{T2}) \cdot \hat{p}^*}$	$\frac{\hat{Y}_{T1} \cdot \hat{Y}_{T2}}{(\hat{Y} + \hat{Y}_{T1} + \hat{Y}_{T2}) \cdot \hat{p}}$
$\frac{\hat{U}_t}{\hat{U}_k}$	$\frac{\hat{Y}_{T1}(\hat{p}^* \cdot (\hat{Y} + \hat{Y}_{T2}) - p \cdot \hat{Y}_{T2})}{\hat{Y} + \hat{Y}_{T1} + \hat{Y}_{T2}}$	$\frac{\hat{Y}_{T2} \cdot (\hat{Y} + \hat{Y}_{T1} - \hat{p} \cdot \hat{Y}_{T1})}{\hat{Y} + \hat{Y}_{T1} + \hat{Y}_{T2}}$	$\frac{\hat{Y}_{T1} \cdot \hat{Y}_{T2} \cdot \hat{p}^*}{\hat{Y} + \hat{Y}_{T1} + \hat{Y}_{T2}}$	$\frac{\hat{Y}_{T1} \cdot \hat{Y}_{T2} \cdot \hat{p}}{\hat{Y} + \hat{Y}_{T1} + \hat{Y}_{T2}}$
Γ -článek s převodem				
$\frac{\hat{U}_k}{\hat{U}_t}$	$\hat{Y}_T \cdot \left(\frac{1-\hat{p}}{p^2} \right) + \frac{\hat{Y}}{p^2}$	$\hat{Y}_T \cdot \left(1 - \frac{1}{\hat{p}} \right)$	$\frac{\hat{Y}_T}{\hat{p}^*}$	$\frac{\hat{Y}_T}{\hat{p}}$
$\frac{\hat{U}_t}{\hat{U}_k}$	$\hat{Y}_T \cdot (p^2 - \hat{p}^*) + \hat{Y} \cdot p^2$	$\hat{Y}_T \cdot (1 - \hat{p})$	$\hat{p}^* \cdot \hat{Y}_T$	$\hat{p} \cdot \hat{Y}_T$

8 Program SimPoruchy

Cílem programu je poskytnout uživateli jednoduchý nástroj návrhu nastavení nadproudových ochran sítě. Do programu je nejprve vloženo schéma vyšetřované sítě a umístění požadovaných ochranných článků. Pomocí metody Simultánních poruch, popsané v kapitole 7, jsou následně vypočteny různé poruchové stavy sítě a za pomoci vhodně zvolené optimalizace pak stanoveny parametry výsledného nastavení. Cílem optimalizace je určit koeficienty charakteristik jednotlivých ochran tak, aby bylo dosaženo co možná nejmenší hodnoty sumy vybavovacích časů všech ochran a zároveň nebyla porušena minimální hodnota požadovaného selektivního času popsaná v kapitole 4. Vypočtené nastavení je následně automaticky ověřeno a zhodnoceno. Zároveň program umožňuje také ověřit nastavení zadané uživatelem.

Program je možno použít jak pro nastavení směrových nadproudových ochran sítí s decentralizovanou výrobou energie, tak pro klasické radiální sítě chráněné ochranami nesměrovými. U ochranných článků jsou pak k dispozici dva typy charakteristik, proudově nezávislé charakteristiky a časově závislé inverzní charakteristiky dle IEC standartu.

Program vznikl ve své základní verzi 1.0 jako součást diplomové práce [51], kdy umožňoval pouze výpočty ustálených a poruchových stavů systému. Jako programovací jazyk byl pro tento účel zvolen jazyk Java, který umožnil vytvořit přehledné grafické uživatelské prostředí a výslednou prezentaci výsledků (viz. Obr. 42). Velkou výhodou tohoto jazyka je jeho multiplatformita. Program je tedy možno spustit na většině známých operačních systémů. V současné době je program stále rozšiřován a laděn. Ve verzi 2.0 došlo k rozšíření programu o výpočet pravděpodobnostního ustáleného stavu a ve verzi 3.0 pak k rozšíření o optimalizaci nastavení nadproudových ochran. Program ve verzi 3.0 spolu s výukovými videi je možno nalézt na příloženém CD.

8.1 V jednotlivých verzích program umožňuje:

SimPoruchy 1.0

- výpočet ustáleného stavu sítě pomocí Newton-Raphsonovy metody,
- výpočet mnohonásobných (simultánních) poruch v síti,
- zobrazení uzlových napětí ve formě fázorových diagramů,
- výpočet poruchových/předporuchových proudů ve všech větvích sítě,
- výpočet poruch s vloženou impedancí do poruchy,
- možnost použití a testování základních typů ochran (nadproudová, nadproudová směrová, rozdílová, nadpět'ová a podpět'ová ochrana),
- výpočet základních typů zkratu ve všech uzlech sítě (trojfázový, dvoufázový zemní, dvoufázový a jednofázový).

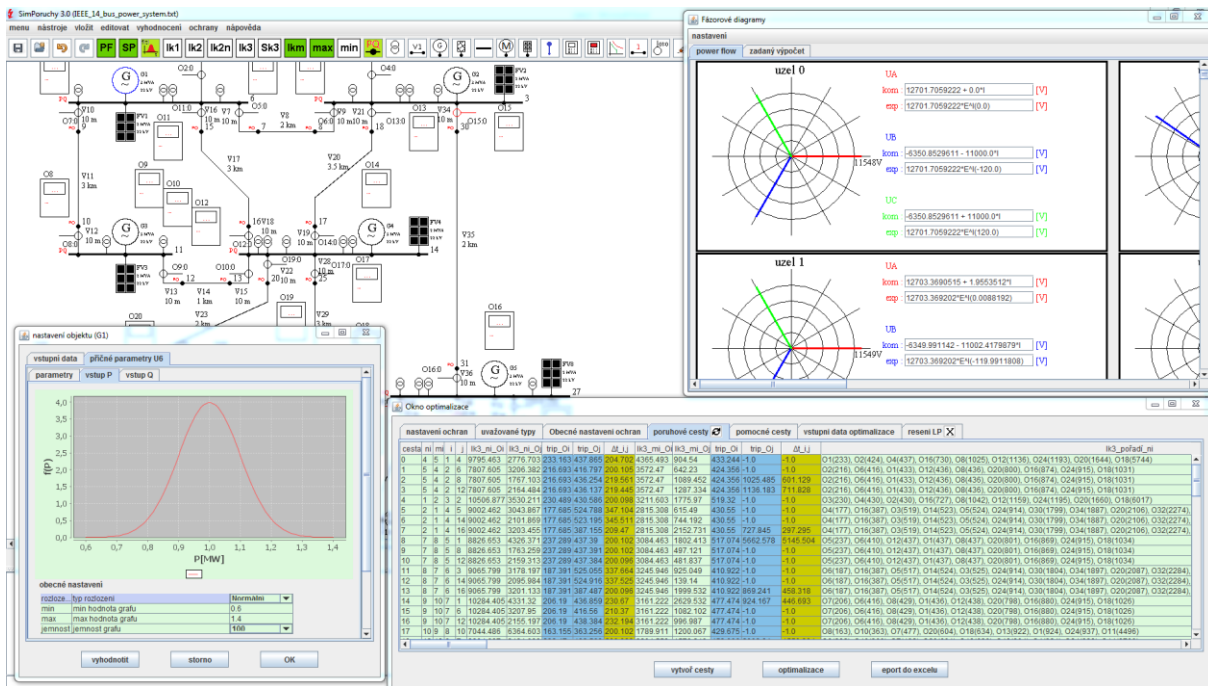
SimPoruchy 2.0

- výpočet pravděpodobnostního ustáleného stavu (jsou zadány hustoty pravděpodobnosti zdrojů a jsou vypočteny hustoty pravděpodobností proudů tekoucích větvemi sítě).

SimPoruchy 3.0

- zobrazit charakteristiky nadproudových ochran,

- propojit reakce ochran s vedeními (po reakci příslušné ochrany je možno tuto ochranu deaktivovat spolu s daným pomocným úsekem vedení a výpočet opakovat),
- optimalizace koeficientů charakteristik nadproudových ochran (Možno volit z jednoduché optimalizace časových multiplikátorů M pomocí lineárního programování (kapitola 6.4), či optimalizace časových multiplikátorů M , popudových proudů I_{pcp} a koeficientu strmosti E pomocí SOMA metody (kapitola 6.5)),
- prověřit správnost reakce ochran, tedy dodržení selektivních časů mezi primárními a sekundárními ochranami, dodržení dostatečně nízké hodnoty vybavovacích časů a dodržení správného pořadí jejich vybavení.



Obr. 42: Ukázka uživatelského prostředí programu SimPoruchy

8.2 Rozpoznání směru poruchového výkonu

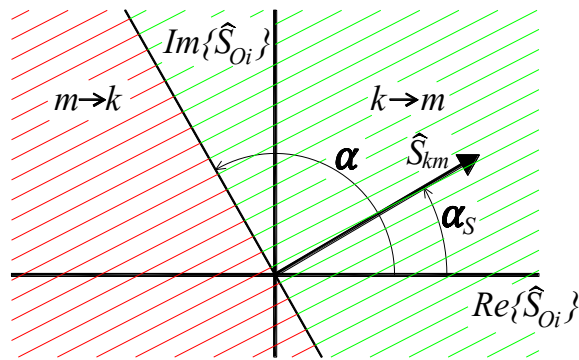
Důležitou součástí nadproudových směrových ochran je rozpoznání správného směru zkratového příspěvku tekoucího příslušnou ochranou. Proud vtékající do obecného π -článku na Obr. 41 a) je možno napsat jako:

$$\hat{I}_{km} = (\hat{U}_k - \hat{U}_m) \cdot \hat{Y}_{km} + \hat{U}_k \cdot \hat{Y}_k \quad (8.1)$$

Výkon pak určíme jako:

$$\hat{S}_{km} = \hat{U}_k \cdot \hat{I}_{km}^* = S_{km} \cdot e^{j\alpha_s} \quad (8.2)$$

Určení směru protékajícího proudu (výkonu) je patrné na Obr. 43. V případě, kdy se úhel výkonu α_s pohybuje v zeleně označené oblasti, je tento směr vyhodnocen jako kladný (od uzlu k k uzlu m). V případě, kdy se úhel výkonu pohybuje v červeně označené oblasti, je určen jako záporný (od uzlu m k uzlu k). V programu je rozdělení na obě oblasti v každé ochraně možno provést nastavením úhlu α (úhel směru).



Obr. 43 Určení směru proudu (výkonu) protékaného ochranou.

8.3 Tvorba poruchových a pomocných cest

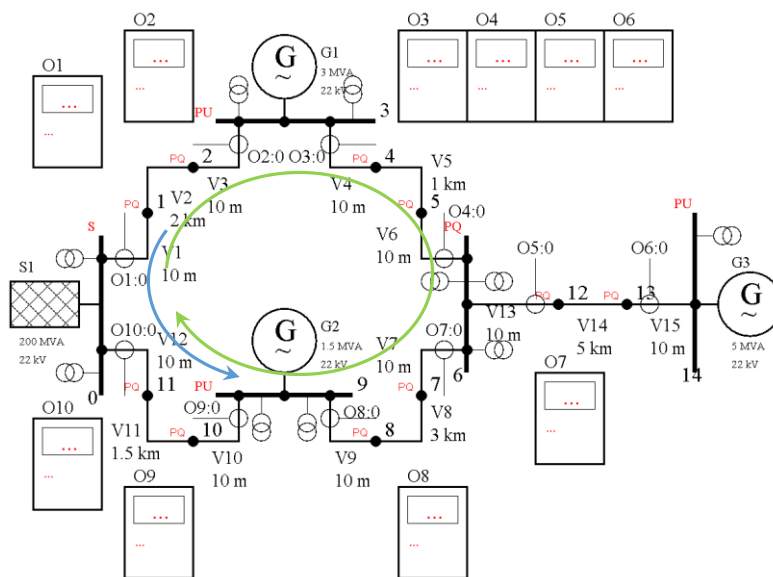
Před samotnou optimalizací koeficientů ochran popsanou v kapitole 6 musí být nejprve určeny všechny primární a sekundární ochrany, tedy požadované vektory I a J_i . Pro jejich určení slouží tzv. poruchové cesty.

Princip je patrný na Obr. 44, modrou šipkou je zde znázorněna poruchová cesta páru ochran O_1 a O_9 . V případě, kdy chceme vytvořit poruchovou cestu o primární ochraně O_1 , neboli chceme zjistit všechny ochrany, které musí být s ochranou O_1 selektivní, musíme nejprve určit směr cesty. Směr cesty volíme v protisměru působení ochrany. Jelikož má ochrana O_1 svůj proudový měnič připojen na vedení V_1 a chrání sekci vedení V_2 , působí ve směru od uzlu 0 k uzlu 1. Požadovaný směr (od uzlu 1 k uzlu 0) spolu s informací o počátečním uzlu cesty (uzel 0) předáme vedení V_1 . Vedení V_1 nyní pošle dotaz všem ostatním vedením a zjistí tak, zda není některé z nich připojeno do uzlu 0. Tomuto požadavku v našem případě vyhovuje pouze vedení V_{12} (V případě, kdy je nalezeno více takových vedení, je vytvořen příslušný počet nových poruchových cest). Vedení V_{12} je následně předána informace o počátečním uzlu cesty (uzel 0) a požadovaném směru (od uzlu 0 k uzlu 11). Tento postup se dále opakuje až do uzlu 10 a vedení V_{10} . Protože u tohoto vedení se předpokládá možný výskyt ochrany působící ve stejném směru jako ochrana O_1 , je na vedení V_{10} vznesen dotaz, zda takovou ochranu obsahuje. V případě, kdy je taková ochrana nalezena, je poruchová cesta ukončena a je vytvořen pár primární a sekundární ochrany. Protože je ochrana O_9 primárně určena k ochraně úseku vedení V_{11} , musí působit ve stejném směru jako ochrana O_1 . Po nalezení ochrany O_9 je tak vytvořena poruchová cesta páru ochran O_1 - O_9 . V případě, kdy pro danou ochranu není nalezena žádná selektivní ochrana, zůstává poruchová cesta otevřená a na danou ochranu není vztahován žádný požadavek selektivity (ve schématu na Obr. 44 je takovou ochranou pouze ochrana O_6). Výše uvedená poruchová cesta je spolu s ostatními cestami pro schéma z Obr. 44 zobrazena na Obr. 45. V programu SimPoruchy je poruchová cesta jedním z nejdůležitějších objektů sloužící ke konstrukci výsledné cílové funkce, včetně zprostředkování všech příslušných omezení a samotné interpretaci výsledného nastavení. Kromě informací o primární (i) a sekundární (j) ochraně pak obsahuje další informace popsané v Tab. 8.

Jak bylo zmíněno výše, poruchová cesta slouží nejenom ke tvorbě cílové funkce, ale také k interpretaci optimalizovaného nastavení. V modře označených sloupcích trip_Oi a trip_Oj jsou uvedeny vybavovací časy primárních, respektive sekundárních ochran příslušného zkratového typu pro aktuální nastavení ochran. Červenou barvou jsou pak označeny vybavovací časy vyšší, než předem zadaná hodnota jejich maxima (v tomto případě vyšších než 400 ms). V případech, kdy není možno danou hodnotu stanovit, je hodnota buňky nastavena na -1. Tato

hodnota může být v jednotlivých sloupcích tabulky poruchových cest interpretována různým způsobem. Ve sloupci j je takto označena cesta bez sekundární ochrany. Na schématu z Obr. 44 je touto cestou pouze cesta 7. Nepřítomnost sekundární ochrany se následně projeví ve sloupcích $I_{k?_{ni_Oj}}$ a $I_{k?_{mi_Oj}}$, kdy není možno určit proudy protékající sekundární ochranou a ve sloupcích $trip_{Oj}$ a $\Delta t_{i,j}$, kdy není možno určit časy vybavení sekundární ochrany a s tím spojené selektivní časy. Ve sloupcích $trip_{Oj}$ může být hodnota -1 způsobena také nemožností stanovit vybavovací čas sekundární ochrany, kdy je nastavený popudový proud vyšší než příslušný zkratový příspěvek²⁴. Pro schéma z Obr. 44 k tomuto jevu dochází u poruchových cest 0, 1, 8, 10, 11 a 12.

V předposledním a posledním sloupci tabulky poruchových cest jsou uvedena pořadí odpínání ochran pro zkrat v primárním, respektive sekundárním uzlu. Například pro cestu 0 lze předposlední sloupec označený jako „ $I_{k3_pořadí_ni}$ “ interpretovat následovně: Při trojfázovém zkratu v uzlu 1 reaguje nejprve primární ochrana O_1 v čase 160 ms. V případě, kdy by nedošlo k reakci O_1 , reaguje následně O_2 v čase 348 ms²⁵. Ve stejném smyslu pak dojde k reakci ostatních zde uvedených ochran. Pokud nastane případ, kdy není správná reakce ochran dodržena, jsou tyto dva sloupce označeny červenou barvou. Ve skutečnosti obsahuje tabulka poruchových cest všechny uvažované typy zkratů a může tak dosahovat značné šířky. Z prostorových důvodů jsou tedy na Obr. 45 vyobrazeny pouze informace pro trojfázový a jednofázový zkrat.



Obr. 44 Tvorba poruchových a pomocných cest.

²⁴ U primárních ochran je před samotnou optimalizací vždy kontrolována povolená hodnota popudového proudu dle podmínky (6.16) a ve sloupcích $trip_{Oj}$ tak k tomuto jevu doházet nemůže.

²⁵ V případě, kdy dojde k reakci O_1 , bude dle (3.6) čas vybavení O_2 nižší, než 348 ms.

Tab. 8 Význam zkratek poruchových cest z Obr. 45.

Označení v programu	Označení v textu	popis
n_i	n_i	primární uzel
m_i	m_i	sekundární uzel
i	i	číslo primární ochrany
j	j	číslo sekundární ochrany
$Ik?_{ni_Oi}$	$Ik_{n_i,i}(k_{i,j})$	Zkratový příspěvek tekoucí primární ochranou i pro zkrat v primárním n_i uzlu
$Ik?_{ni_Oj}$	$Ik_{n_i,j}(k_{i,j})$	Zkratový příspěvek tekoucí sekundární ochranou j pro zkrat v primárním n_i uzlu
$trip_Oi$	$t_{n_i,i}(k_{i,j})$	vybavovací čas primární ochrany pro proud $Ik_{n_i,i}(k_{i,j})$
$trip_Oj$	$t_{n_i,j}(k_{i,j})$	vybavovací čas primární ochrany pro proud $Ik_{n_i,j}(k_{i,j})$
$\Delta t_{i,j}$	$\Delta t_{i,j}(k_{i,j})$	selektivní čas mezi primární a sekundární ochranou pro případ, kdy primární a sekundární ochranou teče zkratový příspěvek $Ik_{n_i,i}(k_{i,j})$, respektive $Ik_{n_i,j}(k_{i,j})$
$Ik?_{mi_Oi}$	$Ik_{m_i,i}(k_{i,j})$	Zkratový příspěvek tekoucí primární ochranou i pro zkrat v sekundárním m_i uzlu
$Ik?_{mi_Oj}$	$Ik_{m_i,j}(k_{i,j})$	Zkratový příspěvek tekoucí sekundární ochranou j pro zkrat v sekundárním m_i uzlu
$trip_Oi$	$t_{m_i,i}(k_{i,j})$	vybavovací čas primární ochrany pro proud $Ik_{m_i,i}(k_{i,j})$
$trip_Oj$	$t_{m_i,j}(k_{i,j})$	vybavovací čas primární ochrany pro proud $Ik_{m_i,j}(k_{i,j})$
$\Delta t_{i,j}$	$\Delta t_{i,j}(k_{i,j})$	selektivní čas mezi primární a sekundární ochranou pro případ, kdy primární a sekundární ochranou teče zkratový příspěvek $Ik_{m_i,i}(k_{i,j})$, respektive $Ik_{m_i,j}(k_{i,j})$
$?_pořadí_ni$		pořadí odpínání ochran včetně časů jejich reakce pro zkrat v uzlu n_i .
$?_pořadí_mi$		pořadí odpínání ochran včetně časů jejich reakce pro zkrat v uzlu m_i .

? – označení názvu daného typu zkratu

Jak bylo uvedeno v subkapitole 6.1, při optimalizaci může být uvažován další typ zkratu, při kterém je odpojen pomocný úsek vedení protilehlé ochrany. Protože u radiálních částí sítě se odpojením pomocné sekce zkratový příspěvek tekoucí ochranami nezvyšuje a takto zavedený typ zkratu by pouze zbytečně zvyšoval počet uvažovaných typů, je toto odpojení důležité pouze v případě, kdy se daná chráněná sekce nachází ve smyčce. Princip je patrný na Obr. 44, zelenou šipkou je zde znázorněna pomocná cesta ochrany O_1 . V případě, kdy chceme vytvořit pomocnou cestu ochrany O_1 , neboli chceme zjistit, zda se tato ochrana nachází ve smyčce, musíme nejprve určit směr cesty. Směr cesty volíme dle směru působení ochrany. Jelikož má ochrana O_1 svůj proudový měnič připojen na vedení V_1 a chrání sekci vedení V_2 , působí ve směru od uzlu 0 k uzlu 1. Získaný směr spolu s informací o počátečním uzlu cesty (uzel 0) předáme vedení V_1 . Vedení V_1 nyní pošle dotaz všem ostatním vedením a zjistí tak, zda není některé z nich připojeno do uzlu 1. Tomuto požadavku v našem případě vyhovuje pouze vedení V_2 . Obdobně, jako v předchozím případě je vedení V_2 předána informace o počátečním uzlu

cesty (uzel 0) a požadovaném směru (od uzlu 1 k uzlu 2). Tento postup se dále opakuje až do uzlu 6, kde dochází k rozvětvení sítě (na dotaz od vedení V_6 odpoví jak vedení V_{13} , tak V_7). Část cesty pokračující přes vedení V_{13} , V_{14} a V_{15} je ukončena v uzlu 14, kde již žádné další vedení nenavazuje. Druhá část cesty pokračuje dále ve směru vyznačené šipky až do uzlu 0. Porovnáním počátečního čísla uzlu cesty s aktuálním uzlem, je cesta označena jako uzavřená (ve smyčce) a pomocný úsek vedení V_1 náležící ochraně O_1 je označen jako odpojitelý. Aby nedocházelo k zacyklení výše uvedeného algoritmu v případných dalších smyčkách sítě, jsou mezi vedeními kromě směru a počátečního uzlu cesty předávány také informace o všech ostatních uzlech cesty. V případě, kdy je následující uzel totožný s některým již zaznamenaným uzlem, je daná část cesty ukončena. Výše uvedená pomocná cesta je spolu s ostatními cestami pro schéma z Obr. 44 zobrazena na Obr. 46.

8.4 Optimalizace nastavení ochran

Po vytvoření všech příslušných poruchových a pomocných cest, dle předchozí subkapitoly 8.3, jsou získána všechna potřebná data pro optimalizaci nastavení ochran. Vzhledem k závěrům uvedeným v subkapitole 6.6, jsou programem umožněny následující optimalizace:

- stanovení vektoru časových multiplikátorů M_{O_i} charakteristik ochran sítě za pomoci lineárního programování (LP),
- stanovení vektorů časových multiplikátorů M_{O_i} a popudových proudů I_{pcO_i} charakteristik ochran sítě za pomoci SOMA,
- stanovení vektorů časových multiplikátorů M_{O_i} a koeficientů strmosti E_{O_i} ochran sítě za pomoci SOMA, kde $E_{O_i} \in \{E_{O_i} \in \mathbb{R} : E_{O_i} > 0\}$.

Pro usnadnění optimalizace jsou v programu obsaženy další pomocné funkce. Všechny tyto funkce jsou dostupné v oknu optimalizace (opt). Jedna ze dvou funkcí, jež je zpřístupněna ihned po spuštění okna, je subokno nastavení ochran zobrazené na Obr. 47, kde je možno nalézt přehled všech aktuálně nastavených koeficientů ochran. Samotné koeficienty je pak možno měnit přímo v tomto suboknu, či zvlášť v nastavení každé ochrany. Druhá funkce je k nalezení v suboknu uvažované typy zobrazeném na Obr. 48. Zde je možno nastavit všechny požadované typy zkratových proudů, jež mají být při optimalizaci uvažovány. Po vytvoření poruchových cest tlačítkem vytvoř cesty, jsou otevřeny další funkce. Funkce umožňující dávkové změny nastavení ochran před optimalizací jsou umožněny v suboknu obecné nastavení ochran zobrazeném na Obr. 49. Jelikož v každé z výše uvedených optimalizací musí být vždy předem zvoleny jeden či dva koeficienty, je správné určení zbývajících koeficientů velice důležité. Pro výběr popudového proudu I_{pcO_i} je možno volit z několika variant:

- Popudový proud bude násobkem minimálního zkratového příspěvku $I_{kmin_{m,i}}$.
- Popudový proud bude násobkem jmenovitého proudu tekoucího ochranou v bezporuchovém stavu I_{nO_i} .
- Popudový proud bude nastaven na pevnou, pro všechny ochrany stejnou, hodnotu.
- Popudový proud bude nastaven na hodnotu $(I_{nO_i} + I_{kmin_{m,i}})/2$

Multiplikátory ochran M_{O_i} a typ IEC charakteristiky (E_{O_i} a K_{O_i}) je pak možno nastavit na pevnou, pro všechny ochrany stejnou hodnotu.

Vstupní požadavky, kladené na optimalizované nastavení, je možno zadat v suboknu vstupní data optimalizace zobrazeném na Obr. 50. Pro každou metodu je možno nastavit meze optimalizovaných parametrů²⁶, maximální vybavovací čas, po kterém je tento v tabulce poruchových cest označen červenou barvou, minimální požadovanou hodnotu selektivního času $\Delta t_{i,j}^*$ a minimální hodnotu selektivního času při odpojení pomocného úseku protilehlé ochrany. Po provedení optimalizace je následně vytvořeno subokno řešení obsahující hledané koeficienty. Ukázka řešení pomocí lineárního programování je zobrazena na Obr. 51. Po dvojkliku na tlačítko ► jsou nalezené koeficienty nahrány do ochran a po aktualizaci poruchových cest tlačítkem ↻ je možno zhodnotit výsledky navrhnutého nastavení. Pro případ, kdy chceme pro optimalizaci využít externí program je možno všechna potřebná data exportovat do Excelu.

Poznámka:

Jak je patrné na Obr. 51, získané hodnoty multiplikátoru M_{O_i} zde dosahují maximální hodnoty ≈ 29 . Nastavení běžných typů nadproudových ochran však takto vysoké hodnoty tohoto koeficientu neumožňují. Například nadproudová ochrana Siemens řady 7SJ [52] umožňuje maximální hodnotu časového multiplikátoru pouze 3.2. Ochrany GE [53] a SEL [54] pak umožňují maximální hodnotu 10, respektive 15. Z tohoto důvodu je v programu možno zadat horní a dolní mez tohoto parametru (viz. Obr. 50), avšak v případech, kdy je horní omezení tohoto koeficientu příliš přísné, nemusí být nalezeno řešení. Snížení hodnoty tohoto koeficientu bez použití výše zmíněného omezení je možno docílit výběrem vhodnější charakteristiky s vyšší hodnotou koeficientu K_{O_i} (Extremely inverse, Long time inverse), případně zvýšením hodnoty popudového proudu.

ochrana	M	pouzite Ipc	pouzite E
1	39.802	1909.667	Verv inverse (F = 1.0. K = 13.5)
2	40.789	600.131	Verv inverse (F = 1.0. K = 13.5)
3	30.859	1719.153	Verv inverse (F = 1.0. K = 13.5)
4	31.238	1162.597	Verv inverse (F = 1.0. K = 13.5)
5	0.0	1505.243	Verv inverse (F = 1.0. K = 13.5)
6	48.291	544.682	Verv inverse (F = 1.0. K = 13.5)
7	36.702	931.268	Verv inverse (F = 1.0. K = 13.5)
8	38.909	1055.398	Verv inverse (F = 1.0. K = 13.5)
9	56.51	442.773	Verv inverse (F = 1.0. K = 13.5)
10	31.6	2318.976	Verv inverse (F = 1.0. K = 13.5)

Obr. 47 Okno optimalizace – nastavení ochran

Obr. 48 Okno optimalizace – uvažované typy

²⁶ pro LP se jedná o meze multiplikátoru M_{O_i} . Pro SOMA se, dle vybraných hledaných koeficientů, jedná o E_{O_i} a M_{O_i} , či I_{pcO_i} a M_{O_i} .

vstupní data optimalizace resení LP

Obecné nastavení ochran poruhové cesty pomocné cesty

nastavení ochran uvažované typy

popis	volba
pupudový proud bude násobkem	minimálního zkratového proudu Ikmin
násobek Ikmin (<1)	0.7
nahraj lpcp do ochran	
charakteristika	Verz inverse (1)
nahraj strmost do ochran	
M	10.0
nahraj M do ochran	

vytvoř cesty optimalizace export do excelu

Obr. 49 Okno optimalizace – obecné nastavení ochran

vstupní data optimalizace resení LP

Obecné nastavení ochran poruhové cesty pomocné cesty

nastavení ochran uvažované typy

popis	volba
maximální čas tripu	1000.0
minimální selektivní čas	200.0
minimální selektivní čas při odpojení	50.0
metoda	lineární programování (LP)
dolní mez M	0.0
horní mez M	100.0

vytvoř cesty optimalizace export do excelu

Obr. 50 Okno optimalizace – vstupní data optimalizace

vstupní data optimalizace resení LP

Obecné nastavení ochran poruhové cesty pomocné cesty

nastavení ochran uvažované typy

ochrana	M
1	18.312
2	20.48
3	14.738
4	14.901
5	0.0
6	22.936
7	20.06
8	19.998
9	28.837
10	14.693
popis	volba
nahraj do ochran	

vytvoř cesty optimalizace export do excelu

Obr. 51 Okno optimalizace – řešení LP

9 Rozbor nastavení nadproudových ochran programem SimPoruchy 3.0

V následujících kapitolách provedeme rozbor nastavení nadproudových směrových ochran pomocí programu SimPoruchy 3.0. Postupně zdokumentujeme základní specifika jejich nastavení a použitelnost pro různé síťové topologie. U každé prověřované sítě provedeme citlivostní analýzu kritérií K_{min} a K_{max} na různých vstupních parametrech optimalizovaného nastavení a sítě. Kritéria pro tento účel definujeme jako kvadratické průměry vybavovacích časů všech aktivních ochran. Kritérium K_{min} definujeme jako:

$$K_{min} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i \in I} t_{m_i,i}^2} \quad (9.1)$$

Kde $t_{m_i,i}$ je vybavovací čas i -té ochrany pro poruchu v sekundárním uzlu m_i a I je vektor všech aktivních ochran. Obdobným způsobem definujeme také kritérium K_{max} jako:

$$K_{max} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i \in I} t_{n_i,i}^2} \quad (9.2)$$

kde $t_{n_i,i}$ je vybavovací čas i -té ochrany pro poruchu v primárním uzlu n_i . Pro jednoduchost budeme pro výše zmíněná kritéria uvažovat pouze trojfázový zkrat. V dalších subkapitolách postupně prověříme nastavení následujících sítí:

- radiální síť,
- IEEE 3-bus power system,
- IEEE 4-bus power system,
- IEEE 6-bus power system,
- IEEE 14-bus power system.

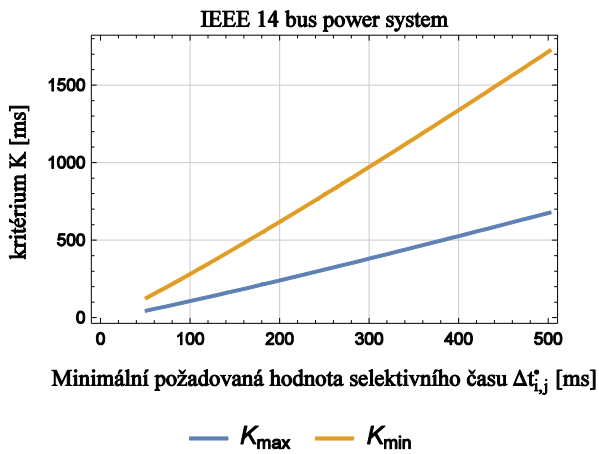
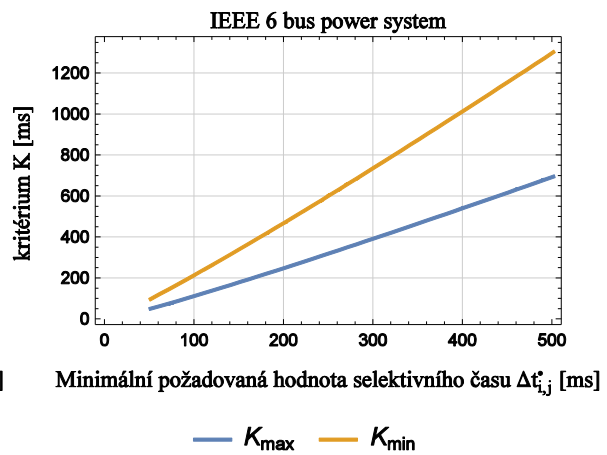
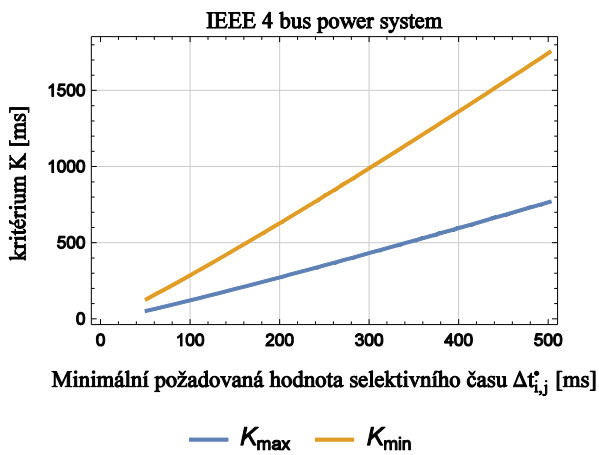
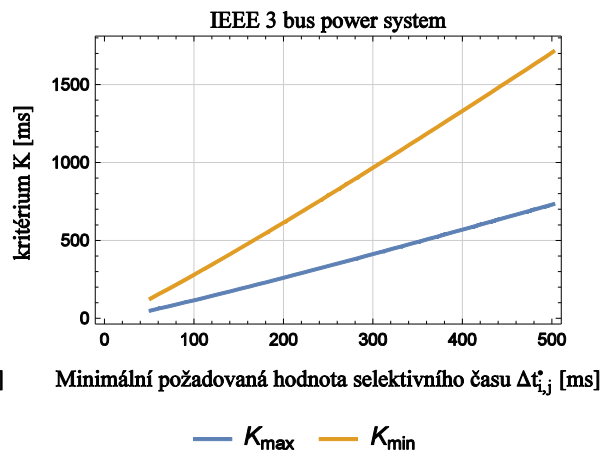
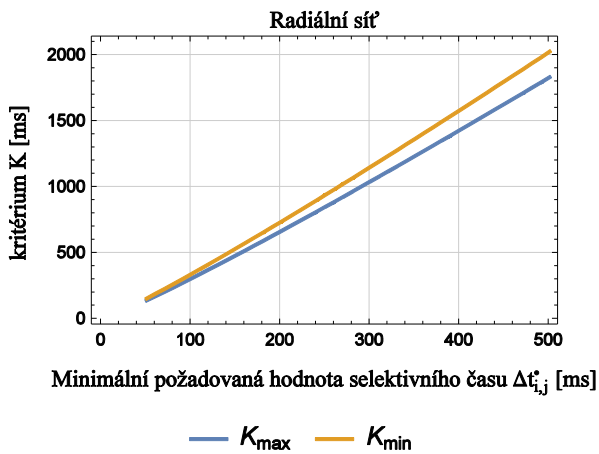
U každé z těchto sítí budeme sledovat hodnoty obou kritérií výsledného optimalizovaného nastavení pro různé hodnoty následujících vstupních parametrů:

- minimální požadovaná hodnota selektivního času $\Delta t_{i,j}^{\bullet}$ mezi i -tou primární a j -tou sekundární ochranou,
- průměr celkového distribuovaného výkonu P_{Σ} ,
- průměr celkového distribuovaného výkonu P_{Σ} pro jedno dané nastavení.

9.1 Minimální požadovaná hodnota selektivního času

Minimální požadovaná hodnota selektivního času $\Delta t_{i,j}^{\bullet}$ je jedním z hlavních požadavků kladených na výsledné optimalizované nastavení. Její hodnota udává minimální povolený čas, za který má sekundární ochrana reagovat za ochranou primární, v případě, že tato není schopna reakce. Její dostatečně velká hodnota je velice důležitá pro správné (selektivní) spínání ochran a jak bylo blíže popsáno v kapitole 4, její příliš malá hodnota může způsobit nechtěnou reakci sekundárních ochran a špatné odpojení postižené části sítě. Abychom si udělali lepší obrázek o tom, jak je rychlost reakce ochran (hodnota kritérií K_{min} a K_{max}) závislá na hodnotě $\Delta t_{i,j}^{\bullet}$ vstupující do každé optimalizace, provedeme sérii optimalizací pro různé hodnoty tohoto parametru v rozmezí 50–500 ms.

Jak je patrné na Obr. 52, u všech testovaných sítí je závislost obou kritérií téměř lineární. Nejnižších hodnot obou kritérií bylo dosaženo u IEEE 6 sítě. U radiální sítě lze pak pozorovat závislost kritéria K_{min} téměř totožnou se závislostí kritéria K_{max} . Pro typický požadavek hodnoty $\Delta t_{i,j}^{\bullet}$, vyšší, než 200–300 ms [18]–[31] lze u všech sítí pozorovat hodnoty obou kritérií nižší než 1000 ms (Dle [55] je odpojení poruchy v čase delším, než 1000 ms považováno za pomalé).



Obr. 52 Závislost kritérií K_{\min} a K_{\max} na minimální požadované hodnotě selektivního času $\Delta t_{i,j}^*$.

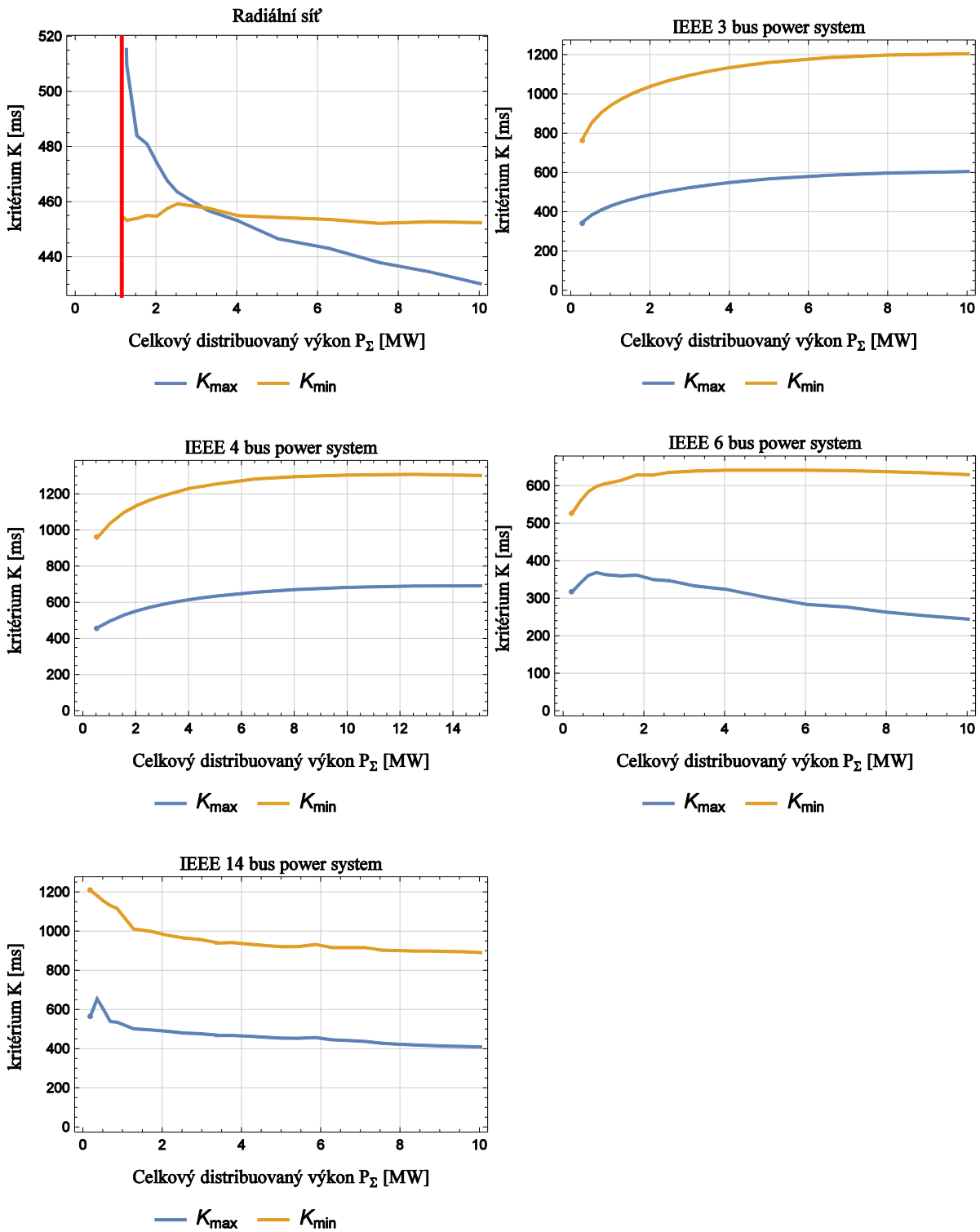
9.2 Změna průměru celkového distribuovaného výkonu

Do každé vybrané přípojnice je připojen generátor o náhodně zvolené hodnotě výkonu. Tento výkon je stanoven tak, aby se celkový průměr výkonů všech generátorů rovnal předem zadané hodnotě P_{Σ} . Pro každý takto získaný stav systému je následně provedena optimalizace nastavení ochran. Hodnoty kritérií K_{min} a K_{max} , uvedené ve výsledných charakteristikách jsou pak pro danou hodnotu P_{Σ} brány jako průměry z celkem 100 pokusů, při nichž je voleno různé náhodné rozprostření P_{Σ} .

Z výsledných závislostí není patrna žádná obecná závislost obou kritérií. U radiální sítě není možno pro nižší hodnoty výkonů správně stanovit popudový proud. Pro takto nízké hodnoty výkonů jsou vstupní data optimalizace v rozporu s podmínkou (6.16)²⁷, není tedy možno určit popudový proud a chránění sítě není realizovatelné (mez podmínky (6.16) je v Obr. 53 ohraničena červenou čarou). Pro zbylé sítě, u kterých, vzhledem k jejich topologii, může poruchový proud vtékat do místa poruchy z obou stran, k tomuto jevu nedochází. Je však třeba poznamenat, že splnění podmínky (6.16) je v tomto případě pouze otázkou zkratového výkonu nadřazené soustavy a není tedy obecně splnitelné.

Dále, u sítí, které obsahují pouze jednu smyčku (IEEE 3 a IEEE 4 bus power system) je možno pozorovat hladší průběhy závislostí, s přibývajícím počtem smyček jsou pak tyto narušeny.

²⁷ Pro všechny sítě jsou bezpečnostní koeficienty zvoleny: $k_{bn} = 1.1$ a $k_{pk} = 0.9$



Obr. 53 Závislost kritérií K_{\min} a K_{\max} na průměru celkového distribuovaného výkonu P_{Σ} . (pro každou hodnotu P_{Σ} je provedeno 100 náhodných rozptřeni tohoto výkonu mezi všechny zdroje a tedy i 100 optimalizací. Zde uvedené hodnoty jsou pak získány jako průměry.)

9.3 Změna průměru celkového distribuovaného výkonu pro jedno dané nastavení

Obdobným způsobem jako v subkapitole 9.2, bude prověřena citlivost nastavení na změnu průměru celkového distribuovaného výkonu P_{Σ} . Nyní však proběhne pouze jedna optimalizace pro jeden předem zvolený průměrný výkon $P_{\Sigma} = 5$ MW. (ve výsledných průbězích označený zelenou čarou). Toto nastavení pak zůstane v průběhu změn P_{Σ} stejné.

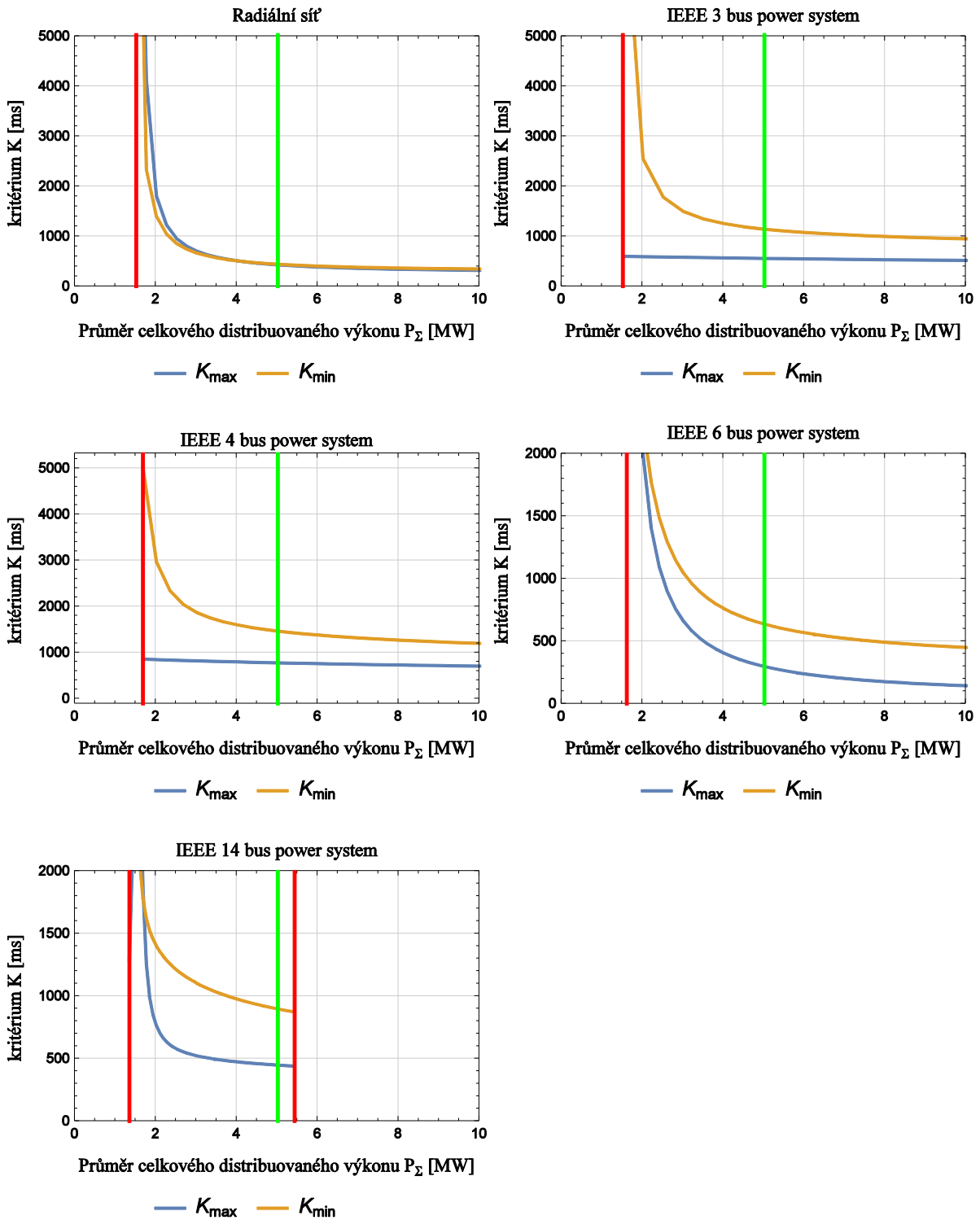
Jak je patrné na Obr. 54, dochází při snižování P_{Σ} ke zvyšování hodnot obou kritérií. V blízkosti hranice použitelnosti nastavení (označena červenou barvou), při jejímž podkročení není splněna spodní část podmínky (6.16) ($k_{bn} \cdot I_{nOi} < I_{pcOi}$) pak dochází k prudkému nárůstu. Opačnou závislost je naopak možno pozorovat při zvyšování P_{Σ} , kdy dochází ke snižování hodnot obou kritérií. Pro příliš vysoké hodnoty P_{Σ} pak dochází k porušení horní části podmínky (6.16) ($I_{pcOi} < k_{bk} \cdot I_{kmin_{m,i}}$)²⁸.

Dalším důležitým parametrem, který může být při změnách P_{Σ} ovlivněn, je minimální hodnota selektivních časů. Jak bylo uvedeno v subkapitole 6.1, minimální požadovaná hodnota selektivního času $\Delta t_{i,j}^{\bullet}$ musí být splněna, jak pro zkrat v primárním, tak v sekundárním uzlu. Pro tento účel definujeme minima všech selektivních časů jako:

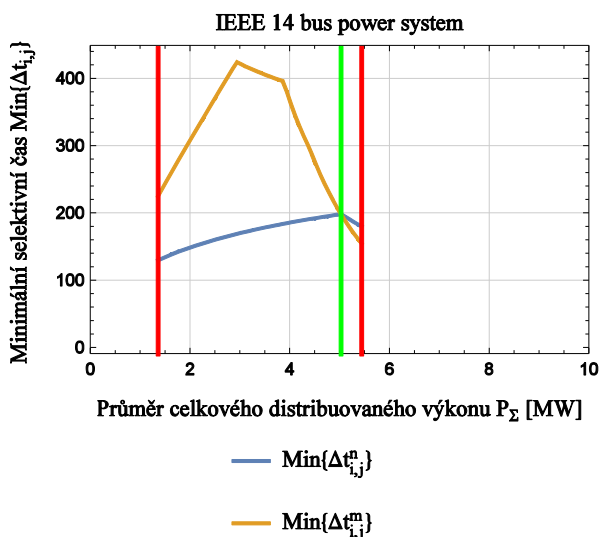
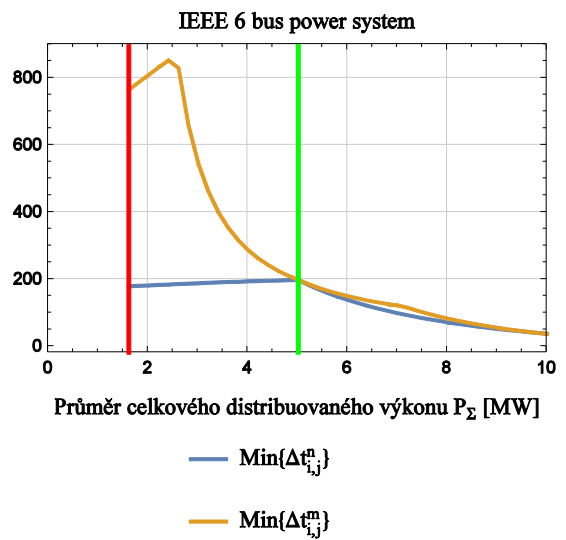
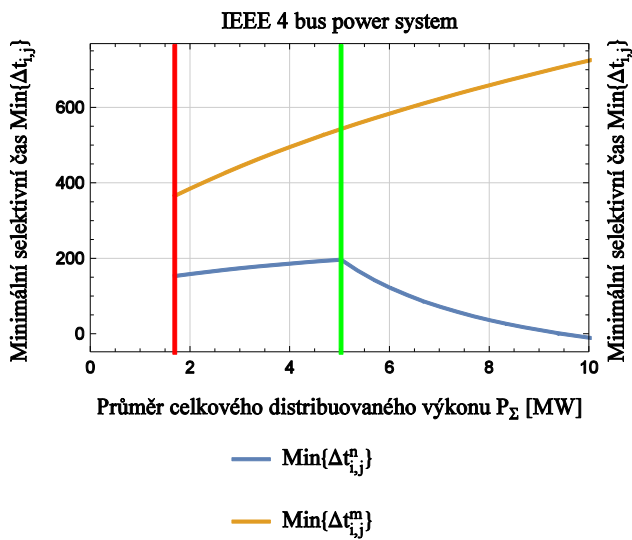
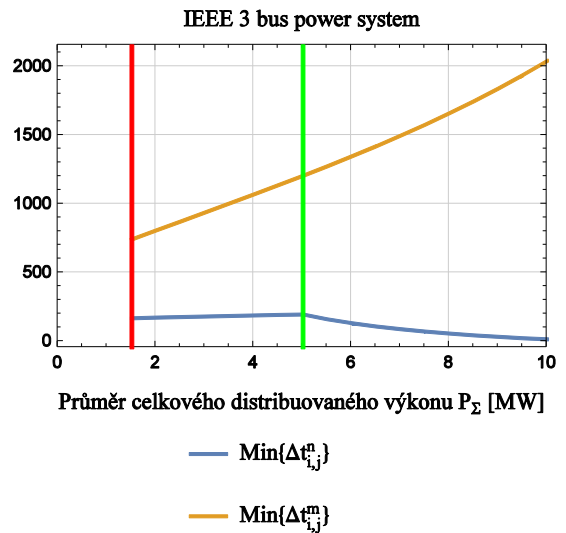
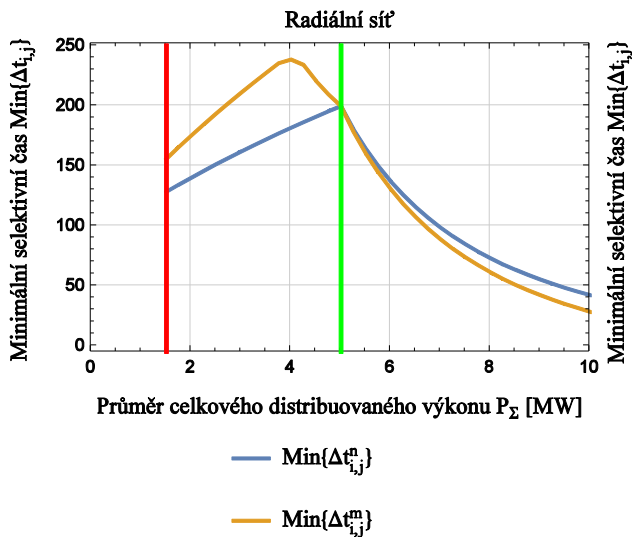
$$\text{Min}\{\Delta t_{i,j}^n\}, \quad \text{Min}\{\Delta t_{i,j}^m\} \quad (9.3)$$

Kde $\Delta t_{i,j}^n$ a $\Delta t_{i,j}^m$ jsou vektory selektivních časů všech poruchových cest pro zkrat v n_i , respektive m_i uzlu. Z Obr. 55 je patrné, že u všech sítí dochází v závislosti na P_{Σ} k prudkým změnám obou parametrů. Ve většině případů pak jak při zvyšování, tak při snižování hodnoty P_{Σ} dochází k jejich poklesu pod hodnotu $\Delta t_{i,j}^{\bullet}$ (200 ms).

²⁸ Porušení horní části podmínky (6.16) však bylo pro vybrané rozmezí P_{Σ} pozorováno pouze u IEEE-14 sítě.



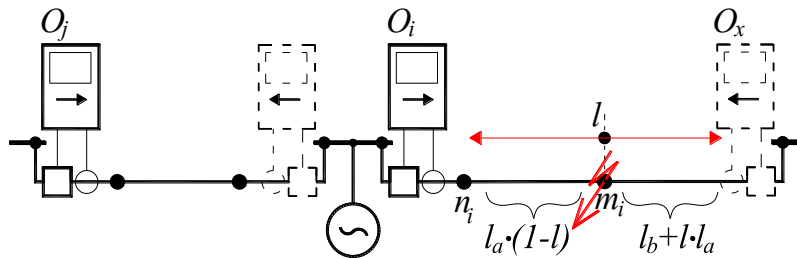
Obr. 54 Závislost kritérií K_{\min} a K_{\max} na průměru celkového distribuovaného výkonu P_{Σ} (nastavení ochran je provedeno pro výkon 5 MW a během změn P_{Σ} zůstává stejné).



Obr. 55 Závislost minimálních hodnot selektivních časů $\text{Min}\{\Delta t_{i,j}^n\}$ a $\text{Min}\{\Delta t_{i,j}^m\}$ na průměru celkového distribuovaného výkonu P_Σ (nastavení ochran je provedeno pro výkon 5 MW a během změn P_Σ zůstává stejné).

9.4 Poloha zkratu v rámci celé chráněné sekce

Jak bylo uvedeno v subkapitole 6.1, při návrhu cílové funkce předpokládáme, že je-li selektivita mezi primární a sekundární ochranou splněna při zkratu v primárním n_i i sekundárním m_i uzlu, je automaticky splněna i v celém úseku mezi nimi (v celé chráněné sekci). Ve všech výše zmíněných publikacích zabývajících se nastavením nadproudových ochran v sítích s decentralizovanou výrobou energie, jsou selektivity vždy ověřovány pouze v krajních uzlech intervalu (n_i a m_i). Abychom platnost tohoto předpokladu ověřili v celé chráněné sekci, budeme zkrat mezi oběma uzly posouvat, jak je zobrazeno na Obr. 56. Posun zkratu v rámci chráněné sekce zprostředkujeme změnou hodnoty poměrné vzdálenosti poruchy l od 0 do 1, kdy je postupně prodlužován pomocný úsek vedení o původní délce l_b a naopak zkracován hlavní úsek vedení sekce o původní délce l_a . Pro $l = 0$ je tedy zkrat umístěn na původní pozici sekundárního uzlu m_i a pro $l = 1$ jsou uzly m_i a n_i překryty²⁹.



Obr. 56 Posun zkratu v rámci chráněné sekce pro jednu poruchovou cestu (l_a – původní délka chráněné sekce, l_b – původní délka pomocné sekce náležící ochraně O_x)

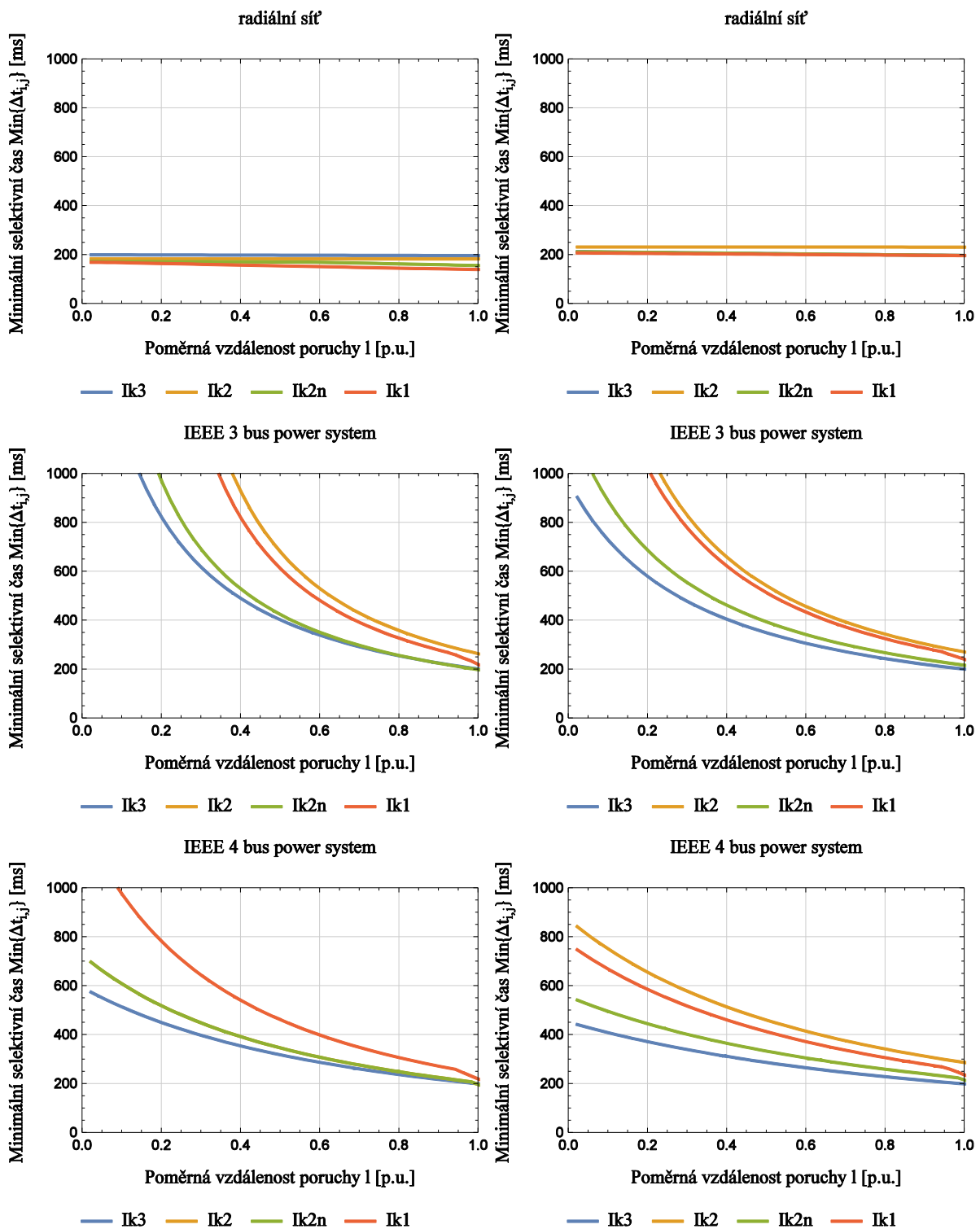
Výše zmíněný posun zkratu v rámci chráněné sekce provedeme vždy pro všechny poruchové cesty a všechny uvažované typy zkratových proudů. Obdobně, jako v předchozí subkapitole 9.3, budeme prověřovat minimální hodnotou selektivního času $\text{Min}\{\Delta t_{i,j}\}$. Nyní však rozšíříme počet námi uvažovaných zkratových typů také o zkrat jednofázový (Ik1), dvoufázový (Ik2) a dvoufázový zemní (Ik2n). Abychom ověřili nutnost zahrnutí všech uvažovaných zkratových typů do optimalizace probranou v subkapitole 6.2, provedeme tuto analýzu pro dvě optimalizace. U první budeme uvažovat pouze nejvyšší hodnoty zkratových příspěvků tekoucích primární ochranou (pro všechny sítě se vždy jedná o trojfázový zkrat Ik3). U druhé pak budeme uvažovat všechny zkratové typy.

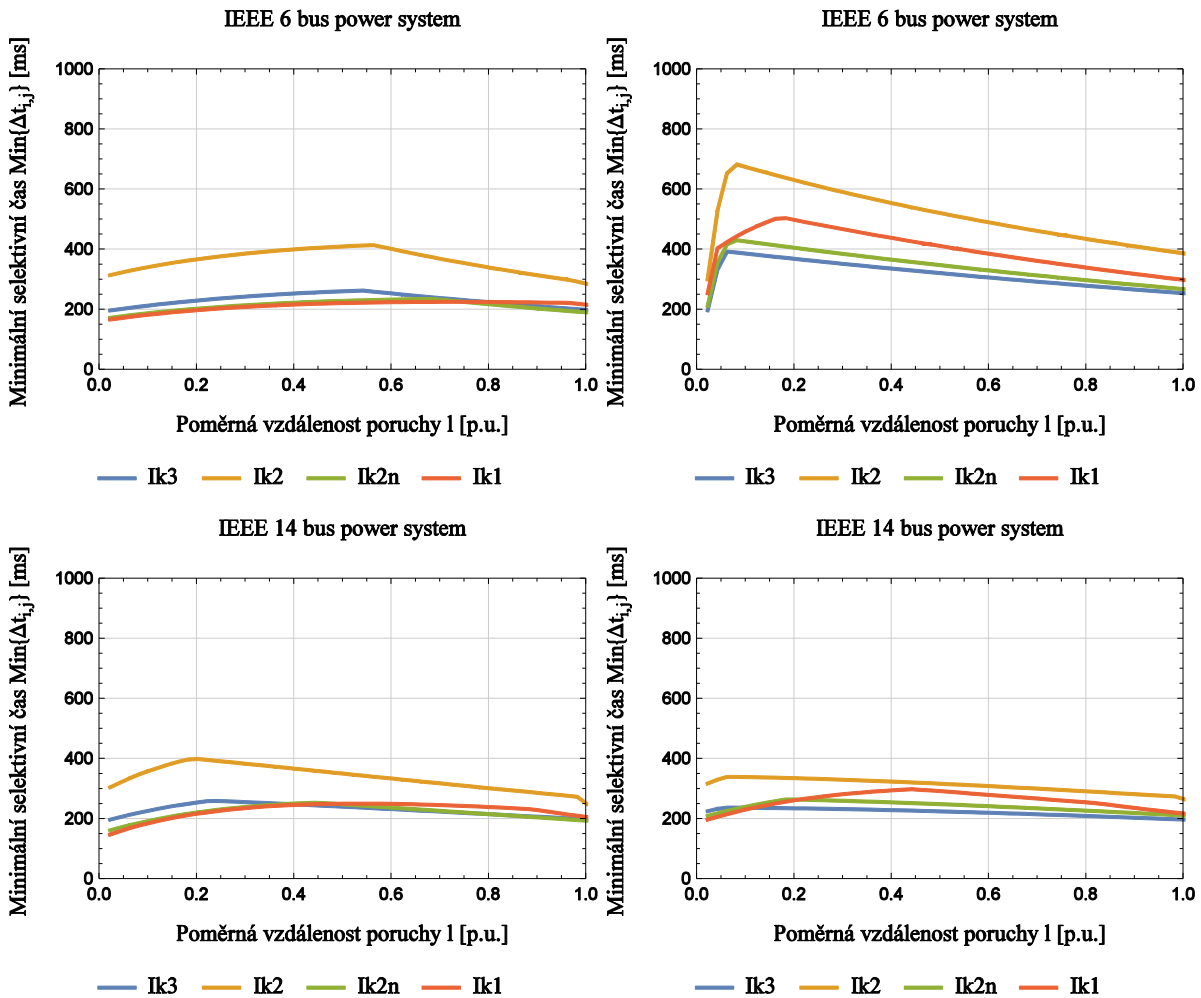
Jak je patrné na Obr. 57, v případě, kdy je uvažován pouze trojfázový zkrat, mohou být selektivní časy pro ostatní typy zkratů nižší, než minimální požadovaná hodnota selektivního času $\Delta t_{i,j}^*$ (pro všechny sítě uvažujeme 200 ms) a při takto navrhnuté optimalizaci může být narušena správná reakce ochran.

Dále je patrné, že u radiální sítě se projevuje pouze velice malá stoupající závislost minimálního selektivního času na poměrné vzdálenosti poruchy. U čistě okružních sítí (IEEE 3 a IEEE 4 bus power system) je pak tato závislost naopak silně klesající. U složitějších sítí (IEEE 6 a IEEE 14 bus power system), jenž jsou kombinací okružních a radiálních částí sítě, se projevuje nejprve stoupající a následně klesající závislost. U všech sítí se však nejnižší hodnoty

²⁹ Z hlediska principu programu SimPoruchy není úplně překrytí uzlů m_i a n_i možné (mezi dvěma uzly není možno nastavit nulovou impedanci). Pro $l_a = 0$ je tedy délka vedení mezi uzly m_i a n_i nastavena na hodnotu $0.001 \cdot l_a$.

selektivních časů vyskytují vždy v krajních uzlech chráněné sekce a výše zmíněný předpoklad uvažovaný v subkapitole 6.1, kdy pro optimalizaci uvažujeme pouze poruchy v primárním a sekundárním uzlu je tak potvrzen.





Obr. 57 Závislost minimálního selektivního času $\text{Min}\{\Delta t_{i,j}\}$ na poloze zkratu v rámci chráněné sekce pro optimalizaci uvažující pouze trojfázový zkrat (na levé straně) a pro optimalizaci zahrnující všechny uvažované typy zkratových proudů (na pravé straně).

9.5 Uvažování většího počtu síťových konfigurací

Jak bylo uvedeno v úvodu práce, jistou nevýhodou nadproudových ochran je jejich závislost na aktuálně připojeném výkonu a aktuální síťové konfiguraci. V případě, kdy je nastavení vytvořeno pouze pro konkrétní síťovou konfiguraci, může být při její změně výrazně ohroženo splnění podmínky minimálního požadovaného selektivního času $\Delta t_{i,j}^*$. Protože současné ochrany většinou umožňují použít pouze určitý omezený počet nastavovacích sad, bylo by vhodné navrhnout nastavení tak, aby respektovalo větší počet síťových konfigurací.

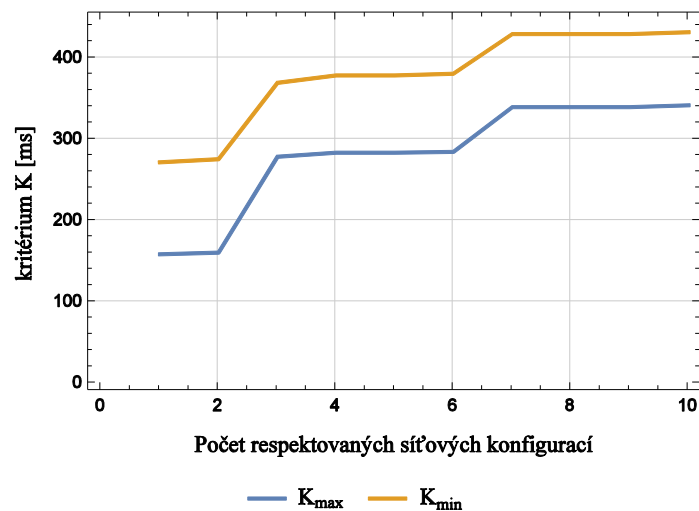
Pomocí algoritmu nalezení nejcitlivějších zkratových typů, popsaného v subkapitole 6.2, může být získáno nejenom nastavení respektující příslušné požadované typy zkratů, ale i nastavení respektující větší počet síťových konfigurací. Místo zkratových příspěvků odpovídajících jednotlivým typům zkratových proudů jsou v tomto případě použity zkratové příspěvky odpovídající příslušným síťovým konfiguracím. Pro ukázkou provedeme sérii nastavení, kdy budeme požadovat stále větší počet respektovaných síťových konfigurací. Pro jednoduchost budeme uvažovat pouze trojfázové zkraty a pouze jednu z výše uvedených sítí (IEEE-6 bus power system). Seznam všech uvažovaných síťových konfigurací je uveden v

Tab. 9. Se zvyšujícím se počtem respektovaných síťových konfigurací (stejně jako s větším počtem respektovaných zkratových typů) je vždy nutno počítat se zvyšující hodnotou kritérií K_{min} a K_{max} jak je zobrazeno na Obr. 58.

Tab. 9 Uvažované síťové konfigurace

číslo konfigurace	G1	G2	G3	G4	G5
1	1	1	1	1	1
2	0	1	1	1	1
3	1	0	1	1	1
4	1	1	0	1	1
5	1	1	1	0	1
6	1	1	1	1	0
7	1	0	1	0	1
8	0	1	1	1	0
9	0	1	1	0	1
10	1	1	0	0	1

1 – aktivní zdroj; 0 – neaktivní zdroj



Obr. 58 Závislost kritérií K_{min} a K_{max} na počtu respektovaných síťových konfigurací

10 Závěr

10.1 Přehled výsledků a přínosů disertace

Práce se zabývá ochranou sítí s decentralizovanou výrobou energie se zaměřením na směrové nadproudové ochrany s časově závislou inverzní charakteristikou. Cílem správného nastavení nadproudových ochran je dosažení co možná nejkratších vybavovacích časů při současném zachování minimálních požadovaných selektivních časů. V rámci práce byla vytvořena metodika nastavení tohoto typu ochran jak pro klasické radiální sítě bez distribuované energie, tak pro sítě s distribuovanou výrobou energie. U klasických radiálních sítí, jež neobsahují distribuované zdroje energie, lze využít nesměrových nadproudových ochran a samotné nastavení může být velice jednoduché. Protože při zkratu v chráněné sekci protéká příslušnou primární i sekundární ochranou stejná hodnota zkratového příspěvku, lze pro zaručení selektivity uvažovat pouze některé typy zkratového proudu. Při správné volbě popudových proudů je pro každý pár ochran možno uvažovat pouze jeden typ zkratového proudu, jež produkuje nejvyšší zkratové příspěvky tekoucí primární a sekundární ochranou. Pro všechny ostatní typy zkratových proudů je pak selektivní čas vždy vyšší. Samotné nastavení může být následně po předpočítání příslušných zkratových příspěvků provedeno pro menší sítě „ručně“.

U složitějších sítí, jež obsahují distribuované zdroje energie a kromě radiálních částí se v nich vyskytují také smyčky, musí být použity ochrany směrové. Oproti doposud publikovaným pracím, kde jsou pro nastavení uvažovány vždy pouze dva typy zkratů, zprostředkávající maximální a minimální hodnoty zkratových proudů, byla v této práci vyzdvihnuta nutnost uvažovat všechny typy zkratů, jež mohou v dané chráněné sekci sítě nastat. Protože na rozdíl od radiálních sítí bez distribuované výroby mohou primární i sekundární ochranou protékat různé hodnoty zkratových příspěvků, není splnění selektivity pouze otázkou velikostí těchto příspěvků, ale také jejich poměrů. Jako nástroj schopný zprostředkovat nastavení ochran se jeví vhodně navržená optimalizace. Tato optimalizace musí být navržena tak, aby minimalizovala vybavovací časy ochran a zároveň zaručila splnění všech potřebných selektivních časů pro všechny uvažované typy zkratů. Pro větší počty uvažovaných typů tak optimalizace obsahuje také velký počet omezení. V práci byl pro tento účel vyvinut algoritmus, jež dokáže pro každý pár primární a sekundární ochrany a daný uzel vyhledat tzv. nejcitlivější typ zkratu, pro který, je-li splněna selektivita, je automaticky splněna i pro všechny ostatní typy. Drobnou úpravou tohoto algoritmu lze dále docílit nastavení respektující ne jedno, ale více možných síťových konfigurací.

Pro pohodlnější ovládání a lepší interpretaci výsledků byl v rámci práce v programovacím jazyku Java vyvinut program SimPoruchy. Pomocí přehledného grafického uživatelského prostředí je do programu možno zadat schéma sítě a rozmístění ochran. Program následně sám ověří realizovatelnost a provede návrh možného nastavení. V poslední fázi je výsledné nastavení automaticky ověřeno a zhodnoceno. Výše zmíněný program byl využit k průzkumu nastavení celkem pěti sítí (radiální síť s distribuovanou výrobou, IEEE 3, IEEE 4, IEEE 6 a IEEE 14 bus power system). Průzkum byl realizován jako citlivostní analýzy kritérií K_{min} a K_{max} a minimálního selektivního času $Min\{\Delta t_{i,j}\}$ na různých vstupních parametrech optimalizovaného nastavení a sítě. Kritéria K_{min} a K_{max} respektují rychlost reakce pro zkrat v primárním, respektive sekundárním uzlu každé poruchové cesty. Hodnota $Min\{\Delta t_{i,j}\}$ pak

určuje nejnižší hodnotu ze všech zkoumaných selektivních časů. Výsledky průzkumu lze shrnout do několika bodů:

- Hodnota obou kritérií je značně závislá na minimální požadované hodnotě selektivního času $\Delta t_{i,j}^*$, tedy našeho požadavku minimálního času, za který má sekundární ochrana reagovat za ochranou primární, v případě, že tato není schopna reakce. Pro běžný požadavek této hodnoty 200–300 ms ([18]–[31]) vyšla pro všechny sítě hodnota kritéria K_{min} , nižší, než 1000 ms (Dle [55] je odpojení poruchy v čase delším, než 1000 ms považováno za pomalé).
- Z výsledků průzkumu nebyla nalezena žádná obecná závislost mezi kvalitou nastavení respektovanou kritériálními koeficienty a hodnotou celkového distribuovaného výkonu s vysokým zkratovým příspěvkem. Jeho příliš nízká hodnota však může způsobit přílišný pokles minimálního zkratového proudu, nemožnost určení popudového proudu a nastavení tedy není možno provést. Vysoká citlivost na tomto parametru byla zaznamenána u radiální sítě, kdy není možno určit popudové proudy ochran působících ve směru zkratového příspěvku distribuovaného zdroje. U zbylých „zauzlovaných“ sítí přitékají zkratové příspěvky z celé sítě a součinností všech zdrojů je pak pro určení popudového proudu vytvořen dostatečně velký zkratový proud.
- V případě, kdy uvažujeme neměnné nastavení ochran, vytvořené pro jeden předem zvolený stav soustavy, dochází při změnách průměrného distribuovaného výkonu P_{Σ} ke značným změnám hodnot obou kritérií. Při výraznějších odchylkách od výchozího stavu jsou porušeny základní podmínky popudového proudu (6.16) a reakce některých ochran je znemožněna. Se změnou P_{Σ} jsou dále spojeny změny minimálních selektivních časů, které mohou při jejich příliš nízké hodnotě ohrozit správné pořadí reakce ochran.
- U všech testovaných sítí byl dále ověřen předpoklad, kdy pro optimalizaci nastavení ochran používáme pouze zkrat v primárním a sekundárním uzlu. Porucha byla postupně posouvána směrem od sekundárního uzlu m_i k primárnímu uzlu n_i a byla tak ověřena správná reakce ochran nejenom v krajních uzlech, ale v celé chráněné sekci. Dále byla ověřena nutnost zahrnout do optimalizace všechny uvažované typy zkratů. V případě, kdy byl pro optimalizaci uvažován pouze jeden (nejvyšší) typ zkratového proudu, docházelo u většiny sítí u ostatních typů k poklesu minimálního selektivního času $Min\{\Delta t_{i,j}\}$ pod její minimální hranici $\Delta t_{i,j}^*$ a byla tak porušena podmínka správné reakce ochran.

Nadproudové směrové ochrany s časově závislou inverzní charakteristikou se jeví jako jeden z možných nástrojů pro ochranu sítí s decentralizovanou výrobou energie. Před jejich použitím je však třeba zvážit všechny výše zmíněné klady i zápory. Nespornou výhodou těchto ochran je jejich jednoduchost a nízká komunikační náročnost. Naopak nevýhodami jsou značná závislost na aktuální hodnotě distribuovaného výkonu, potřeba sofistikovanější metody nastavení, či nutnost určitého minimálního rozdílu mezi nominálním a zkratovým proudem. Nevýhody vyplývající ze závislosti nastavení na aktuální hodnotě distribuovaného výkonu lze částečně omezit respektováním většího počtu síťových konfigurací. S větším počtem respektovaných síťových konfigurací je však vždy nutno počítat s následným nárůstem vybavovacích časů ochran. Použití tohoto typu ochran je tak vhodné především u sítí, kde distribuované zdroje, či nadřazený systém poskytují dostatečnou hodnotu zkratového proudu a zároveň nejsou předpokládány výrazné změny připojeného výkonu.

10.2 Závěry pro další rozvoj práce

Pro další rozvoj je možno využít některé z následujících témat:

- Zefektivnění optimalizace nastavení ochran.
- Design nových charakteristik nadproudových ochran, speciálně navržených tak, aby bylo možno jejich koeficienty snadno optimalizovat.
- Uvažování celého vypínacího procesu chráněné sekce. Jak bylo uvedeno v subkapitole 6.1, v případě, kdy je konkrétní chráněná sekce součástí složitějšího vzájemně propojeného systému, může po reakci ochrany na jedné straně chráněné sekce dojít ke vzrůstu zkratového příspěvku tekoucího skrze ochrany na straně druhé. Z tohoto důvodu uvažujeme pro takto zvýšený zkratový příspěvek určitou (jednotnou) sníženou hodnotu selektivního času zaručujícího, že i při takto zvýšeném proudu nebude ochrana sekundární reagovat před ochranou primární. Pro návrh nastavení by tedy bylo možno pro tento případ určit přesnou (sníženou) hodnotu minimálního požadovaného selektivního času určenou tak, aby byla během vypínacího procesu zaručena její plná (nesnížená) hodnota. Protože určení této snížené hodnoty selektivního času by bylo závislé na konkrétním nastavení všech ochran a zároveň by mělo být vstupem optimalizace, došlo by ke značnému zesložiténí celé optimalizace.
- Úprava softwaru ochran tak, aby umožňoval nastavení libovolných hodnot koeficientů charakteristik (M_{O_i} a E_{O_i}) a optimalizace tak nemusela být v tomto směru omezena.
- Zpřesnění výpočtového modelu použitého pro výpočet zkratových příspěvků. V práci použitý výpočtový model (metoda simultánních poruch) využívá klasické náhrady prvků sítě pomocí sousledné, zpětné a netočivé složky. Tato náhrada sebou přináší značné urychlení výpočtu. Pro její využití však musíme uvažovat jistá zanedbání a zjednodušení.

11 Použitá označení

t_{tripO_i}	vybavovací čas ochrany O_i
I_{pcO_i}	popudový proud ochrany O_i
I_{pO_i}	poruchový proud protékající skrze i -tou ochranu.
I_{nO_i}	jmenovitý (nominální) proud protékající skrze i -tou ochranu.
M_{O_i}	časový multiplikátor inverzně časové charakteristiky i -té ochrany.
K_{O_i}	pomocný koeficient časově inverzní charakteristiky i -té ochrany.
E_{O_i}	Koeficient strmosti časově inverzní charakteristiky i -té ochrany.
X_{O_i}	další pomocný koeficient časově inverzní charakteristiky i -té ochrany (pouze u ANSI standardu)
I_{kmaxLj}	maximální zkratový proud tekoucí do j -tého uzlu z levé strany.
I_{kminLj}	minimální zkratový proud tekoucí do j -tého uzlu z levé strany.
ξ_j^{max}	vektor obsahující všechny uvažované maximální hodnoty zkratových proudů v j -tém uzlu
ξ_j^{min}	vektor obsahující všechny uvažované minimální hodnoty zkratových proudů v j -tém uzlu
$I_{k3,j}^{max}, I_{k2n,j}^{max}$	velikosti trojfázového, dvoufázového zemního, dvoufázového a jednofázového zkratového proudu v uzlu j pro konfiguraci sítě zaručující maximální hodnoty zkratových proudů.
$I_{k2,j}^{max}, I_{k1,j}^{max}$	
$I_{k3,j}^{min}, I_{k2n,j}^{min}$	velikosti trojfázového, dvoufázového zemního, dvoufázového a jednofázového zkratového proudu v uzlu j pro konfiguraci sítě zaručující minimální hodnoty zkratových proudů.
$I_{k2,j}^{min}, I_{k1,j}^{min}$	
U_S	velikost napětí nadřazené sítě
S_{ks}	zkratový výkon nadřazené sítě
X_S	reaktance nadřazené sítě
I_{k1}	velikost zkratového proudu na začátku poslední sekce
I_{k2}	velikost zkratového proudu na konci poslední sekce
ΔI_k	rozdíl zkratových proudů na začátku a na konci poslední chráněné sekce
P_2	hodnota činného výkonu vstřikovaného do uzlu 2
Q_2	hodnota jalového výkonu vstřikovaného do uzlu 2
\hat{S}_2	komplexní výkon uzlu 2
φ_S	úhel napětí sítě
φ_G	úhel napětí generátoru
Z_{v1}	velikost impedance vedení V_1
δ_{V1}	úhel impedance vedení V_1
l_{V1}	délka vedení V_1

Optimalizace nastavení ochran:

ψ	vektor hledaných koeficientů popisujících daný typ charakteristiky (Pro inverzně časové charakteristiky a i -tou ochranu to může být časový multiplikátor M_{O_i} , koeficient strmosti E_{O_i} , případně popudový proud I_{pcO_i})
ψ^*	řešení optimalizace
D	množina přípustných řešení vektoru ψ .
$\Phi(\psi)$	cílová funkce, jejíž minimum hledáme.
$g(\psi)$	pomocné podmínky typu nerovnosti vektoru ψ .

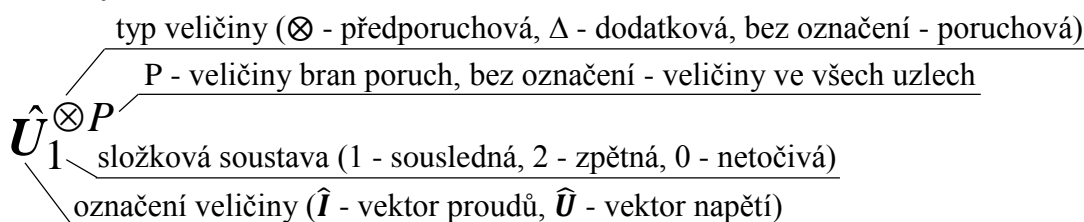
MK_{O_i}	násobek koeficientů M_{O_i} a K_{O_i} i -té ochrany, tedy $MK_{O_i} = M_{O_i} \cdot K_{O_i}$.
$I_{kmax_{n,i}}$	maximální možný proud tekoucí i -tou ochranou pro poruchu v uzlu n .
$I_{kmin_{m,i}}$	minimální možný proud tekoucí i -tou ochranou pro poruchu v uzlu m .
$I_{kmin'_{m',i}}$	minimální možný proud tekoucí i -tou ochranou pro poruchu v uzlu m' .
$\Delta t_{i,j}^{\bullet}$	minimální požadovaná hodnota selektivního času mezi ochranami O_i a O_j .
$\Delta t_{i,j}$	hodnota selektivního času mezi ochranami O_i a O_j získaná dle aktuálních hodnot všech optimalizovaných koeficientů (tedy prvků vektoru ψ náležící ochraně O_i a O_j)
n_i	Primární uzel i -té ochrany
m_i	Sekundární uzel i -té ochrany
m'_i	Druhý sekundární uzel i -té ochrany
i	Označení primární ochrany
j	Označení sekundární ochrany
\mathbf{I}	Vektor všech primárních ochran
\mathbf{J}_i	Vektor všech aktivních sekundárních ochran i -té ochrany
$\Delta t_{max_{i,j}}$	selektivní čas mezi i -tou a j -tou ochranou pro maximální zkratové příspěvky
$\Delta t_{min_{i,j}}$	selektivní čas mezi i -tou a j -tou ochranou pro minimální zkratové příspěvky
$t_{max_{n,i}}$	čas vybavení i -té ochrany pro poruchu v uzlu n a maximální zkratové příspěvky
$t_{min_{m,i}}$	čas vybavení i -té ochrany pro poruchu v uzlu n a minimální zkratové příspěvky
$b(t)$	bariérová funkce
$S(t), P(t)$	pomocné funkce optimalizace
k_{bn}	bezpečnostní koeficient pro nominální proud
k_{bk}	bezpečnostní koeficient pro minimální zkratový příspěvek

SOMA metoda:

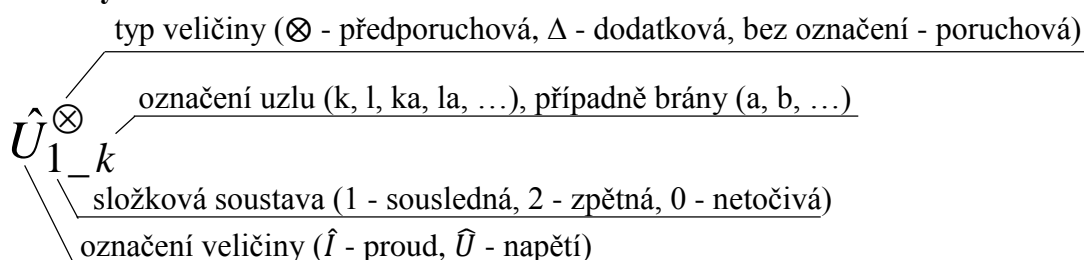
R	náhodně generované číslo v intervalu $\langle 0,1 \rangle$
L	označení nejlepšího jedince (Leadera)
ψ'_j, ψ''_j	pomocní jedinci
PRT'_j	pomocný vektor obsahující náhodně zvolené konstanty 1, nebo 0
PRT	Perbutace

Metoda simultánních poruch:

Vektory veličin:



Veličiny v uzlech:



Matice:

P - veličiny bran poruch, bez označení - veličiny ve všech uzlech

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_1^P \end{bmatrix}$$

složková soustava (1 - sousledná, 2 - zpětná, 0 - netočivá)

označení veličiny ($\hat{\mathbf{Y}}$ - admitance, $\hat{\mathbf{Z}}$ - impedance)

$\hat{\mathbf{U}}_1^\Delta$	Vektor dodatkových napětí sousledné složky ve všech uzlech sítě
$\hat{\mathbf{I}}_0^{\Delta P}$	Vektor dodatkových proudů netočivé složky v branách poruch
\hat{U}_{1-k}^\otimes	Předporuchové napětí sousledné složky v k -tém uzlu
\hat{I}_{2-k}^Δ	Dodatkový proud zpětné složky v k -tém uzlu
k	k -tý uzel soustavy
l	l -tý uzel soustavy
ka	k -tý uzel brány a
la	l -tý uzel brány a
$[\hat{\mathbf{Z}}_1]$	Sousledná impedanční matice
$\hat{Z}_{1(k,l)}$	Prvek na k -tém řádku a l -tém sloupci sousledné impedanční matice $[\hat{\mathbf{Z}}_1]$
\hat{I}_{3f-k}	Hodnota trojfázového zkratového proudu k -tého uzlu
\hat{Z}_a^F	Poruchová impedance (impedance vložená do poruchy) v bráně a
\hat{U}_a^F	Napětí na poruchové impedanci \hat{Z}_a^F vyvolané průchodem zkratového proudu
$\hat{\mathbf{U}}^{FP}$	Vektor napětí na poruchových impedancích
$[\hat{\mathbf{Z}}_{\%}^{FP}]$	Diagonální matice vložených poruchových impedancí
\hat{a}	Pomocná komplexní proměnná (fázový posuv o 120°)
$\hat{I}_1, \hat{I}_2, \hat{I}_0$	Sousledný, zpětný a netočivý proud
$\hat{I}_A, \hat{I}_B, \hat{I}_C$	Proud ve fázích A, B a C
$\hat{\epsilon}_1, \hat{\epsilon}_2, \hat{\epsilon}_0$	Sousledná, zpětná a netočivá obecná pomocná komplexní proměnná s fázových posuvem pro příslušnou poruchovou fázi
$[\hat{\epsilon}_{1\%}^P]$	Diagonální matice obecných pomocných proměnných sousledné složky
$\hat{\mathbf{U}}_{120}^P$	Rezultující vektor napětí
$[\hat{\mathbf{Z}}_{120}^P]$	Rezultující poruchová impedanční matice
n_B	Počet bran poruch
\hat{p}	Komplexní převod

Příklady:

S_G	Zdánlivý výkon generátoru
U_{NG}	Jmenovité napětí generátoru
x_d''	Podélná rázová reaktance generátoru
x_2	Zpětná reaktance generátoru

x_0	Netočivá reaktance generátoru
S_{NT}	Jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru
u_k	Napětí nakrátko transformátoru
l_{V1}	Délka vedení V_1
R	Odpor
X	Reaktance
B	Susceptance
R_l, R_0	Sousledný a netočivý odpor
X_0, X_l	Sousledná a netočivá reaktance
S''_{ks}	Rázový zkratový výkon soustavy
U_{NS}	Jmenovité napětí soustavy
U_S	Napětí soustavy
\hat{Y}_1	Vektor příčných uzlových sousledných admitancí
UP	Vektor počátečních uzlů
UK	Vektor koncových uzlů
\hat{Z}_{pk}	Vektor meziuzlových impedancí
B	Vektor susceptancí
\hat{T}	Vektor komplexních převodů
K	Vektor počátečních uzlů bran poruch
L	Vektor koncových uzlů bran poruch
$\hat{U}_{1(2)}^\otimes$	Hodnota na druhé pozici vektoru $\hat{U}_{1(2)}^\otimes$

Seznam zkratk:

IEC	International Electrotechnical Commission
ANSI	American National Standards Institute
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
SOMA	Samo-Organizující se Migrační Algoritmus
IDT	Intelligent Distributed Terminal

12 Literatura

- [1] T. Chang. “Impact of Distributed Generation on Distribution Feeder Protection“, PhD thesis, University of Toronto, 2010.
- [2] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, C. Marnay, “Microgrids“, IEEE Power & Energy magazine, July 2007, pp. 78–94.
- [3] S. Chaitusaney, A. Yokoyama, “Impact of protection coordination on sizes of several distributed generation sources“, International Power Engineering Conference, 2005, pp. 669–674, ISBN: 981-05-5702-7.
- [4] P. Mareček, J. Šrom, J. Švec, Z. Müller “Dispersed Generation Impact on Faulted Currents in Distribution Systems“. In Proceedings of the 13th International Scientific Conference EPE 2012. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 20 2, p. 749–752. ISBN 978-80-214-4514-7.
- [5] N. Handjsaid, J. Canard, F. Dumas, “Dispersed generation impact on distribution networks“, IEEE, Computer Applications in Power, pp. 22–28.
- [6] Wang Wei, Z. Pan, W. Cong, C. Yu, F. Gu, “Impact of distributed generation on relay protection and its improved measures, “ in CICED 2008 China International Conf. On Electricity Distribution., pp.1–5.
- [7] Z. Müller, M. Müller, J. Švec, J. Tlustý : Advances in Distribution System Architecture. In Electric Power Engineering 2013. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, 2013, ISBN 978-80-248-2988-3.
- [8] M. M. Eissa, “New Protection philosophy for protecting Complex Smart Grid With Renewable Resources Penetration” IEEE International Conference on Smart Grid Engineering (SGE’12), Canada, August 2012, ISBN: 978-1-4673-4457-9.
- [9] M. Venkata, D. Wilson, J. Ren, M. Miller, “Advanced and adaptive protection for active distribution grid”, Internal Conference on Electricity Distribution (CIRED 2013), June 2013, ISBN: 978-1-84919-732-8.
- [10] Gao Houlei, Gingle Pang, Yanqiu An, Baoguang Zhao, Xiaosheng Qim Yuanbo Wu, Chun Tian, “New type of protection and control method for smart distribution grid” IEEE Developments in Power System Protection, 2012, ISBN: 978-1-84919-620-8.
- [11] E. Sortomme, M. Venkata, J. Mitra, “Microgrid Protection Using Communication-Assisted Digital Relays” IEEE transaction on power delivery, October 2010, ISBN: 978-1-4244-6549-1.
- [12] F. Muzi, A. De Sanctis, P. Palumbo, “Distance protection for smart grids with massive generation from renewable sources”, IASME International conference on Energy & enviroment, USA, 2011, pp. 208–213, ISBN:978-960-474-274-5.
- [13] Yi Lv, Dahai You, Ke Wang, Liang Wang, Zhenhai Chen, Simin Huo, “Study on wide-area backup protection system for the smart grid”, IEEE, Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), July 2011, pp. 218–224, ISBN: 978-1-4577-0364-5.

- [14] L. A. Montoya, D. Montenegro, “Adaptive Protection Testbed Using Real time and Hardware-in-the-Loop Simulation”, IEEE PowerTech, June 2013, pp. 1–4.
- [15] Jing Ma, Chao Mi, Tong Wang, Jie Wu, Zengping Wang, “An Adaptive Protection Scheme for Distributed Systems with Distributed Generation”, IEEE, Power and Energy Society General Meeting, July 2011, pp. 1–6, ISBN: 978-1-4577-1000-1.
- [16] A. J. Urdaneta, H. Restrepo, S. Marquez, J. Sanchez, “Coordination of directional overcurrent relay timing using linear programming”, IEEE Transactions on Power Delivery, Issue: 1, pp. 122–129, Jan 1996.
- [17] A. J. Urdaneta, L. G. Perez, H. Restrepo, “Optimal coordination of directional overcurrent relays considering dynamic changes in the network topology”, IEEE Transactions on Power Delivery, Issue: 4, pp. 1458–1464, Jan 1997.
- [18] B. Chattopadhyay, M. S. Sachdev, T. S. Sidhu, “An on-line relay coordination algorithm for adaptive protection using linear programming technique”, IEEE Transactions on Power Delivery, Issue: 1, pp. 165–173, Jan 1996.
- [19] L. G. Perez, A. J. Urdaneta, “Optimal coordination of directional overcurrent relays considering definite time backup relaying”, IEEE Transactions on Power Delivery, Issue: 4, pp. 1276–1284, Jan 1999.
- [20] L. G. Perez, A. J. Urdaneta, “Calculation of optimum directional overcurrent relays settings: the parallel lines case”, IEEE Power Engineering Review, Issue: 5, pp. 68–69, May 2000.
- [21] A.J Urdanetaa, L.G Pérez, J.F Gómez, B Feijoo, M Gonzálezb, “Presolve analysis and interior point solutions of the linear programming coordination problem of directional overcurrent relays”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Issue: 8, pp. 819–825, Nov. 2001.
- [22] A.Y Abdelaziza, H.E.A Talaata, A.I Nosseira, Ammar A Hajjarb, “An adaptive protection scheme for optimal coordination of overcurrent relays”, Journal of Electric Power Systems Research, Issue: 1, pp. 1–9, Feb. 2002.
- [23] H. K. Karegara, H. A. Abyanehb, V. Ohisc, M. Meshkind, “Pre-processing of the optimal coordination of overcurrent relays”, Journal of Electric Power Systems Research, Issue:2–3, pp.134-141, Aug. 2005.
- [24] S. Ralhan, S. Ray, “ Directional overcurrent relays coordination using linear programming intervals: A comparative analysis”, IEEE India Conference (INDICON), pp. 1–6, Dec. 2013, ISBN: 978-1-4799-2274-1.
- [25] M. Thakur, A. Kumar, “ Optimal coordination of directional over current relays using a modified real coded genetic algorithm: A comparative study”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, pp. 484–495, Nov. 2016.
- [26] J. C. Bansal, K. Deep, “Optimization of directional overcurrent relay times by particle swarm optimization”, Swarm Intelligence Symposium, pp. 1–7, Sept. 2008, ISBN: 978-1-4244-2704-8.

- [27] K. Deep, J. C. Bansal, "Optimization of directional overcurrent relay times using Laplace Crossover Particle Swarm Optimization (LXPSO)", *Nature & Biologically Inspired Computing*, pp. 288–293, Dec. 2009, ISBN: 978-1-4244-5053-4.
- [28] R. Thangaraja, M. Panta, A. Abraham, "New mutation schemes for differential evolution algorithm and their application to the optimization of directional over-current relay settings", *International Journal of Applied Mathematics and Computation*, Vol.: 216, Issue:2, pp. 532–544, Mar. 2010.
- [29] R. Thangaraja, M. Panta, K. Deep, "Optimal coordination of over-current relays using modified differential evolution algorithms", *International Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol.: 23, Issue: 5, pp. 820–829, Aug. 2010.
- [30] J. Moirangthem, K. Krishnanand, S. S. Dash, R. Ramaswami, "Adaptive differential evolution algorithm for solving non-linear coordination problem of directional overcurrent relays", Vol.: 7, Issue: 4, pp. 329–336, Apr. 2013.
- [31] T. R. Chelliah, R. Thangaraj, S. Allamsetty, M. Pant, "Coordination of directional overcurrent relays using opposition based chaotic differential evolution algorithm", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol.:55, pp. 341–350, Feb. 2014.
- [32] V. P. Mahadanaarachchi, R. Ramakuma, "Impact of distributed generation on distance protection performance - A review", *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008 IEEE, Aug. 2008.
- [33] Jing Ma, Jinlong Li, Zengping Wang, "An adaptive distance protection scheme for distribution system with distributed generation", *Critical Infrastructure (CRIS)*, 2010 5th International Conference on, Nov. 2010.
- [34] S. Voima, K. Kauhaniemi, "Using distance protection in smart grid environment", *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 2014 IEEE PES, Feb. 2015.
- [35] Hengwei Lin, Josep M. Guerrero, Juan C. Vásquez, "Adaptive Distance Protection for Microgrids", *Industrial Electronics Society, IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE*, Jan. 2016.
- [36] Hengwei Lin, Chengxi Liu, Josep M. Guerrero "Distance Protection for Microgrids in Distribution System", *Industrial Electronics Society, IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE*, Jan. 2016.
- [37] V. C. Nikolaidis, C. Arsenopoulos, A. S. Safigianni, "A Distance Based Protection Scheme for Distribution Systems with Distributed Generators", *Power Systems Computation Conference (PSCC)*, 2016, Aug. 2016.
- [38] Tao Zheng, Yutong Zhao, Jing Li, "A New Pilot Distance Protection Scheme for Teed Lines", *AC and DC Power Transmission (ACDC 2016)*, 12th IET International Conference on, Dec. 2016.
- [39] K. Pandakov, H. Kr. Høidalen, J.I. Marvik, "Implementation of Distance Relaying in Distribution Network with Distributed Generation", *Development in Power System Protection 2016 (DPSP)*, 13th International Conference on, Dec. 2016.

- [40] M. Biller, J. Jaeger, I. Mladenovic, "Protection Systems in Distribution Grids with Variable Short-Circuit Conditions", Development in Power System Protection 2016 (DPSP), 13th International Conference on, Dec. 2016.
- [41] "IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays", IEEE Standard C37.112-1996, Sept. 1996, ISBN: 1-55937-887-5.
- [42] "Applications for Siprotec Protection Relays", Siemens Aktiengesellschaft, Germany 2005, pp. 14-5.
- [43] "ČSN EN 60909-0 (333022): Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 0: Výpočet proudů", Český normalizační institut, 2002, 62 s.
- [44] P. Myrda, W. Gawlik, B. Bak-Jensen, M. Browne, R. Calone, R. Cimadevilla, A. Craib, G. Donnart, D. Dumitrascu, M. Engel, R. Hanuš, H. Hoidalén, L. Karsenti, A. Kubis, H. Laaksonen, M. Loukkalahti, M. Louro, H. Ma, P. Mahat, P. McMullan, T. Shire, M. Wurm, X. Zhao, "Protection of Distribution Systems with Distributed Energy Resources", Cigre, March 2015, ISBN: 978-2-85873-315-6.
- [45] E. Jeroen Coster, "Distribution Grid Operation Including Distributed Generation", Technische Universiteit Eindhoven, ISBN: 978-90-386-2289-7.
- [46] J. Deuse, S. Grenard, M.H.J. Bollen, M. Häger, and F. Sollerkvist, "Effective impact of der on distribution system protection", CIRED 19th International conference on Electricity Distribution, paper No 075, May 2007, Vienna.
- [47] J. Driesen, P. Vermeyen, and R. Belmans, "Protection issues in microgrids with multiple distributed generation units", Power Conversion Conference PCC'07, 2007, Nagoya, pp. 646–653.
- [48] K. Kauhamieni, L. Kumpulainen, „Impact of distributed generation on the protection of distribution networks“, Eighth IEE international conference on developments in power system protection, April 2004, pp. 315–318.
- [49] I. Zelinka, "Umělá inteligence v problémech globální optimalizace", 1. vyd, Praha: BEN - technická literatura 2002, ISBN: 80-7300-069-5.
- [50] J. Špetlík, "Poruchy v trojfázové soustavě, Metoda simultánních poruch", Přednáška z předmětu Řízení elektroenergetických soustav [online]. Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz>
- [51] J. Ehrenberger, „Řešení poruch v sítích Smart Grid pomocí metody simultánních poruch“, Praha 2013, Diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky.
- [52] „Multi-Functional Protective Relay with Local Control 7SJ62/63/64“, Siemens AG, 2011.
- [53] „MDP Digital Time Overcurrent Relay Instruction Manual“, Rev. D, GE Power Management, Canada 2000.
- [54] "SEL-551 Relay – Overcurrent Relay – Reclosing Relay – Instruction Manual“, SEL Schweitzer engineering laboratories, 2007.

- [55] “PNE 33 0000-1: Ochrana před úrazem elektrickým proudem v distribučních soustavách a přenosové soustavě“, ČEZ Distribuce, E.ON distribuce, E.ON ČR, PRE distribuce, ČEPS a ZSE, 2011, 89 s.

13 Seznam publikací disertanta

13.1 Publikace vztahující se k tématu disertační práce

13.1.1 Publikace v impaktovaných časopisech

- [A1] Ehrenberger, J.; Švec, J., “Directional Overcurrent Relays Coordination Problems in Distributed Generation Systems“. *Energies* 2017, special issue: Control and Communication in Distributed Generation Systems, IF: 2.262, ISSN: 1996-1073.

13.1.2 Publikace v recenzovaných časopisech

13.1.3 Patenty

13.1.4 Publikace excerptované WoS

- [A2] Ehrenberger, J., “ Fault Analysis of Smart Grid Power System Employing Simultaneous Faults Method“, *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014*, pp. 95-100. ISBN: 978-1-4799-3806-3.
- [A3] Ehrenberger, J.; Švec, J., “Protection settings optimization in distributed generation system“, *2016 IEEE International Energy Conference, ENERGYCON 2016, 2016*, ISBN: 978-1-4673-8463-6.
- [A4] Ehrenberger, J.; Švec, J. , “ Nelder Mead Method Used in Protection Setting Optimization“, *2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE 2016), 2016*, pp. 251-256, ISSN: 2376-5623, ISBN: 978-1-5090-0908-4.

- [A5] Ehrenberger, J., “ Use of Directional Overcurrent Protection Scheme for Distributed Generation Systems“, *2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, 2015*, pp. 325-330. ISBN: 978-1-4673-6788-2.

článek byl citován v publikaci:

Lian Yang, Nengling Tai, Chunju Fan, Wentao Huang, “ Distance protection optimization strategy for distribution systems with battery energy storage system “, Journal of Renewable and Sustainable Energy, May 2016.

- [A6] Ehrenberger, J., “ Adaptive Protection Scheme Used for Distributed Generation System Switched into Island Mode“, *Proceedings of the 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2015, Košice: TU Košice, 2015*, pp. 560-563, ISBN: 978-80-553-2187-5.

13.1.5 Publikace ostatní

- [A7] Dang, M.; Ehrenberger, J., “Impacts of distributed generation in distribution network“, *POSTER 2016 - 20th International Student Conference, Prague: Czech Technical University, 2016*, ISBN: 978-80-01-05950-0.

13.2 Ostatní publikace

13.2.1 Publikace v impaktovaných časopisech

13.2.2 Publikace v recenzovaných časopisech

13.2.3 Patenty

13.2.4 Publikace excerptované WoS

[A8] Švec, J.; Ehrenberger, J., “ Analysis of Current Unbalance in Meshed Transmission System“, 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, 2015, pp. 320-324, ISBN: 978-1-4673-6788-2.

[A9] Švec, J.; Ehrenberger, J., “ Current Unbalance Calculations in Meshed Transmission System“, Proceedings of the 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2015, Košice: TU Košice, 2015, pp. 113-116, ISBN: 978-80-553-2187-5.

[A10] Ehrenberger, J.; Müller, Z.; Švec, J., “ Calculation of magnetic and electric field under OHL and its reduction“, Proceedings of the 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2015, Košice: TU Košice, 2015, pp. 117-120, ISBN: 978-80-553-2187-5.

13.2.5 Publikace ostatní

[A11] Ehrenberger, J., “ Power System Probability Analysis“, POSTER 2014 - 18th International Student Conference on Electrical Engineering, Prague: Czech Technical University, 2014, ISBN: 978-80-01-05499-4.

[A12] Cimbolínek, I.; Švec, J.; Ehrenberger, J., “ Ověřování činnosti používaných technických variant „přizemňování postižené fáze“ (shuntingu) v reálných podmínkách“, EnerGoConsult ČB, 2016, ISBN: 978-80-905014-5-4.

[A13] Ehrenberger, J.; Špetlík, J., “ Model přístrojového transformátoru proudu“, Proceedings of ELEN 2014, Praha: ČVUT FEL, Katedra elektroenergetiky, 2014, ISBN 978-80-01-05654-7.

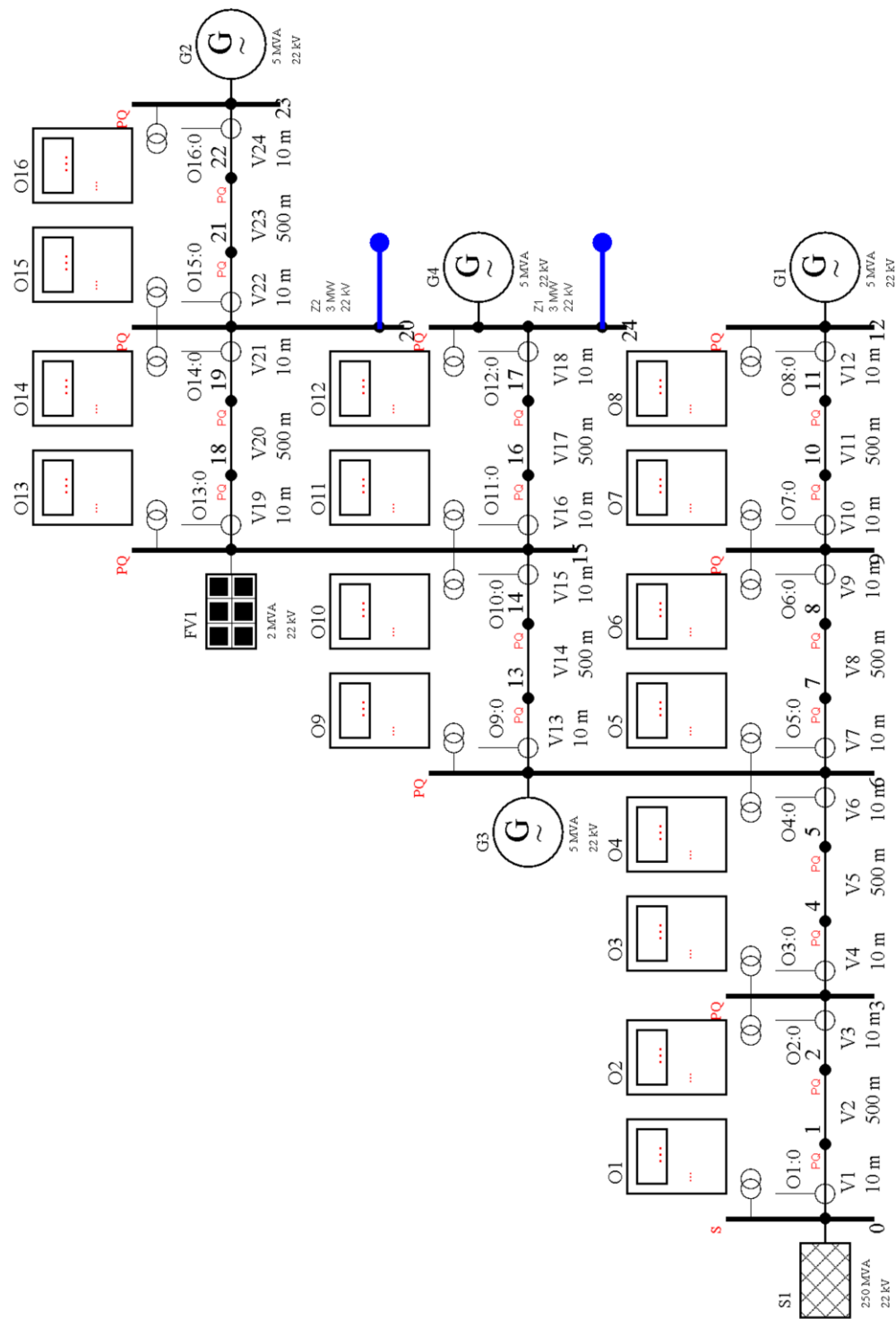
[A14] Švec, J.; Ehrenberger, J., “ Výpočty proudové nesymetrie vícenásobných vedení vvn v uzlové síti“, 2014, 13115-CEPSInvest.

Podíl spoluautorství u všech uvedených publikací je dělen mezi jednotlivé autory vždy rovným dílem.

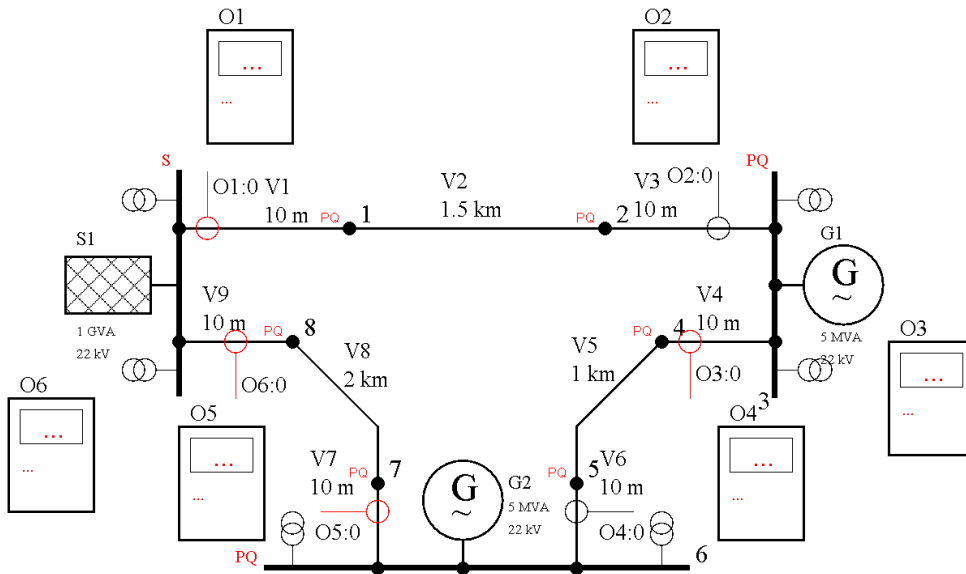
Pokud není u jednotlivých článků uvedeno jinak, doposud nejsou na výše uvedené publikace registrovány žádné ohlasy.

14 Přílohy

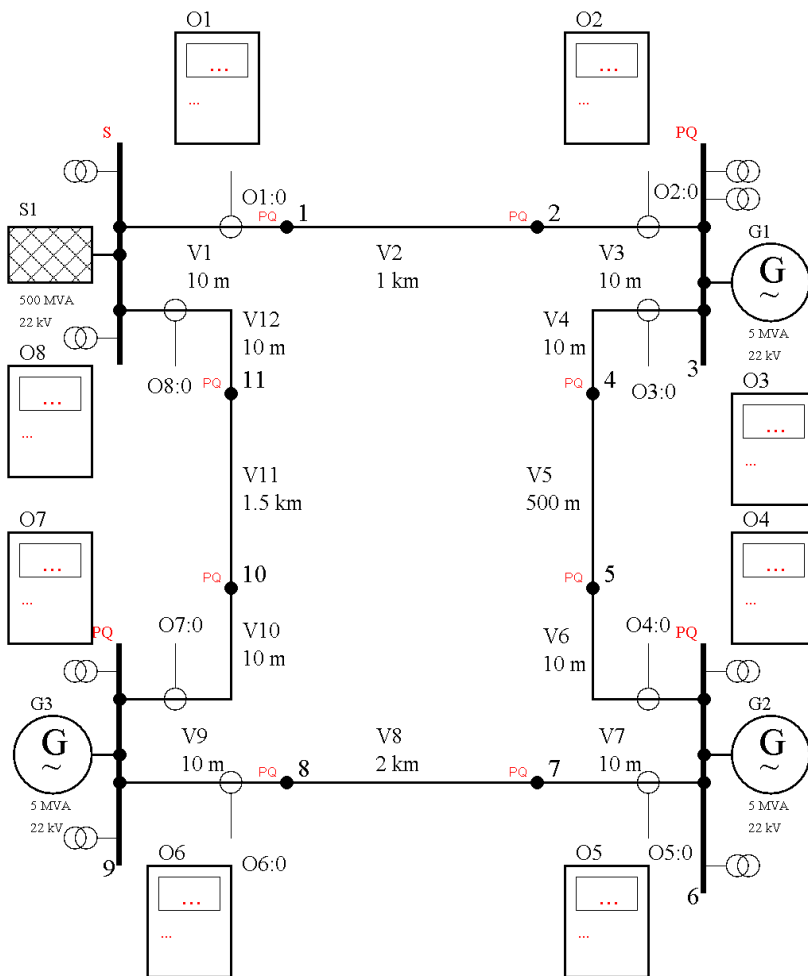
14.1 Schémata testovaných sítí



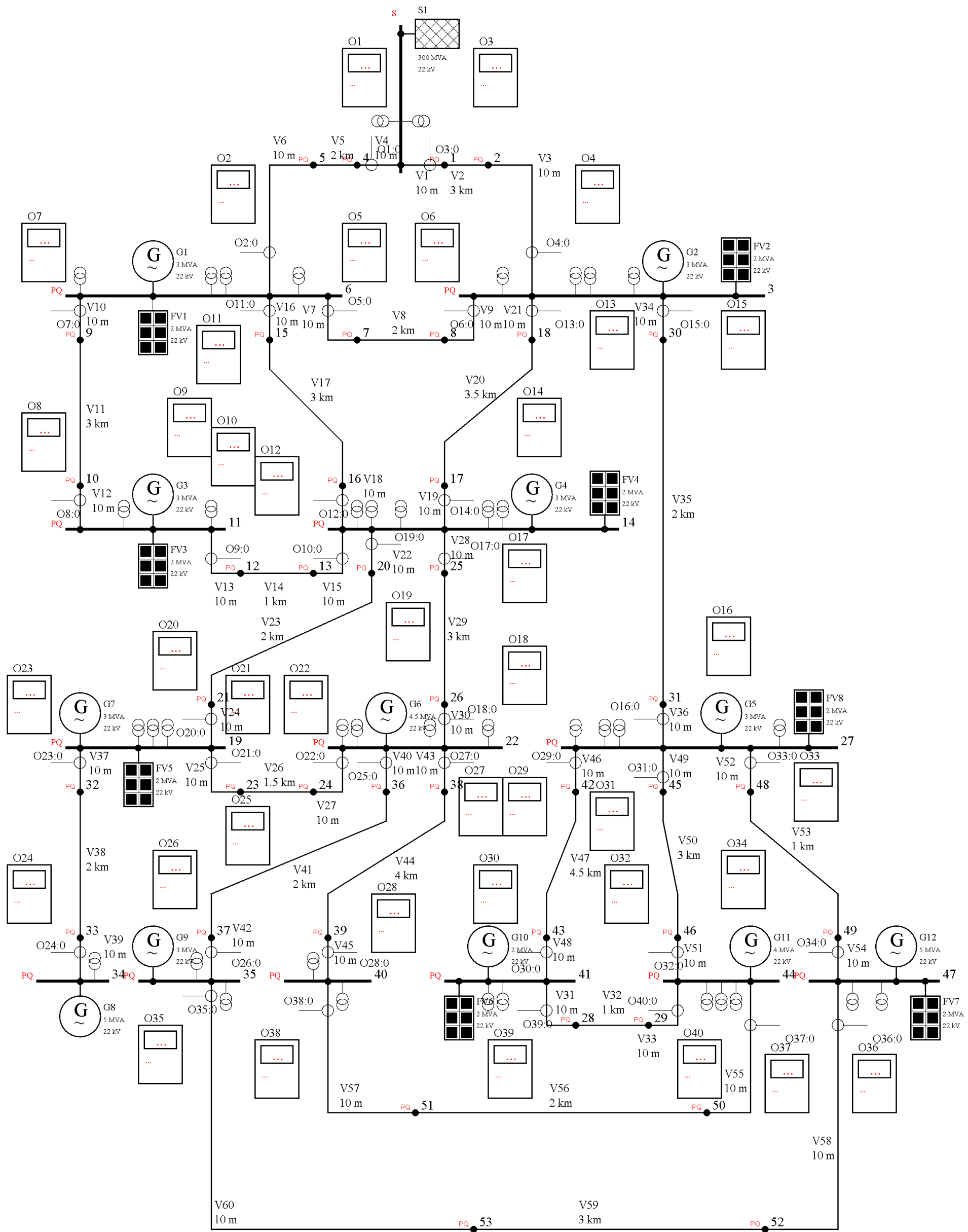
Obr. 59 Schéma radiální sítě



Obr. 60 IEEE 3-bus power system



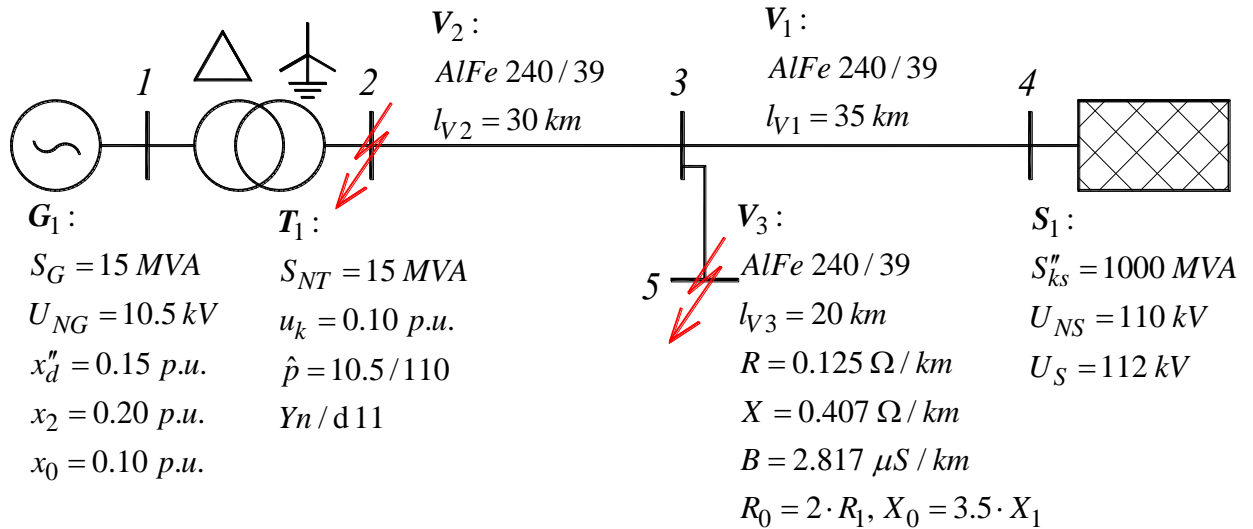
Obr. 61 IEEE 4-bus power system



Obr. 63 IEEE 14-bus power system

14.2 Ukázka výpočtu simultánních poruch pro trojfázové poruchy

Schéma námi vyšetřované sítě je zobrazeno na Obr. 64. Pro náš výpočet budeme předpokládat dvě trojfázové poruchy. Ideální kovovou poruchu v uzlu 5 a poruchu s vloženou poruchovou impedancí 10Ω v uzlu 2. Výpočet provedeme dle postupu uvedeného v subkapitole 7.2.



Obr. 64 Schéma vyšetřované sítě.

Nejprve stanovíme náhradní parametry obvodu, potřebné pro sestavení admitanční matice sítě. Sestavíme vektor příčných uzlových admitancí sousledné složky:

$$\hat{Y}_1 = \left(\frac{S_G}{jx_d'' \cdot U_{NG}^2}, 0, 0, \frac{S_{ks}''}{jU_{NS}^2}, 0 \right)^T = (0 - j0.907, 0, 0, 0 - j0.083, 0)^T \text{ S}$$

Dále vytvoříme pomocné vektory UP a UK , obsahující počáteční, respektive koncové uzly jednotlivých podélných sekcí sítě.

$$UP = (1, 2, 3, 3)^T$$

$$UK = (2, 3, 4, 5)^T$$

Pomocí těchto vektorů pak sestavíme vektor meziuzlových impedancí jako:

$$\hat{Z}_{pk} = \left(ju_k \cdot \frac{(110 \text{ kV})^2}{S_{NT}}, (R + jX) \cdot l_{V2}, (R + jX) \cdot l_{V1}, (R + jX) \cdot l_{V3} \right)^T$$

$$= (0. + j80.667, 3.75 + j12.210, 4.375 + j14.245, 2.5 + j8.140)^T \Omega$$

a vektor příslušných susceptancí jako:

$$B = (0, B \cdot l_{V2}, B \cdot l_{V1}, B \cdot l_{V3})^T = (0, 84.510, 98.595, 59.340)^T \mu S$$

Napětí 110 kV použité pro výpočet náhradní impedance transformátoru v první buňce vektoru $\hat{\mathbf{Z}}_{pk}$ koresponduje s uvedenou volbou počátečního a koncového uzlu 1, respektive 2 a použitého náhradního π -článku z Obr. 41 b). Pro volbu převodu $\hat{p} = \hat{U}_k / \hat{U}_t$ můžeme sestavit vektor převodů jako:

$$\hat{\mathbf{T}} = \left(\frac{10.5}{110} \cdot e^{j30^\circ}, 1, 1, 1 \right)^T = (0.083 - j0.048, 1, 1, 1)^T$$

Vektory $\hat{\mathbf{Y}}_1, \mathbf{UP}, \mathbf{UK}, \hat{\mathbf{Z}}_{pk}, \mathbf{B}$ a $\hat{\mathbf{T}}$ použijeme k sestavení sousledné admitanční matice sítě $[\hat{\mathbf{Y}}_1]$.

Pro zdrojový systém můžeme admitanční matici napsat jako:

$$\begin{bmatrix} 0 - j2267.57 & 64.94 + j112.47 & 0 & 0 & 0 \\ -64.94 + j112.47 & 22.99 - j87.20 & -22.99 + j74.84 & 0 & 0 \\ 0 & -22.99 + j74.84 & 77.17 - j251.13 & -19.70 + j64.15 & -34.48 + j112.26 \\ 0 & 0 & -19.70 + j64.15 & 19.70 - j146.74 & 0 \\ 0 & 0 & -34.48 + j112.26 & 0 & 34.48 - j112.23 \end{bmatrix} \text{ mS}$$

Inverzí pak získáme příslušnou impedanční matici sousledné složky $[\hat{\mathbf{Z}}_1]$ jako:

$$\begin{bmatrix} 1.89 + j54.82 & 122.13 + j145.62 & 78.58 + j102.29 & 27.54 + j51.57 & 78.61 + j102.30 \\ -65.05 + j178.58 & 575.45 + j3268.12 & 295.25 + j2232.70 & -33.72 + j1020.19 & 295.47 + j2233.19 \\ -49.29 + j119.20 & 295.25 + j2232.70 & 354.13 + j2361.28 & -16.94 + j1082.05 & 354.38 + j2361.80 \\ -30.89 + j49.64 & -33.72 + j1020.19 & -16.94 + j1082.05 & 1.98 + j1151.93 & -16.87 + j1082.30 \\ -49.30 + j119.23 & 295.47 + j2233.19 & 354.38 + j2361.80 & -16.87 + j1082.30 & 604.74 + j3176.48 \end{bmatrix} \cdot 10^{-2} \Omega$$

Dále sestavíme pomocné vektory \mathbf{K} a \mathbf{L} , popsané v subkapitolách 7.5 a 7.6, definující počáteční a koncové uzly bran poruch. Dle výše uvedeného zadání budou tyto vektory:

$$\mathbf{K} = (2, 5)^T$$

$$\mathbf{L} = (0, 0)^T$$

Jedná se tedy o dvě brány poruchy typu uzel-zem. Dle (7.46) sestavíme poruchovou impedanční matici sítě sousledné složky (Příslušné prvky, jsou v matici $[\hat{\mathbf{Z}}_1]$ vyznačeny červenou barvou):

$$[\hat{\mathbf{Z}}_1^P] = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{1(2,2)} & \hat{Z}_{1(2,5)} \\ \hat{Z}_{1(5,2)} & \hat{Z}_{1(5,5)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 575.45 + j3268.12 & 295.47 + j2233.19 \\ 295.47 + j2233.19 & 604.74 + j3176.48 \end{bmatrix} \cdot 10^{-2} \Omega$$

Pro další výpočty budeme potřebovat předporuchová napětí ve všech uzlech sítě respektované vektorem $\hat{\mathbf{U}}_1^\otimes$. Napětí lze stanovit libovolným způsobem uvedeným v subkapitole 7.1. Pro náš účel jsme tato napětí stanovili výpočtem ustáleného stavu sítě jako:

$$\hat{\mathbf{U}}_1^\otimes = \left(10.5 \cdot e^{j37.578^\circ}, 112.145 \cdot e^{j1.948^\circ}, 112.062 \cdot e^{j1.050^\circ}, 112, 112.062 \cdot e^{j1.050^\circ} \right)^T \text{ kV}$$

Dále dle (7.9) vytvoříme diagonální matici vložených poruchových impedancí $\left[\hat{\mathbf{Z}}_{\%}^{FP} \right]$ jako:

$$\left[\hat{\mathbf{Z}}_{\%}^{FP} \right] = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \Omega$$

Z plného vektoru předporuchových napětí $\hat{\mathbf{U}}_1^{\otimes}$ vytvoříme pomocí vektorů \mathbf{K} a \mathbf{L} vektor předporuchových napětí na branách poruch $\hat{\mathbf{U}}_1^{\otimes P}$ jako:

$$\hat{\mathbf{U}}_1^{\otimes P} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{U}}_{1(2)}^{\otimes} - \hat{\mathbf{U}}_{1(0)}^{\otimes} \\ \hat{\mathbf{U}}_{1(5)}^{\otimes} - \hat{\mathbf{U}}_{1(0)}^{\otimes} \end{pmatrix} = \left\langle \left\langle \hat{\mathbf{U}}_{1(0)}^{\otimes} = 0 \right\rangle \right\rangle = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{U}}_{1(2)}^{\otimes} \\ \hat{\mathbf{U}}_{1(5)}^{\otimes} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 112.145 \cdot e^{j1.948^\circ} \\ 112.062 \cdot e^{j1.050^\circ} \end{pmatrix} \text{ kV}$$

Vektor předporuchových proudů v branách poruch $\hat{\mathbf{I}}_1^{\otimes P}$ bude:

$$\hat{\mathbf{I}}_1^{\otimes P} = (0, 0)^T \text{ A}$$

Vektor dodatkových proudů v branách poruch určíme dle (7.11) jako:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{I}}_1^{\Delta P} &= -\left(\left[\hat{\mathbf{Z}}_1^P \right] + \left[\hat{\mathbf{Z}}_{\%}^{FP} \right] \right)^{-1} \cdot \left(\hat{\mathbf{U}}_1^{\otimes P} + \left[\hat{\mathbf{Z}}_{\%}^{FP} \right] \cdot \hat{\mathbf{I}}_1^{\otimes P} \right) = \\ &= \left(1.529 \cdot e^{j127.170^\circ}, 2.580 \cdot e^{j90.440^\circ} \right)^T \text{ kA} \end{aligned}$$

Pomocí funkce Alokace, popsané v subkapitole 7.6, získáme plný vektor dodatkových proudů $\hat{\mathbf{I}}_1^{\Delta}$ jako:

$$\hat{\mathbf{I}}_1^{\Delta} = \left(0, 1.529 \cdot e^{j127.170^\circ}, 0, 0, 2.580 \cdot e^{j90.440^\circ} \right)^T \text{ kA}$$

Plný vektor napětí sousledné složky při poruše získáme dle (7.12) jako:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{U}}_1 &= \hat{\mathbf{U}}_1^{\otimes} + \left[\hat{\mathbf{Z}}_1 \right] \cdot \hat{\mathbf{I}}_1^{\Delta} = \\ &= \left(8.990 \cdot e^{j72.103^\circ}, 15.295 \cdot e^{-j52.830^\circ}, 22.003 \cdot e^{-j16.636^\circ}, 72.710 \cdot e^{-j8.292^\circ}, 0 \right)^T \text{ kV} \end{aligned}$$

Výsledná napětí při poruše ve fázích A, B, C můžeme získat pomocí (7.13) jako:

uzel	A	B	C
1	$8.990 \cdot e^{j72.103^\circ} \text{ kV}$	$8.990 \cdot e^{-j47.897^\circ} \text{ kV}$	$8.990 \cdot e^{-j167.897^\circ} \text{ kV}$
2	$15.295 \cdot e^{-j52.830^\circ} \text{ kV}$	$15.295 \cdot e^{-j172.830^\circ} \text{ kV}$	$15.295 \cdot e^{-j67.170^\circ} \text{ kV}$
3	$22.003 \cdot e^{-j16.636^\circ} \text{ kV}$	$22.003 \cdot e^{-j136.636^\circ} \text{ kV}$	$22.003 \cdot e^{-j103.364^\circ} \text{ kV}$
4	$72.710 \cdot e^{-j8.292^\circ} \text{ kV}$	$72.710 \cdot e^{-j128.292^\circ} \text{ kV}$	$72.710 \cdot e^{-j111.708^\circ} \text{ kV}$
5	0	0	0

14.3 Ukázka výpočtu simultánních poruch pro jednofázové poruchy

Schéma námi vyšetřované sítě je zobrazeno na Obr. 64. Pro náš výpočet budeme předpokládat jednu jednofázovou a jednu dvoufázovou poruchu. Ideální dvoufázovou kovovou poruchu v uzlu 5 ve fázích A a B a jednofázovou poruchu s vloženou poruchovou impedancí 10Ω v uzlu 2 ve fázi A. Výpočet provedeme dle postupu uvedeného v subkapitole 7.3.

Nejprve stanovíme náhradní parametry obvodu, potřebné pro sestavení admitančních matic sítě všech tří složkových soustav. Matice sousledné složky bude stejná jako v předchozím příkladu 14.2. Pro zpětnou a netočivou složku nejprve sestavíme vektory příčných uzlových admitancí:

$$\hat{Y}_2 = \left(\frac{S_G}{jx_2 \cdot U_{NG}^2}, 0, 0, \frac{S''_{ks}}{jU_{NS}^2}, 0 \right)^T = (0 - j0.680, 0, 0, 0 - j0.083, 0)^T \quad S$$

$$\hat{Y}_0 = \left(\frac{S_G}{jx_0 \cdot U_{NG}^2}, 0, 0, \frac{S''_{ks}}{jU_{NS}^2}, 0 \right)^T = (0 - j1.361, 0, 0, 0 - j0.083, 0)^T \quad S$$

Dále za použití již sestavených vektorů **UP** a **UK** obsahujících počáteční, respektive koncové uzly jednotlivých podélných sekcí sítě, sestavíme vektory meziuzlových impedancí jako:

$$\hat{Z}_{pk1} = \hat{Z}_{pk2} = \hat{Z}_{pk}$$

$$\hat{Z}_{pk0} = \left(j10^6, (R_0 + jX_0) \cdot l_{V2}, (R_0 + jX_0) \cdot l_{V1}, (R_0 + jX_0) \cdot l_{V3} \right)^T$$

$$= \left(0. + j10^6, 7.50 + j42.735, 8.750 + j49.858, 5.00 + j28.490 \right)^T \quad \Omega$$

Vektory příslušných susceptancí budou za použití vektoru susceptance **B** z předchozího příkladu 14.2:

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_2 = \mathbf{B}$$

$$\mathbf{B}_0 = (0, 0, 0, 0)^T \quad \mu S$$

Obdobným způsobem jako u předchozího příkladu 14.2 použijeme vektory $\hat{Y}_1, \hat{Y}_2, \hat{Y}_0, \mathbf{UP}, \mathbf{UK}, \hat{Z}_{pk1}, \hat{Z}_{pk2}, \hat{Z}_{pk0}, \mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_0$ a \hat{T} k sestavení všech potřebných admitančních matic $[\hat{Y}_1], [\hat{Y}_2]$ a $[\hat{Y}_0]$. Pro zdrojový systém můžeme zpětnou admitanční matici sítě $[\hat{Y}_2]$ napsat jako:

$$\begin{bmatrix} 0 - j2040.82 & 64.94 + j112.47 & 0 & 0 & 0 \\ -64.94 + j112.47 & 22.99 - j87.20 & -22.99 + j74.84 & 0 & 0 \\ 0 & -22.99 + j74.84 & 77.17 - j251.13 & -19.70 + j64.15 & -34.48 + j112.26 \\ 0 & 0 & -19.70 + j64.15 & 19.70 - j146.74 & 0 \\ 0 & 0 & -34.48 + j112.26 & 0 & 34.48 - j112.23 \end{bmatrix} \quad mS$$

Inverzí pak získáme příslušnou impedanční matici zpětné složky $[\hat{\mathbf{Z}}_2]$ jako:

$$\begin{bmatrix} 2.46 + j62.59 & 140.28 + j165.61 & 90.30 + j116.37 & 31.74 + j58.73 & 90.33 + j116.39 \\ -73.28 + j204.28 & \mathbf{607.83 + j3355.87} & 314.65 + j2293.14 & -29.54 + j1048.65 & \mathbf{314.88 + j2293.64} \\ -55.62 + j136.39 & 314.65 + j2293.14 & 365.53 + j2402.83 & -14.93 + j1101.47 & 365.79 + j2403.35 \\ -35.00 + j56.85 & -29.54 + j1048.65 & -14.93 + j1101.47 & 1.44 + j1160.77 & -14.85 + j1101.73 \\ -55.63 + j136.42 & \mathbf{314.88 + j2293.64} & 365.79 + j2403.35 & -14.85 + j1101.73 & \mathbf{616.16 + j3218.05} \end{bmatrix} \cdot 10^{-2} \Omega$$

Obdobně můžeme netočivou admitanční matici sítě $[\hat{\mathbf{Y}}_0]$ napsat jako:

$$\begin{bmatrix} 0 - j1360.65 & 5 \cdot 10^{-3} + j9 \cdot 10^{-3} & 0 & 0 & 0 \\ 5 \cdot 10^{-3} + j9 \cdot 10^{-3} & 3.98 - j22.70 & -3.98 + j22.70 & 0 & 0 \\ 0 & -3.98 + j22.70 & 13.37 - j76.21 & -3.41 + j19.46 & -5.98 + j34.05 \\ 0 & 0 & -3.41 + j19.46 & 3.41 - j102.10 & 0 \\ 0 & 0 & -5.98 + j34.05 & 0 & 5.98 - j34.05 \end{bmatrix} \text{ mS}$$

Inverzí pak získáme příslušnou impedanční matici netočivé složky $[\hat{\mathbf{Z}}_0]$ jako:

$$\begin{bmatrix} 9.63 \cdot 10^{-6} + j7349.41 & 5.11 + j6.35 & 2.97 + j3.79 & 0.47 + j0.81 & 2.97 + j3.79 \\ -2.95 + j7.61 & \mathbf{162466.00 + j1.05 \cdot 10^6} & 87480.80 + j619512.00 & -1.97 + j120987.00 & \mathbf{87480.80 + j619512.00} \\ -1.80 + j4.47 & 87480.80 + j619512.00 & 87489.20 + j619537.00 & -1.06 + j120993.00 & 87489.20 + j619537.00 \\ -0.47 + j0.81 & -1.96568 + j120987.00 & -1.06 + j120993.00 & 23.78 \cdot 10^{-6} + j120999.00 & -1.06 + j120993.00 \\ -1.80 + j4.47 & \mathbf{87480.80 + j619512.00} & 87489.20 + j619537.00 & -1.06 + j120993.00 & \mathbf{137489.00 + j904437.00} \end{bmatrix} \cdot 10^{-4} \Omega$$

Dále sestavíme pomocné vektory \mathbf{K} a \mathbf{L} potřebné pro sestavení poruchové impedanční matice:

$$\mathbf{K} = (2, 5, 5)^T$$

$$\mathbf{L} = (0, 0, 0)^T$$

Dle (7.46) sestavíme poruchové impedanční matice sítě všech složek (Příslušné prvky, jsou v matici $[\hat{\mathbf{Z}}_1]$, $[\hat{\mathbf{Z}}_2]$ a $[\hat{\mathbf{Z}}_0]$ vyznačeny červenou barvou):

$$[\hat{\mathbf{Z}}_1^P] = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{1(2,2)} & \hat{\mathbf{Z}}_{1(2,5)} & \hat{\mathbf{Z}}_{1(2,5)} \\ \hat{\mathbf{Z}}_{1(5,2)} & \hat{\mathbf{Z}}_{1(5,5)} & \hat{\mathbf{Z}}_{1(5,5)} \\ \hat{\mathbf{Z}}_{1(5,2)} & \hat{\mathbf{Z}}_{1(5,5)} & \hat{\mathbf{Z}}_{1(5,5)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 575.45 + j3268.12 & 295.47 + j2233.19 & 295.47 + j2233.19 \\ 295.47 + j2233.19 & 604.74 + j3176.48 & 604.74 + j3176.48 \\ 295.47 + j2233.19 & 604.74 + j3176.48 & 604.74 + j3176.48 \end{bmatrix} \cdot 10^{-2} \Omega$$

$$\begin{bmatrix} \hat{Z}_2^P \\ \hat{Z}_0^P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{2(2,2)} & \hat{Z}_{2(2,5)} & \hat{Z}_{2(5,5)} \\ \hat{Z}_{2(5,2)} & \hat{Z}_{2(5,5)} & \hat{Z}_{2(5,5)} \\ \hat{Z}_{2(5,2)} & \hat{Z}_{2(5,5)} & \hat{Z}_{2(5,5)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 607.83 + j3355.87 & 314.88 + j2293.64 & 314.88 + j2293.64 \\ 314.88 + j2293.64 & 616.16 + j3218.05 & 616.16 + j3218.05 \\ 314.88 + j2293.64 & 616.16 + j3218.05 & 616.16 + j3218.05 \end{bmatrix} \cdot 10^{-2} \Omega$$

$$\begin{bmatrix} \hat{Z}_0^P \\ \hat{Z}_0^P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{0(2,2)} & \hat{Z}_{0(2,5)} & \hat{Z}_{0(2,5)} \\ \hat{Z}_{0(5,2)} & \hat{Z}_{0(5,5)} & \hat{Z}_{0(5,5)} \\ \hat{Z}_{0(5,2)} & \hat{Z}_{0(5,5)} & \hat{Z}_{0(5,5)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1624.66 + j10468.20 & 874.81 + j6195.12 & 874.81 + j6195.12 \\ 874.81 + j6195.12 & 1374.89 + j9044.37 & 1374.89 + j9044.37 \\ 874.81 + j6195.12 & 1374.89 + j9044.37 & 1374.89 + j9044.37 \end{bmatrix} \cdot 10^{-2} \Omega$$

Pro další výpočty budeme potřebovat předporuchová napětí všech tří složek \hat{U}_1^\otimes , \hat{U}_2^\otimes a \hat{U}_0^\otimes . Vektor předporuchových napětí sousledné složky \hat{U}_1^\otimes převezmeme z předchozího příkladu 14.2. Jelikož předpokládáme symetrický předporuchový stav, budou vektory \hat{U}_2^\otimes a \hat{U}_0^\otimes následující:

$$\hat{U}_2^\otimes = \hat{U}_0^\otimes = (0, 0, 0, 0, 0)^T V$$

Dále dle (7.9) vytvoříme diagonální matici vložených poruchových impedancí $[\hat{Z}_\%^{FP}]$ jako:

$$[\hat{Z}_\%^{FP}] = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Omega$$

Z plného vektoru předporuchových napětí \hat{U}_1^\otimes vytvoříme pomocí vektorů \mathbf{K} a \mathbf{L} vektor předporuchových napětí na branách poruch $\hat{U}_1^{\otimes P}$ jako:

$$\hat{U}_1^{\otimes P} = \begin{pmatrix} \hat{U}_{1(2)}^\otimes - \hat{U}_{1(0)}^\otimes \\ \hat{U}_{1(5)}^\otimes - \hat{U}_{1(0)}^\otimes \\ \hat{U}_{1(5)}^\otimes - \hat{U}_{1(0)}^\otimes \end{pmatrix} = \langle\langle \hat{U}_{1(0)}^\otimes = 0 \rangle\rangle = \begin{pmatrix} \hat{U}_{1(2)}^\otimes \\ \hat{U}_{1(5)}^\otimes \\ \hat{U}_{1(5)}^\otimes \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 112.145 \cdot e^{j1.948^\circ} \\ 112.062 \cdot e^{j1.050^\circ} \\ 112.062 \cdot e^{j1.050^\circ} \end{pmatrix} kV$$

Pro zbývající složky pak obdobným postupem získáme:

$$\hat{U}_2^{\otimes P} = \hat{U}_0^{\otimes P} = (0, 0, 0)^T V$$

Vektory předporuchových proudů v branách poruch $\hat{I}_1^{\otimes P}$, $\hat{I}_2^{\otimes P}$ a $\hat{I}_0^{\otimes P}$ budou:

$$\hat{I}_1^{\otimes P} = \hat{I}_2^{\otimes P} = \hat{I}_0^{\otimes P} = (0, 0, 0)^T A$$

Protože vyšetřujeme jednofázové poruchy v různých poruchových fázích, musíme dle Tab. 6 vytvořit diagonální matice pomocných proměnných $[\hat{\epsilon}_{1\%}^P]$ a $[\hat{\epsilon}_{2\%}^P]$:

$$\begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & a^2 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & a \end{bmatrix}$$

Vektor rezultujícího napětí určíme dle (7.26) jako:

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{U}}_{120}^P &= \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P \end{bmatrix} \cdot \left(\hat{\boldsymbol{U}}_1^{\otimes P} + \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{Z}}_1^P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P \end{bmatrix}^{-1} \cdot \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\otimes P} + \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{Z}}_1^P \end{bmatrix} \cdot \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\otimes P} \right) \\ &+ \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P \end{bmatrix} \cdot \left(\hat{\boldsymbol{U}}_2^{\otimes P} + \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{Z}}_2^P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P \end{bmatrix}^{-1} \cdot \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\otimes P} + \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{Z}}_2^P \end{bmatrix} \cdot \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\otimes P} \right) + \hat{\boldsymbol{U}}_0^{\otimes P} \\ &= \left(112.145 \cdot e^{j1.958^\circ}, 112.062 \cdot e^{j1.050^\circ}, 112.062 \cdot e^{j118.950^\circ} \right)^T \text{ kV} \end{aligned}$$

Rezultující poruchovou impedanční matici určíme dle (7.27) jako:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{Z}}_{120}^P \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{Z}}_1^P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P \end{bmatrix}^{-1} + \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{Z}}_2^P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P \end{bmatrix}^{-1} + \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{Z}}_0^P \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 28.08 + j170.92 & 14.85 + j107.22 & 6.22 + j39.19 \\ 14.85 + j107.22 & 25.96 + j154.39 & 8.00 + j58.37 \\ 5.17 + j39.46 & 7.28 + j58.57 & 25.96 + j154.39 \end{bmatrix} \Omega \end{aligned}$$

Dodatkové proudy všech tří složek určíme dle (7.33) a (7.20) jako:

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\Delta P} &= \left(\begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{Z}}_{120}^P \end{bmatrix} + 3 \cdot \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{Z}}_{\%}^{FP} \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \left(-3 \cdot \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{Z}}_{\%}^{FP} \end{bmatrix} \cdot \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\otimes P} - \hat{\boldsymbol{U}}_{120}^P \right) \\ &= \left(0.327 \cdot e^{j114.025^\circ}, 0.793 \cdot e^{j117.277^\circ}, 1.033 \cdot e^{-j33.640^\circ} \right)^T \text{ kA} \\ \hat{\boldsymbol{I}}_1^{\Delta P} &= \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1\%}^P \end{bmatrix}^{-1} \cdot \left(\hat{\boldsymbol{I}}_0^{\otimes P} + \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\Delta P} \right) - \hat{\boldsymbol{I}}_1^{\otimes P} \\ &= \left(0.327 \cdot e^{j114.025^\circ}, 0.793 \cdot e^{j117.277^\circ}, 1.033 \cdot e^{-j86.360^\circ} \right)^T \text{ kA} \\ \hat{\boldsymbol{I}}_2^{\Delta P} &= \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2\%}^P \end{bmatrix}^{-1} \cdot \left(\hat{\boldsymbol{I}}_0^{\otimes P} + \hat{\boldsymbol{I}}_0^{\Delta P} \right) - \hat{\boldsymbol{I}}_2^{\otimes P} \\ &= \left(0.327 \cdot e^{j114.025^\circ}, 0.793 \cdot e^{j117.277^\circ}, 1.033 \cdot e^{-j153.640^\circ} \right)^T \text{ kA} \end{aligned}$$

Pomocí funkce Alokace, popsané v subkapitole 7.6, získáme plný vektor dodatkových proudů $\hat{\boldsymbol{I}}_1^\Delta$, $\hat{\boldsymbol{I}}_2^\Delta$ a $\hat{\boldsymbol{I}}_0^\Delta$ jako:

$$\hat{\mathbf{I}}_1^\Delta = \left(0, 0.327 \cdot e^{j114.025^\circ}, 0, 0, 1.762 \cdot e^{j99.740^\circ}\right)^T \text{ kA}$$

$$\hat{\mathbf{I}}_2^\Delta = \left(0, 0.327 \cdot e^{j114.025^\circ}, 0, 0, 1.313 \cdot e^{j169.178^\circ}\right)^T \text{ kA}$$

$$\hat{\mathbf{I}}_0^\Delta = \left(0, 0.327 \cdot e^{j114.025^\circ}, 0, 0, 0.514 \cdot e^{j14.980^\circ}\right)^T \text{ kA}$$

Plné vektory napětí všech složek získáme dle (7.34) jako:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{U}}_1 &= \hat{\mathbf{U}}_1^\otimes + [\hat{\mathbf{Z}}_1] \cdot \hat{\mathbf{I}}_1^\Delta \\ &= \left(9.54 \cdot e^{j53.19^\circ}, 61.82 \cdot e^{-j0.32^\circ}, 62.92 \cdot e^{-j0.84^\circ}, 90.39 \cdot e^{-j3.16^\circ}, 48.03 \cdot e^{j1.19^\circ}\right)^T \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{U}}_2 &= \hat{\mathbf{U}}_2^\otimes + [\hat{\mathbf{Z}}_2] \cdot \hat{\mathbf{I}}_2^\Delta \\ &= \left(2.39 \cdot e^{-j153.17^\circ}, 37.57 \cdot e^{-j123.17^\circ}, 36.85 \cdot e^{-j119.09^\circ}, 16.70 \cdot e^{-j109.66^\circ}, 48.03 \cdot e^{-j118.81^\circ}\right)^T \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{U}}_0 &= \hat{\mathbf{U}}_0^\otimes + [\hat{\mathbf{Z}}_0] \cdot \hat{\mathbf{I}}_0^\Delta \\ &= \left(3.37 \cdot 10^{-4} \cdot e^{j118.56^\circ}, 43.77 \cdot e^{j148.56^\circ}, 35.30 \cdot e^{j131.86^\circ}, 6.83 \cdot e^{-j139.92^\circ}, 48.03 \cdot e^{j121.19^\circ}\right)^T \text{ kV} \end{aligned}$$

Výsledná napětí při poruše ve fázích A, B, C můžeme získat pomocí (7.13) jako:

uzel	A	B	C
1	$7.469 \cdot e^{j61.362^\circ} \text{ kV}$	$11.601 \cdot e^{-j60.254^\circ} \text{ kV}$	$9.977 \cdot e^{-j159.352^\circ} \text{ kV}$
2	$9.818 \cdot e^{-j65.975^\circ} \text{ kV}$	$45.09 \cdot e^{-j133.564^\circ} \text{ kV}$	$139.083 \cdot e^{-j127.645^\circ} \text{ kV}$
3	$22.498 \cdot e^{-j17.704^\circ} \text{ kV}$	$33.134 \cdot e^{-j124.962^\circ} \text{ kV}$	$134.482 \cdot e^{-j122.955^\circ} \text{ kV}$
4	$81.070 \cdot e^{-j11.606^\circ} \text{ kV}$	$78.258 \cdot e^{-j119.246^\circ} \text{ kV}$	$113.103 \cdot e^{-j120.175^\circ} \text{ kV}$
5	0	0	$144.099 \cdot e^{-j121.186^\circ} \text{ kV}$

14.4 Obsah příloženého CD

- disertační práce ve formátu pdf,
- program SimPoruchy ve verzi 3.0,
- výuková videa k programu SimPoruchy 3.0 dle Tab. 10.

Tab. 10 Výuková videa k programu SimPoruchy 3.0 na příloženém CD.

číslo videa	obsah videa
1	tvorba jednoduché sítě
2	vložení poruchy a výpočet proudů větvemi
3	ukázka funkce nadproudové ochrany
4	jednoduché (bez použití optimalizace) nastavení selektivity
5	ukázka funkce nadproudové směrové ochrany
6	ukázka funkce rozdílové ochrany
7	ukázka funkce rozdílové ochrany použitá na transformátor
8	výpočet zkratových poměrů ve všech uzlech sítě
9	optimalizace nastavení ochran
10	zobrazení charakteristik ochran
11	zobrazení fázorových diagramů