

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

DISERTAČNÍ PRÁCE

Plzeň, 2019

Ing. ROMAN VYKUKA



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
UNIVERSITY OF WEST BOHEMIA

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

**ROZVOJ A PROVOZ DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ SE
ZAMĚŘENÍM NA ZABEZPEČENÍ A KVALITU
DODÁVEK ELEKTRICKÉ ENERGIE**
DEVELOPMENT AND OPERATION OF DISTRIBUTION NETWORKS WITH A FOCUS ON
RELIABILITY AND QUALITY OF POWER SUPPLY

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Roman Vykuka

VEDOUCÍ PRÁCE
ADVISOR

doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.

PLZEŇ 2019

ABSTRAKT

Disertační práce se zabývá změnou koncepce rozvoje sítí vn z hlediska topologie a způsobu provozování při zachování trendu zvyšování spolehlivosti dodávek elektrické energie. Práce shrnuje trendy, které formují odvětví energetiky jako celku, a dále popisuje opatření, kterými provozovatelé distribučních soustav reagují na zvyšující se dynamiku okolního světa. Stěžejní část práce se věnuje propojování vývodů vn jakožto prostředku pro zvyšování spolehlivosti dodávek elektrické energie. Podrobně je rozebrána problematika spínání vývodů napájených z různých částí nadřazené soustavy z hlediska rozdílového úhlu napětí, vyrovnávacího proudu a vlivu produkce rozptýlených zdrojů. Je představen a verifikován vlastní výpočetní model, pomocí něhož jsou provedeny rozsáhlé analýzy propojených vývodů vn. Výsledky simulací jsou vyhodnoceny s ohledem na výkonové a proudové zatížení kmenových linek a vypínací schopnost úsekových odpínačů bez zášecí komory, pro které jsou stanoveny oblasti rizikového spínání. Pro reálnou síť je dále provedena analýza trvalého paralelního provozu vývodů vn napájených ze společného transformátoru a provedeno porovnání se stávajícím radiálním provozem vývodů, mimo jiné z hlediska připojitelného výkonu zdrojů. V tomto ohledu přináší práce nový pohled na posuzování připojitelnosti rozptýlených zdrojů začleněných do systému regulace napětí. Z hlediska budoucího rozvoje zkruhované sítě vn práce představuje metodiku analýzy topologických dat pro účely identifikace kmenů a odboček vhodných k zakruhování.

KLÍČOVÁ SLOVA

rozvoj sítí, distribuční síť, síť vysokého napětí, propojování vývodů, úsekové odpínače, decentrální zdroje energie, výpočet chodu soustavy, analýza topologie sítě

ABSTRACT

The thesis deals with the change of the conception of the medium-voltage network in terms of development, topology, and operation scenarios, with a focus on increasing the power supply reliability. The paper summarizes the trends that shape the whole energy sector and introduces the measures that distribution system operators employ in response to the increasing dynamics of the outside world. The main part of the thesis is dedicated to the interconnection of medium-voltage feeders as the tools for increasing the power-supply reliability. The switching of feeders fed from different parts of upstream network is discussed in more detail from the point of view of angular voltage displacement, circulating current and the effect of distributed energy resources. Own calculation model is introduced, verified and used for the extensive analyzes of interconnected medium-voltage feeders. The results of the simulations are evaluated in terms of power and current flows through the trunk lines. Moreover, the areas of unsecure switching are identified and are based on the breaking capacity of the sectionalizing switches without a extinguishing chamber. For real network, the analysis of permanent parallel operation of medium-voltage feeders fed from one transformer is performed and compared to the common radial operation. From this point of view, the thesis brings a new perspective on the assessment of the connectivity of distributed resources integrated into the grid voltage control system. From the perspective of future development of ringed medium-voltage network, the thesis presents the methodology of analysis of topological data for the purpose of the identification of trunk lines and lateral branches suitable for looping.

KEYWORDS

network development, distribution network, medium-voltage network, feeder interconnection, sectionalizing switch, distributed energy resources, load-flow analysis, analysis of network topology

VYKUKA, Roman. *Rozvoj a provoz distribučních sítí se zaměřením na zabezpečení a kvalitu dodávek elektrické energie*. Plzeň, 2019, 118 s. disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie. Vedoucí práce: doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně a použil jsem prameny, které cituji a uvádím v seznamu literatury. V předložené vědecké práci jsou použity obvyklé vědecké postupy.

Plzeň

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval své školitelce paní doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále mé poděkování patří kolegům ze společnosti ČEZ Distribuce a.s. a E.ON Distribuce a.s. za poskytnutá data, odborné rady a konzultace. Závěrem musím poděkovat své rodině, blízkým a zejména své partnerce, která mi po celou dobu studia byla a je velkou oporou.

Plzeň

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod	11
1.1	Motivace	11
1.2	Současný stav problematiky	12
1.3	Cíle disertační práce	14
2	Rozvoj distribučních soustav	16
2.1	Kvalita dodávek elektrické energie	16
2.2	Změna výkonových poměrů a toků v DS	20
2.3	Koncepční změny v distribučních sítích	23
3	Výpočty a analýzy v distribuční soustavě	27
3.1	Popis a modely distribuční soustavy	27
3.2	Trasovací úlohy	30
3.3	Výpočet ustáleného chodu soustavy	32
3.3.1	Modelování uzlů soustavy	32
3.3.2	Modelování větví soustavy	32
3.3.3	Admitanční matice	33
3.3.4	Zahrnutí dvouvinutového transformátoru	34
3.3.5	Zahrnutí kompenzačního prvku nebo připojené soustavy	35
3.4	Numerické metody pro výpočet chodu soustavy	35
3.5	Newton-Raphson numerická metoda	36
3.6	Aplikace Newton-Raphson metody pro řešení chodu soustavy	37
3.6.1	Jacobiho matice	37
3.6.2	Výpočet rozdílového vektoru	39
3.6.3	Řešení soustavy rovnic	39
3.6.4	Začlenění jalových mezí zdroje	40
3.6.5	Vývojový diagram NR metody	42
3.7	Výsledky testů NR metody	42
4	Propojování vývodů vn	44
4.1	Vyrovňovací proud	46
4.2	Vyhodnocení měření rozdílu fázorů napájecích napětí	48
4.3	Vyhodnocení měření vyrovňovacího proudu při spínání vývodů vn	53
4.4	Návrh metodiky výpočtu vyrovňovacího proudu simulací chodu soustavy	55
4.4.1	Návrh výpočetního algoritmu	57
4.4.2	Verifikace výpočetního algoritmu	59

4.5	Návrh metodiky rozvoje zkruhované sítě	60
4.5.1	Trasování kmenů a odboček vn	61
4.5.2	Klasifikace odboček	62
5	Simulační výpočty propojených vývodů vn	65
5.1	Popis modelované sítě	65
5.2	Interpretace výsledků simulací	65
5.3	Výkonové a proudové poměry na vývodech bez vnořené výroby	67
5.3.1	Vyhodnocení výkonových poměrů	67
5.3.2	Vyhodnocení proudových poměrů	69
5.4	Výkonové a proudové poměry na vývodech s vnořenou výrobou	71
5.4.1	Vyhodnocení výkonových poměrů	71
5.4.2	Vyhodnocení proudových poměrů	73
5.4.3	Vyhodnocení vlivu režimu vnořené výroby	75
5.5	Vyhodnocení oblastí rizikových z hlediska spínání	78
5.6	Vyhodnocení z hlediska kontroly průřezu vodičů	79
5.7	Dílčí závěr k problematice propojování vývodů vn	80
6	Případová studie analýzy vývodů vn	82
6.1	Zpracování a příprava síťových dat	82
6.2	Analýza obvodu propojovaných vývodů vn	83
6.3	Analýza základního stavu a náhradního napájení	85
6.4	Analýza zvýšení připojitelného výkonu zdrojů	88
6.5	Analýza propojených vývodů napájených z různých transformátorů	91
6.6	Analýza propojení odboček sítě vn	95
7	Závěr	98
7.1	Zhodnocení vlastních přínosů	100
7.2	Možnosti v pokračování výzkumu	101
	Literatura	102
	Vlastní publikace	106
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	110
	Seznam příloh	113
A	Přílohy	114
A.1	Seznam testovacích sítí	114
A.2	Fotodokumentace spínacích prvků v poli vn	115

Seznam obrázků

2.1	Porovnání ukazatele SAIDI	17
2.2	Rozdělení přerušení dle napěťových hladin a kategorie	17
2.3	Porovnání míry kabelizace v Evropských zemích	18
2.4	Míra kabelizace DS v ČR	19
2.5	Automatika vypnutí ve druhé pauze OZ	19
2.6	Vývoj výroby a predikce nárůstu instalovaného výkonu OZE	20
2.7	Rozptyl napětí v DS s instalovanými OZE	22
2.8	Předpokládaný vývoj spotřeby v ČR do r. 2040	23
2.9	Architektonický model chytrých sítí	24
3.1	Modely elektrické sítě	27
3.2	Datový model	29
3.3	Pořadí procházení vrcholů grafu DFS a BFS algoritmem	30
3.4	Alogirmus pro identifikaci komponent grafu	31
3.5	Náhradní π -článek vedení	33
3.6	Náhradní π -článek transformátoru	35
3.7	Jalové meze PU uzlů	41
3.8	Vývojový diagram NR metody	42
4.1	Diagram rozdílu fázoru napětí	46
4.2	Varianty propojování vývodů vn	47
4.3	Vyrovňovací proud při spínání vývodů vn	47
4.4	Schéma části sítě 22 kV	49
4.5	Průběh I_v , $\Delta\vartheta$ a zatížení vývodu Kunžak	50
4.6	Průběh min. a max. denních hodnot $\Delta\vartheta$	50
4.7	Distribuční funkce rozdílu velikostí a úhlů napětí mezi HRA–DAC	51
4.8	I_v funkcí $\Delta\vartheta$	52
4.9	Měření během propojování vývodů	54
4.10	Tok výkonu a proudu vývodem Kunžak během zkoušky	54
4.11	Tok výkonu a proudu vývodem Slavonice během zkoušky	55
4.12	Zjednodušené schéma řešené sítě	55
4.13	Závislost rozdílového úhlu na injektovaném výkonu	57
4.14	Vývojový diagram modifikovaného výpočtu Load Flow	58
4.15	Schéma obvodu v programu MVA Schematic	59
4.16	Identifikace kmenů a odboček	62
4.17	Vývojový diagram procesu klasifikace odboček	64
5.1	Schéma obvodu pro simulační výpočty	66
5.2	Interpretace výstupů simulace	66
5.3	Profil P podél propojených vývodů	68

5.4	Profil Q podél propojených vývodů	69
5.5	Profil P, Q v závislosti na napětí	69
5.6	Profil I podél propojených vývodů	70
5.7	Profil I podél propojených vývodů	70
5.8	Umístění vnořené výroby	71
5.9	Profil P podél propojených vývodů se zdrojem	72
5.10	Profil P podél propojených vývodů s různými zdroji	72
5.11	Profil I podél propojených vývodů se zdrojem	73
5.12	Profil I podél propojených vývodů se zdrojem	73
5.13	Porovnání profilů I podél propojených vývodů s výrobou	74
5.14	Charakteristika funkce $Q(U)$	75
5.15	Vliv účinníku zdroje na profil I podél propoj. vývodů	76
5.16	Vliv regulace Q na profil I podél propoj. vývodů	77
5.17	Vliv regulace Q na profil U podél propoj. vývodů	77
5.18	Oblasti s nedostatečnou vypínací kapacitou úsečníků	78
5.19	Vliv velikosti a pozice zdroje na pásma problematická z hlediska spínání úsečnicků	79
5.20	Posouzení proudového zatížení kmenových linek	80
6.1	Schéma řešené sítě	84
6.2	Profil P podél vývodů	85
6.3	Profil Q podél vývodů	86
6.4	Profil U, I podél vývodů	86
6.5	Profil U, I při náhradním napájení	87
6.6	Vývojový diagram výpočtu připojitelnost zdrojů	89
6.7	Vliv připojeného zdroje $3 \times 7,1 \text{ MW} (\cos \varphi = 0,95)$ na profil U, I	91
6.8	Profil P, Q při toku I_v ze stanice A do B	92
6.9	Profil I při toku I_v ze stanice A do B	93
6.10	Profil U při toku I_v ze stanice A do B	94
6.11	Profil P, Q při toku I_v ze stanice B do A	94
6.12	Profil I při toku I_v ze stanice B do A	94
6.13	Analýza odboček sítě vn	95
A.1	Úsečník pružinový (na rovinné konzoli)	115
A.2	Úsečník se zhášecí komorou (na rovinné konzoli)	115
A.3	Dálkově ovládaný úsečník se zhášecí komorou (na rovinné konzoli)	116
A.4	Dálkově ovládaný úsečník se zhášecí komorou (na vedení typu pařát)	116
A.5	Dálkově ovládaný úsečník se zhášecí komorou na rozhraní vývodů	117
A.6	Odpojený recloser	117
A.7	Recloser v provozu (dálkově ovládaný vypínač s funkcí ochrany v poli vn)	118

Seznam tabulek

3.1	Výsledky testů NR metody	43
4.1	Vypínací schopnosti úsečníků	44
4.2	Maximální provozní proud vodičů vn	45
4.3	Vyhodnocení sledovaného období	52
4.4	Parametry vývodů	53
4.5	Porovnání simulace a měření	60
4.6	Základní parametry pro hodnocení tech. stavu úseku vedení	63
6.1	Parametry vývodů	83
6.2	Vlivu stávajících zdrojů na změnu napětí ΔU	90
6.3	Max. připojitelný P_g zdrojů ve vývodu B dle kritéria ΔU	90
6.4	Shrnutí analýzy propojení odboček vn	96
A.1	Seznam sítí použitých pro testování Load Flow výpočtů	114

1 Úvod

Úkolem distribuční soustavy je zajištění bezpečné a hospodárné dodávky elektrické energie odběrateli v požadovaném místě, čase a kvalitě. Soustava samotná představuje komplexní systém sestávající vedle silových prvků i ze zařízení měřicích, ochranných, řídicích systémů, sdělovací infrastruktury a informačních systémů.

Elektroenergetika platila po dlouhá desetiletí za poměrně konzervativní průmyslové odvětví. Situace se postupně začala měnit v průběhu devadesátých let, kdy začal sílit tlak na liberalizaci energetického sektoru. Dílčím milníkem se stal rok 2000, kdy byl přijat takzvaný energetický zákon, v rámci něhož byl zřízen *Energetický regulační úřad* (ERÚ) jakožto ústřední orgán státní správy pro výkon regulace v odvětví energetiky, ve které vzniká přirozený monopol provozovatelů (držitelů licence na provoz DS).

Energetický zákon dává mj. legislativní rámec kvalitě dodávek elektrické energie, jejíž standardy předepisuje ERÚ prostřednictvím vyhlášky č. 540/2005 Sb. ve znění vyhlášky č. 41/2010 Sb. [3]. Technické požadavky kladené na chod distribučních soustav jsou upraveny dokumentem *Pravidla provozování distribučních soustav* (PPDS) [2], charakteristiky napětí dále normou ČSN EN 50160 [1].

1.1 Motivace

Hlavní hybnou silou změn v odvětví energetiky je snaha o dekarbonizaci a obecně „čistší energetiku“. Jedná se o celosvětový trend, který formou iniciativ, doporučení a směrnic koordinuje na úrovni svých členských států i *Evropská unie* (EU).

Dlouhodobý tlak na rozvoj OZE (obnovitelných zdrojů energie) jakožto cesty k čistší energetice, potvrdila EU závazkem pokrytí 32 % spotřeby produkcí energie z obnovitelných zdrojů do roku 2030. Tento závazek byl formulován v aktualizované směrnici [20], která je součástí širšího balíčku s názvem *Čistá energie pro všechny Evropany* (CEP), známého spíše jako Zimní balíček neboli Winter Package [21]. Cílem CEP je vedle podpory OZE i stanovení nových pravidel energetického trhu, na kterém bude odběratel hrát aktivní a ústřední roli, a to vše při zachování vysoké míry zabezpečení dodávek energie.

V rámci návrhu Aktualizace státní energetické koncepce připravilo Ministerstvo průmyslu a obchodu Národní akční plán pro chytré sítě (NAP-SG), který počítá s implementací konceptu inteligentních sítí, což bude mít přímý technicko-ekonomický dopad zejména na provozovatele distribučních soustav. V definičním dokumentu NAP-SG jsou formulovány předpoklady vývoje energetiky až do roku 2040, kdy by instalovaný výkon OZE měl dosáhnout hodnoty blízké 10 TW [22].

Pakliže se odhady naplní a přibližně polovinu z uvedené hodnoty bude tvořit výkon malých zdrojů na hladině nn, tedy šestnáctkrát více oproti roku 2016, nebude bez implementace inteligentních sítí dle názoru autora možné takovýto nárůst zvládnout.

Jak zmiňuje i NAP–SG, pro úspěšnou integraci velkého objemu OZE bude nutné přehodnotit stávající design a způsob provozování sítí vn a nn. Ve spojení s tlakem ERÚ na zvyšování kvality dodávek to prakticky znamená přistoupit ke kruhování a paralelnímu provozu napáječů, což s sebou přináší i vysoké nároky na chránění a distribuční automatizaci, která umožní sítě inteligentně řídit.

1.2 Současný stav problematiky

Provozovatelé distribučních soustav reagují na měnící se prostředí energetiky realizací pilotních projektů, nasazováním prvků distribuční automatizace, rozvojem komunikační infrastruktury a zaváděním nových metodik v oblasti správy kondice aktiv.

Z hlediska provozního se distributoři snaží hledat efektivní postupy jak pozitivně ovlivnit kvalitu a nepřetržitost dodávek elektrické energie. Cílem je minimalizovat manipulace (zejména na hladinách vn), kdy dochází k dočasnému beznapětovému stavu. Například při plánovaném přerušení dodávek lze omezit postiženou oblast vhodnou změnou topologie tak, aby byla odpojena nejmenší možná část sítě a minimum odběratelů. Vývody jsou děleny do sekcí pomocí úsekových odpínačů, které jsou umístěny i na jejich koncích pro případné propojení se sousedním nebo protějším vývodem. Trendem v této oblasti je nasazování dálkově ovládaných prvků [8].

Problematika rekonfigurace sítě na hladině vn patří mezi živá témata jak u nás, tak v zahraničí. Vedle zvýšení kvality dodávek se paralelní provoz vývodů používá například při manipulacích z důvodu lepšího rozložení výkonu mezi vývody, snížení ztrát či stabilizace napětí. Pro řešení rozložení výkonů a napětového profilu podél propojených vývodů lze aplikovat celou řadu výpočetních postupů, které představuje například článek [10], kde jsou prezentovány moderní heuristické metody. Podstatně jednodušší a přímočařejší výpočet napětového profilu s nerovnoměrným zatížením podél vývodů lze najít v článku [11]. Obecné podmínky kladené na výpočetní procedury jsou univerzálnost a rychlost výpočtu při zachování dobré přesnosti obdržených výsledků. Z tohoto pohledu se nabízí využití konvenčních numerických metod pro řešení ustáleného chodu soustavy (Newton-Raphson, Fast-Decoupled). Zmíněné metody jsou v této práci aplikovány pro řešení problematiky propojování vývodů vn.

Při propojování sousedních vývodů je nutné rozlišovat, zda jsou oba napájeny ze stejné nebo dvou různých stanic 110 kV/vn. Při propojování různých uzlových

oblastí musí být ověřena i velikost rázového vyrovnávacího proudu, který v součtu s provozním proudem může vést k překročení vypínací schopnosti úsekových odpínačů, případně reakci nadproudových ochran, což jsou jevy, kterým se snaží distributoři předcházet, a které v konečném důsledku mohou způsobit přerušování dodávky [12, 13]. Dále může dojít i k překročení proudové zatížitelnosti určitých sekcí vývodů, neboť z historického hlediska se sítě budovaly se snižujícím se průřezem i na kmenových linkách.

Velikost vyrovnávacího proudu lze stanovit na základě znalosti rozdílu úhlů fázorů napětí v napájecích rozvodnách. Rozsáhlejší analýza poměrů na propojených vývodech napájených z různých uzlových napájecích stanic společně s citlivostní analýzou je představena v článku [14]. V publikaci [15] lze nalézt řešení dané problematiky pomocí komerčního softwaru pro nesymetricky zatížené vývody. Ve studii [16] autoři navíc zohledňují i proměnlivost zatížení vývodů během dne a dále simulují přechodové jevy vznikající při spínání.

Pro stanovení velikosti vyrovnávacího proudu s vysokou přesností je potřeba znát napětové poměry (velikost i úhel) v místě sepnutí vývodů. Z technicko-ekonomického hlediska však nejsou tyto údaje k dispozici. Je tedy nutné vycházet pouze z hodnot změřených v napájecích stanicích 110 kV/vn, což lze realizovat vyspělými měřicími systémy.

Fázory napětí pro následný dopočet vyrovnávacího proudu lze získat například systémem pro měření synchronních fázorů *Wide Area Monitoring System* (WAMS), který byl původně využíván zejména v přenosových soustavách pro sledování stavu sítě v reálném čase. V posledních letech jsou však systémy WAMS čím dál častěji nasazovány i v distribučních soustavách, kde nachází uplatnění právě při spínání uzlových oblastí, přípravě provozu a provozních manipulací. Znalost informací o rozdílu úhlu fázorů napětí a vyrovnávacího proudu jsou pro dispečera cenné. Skutečnost, že se jedná o aktuální a živé téma, podporuje vznik komerčního softwaru, který nabízí podporu při spínání v DS [17].

Dalším z trendů posledních let, který se uplatňuje zatím zejména v zahraničí, je nasazování systémů pokročilé distribuční automatizace [18]. Tento přístup je založen na instalaci prvků v DS, které mohou být ovládány vzdáleně a vzájemně komunikují. Jedná se jak o prvky pasivní (měření), tak aktivní (spínače), které společně s řídicím systémem tvoří řetězec umožňující vyhodnocovat stav sítě v reálném čase, provádět nad modelem sítě výpočty a na základě optimalizačních kritérií automaticky (bez zásahu dispečera a tudíž s minimální časovou prodlevou) realizovat změny konfigurace [19].

Při spínání různých uzlových oblastí vn se může vyskytnout problém nedostatečné vypínací schopnosti úsekových odpínačů, který vede k nutnosti krátkodobě vypnout i odběratele, kteří by manipulací nemuseli být dotčeni při dostatečné vy-

pínací schopnosti úsečníků. Situaci ještě komplikuje vnořená výroba instalovaná na vývodech vn. Při velmi nepříznivé situaci je před provedením manipulací v síti vn nutné provést také zásahy v nadřazené síti 110 kV. Manipulace v síti 110 kV je možné provádět při dodržení kritéria N-1, jehož splnění se ověřuje kontingenční analýzou. Jedná se tedy o komplexní problém napříč napěťovými hladinami, který vyžaduje netriviální řešení s použitím pokročilých výpočetních metod.

V ČR se nikdo zmíněné problematice doposud nevěnoval takto komplexně. Řešeny byly pouze dílčí problémy, většinou odděleně od sebe. Jak ukazují například publikace [12, 14], jedná se o aktuální téma, kterému se věnují i v zahraničí, kde danou problematiku řešili zejména z pohledu rekonfigurace sítě, většinou z důvodu snížení ztrát či optimalizace počtu a umístění spínacích prvků. Neřeší však důležitou otázku, zda spínací prvky budou schopny za daných podmínek obvod přerušit. Cíle práce je možno shrnout do následujících odstavců.

1.3 Cíle disertační práce

Aktuální vývoj v oblasti distribuce elektrické energie

Cílem první části práce je popsat současný stav a vývoj v oblasti distribuce elektrické energie v evropském kontextu. Mezi aktuální trendy, které formují odvětví energetiky jako celek, patří tlak na liberalizaci trhu, zvyšování produkce OZE, zvyšování energetické účinnosti, zvyšování spolehlivosti dodávek, automatizace apod. Cílem bude popsat, jaké mají tyto trendy dopady na distribuční soustavu, její provozovatele a jaká jsou přijímána opatření k jejich naplnění.

Metody pro provádění analýz distribučních soustav

Jedním z konkrétních opatření, které vede ke zvyšování spolehlivosti dodávek a pozitivně ovlivňuje další parametry sítě vn, je propojování vývodů vn ať už za účelem trvalého paralelního provozu vývodů, nebo dočasného propojení při tvorbě náhradního napájení. Uvedené způsoby napájení sítě je nutné modelovat, nad modely provádět topologické analýzy a výpočty ustáleného chodu, a poměrně velký objem dat, který výstupy představují, automatizovaně zpracovat a vyhodnotit. Vzhledem k specifčnosti daných úloh je velmi obtížné uvedené spektrum analýz pokrýt SW, které jsou v současné době na trhu. Z tohoto důvodu budou vyvinuty vlastní analytické nástroje a výpočetní knihovny nejen pro výpočet ustáleného chodu soustavy.

Analýza propojování vývodů vn

Především při paralelním provozu nebo změnách řazení sítě dochází ke spínání sousedních či protějších vývodů vn. Cílem této části práce je na základě dostupných měření vyhodnotit chování obvodu při propojení vývodů z hlediska toku vyrovnávacího proudu v závislosti na rozdílovém úhlu napětí mezi napájecími stanicemi. S využitím vlastních výpočetních knihoven bude stanovena metodika provádění analýz propojených vývodů. Pro modelový příklad budou analyzovány poměry (především proudové a výkonové) podél propojených vývodů vn při spínání různých uzlových oblastí, pro různé hodnoty rozdílových úhlů napětí a různé poměry zatížení vývodů. Předmětem samostatných analýz bude vyhodnocení vlivu lokálního zdroje v závislosti na jeho umístění a provozním režimu. Dále bude popsán způsob analýzy topologie sítě vn s ohledem na identifikaci kmenů a klasifikaci odboček a vypracován návrh metodiky pro rozvoj zkruhované sítě.

Analýza propojení vývodů vn reálné sítě

Pro vybranou oblast reálné sítě vn bude zpracována analýza základního stavu, náhradního napájení a varianty paralelního provozu dvou vývodů napájených z jednoho nebo dvou různých transformátorů z hlediska proudových a výkonových toků a profilu napětí. Paralelní provoz vývodů vn je stále velmi ojedinělý, takže přechod na tento způsob provozu obnáší změnu koncepce budoucího rozvoje sítě s přímým dopadem na schopnost vývodů pojmout lokální zdroje. Dalším cílem práce je přinést nový pohled na posuzování připojitelnosti zdrojů do hladiny vn při uvažování paralelního provozu vývodů v základním stavu.

2 Rozvoj distribučních soustav

Cílem této kapitoly je podrobněji představit prostředí, které formuje a ovlivňuje rozvoj distribučních soustav. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, jedná se zejména o trend připojování většího množství OZE, decentralizace a zvyšování kvality dodávek elektrické energie.

2.1 Kvalita dodávek elektrické energie

Úroveň kvality distribuce elektrické energie je stanovena na základě sledování počtu a doby trvání přerušení dodávek. Formálně je pojem přerušení napájení definován normou ČSN EN 50 160 jako stav, při kterém je napětí ve všech fázích v místě dodávky menší než 5 % jmenovitého / dohodnutého napětí. Zmíněná norma dále rozlišuje přerušení dle vzniku na plánovaná a neplánovaná, z hlediska doby trvání dále na krátkodobá (do 3 minut) a dlouhodobá (od 3 minut). Krátkodobá přerušení spadají do kategorie kvality napětí, zatímco dlouhodobá do kategorie nepřetržitosti dodávek.

Obdobný soubor definic je uveden ve vyhlášce č. 41/2010 Sb., která společně se starší vyhláškou č. 540/2005 Sb. zavádí pro účely hodnocení kvality síťových služeb ukazatele nepřetržitosti distribuce elektřiny.

- **SAIDI** zohledňuje průměrnou souhrnnou dobu trvání přerušení distribuce elektřiny u zákazníka v hodnoceném období.
- **SAIFI** zohledňuje průměrný počet přerušení distribuce elektřiny u zákazníka v hodnoceném období.

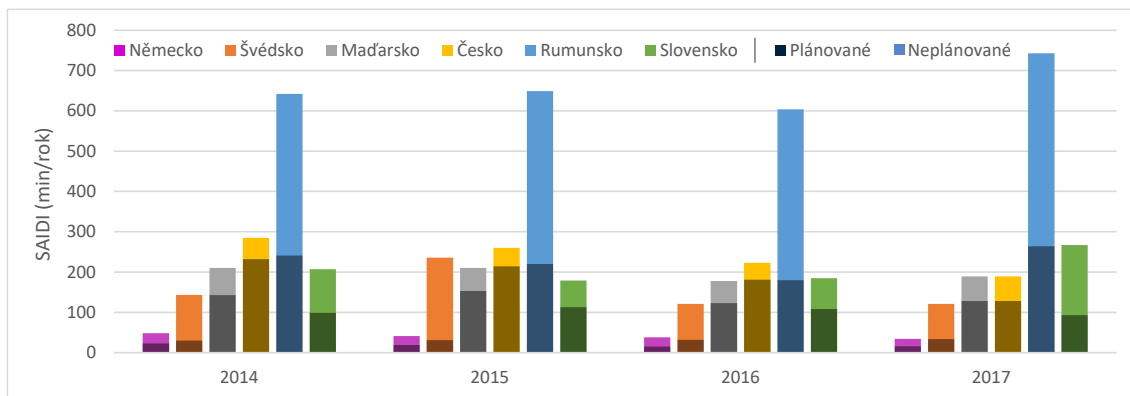
Jelikož každá distribuční společnost spravuje geograficky rozdílné území s odlišným rozsahem a charakterem infrastruktury [7], stanovuje ERÚ tyto ukazatele individuálně v rámci tzv. regulačního období trvajících minimálně 5 let [9].

Počínaje III. regulačním obdobím (r. 2010–2015) byl do vzorce pro výpočet povolených výnosů regulovaného subjektu zanesen nový člen (tzv. parametr Q) zohledňující finanční bonus nebo penále za dosaženou úroveň kvality. Metodika počítá s pětiprocentním neutrálním pásmem i mantinely, ve kterých se uplatňuje bonus nebo penalizace na základě souhrnných systémových ukazatelů. Podrobněji je celý mechanismus popsán v [4].

Jak si z hlediska průměrné doby výpadku na jedno odběrné místo za rok vede ČR v porovnání s dalšími Evropskými státy znázorňuje Obr. 2.1¹. Je třeba poznamenat, že způsob započítávání přerušení dle kauzality se může v jednotlivých zemích lišit

¹Graf byl zpracován na základě zpráv E.ON Sustainability Report z let 2014 až 2017

a porovnání nemusí být zcela přesné, nicméně i tak lze na základě tohoto grafu provést alespoň hrubé porovnání.

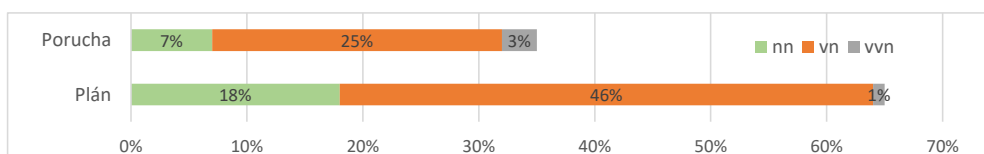


Obr. 2.1: Porovnání ukazatele SAIDI

Lze konstatovat, že ČR si nestojí špatně, nicméně hodnota, o kterou zaostává za některými státy západní Evropy, je opravdu velká. V období 2014 až 2017 bylo v ČR jedno odběrné místo bez napájení přibližně 6x delší dobu než v Německu, z čehož vyplývá, že prostor pro dlouhodobé zkvalitnění nepřetržitosti dodávek je značný.

Dalším z ukazatelů nepřetržitosti dodávky je index **MAIFI**, který se v současné době v ČR nesleduje ani nevyhodnocuje. Cílem tohoto ukazatele je sledovat krátkodobá přerušení (aktuálně spadající do kategorie kvality napětí), která mohou mít negativní vliv zejména na citlivá elektronická zařízení. V odborných kruzích se však intenzivně hovoří o stanovení pravidel pro vyhodnocování tohoto ukazatele a zavedení jeho sledování. To by vedlo k ještě intenzivnějšímu tlaku na provozovatele distribučních soustav z hlediska omezení „manipulací na tmu“.

Pro eliminaci neplánovaných přerušení dodávky je nutné analyzovat příčiny jejich vzniku a rozsah co do počtu postižených odběrných míst a doby trvání beznapětového stavu. Jak ukazuje Obr. 2.2 – statistika společnosti E.ON Distribuce z roku 2014, rovných 35 % přerušení bylo neplánovaných, přičemž 25 % vzniklo na hladině vn, kde jsou přerušením postiženi jak odběratelé na této hladině, tak odběrná místa na přidružených větvích nn za DTS.

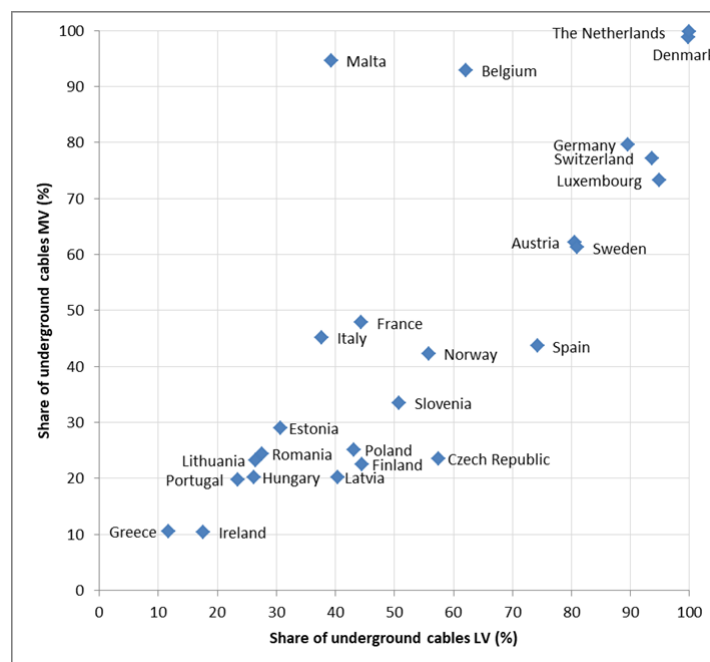


Obr. 2.2: Rozdělení přerušení dle napěťových hladin a kategorie [24]

Z hlediska eliminace počtu poruchou postižených OM se tedy nejperspektivněji jeví hledání opatření na hladině vn. Velkou pozornost si zasluhují zejména rizikové úseky venkovních vedení, které jsou za nepříznivých povětrnostních podmínek nejvíce ohroženy.

Dodržování řádu preventivní údržby a udržování lesních průseků jsou základním předpokladem pro eliminaci rizika vzniku poruchy. Významným parametrem pozitivně ovlivňujícím spolehlivost dodávek je míra kabelizace distribučních sítí, která zároveň tvoří hlavní faktor odlišující ČR od států západní Evropy.

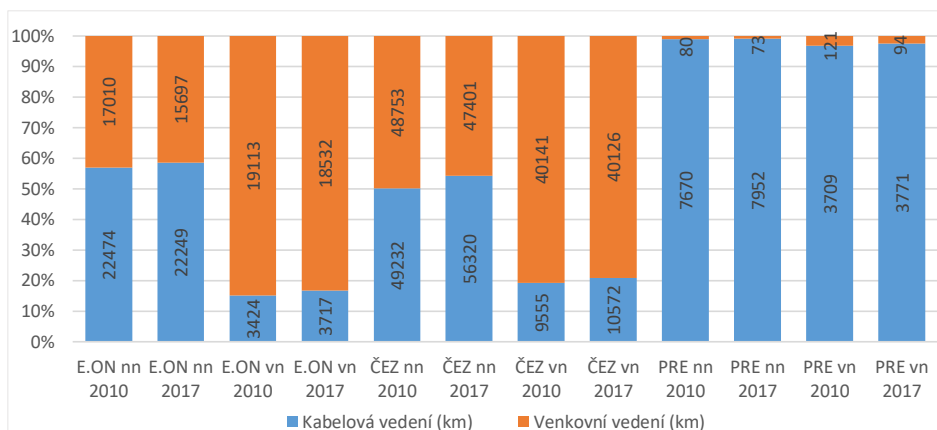
Na Obr. 2.3 je znázorněna míra kabelizace na hladinách nn a vn. Není náhodou, že státy v I. kvadrantu, mající vysokou míru kabelizace, vykazují poměrně nízké hodnoty ukazatelů nepřetržitosti dodávky.



Obr. 2.3: Porovnání míry kabelizace v Evropských zemích

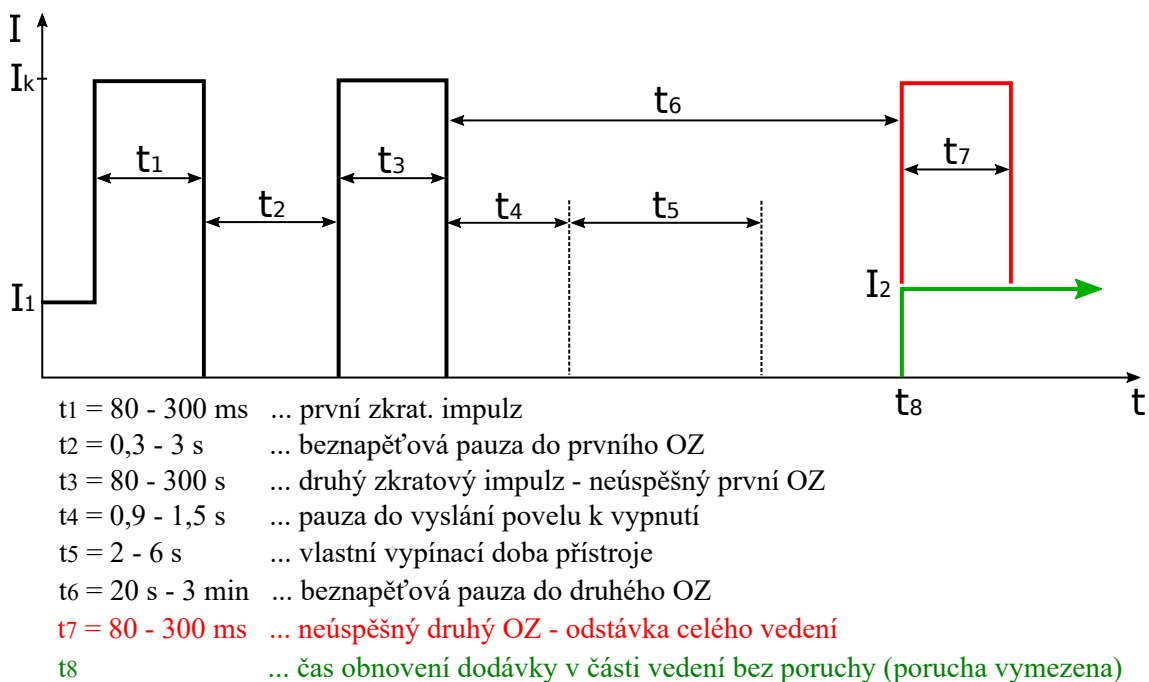
Porovnání míry kabelizace v ČR na hladinách nn a vn v letech 2010 a 2017 je znázorněno na Obr. 2.4. Graf rovněž v absolutních číslech dokresluje rozsah distribuční sítě, kterou jednotliví distributoři spravují.

Z grafu vyplývá, že distributoři se snaží trendu zvyšování kabelizace přizpůsobit. Poměr kabelových vedení se mezi lety 2010 a 2017 zvýšil, nicméně tento nárůst je stále v řádu jednotek procent. Absolutní hodnoty délky venkovních vedení navíc ve většině případů vykazují pokles, z čehož vyplývá, že některé rekonstruované úseky jsou nahrazovány kabelovými ať už při plánované obnově sítě, nebo projektech tzv. selektivní kabelizace zahrnující zejména lesní úseky vedení s vysokou mírou poruchovosti.



Obr. 2.4: Míra kabelizace DS v ČR

Dalším ze způsobů, jak omezit počet poruchou postižených odběrných míst, je rozvoj v oblasti distribuční automatizace a instalace dálkově ovládaných prvků. Příklad na Obr. 2.5 znázorňuje princip použití úsekového odpínače dovybaveného dálkovým řízením a automatikou vypnutí ve druhé pauze OZ. Umístění tohoto typu dálkově ovládaného prvku se využívá na začátku rozsáhlejších odboček od kmene nebo přímo v kmeni paprsku vn pro rozdělení do sekcí. Princip je poměrně prostý.



Obr. 2.5: Automatika vypnutí ve druhé pauze OZ

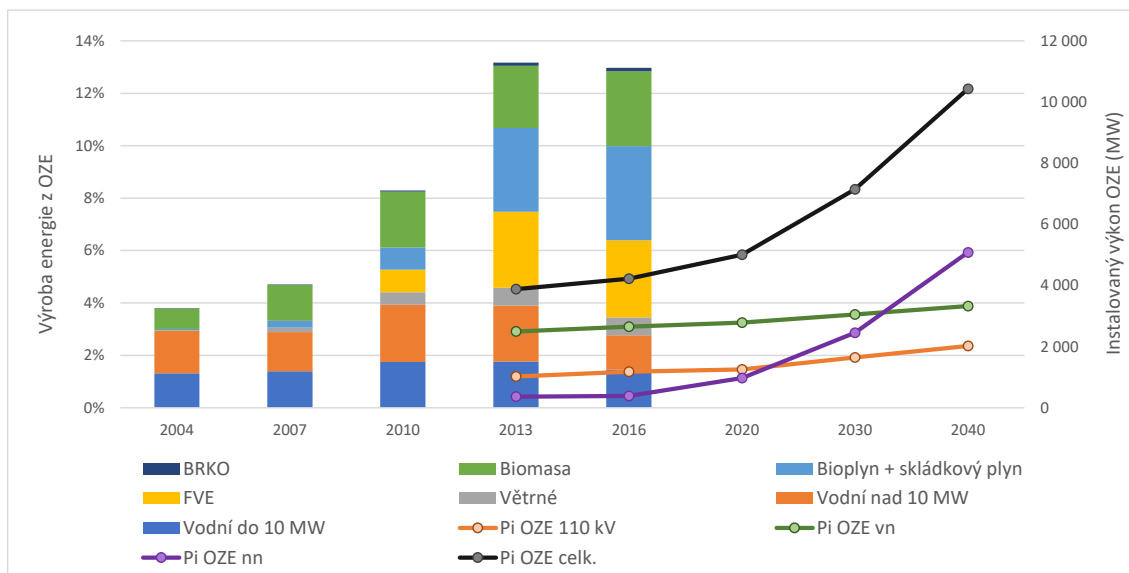
Po vzniku zkratu automatika OZ vypne celý vývod. Pokud je i po obnovení napájení detekován průchod zkratového proudu, přichází druhé vypnutí, během něhož

jde povel k vypnutí na dálkově ovládaný prvek. Pokud není po obnovení napájení vývodu zaznamenán průchod zkratového proudu, byla porucha vymezena dálkově ovládaným prvkem v poli a kromě odběratelů v postižené sekci je ostatním obnovena dodávka. V opačném případě je vypnut celý vývod a porucha lokalizována standardním způsobem. Tento příklad ukazuje, že i dovybavení (často původních) úsekových odpínačů dodatečnou logikou může být jednou z cest zvyšování nepřetržitosti dodávky.

2.2 Změna výkonových poměrů a toků v DS

Původní koncepce a podoba elektrizační soustavy počítala s tokem výkonu od centralizovaných výroben ke spotřebiteli. Tento předpoklad platil po celá desetiletí, nicméně v poslední dekádě se situace značně změnila. Důvodem je zejména rostoucí instalovaný výkon ve zdrojích vyrábějících elektřinu z obnovitelných zdrojů. Mezi roky 2006 a 2013 se zvýšil podíl elektřiny vyrobené z obnovitelných zdrojů z 5 na 13 % [5]. Přibyla řada zdrojů připojených na hladině vn, což s sebou přineslo změny výkonových poměrů a problémy s kolísáním kvality napětí na příslušných napěťových hladinách. Začalo rovněž docházet ke zpětnému toku výkonu jak mezi hladinami nn/vn, tak vn/vvn. Problematika vyhodnocení přetoků výkonu byla autorem podrobněji rozebrána v článcích [A18] a [A19].

Kombinovaný graf na Obr. 2.6 reflektuje trend výroby a především referenční scénář nárůstu instalovaného výkonu OZE v ČR, se kterým operuje NAP–SG [6]. Z grafu je zřejmý predikovaný nárůst instalovaného výkonu OZE z hodnoty 4,2 GW



Obr. 2.6: Vývoj výroby a predikce nárůstu instalovaného výkonu OZE

v roce 2016 na hodnotu 10,4 GW v roce 2040, z čehož nejvyšší přírůstek 4,7 GW připadá na hladinu nn. Zda se referenční scénář naplní, záleží na mnoha faktorech, nicméně již nyní je zřejmé, že hodnota pro rok 2020 naplněna nebude. Z ročních zpráv o provozu ES (pro roky 2004–2018), které zveřejňuje ERÚ vyplývá, že s koncem subvencí v roce 2013 dochází v ČR spíše ke stagnaci rozvoje OZE, nicméně dlouhodobé závazky dané ze strany EU jsou stanoveny a otázkou spíše zůstává tempo jejich naplňování.

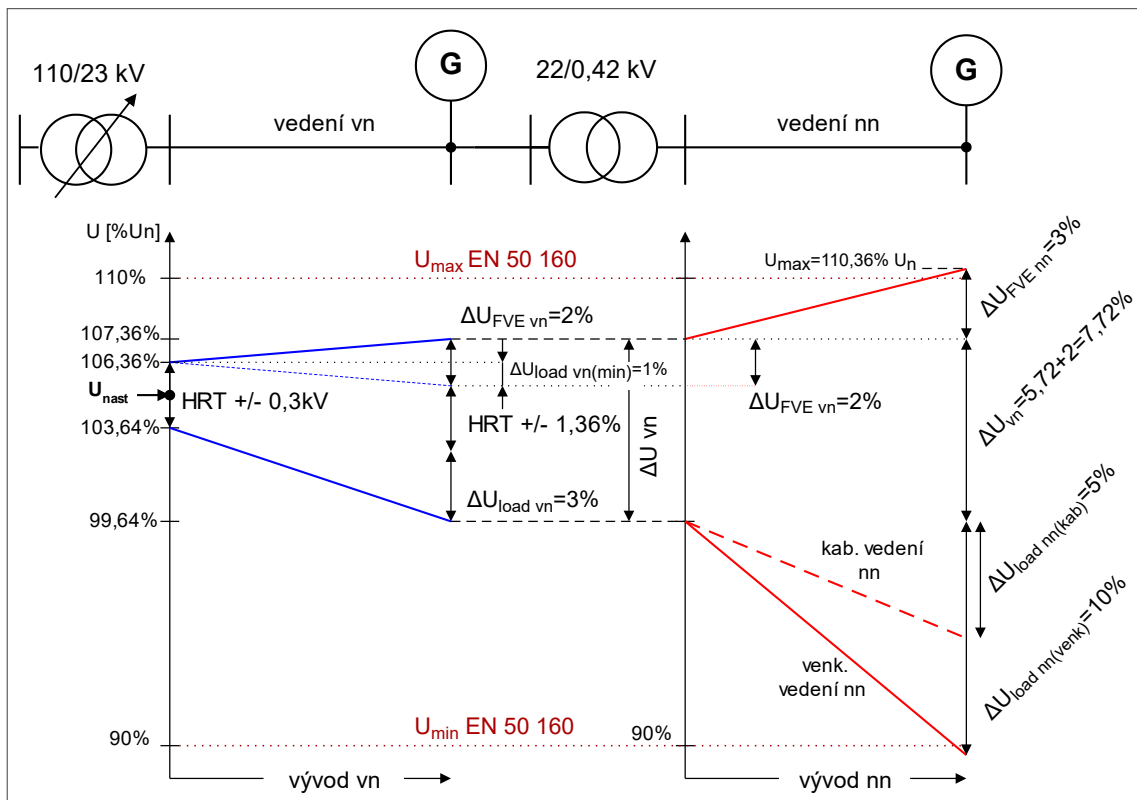
Integrace většího množství zdrojů na hladinách nn a vn s sebou nese mnoho technických výzev. Schopnost distribuční soustavy pojmout nové zdroje při zachování mezních hodnot provozních parametrů (zejména napětí) není nekonečná a připojení nových výrobních jednotek musí být posuzováno vzhledem k lokálním poměrům v síti.

Rámec kvality napětí dává norma ČSN EN 50160, způsob jejího měření a hodnocení je dále upraven v příloze 3 PPDS. Pravidla shrnující hlavní hlediska při připojování nových zdrojů do DS jsou upravena v příloze 4 PPDS. Tento dokument pro jednotlivé napěťové hladiny mj. stanovuje mez maximálního zvýšení napětí, které svým provozem zdroje způsobí. Na hladině vn jsou to maximálně 2 % U_n v základním zapojení a 5 % U_n při mimořádném zapojení sítě. V případě hladiny nn má uvedená mez hodnotu 3 % U_n . Referenční hodnota vychází ze stavu bez připojených zdrojů a vyhodnocuje se změna napětí po jejich připojení (v nejnepříznivějším stavu zpravidla s ohledem na zatížení sítě a produkci ostatních zdrojů).

Teoretický rozbor vlivu zdrojů na hladinách nn, vn na napěťové poměry v síti je znázorněn na Obr. 2.7, který vznikl v rámci studie zpracované společností E.ON [25]. Obrázek ilustruje mezní stavy sítě v oblasti vn s provozním napětím $U_{nast} = 23,1 \text{ kV}$. Při provozu sítě s nastavenou střední odbočkou na distribučním transformátoru DTR 22/0,4 kV (případně odbočkou -5% u DTR 22/0,42 kV) je na konci venkovních vývodů nn patrný vznik podpětí, ale i přepětí, které je způsobeno kumulativním zvýšením napětí o $3 + 2 = 5 \%$.

Z uvedeného je zřejmé, s rostoucí mírou OZE může být udržení napětí v povolených mezích problematické. Koncept moderních distribučních sítí proto počítá se zapojením těchto zdrojů do systému dálkového řízení provozovatele DS. S cílem koordinovat na úrovni členských států podmínky připojování nových zdrojů vydala Evropská komise nařízením č. 631/2016 kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k ES. S platností od konce dubna 2019 je tento kodex implementován i do přílohy 4 PPDS, čímž se stal závazným pro všechny provozovatele a uživatele DS.

Nejzásadnější dopad bude mít nařízení č. 631/2016 na nově připojované výrobní a to z hlediska požadavků na jejich dálkové řízení, výměnu dat s centrálním dispečinkem a regulační schopnosti těchto zdrojů. Výrobní moduly s výkonem již od 800 kW do 30 MW musí být vybaveny logickým rozhraním pro ovládání odpínacího prvku



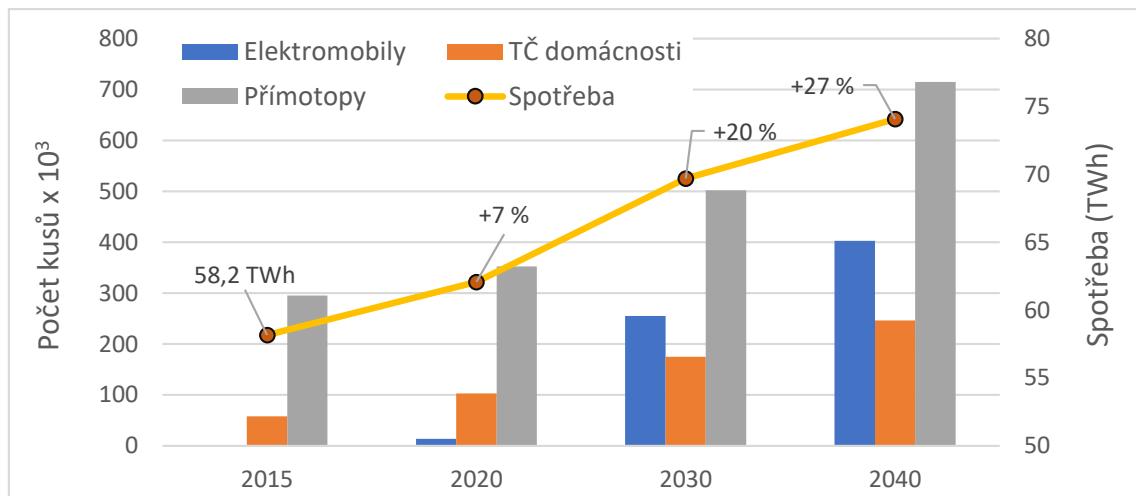
Obr. 2.7: Rozptyl napětí v DS s instalovanými OZE – převzato z [25]

tak, aby bylo možné přerušit dodávku P na výstupu (např. pomocí HDO). Výrobní moduly s výkonem od 11 kW pak musí být rovněž vybaveny logickým rozhraním pro dálkový přenos dat a příjem povelů provozovatele DS zejména pro účely dálkového vypnutí, omezení dodávek P a řízení Q , U . V aktualizované příloze 4 PPDS jsou rovněž stanoveny požadavky na statickou a dynamickou podporu sítě pro udržení napětí (včetně charakteristik spojených s jeho regulací - zejména $Q(U)$ a $P(U)$).

V rámci podpory sítě může distributor vyžadovat v závislosti na lokálních podmínkách regulaci jalového výkonu výroby na účinník v rozsahu 0,9 ind. až 0,9 kap. Pro zohlednění této skutečnosti může provozovatel DS zvolit i při výpočtu připojitelnosti jiný účinník než 1. Jak ukazují studie [26, 27] společnosti ČEZ Distribuce, čistě s ohledem na kritérium napěťové změny může uvažování účinníku výroben 0,9 ind. na nn, respektive 0,95 ind. na vn zvýšit v některých sítích připojitelný výkon až o desítky procent. V řadě případů však stopku navýšení připojitelného výkonu vystaví zohlednění maximální proudové zátěžitelnosti prvků DS. Nezanedbatelný příspěvek k nárůstu velikosti proudu bude rovněž tvořit i jeho jalová složka nutná pro změnu účinníku při regulaci na zadané napětí.

Spolu se změnou výkonových toků způsobených rozvojem OZE dochází také k přirozenému nárůstu výkonu na straně spotřeby. Pomineme-li výkonové nároky

různých odvětví průmyslové výroby a zaměříme se na spotřebu připojenou do sítě nn, půjde očekávaný nárůst na vrub zejména rozvoji elektromobility, tepelných čerpadel a pŕímotopů. Jak ukazuje Obr. 2.8 zpracovaný na základě scénářů ASEK,



Obr. 2.8: Předpokládaný vývoj spotřeby v ČR do r. 2040

NAP Čistá mobilita a NAP-SG vzroste celkový počet těchto zařízení o desítky procent. Celková spotřeba elektrické energie v ČR se mezi lety 2015 a 2040 navýší pŕibližně o 27 %. V pŕípadě, že se naplní pŕedpověď rozvoje elektromobility, budou distributoři vedle tlaku na pŕipojování dobíjecí infrastruktury čelit i technickým výzvám v podobě eliminace výkonových špiček v nejexponovanějších časech dobíjení [23]. Je tedy nasnadě, jakým způsobem elektromobily coby pojízdne baterie zakomponovat do konceptu chytrých sítí.

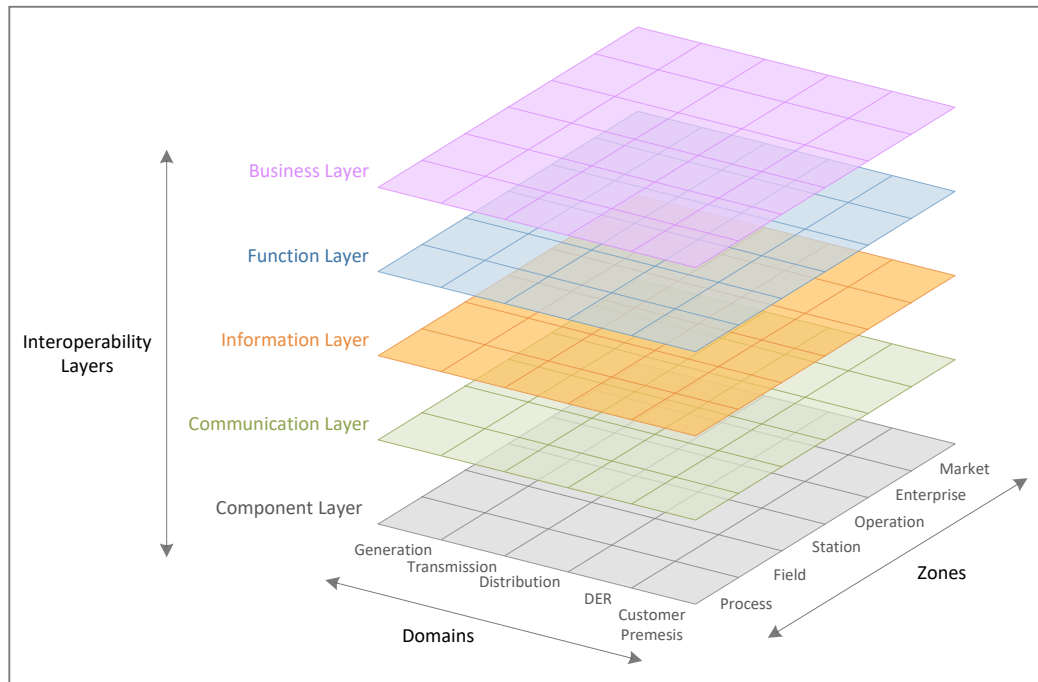
2.3 Koncepční změny v distribučních sítích

Pro pokrytí zvyšujících se nároků na distribuční soustavu dochází rostoucím tempem k rozvoji dle konceptu chytrých sítí. Decentralizace na straně výroby s sebou nese zvýšené nároky na řízení celé soustavy a to i na straně spotřeby. V porovnání se stávajícím systémem HDO počítá koncept chytrých sítí s mnohem flexibilnějším spínáním tzv. odložené spotřeby na straně odběratelů a zahrnuje i technické prostředky pro akumulaci, coby podpůrného prostředku pro řízení soustavy. Cílem je rozložení odebrané energie v čase pro eliminaci tzv. výkonových špiček a omezení pŕetoků mezi napětovými hladinami.

Prostředí chytrých sítí zcela pŕirozeně počítá s tím, že provozovatelé soustav, odběratelé, obchodníci a ostatní účastníci trhu budou vzájemně komunikovat a interagovat. K tomu musí být vybudována pŕíslušná informační a komunikační in-

infrastruktura, schopná data spolehlivě přenášet a ve větším objemu dále zpracovávat a vyhodnocovat.

Z uvedeného je patrné, že silová část distribučních sítí, je pouze jednou z vrstev, kterých se změna dotkne. Přehledový Obr. 2.9 znázorňuje referenční architekturu chytrých sítí, kterou definoval *Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice* (CENELEC) za účelem poskytnutí zjednodušeného, agregovaného pohledu na jinak velmi komplexní systém.



Obr. 2.9: Architektonický model chytrých sítí [28]

Jsou zde definovány vrstvy, které pokrývají byznys pravidla, funkční a datové modely, komunikační protokoly a rovněž fyzické komponenty silové, komunikační i řídicí. Dále jsou znázorněny domény klasického řetězce energetiky od výroby až ke spotřebě. Zóny pak vyjadřují hierarchický model zohledňující koncept agregace a rozdělení úloh při řízení soustavy. Zmíněné domény a zóny jsou platné v kontextu každé z vrstev [28]. Samotný pojem agregace zahrnuje v kontextu řízení sítí více oblastí:

- **Datová agregace** - příkladem může být sběr dat ze zařízení umístěných v poli (Field zone), která jsou dále agregována nebo koncentrována ve stanici (Station zone), čímž se sníží objem dat dále odesílaných ke zpracování dispečinkem (Operation zone).
- **Prostorová agregace** - například vybavení každé odbočky je umístěno v konkrétním poli, více polí dále tvoří stanici. Stejná analogie platí i u rozptýlených

zdrojů, akumulace respektive říditelné spotřeby, kdy více menších jednotek může tvořit jeden větší blok.

Jakým způsobem se plánované změny projeví v distribuční soustavě shrnuje následujících několik odstavců. Konkrétní zmíněné technologie nebo jejich soubor si lze s určitou mírou abstrakce snadno dosadit do Obr. 2.9, a tím na danou technologii nahlédnout optikou referenční architektury chytrých sítí.

Silová část distribučních sítí

Na hladině vvn bude docházet k připojování nových zdrojů, nicméně jejich objem nebude v porovnání s nižšími napětovými hladinami tak výrazný. Dále dojde k budování nových transformoven v místech s vysokou mírou nepřipojitelného výkonu. U sítí vn budou průběžně navyšovány průřezy vodičů kmenových linek (zpravidla 110 mm^2 pro venkovní a 240 mm^2 pro kabelové vývody) [6].

Zmíněná opatření jsou v přímé souvislosti s předpokládaným nárůstem připojovaného výkonu decentralních zdrojů na hladinách vn a nn. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2, u těchto zdrojů se počítá s jejich podporou pro regulaci napětí. Dalším možným zařízením pro regulaci napětí jsou OLTC transformátory, jejichž umístění se nabízí v DTS, která napájí nn síť problematickou z hlediska udržení napětí v předepsaných mezích.

Distribuční automatizace

Pro zvyšování kvality dodávek a stabilizaci napětových poměrů bude realizován přechod k paralelnímu provozu vývodů vn. S tím souvisí setrvalý trend instalace dálkově ovládaných prvků typu úsečník a recloser disponujících komunikačním modulem a vlastní RTU s programovatelnou logikou. Díky jejich komunikaci s nadřazeným řídicím systémem bude možné implementovat logiku automatické rekonfigurace sítě pro vymezení úseku s poruchou, což bude mít příznivý dopad na ukazatele nepřetržitosti dodávky.

Oblast měření

Velký rozvoj se rovněž očekává v oblasti měření (nejen kvality napětí). Nad rámec již dnes sbíraných hodnot budou měření U, I, P, Q osazeny vývody v transformačních stanicích 110 kV/vn, dále uzlové, smyčkové, koncové DTS, výrobní moduly od 100 kW a vybrané prvky v poli vn. Společně s měřením AMM na odběrných místech, s jehož plošným nasazením se také počítá, poskytne celý řetězec věrný obraz stavu sítě pro podporu dispečerského řízení, hodnocení i plánování provozu a rozvoje.

Oblast komunikační infrastruktury a technologií

Z hlediska komunikační infrastruktury bude docházet v trasách vedení 110 kV k doplnění kombinovaných zemních lan (KZL), kde doposud chyběly tak, aby byly zajištěny pokud možno redundantní spoje v transformovnách 110 kV/vn. V rámci obnovy budou dále nahrazována starší KZL novým typem s vyšší přenosovou schopností. Společnost ČEZ Distribuce zmiňuje v koncepčním dokumentu rozvoje optické infrastruktury zavedení standardu KZL se 48 vláknů, který bude dále uplatněn i v případě příloží typu ZOK (zemní optický kabel) a podvěsů SDOK (samonosný dielektrický optický kabel) na hladině vn. Cílem budování páteřní optické sítě na hladině vn je pokrytí všech uzlových, smyčkových a vybraných koncových stanic pro podporu dispečerského řízení a nových funkcí inteligentních sítí. Kromě optické infrastruktury se pro přenos informací jako perspektivní technologie jeví použití Power-line komunikace. Příkladem může být koncept komunikace chytrých elektroměrů na odběrných místech s koncentrátorem na DTS, kde probíhá datová agregace a komunikace DTS s datovou centrálou je dále zprostředkována optickou trasou, GSM sítí mobilních operátorů nebo jiným způsobem.

3 Výpočty a analýzy v distribuční soustavě

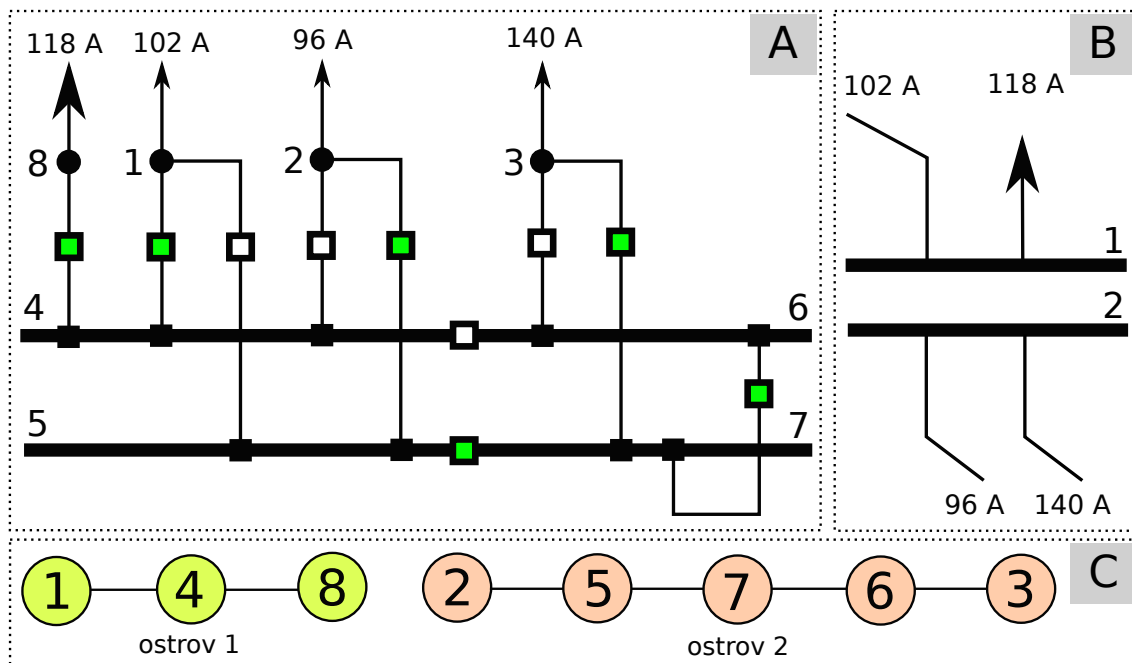
Cílem této kapitoly je představit metody výpočtových simulací ustáleného chodu soustavy a analýzy distribučních soustav z hlediska topologie, skladby jednotlivých prvků a návrhu alternativní konfigurace.

V rámci analýz prezentovaných v této disertační práci byly prováděny výpočtové simulace nad obvody, jejichž stav byl inspirován nebo přímo vycházel z obrazu vybrané části reálné distribuční sítě. Z tohoto důvodu byly vyvinuty vlastní postupy a aplikovány algoritmy, které dokáží zpracovat a validovat vstupní data reprezentující rozsáhlé distribuční sítě.

K tvorbě vlastního softwarového řešení bylo přistoupeno i v případě implementace algoritmů pro výpočet ustáleného chodu soustavy, který tvoří základ pro provádění analýz nad vybranými částmi distribuční soustavy, viz další kapitoly.

3.1 Popis a modely distribuční soustavy

Způsobů jak vytvořit model distribuční soustavy je samozřejmě více, nicméně hlavní hledisko, které odlišuje jednotlivé pohledy, je míra zjednodušení popisované reality a účel zpracování daného modelu. Například pro úlohu hodnocení kondice aktiv bude využit odlišný model než pro výpočet chodu soustavy.



Obr. 3.1: Modely elektrické sítě

Na Obr. 3.1 jsou znázorněny tři modely elektrické sítě relevantní pro tuto disertační práci. Každý z modelů představuje odlišný pohled na stále stejnou síť. Písmenem **A** je označen tzv. Breaker Oriented Model (BROM), který je sám o sobě již velmi zjednodušeným pohledem, který agreguje více prvků DS do jednoho nebo některé prvky neuvažuje vůbec. Díky rozumné míře detailu pro popis stavu DS z hlediska zapojení, výkonových toků apod. je využíván zejména v podobě pravoúhlých schémat pro účely dispečerského řízení.

Pro účely výpočtu chodu soustavy je nutné BROM dále zjednodušit na tzv. Bus Oriented Model (BOM – na Obr. 3.1 označen písmenem **B**), který poskytuje pohled na uzly soustavy propojené pomocí větví s nenulovou impedancí. Při přechodu na BOM jsou na základě definovaných propojení a stavu spínacích prvků vytvořeny nebo naopak potlačeny větve soustavy (vedení, transformátory).

Zatímco v BROM se mohou vyskytovat uzlové elementy propojené spojkou s nulovou impedancí, v BOM tento přístup možný není a takovéto uzly musejí být sloučeny do jednoho, nebo spojka nahrazena větví s velmi malou impedancí. Pro slučování neimpedančně propojených uzlových elementů lze použít například trasovací funkce, které projdou celou sítí a takto propojené elementy agregují do společného elektrického uzlu. Po dokončení výpočtu je pak možné výsledné hodnoty mapovat zpět do BROM.

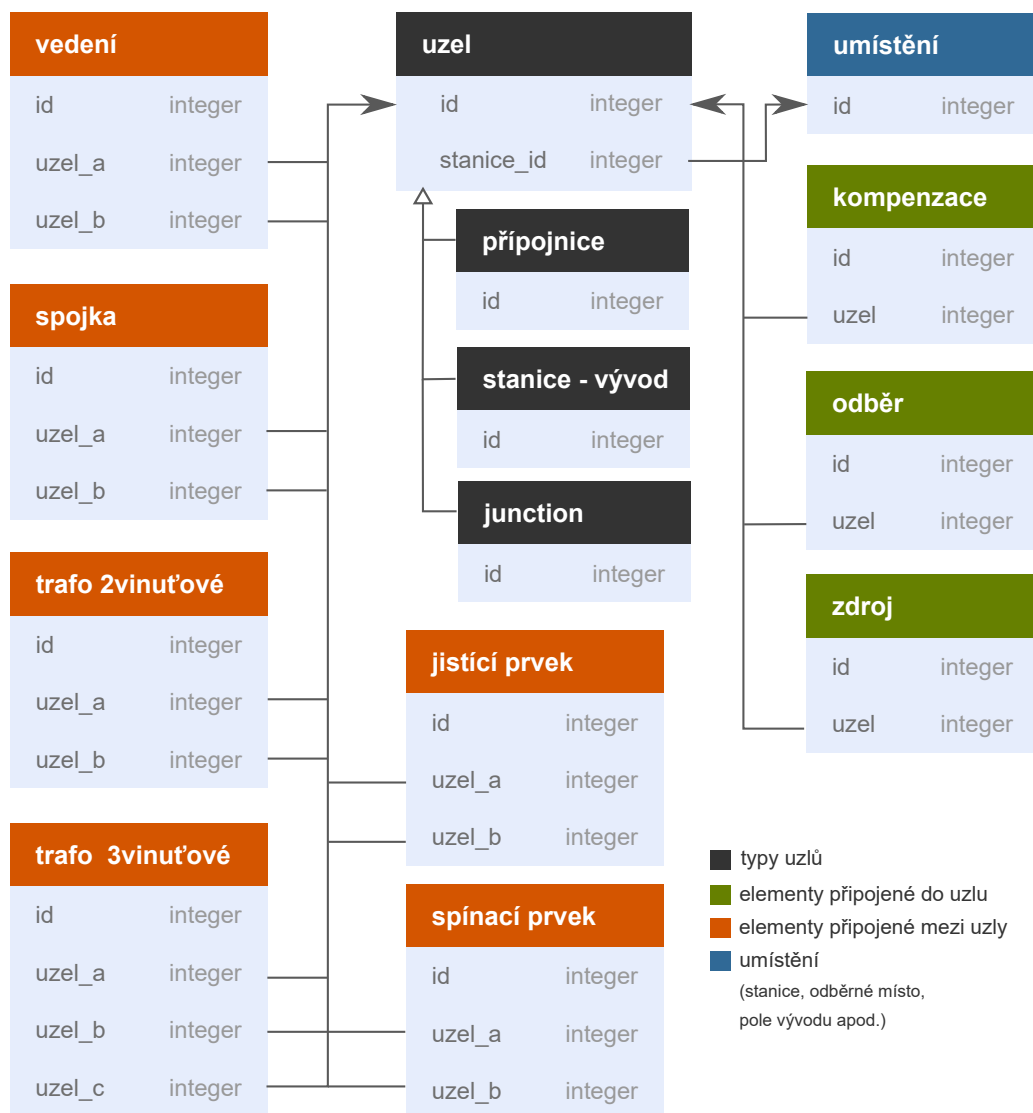
Posledním modelem, který je na Obr. 3.1 označen písmenem **C**, je tzv. topologický model představující grafovou reprezentaci dané sítě. Formou např. incidenčních matic popisuje vrcholy (uzly), které jsou navzájem propojeny hranou (větví). Topologie, kterou tento model popisuje, může vycházet z BROM i BOM, záleží čistě na typu úlohy, pro kterou je model určen. Reprezentace sítě pomocí topologického modelu je výhodná z hlediska efektivity při trasovacích a jiných grafových úlohách.

Provádění elektrických výpočtů a topologických analýz, klade požadavek na rozsah zpracovávaných dat, ze kterých lze sestavit modely viz Obr. 3.1. V následujících bodech jsou shrnuty tři základní soubory dat, které definují minimální rozsah vstupních veličin, na základě nichž lze sestavit objekty, jejich atributy a vzájemné vazby vstupující do modelů soustavy.

- **Výčet prvků sítě** (přípojnice, spínací prvky, vedení, odběry apod.) s příslušnými atributy, které reprezentují vlastnosti relevantní pro daný element sítě. Vztahy mezi prvky určují zapojení sítě, které je dále validováno a promítnuto do příslušných modelů. Připojené polohopisné atributy umožňují vykreslení sítě prostřednictvím geografického informačního systému.
- **Stavy spínacích prvků**, které jsou nezbytné pro správné sestavení topologie sítě v daném stavu. Pomocí různých sad stavu spínacích prvků lze tvořit i různé varianty simulované topologie.
- **Estimované a změřené hodnoty**, které jsou rovněž charakteristické pro da-

nou topologii a stav sítě. V případě sítě vn je hlavním zdrojem měření U, I, P, Q na začátku vývodu v transformovně. Výkon je mezi jednotlivé DTS obvykle rozpočítán proporcionálně dle velikosti transformátorů se zohledněním ztrát v síti. Jako vstupy pro zpřesnění výkonových poměrů ve vývodu lze použít například hodnoty měření na dálkově ovládaných prvcích v poli. Samotné DTS jsou měřením stále vybaveny spíše výjimečně.

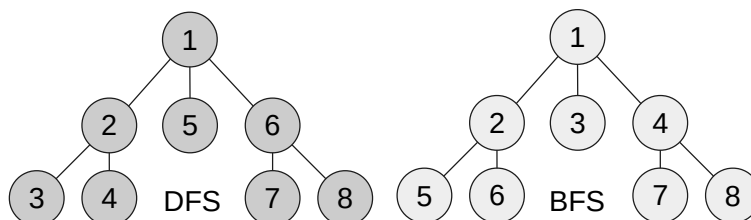
Na Obr. 3.2 je znázorněna kostra datového modelu elementů a jejich vzájemných vazeb. V reálné aplikaci má každý element kromě identifikátorů ještě seznam dalších atributů potřebných pro vytvoření modelu soustavy, viz dále v kapitole 3.3 modely uzlů a větví soustavy.



Obr. 3.2: Datový model

3.2 Trasovací úlohy

Vedle elektrických výpočtů jsou nedílnou součástí analýzy elektrických soustav i grafové úlohy pracující s topologickým modelem sítě. Většina grafových úloh je založena na systematickém procházení vrcholů grafu, nicméně jednotlivé algoritmy odlišuje zejména strategie, se kterou k procházení přistupují. Na Obr. 3.3 je znázorněn rozdíl



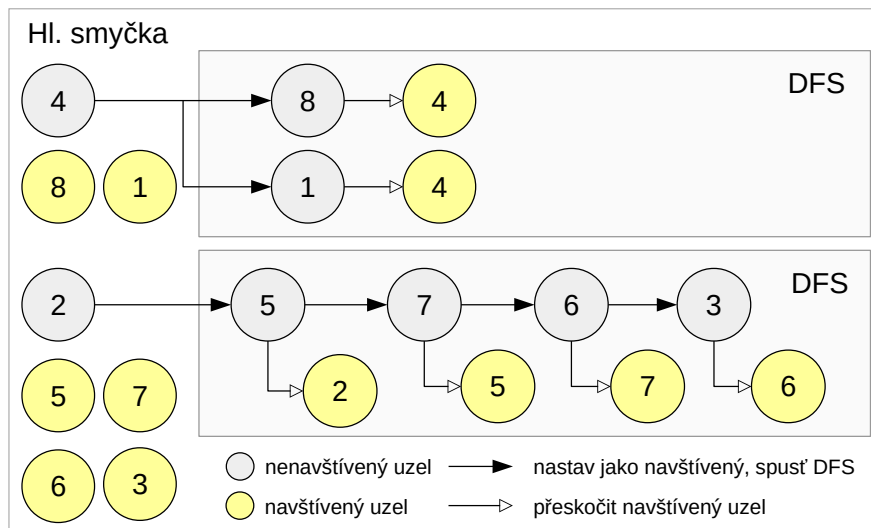
Obr. 3.3: Pořadí procházení vrcholů grafu DFS a BFS algoritmem

v pořadí jakém je přistupováno k vrcholům grafu pomocí algoritmu BFS (prohledávání do šířky) a DFS (prohledávání do hloubky). Oba algoritmy jsou podrobně popsány v publikaci [35]. Algoritmus BFS prochází všechny uzly a jejich potomky, poznamenává si jejich rodiče a systematicky buduje strom nejkratších cest k počátečnímu uzlu.

DFS algoritmus prochází uzly a jejich následovníky systematicky do hloubky, dokud nenarazí na uzel, ze kterého nelze dále pokračovat. Tzv. backtrackingem se poté vrací k nejbližšímu předchůdci, ze kterého lze opět pokračovat do dosud neprohledaných uzlů. Neprohledané, prohledané a zpětně protrasované uzly jsou odlišeny příslušným příznakem. Ke zpětně protrasovaným uzlům se již algoritmus nevrací. Tento přístup má mimo jiné výhodu ve schopnosti algoritmu identifikovat, že se do uzlu dostal dvěma nebo více cestami - jinými slovy je schopen identifikovat paralelní cestu a tedy i zkruhované vývody vn. Této vlastnosti DFS algoritmu je dále využito při návrhu metodiky klasifikace kmenů a odboček vn, viz kapitolu 4.5.

Na Obr. 3.4 je znázorněna aplikace DFS algoritmu, pro identifikaci komponent grafu. Jedná se o úlohu, jejímž cílem je zjistit, zda je graf souvislý či nesouvislý – sestávající z více samostatných komponent. Z hlediska aplikace v elektrické síti lze takto identifikovat ostrovy, které nejsou vzájemně propojené. Na Obr. 3.4 níže je ukázka identifikace komponent v síti, viz Obr. 3.1.

Algoritmus je rozdělen do dvou částí – hlavní smyčky, která prochází postupně všechny uzly a rekurzivně volané funkce DFS. V hlavní smyčce je vybrán uzel a jeho následovníci rekurzivně prohledání funkcí DFS. Ve chvíli, kdy trasování do hloubky navštíví posledního následovníka, vrátí se algoritmus do hlavní smyčky a prochází uzly jeden po druhém. Pokud je uzel již označen jako navštívený, je přeskočen, v opačném případě jsou jeho následovníci prohledáni a takto se celý proces opakuje,



Obr. 3.4: Alogirmus pro identifikaci komponent grafu

dokud není prohledán poslední uzel. Jak je na Obr. 3.4 vidět, nová samostatná komponenta (ostrov) je identifikována vždy, když se algoritmus vrátí do hlavní smyčky a najde v seznamu nenavštívený uzel. Uzel z hlavní smyčky a celý strom jeho následovníků poté náleží do samostatné komponenty.

U sítí vn lze tento postup aplikovat pro dva základní typy úloh. První z nich prochází síť, ve které jsou všechny spínací prvky v sepnutém stavu a následně jsou identifikovány izolované části sítě bez napájení. Tímto způsobem lze poměrně efektivně validovat vstupní síťová data z hlediska výskytu nekonzistencí. Dále jsou v tomto stavu identifikovány kmenové linky a odbočky.

Druhá varianta již pracuje s topologickým modelem, do kterého jsou promítnuty stavy spínacích prvků, které definují aktuální stav zapojení. Pro každý nalezený ostrov (komponentu), který má napájení (transformátor a přípojnicí 110 kV), musí být vytvořen samostatný model pro výpočet chodu soustavy, neboť nad grafově nesouvislou sítí by výpočet selhal.

Další využití trasovacích úloh je při hledání napájecího stromu pro dané zapojení sítě. Z počátečního bodu směrem do sítě dochází k nalezení kompletní části soustavy, která je z daného bodu (zpravidla vývodu nebo transformátoru) napájena. Tato informace se hodí zejména při plánování alternativních způsobů zapojení pro účely náhradního napájení. Trasovací funkce může na základě atributů, které mají uzly a hrany přiřazeny, sbírat při procházení sítě různé druhy informací. Příkladem může být vyčíslení počtu napájených DTS z daného vývodu nebo nalezení úseků vedení s nejnižším průřezem apod.

3.3 Výpočet ustáleného chodu soustavy

Řešení ustáleného chodu soustavy (Load Flow) je výpočetní procedura, jejímž úkolem je v první řadě vyčíslit fázory uzlových napětí a dále dopočítat větвовé toky. Na základě získaných výsledků lze snadno zhodnotit celkový stav sítě a případná porušení mezi provozních veličin.

K řešení chodu soustavy je nutné sestavit model, nad kterým bude výpočet probíhat. Základními prvky modelu jsou uzly a větve. V uzlech jsou připojena zařízení (generátor, odběr a další), ovlivňující velikost injektovaných výkonů, větve jsou pak modelovány pomocí π -článků a jejich pasivních parametrů. V případě generátoru musí být známa velikost dodávaného činného výkonu, případně velikost napětí, která má být v uzlu udržována. Zátěž je charakterizována velikostmi konstantně odebíraného činného a jalového výkonu s přihlédnutím k faktu, že malé odchylky napětí a frekvence lze v ustáleném stavu zanedbat.

3.3.1 Modelování uzlů soustavy

Pro účely sestavení modelu soustavy je možné rozlišit následující typy uzlů.

- **PQ uzel** (odběrový) – Jedná se o uzel s připojenou zátěží, ve kterém jako známé veličiny figurují velikosti injektovaného činného a jalového výkonu ($P_i + jQ_i$). Dopočítávány jsou hodnoty velikosti a úhlu napětí ϑ_i . Jako typický příklad odběrového uzlu na hladině vn lze uvést distribuční stanice, které jsou reprezentovány agregovanou hodnotou odebíraného P, Q odběrnými místy za DTS.
- **PU uzel** (výrobní) – V tomto uzlu jsou zadány velikost injektovaného činného výkonu P_i a požadovaná velikost napětí U_i . V modelu sítě vn se jedná nejčastěji o přípojnicí, do které je připojeno primární vinutí transformátoru 110 kV/vn v transformovných. Dále jsou jako PU obecně definovány uzly s připojenou výrobnou se schopností regulace na zadané napětí.
- **Referenční uzel** – Tento uzel je v modelu pouze jeden a je v něm známa jak velikost, tak úhel napětí. Referenční uzel se volí na základě rozsahu modelované sítě buďto jako konkrétní přípojnice 110 kV v případě menších studií, nebo jako virtuální uzel, který je propojen s přípojnicemi 110 kV přes impedanci vypočítanou ze zkratového výkonu v daném bodě.

3.3.2 Modelování větví soustavy

Vedení a transformátory jsou modelovány pomocí náhradních π -článků, které jsou dále charakterizovány pasivními parametry:

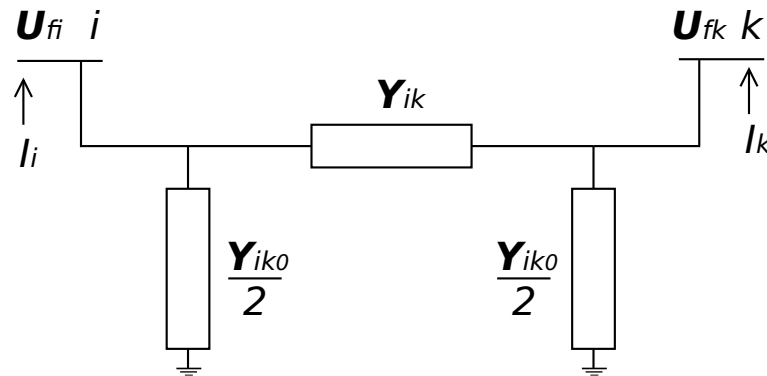
- v podélné větvi – odpor R , reaktance X ,

- v příčné větvi – svod G , kapacitní susceptance B_c .

Dále lze mezi větve zahrnout prvky, jejichž úkolem je modelovat připojení injekce činného i jalového výkonu do uzlu soustavy. Takto lze modelovat například rozhraní mezi dvěma soustavami nebo kompenzační prvek. Charakterizovat tento druh větve lze pomocí vodivosti G_{sh} a susceptance B_{sh} , nebo modifikací injektovaných výkonů v daném uzlu.

3.3.3 Admitanční matice

Pro účely výpočtu chodu soustavy je výhodné použít metodu uzlových napětí a popsat obvod pomocí admitanční matice. Hlavním důvodem je možnost jejího snadného sestavení a následné modifikace. V případě velkých sítí je admitanční matice řídká, neboť nenulové hodnoty jsou pouze na souřadnicích odpovídajících vzájemnému propojení uzlů. Admitanční matice je diagonálně dominantní a v případě použití převodů transformátorů reprezentovaných pouze reálnými čísly i symetrická. Všechny těchto vlastností lze dále využít při řešení soustav lineárních rovnic, v nichž admitanční matice figuruje.



Obr. 3.5: Náhradní π -článek vedení

Výpočet admitancí v příčné a podélně větvi:

$$\mathbf{Y}_{ik0} = G_{ik0} + jB_{ik0} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{Y}_{ik} = \frac{1}{\mathbf{Z}_{ik}} = \frac{R_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} - j \frac{X_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} = G_{ik} + jB_{ik} \quad (3.2)$$

Vyjádření injektovaného proudu v uzlu i prostřednictvím součinu fázového napětí a admitance:

$$\sum_{k=1}^{n_b} I_{ik} = U_{fi} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n_b} \left(\frac{\mathbf{Y}_{ik0}}{2} + \mathbf{Y}_{ik} \right) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n_b} U_{fk} \mathbf{Y}_{ik} \quad (3.3)$$

Maticový zápis pro soustavu n rovnic a vyjádření vektoru injektovaných proudů:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{n_b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} & \cdots & \mathbf{A}_{1n_b} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} & \cdots & \mathbf{A}_{2n_b} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_{n_b1} & \mathbf{A}_{n_b2} & \cdots & \mathbf{A}_{n_bn_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{f1} \\ \mathbf{U}_{f2} \\ \vdots \\ \mathbf{U}_{fn_b} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Pro diagonální prvky platí:

$$\mathbf{A}_{ii} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n_b} \left(\frac{\mathbf{Y}_{ik0}}{2} + \mathbf{Y}_{ik} \right) \quad (3.5)$$

Pro nediagonální prvky platí:

$$\mathbf{A}_{ik} = -\mathbf{Y}_{ik} \quad (3.6)$$

Analogicky lze vyjádřit prvky na pozicích \mathbf{A}_{ki} a \mathbf{A}_{kk} . Maticový zápis soustavy rovnic pro náhradní π -článek vedení lze potom vyjádřit:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_i \\ \mathbf{I}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{ik0} + \mathbf{Y}_{ik} & -\mathbf{Y}_{ik} \\ -\mathbf{Y}_{ik} & \mathbf{Y}_{ik0} + \mathbf{Y}_{ik} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{fi} \\ \mathbf{U}_{fk} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Zapnutí nebo vypnutí linky lze realizovat prostým přičtením respektive odečtením admitance linky na příslušných souřadnicích:

$$\mathbf{A}_{ik} = \mathbf{A}_{ik} \pm (-\mathbf{Y}_{ik}) \quad (3.8)$$

$$\mathbf{A}_{ii} = \mathbf{A}_{ii} \pm \left(\frac{\mathbf{Y}_{ik0}}{2} + \mathbf{Y}_{ik} \right) \quad (3.9)$$

3.3.4 Zahrnutí dvouvinutového transformátoru

Na Obr. 3.6 je znázorněn transformátor s π -článkem umístěným blíže uzlu i . Transformátor má komplexní převod daný vztahem $\mathbf{p} = p \angle \alpha$.

Komplexní převod transformátoru je reprezentován podílem napětí:

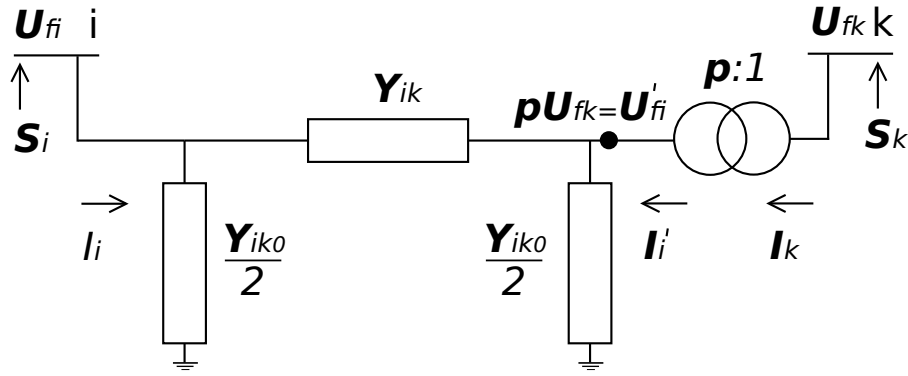
$$\mathbf{p} = p \angle \alpha = \frac{\mathbf{U}'_{fi}}{\mathbf{U}_{fk}} \quad (3.10)$$

Výkonová rovnice:

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{S}_k = \frac{\mathbf{U}'_{fi}}{\mathbf{U}_{fk}} = \frac{\mathbf{I}_k^*}{\mathbf{I}_i^*} \Rightarrow \mathbf{I}_i^* = \frac{\mathbf{I}_k^*}{\mathbf{p}}; \mathbf{I}'_i = \frac{\mathbf{I}_k}{\mathbf{p}^*} \quad (3.11)$$

Injektované proudy v uzlu i :

$$\mathbf{I}_i = \frac{\mathbf{S}_i^*}{\mathbf{U}_{fi}^*} = \mathbf{U}_{fi} \mathbf{Y}_{ik0} + (\mathbf{U}_{fi} - \mathbf{p} \mathbf{U}_{fk}) \mathbf{Y}_{ik} \quad (3.12)$$



Obr. 3.6: Náhradní π -článek transformátoru

Injektované proudy v uzlu k :

$$\frac{I_k}{p^*} = \frac{S_i^*}{(U_{fk}p)^*} = pU_{fk}Y_{ik0} + (pU_{fk} - U_{fi})Y_{ik} \quad (3.13)$$

Vytknutím napětí z obou předchozích rovnic a vynásobením druhé rovnice p^* je možné soustavu přepsat do maticového tvaru:

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ik0} + Y_{ik} & -pY_{ik} \\ -p^*Y_{ik} & pp^*(Y_{ik0} + Y_{ik}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{fi} \\ U_{fk} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Druhou variantou je umístění náhradního π -článeku blíže uzlu k . Pro odvození lze použít analogické vztahy a výsledná soustava bude vypadat takto:

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pp^*(Y_{ik0} + Y_{ik}) & -p^*Y_{ik} \\ -pY_{ik} & Y_{ik0} + Y_{ik} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{fi} \\ U_{fk} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.3.5 Zahnutí kompenzačního prvku nebo připojené soustavy

Do uzlu soustavy lze dále připojit kompenzační prvky (kondenzátory a tlumivky) i nadřazené nebo sousední části elektrizačních soustav. Tyto prvky lze charakterizovat příčnými parametry pomocí vodivosti G_{sh} a susceptance B_{sh} . Z hlediska aplikace v distribučních sítích se tohoto přístupu dá využít například pro zahrnutí dekompenzačních tlumivek dlouhých kabelových vývodů.

$$A_{ii} = A_{ii} + jB_{sh} \quad (3.16)$$

3.4 Numerické metody pro výpočet chodu soustavy

Pro účely výpočtu chodu sítě uvažujeme vyváženou souměrně zatíženou třífázovou soustavu v ustáleném stavu po odeznění všech přechodových jevů. Za předpokladu splnění těchto podmínek lze výpočty provádět nad jednopólovým modelem sítě.

Hlavním cílem řešení chodu soustavy je získat vektor fázorů uzlových napětí a tedy informaci o velikosti a úhlu napětí v každém uzlu sítě. V případě znalosti vektoru injektovaných proudů by rovnice v soustavě (3.7) byly lineární a výpočet by šel provést přímo. V praxi však pro většinu uzlů injektované proudy známy nejsou, neboť zátěž, kterou reprezentují, je napěťově závislá.

Proud v uzlu i lze obecně vyjádřit:

$$\mathbf{I}_i = \frac{P_i + jQ_i}{\sqrt{3}U_i^*} = \frac{P_i + jQ_i}{3U_{fi}^*} \quad (3.17)$$

Znamé veličiny uvedené v rovnici výše závisí na typu uzlu, viz kapitolu 3.3.1. Například pro PQ uzel jsou známými veličinami P_i a Q_i , v případě PU uzlu jsou známy P_i a U_i . Pro ostatní typy uzlů je vztah mezi P_i , Q_i , U_i a I_i definován charakteristikou zařízení připojeného do uzlu i . Rovnice popisující výkonové poměry v uzlech jsou nelineární a při řešení jejich soustav je nutné zvolit vhodnou numerickou metodu. Pro účely výpočtových simulací prováděných v rámci této práce byla použita Newton-Raphson metoda.

3.5 Newton-Raphson numerická metoda

Newton-Raphson metoda (dále pouze NR) je iterační numerická metoda vhodná pro řešení soustav nelineárních rovnic. Nelineární problém je v každé iteraci aproximován soustavou lineárních rovnic. Metoda konverguje kvadraticky, ale v některých případech se jeví jako numericky nestabilní a k výsledku nedokonverguje. Je zde patrna silná závislost na počátečních hodnotách, v tomto případě napětí. Numerickou nestabilitu popřípadě celkový počet iterací potřebných k nalezení výsledku lze eliminovat aplikací stabilizačních a akceleračních algoritmů.

Nalezení řešení pro rovnici o jedné neznámé:

$$f(x^p + \Delta x^p) = 0 \quad (3.18)$$

Taylorův rozvoj v bodě $x^p + \Delta x^p$:

$$f(x^p + \Delta x^p) = 0 = f(x^p) + \Delta x^p f'(x^p) + \frac{(\Delta x^p)^2}{2!} f''(x^p) + \dots \quad (3.19)$$

Hodnoty Δx^p jsou velmi malé a pro vyšší mocniny je lze zanedbat. Přírůstek vypočítaný v dané iteraci lze tedy vyjádřit následovně:

$$f(x^p) + \Delta x^p f'(x^p) = 0 \Rightarrow \Delta x^p = -\frac{f(x^p)}{f'(x^p)} \quad (3.20)$$

Nová hodnota proměnné se získá přičtením přírůstku ke stávající hodnotě:

$$x^{p+1} = x^p + \Delta x^p \quad (3.21)$$

Derivaci lze dále vyjádřit pomocí Jakobiánu:

$$f(x^p) = -JAC\Delta x^p \quad (3.22)$$

Rozšířením úlohy pro řešení n rovnic o n neznámých se z Jakobiánu stane čtvercová matice, jejíž hodnoty jsou dány parciálními derivacemi rovnic $f_m(x_n)$:

$$JAC_{mn} = \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \quad (3.23)$$

3.6 Aplikace Newton-Raphson metody pro řešení chodu soustavy

Pomocí Newton-Raphson metody lze řešit výpočet ustáleného chodu elektrizační soustavy. Známé a neznámé veličiny jsou pro řešení NR metodou definovány v souladu s kapitolou 3.3. Jelikož NR metoda silně závisí na počátečních podmínkách, je pro neznámé velikosti napětí nastavena hodnota 1 pu a pro úhel napětí 0 rad. Výsledky se obvykle pohybují kolem počátečních hodnot (v praxi se napětí udržují blízko jmenovitým).

Použitím NR metody lze linearizovaný model definovat jako soustavu rovnic:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \vartheta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

- Vektor levé strany je nazýván rozdílovým (mismatch) vektorem a jeho hodnoty jsou vypočítány v každé iteraci pro aktuální hodnoty napětí.
- Matice pravé strany je Jacobiho matice sestávající z jednotlivých submatic, jejichž odvození bude popsáno dále v této kapitole.
- Vektor pravé strany zahrnuje neznámé změny úhlu $\Delta \vartheta$ a velikosti napětí ΔU .
- Pro referenční uzel nebude v soustavě žádná rovnice – fázor napětí je známý.
- Pro PU uzel bude v soustavě jedna rovnice – výpočet ΔP_i .
- Pro PQ uzel budou v soustavě dvě rovnice – výpočet ΔP_i a ΔQ_i .

3.6.1 Jacobiho matice

Jacobiho matice při výpočtu chodu soustavy NR metodou sestává ze čtyř submatic, které vyjadřují změnu velikosti respektive úhlu napětí při malé změně činného respektive jalového výkonu. Každá ze submatic je obecně řídká a svou strukturou z hlediska propojení uzlů odpovídá admitanční matici. Pro efektivní řešení soustavy lineárních rovnic je tedy vhodné použít metodu, která je schopna efektivně pracovat s řídkými maticemi a vektory [32].

Výpočet hodnot Jacobiho matice lze realizovat dvěma způsoby. První přístup je založen na derivování rovnic injektovaných výkonů P_i a Q_i podle úhlu respektive velikosti napětí. Pro každou submatici jsou derivací odvozeny vztahy pro výpočet diagonálních respektive nediagonálních prvků, ze kterých jsou vypočítány hodnoty pro aktuální napětí [31].

Na základě provedené analýzy byla pro výpočet hodnot Jacobiho matice zvolena metoda založená na maticových operacích při derivování komplexního výkonu, neboť bylo zjištěno, že tato metoda konverguje rychleji a je numericky stabilnější zejména v případě rozsáhlejších soustav [30].

Derivace fázoru napětí a proudu podle velikosti napětí:

$$\frac{\partial \mathbf{U}_{bus}}{\partial U} = \frac{\partial \mathbf{U}_{diag}}{\partial U_{diag}} = \mathbf{U}_{norm} \Rightarrow \frac{\partial \mathbf{I}_{bus}}{\partial U} = \mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{U}_{bus}}{\partial U} = \mathbf{A} \mathbf{U}_{norm} \quad (3.25)$$

Derivace fázoru napětí a proudu podle úhlu napětí:

$$\frac{\partial \mathbf{U}_{bus}}{\partial \vartheta} = j \mathbf{U}_{diag} \Rightarrow \frac{\partial \mathbf{I}_{bus}}{\partial \vartheta} = \mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{U}_{bus}}{\partial \vartheta} = j \mathbf{A} \mathbf{U}_{diag} \quad (3.26)$$

Vyjádření komplexního výkonu:

$$\mathbf{S}_{bus} = \mathbf{U}_{diag} \mathbf{I}_{bus}^* = \mathbf{I}_{diag}^* \mathbf{U}_{bus} \quad (3.27)$$

Derivace komplexního výkonu podle velikosti napětí:

$$\begin{aligned} G_U^S &= \frac{\partial \mathbf{S}_{bus}}{\partial U} = \mathbf{U}_{diag} \left(\frac{\partial \mathbf{I}_{bus}}{\partial U} \right)^* + \mathbf{I}_{diag}^* \left(\frac{\partial \mathbf{U}_{bus}}{\partial U} \right) \\ &= \mathbf{U}_{diag} (\mathbf{A} \mathbf{U}_{norm})^* + \mathbf{I}_{diag}^* \mathbf{U}_{norm} \end{aligned} \quad (3.28)$$

Derivace komplexního výkonu podle úhlu napětí:

$$\begin{aligned} G_\vartheta^S &= \frac{\partial \mathbf{S}_{bus}}{\partial \vartheta} = \mathbf{U}_{diag} \left(\frac{\partial \mathbf{I}_{bus}}{\partial \vartheta} \right)^* + \mathbf{I}_{diag}^* \left(\frac{\partial \mathbf{U}_{bus}}{\partial \vartheta} \right) \\ &= \mathbf{U}_{diag} (j \mathbf{A} \mathbf{U}_{diag})^* + \mathbf{I}_{diag}^* j \mathbf{U}_{diag} = j \mathbf{U}_{diag} (\mathbf{I}_{diag} - \mathbf{A} \mathbf{U}_{diag})^* \end{aligned} \quad (3.29)$$

Výsledkem derivování jsou matice G_U^S a G_ϑ^S , jejichž hodnotami jsou komplexní čísla. Vyjádřením reálné a imaginární části dostaneme celkem 4 matice, které představují submatice Jacobiánu. Z matic G_U^S a G_ϑ^S jsou pak vybírány pouze prvky na pozicích příslušných PU a PQ uzlů.

$$JAC = \begin{bmatrix} \Re\{G_{\vartheta[1,1]}^S\} & \cdots & \Re\{G_{\vartheta[1,nuq]}^S\} & \Re\{G_{U[1,1]}^S\} & \cdots & \Re\{G_{U[1,nuq]}^S\} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Re\{G_{\vartheta[nuq,1]}^S\} & \cdots & \Re\{G_{\vartheta[nuq,nuq]}^S\} & \Re\{G_{U[nuq,1]}^S\} & \cdots & \Re\{G_{U[nuq,nuq]}^S\} \\ \Im\{G_{\vartheta[1,1]}^S\} & \cdots & \Im\{G_{\vartheta[1,nuq]}^S\} & \Im\{G_{U[1,1]}^S\} & \cdots & \Im\{G_{U[1,nuq]}^S\} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Im\{G_{\vartheta[nq,1]}^S\} & \cdots & \Im\{G_{\vartheta[nq,nuq]}^S\} & \Im\{G_{U[nq,1]}^S\} & \cdots & \Im\{G_{U[nq,nuq]}^S\} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

3.6.2 Výpočet rozdílového vektoru

Rozdílový vektor udává rozdíl známých injektovaných výkonů P , Q a výkonů dopočítaných v aktuální iteraci (p).

Z hodnot generovaných (s indexem G) a spotřebovávaných výkonů (s indexem L), které jsou součástí zadání, je možné vyjádřit vektor komplexních výkonů:

$$\mathbf{S} = (P_g - P_l) + j(Q_g - Q_l) \quad (3.31)$$

Vektor komplexních výkonů vypočítaných na základě fázorů napětí aktualizovaných v dané iteraci:

$$\mathbf{S}^{(p)} = \mathbf{U}^{(p)} \mathbf{I}^{*(p)} = \mathbf{U}^{(p)} (\mathbf{A} \mathbf{U}^{(p)})^* \quad (3.32)$$

Rozdíl komplexních výkonů:

$$\Delta \mathbf{S} = \mathbf{S} - \mathbf{S}^{(p)} \quad (3.33)$$

Pro vyjádření finálního rozdílového vektoru je nutné vybrat reálné a imaginární hodnoty na pozicích odpovídajících PU a PQ uzlům (podobně jako tomu bylo u Jacobiho matice).

$$m = [\Re\{\Delta \mathbf{S}_{[1]}\}, \dots, \Re\{\Delta \mathbf{S}_{[nuq]}\}, \Im\{\Delta \mathbf{S}_{[1]}\}, \dots, \Im\{\Delta \mathbf{S}_{[nq]}\}] \quad (3.34)$$

S každou další iterací by hodnoty rozdílového vektoru měly klesat. Na základě největší hodnoty v tomto vektoru se určuje podmínka konvergence. Iterační proces je ukončen v případě, že největší hodnota je menší nebo rovna ε ($\varepsilon \leq \max |m|$).

Pokud hodnota ε v průběhu výpočtu s každou další iterací neklesá nebo osciluje, potom numerická metoda nekonverguje k výsledku. Výsledný rozdílový vektor je v další iteraci ($p + 1$) použit jako levá strana rovnice (3.24).

3.6.3 Řešení soustavy rovnic

Hlavním úkolem NR metody je převést nelineární problém na snadno řešitelnou soustavu lineárních rovnic, což je zajištěno výpočtem Jacobiho matice a rozdílového vektoru v každé iteraci. Při výpočtu chodu soustavy pomocí matematických knihoven velmi záleží (zejména u velkých sítí) na vnitřní reprezentaci datových struktur a metodě výpočtu soustavy rovnic. Na základě testů, provedených v rámci této práce, bylo zjištěno, že u sítí s již řádově stovkami uzlů mají v admitanční a Jacobiho matici nenulovou hodnotu řádově jednotky procent prvků. Z tohoto důvodu je nutné pro efektivní výpočty použít knihovny umožňující práci a matematické operace s řídkými maticemi.

V rámci řešení této disertační práce bylo použito prostředí programovacího jazyka Python a pro práci s řídkými maticemi použita knihovna *scipy.sparse*. Výpočty, které tato knihovna používá pro řešení soustav lineárních rovnic, jsou založeny na LU rozkladu. Matematický aparát, který zmíněná knihovna používá, je podrobně popsán v publikaci [34].

Pro aktuální iteraci jsou prvky Jacobiho matice a rozdílového vektoru vypočítány na základě napětí z předchozí iterace:

$$\begin{bmatrix} \Delta \vartheta^{(p)} \\ \Delta U^{(p)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{(p-1)} & N^{(p-1)} \\ J^{(p-1)} & L^{(p-1)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(p-1)} \\ \Delta Q^{(p-1)} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Po vyřešení soustavy rovnic jsou výsledným přírůstkem velikostí a úhlů napětí aktualizovány stávající hodnoty vektoru uzlových napětí:

$$\vartheta^{(p)} = \vartheta^{(p-1)} + \Delta \vartheta^{(p)} \quad (3.36)$$

$$U^{(p)} = U^{(p-1)} + \Delta U^{(p)} \quad (3.37)$$

Lze pozorovat, že velikosti přírůstku $\vartheta^{(p)}$ a $U^{(p)}$ mohou nabývat v prvních iteracích značných hodnot, což vede k nestabilitě NR metody, která pak konverguje k nesprávnému výsledku nebo nekonverguje vůbec. Proto je výhodné pro účely stabilizace v prvních iteracích hodnoty přírůstků *corr* vhodným způsobem oříznout na hodnotu *cor_{tr}*. Uvedená metoda ořezávání využívá funkce *signum* a zohledňuje funkční závislost na hodnotě přírůstku, jehož mezní velikost pro ořezávání určuje proměnná *DXT*. V porovnání s lineární závislostí nebo násobením konstantou se tento přístup vzhledem k poměru zvýšení počtu iterací ukazuje jako efektivní [33].

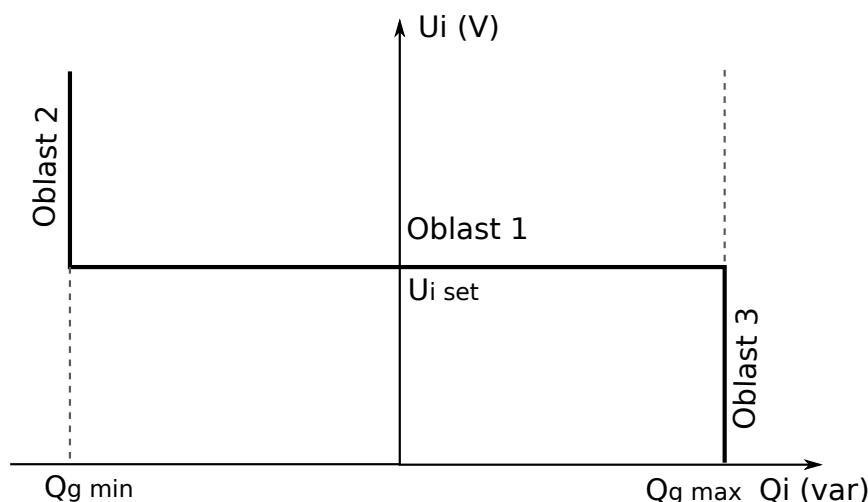
$$cor_{tr} = \begin{cases} corr & \text{pokud } |corr| < DXT \\ 2 \operatorname{sgn}(corr) DXT - \frac{DXT^2}{corr} & \text{pokud } |corr| \geq DXT \end{cases} \quad (3.38)$$

V průběhu iteračního procesu jsou hodnoty přírůstků průběžně porovnávány s mezní hodnotou *DXT* a pokud jsou větší, dochází k jejich oříznutí dle předpisu v (3.38). Na základě poměru účinnosti stabilizace k zvýšení počtu iterací byly v rámci provedených testů určeny mezní hodnoty $DXT_{\vartheta} = 0,7$ a $DXT_U = 0,3$. Pokud k oříznutí dojde, jsou v dané iteraci hodnoty $\Delta \vartheta^{(p)}$ a $\Delta U^{(p)}$ aktualizovány oříznutou hodnotou.

3.6.4 Začlenění jalových mezí zdroje

Hodnota napětí z PU uzlu je udržována prostřednictvím regulace jalového výkonu, jehož velikost dodávky je ovšem omezená a udržována z mezí:

$$Q_{g \min} \leq Q_g \leq Q_{g \max} \quad (3.39)$$



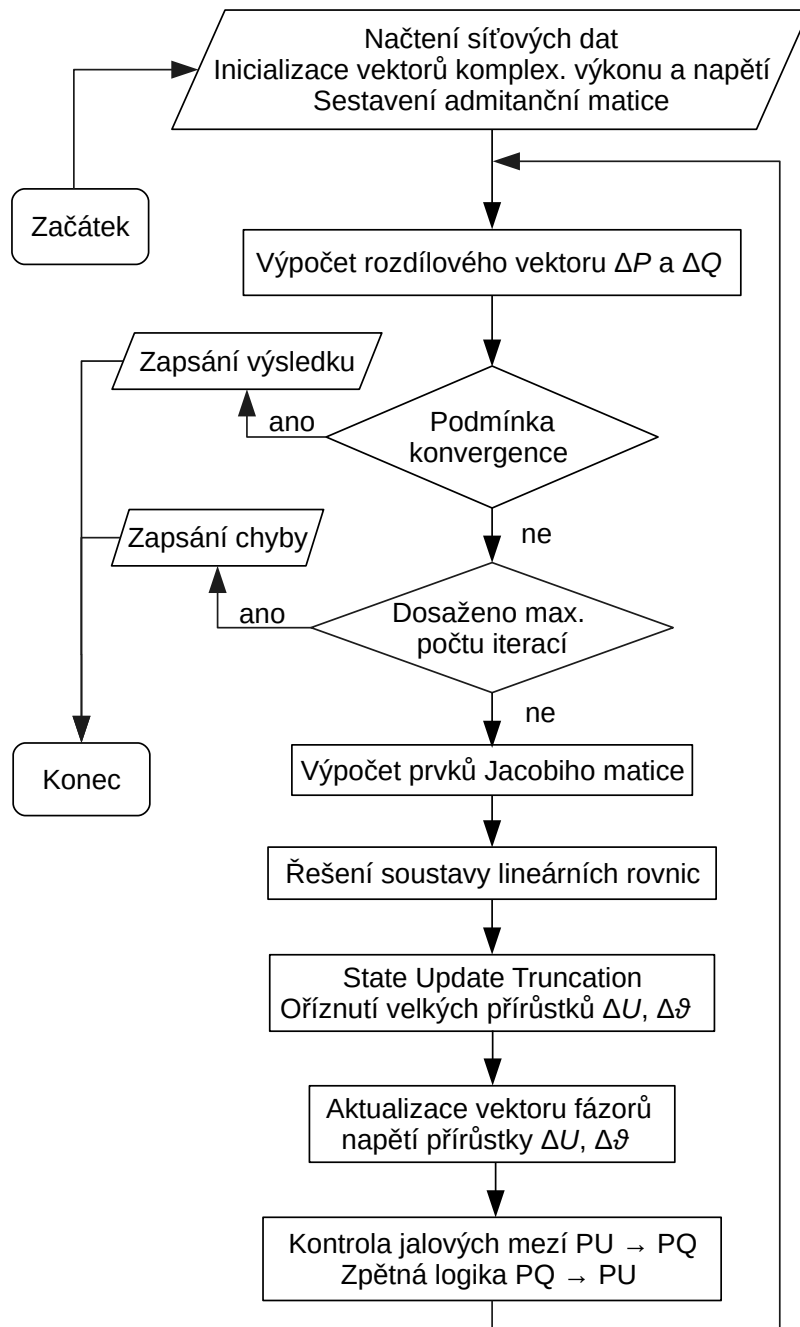
Obr. 3.7: Jalové meze PU uzlů

Pro získání realističtějších výsledků je nutné, logiku NR metody rozšířit o dopočet hodnoty generovaného jalového výkonu v PU uzlech, jeho porovnání s mezními hodnotami a přepínání na PQ uzel v případě jejich porušení.

Z Obr. 3.7 vyplývá, že uzel zůstane typu PU, pokud se hodnoty jalového výkonu pohybují v oblasti 1, kde je napětí udržováno na hodnotě $U_{i \text{ set}}$ a hodnota Q_g neporušuje jalové meze. Při jejich porušení je uzel přepnut na typ PQ s hodnotou jalového výkonu, který odpovídá porušené mezi – $Q_g \in \{Q_{g \text{ min}}, Q_{g \text{ max}}\}$. Tímto způsobem lze při výpočtu sítí vn zohlednit regulační schopnosti dnes již hojně zastoupených zdrojů připojených na této hladině, viz kapitolu 5.4.3.

V průběhu iteračního procesu se může velikost napětí stabilizovat a nabývat hodnot, které umožní aplikaci zpětné logiky přepnutí PQ na PU. Pokud byl uzel přepnut na PQ z důvodu porušení horní meze a v aktuální iteraci pro velikost uzlového napětí platí $U_i > U_{i \text{ set}}$, pak může být uzel přepnut zpět na PU, protože se snížením napětí klesne i jalový výkon. Analogický postup lze aplikovat, pokud byla porušena mez Q_{min} a v aktuální iteraci platí $U_i < U_{i \text{ set}}$, může být uzel rovněž přepnut zpět na PU, protože se zvýšením napětí poroste i jalový výkon.

3.6.5 Vývojový diagram NR metody



Obr. 3.8: Vývojový diagram NR metody

3.7 Výsledky testů NR metody

Na základě poznatků uvedených v této kapitole byla autorem v prostředí jazyka Python vytvořena knihovna pro výpočet ustáleného chodu soustavy Newton-Raphson

metodou. Pro její validaci, testování z hlediska přesnosti a zejména časové náročnosti výpočtu byly provedeny simulační výpočty nad vzorkem sítí různého rozsahu od 59 až do 3120 uzlů, jejichž popis je uveden v příloze A.1. V Tab. 3.1 jsou pro každou síť uvedeny průměrné hodnoty výsledků deseti opakovaných výpočtů Load Flow.

Tab. 3.1: Výsledky testů NR metody

Síť	Počet uzlů	Výpočetní čas (ms)	Počet iterací	Čas / iterací (ms)
EPS0059	59	40,2	5	8,04
IEEE145	145	49,6	5	9,92
IEEE300	300	51,8	5	10,36
EPS0734	734	54,7	4	13,68
EPS2376	2383	381,4	16	23,84
EPS2746	2746	167,8	5	33,56
EPS3012	3012	221,3	8	27,66
EPS3120	3020	340,2	11	30,93

Testy byly provedeny na PC se čtyřjádrovým procesorem Intel Core i5 s frekvencí 2,6 Ghz s 8 GB paměti RAM pro mezní odchylku výpočtu $\varepsilon = 10e^{-7}$. Validace výpočtu chodu soustavy byla úspěšně provedena na základě porovnání celkových činných a jalových ztrát s referenčními hodnotami. Z uvedeného vyplývá, že u všech sítí se podařilo najít výsledek do jedné sekundy, což je hranice, která byla stanovena jako maximální. Se zvětšujícím se rozsahem sítě se zvyšuje i výpočetní náročnost, nicméně samotný počet uzlů není jediným parametrem ovlivňující průběh výpočtu. Velmi záleží například i na zatížení sítě a hustotě propojení, což je vidět na síti EPS2376, která sice není největší co do počtu uzlů a přesto nalezení výsledku trvá v jejím případě nejdéle ze všech sítí.

Výsledky podrobnějších analýz rychlosti numerických metod po aplikaci stabilizačních a akceleračních algoritmů jsou shrnuty v publikacích [A12] a [A6], kde je testována i Fast-Decoupled metoda, která byla v rámci této práce implementována jako rychlejší, ale méně přesná alternativa k výpočtu pomocí Newton-Raphson metody.

Při řešení konkrétního problému v rámci sítí vn se zpravidla pracuje s modelem, který zahrnuje pouze stanice a vývody pro danou oblast. I v případě rozsáhlejší sítě zpravidla model nemívá více než 3000 výpočetních (nikoliv fyzických) uzlů a často je možné výpočty dílčích oblastí spouštět samostatně s využitím paralelizace. Na základě uvedených poznatků lze konstatovat, že vytvořená výpočetní knihovna má potenciál pro využití v praxi a to zejména v oblasti plánování a rozvoje pro výpočet variantních stavů sítě.

4 Propojování vývodů vn

Vývody vn jsou většinou provozovány jako paprskové s možností propojení do uzavřené smyčky se sousedním nebo protějším vývodem. Hlavní výhodou paprskově provozovaných vývodů je snadná detekce poruch a menší zkratový výkon. Důvodem k propojování sousedních vývodů je zvýšení spolehlivosti, rovnoměrnější rozložení výkonů a s tím spojená napěťová stabilizace a snížení ztrát. Paralelní provoz sousedních vývodů poskytuje možnost alternativního napájení odběrných míst, které by v době plánované odstávky nebo odstraňování poruchy musely být odpojeny. Vhodnou změnou konfigurace sítě lze vyčlenit minimální úsek postižený poruchou a tím pozitivně ovlivnit ukazatele nepřetržitosti dodávky.

Spínací prvky na hladině vn navzájem odlišuje zejména jejich umístění a vypínací schopnost. Pro spínání celých vývodů slouží vývodové vypínače umístěné přímo v transformovnách 110 kV/vn. U venkovních vedení vn slouží pro účely provádění manipulací na kmenech vývodů nebo v odbočkách úsekové odpínače (úsečníky) dimenzované na spínání provozních proudů. Ty mohou být ovládány lokálně (vyžaduje výjezd montážní čety), nebo dálkově v případě vybavení úsečníku dálkovým ovládním. Vybavení umožňující dálkovou manipulaci se obvykle instaluje u dvou až tří úsečníků v jednom kmeni, případně u důležitých odboček nebo propojů s jiným vývodem. Samostatnou kapitolu tvoří reclosery, což jsou rovněž dálkově ovládané prvky v poli s funkcí ochrany a schopností vypínat zkratové proudy. Instalovány jsou zpravidla v kmenových linkách vn.

Tab. 4.1: Vypínací schopnosti odpínačů a vypínačů

Typ	Popis	I_n zkrat zap (A)	I_n vyp (A)	I_n vyp smyčky (A)
Dribo Fla 15/60	komorový	18000	630	400
IVEP VLK	růžkový	6300	36	30
Dribo Flb	růžkový	16000	31,5	31,5
Dribo Flc GBR	pružinový	10000	35	20
Dribo Fla 15/97	komorový	25000	630	630
Dribo GVR 27	recloser	12500	12500	-
ABB VD4	vypínač	25000	25000	-

Z hlediska konstrukce se úsečníky obecně dělí na typy se zhašecí komorou a bez ní. Co do počtu méně zastoupené úsečníky se zhašecí komorou dokáží při účinníku 0,7 vypínat proudy až 630 A respektive 400 A pro uzavřenou smyčku. S klesajícím účinníkem se vypínací schopnost snižuje. Více zastoupené úsečníky bez zhašecí komory mají při účinníku 0,7 vypínací schopnost pouze okolo 30 A. K zhašení případného

oblouku mají tyto úsekové odpínače k dispozici pouze opalovací růžky, případně pružinový mechanismus.

Stanovení hodnot vypínacích proudů je předmětem typových zkoušek dle normy ČSN EN 62271–103. Ta stanovuje pro zkoušku na *jmenovitý vypínací proud* hodnotu napětí zdroje 100 % U_n a převážně činnou zátěž s $\cos\varphi = 0,7 \text{ ind.}$ U zkoušky na *jmenovitý vypínací proud uzavřené smyčky* je hodnota zdroje nastavena na 20 % U_n a účinník převážně induktivní zátěže $\cos\varphi = 0,3 \text{ ind.}$ Jak vyplývá z Tab. 4.1, hodnoty obou proudů jsou si poměrně blízké. Zde se nabízí úvaha, zda by optikou stanovení *jmenovitého vypínacího proudu* nemohl být *jmenovitý vypínací proud uzavřené smyčky* při účinníku $\cos\varphi = 0,7 \text{ ind.}$ s přihlédnutím ke sníženému napětí 20 % U_n až 5x vyšší. Tato úvaha je v této práci dále zohledněna při stanovení proudových mezí v simulacích.

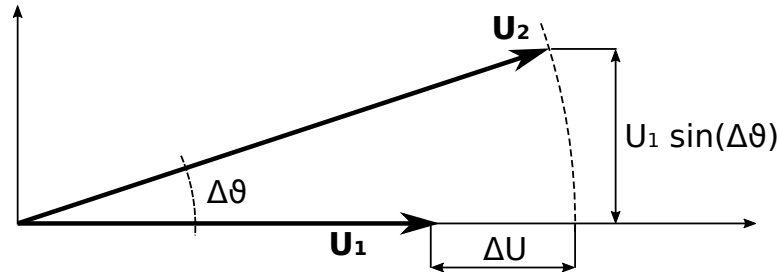
Omezené spínací schopnosti nejsou samozřejmě jediným limitním faktorem v proudové dráze podél propojených vývodů. Tab. 4.2 uvádí přehled nejčastějších typů vodičů, jejich průřezů a především velikosti maximálních provozních proudů. U vel-

Tab. 4.2: Maximální provozní proud vodičů vn

Průřez (mm ²)	Venkovní		Kabelové	
	Typ	I_{max} (A)	Typ	I_{max} (A)
35	AlFe6	183	SAXKA	148
50		177	AXEKVCEY	174
70		225	AXEKCY	264
95		289	AXEKVCEY	254
110		318	-	-
120		357	AXEKCY	341
150		387	AXEKVCEY	322
185		459		364
240		535		422

kého množství vývodů vn se zejména kvůli hospodárnosti snižuje průřez vodičů směrem do vývodu a je stále možné setkat se v kmenových linkách vn s průřezy 50 i 35 mm². Původní koncepce sítí vn totiž počítala s faktem, že nejvyšší zatížení lze očekávat na začátku vývodu a ve vzdálenějších sekcích proud vedením díky odběru klesá. Tento předpoklad však v dnešní době s rozvojem distribuovaných zdrojů nemusí platit zdaleka všude. Značné nároky na proudovou zatižitelnost může mít i vyrovnávací proud, o kterém je řeč dále v tomto textu. V rámci obnovy sítí vn jsou provozovatelé DS nuceni již dnes posilovat úseky vedení z hlediska průřezu. Posílení kmenů vn zmiňuje jako jedno z opatření i NAP–SG (venkovní vedení na 110 mm² a kabelová na 240 mm²) [6].

Při spínání na hladinách vn se obecně jedná o propojení dvou částí sítě, u kterých se předpokládá splnění fázovacích podmínek, tedy shodné frekvence a sledu fází. Poslední a někdy obtížně splnitelnou podmínkou je stejná velikost a nulový rozdíl úhlů fázorů napětí v uzlech, kde dochází k propojování vývodů. Při nesplnění této podmínky nastává situace znázorněná na Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Diagram rozdílu fázoru napětí

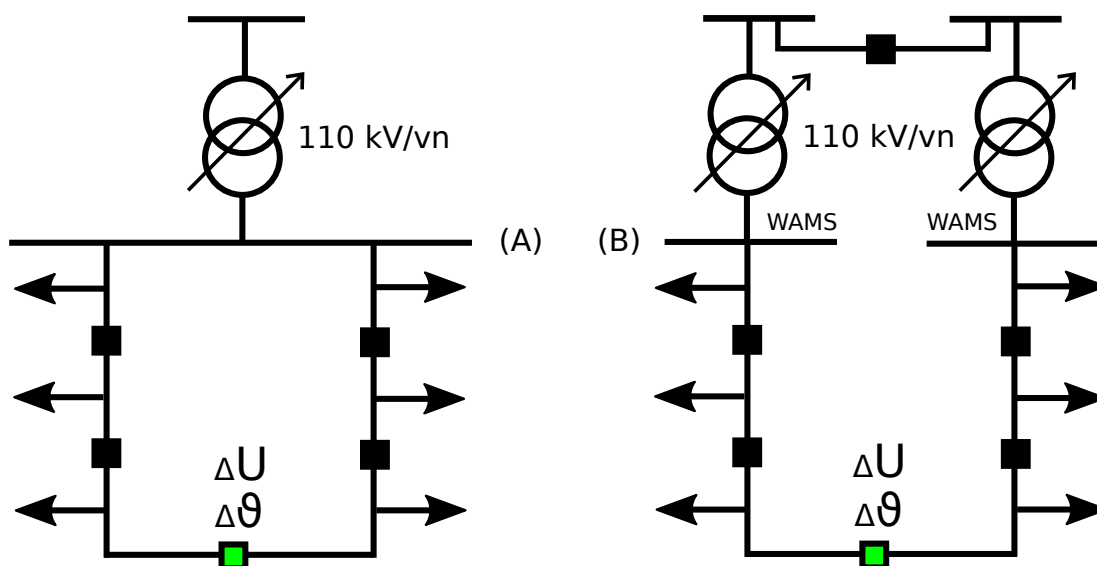
Rozdíl úhlů fázorů napětí je způsoben zejména rozdílnou impedancí a zatížením vývodů, následkem čehož dochází k toku nežádoucího vyrovnávacího proudu I_v propojenými vývody. Při kruhování dvou vývodů vn je dále nutné rozlišovat, zda jsou oba napájeny z jedné rozvodny, nebo různých rozveden 110 kV/vn.

V případě velkého rozdílu úhlů napětí mezi napájecími rozvodnami se po sčítání fázory provozního a vyrovnávacího proudu propojenými vývody sčítají, což může vést k přetížení některých prvků v dráze proudu tekoucího propojenými vývody, reakci nadproudových ochran, nebo překročení vypínací schopnosti úsekových odpínačů při manipulaci v síti. Může dokonce docházet k případům, kdy výsledný tok proudu směřuje z jedné napájecí rozvodny do druhé.

Na Obr. 4.2 jsou znázorněny dvě varianty paralelního provozu vývodů vn. Varianta *A* počítá s napájením obou vývodů ze společného transformátoru, zatímco ve variantě *B* je každý vývod napájen jiným strojem. Ve variantě *B* velmi záleží na tom, zda jsou oba stroje napájeny ze stejné přípojnice v jedné stanici, nebo je každý umístěn v jiné části DS. V praxi dochází i k případům, kdy napájecí body spadají do více uzlových oblastí napájených z různých předávacích míst PS/DS. Potenciální vyrovnávací proud vývody vn pak může nabývat značných hodnot. Pro snížení úhlového rozdílu napětí a tedy i vyrovnávacího proudu pak může být nutné provést rekonfiguraci sítě vvn.

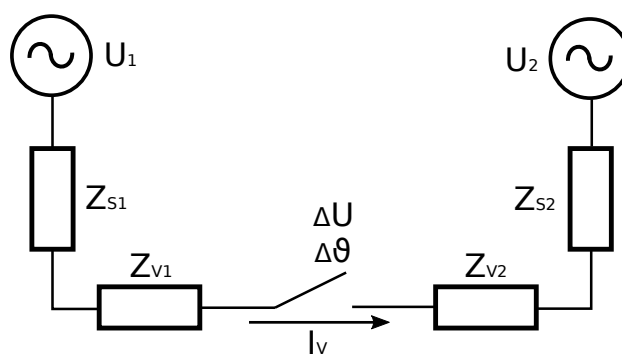
4.1 Vyrovnávací proud

Největší vliv na velikost vyrovnávacího proudu má rozdíl úhlů fázorů napětí na propojovaných koncích vývodů. Jedná se však z technického hlediska o téměř nedo-



Obr. 4.2: Varianty propojování vývodů vn

sažitelnou informací. V praxi bývají měření synchronních fázorů vybaveny vybrané napájecí stanice a vyrovnávací proud lze odhadnout na základě výpočtu vycházejícího z náhradního schéma na Obr. 4.3



Obr. 4.3: Vyrovnávací proud při spínání vývodů vn (Z_s – impedance napájecí sítě a transformátoru, Z_v – impedance vývodu)

Rozdíl fázorů napětí (viz Obr. 4.1) lze rozdělit na reálnou a imaginární část, respektive na rozdíl velikostí a úhlů napětí:

$$U_1 - U_2 = \Delta U_{Re} + j\Delta U_{Im} \approx \Delta U + jU_1 \sin \Delta \vartheta \quad (4.1)$$

Za předpokladu, že úbytek napětí je na obou vývodech stejný, lze vyrovnávací proud odhadnout na základě znalosti fázorů napětí v napájecích stanicích:

$$I_v = \frac{U_1 - U_2}{Z_{S1} + Z_{V1} + Z_{S2} + Z_{V2}} = \frac{R\Delta U_{Re} + X\Delta U_{Im}}{R^2 + X^2} - j \frac{X\Delta U_{Re} + R\Delta U_{Im}}{R^2 + X^2} \quad (4.2)$$

Jak vyplývá z rovnice (4.2), velikost reálné a imaginární složky vyrovnávacího proudu závisí na poměru R/X uzavřené smyčky. Za předpokladu, že $R \ll X$, lze rovnici zjednodušit:

$$\mathbf{I}_v = \frac{\mathbf{U}_1 - \mathbf{U}_2}{\mathbf{Z}_{S1} + \mathbf{Z}_{V1} + \mathbf{Z}_{S2} + \mathbf{Z}_{V2}} \approx \frac{\Delta U + jU_1 \sin \Delta\vartheta}{j(X_{S1} + X_{V1} + X_{S2} + X_{V2})} \quad (4.3)$$

Reálná část vyrovnávacího proudu silně závisí na rozdílu úhlů $\Delta\vartheta$, zatímco imaginární část na rozdílu velikostí napětí ΔU . Reálná část proudu a tedy i činný výkon potečou z rozvodny s předbíhajícím fázorem \mathbf{U}_1 . Na hladině vn je rovněž nutné přihlídnout k faktu, že R a X jsou stejného řádu a zjednodušení v rovnici (4.3) není potom korektní.

Rozdíl velikostí napětí lze v praxi ovlivnit nastavením odboček na transformátorech 110 kV/vn, velikost vyrovnávacího proudu je potom ovlivněna převážně rozdílovým úhlem napětí mezi napájecími stanicemi. Tento úhlový rozdíl je dán zejména aktuálním zapojením a zatížením nadřazené soustavy a může být výrazně ovlivněn i produkcí lokálních zdrojů připojených do vývodů vn.

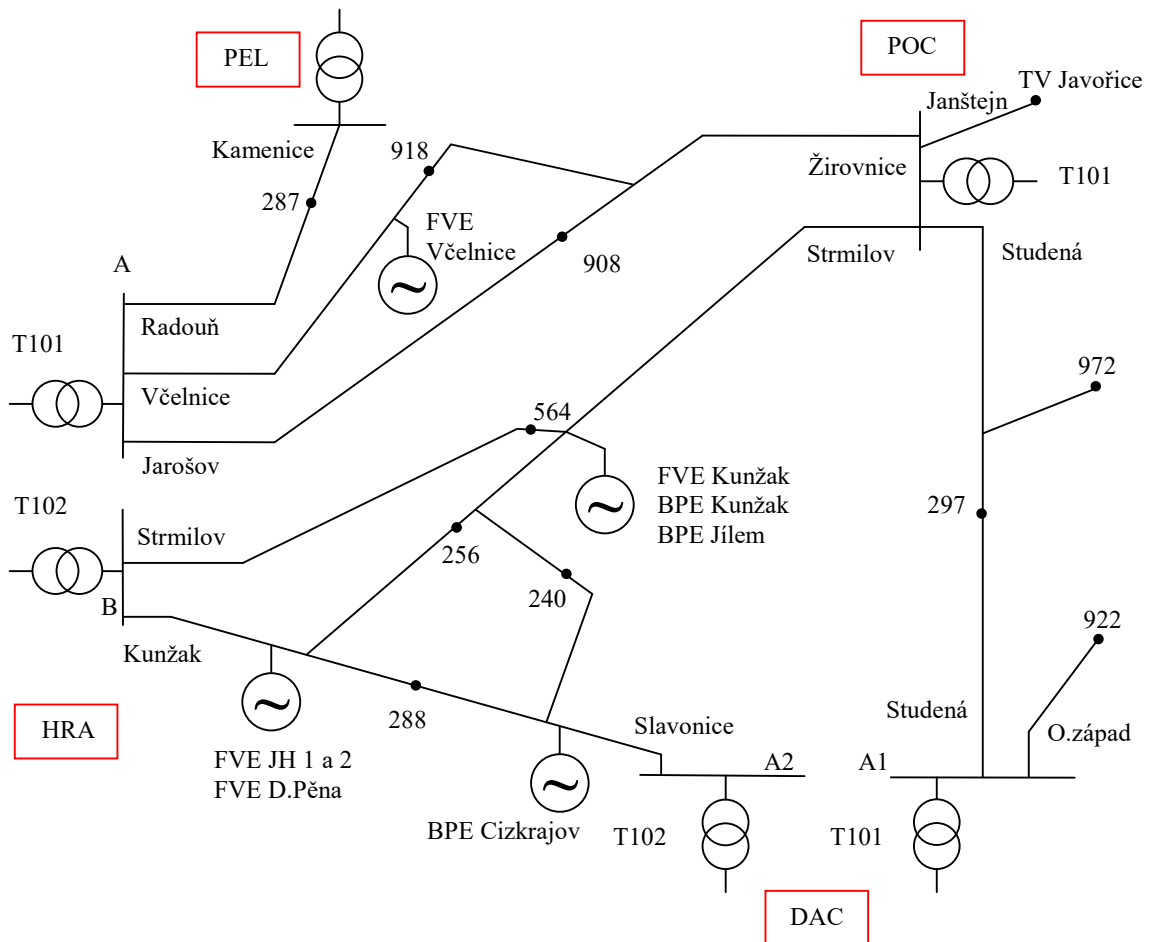
4.2 Vyhodnocení měření rozdílu fázorů napájecích napětí

Za účelem zmapování poměrů, které se dají očekávat při spínání vývodů a identifikaci podmínek pro zajištění bezpečného spínání, bylo na základě dat studie [29] provedeno vyhodnocení rozdílu velikosti a úhlu fázorů napětí několika konkrétních transformoven 110 kV/vn, jejichž vývody mohou být při manipulacích v síti vn propojovány. Dílčí výsledky dané problematiky rovněž prezentuje článek [A5]. Cílem bylo zjistit hodnoty rozdílových úhlů, které se v síti vyskytují co do četnosti a výskytu v různé denní době. Na základě změřených hodnot je pak odhadnuta velikost vyrovnávacího proudu při případném propojení vývodů.

Z hlediska časového rozsahu byly k dispozici hodnoty měření za celkem 4 měsíce od ledna do května 2014. Výsek zkoumané sítě 22 kV je znázorněn na Obr. 4.4. Zajímavostí je rovněž skutečnost, že uvedené transformovny spadají do více uzlových oblastí napájených z různých předávacích míst PS/DS.

Všechny transformovny na obrázku Obr. 4.4 byly osazeny systémem synchronního měření fázorů (WAMS), který v DS slouží především pro plošné monitorování stavu sítě v reálném čase. Pro účely této práce je klíčovou vlastností systému WAMS poskytnutí informace o úhlu napětí ve stanicích. Díky měření WAMS pro účely získání úhlu uzlových napětí odpadá nutnost provádět složitější výpočty chodu soustavy nad větší částí sítě (se zahrnutím nadřazené napěťové hladiny). V případě

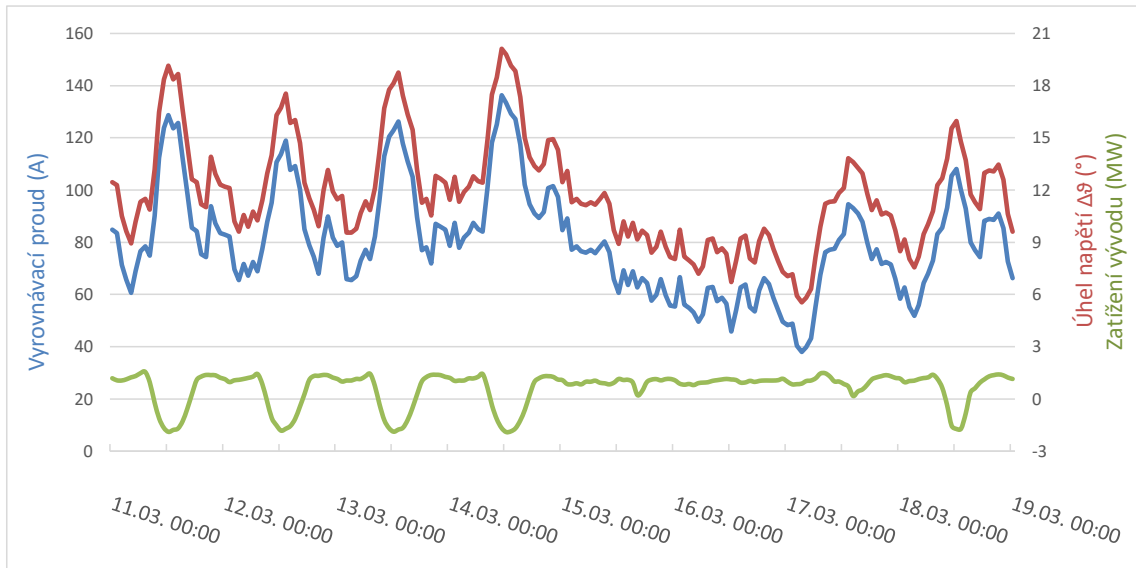
přenosových soustav se lze v praxi setkat s využitím této technologie pro rozšíření vstupů stavové estimace.



Obr. 4.4: Zjednodušené schéma sítě 22 kV, ve které probíhalo měření (vyznačeny pouze významné zdroje)

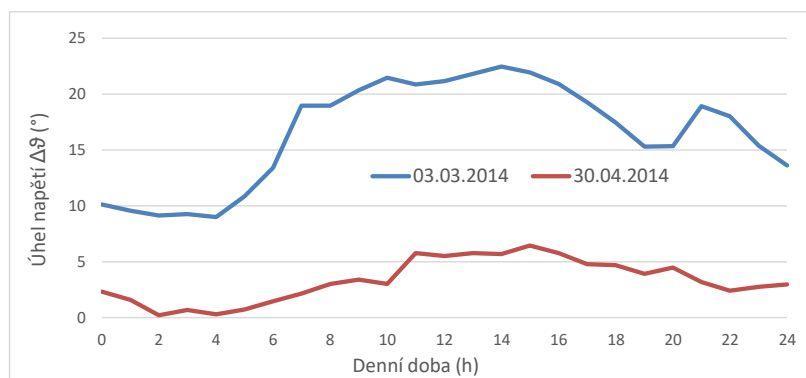
Další část textu se zaměřuje na poměry na vývodech Kunžak (napájen z HRA T102) a Slavonice (napájen z DAC T102) propojených úsečníkem č. 288. Každá z napájecích stanic je připojena do jiné uzlové oblasti sítě 110 kV (předávací místo Dasný, resp. Slavětice), a proto lze zde očekávat značný rozdíl úhlů fázorů napájecích napětí. Jak je znázorněno na Obr. 4.4, v obou vývodech jsou připojeny lokální zdroje, takže je možné sledovat, jak se jejich provoz promítne do rozdílového úhlu napětí mezi stanicemi. Ve vývodu Kunžak jsou připojeny FVE zdroje o celkovém instalovaném výkonu 4,2 MW, v protějším vývodu Slavonice pak bioplynová stanice o výkonu 630 kW.

Na Obr. 4.5 je znázorněno zatížení vývodu vn Kunžak, které je ovlivněno produkcí připojených FVE (zelená křivka). Do grafu byl rovněž vynesena změřená rozdílová úhlu napětí mezi stanicemi HRA–DAC a na základě znalosti impedancí vývodů



Obr. 4.5: Průběh I_v , $\Delta\vartheta$ a zatížení vývodu Kunžak během sledovaného období

dosazených do vztahu (4.2) vypočítán očekávaný vyrovnávací proud při propojení vývodů pomocí úsečníku 288 (modrá křivka). Graf dokládá, že v průběhu sledovaného období se zatížení vývodu značně měnilo, což je dáno různou hodnotou odběrů a zejména produkcí FVE, která se mění s intenzitou slunečního osvětlení. V období od 1.3. do 18.3. ze zatížení vývodu pohybovalo v širokých mezích od -1,9 MW do 1,6 MW. Negativní znaménko značí zpětný tok energie do nadřazené soustavy. K tomu docházelo přibližně od 9. do 17. hodiny, kdy produkce lokálních zdrojů převýšila odběr vývodu. V tomto období se rozdíl úhlů mezi stanicemi pohyboval od 6° do 20° , což odpovídá vyrovnávacímu proudu od 40 A do 135 A. Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány v době maximální produkce FVE mezi 10. a 16. hodinou.

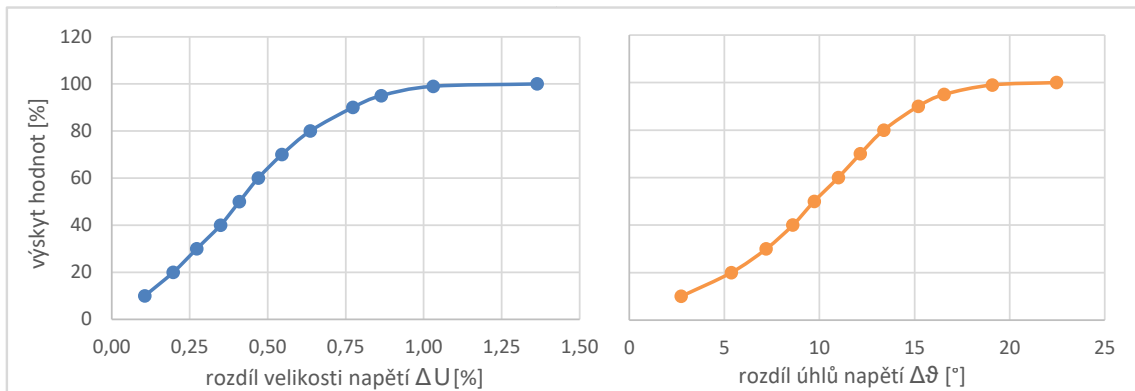


Obr. 4.6: Průběh min. a max. denních hodnot $\Delta\vartheta$

Jak dále dokládá Obr. 4.6, hodnota $\Delta\vartheta$ a tedy i I_v se skutečně velmi liší ve dnech s minimální a maximální produkcí FVE. Lze tedy konstatovat, že rozptýlené

zdroje mohou mít značný vliv na velikost vyrovnávacího proudu při spínání vývodů vn.

Z naměřených hodnot byly vyhodnoceny distribuční funkce rozdílu úhlu a velikosti napětí mezi stanicemi HRA–DAC – viz Obr. 4.7. V případě rozdílu velikosti napětí lze konstatovat, že změřené hodnoty se v průběhu měření pohybovaly v rozmezí 0,1 až 1,36 % U_n , avšak 90 % hodnot nepřekročilo rozdíl 0,77 % U_n . V případě rozdílového úhlu napětí leželo největší množství změřených hodnot (přibližně třetina) v intervalu 8° až 12°, přičemž 93 % hodnot nepřekročilo úhel 16°. Nad touto mezí až do 20° (maximálně však 22,5°) bylo zaznamenáno 7 % vzorků.

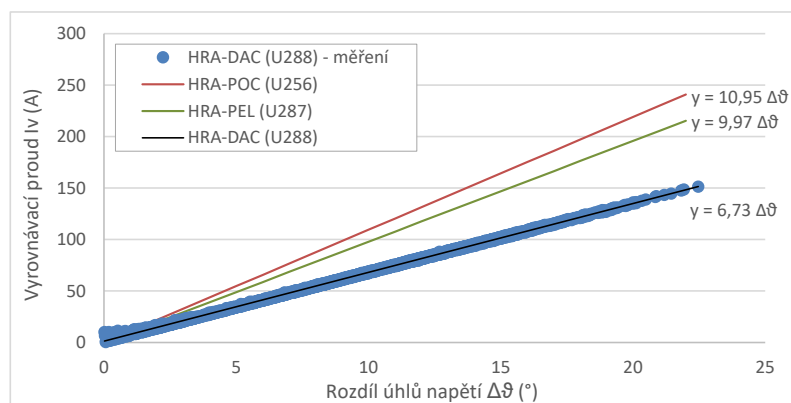


Obr. 4.7: Distribuční funkce rozdílu velikostí a úhlů napětí mezi HRA–DAC

Na základě jednoduché lineární regrese s využitím vztahu (4.2) byla dále získána funkční závislost I_v na $\Delta\vartheta$. Na Obr. 4.8 je znázorněn referenční příklad HRA–DAC a pro porovnání doplněny i výsledné přímky pro úhlové poměry mezi stanicemi HRA–POC a HRA–PEL.

Z obrázku je zřejmé, že proložení přímkou dává poměrně dobré výsledky, přestože pro hodnoty menší než 1° je chyba patrná (díky vlivu rozdílu velikosti napětí). Získané směrnice přímek charakterizují velikost vyrovnávacího proudu na jeden stupeň úhlového rozdílu napětí. Z tohoto pohledu vychází nejpříznivěji referenční případ stanic HRA–DAC – 6,73 A / 1°. Ve zbylých dvou případech je sklon vyšší – 9,97 respektive 10,95 A / 1°.

Díličí výsledky této kapitoly doplňuje a shrnuje Tab. 4.3, kde jsou uvedeny významné hodnoty distribuční funkce i maximální hodnoty. Pro lepší představu bylo doplněno i vyhodnocení měření mezi stanicemi HRA–POC, HRA–PEL a na základě funkční závislosti I_v na $\Delta\vartheta$ (viz Obr. 4.8) dopočítán i očekávaný vyrovnávací proud. Při porovnání vypočítaného I_v mezi jednotlivými stanicemi je zřejmé, že rozdíl fázoru napětí není jediným parametrem, který ovlivňuje jeho velikost. Jak vyplývá i z rovnice (4.2), výrazným způsobem se zde uplatní impedance vývodů, jejíž hodnota byla nejvyšší v případě dlouhých propojovacích vedení vývodů Kunžak (HRA)



Obr. 4.8: I_v funkcí $\Delta\vartheta$

Tab. 4.3: Rozložení veličin během sledovaného období

Stanice	Veličina	Percentil						
		10 %	20 %	50 %	90 %	95 %	99 %	100 %
HRA–DAC (U288)	ΔU (%)	-	-	0,41	0,77	0,86	1,03	1,36
	$\Delta\vartheta$ (°)	2,73	5,36	9,73	15,20	16,56	19,09	22,47
	I_v (A)	18,37	36,07	65,48	102,30	111,45	128,48	151,22
HRA–POC (U256)	ΔU (%)	-	-	0,32	0,68	0,80	0,97	1,11
	$\Delta\vartheta$ (°)	1,92	4,90	9,89	14,29	15,48	17,29	19,56
	I_v (A)	21,02	53,66	108,30	156,48	169,51	189,33	214,18
HRA–PEL (U287)	ΔU (%)	-	-	0,23	0,59	0,70	0,91	1,55
	$\Delta\vartheta$ (°)	6,11	8,09	11,98	16,83	18,03	20,08	22,67
	I_v (A)	60,92	80,66	119,44	167,80	179,76	200,20	226,02

a Slavonice (DAC). Důležitým výstupem je porovnání hodnot I_v v Tab. 4.3 v kontextu vypínacích schopností úsečníků uvedených v Tab. 4.1.

Z měření vyplývá, že při propojování vývodů HRA–DAC by I_v ve 20 % případů nepřekročil 36 A, což je mezní vypínací schopnost různových úsečníků. U zbývajících dvou propojení vývodů je možnost bezpečného spínání tímto druhem úsečníku ještě omezenější. Je třeba poznamenat, že I_v se počítá i s proudem zátěže respektive vnořené výroby a výsledný proud tak může být ještě vyšší, zejména pokud je úsečník umístěn v blízkosti napájecí stanice. V takovém případě za nepříznivých podmínek při velkém zatížení vývodu se může výsledný proud přiblížit hranici 400 A, která je charakteristická pro většinu komorových úsečníků při vypínání uzavřené smyčky. V případě propojení vývodů stanic HRA–PEL by vyrovnávací proud mohl pro největší hodnoty změřených rozdílů úhlů napětí dosáhnout až hodnoty 226 A.

4.3 Vyhodnocení měření vyrovnávacího proudu při spínání vývodů vn

Pro ověření teoretických předpokladů byla dále zpracována a vyhodnocena data provozního měření, které prováděla společnost E.ON. Podrobné výsledky dvou měření a jejich porovnání s výsledky výpočetního modelu byly publikovány ve společném článku [A16] a studii [A22].

Měření probíhala na vývodech 22 kV Kunžak (HRA) a Slavonice (DAC) znázorněných na Obr. 4.4 a podrobněji popsanych v předešlé kapitole 4.2. Základní parametry vývodů shrnuje Tab. 4.4.

Tab. 4.4: Parametry vývodů

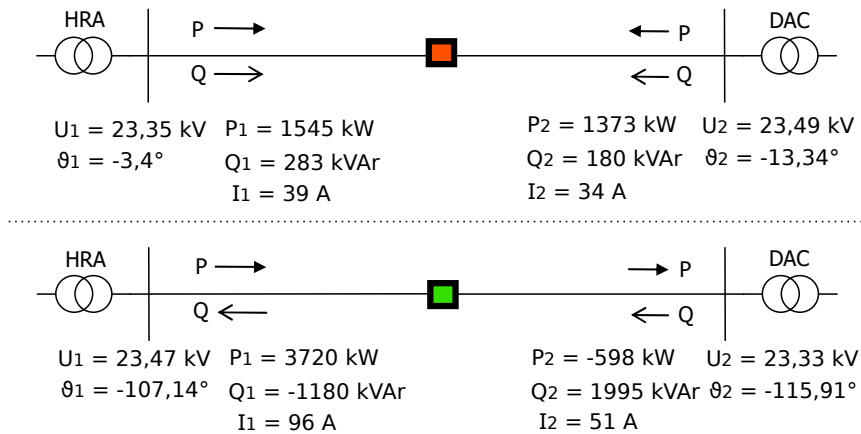
Vývod vn	Kunžak	Slavonice
Délka (km)	42	19,5
Napájecí transformátor (MVA)	40	25
Impedance vývodu k úsečníku 288 (Ω)	13,696 + j15,79	5,938 + j7,32
Zkrat. impedance u úsečníku 288 (Ω)	13,796 + j17,625	6,117 + j10,444
Inst. výkon vnořené výroby (kW)	4200	1600

Pro účely této práce bylo vybráno druhé měření, které probíhalo v nočních hodinách dne 23. 9. 2014 v čase 20:45–20:55, tj. v době nízkého zatížení, aby byly eliminovány případné negativní dopady na odběratele, např. změna napětí v důsledku úbytků napětí způsobených průchodem vyrovnávacího proudu. Vzhledem k době měření byla produkce FVE zdrojů na vývodu Kunžak blízka nule. Výkon vnořené výroby na vývodu Slavonice byl v době měření 620 kW (BPS) a 35 kW (MVE) při účinníku blízkeému jedné. Na základě charakteristiky (viz Obr. 4.8 a Tab. 4.3) byla odhadnuta velikost vyrovnávacího proudu na hodnotu 67 A. Změnou odboček napájecích transformátorů byl rozdíl velikostí napětí mezi stanicemi HRA–DAC snížen na méně než 1 %.

Vývody byly propojeny úsečníkem 288 po dobu pěti minut a poté znovu rozpojeny. Pro měření byly v každé stanici instalovány, z důvodu eliminace chyb, dvě sady měřicích přístrojů. V obou stanicích byly zaznamenávány fázory napětí a třicetivteřinové průměrné hodnoty proudu, respektive činného a jalového výkonu.

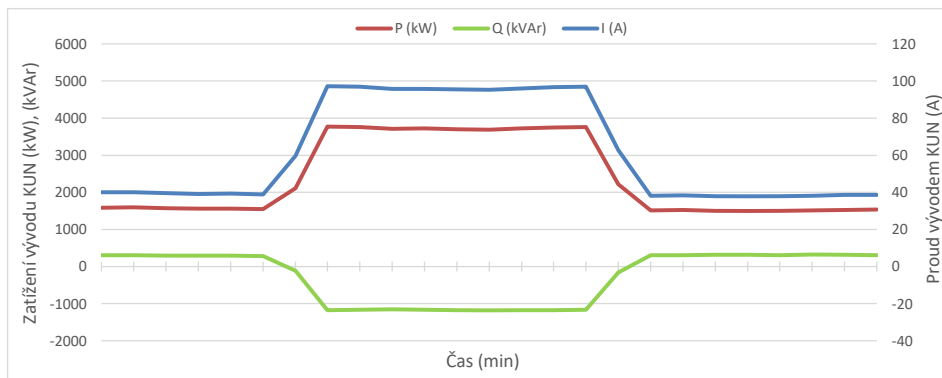
Výkonové, proudové a napěťové poměry před zkouškou a během ní jsou znázorněny na Obr. 4.9. Z hodnot proudů vyplývá, že zatížení obou vývodů se razantně zvýšilo a změnil se i směr výkonových toků. Zatímco před propojením tekly výkony směrem do vývodů, po jejich propojení tekly činný výkon ze stanice HRA do DAC a jalový výkon směrem opačným. Směr toku činného výkonu je ovlivněn úhlovými

poměry, kdy se úhel napětí v DAC zpožďuje za HRA. U směru toku jalového výkonu hrálo roli vyšší napětí v uzlu DAC před propojením.



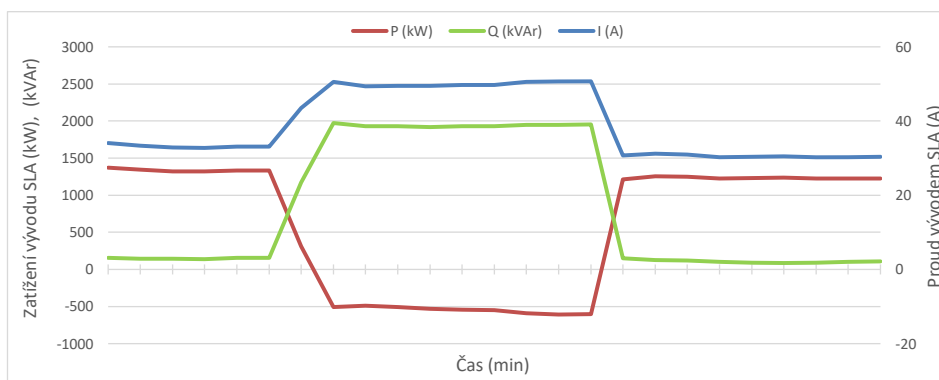
Obr. 4.9: Měření během propojování vývodů

Na Obr. 4.10 a Obr. 4.11 jsou vyneseny průběhy měřených veličin v průběhu celé zkoušky pro oba vývody. I zde jsou velmi dobře vidět změny ve velikosti a někde i směru toku P a Q. Vzhledem k poměrně krátkému času, kdy měření probíhalo, nebylo zaznamenáno větší kolísání odběru. Po rozpojení došlo u obou vývodů k ustálení všech měřených hodnot velmi blízko původní hodnotě. V různých fázích zkoušky,



Obr. 4.10: Tok výkonu a proudu vývodem Kunžak během zkoušky

lze pozorovat změnu hodnoty rozdílového úhlu napětí mezi napájecími uzly vn. Před propojením byl $\Delta\vartheta = 9,94^\circ$, po propojení $8,77^\circ$ a po rozpojení $10,21^\circ$. Tyto rozdíly lze vysvětlit celkovým přerozdělením toků ve stanici na přípojnicích vn.

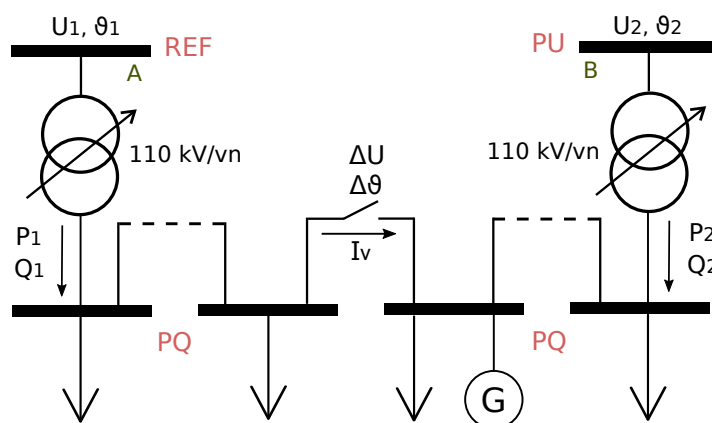


Obr. 4.11: Tok výkonu a proudu vývodem Slavonice během zkoušky

4.4 Návrh metodiky výpočtu vyrovnávacího proudu simulací chodu soustavy

Problematické řešení chodu soustavy je v rámci této práce věnována kapitola 3.3. V této kapitole je představena aplikace výpočtu chodu soustavy, kterou autor implementoval pro účely výpočtu výkonů, napěťového profilu a vyrovnávacího proudu podél propojených vývodů vn.

Prvotní odhad velikosti I_v je možné provést pomocí vztahů uvedených v kapitole 4.1, které však počítají s určitými zjednodušeními. Důvodem pro použití výpočtu chodu soustavy je univerzálnost, přesnost a rychlost výpočtu. V případě sítí vn lze díky řešení chodu pomocí numerických metod snadno simulovat i nerovnoměrně zatížené vývody, ve kterých jsou instalovány lokální zdroje. Další výhodou je možnost



Obr. 4.12: Zjednodušené schéma řešené sítě

simulovat i stavy sítě, pro které nejsou k dispozici například výsledky měření WAMS, případně jsou k dispozici pro jiné období (zimní vs. letní měření), ve kterém se liší

konfigurace sítě z důvodu provádění plánovaných prací, oprav, revizí apod.

Zjednodušené schéma řešené části distribuční sítě je znázorněno na Obr. 4.12. Jedná se o dva vývody 22 kV napájené ze dvou různých stanic přes transformátory 110/22 kV. V napájecích stanicích je instalováno měření synchronních fázorů napětí, které dává informaci jak o velikosti, tak úhlu napětí.

Cílem simulace je vyčíslit fázory uzlových napětí ve všech uzlech soustavy a dále dopočítat větvové toky – fázor proudu, činný a jalový výkon. Ve výpočtu figurují jako známé veličiny:

- velikosti fázorů napětí v obou uzlech 110 kV před transformátory,
- požadovaný rozdíl úhlů napětí mezi uzly vn za transformátory,
- zatížení vývodů (činný a jalový výkon zátěže) – rovnoměrně rozložené,
- pasivní parametry sítě (impedance transformátorů a vývodů).

Jeden z uzlů 110 kV musí být nastaven jako referenční, druhý jako PU uzel a ostatní uzly na 22 kV jako odběrové PQ.

Hlavním požadavkem na výpočtové simulace byla možnost definovat konstantní rozdíl fázorů napětí v napájecích uzlech. Tato vlastnost je klíčová pro vyšetření vlivu rozdílných napěťových podmínek (zejména úhlu napětí) v propojovaných stanicích na velikost vyrovnávacího proudu a na celkový proudový, výkonový a napěťový profil podél propojovaných vývodů. Dalším požadavkem byla možnost automatizované změny vybraných parametrů obvodu tak, aby bylo možné dávkově spouštět simulace pro různé varianty zadání a výsledky simulačních výpočtů ukládat do databáze pro následné hromadné vyhodnocení například z hlediska porušení limitních parametrů ve větvích a uzlech.

S ohledem na zmíněné požadavky byla provedena analýza softwaru dostupného jak pod veřejnými, tak komerčními licencemi. Při porovnání deseti různých programů primárně určených pro výpočet chodu soustavy (Load Flow analýzy) ¹ bylo zjištěno, že požadavek na modelování konstantního rozdílu úhlu napětí mezi vybranými uzly nabízí pouze software PSAT. Bohužel ani v případě tohoto jediného SW se nepodařilo danou funkcionalitu zprovoznit pro účely výše zmíněných simulací. Principiální problém mnoha softwarů tkví v nemožnosti parametrizovat úlohu tak, aby se uzel, který moderuje rozdíl úhlů napětí, choval jako PU uzel i v případě odběru (záporné dodávky) činného výkonu, což je však pro tento typ simulací klíčovou vlastností.

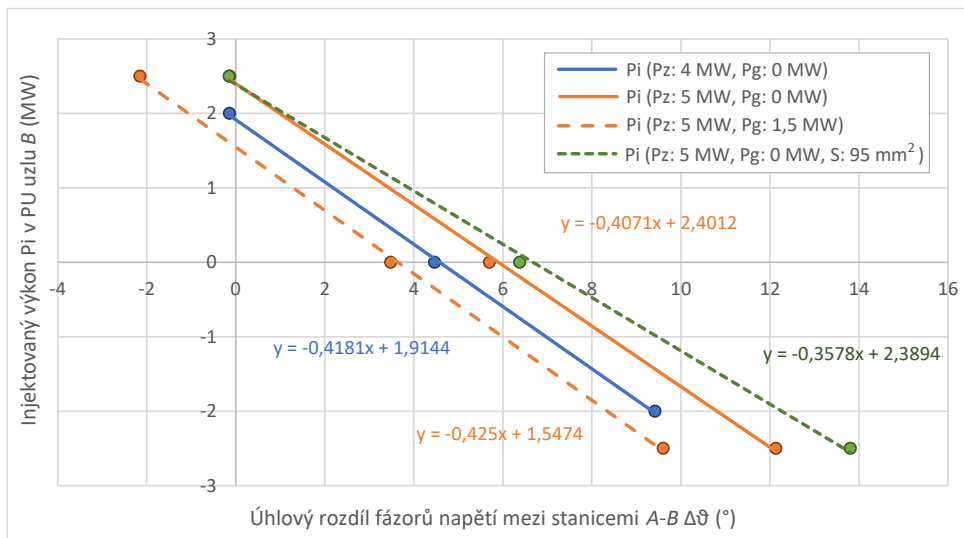
¹Porovnávané SW: MATPOWER, PYPOWER, PSAT, EasyPower, PowerWorld, EVlivity, DN-
Calc, PyPSA, ETAP, PowerFactory

4.4.1 Návrh výpočetního algoritmu

Ze zmíněného důvodu byl pro účely této práce autorem navržen a implementován vlastní algoritmus založený na modifikaci Newton–Raphson numerické metody. Daná modifikace je založena na schopnosti algoritmu moderovat požadovaný rozdíl úhlů napětí injekcí činného výkonu ve druhém napájecím uzlu. Samotné implementaci daného řešení však předcházela rozbor chování propojených vývodů pomocí simulačních výpočtů chodu soustavy pro různé zatížení obvodu a výkon lokální výroby.

Při klasickém výpočtu chodu soustavy v obvodu tvořeného propojenými vývody vn (viz schéma Obr. 4.12) lze pozorovat očekávanou závislost mezi injektovaným činným výkonem P_i v uzlu B a rozdílovým úhlem napětí mezi uzly na vn straně transformátorů. Výsledky dílčích simulací jsou znázorněny na Obr. 4.13, kde každá přímka, proložená třemi body, udává funkční závislost injektovaného činného výkonu P_i na rozdílovém úhlu napětí $\Delta\vartheta$. Každý z trojice bodů byl získán samostatným výpočtem chodu soustavy rovnoměrně zatíženého obvodu P_z pro tři varianty injektovaného výkonu $P_i = \pm 0,5P_z$ a $P_i = 0$. Jakým způsobem se projeví v případě dvou vývodů o délce 20 km změna průřezu vodičů ze 110 na 95 mm², charakterizuje zelená přímka.

Výsledné charakteristiky na Obr. 4.13 jsou samozřejmě vzhledem k linearizaci pouze orientační, nicméně dávají dobrou představu pro porovnání obvodu v různém pracovním bodě, který je primárně určen celkovým zatížením (modrá vs. oranžová přímka), jehož velikost snižuje lokální výroba (oranžová přerušovaná přímka).

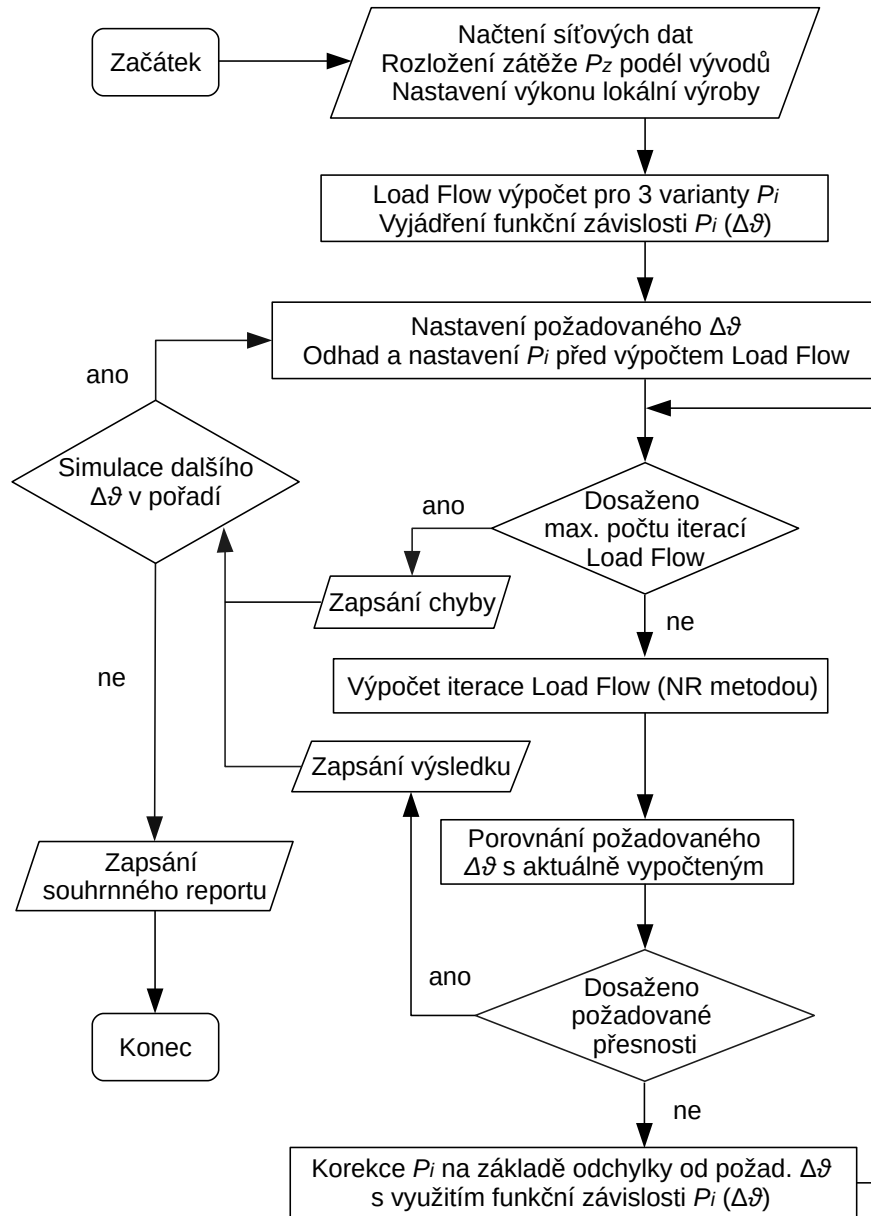


Obr. 4.13: Závislost rozdílového úhlu $\Delta\vartheta$ na injektovaném výkonu P_i

Z Obr. 4.13 vyplývá, že se změnou zatížení obvodu dochází k posunu charakte-

ristik a zároveň se v menší míře mění i směrnice přímek, neboť vyšší zatížení vyvolá vyšší ztráty, které rostou nelineárně s kvadrátem proudu. Porovnání oranžové a zelené přímky také ukazuje, že mnohem větší vliv na směrnici a tedy sklon přímky má celková impedance obvodu (mění se s průřezem vodiče).

Vzhledem k vlivu nelinearit je výhodné podobnou charakteristiku sestavit vždy pro danou variantu konfigurace a zatížení obvodu. Nalezení tří bodů pro různé hodnoty injektovaného výkonu v uzlu B v praxi znamená provedení přibližně dvanácti iterací NR metody, což není výpočetně nikterak náročné. Následnou interpolací (po-



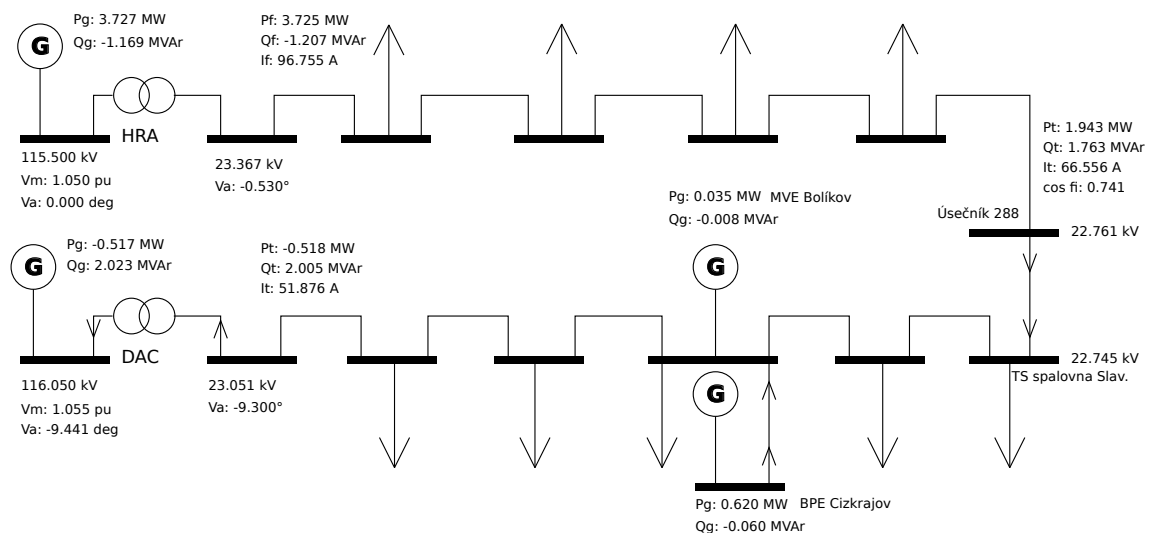
Obr. 4.14: Vývojový diagram modifikovaného výpočtu Load Flow – pro dané P_z a P_g vypočte požadované varianty $\Delta\vartheta$ (zpravidla od 0° do 8°)

stačuje lineární) je získána funkční závislost injektovaného výkonu P_i na rozdílovém úhlu $\Delta\vartheta$. Tu lze dále použít jak pro počáteční odhad P_i pro zadaný úhel, tak následnou korekci P_i v každé iteraci na základě rozdílu zadaného a aktuálního $\Delta\vartheta$. Pomocí takto modifikovaného výpočtu chodu soustavy je pro každou variantu, která je tvořena kombinací zatížení, úhlu a lokální výroby nalezen výsledek zpravidla do šesti iterací NR metody ².

4.4.2 Verifikace výpočetního algoritmu

Výpočetní algoritmus byl verifikován na základě porovnání s výsledky měření uvedenými v kapitole 4.3. Díky datům poskytnutým provozovatelem DS bylo možné sestavit model části řešené sítě a provést simulaci stavu, který se velmi blížil podmínkám při měření.

Schéma modelovaného obvodu je znázorněno na Obr. 4.15. Jedná se o export z programu MVA Schematic, který byl vyvinut v rámci řešení této disertační práce pro účely sestavení a vizualizace obvodových schémat [A24]. Jedná se grafickou nad-



Obr. 4.15: Schéma obvodu v programu MVA Schematic

stavbu nad výpočetním jádrem popsáním v kapitole 3.3. Jak je vidět ve schématu, požadované zatížení bylo rozloženo podél vývodů do čtyř respektive pěti uzlů s respektováním reálné délky vývodů a vzdáleností mezi hlavními body. Do modelu propojených vývodů byly začleněny i transformátory 110/22 kV a také dva malé lokální zdroje s nenulovou produkcí připojené do uzlu 22 kV. Vzhledem k tomu, že pro eliminaci vlivu lokálních zdrojů probíhalo referenční měření ve večerních hodinách,

²Testy byly provedeny nejprve nad 43uzlovou rovnoměrně zatíženou sítí (Kap. 5) a poté i modelem propojení reálných vývodů 120uzlové sítě (Kap. 6.2).

nebyla velká FVE z důvodu nulové produkce do simulace zahrnuta. Simulace byla provedena s ohledem na zachování stejného rozdílu úhlů napětí, který byl zjištěn měřením synchronních fázorů. Byla dopočítána uzlová napětí a větvové toky.

Tab. 4.5: Porovnání simulace a měření

Místo	Metoda	U (kV)	P (kW)	Q (kVAr)	I (A)	$\cos\varphi$
Vývod Kunžak	simulace	23,37	3725	-1207	96,76	0,95 kap.
	měření	23,47	3720	-1180	96	0,95 kap.
Vývod Slavonice	simulace	23,05	-518	2005	51,88	0,25
	měření	23,33	-545	1930	49,5	0,27
Úsečník 288	simulace	-	-	-	66,56	0,75
	měření	-	-	-	65,5	0,72/0,83
TS spalovna Slav.	simulace	22,75	-	-	-	-
	měření	22,9	-	-	-	-

Tab. 4.5 uvádí porovnání simulovaných a změřených hodnot pro rozdíl úhlů napětí $8,77^\circ$. Porovnání změřených hodnot s výsledky simulace ukazuje, že výsledky získané modifikovaným výpočtem chodu soustavy se příliš neliší od změřených hodnot a to zejména pokud budeme jako hlavní výsledek simulace uvažovat velikost a účinník vyrovnávacího proudu. Výpočetní algoritmus byl tedy úspěšně verifikován a bude použit pro detailní analýzy poměrů pro bezpečné spínání propojených vývodů a souvisejících úloh.

4.5 Návrh metodiky rozvoje zkruhované sítě

Větve vývodů sítě vn lze rozdělit do dvou hlavních kategorií - kmenové linky a odbočky. Kmenové linky tvoří páteř sítě vn a napájí jednotlivé odbočky a DTS v nich umístěné. Kmenové linky obvykle začínají na vývodu z transformovny 110 kV/vn a končí na rozhraní se sousedním vývodem, ve spínací stanici nebo rovněž v transformovně. Samostatnou kapitolou jsou linky, které tvoří tzv. příčky a propojují různé kmenové linky hluboko v poli sítě. Často se původně jednalo o odbočky od kmenů, jejichž propojením v průběhu rozvoje sítě vznikla uzavřená smyčka, která je provozována jako rozpojená s možností sepnutí a vytvoření alternativní provozní konfigurace, což vede ke zvyšování spolehlivosti sítě. Při pohledu na topologii rozsáhlých venkovních sítí vn je často obtížné identifikovat, která linka je z hlediska původní koncepce kmenová a která propojovací příčkou.

V rámci koncepce moderních chytrých sítí se rozdílily v nárocích na kmenové linky a propojovací vedení téměř stírají. Oba typy linek by totiž měly být schopny přenést požadovanou velikost výkonu při náhradním napájení, nebo provozu zkruhované sítě.

Dalším hlediskem, které je potřeba vzít v úvahu, jsou požadavky na další rozvoj a zahušťování sítě vn pro účely zvyšování připojitelného výkonu zdrojů i spotřeby bez negativního dopadu na spolehlivost.

Z uvedených důvodů byla v rámci této disertační práce vytvořena metodika vyhledávání kmenů a klasifikace odboček z hlediska jejich potenciálu k zakruhování s protější odbočkou (vytvořením propojky kmenů). Dále byly vytvořeny skripty v prostředí jazyka Python, které zmíněnou logiku implementují při zpracování síťových dat reálné části DS.

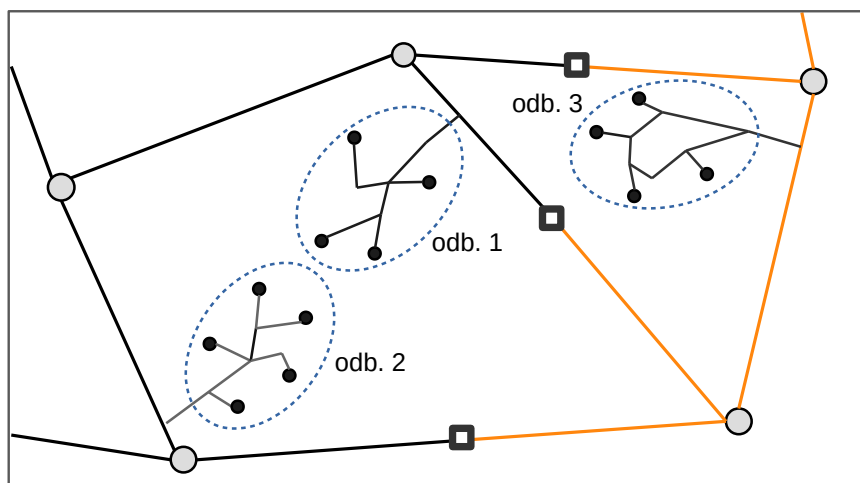
4.5.1 Trasování kmenů a odboček vn

Při klasifikaci jednotlivých linek sítě vn z hlediska typu je důležité nejprve ukotvit definici toho, které linky a jejich úseky má algoritmus považovat za kmenové a které za odbočky. Při pohledu do mapových podkladů to lze poměrně dobře odhadnout, ale při automatizovaném zpracování desítek tisíc uzlů a hran je potřeba přesná definice. Za kmenové jsou tedy považovány všechny zakruhované linky, které tvoří paralelní propojení mezi dvěma uzly. Jako odbočky, jsou klasifikovány linky, které se od kmene větví směrem do uzlu, který v kmenu neleží.

Pro automatizované zpracování síťových dat za účelem identifikace kmenů a odboček sítě vn byly použity trasovací úlohy popsané v kapitole 3.2. Kmenové linky tvoří zkruhovanou topologii díky vzájemnému propojení a nikoliv sami o sobě. Z tohoto důvodu je při trasování topologický model vytvořen nad sítí, ve které jsou všechny spínací prvky sepnuty. Po nalezení kmenů sítě jsou vyhledány úseky vedení, které nebyly označeny jako součást kmenové linky, ale vychází z uzlu, který v kmenech leží. Takto je vždy identifikován první úsek v odbočce. Zbytek úseků směrem ke koncovým DTS je dohledán opět na základě trasovací funkce. Všechny úseky tvořící odbočku jsou agregovány do jedné entity, které jsou přiřazeny informace relevantní pro posouzení jejího technického stavu.

Výsledek trasování kmenů a odboček je znázorněn na Obr. 4.16. Tučnou čarou jsou znázorněny kmenové linky a tenkou čarou odbočky s DTS (černé body). Za pozornost stojí odbočka 3, ve které se vyskytuje uzavřená smyčka, ale linky, které ji tvoří, nejsou označeny jako kmenové. Tyto malé kruhy napájené paprskem z kmenové linky tvoří výjimku z pravidla pro identifikaci kmenů a jsou považovány na odbočky.

Po identifikaci kmenů jsou v modelu sítě nastaveny stavy spínacích prvků dle vstupních dat charakterizujících daný stav sítě a následně provedeno trasování napájecích stromů dle vývodu (černé vs. oranžové části kmenů).



Obr. 4.16: Identifikace kmenů a odboček

4.5.2 Klasifikace odboček

Jak je na Obr. 4.16 vidět, odbočky 1 a 2 jsou si geograficky blízké, což je jeden z argumentů pro jejich zakruhování. Parametrů, ke kterým musí být přihlédnuto je však mnohem více. Nejdůležitějším hlediskem je počet DTS a odběrných míst, které odbočka napájí a kondice technického stavu vedení, která zahrnuje i frekvenci poruch. Cílem je totiž maximalizovat efekt provedeného technického opatření z hlediska zlepšení spolehlivosti dodávek, které se odráží do parametrů SAIDI a SAIFI.

Každá odbočka se skládá z úseků, které mohou mít různý průřez, stáří apod. V rámci procesu hodnocení kondice aktiv přepočítávají provozovatelé distribučních soustav (zpravidla jednou ročně) u každého úseku index HTS (hodnocení tech. stavu). Společnost ČEZ Distribuce například používá hodnocení od 0 do 100, kdy větší hodnota odpovídá horšímu stavu. Index přesahující číslo 75 označuje kritický stav [36].

Parametry vstupující do hodnocení kondice úseku vedení jsou uvedeny v Tab. 4.6. Jelikož se odbočka skládá z více úseků v různé kondici, je pro její klasifikaci z hlediska indexu HTS vhodné spočítat průměrnou hodnotu. Pro zachování vypovídající hodnoty agregovaného indexu HTS byl použit výpočet váženého průměru, kde parametr váhy odpovídá délce úseku.

$$HTS_{odb} = \frac{HTS_1 l_1 + HTS_2 l_2 + \dots + HTS_n l_n}{l_1 + l_2 + \dots + l_n} \quad (4.4)$$

Stejným způsobem je vypočítána i hodnota průměrného průřezu a dále identifikován maximální a minimální průřez úseku vedení v odbočce.

Vyhledání dvou blízkých konců odboček k zakruhování lze realizovat pomocí databáze, která umí pracovat s geoprostorovými daty. Pro účely této disertační práce byla testována databáze PostgreSQL s rozšířením PostGIS [37]. U každé odbočky

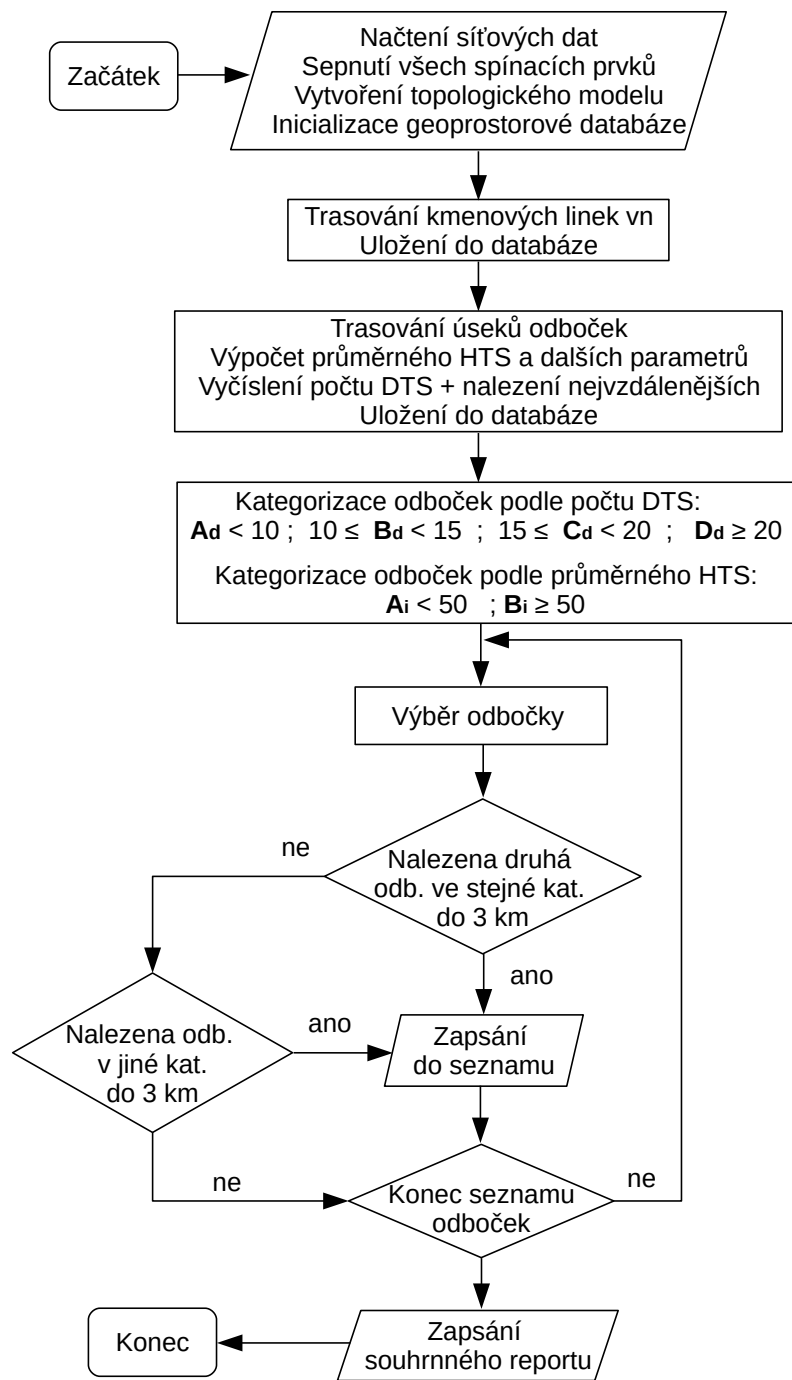
Tab. 4.6: Základní parametry pro hodnocení tech. stavu úseku vedení

Základní parametry pro hodnocení tech. stavu úseku vedení	
Rok výstavby	Důležitost
Náklady na poruchy	Zatížení
Náklady na provedené opravy	Plánované náklady na odstranění závad
Počet poruch bez přerušení	Počet poruch s přerušením
Počet provedených oprav	Počet otevřených závad
Zůstatková hodnota	Existence náhr. napájení
Hodnocení poslední diagnostiky	Rizikové typy (u kabelů)

byly identifikovány dvě nejvzdálenější DTS směrem od kmene (kvůli větvení odbočky). Na základě uspořádání venkovní sítě vn a délky vedení od kmene k nejvzdálenějším DTS v odbočce (nejčastěji 6 až 10 km) byla stanovena vzdálenost pro vyhledávání sousedních vrcholů odboček 3 km. Tento automatizovaný způsob vyhledávání funguje poměrně spolehlivě pro identifikaci odboček, které se nacházejí ve stejné úzké kategorii z hlediska počtu DTS a parametru HTS.

Dobře tedy funguje vyhledání zkruhovatelných odboček, které jsou od sebe vzdáleny do 3 km, napájí 10 a více DTS a průměrný parametr HTS je větší než 50. Takto lze vyhledat odbočky s vysokým potenciálem k zakruhování. Pakliže pro odbočky zmíněných parametrů není nalezen protějšek, lze dále vyhledávat např. mezi odbočkami, které napájí méně DTS, mají nižší hodnotu indexu HTS apod. Počet nalezených variant pak ale narůstá.

Návrh metodiky rozvoje zkruhované sítě je shrnut na Obr. 4.17. V praxi je důležitá především zmíněná základní klasifikace (na základě počtu DTS a HTS), která slouží pro prioritizaci projektů. Podrobné posouzení vhodnosti zakruhování z hlediska proveditelnosti a nákladů stále vyžaduje lidskou práci, protože do celého procesu vstupují například jiné projekty, majetkoprávní uspořádání v lokalitě, kde by nové vedení vzniklo, problematický terén nové trasy apod. Nicméně stanovená metodika s vazbou na agregované výstupy zpracování velkého objemu dat může v praxi poskytnout velmi důležitou podporou v rámci procesu rozvoje distribuční infrastruktury. Aplikace uvedených postupů nad modelem reálné sítě vn je uvedena v kapitole 6.6.



Obr. 4.17: Vývojový diagram procesu klasifikace odboček

5 Simulační výpočty propojených vývodů vn

Cílem této kapitoly je na jednoduchém modelovém případu demonstrovat, jak a v jaké míře jsou proudové a výkonové poměry na propojených vývodech ovlivněny rozdílovým úhlem napětí mezi transformovny, zatížením vývodů a produkcí připojených decentrálních zdrojů. Na základě znalosti spínacích schopností úsekových odpínačů a proudových poměrů podél propojených vývodů jsou stanovena pásma bezpečného a rizikového spínání v závislosti na úhlu napětí, lokaci vypínacího prvku a také pozici výroby a jejím výkonu. Výsledky vybraných variant simulačních výpočtů jsou vzájemně porovnány pro účely stanovení obecnějších zákonitostí chování obvodu v závislosti na vstupních parametrech. Analýza a simulační výpočty nad reálnou sítí vn jsou provedeny v kapitole 6.

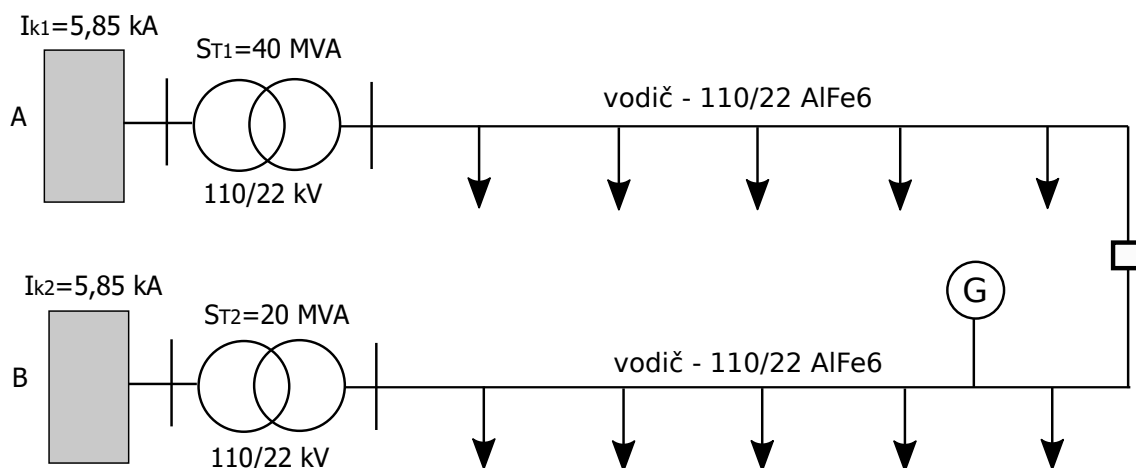
5.1 Popis modelované sítě

Obvod pro simulační výpočty byl navržen tak, aby respektoval poměry na reálných vývodech, viz kapitolu 4. Jedná se o dva totožné vývody délky 20 km, provedené venkovním vedením 110/22 AlFe6. Obě stanice 110 kV mají totožný zkratový proud 5,85 kA, ale liší se osazeným transformátorem 40 MVA respektive 25 MVA. Napětí ve stanici *A* předbíhá napětí ve stanici *B*, rozdíl úhlů napětí bude ve studii uvažován pro hodnoty 0, 2, 4, 6, 8 stupňů.

Při simulacích bylo uvažováno stejné zatížení obou vývodů (1 MW, 1,5 MW, 2 MW, 2,5 MW, 3 MW) při rovnoměrném rozložení podél jejich délky. Ve variantách simulací zahrnujících zdroj připojený do vývodu *B* byly uvažovány dodávané výkony (0 MW, 0,5 MW, 1 MW, 1,5 MW, 2 MW). Pro základní variantu byl zdroj připojen ve vzdálenosti 16 km od napájecí stanice, tj. 4 km od místa sepnutí vývodů, nicméně pro porovnání byly doplněny dvě další varianty s odlišným umístěním zdroje. Dále byl pro vybrané varianty zatížení a rozdílového úhlu vyšetřen vliv provozního režimu lokální výroby ($\cos \varphi = konst.$, $U = konst.$) a různé velikosti napětí sítí 110 kV.

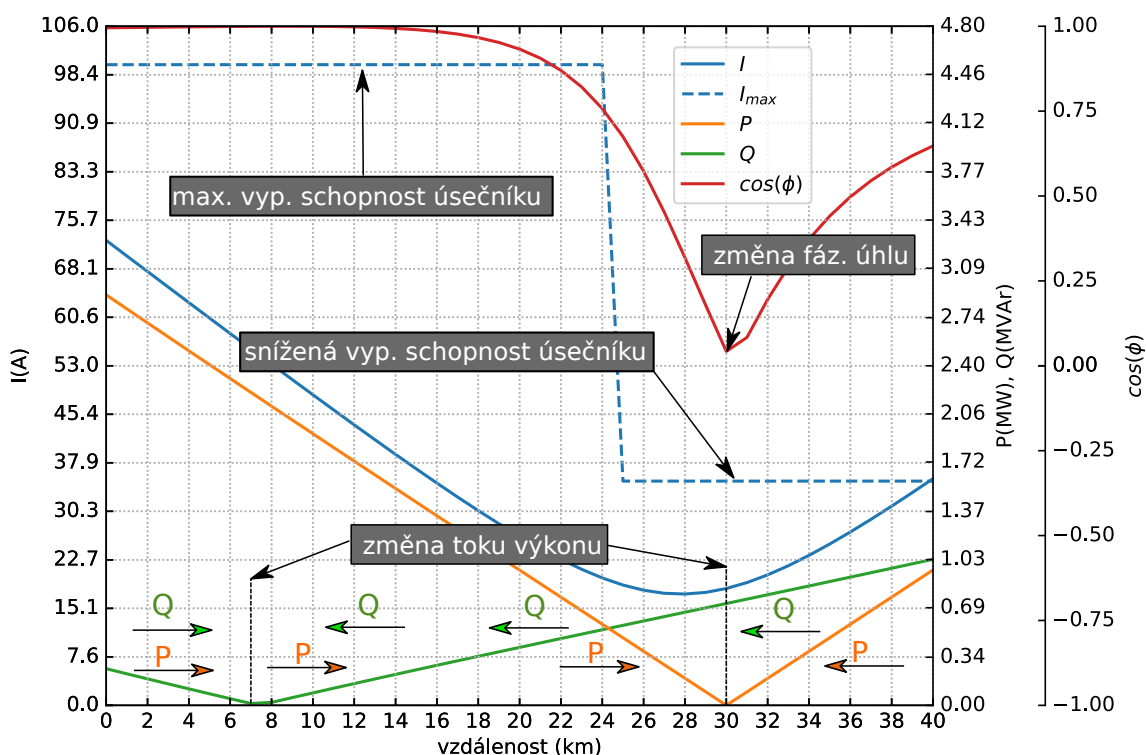
5.2 Interpretace výsledků simulací

Pro základní varianty (5 variant zatížení vývodu, výroby i rozdílového úhlu napětí) bylo provedeno celkem 125 simulačních výpočtů, plus dalších 25 variant doplňujících simulací, tj. celkem 150 výpočtů. Vzhledem k náročnosti zpracování značného objemu dat, který výstupy představují, byl v prostředí jazyka Python vytvořen automatizační skript pro generování tabulkových a grafických výstupů výpočtu.



Obr. 5.1: Schéma obvodu pro simulační výpočty

Výsledkem jsou průběhy rozložení toku P , Q , I a $\cos \varphi$ podél propojených vývodů pro jednotlivá zatížení a hodnoty rozdílových úhlů napětí v transformovnách. Dalším výstupem jsou souhrnné grafy rozložení proudu podél vývodů a to pro každou variantu zatížení, rozdílového úhlu napětí a různé hodnoty výkonu distribuovaného zdroje, včetně zobrazení limitní vypínací schopnosti úsekových odpínačů.



Obr. 5.2: Interpretace výstupů simulace

Na Obr. 5.2 je znázorněna grafická interpretace výsledků simulace. Jedná se

o variantu, kdy jsou oba vývody zatíženy 2 MW, zdroj připojený ve druhém vývodu nedodává žádný výkon a úhel mezi fázory napětí v propojených rozvodnách je 2° . V grafu jsou vyznačeny úseky se shodným a opačným směrem toku P a Q ind. charakteru. Změnu polaritu toku P a Q je možné vysledovat i v bodě, kde účinník mění svůj charakter.

Dále je z grafu čitelná hranice maximálního proudu I_{max} , který ještě umožňuje bezpečnou manipulaci s bezkomorovými úsečníky. Na základě předpokladů uvedených v úvodu kapitoly 4 byly zvoleny následující meze (vypínací schopnost):

$$I_{max} = \begin{cases} 100 \text{ A} & \text{pokud } \cos \varphi \geq 0,7 \\ 35 \text{ A} & \text{pokud } \cos \varphi < 0,7 \end{cases} \quad (5.1)$$

V případě, že je modrá křivka velikosti průchozího proudu I pod mezí vypnutí (modrou přerušovanou čarou), je možné úsečníkem obvod bezpečně rozepnout. Pro variantu na Obr. 5.2 je vidět, že úsečníky podél obou vývodů mají dostatečnou vypínací schopnost, pouze na začátku vývodu vpravo dochází k nepatrnému překročení meze snížené vlivem nízkého účinníku.

5.3 Výkonové a proudové poměry na vývodech bez vnořené výroby

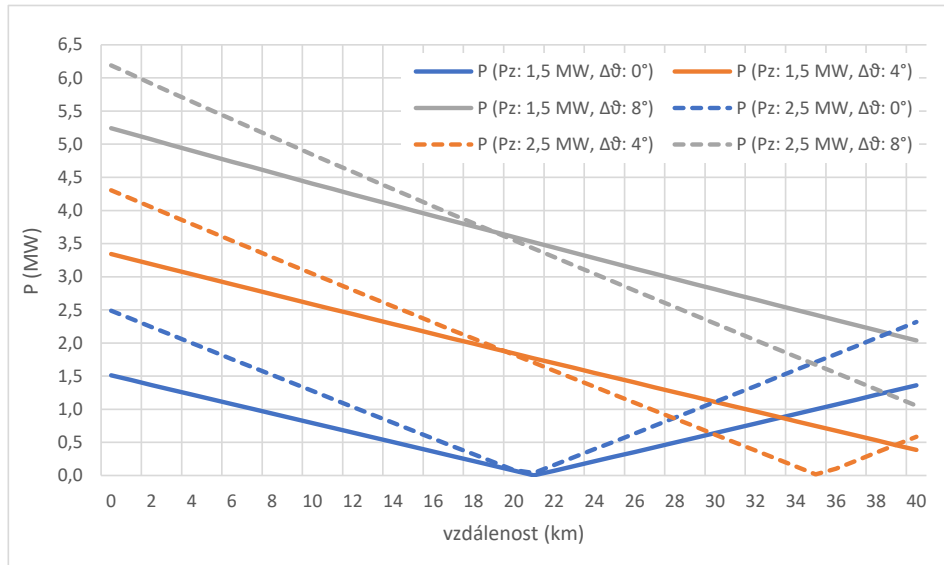
V této kapitole jsou uvedeny vybrané výsledky simulačních výpočtů s ohledem na různé varianty zatížení vývodů a rozdílového úhlu napětí. Následujících pět obrázků představuje rozložení P, Q, I podél propojených vývodů vn pro dvě reprezentativní varianty zatížení vývodů – $2 \times 1,5 \text{ MW}$ a $2 \times 2,5 \text{ MW}$.

V případě rozdílového úhlu napětí propojených stanic $\Delta\vartheta = 0$ je odběr podél propojených vývodů přerozdělen mezi oba vývody stejným dílem. Modré průběhy P, Q, I potom připomínají písmeno „V“, které se láme blízko propojení vývodů na 20. km (Obr. 5.3). Malé posunutí je v důsledku různé zkratové impedance vývodů (rozdílné výkony transformátorů 40 MVA versus 25 MVA) a rovněž rozdílných napětí před transformátory (115,5 kV versus 116 kV).

5.3.1 Vyhodnocení výkonových poměrů

Při simulacích rozdílného úhlu fázorů napětí ve stanicích A a B je vždy uvažováno, že fázor napětí rozvodny A je v předstihu před fázorem rozvodny B . S rostoucím rozdílovým úhlem $\Delta\vartheta$ narůstá činná složka vyrovnávacího proudu a tedy i tok činného výkonu podél vývodů, viz Obr. 5.3. Křivka připomínající písmeno „V“ se poté posunuje stále více doprava, až nakonec vznikne přímka se sklonem od stanice A

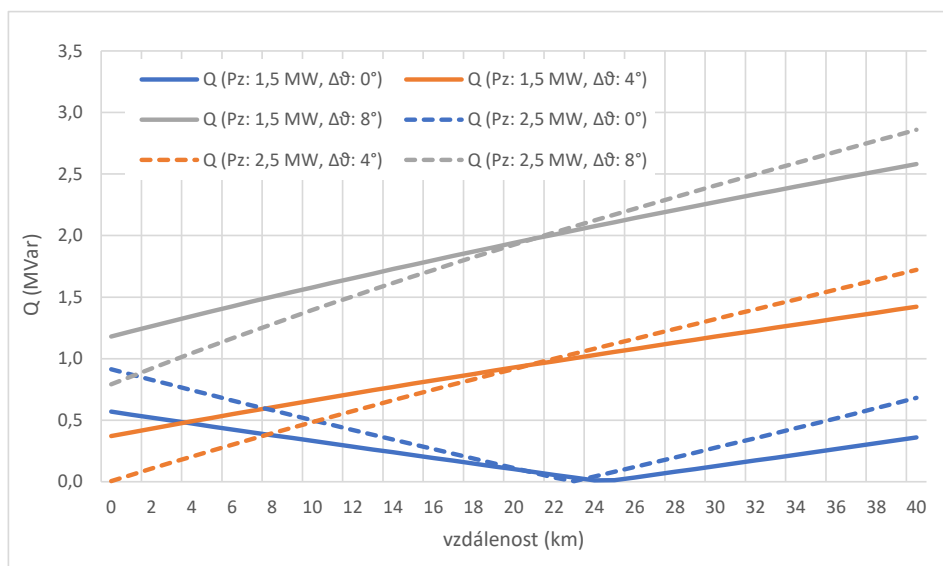
do B . Dochází pak k přetoku činného výkonu mezi těmito stanicemi ve směru klesání přímky. Jak je vidět na Obr. 5.3, mezní úhel $\Delta\vartheta$, při kterém začne docházet k přetoku mezi stanicemi, velmi závisí na zatížení vývodů – v případě vyšší zátěže je mezní úhel větší (porovnejte oranžovou a šedou křivku).



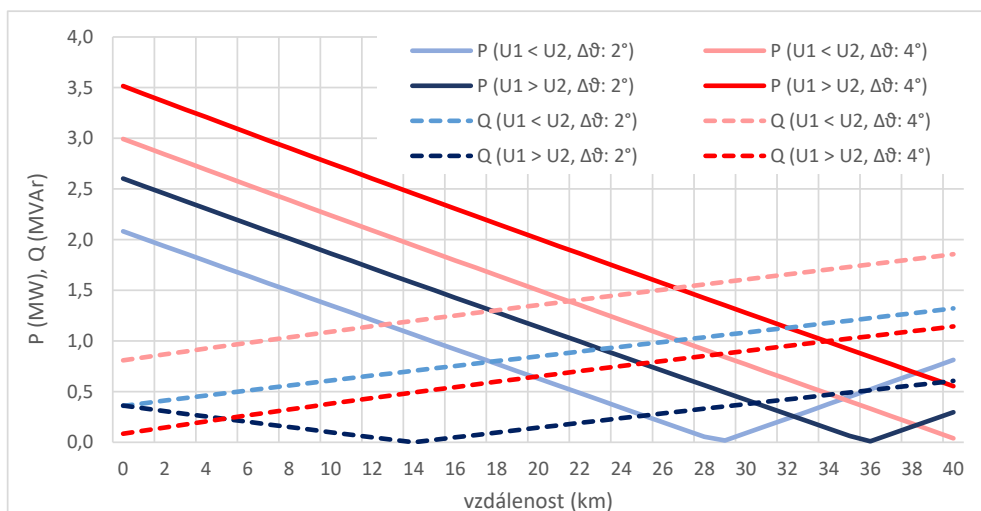
Obr. 5.3: Profil P podél propoj. vývodů – $P_z = 2 \times 1,5 \text{ MW}$, $2,5 \text{ MW}$

Z Obr. 5.4 vyplývá, že při velkých rozdílových úhlech $\Delta\vartheta$ dochází k přetoku jalového výkonu z rozvodny B do rozvodny A , neboť vlivem většího rozdílového úhlu dochází také k většímu rozdílu napětí propojených stanic. Větší rozdíl úhlů znamená větší zatížení vývodu B jalovým tokem (oranžová a šedá křivka). Při menších rozdílech úhlu $\Delta\vartheta$ a větším zatížení vývodů nemusí tok Q přesáhnout jalové zatížení vývodu B , což se projeví tím, že Q na A i B teče směrem do vývodů (modrá křivka). Jednoduše řečeno tok jalového výkonu se v daném případě chová opačně k toku činného výkonu.

Jakým způsobem se projeví rozdílná velikost napětí mezi napájecími stanicemi znázorňuje Obr. 5.5. Jedná se o variantu zatížení vývodů $P_z = 2 \times 1,5 \text{ MW}$ při simulovaném úhlu napětí mezi stanicemi $\Delta\vartheta = 2^\circ$ a 4° . V obvodu se samozřejmě projeví i rozdílná impedance napájecích transformátorů, nicméně i tak je efekt změny napětí patrný. Rozdíl napětí $\pm 2 \text{ kV}$ na primární straně napájecích transformátorů se projeví posunem bodu, ve kterém se lámou křivky P . V případě vyššího napětí ve stanici A , kdy je $U_1 > U_2$ (tmavší křivky) je vidět, že při stejném $\Delta\vartheta$ dochází k vyššímu zatížení P a naopak nižšímu zatížení tokem Q . Z hlediska proudového zatížení začátků vývodů při $U_1 > U_2$ dojde v případě B k odlehčení oproti A , kde proud vzroste.



Obr. 5.4: Profil Q podél propoj. vývodů – $P_z = 2 \times 1,5$ MW, 2,5 MW

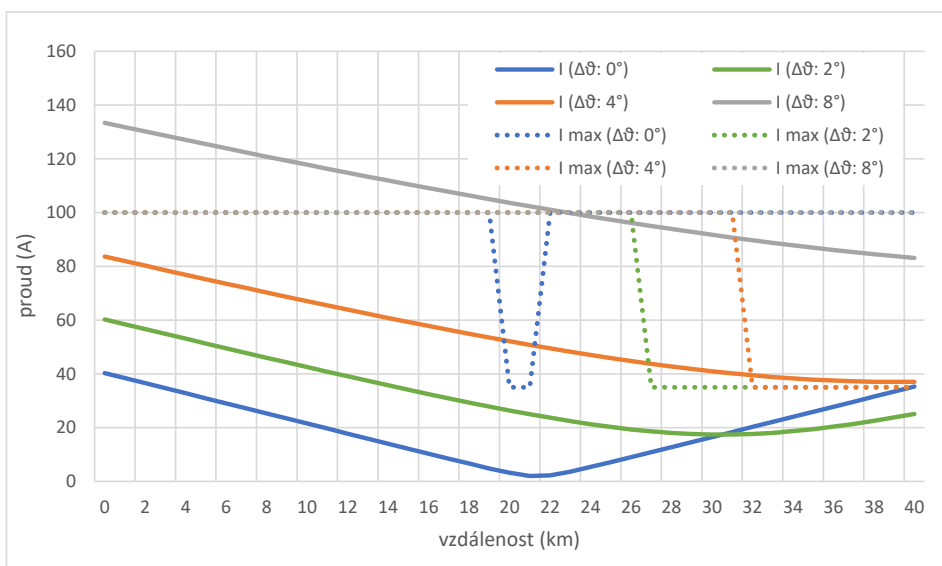


Obr. 5.5: Závislost profilu P, Q podél propoj. vývodů – $P_z = 2 \times 1,5$ MW, $\Delta\theta = 2^\circ, 4^\circ$

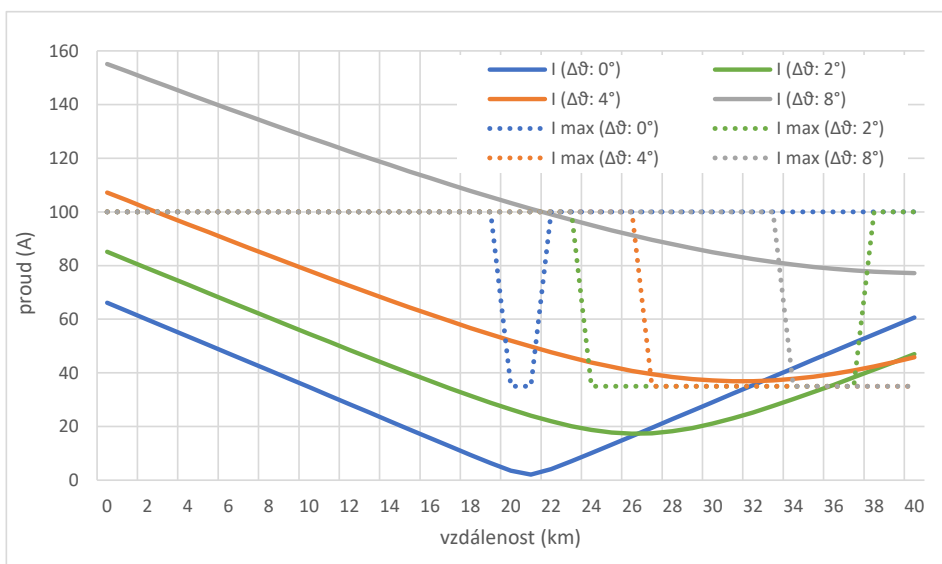
5.3.2 Vyhodnocení proudových poměrů

Na Obr. 5.6, Obr. 5.7 je znázorněno rozložení proudů podél propojených vývodů pro stejné varianty zatížení, které byly představeny výše. Tentokrát je kvůli přehlednosti každá varianta v samostatném grafu, neboť jsou zde vyneseny i maximální proudy respektující vypínací schopnosti úsečníků v závislosti na účínku proudu v daném úseku.

Z průběhu proudů podél vývodů vyplývá, že pro malé rozdílové úhly napětí je křivka proudu (plnou čarou) pod maximální hodnotou (tečkovanou čarou). Snížení maximálního proudu je patrné v oblasti propojení vývodů na 20. km, kde teče velmi



Obr. 5.6: Profil I podél propoj. vývodů – $P_z = 2 \times 1,5$ MW

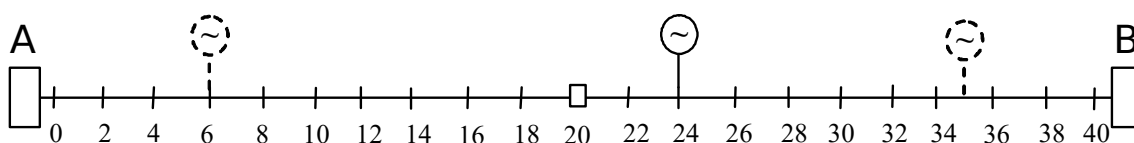


Obr. 5.7: Profil I podél propoj. vývodů – $P_z = 2 \times 2,5$ MW

malý proud, avšak s nízkým účíníkem. S rostoucím $\Delta\vartheta$ roste i vyrovnávací proud, který se sčítá se zátěží a způsobuje především podél vývodu A překročení limitního proudu 100 A (šedá křivka). S rostoucím zatížením vývodů se snižuje $\Delta\vartheta$, při kterém k danému překročení dochází. Ve vývodu B pak průchodem (nikterak extrémního) proudu s nízkým účíníkem dochází k překročení limitu vypínacího proudu pro nízký účíník (35 A), viz oranžovou křivku na Obr. 5.6 a Obr. 5.7. Šířka této oblasti se opět rozšiřuje s rostoucím zatížením.

5.4 Výkonové a proudové poměry na vývodech s vnořenou výrobou

Jakým způsobem se promítne začlenění vnořené výroby do profilů U, P, Q podél propojených vývodů vn je shrnuto v několika následujících odstavcích a grafech. Pro základní variantu byl zdroj připojen ve vývodu B na 24. km smyčky tvořené oběma propojenými vývody. Pro porovnání byly vypracovány i varianty uvažující zdroj umístěný na 6. respektive 35. km. Uvažovaná činná dodávka zdroje byla od 0,5 MW do 2 MW při jednotkovém účinníku. Byly však vypracovány i varianty uvažující účinník 0,92 induktivního i kapacitního charakteru a uvažující i regulaci zdroje na zadané napětí v připojeném uzlu.



Obr. 5.8: Umístění vnořené výroby

Při nepropojených vývodech, pakliže výroba lokálních zdrojů nepřevyšuje spotřebu, teče P a Q_{ind} směrem do vývodu. Výrobní jednotka připojená poblíž konce vývodu B injektuje činný výkon, což se oproti stavu bez vnořené výroby projeví na průběhu toku činného výkonu P podél propojených vývodů.

5.4.1 Vyhodnocení výkonových poměrů

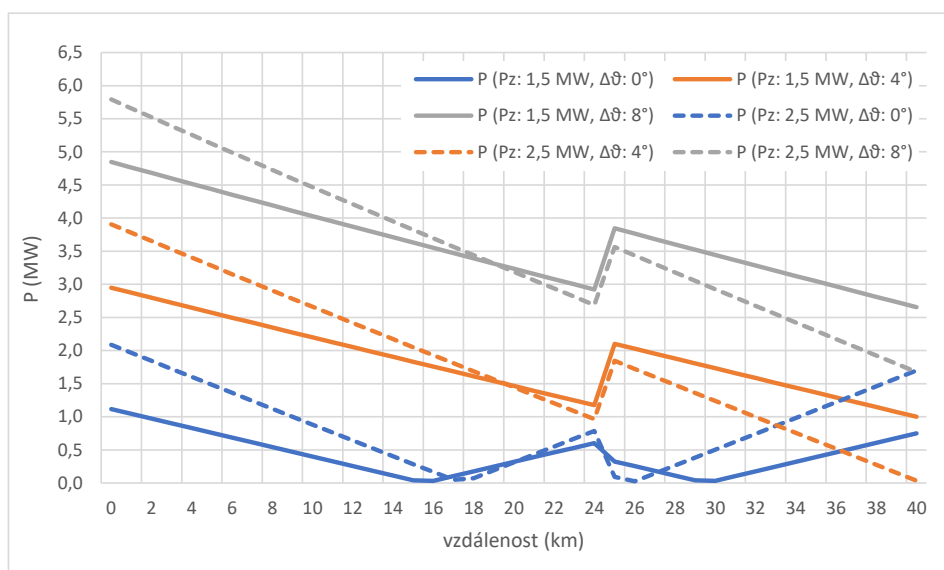
Jakým způsobem se projeví produkce zdroje 1 MW pro dvě varianty zatížení vývodů znázorňuje Obr. 5.9. Porovnání variant s různým umístěním zdroje i bez něj je dále shrnuto na Obr. 5.10.

Z Obr. 5.9 je zřejmé, že v místě připojení zdroje dochází k navýšení křivky toku P , její vytažení směrem nahoru závisí na zatížení vývodu, velikosti připojené výroby i velikosti rozdílového úhlu napětí mezi spínanými stanicemi $\Delta\vartheta$.

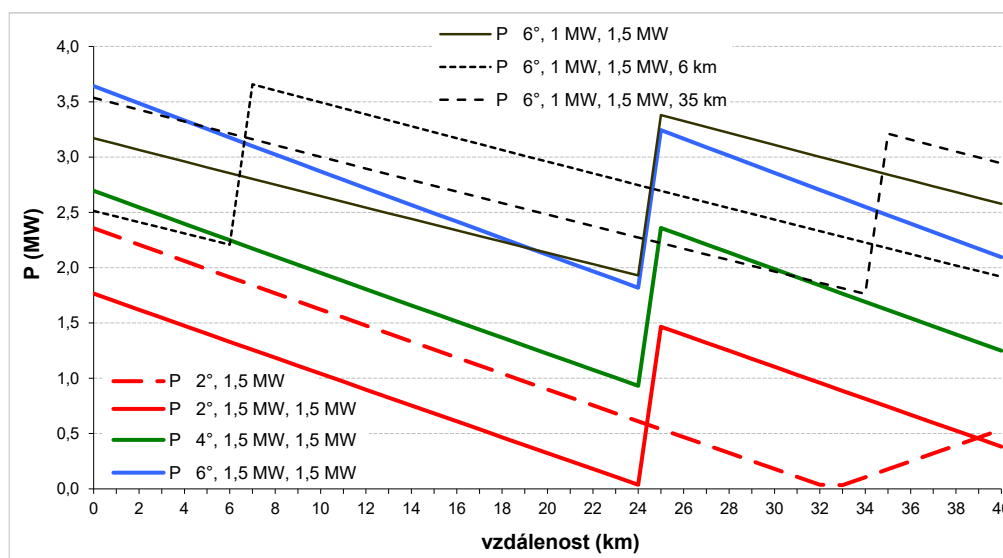
Se vzrůstajícím rozdílovým úhlem $\Delta\vartheta$ narůstá tok vyrovnávacího proudu, respektive činného výkonu P ze stanice A do B . K jakému navýšení průchozího výkonu P propojenými vývody dojde, závisí samozřejmě na předchozím poměru mezi zatížením rozpojených vývodů a výkonu připojeného zdroje na konci vývodu B .

Při nízkém zatížení vývodů a velké výrobě (černá křivka plnou čarou na Obr. 5.10) mohou být úseky v blízkosti připojeného zdroje zatíženy srovnatelným nebo větším P v porovnání s tokem na počátku vývodu A . Směr toku P na vývodu B závisí na poměru výroby a zatížení a také na rozdílovém úhlu $\Delta\vartheta$. Jak je vidět na Obr. 5.9,

při velkém rozdílu úhlů $\Delta\vartheta$ dochází k výraznému vyrovnávacímu toku činného výkonu ze stanice A do B . Při větším zatížení vývodů se vliv lokální výroby snižuje.



Obr. 5.9: Profil P podél propoj. vývodů $P_z = 2 \times 1,5$ MW, 2,5 MW, $P_g = 1$ MW

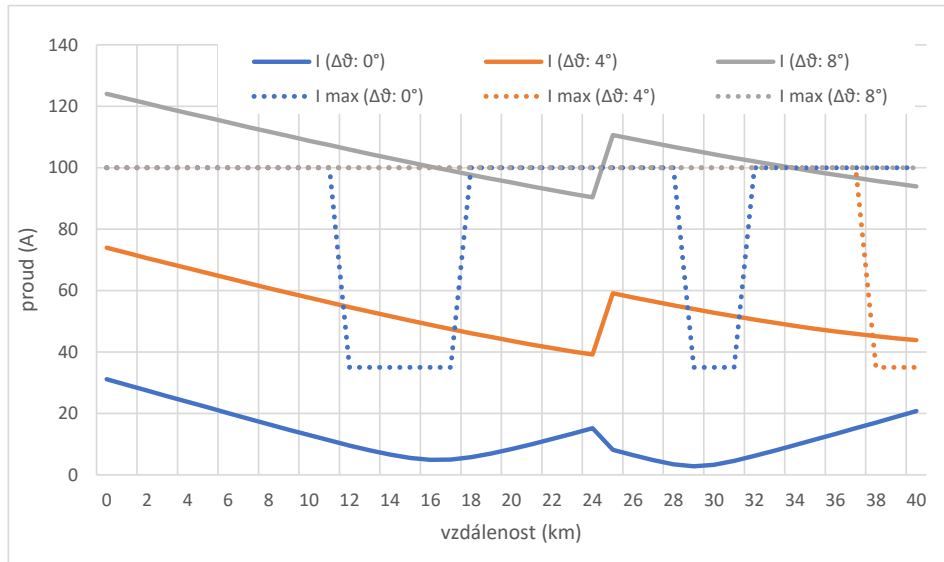


Obr. 5.10: Profil P podél propoj. vývodů – různá pozice zdroje, velikost P_g i P_z (veličiny v legendě: $\Delta\vartheta$, P_z , P_g)

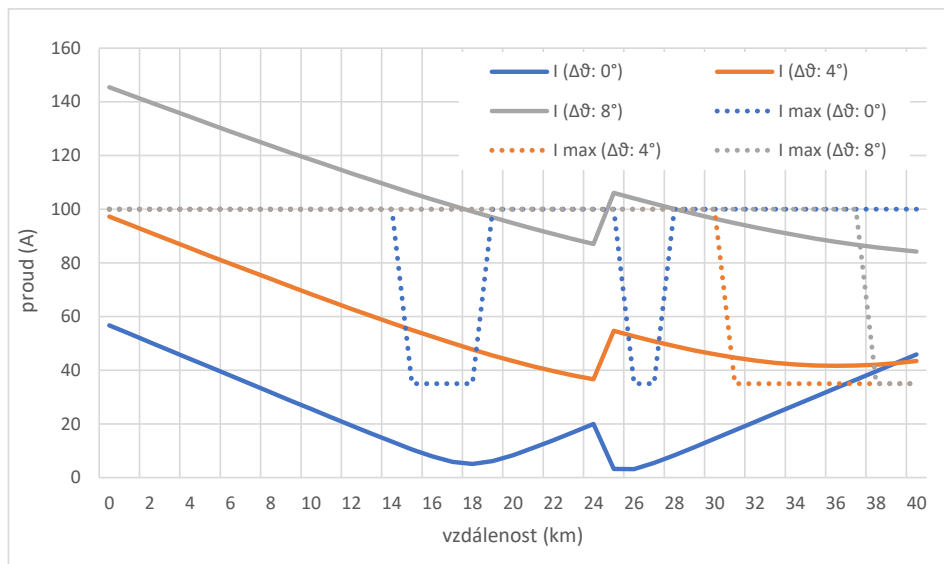
V případě nízkého rozdílového úhlu napětí propojených rozveden (0°, 2°) dochází v závislosti na poměru výroby a zatížení propojených vývodů k dvojitému lámání křivky P (modré křivky na Obr. 5.9), avšak tok jalového výkonu Q není při jednotkovém účinníku připojeného zdroje na vývod B ovlivněn.

5.4.2 Vyhodnocení proudových poměrů

Rozdílné poměry mezi P a Q se oproti stavu bez vnořené výroby promítnou do velikosti, ale i účinníku proudu tekoucího vývodů. Opět lze nalézt úseky, kde tečou relativně nízké proudy (jednotky či pár desítek A), avšak s velmi nízkým účínkem. V takových oblastech může nastat problém s vypínáním malých jalových proudů.



Obr. 5.11: Profil I podél propoj. vývodů – $P_z = 2 \times 1,5 \text{ MW}$, $P_g = 1 \text{ MW}$

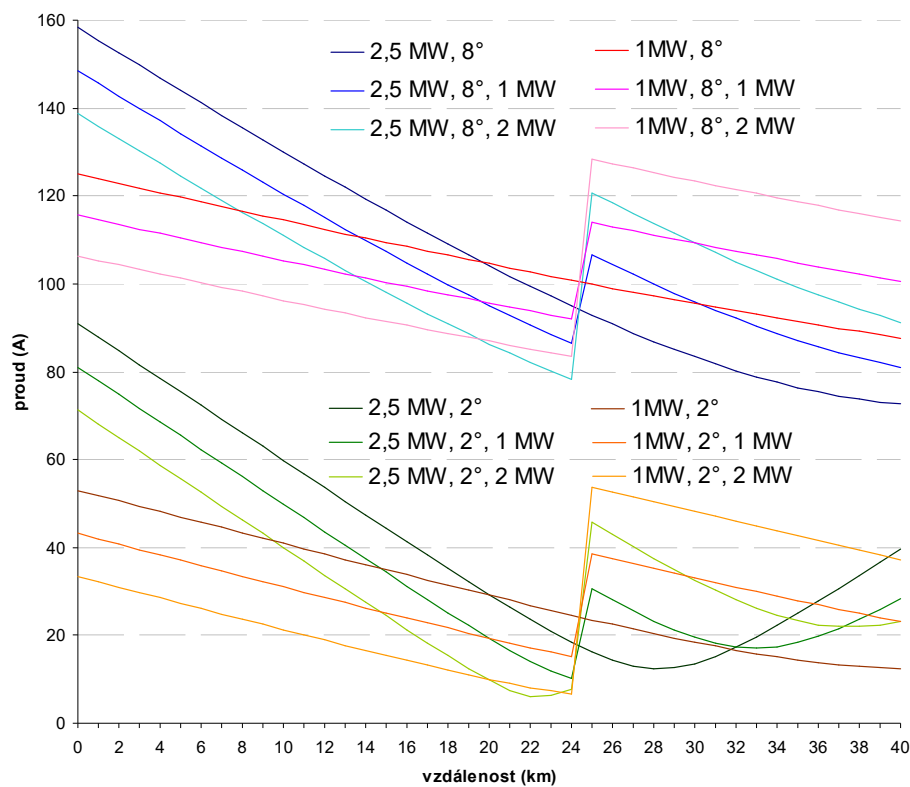


Obr. 5.12: Profil I podél propoj. vývodů – $P_z = 2 \times 2,5 \text{ MW}$, $P_g = 1 \text{ MW}$

Vnořená výroba tedy přímo ovlivňuje šířku pásma bezpečného spínání, ovšem zdali je efekt negativní či nikoliv záleží na aktuálních podmínkách v obvodu –

zejména na zatížení vývodů a rozdílovém úhlu napětí. Při porovnání proudových profilů na Obr. 5.11, Obr. 5.12 s variantami bez zdroje (viz Obr. 5.3) je vidět, že vnořená výroba může posunout nebo zúžit (v extrémním případě úplně odstranit) pásmo problematické z hlediska spínání.

Obecně lze říci, že při propojených vývodech vnořená výroba na vývodu *B* (oproti stavu bez ní) proudově odlehčí počátek vývodu *A*, naopak navýší proudové zatížení vývodu *B* a úseků v blízkosti míst připojení výroby (viz Obr. 5.13). V grafech rozložení proudu se to projeví tak, že proudová křivka vizuálně působí při vnořené výrobě v místě připojení zdroje jako přestřižená a posunutá směrem dolů pro úseky před zdrojem (0.–24. km), resp. nahoru pro úseky za zdrojem (24.–40 km). Změna zatížení vývodu se projeví na proudovém profilu tak, že dochází k jeho natáčení ve směru hodinových ručiček při zvyšujícím se zatížení vývodů, kdy pevným bodem je středová propojka na 20. km (porovnej např. tmavě modrou s červenou křivkou). Se zvyšujícím se rozdílovým úhlem napětí propojených stanic $\Delta\vartheta$ se proudový profil posouvá směrem nahoru. Popsané zákonitosti shrnuje Obr. 5.13.



Obr. 5.13: Porovnání profilů *I* podél propojených vývodů s výrobou (veličiny v legendě: $\Delta\vartheta$, P_z , P_g na 24. km)

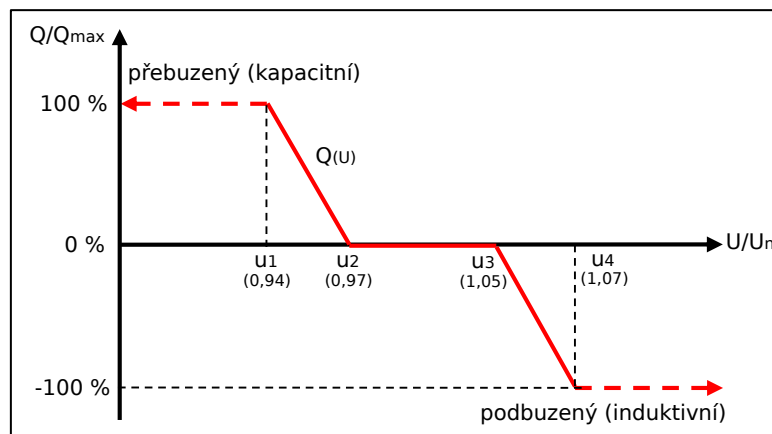
5.4.3 Vyhodnocení vlivu režimu vnořené výroby

V případě zdrojů připojených do sítě vn instalovaného výkonu od 100 kVA přichází dle přílohy č. 4 PPDS v úvahu několik variant řízení jalového výkonu. Kromě běžně aplikované regulace na konstantní účinník musí nově připojované zdroje v rámci podpory sítě poskytovat funkci řízení napětí regulací jalového výkonu v rozsahu 0,9 ind. až 0,9 kap.

Modelování zdroje s dodávkou výkonu při konstantním účinníku je v případě výpočtu chodu soustavy poměrně snadné. Stačí pro daný zdroj připojený v příslušném PQ uzlu dopočítat pro požadovaný účinník i jalový výkon a ten s přihlédnutím k charakteru (induktivní, kapacitní) nastavit společně s činným výkonem jako injekci do uzlu.

Modelování zdroje udržujícího zadané napětí dodávkou jalového výkonu $Q(U)$ lze do výpočtu chodu soustavy začlenit připojením zdroje do příslušného PU uzlu. V takovém případě je však nutné začlenit do výpočtu algoritmus respektující jalové meze dané výrobní jednotky tím, že při jejich porušení přepne PU uzel na odběrový PQ uzel a jako dodávku Q nastaví limitní hodnotu, k jejímuž překročení došlo, viz kapitolu 3.6.4. V případě vynechání této logiky při výpočtu rozložení veličin podél propojených vývodů se dopouštíme značné chyby zejména v případě, kdy se nastavené napětí PU uzlu značně liší od hodnoty vzniklé přirozeným úbytkem při účinníku zdroje $\cos \varphi = 1$ (viz Obr. 5.17 dále v textu).

Příklad nastavení charakteristiky PU uzlu je uveden na Obr. 5.14, který znázorňuje funkci $Q(U)$, tak jak ji uvádí příloha č.4 PPDS včetně konkrétního nastavení hodnot charakteristiky (v závorkách).



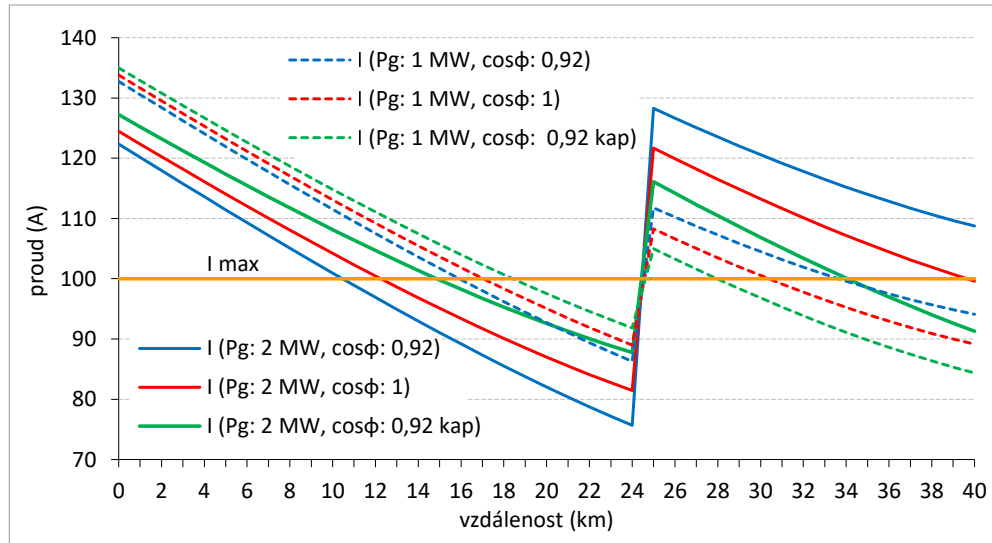
Obr. 5.14: Charakteristika funkce $Q(U)$ [2]

V rámci řešení této disertační práce byla pro obdržení reálnějších výsledků implementována logika hlídání jalových mezí zdroje v rozsahu, 0,9 ind. až 0,9 kap.,

který předepisuje příloha č. 4 PPDS. Pro zdroj s instalovaným výkonem 2000 kW poté vychází tyto meze:

$$Q_{lim} = P_g \pm \tan(\arccos(0,9)) = 2000 \tan(25,84^\circ) = 968,64 \text{ kvar} \quad (5.2)$$

Pro vyhodnocení vlivu režimu vnořené výroby byly spočítány varianty pro dodávaný výkon zdroje 1 MW a 2 MW při zatížení vývodů 2×2 MW. Účinník byl nastaven na 1 a 0,92 ind. i kap. charakteru. Pro varianty s regulací na konstantní napětí bylo uvažováno zadané napětí pro hodnoty 1,035 respektive 1,045 pu.

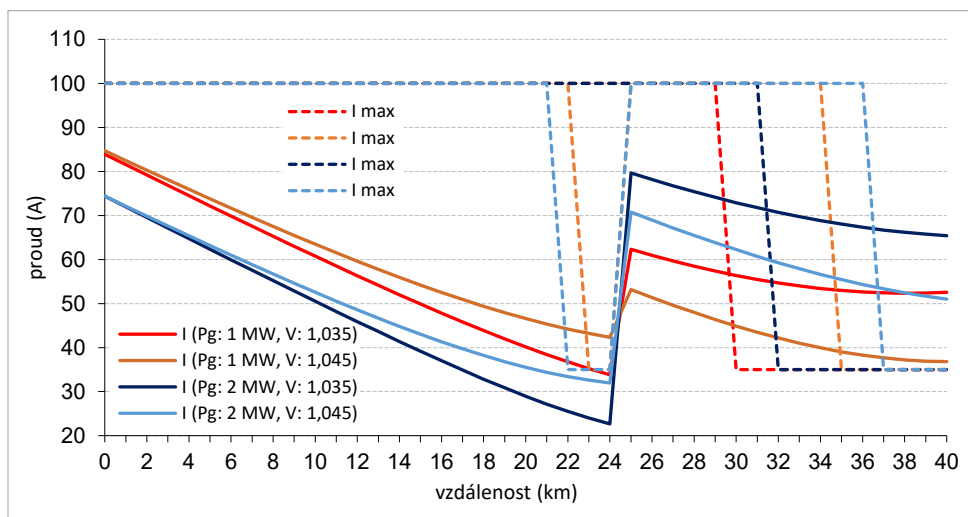


Obr. 5.15: Vliv účinníku zdroje na profil I podél vývodů – $P_z = 2 \times 2$ MW, $\Delta\vartheta = 8^\circ$

Na Obr. 5.15 jsou vyhodnoceny simulace, kdy zdroj dodával konstantní jalový výkon. Z porovnání zelených a modrých křivek vyplývá, že dodávka jalového výkonu (zelenou barvou) snižuje špičku velikosti proudu v místě připojení zdroje a tedy i šířku oblasti potenciálně problematické z hlediska spínání.

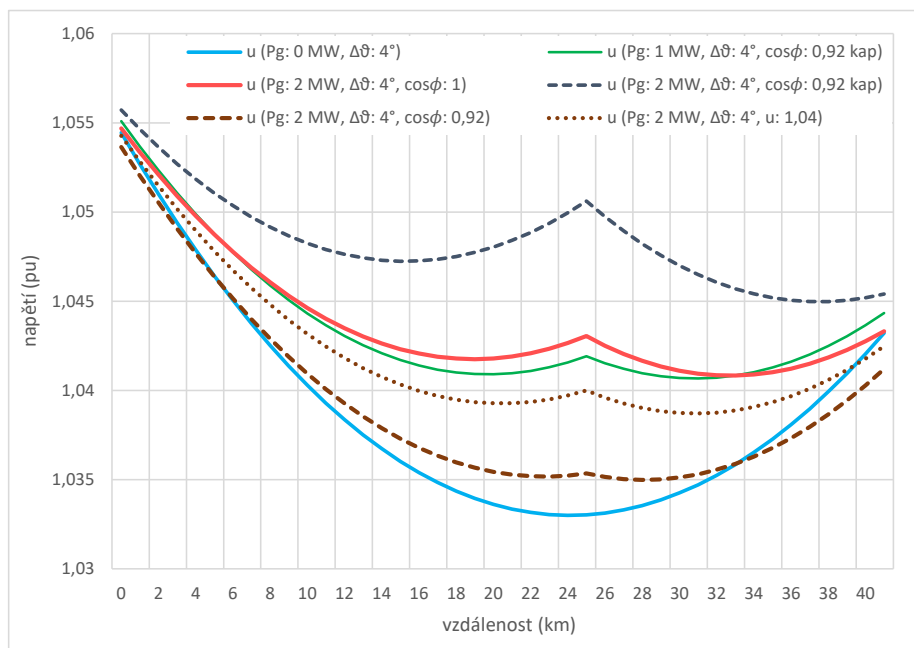
Vyhodnocení simulací pro stejně zatížený obvod při regulaci Q na konstantní napětí prezentuje Obr. 5.16. Vliv regulace jalového výkonu má vliv na pozici a šířku pásma potenciálně problematického z hlediska spínání. To je znát zejména v případě nízkých hodnot $\Delta\vartheta$, kdy je i činná složka vyrovnávacího proudu malá. Jalový výkon zdroje má pak značný vliv na proudový profil podél propojených vývodů.

Velikost jalového výkonu pro udržení napětí na zadané hodnotě je samozřejmě dána aktuálními poměry v obvodu, nicméně na základě jednoduché analýzy lze určit rozsah velikostí napětí vhodný pro nastavení regulace Q . Křivky napětí pro různé režimy zdroje jsou znázorněny na Obr. 5.17. Porovnáním modré a červené křivky zjistíme, že připojený zdroj 2 MW (pracující s $\cos\varphi = 1$) způsobí zvýšení napětí o přibližně 1 % U_n . Čárkované křivky definují profil napětí pro stejný zdroj při



Obr. 5.16: Vliv regulace Q na profil I podél vývodů – $P_z = 2 \times 2 \text{ MW}$, $\Delta\vartheta = 4^\circ$

konstantním účinníku 0,92 (kapacitním i induktivním), což je hodnota blízká 0,9, kterou vyžadují PPDS. Z uvedeného je tedy zřejmé, že regulace Q by měla být nastavena na hodnotu napětí, která je v rozmezí určeném těmito dvěma křivkami v místě zdroje (hnědá a modrá čárkovaná křivka).



Obr. 5.17: Vliv regulace Q na profil U podél vývodů

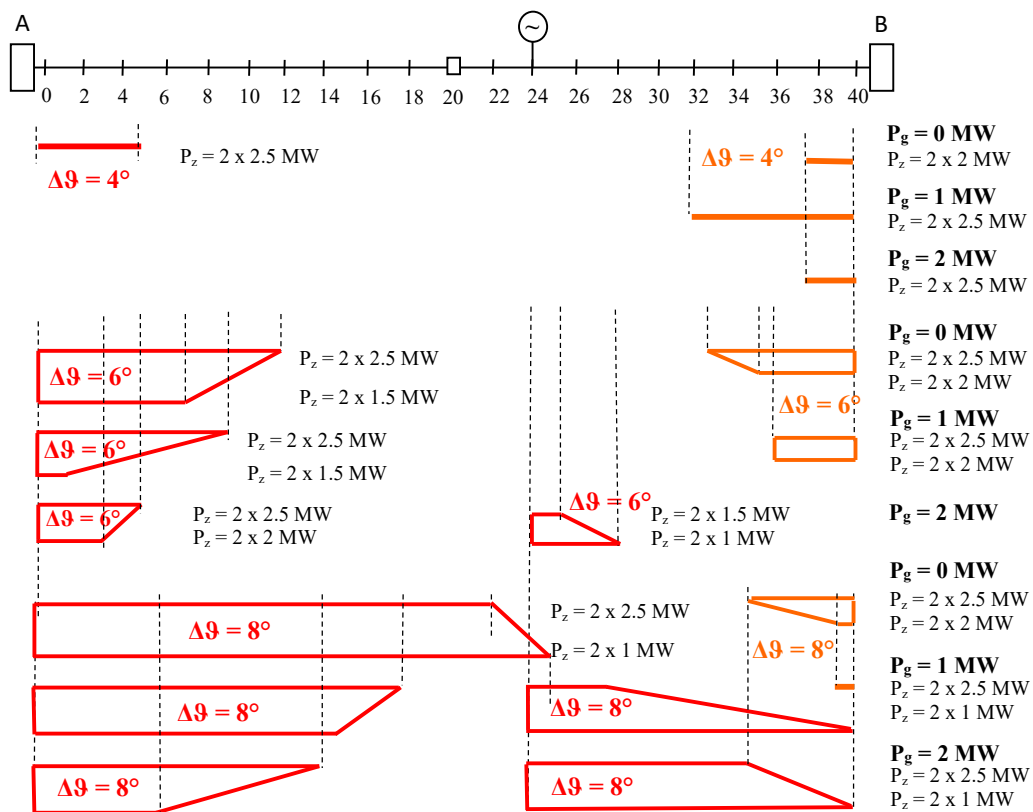
S rostoucím poměrem lokální výroby k zatížení vývodu respektive i počtem zdrojů se zvětšuje potenciál regulace Q pro udržení napětí v povolených mezích. Pro efektivní regulaci, je však nutné znát poměry ve vývodu, což je dnes společně

s produkcí starších zdrojů bez možnosti regulace hlavním problémem. Koncept chytřích sítí, který již distributoři postupně naplňují, však počítá s tím, že vývody vn ve stanicích a rovněž distribuční trafostanice budou osazeny měřeními U, P, Q , což pozitivně ovlivní i možnosti dispečerského řízení.

5.5 Vyhodnocení oblastí rizikových z hlediska spínání

Pro varianty zatížení vývodů od 2×1 do $2 \times 2,5$ MW a výkonu zdroje od 0 do 2 MW při jednotkovém účinníku byly zpracovány výsledky simulací s ohledem na vyhodnocení potenciálně rizikových oblastí z hlediska manipulací s úsečníky.

Při hodnocení vypínací schopnosti úsekových odpínačů bylo přihlédnuto k podmínce (5.1). Z provedených simulací vyplývá, že všemi spínacími prvky v poli vn lze bezpečně manipulovat do 3° rozdílového úhlu mezi napájecími uzly. Tato hodnota odpovídá i provozní zkušenosti při rozepínání uzavřené smyčky pomocí úsečníků bez zhášecí komory. Obr. 5.18 ukazuje oblasti s nedostatečnou vypínací schopností úsekových odpínačů pro účely rozpojení propojených vývodů.

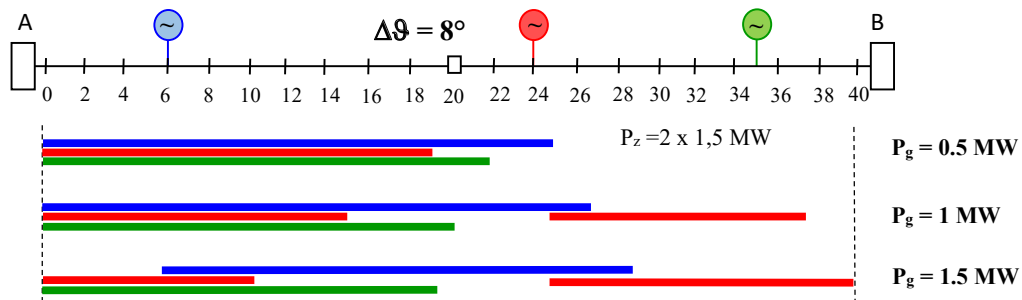


Obr. 5.18: Oblasti s nedostatečnou vypínací kapacitou úsečníků

Problémy s nedostatečnou vypínací schopností úsekových odpínačů jsou očekávány na začátku obou vývodů. Když fázor ve stanici A předbíhá fázor v B, je pod-

mínka (5.1) porušena na začátku vývodu *A* kvůli překročení proudové meze 100 A (červené oblasti), zatímco na začátku *B* je porušena především mez 35 A při nízkém účinníku (oranžové oblasti) – platí zejména pro více zatížené vývody bez lokálního zdroje. S rostoucím $\Delta\vartheta$ se rozsah problematické oblasti rozšiřuje dále do vývodu.

Lokální zdroj instalovaný na konci vývodu *B* má poměrně pozitivní vliv na šířku problematického pásma pro hodnoty $\Delta\vartheta < 6^\circ$, kdy dochází k jeho zúžení a posunutí směrem do vývodu *A* (začátek vývodu *A* je odlehčen). Pro větší rozdílové úhly je vliv lokální výroby spíše negativní, protože vytáhnutí proudové špičky v místě zdroje směrem nahoru (viz např. Obr. 5.13) rozšiřuje pásmo, kde se proud dostává nad hranici 100 A.



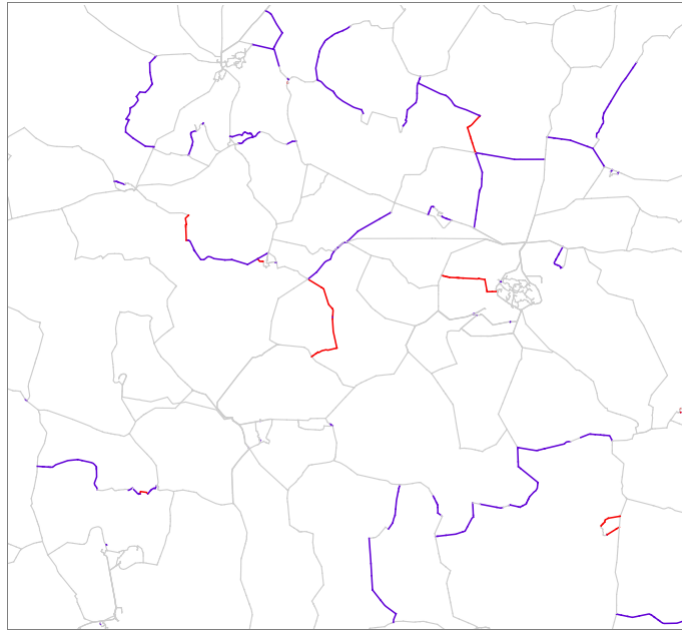
Obr. 5.19: Vliv velikosti a pozice zdroje na pásma problematická z hlediska spínání úsečníky

Obr. 5.19 ilustruje, že nejen velikost, ale i umístění zdroje podstatným způsobem ovlivňují oblasti problematické z hlediska spínání bezkomorovými odpínací. Problematická pásma jsou vyhodnocena pro případ, kdy byl rozdíl úhlu 8° a zatížení vývodů $2 \times 1,5$ MW.

5.6 Vyhodnocení z hlediska kontroly průřezu vodičů

Výpočtové simulace propojených vývodů lze využít i k posouzení proudového zatížení samotných vedení vn, které jsou rovněž hlavním prvkem v dráze vyrovnávacího proudu. Na Obr. 5.20 je výřez sítě vn, nad kterou byla provedena analýza kmenových linek a odboček, viz kapitolu 4.5. Obrázek znázorňuje pouze kmenové linky bez odboček, kde jsou zvýrazněny úseky venkovních vedení s průřezem 50 mm^2 (fialovou barvou) a 35 mm^2 (červenou barvou).

S ohledem na maximální proudovou zátížitelnost vodičů AlFe6 zmíněných průřezů (177 A resp. 150 A – viz Tab. 4.2), neprokázaly provedené simulace pro zatížení vývodů $2 \times 2,5$ MW a $\Delta\vartheta$ do 8° problémy s proudovým přetížením za předpokladu, že nejsou zmíněné průřezy použity na začátku kmene vn (přibližně v první třetině).



Obr. 5.20: Posouzení proudového zatížení kmenových linek

V praxi však může být zatížení vývodu výrazně vyšší než bylo uvažováno v simulacích a to zejména při napájení průmyslových objektů. Rovněž instalovaný výkon distribuovaných zdrojů v jednom vývodu může už dnes dosahovat hodnot přes 3–4 MW. V takových případech nízké průřezy vodičů komplikují připojování nových zdrojů i z hlediska případného nedodržení změny napětí $2 \% U_n$ z důvodu značných úbytků napětí a snížení tvrdosti sítě (zkratového výkonu v místě připojení). Z tohoto důvodu autor považuje doporučení NAP–SG v oblasti posilování průřezu kmenových linek za velmi prozíravé, neboť ke komplexní obnově rozsáhlých úseků sítě vn dochází jen velmi pozvolna a nové respektive rekonstruované části sítě musí počítat i s výkonovou rezervou nejen pro účely náhradního napájení.

V případě dlouhodobého paralelního provozu vývodů je rovněž potřeba brát v úvahu zkratové poměry, které se při paralelním napájení samozřejmě navýší, což je pozitivní z hlediska kvality napětí či zpětných vlivů zařízení na síť, ale z hlediska poruchových stavů je třeba analyzovat, zda stávající zařízení těmto zvýšeným proudům odolá.

5.7 Dílčí závěr k problematice propojování vývodů vn

Z výsledků simulačních výpočtů provedených v kapitole 5 vyplývá, že určení výskytu oblastí problematických z hlediska spínání nelze jednoduše zobecnit. Ve které části vývodů vn se problematické úseky vyskytují, velmi závisí na aktuálních podmínkách, tj. zatížení sítě, rozdílovém úhlu napětí i připojených zdrojích a jejich aktuální

produkcí. Poznatky z kapitoly 5 by bylo možné v praxi použít pro vytvoření SW nástroje, který by na základě aktuálních vstupů dokázal vyšetřit proudové a výkonové poměry podél propojených vývodů pro účely podpory při spínání.

Tok mnohdy značného vyrovnávacího proudu při propojení sousedních vývodů tvoří společně s rostoucí penetrací rozptýlených zdrojů hlavní argument pro vybavení kmenů vn výhradně komorovými úsečníky. Ty mají vypínací schopnost dle typu nejčastěji 400 A, což je hodnota, které může být dosaženo pouze v extrémním případě v úseku na začátku vývodu. Podobným způsobem lze vyhodnotit i proudovou zátížitelnost kmenů vývodů, ve kterých se stále vyskytují úseky s hranicí zátížitelnosti nižší než 200 A.

6 Případová studie analýzy vývodů vn

Na základě poznatků z předchozích kapitol byly vytvořeny softwarové knihovny pro komplexní analýzu sítě vn jak z hlediska topologie, tak chodu soustavy. Tato kapitola představuje aplikaci vyvinutých postupů a softwarové podpory pro analýzu reálné sítě vn a ilustruje způsob provádění analýz sítí vn.

6.1 Zpracování a příprava síťových dat

Pro účely praktického otestování vyvinutých postupů a metod byla vybrána konkrétní dispečerská oblast sítě vn na území ČR, která co do rozsahu zahrnuje přibližně patnáct tisíc uzlů. Vstupní informace pro popis dané sítě tvořil výčet prvků (přípojnice, vedení, výroba apod.), dále soubor hodnot reprezentující stavy spínacích prvků a tabulka měřených a estimovaných hodnot.

Data byla nejprve zpracována v souladu s kapitolou 3.1 a po konverzi a validaci proběhlo jejich uložení do relační databáze, která umožňuje mnohem pružnější způsob práce s velkým objemem dat při následných analýzách.

Síťová data byla nejprve zpracována trasovacími algoritmy (viz kapitolu 3.2), jejichž výstup byl použit k doplnění dodatečných informací do datového modelu. Pro účely analýzy vývodů vn a jejich odboček bylo provedeno trasování kmenových linek, identifikace a klasifikace odboček z hlediska počtu distribučních stanic a transformátorů. Se zohledněním stavu spínacích prvků a topologického modelu byly dále identifikovány napájecí stromy, na základě nichž lze určit příslušnost prvku sítě (vedení, DTS apod.) k vývodu nebo transformátoru (110 kV/vn) z hlediska napájení.

V případě rozsáhlých sítí (řádově již od stovek uzlů) je velmi problematické provádět analýzy takzvaně „na slepo“, to jest bez možnosti vizuální kontroly sítě. Řada souvislostí se bez prostého pohledu na síť může snadno pod náporom megabajtů tabelárních hodnot ztratit. V případě absence polohopisných atributů lze pro vykreslení sítě využít automatizované nástroje pro vizualizaci grafových struktur (např. software Gephy), které síť vykreslí pomocí předdefinovaných algoritmů na základě topologického modelu. Pro síť většího rozsahu je samozřejmě výstup automatizovaného vykreslení méně přehledný, ale pro síť, kde polohopisné údaje chybí (například z důvodu anonymizace), se jedná stále o velmi užitečný nástroj.

Pro vykreslení sítě vn (viz např. Obr. 6.1) byl použit program QGIS, což je nástroj spadající do rodiny svobodných geografických informačních systémů. Při dodržení konvencí z hlediska formátu polohopisných dat lze tento nástroj připojit k relační databázi a na základě souřadnic ve vybraných sloupcích tabulky vykreslit jednotlivé prvky sítě do mapy. Na základě atributů každého typu prvku lze v nástroji QGIS definovat styly, které ovlivní grafickou podobu vykreslovaných uzlů a větví.

6.2 Analýza obvodu propojovaných vývodů vn

Způsob výpočtu výkonových, proudových a napěťových poměrů podél propojených vývodů vn stejné délky a jednotného průřezu vodičů s rovnoměrně rozloženou zátěží je popsán v kapitole 5. Jak se budou lišit výsledky simulací nad modelem reálné sítě vn oproti výsledkům pro zjednodušenou síť, představuje tato kapitola. Pro účely simulačních výpočtů nad reálnou sítí vn byla vybrána oblast se dvěma vývody 35 kV. Základní fakta o propojovaných vývodech jsou uvedena v Tab. 6.1.

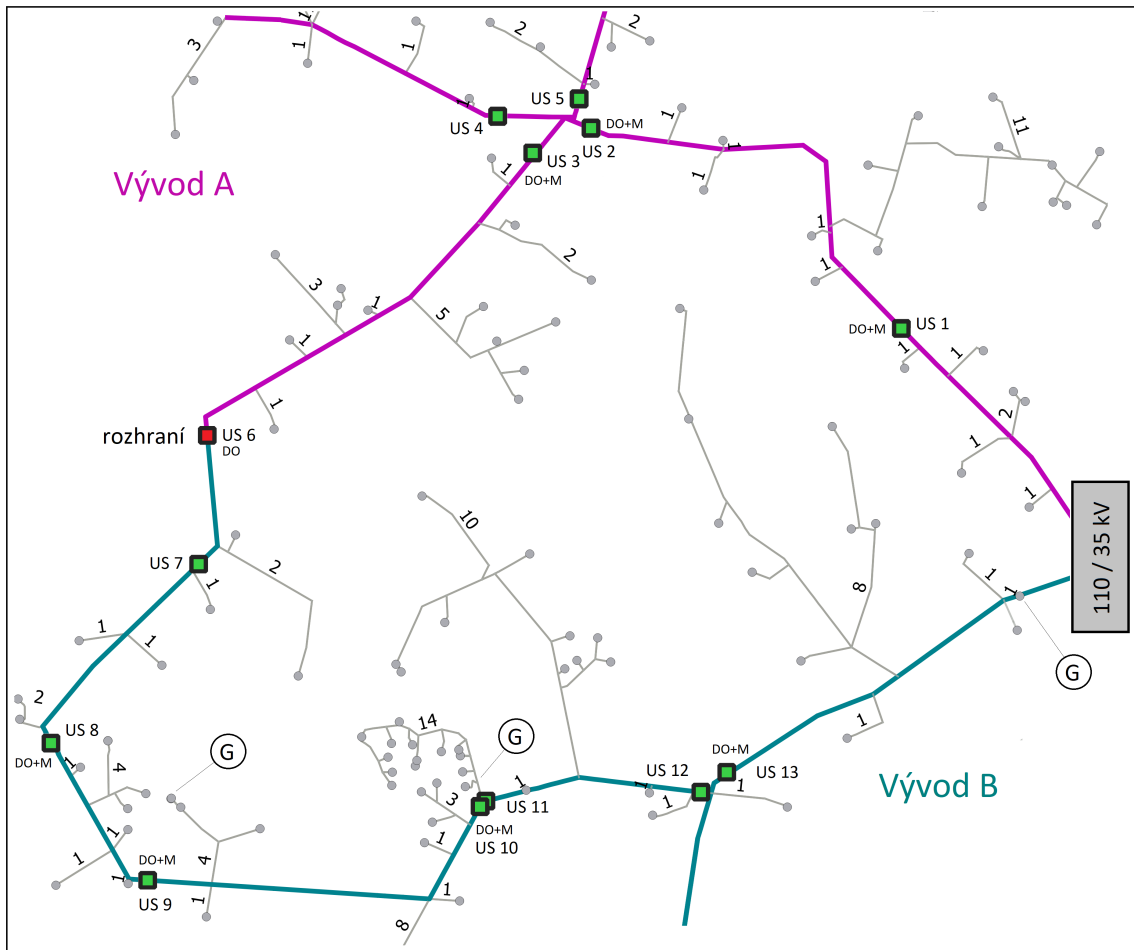
Tab. 6.1: Parametry vývodů

Veličina	Vývod A	Vývod B
Vzdálenost k US 6 (km)	16,8	21,8
Záťaž (MW)	1,9	3,5
Vnořená výroba (MW)	0	1,25
		0,705
		1,5
Počet DTS	89	69
Statistika průřezů v hlavním kmeni k US 6	95 mm ² (16,8 km)	95 mm ² (5,2 km)
		70 mm ² (6,9 km)
		110 mm ² (9,7 km)

Hlavním důvodem pro výběr části sítě vn znázorněné na Obr. 6.1, je charakter vývodů – vývod A je čistě odběrový, ve vývodu B jsou připojeny velké zdroje. Další důležitou informací je, že jsou oba vývody napájeny ze stejného transformátoru 110/35 kV, což je hlavním předpokladem pro dlouhodobý paralelní provoz vývodů. Poměrně nezvyklý je i počet dálkově ovládaných úsečníků (DO), které jsou (kromě jednoho) vybaveny i měřením U, I (DO+M). Díky těmto měřením proudu v poli je možné přesněji rozpočítat celkové zatížení mezi DTS v jednotlivých sekcích vývodu. Kromě měření v poli vývodů byla k dispozici i měření P, Q lokálních zdrojů a dále měření vývodů U, P, Q v transformovně. Měření probíhala od ledna do srpna 2018 a byla použita při tvorbě scénářů výpočtových simulací tak, aby byl co možná nejvěrněji simulován reálný stav sítě.

V rámci mapování podoby reálných vývodů byla autorem v terénu pořízena fotodokumentace vybraných spínacích prvků. V příloze A.2 jsou uvedeny snímky úsečníků a recloserů vyfocených přímo v trase kmenových linek vývodů A a B.

V síti vykreslené na základě polohopisných atributů jsou zároveň graficky znázorněny výsledky trasovacích úloh. Trasovacím algoritmem byly nejprve identifikovány kmenové linky a těm přidělena barva na základě příslušnosti k vývodu dle napájecího stromu, jehož sestavení bylo rovněž výsledkem samostatné úlohy. V dalším kroku

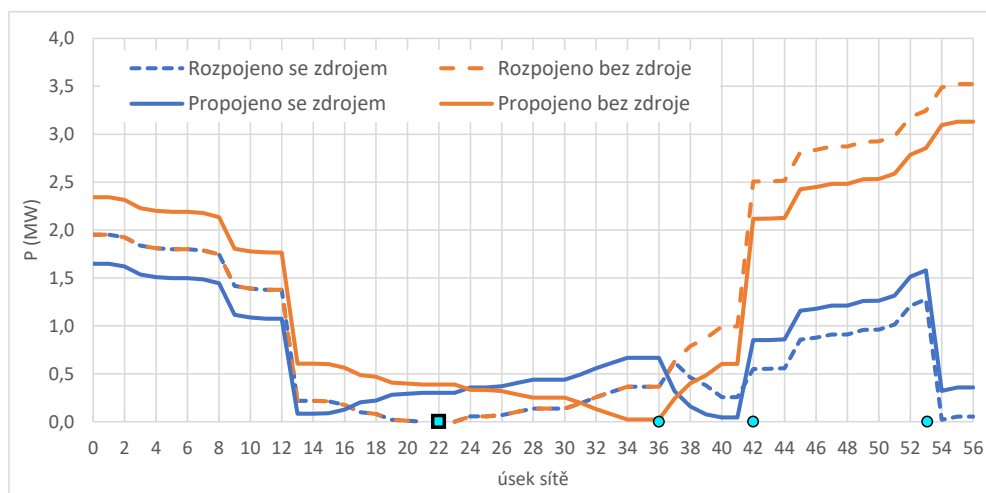


Obr. 6.1: Schéma řešené sítě

došlo k identifikaci a trasování odboček. Na Obr. 6.1 jsou odbočky znázorněny šedými čarami a DTS šedými body. U každé odbočky je dále vypsán počet DTS, které jsou v ní umístěny. Toho se dá dobře využít při tvorbě zjednodušeného modelu, kdy lze odbočku od kmene nahradit například jedním uzlem s vedením a agregovanou hodnotou zátěže (výroby) na DTS. Z Obr. 6.1 je dále patrné, že kmen obou zkoumaných vývodů (fialovou a zelenou barvou) tvoří pouze linky formující kruh v rámci daného výseku sítě, ale i stejně podbarvené paprsky směřující k okraji schématu. V kontextu celé sítě se jedná o pokračování kmenových linek směřujících k propojkám s dalším vývodem (dvě další možnosti propojení pro vývod *A*, jedno pro vývod *B*). S přihlédnutím k zapojení sítě je pro účely následujících analýz na tyto části kmenů pohlíženo jako na běžné odbočky od kmene.

6.3 Analýza základního stavu a náhradního napájení

V rámci analýzy vývodů vn byla nejprve provedena výpočtová simulace základního stavu, kdy je úsečník ÚS 6 rozepnut a vývody zatíženy hodnotou, viz Tab. 6.1. Jak se změní výkonové, proudové a napěťové poměry v obvodu při paralelním provozu vývodů napájených ze společného transformátoru shrnují následující grafy. Část sítě vn formující kruh byla nahrazena 57 uzly respektive 56 úseky vedení. Ty jsou v následujících grafech vyneseny na osu x, kde je značkou čtverce znázorněno i místo propojení a značkou kruhu umístění přípojených výroben. Na všech grafech je vývod *A* v levé části a vývod *B* v pravé části.

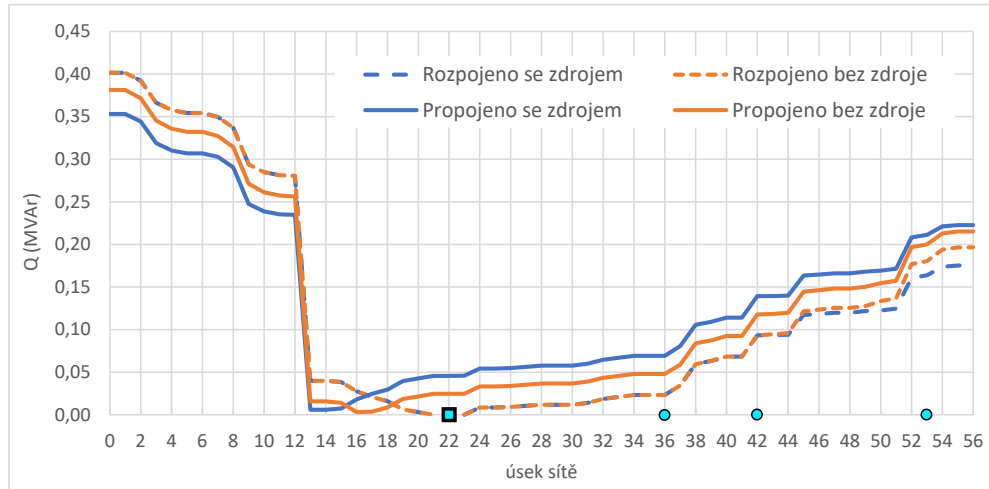


Obr. 6.2: Profil P podél vývodů

Na Obr. 6.2 je znázorněn profil činného výkonu podél vývodů před (čárkovanou čarou) a po propojení vývodů (plnou čarou). Barevně je dále odlišena varianta vlivu vnořené výroby. Při porovnání s výkonovým profilem rovnoměrně rozložené zátěže (viz kapitolu 5) jsou na první pohled patrné výkonové skoky v místech odboček napájejících další část sítě různého zatížení. Pro variantu s nulovou produkcí lokálních zdrojů je po propojení patrné odlehčení první poloviny vývodu *B*, které je kompenzováno zvýšením zatížení vývodu *A*, což vede k rovnoměrnějšímu rozložení toku podél vývodů. Při uvažování produkce lokálních zdrojů (viz hodnoty v Tab. 6.1) je patrné odlehčení zejména první poloviny vývodu *B* o více než polovinu. Po propojení je díky rozprostření výkonu lokálních zdrojů výrazně odlehčen i vývod *A*.

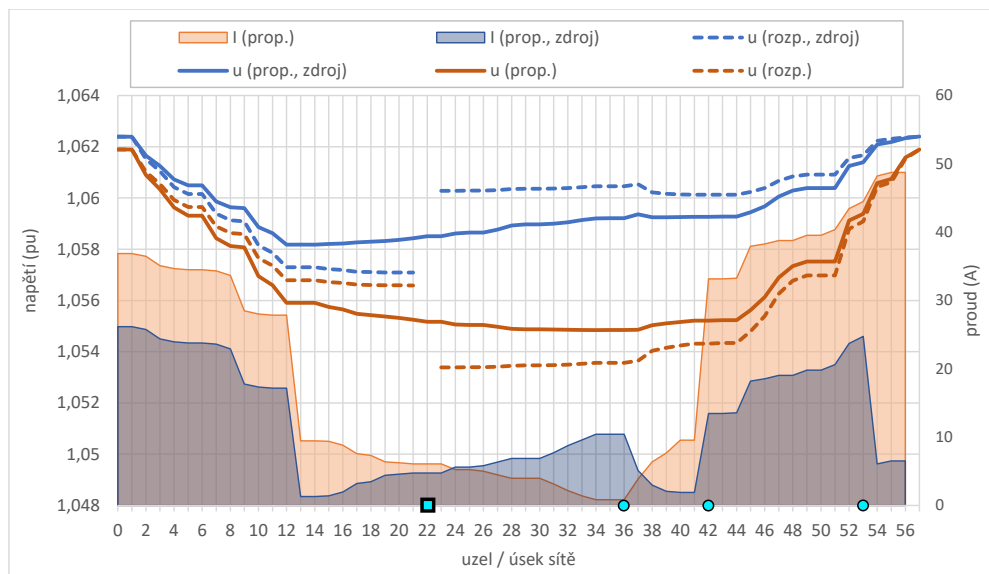
Tok jalového výkonu podél vývodů je uveden v grafu na Obr. 6.3. Hodnoty ve všech variantách dosahují nízkých hodnot, což je dáno zejména charakterem zátěže a sítě. Hodnoty jalového výkonu odpovídající účinníku 0,97–0,99 jsou v souladu účinníkem zjištěným na obou vývodech během dlouhodobého měření. Kromě první poloviny vývodu *A* dojde po propojení vývodů k nárůstu toku Q , který dále stoupne

ve variantě s lokálními zdroji. V první polovině vývodu *A* pak dochází přesně k opačnému jevu.



Obr. 6.3: Profil Q podél vývodů

Obr. 6.4 znázorňuje průběh napětí pro stejné varianty simulací, které byly uvedeny v předchozích dvou grafech. Doplněny jsou plošné grafy pro porovnání velikosti proudů tekoucích jednotlivými úseky propojených vývodů a to pro variantu s nulovou a variantu s jmenovitou produkcí lokálních zdrojů. Z uvedeného vyplývá, že

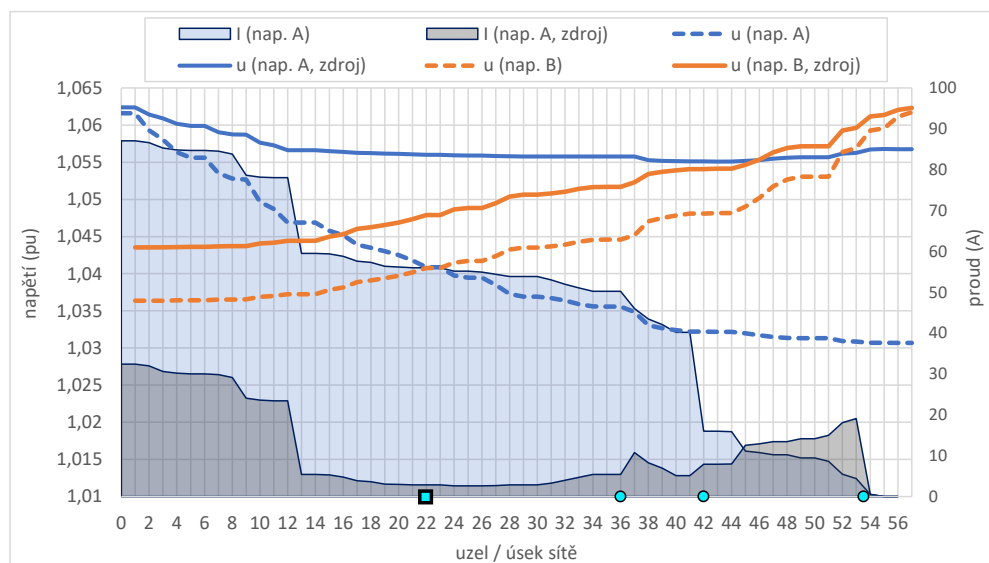


Obr. 6.4: Profil U, I podél vývodů

profil napětí ve vývodu *A* po propojení klesne a naopak ve vývodu *B* stoupne. Vliv změny výkonu ve vývodech na profil napětí před a po propojení dobře ilustrují varianty s připojenými zdroji. Značný efekt lokálních zdrojů lze pozorovat porovnáním

čárkovaných čar v pravé části grafu (vývod *B*). Při radiálním provozu vývodů lze po připojení zdrojů pozorovat napětovou změnu přibližně 0,7 % U_n . Po připojení zdrojů v případě propojených vývodů činí maximální napětová změna 0,45 % U_n (v uzlu 37). Z porovnání proudových profilů před a po připojení zdrojů je patrný pozitivní efekt výroby z hlediska rovnoměrnějšího rozložení proudu. Díky odlehčení začátků vývodů je v této části patrné i snížení úbytku napětí a celkové vytažení křivky napětí směrem nahoru. Při paralelním provozu vývodů klesne průměrná hodnota zatížení větví kmene po připojení zdrojů z 21 na 12 A. Vyrovnávací proud přes US 6 měl vyšší hodnotu ve stavu před připojením zdrojů – přibližně 6 A. Před sepnutím byl na koncích vývodů rozdíl fázorů napětí přibližně $112\text{ V} \angle 0,25^\circ$.

K propojení sousedních vývodů se přistupuje také při tvorbě náhradního napájení. Z hlediska kontrolních výpočtů se tento stav simuluje tak, že úsečník na rozhraní je sepnut a příslušný vývod odpojen od napájecí přípojnice ve stanici. Protilehlý vývod pak radiálně napájí nejen vlastní DTS, ale i celý sousední vývod. Kmeny vývodů samozřejmě musí být na tento typ provozu dimenzovány z hlediska průřezu respektive proudové zatížitelnosti, což je hlavní důvod, proč se kmeny vn projektují v tomto ohledu s přibližně 50% rezervou. Analýza stavu náhradního napájení se provádí i v případových studiích připojitelnosti nových zdrojů na hladině vn, viz kapitolu 6.4.



Obr. 6.5: Profil U, I při náhradním napájení

Profil napětí a proudu pro stav náhradního napájení je znázorněn na Obr. 6.5. Z grafu vyplývá, že ve stavu bez připojených lokálních zdrojů je úbytek napětí výraznější v případě náhradního napájení z vývodu *A* (modrá přerušovaná čára), kdy je jeho začátek zatížen téměř trojnásobným proudem oproti stavu v základním

zapojení (světle modrá plocha). Vliv lokální výroby je pak o to výraznější, neboť ta dokáže sama o sobě pokrýt téměř celou spotřebu vývodu B (šedá plocha) a výrazně tak odlehčit i vývodu A . Průměrná hodnota zatížení větví kmene klesne z 50 na 12 A. Napěťový profil je pak výrazně rovnoměrnější a rozdíl napětí mezi napájecím uzlem a uzly vývodu nečiní více než 1 % U_n . V případě náhradního napájení z vývodu B již není vliv zdroje na napěťový profil tak výrazný, neboť tranzitní tok proudu směrem do vývodu A nabývá díky jeho nízkému zatížení hodnot okolo 30 A.

Z uvedených analýz plyne, že propojení vývodů vn napájených ze stejného transformátoru vede k rovnoměrnějšímu rozložení výkonu a napětí zejména v poslední třetině vývodů. Významnou roli v provedených analýzách hrají lokální zdroje, jejichž produkce vede k odlehčení především první poloviny obou propojených vývodů a významnému proudovému odlehčení kmenů vn, což se pozitivně odrazí i ve snížení úbytku napětí a ztrát.

Je však třeba poznamenat, že vliv lokálních zdrojů na proudové a napěťové poměry musí být posuzován vždy individuálně pro každou část sítě (vývody v dané oblasti) a nemusí být vždy jednoznačně pozitivní. V případě sítě zkoumané v této kapitole se projevil příznivý poměr lokální výroby k zatížení vývodu – hodnoty si byly velmi blízké. Další úskalí skýtá i nesoudobost produkce vnořené výroby a odběru DTS. V uvedené případové studii tvoří téměř dvě třetiny produkce FVE, jejichž výkon je nestálý jak v průběhu dne, tak delším časovém období. Tím je pozitivní vliv výroby rovněž eliminován. Ve chvíli, kdy by jejich výkon kryl spotřebu vývodů, nemusí být zrovna k dispozici a naopak.

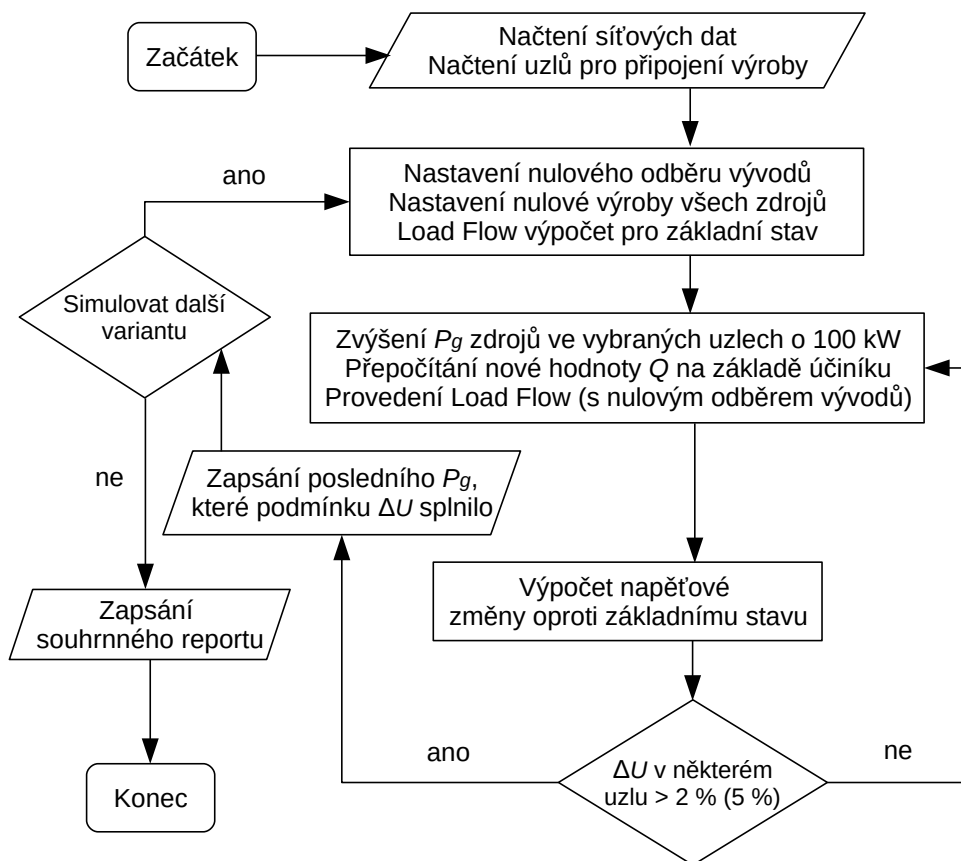
6.4 Analýza zvýšení připojitelného výkonu zdrojů

Primárním cílem této kapitoly je provést analýzu vlivu paralelního chodu vývodů vn na zvýšení připojitelného výkonu lokálních zdrojů se zohledněním režimu jejich výroby. V případových studiích připojitelnosti se jako hlavní kritérium uvažuje změna napětí po připojení plného výkonu všech výrobních jednotek, kdy zdroje nesmí vyvolat změnu vyšší než 2 % U_n při základním a 5 % U_n při náhradním napájení oproti stavu s nulovou produkcí zdrojů. PPDS v příloze č. 4 kromě těchto hodnot stanovují, že studie připojitelnosti má zohledňovat nejnepříznivější podmínky v síti, což se v praxi vykládá tak, že se při posuzování změny napětí vyvolané zdroji uvažuje minimální (určena na základě zimního měření) nebo nulová spotřeba na DTS ve vývodech.

Pakliže se naplní předpoklady stanovené například v rámci NAP-SG, bude paralelní provoz vývodů v budoucnu stále častější. Vývody budou poté v základním zapojení provozovány paralelně a naopak při mimořádném zapojení napájeny paraskově. Na základě této úvahy byly provedeny další výpočtové simulace nad sítí

představenou v kapitole 6.2.

S využitím softwarové knihovny pro výpočet Load Flow vyvinuté v rámci této disertační práce byl připraven automatizační skript popsany vývojovým diagramem na Obr. 6.6. Pomocí opakovaného výpočtu Load Flow je zjištěn maximální při-



Obr. 6.6: Vývojový diagram výpočtu připojitelnost zdrojů

pojitelný výkon zdrojů ve vybraných uzlech. Nastavením počátečních podmínek lze snadno zohlednit produkci zdrojů v dalších uzlech soustavy a vyhodnotit připojitelný výkon zdrojů komplexně jak pro základní stav, tak náhradní napájení. V rámci provedených analýz byl uvažován stav naprázdno (nulový odběr na všech DTS).

Pro vytvoření výchozího bodu pro další výpočtové simulace byla nejprve provedena analýza vlivu stávajících zdrojů ve vývodu *B* (viz Obr. 6.1) na napěťovou změnu oproti základnímu stavu. Výsledky analýzy jsou prezentovány v Tab. 6.2. Součet jmenovitých výkonů zdrojů v daném vývodu činí 3,455 MW. Jak pro radiální, tak paralelní napájení bylo uvažováno $\Delta U_{max} = 2\%$. Ve své podstatě se jedná o úbytek napětí vyvolaný tokem proudu směrem od zdrojů k začátkům vývodů.

Úbytek napětí, jak známo, je vedle impedance prvku ovlivněn velikostí a účinníkem proudu jím protékajícím. Jak ukazují simulace, při paralelním provozu dochází k proudovému odlehčení vývodu *B*, kdy přibližně 20 % velikosti proudového toku

Tab. 6.2: Vlivu stávajících zdrojů na změnu napětí ΔU

Napájení	ΔU_{max} (%)	ΔU (%) při $P_g = 3,455$ MW		
		$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0,98$	$\cos \varphi = 0,95$
Radiální	2	0,74	0,40	0,27
Paralelní	2	0,51	0,22	0,27
Napájení z A	5	2,33	1,53	1,04
Napájení z B	5	0,74	0,40	0,27

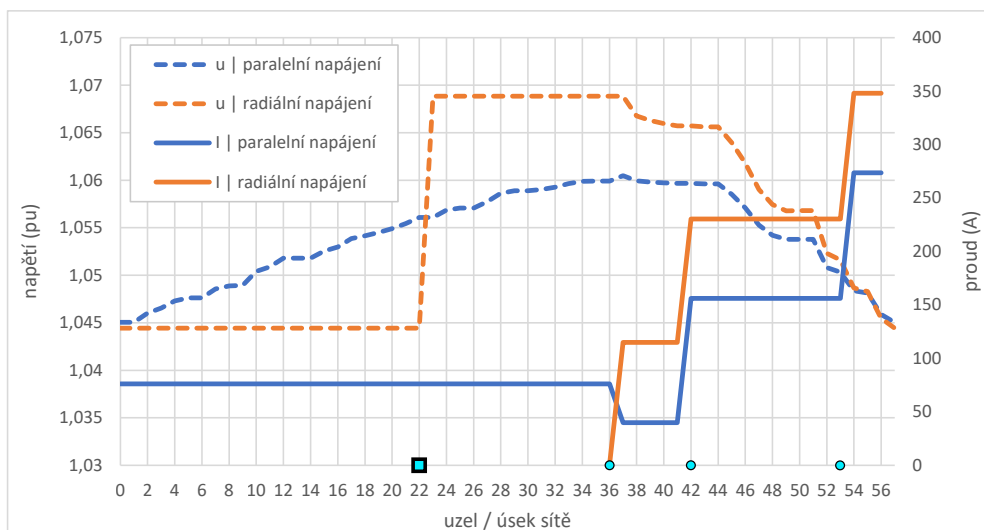
převezme čistě odběrový vývod A. To se pozitivně projeví i na hodnotě ΔU , která je (pro účinník blízký jedné) přibližně o 0,2 % nižší než při radiálním napájení. V případě uvažování $\cos \varphi = 0,95$ se však mnohem výrazněji projeví pozitivní efekt induktivního účinníku. Při pohledu do Tab. 6.2 je vidět, že nejvýznamnější dopad má $\cos \varphi = 0,95$ na snížení napěťové změny při náhradním napájení z čistě odběrového vývodu A.

Tab. 6.3: Max. připojitelný P_g zdrojů ve vývodu B dle kritéria ΔU

Napájení	ΔU_{max} (%)	P_g zdrojů (MW)		
		$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0,98$	$\cos \varphi = 0,95$
Radiální	2	$3 \times 2,9$	3×6	$3 \times 7,1$
Paralelní	2	$3 \times 4,4$	$P_g > 3 \times 10$	$3 \times 7,3$
Napájení z A	5	$3 \times 2,6$	$3 \times 4,7$	$P_g > 3 \times 10$
Napájení z B	5	$3 \times 8,1$	$P_g > 3 \times 10$	$P_g > 3 \times 10$

S využitím postupu znázorněného na Obr. 6.6 byl pro každou variantu zapojení se zohledněním ΔU_{max} určen maximální připojitelný výkon v místech stávajících zdrojů ve vývodu B. Jak vyplývá z Tab. 6.3, paralelní provoz vývodů má dle předpokladů nejpriznivější efekt v případě uvažování jednotkového účinníku zdrojů, kdy je ovšem max. připojitelný výkon omezen variantou náhradního napájení z vývodu A. Hodnota výkonu pak činí $3 \times 2,6$ MW místo při paralelním chodu možných $3 \times 4,4$ MW. Pro varianty s induktivním účinníkem se dle očekávání připojitelný výkon výrazně zvyšuje až na hodnotu $3 \times 7,1$ MW pro radiální, respektive $3 \times 7,3$ MW pro paralelní napájení.

Ze zjištěných hodnot výkonů vyplývá, že takovýto objem produkce lokálních zdrojů síť nepojme z hlediska proudové zatížitelnosti vývodů. Z přehledové Tab. 4.2 lze zjistit, že např. pro venkovní vedení AlFe6 110 mm² je hodnota $I_{max} = 318$ A. Při pohledu na proudový profil na Obr. 6.7 je vidět, že v případě radiálně napájených vývodů k překročení zmíněné max. hodnoty proudu dojde. Ve vývodu B se navíc vyskytují i úseky s nižšími průřezy než 110 mm². Zde se opět pozitivně projeví vliv paralelního napájení, které proud na začátku vývodu B sníží z hodnoty 348 na 274 A.



Obr. 6.7: Vliv připojeného zdroje $3 \times 7,1 \text{ MW} (\cos \varphi = 0,95)$ na profil U, I

V reálném provozu se pozitivně projeví i zohlednění zátěže podél vývodů. Ovšem s přihlédnutím k faktu, že mezním hodnotám musí vyhovět i varianta náhradního napájení, dojde k výrazné korekci hodnot připojitelného výkonu směrem dolů. Se zohledněním max. proudu 225 A (odpovídá AlFe6 70 mm²) bude hodnota max. připojitelného výkonu společná a přerozdělitelná mezi oba vývody:

$$P_g = \sqrt{3}UI \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 35 \cdot 0,225 \cdot 0,95 \approx 3 \times 4,32 \text{ MW} \quad (6.1)$$

Varianta vzájemného náhradního napájení vývodů A a B se pro účely posouzení připojitelnosti jeví jako limitující z hlediska max. proudové zatižitelnosti. Pakliže není k dispozici alternativní způsob náhradního napájení, musí být propojené kmeny schopny přenést výkon zdrojů v obou vývodech. Problémy se splněním podmínky max. změny napětí lze eliminovat uvažováním induktivního účinku zdrojů, ale i paralelním provozem vývodů v základním stavu. Paralelní napájení pak vede k rovnoměrnějšímu rozložení proudu i napětí podél vývodů a tím pádem k redukci ztrát.

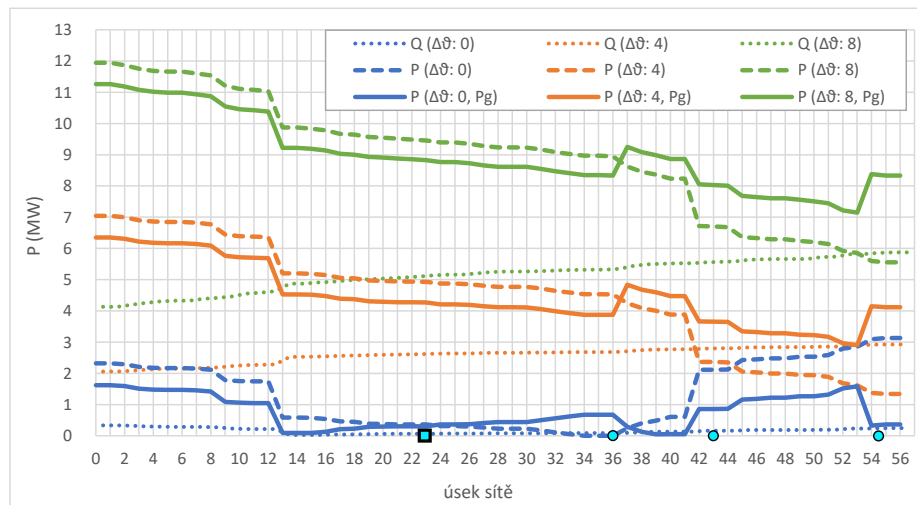
6.5 Analýza propojených vývodů napájených z různých transformátorů

V předchozí kapitole byl podrobně rozebrán stav, kdy jsou oba vývody napájeny ze stejného transformátoru pro účely dlouhodobého paralelního provozu. V této kapitole bude uvažováno napájení každého vývodu z jiného transformátoru, který zpravidla bývá umístěn i v jiné stanici. Spínání vývodů při tomto typu napájení se provádí při rekonfiguraci sítě např. při převádění zátěže mezi vývody, nebo tvorbě

náhradního napájení při rekonstrukčních pracích, provádění řádu preventivní údržby apod. Propojení takto napájených vývodů je tedy zpravidla dočasné a motivované zejména tlakem na provozovatele DS z hlediska omezení manipulací na tmu.

Jaká úskalí přináší spínání takto napájených vývodů je podrobně zmapováno v kapitole 4 a dále kapitole 5, kde bylo provedeno vyšetření výkonových a proudových poměrů v závislosti na rozdílu fázorů napětí mezi napájecími stanicemi a dále zohledněn i vliv lokálního zdroje v různém provozním režimu. Předmětem této kapitoly je provést vybranou sadu zmíněných simulací pro vývody popsané v kapitole 6.2. Oproti situaci na Obr. 6.1 bude v rámci této kapitoly uvažováno napájení každého vývodu z jiné transformovny. Zbytek parametrů, včetně těch založených na reálném měření (např. zatížení), bude zachován. Touto modifikací v obvodu přibude mj. napájecí PU uzel a transformátor 110/35 kV (stejně velikosti jako první – 40 MVA).

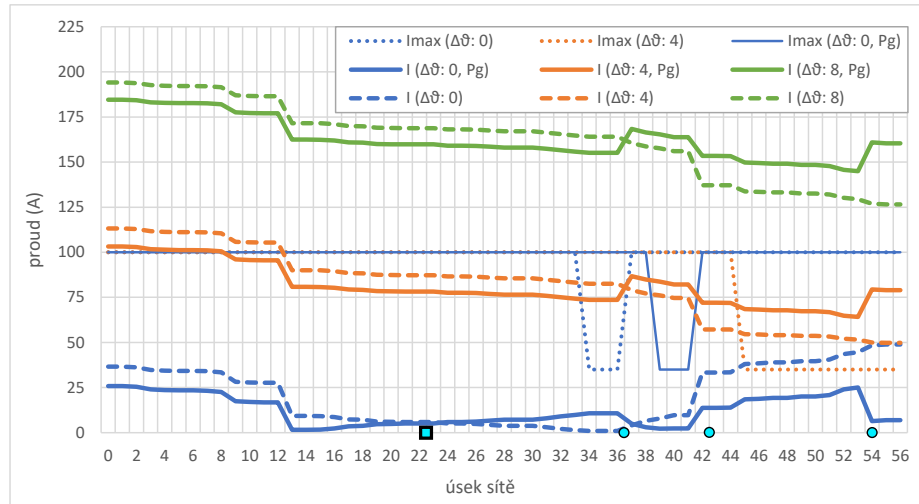
Jako první byly provedeny výpočtové simulace stavu, kdy se fázor napětí ve stanici *B* zpožďuje za fázorem napětí v *A*. Velikost zatížení a výroby lokálních zdrojů (při $\cos\varphi = 1$) byla opět zvolena na základě Tab. 6.1. V každém grafu jsou pro porovnání rovněž křivky reprezentující stav s nulovou lokální výrobou. Simulace byly provedeny pro rozdílové úhly napětí od 0 do 8°.



Obr. 6.8: Profil P, Q při toku I_v ze stanice *A* do *B*

Na Obr. 6.8 jsou znázorněny profily činného a jalového výkonu pro tři vybrané rozdílové úhly napětí. Křivky pro nulový úhel kopírují trend, kdy byl obvod napájen ze společného transformátoru. Již pro úhly $\Delta\vartheta > 2^\circ$ dochází při daném zatížení k přetoku činného výkonu (tučné čáry) ze stanice *A* do *B* viz zelené a oranžové křivky. S rostoucím rozdílovým úhlem $\Delta\vartheta$ roste i tok jalového výkonu, přestože $\cos\varphi$ zátěže se pohybuje okolo hodnoty 0,99. Směr toku Q (tečkovanou čarou) má

v souladu se zjištěními uvedenými v kapitole 5.3 pro nenulové hodnoty $\Delta\vartheta$ opačný směr než P . Potvrdit se rovněž podařilo závěry učiněné pro dopad připojení lokálního zdroje (průběhy P plnou vs. čárkovanou čarou), kdy od $\Delta\vartheta > 2^\circ$ dochází k odlehčení vývodu B , ale výraznému nárůstu zatížení první poloviny vývodu A .



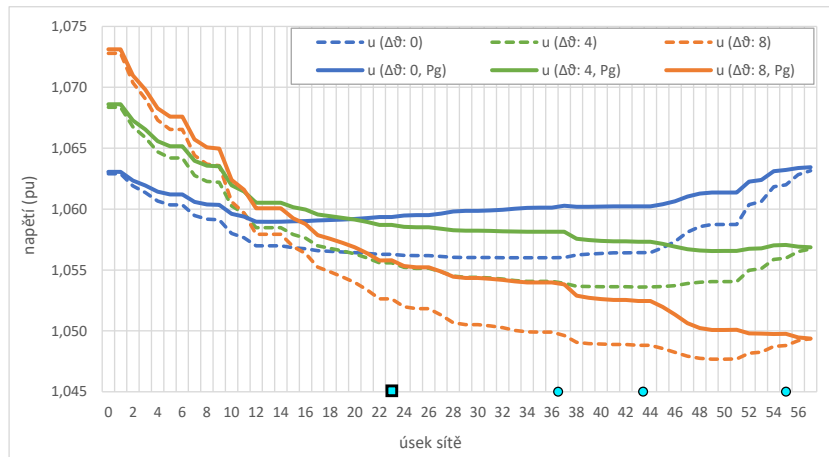
Obr. 6.9: Profil I při toku I_v ze stanice A do B

Proudové profily na Obr. 6.9 jsou tvořeny součtem proudu zátěže a vyrovnávacího proudu I_v . Hlavní podobu tvaru křivek vtiskla činná složka proudu, nicméně díky jalové složce, která teče opačným směrem, dochází ve srovnání s profilem P k výraznému narovnání sklonu výsledné proudové křivky.

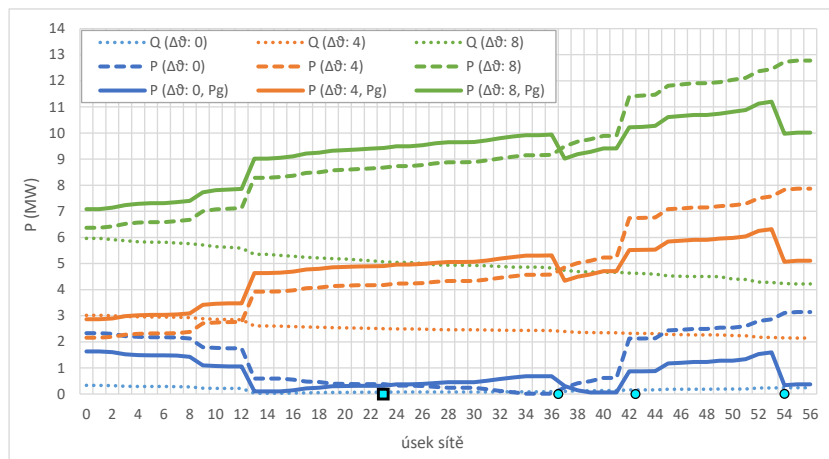
V místech, kde obě složky proudu nabývají srovnatelné velikosti dochází ke snížení účinníku až pod hodnotu 0,7, což je vidět ve snížení max. hodnoty proudu (tenkou čarou) pro spínání bezkomorovými úsečníky. Z tohoto pohledu se jeví problematická první polovina vývodu B ve variantě bez lokálních zdrojů, kdy se ve zmíněném úseku velikost proudu pohybuje nad stanovenou hranicí.

Na Obr. 6.10 jsou znázorněny profily napětí, do kterých se promítl úbytek napětí vyvolaný vyrovnávacím proudem, který roste společně s $\Delta\vartheta$. Produkce lokálních zdrojů se projeví posunutím napěťového profilu směrem nahoru – v prostřední části grafu přibližně o 3–4 %.

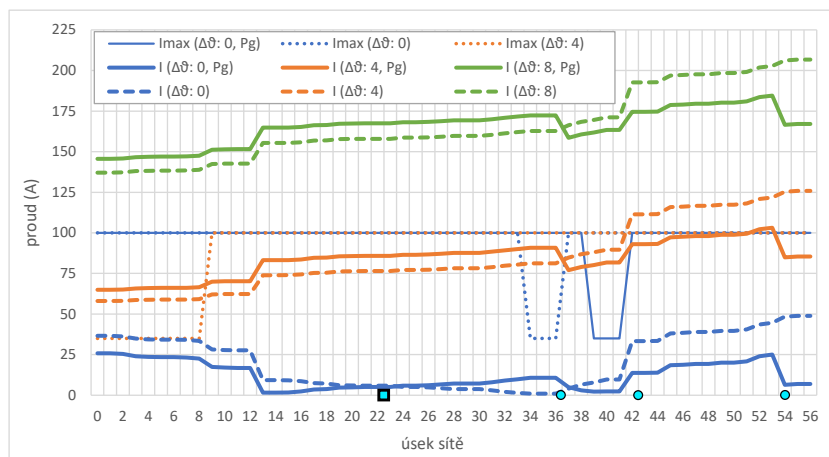
Varianty výpočtových simulací, kdy fázor napětí ve stanici B předbíhá fázor ve stanici A , jsou znázorněny na Obr. 6.11 a Obr. 6.12. Díky toku vyrovnávacího proudu v opačném směru tečou pro nenulové $\Delta\vartheta$ opačným směrem i P, Q, I . Podobně se projeví i vliv lokálních zdrojů, kdy v první polovině vývodu A nyní dojde k proudovému odlehčení místo nárůstu. Přestože došlo ke změně směru toku vyrovnávacího proudu, jeho velikost se v oblasti rozhraní vývodů (úsek 23) oproti předchozí variantě razantně nezměnila.



Obr. 6.10: Profil U při toku I_v ze stanice A do B



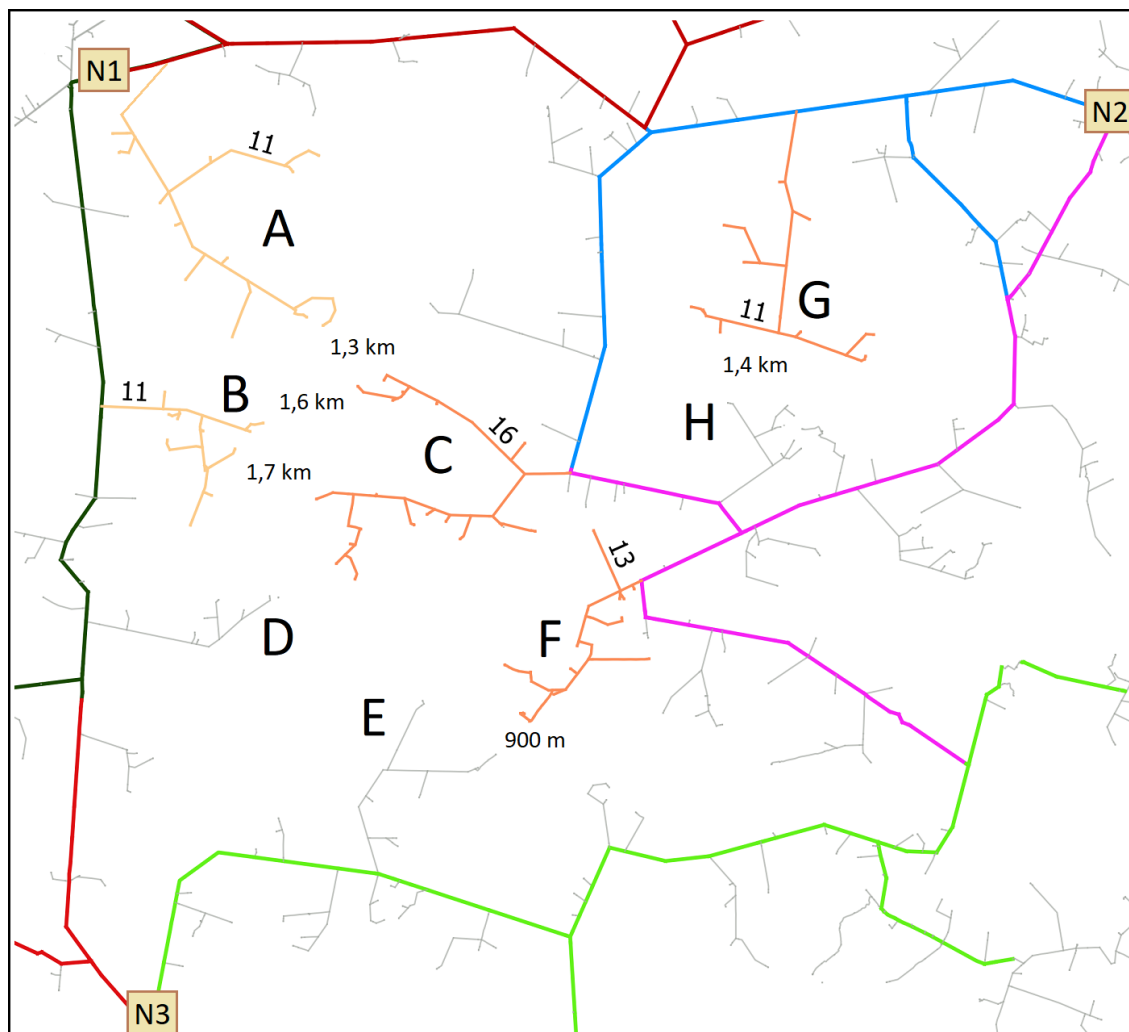
Obr. 6.11: Profil P, Q při toku I_v ze stanice B do A



Obr. 6.12: Profil I při toku I_v ze stanice B do A

6.6 Analýza propojení odboček sítě vn

V rámci analýzy kmenů a odboček byly aplikovány postupy z kapitoly 4.5.1 na model reálné sítě vn. Nad sítí, jejíž výřez je znázorněn na Obr. 6.13, bylo provedeno trasování kmenů a odboček včetně jejich klasifikace z hlediska počtu DTS a indexu HTS, který charakterizuje technický stav úseků vedení v odbočce.



Obr. 6.13: Analýza odboček sítě vn

Na Obr. 6.13 jsou písmeny označeny jednotlivé odbočky, u kterých je rovněž uveden počet napájených DTS a vypsána přibližná vzdálenost k protilehlé odbočce. Podbarveny jsou pouze odbočky, u kterých bylo nalezeno 10 a více DTS. Odstín žluto-oranžové barvy v případě odboček značí technický stav dle HTS - čím vyšší hodnota (horší kondice), tím tmavší barva. Kmenové linky jsou podbarveny na základě příslušnosti k vývodu vn. Znázorněny jsou rovněž napájecí stanice N1–N3.

Kromě propojení H a G by ve všech případech došlo k propojení odboček, napájených přes vývody z různých transformačních stanic 110 kV/vn, což je výhodné z hlediska redundance, nikoliv však z hlediska velikosti vyrovnávacího proudu. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, napájení vývodů ze stejného transformátoru poskytuje mnohem příznivější podmínky pro trvalý paralelní provoz. Pakliže jsou vývody napájeny z jiných transformátorů nebrání to jejich dočasnému propojení za účelem vytvoření alternativní konfigurace sítě, musí se však ohlídat velikost vyrovnávacího proudu a vypínací schopnost prvků, kterými je při rekonfiguraci manipulováno, viz kapitolu 4 a 5.

Tab. 6.4: Shrnutí analýzy propojení odboček vn

Odbočka	Počet DTS	HTS	S_{pr} (mm ²)	S_{min} (mm ²)	Propojení vzdálenost, terén
A	11	34	42	35	C 1,3 km (louka)
B	11	40	49	35	C 1,7 km (louka)
C	16	51	44	35	A 1,3 km (louka)
					B 1,7 km (louka)
					D 1,3 km (pole, železnice, obec)
D	7	43	41	35	C 1,3 km (pole, železnice, obec)
E	7	60	40	35	F 0,9 km (les, cesta)
F	13	52	61	35	E 0,9 km (les, cesta)
G	11	49	41	35	H 1,4 km (louka, pole)
H	7	53	39	35	G 1,4 km (louka, pole)

V Tab. 6.4 je uvedeno shrnutí analýzy propojení odboček. Z hlediska potenciálního dopadu na zvýšení spolehlivosti se jeví jako perspektivní propojení odboček $A-C$ a $B-C$ prostřednictvím dvou dominantních větví odbočky C . Danou variantou propojení by vznikla kruhová topologie pokrývající až 38 DTS. Dále by vznikla celá řada variant napájení v závislosti na umístění spínacích prvků od stávajícího schématu, přes provoz dvou dlouhých paprsků, až po provoz uzavřené smyčky při odpojení odbočky C od stávajícího vývodu. Celkem by bylo nutné dostavět přibližně 3 km trasy vedené po louce. Z hlediska typu vodiče jsou hlavní úseky odboček A , B , C typu AlFe6 42 mm². V závislosti na lokálních výkonových a zkratových poměrech by daný průřez musel být zkontrolován výpočty pro různé varianty napájení. Pakliže by průřez nevyhověl, nedávala by rekonstrukce hlavní trasy odboček s přihlédnutím k parametru HTS příliš smysl, neboť úseky stávajících vedení jsou v dobrém technickém stavu.

S ohledem na parametr HTS a délku propojení se z ekonomického hlediska jeví jako výhodné propojení odboček E a F , které dohromady napájí 20 DTS. V odbočce

E se na několika hlavních úsecích vyskytuje průřez vodiče 35 mm^2 , což by mohlo být problematické. Zároveň hodnota HTS této odbočky činí 60, což ukazuje horší technický stav, díky kterému by dávala rekonstrukce s prodloužením až do odbočky *F* smysl.

Z uvedené analýzy vyplývá, že při plánování rozvoje sítě vn je potřeba vzít v úvahu mnoho parametrů, které se individuálně liší pro danou oblast sítě. Dále je patrné, že práci může technikům rozvoje značným způsobem ulehčit automatizace, která zpracuje rozsáhlé podklady na základě stanovené metodiky, připraví agregované výstupy, čímž poskytne podporu pro rozhodování a prioritizaci v rámci procesů spojených s plánováním a rozvojem DS.

7 Závěr

Práce se zabývá jedním z perspektivních trendů v oblasti provozu a rozvoje distribučních sítí, konkrétně kruhováním a paralelním provozem vývodů vn.

Pro účely provádění analýz byly vytvořeny vlastní analytické nástroje a výpočetní knihovny. U Newton-Raphson metody, používané pro výpočty ustáleného chodu soustavy, byl z důvodu zvýšení její numerické stability implementován stabilizační algoritmus a pro modelování zdrojů s regulací Q byla doplněna logika přepínání PU uzlu na PQ a zpět, s ohledem na porušení mezí jalového výkonu. Pro účely topologického zpracování dat byly implementovány trasovací algoritmy, které byly mimo jiné použity pro vyhledávání ostrovů v síti, vyhledávání zkruhované topologie, identifikaci kmenových linek a odboček a tvorbě napájecích stromů. Z provedených analýz a porovnání s komerčními SW vyplývá, že vytvořená výpočetní knihovna má potenciál pro využití v praxi a to zejména v oblasti plánování a rozvoje pro výpočty variantních stavů sítě.

Vyhodnocení měření fázorů napájecích napětí ve stanicích 110 kV/vn prokázalo, že rozdílový úhel napětí mezi stanicemi se mění co do denní doby výskytu, ale i rozsahu naměřených velikostí. U stanic napájených z různých uzlových oblastí vvn byly změřeny značné rozdílové úhly, v některých případech více než 20° . Rozdílový úhel napětí je ovlivněn i produkcí zdrojů připojených ve vývodech vn (vysledována souvislost mezi odlehčením vývodu v důsledku zvýšené výroby a změnou rozdílového úhlu). Závislost velikosti vyrovnávacího proudu na rozdílovém úhlu napětí je víceméně lineární a lze ji použít pro posouzení bezpečnosti manipulací v síti s propojenými vývody.

Při analýzách propojení vývodů vn lze s určitými zjednodušeními odhadnout vyrovnávací proud na základě znalosti impedance obvodu a rozdílu fázorů napětí. Pro podrobnější analýzy nad rozsáhlou sítí s nerovnoměrně rozloženou zátěží a lokálními zdroji však není tento zjednodušený odhad dostatečný a je nutné použít výpočet chodu soustavy. Bylo zjištěno, že SW dostupné na trhu nedokážou modelovat konstantní rozdíl úhlu napětí mezi napájecími uzly, což bylo nezbytné pro následné analýzy. Vlastní navržený algoritmus modifikuje Newton-Raphson numerickou metodu a je schopen moderovat požadovaný rozdíl úhlů napětí injekcí činného výkonu ve druhém napájecím uzlu. Navržený algoritmus byl úspěšně verifikován porovnáním s výsledky měření poskytnutými provozovatelem DS.

Analýza proudových a výkonových poměrů v síti s propojenými vývody byla provedena pro modelový případ napájení ze dvou různých transformátorů. Výpočtové simulace byly provedeny pro různé rozdílové úhly napětí, zatížení vývodů a produkci připojených decentrálních zdrojů. Pro jednotlivé varianty byla stanovena pásma rizikového spínání, tj. úseky na vývodech, kde úsekové odpínače bez zhášecí komory

nemají dostatečnou vypínací schopnost bezpečně rozepnout propojené vývody. Z vyhodnocených simulací vyplývá, že určení pásem rizikového spínání nelze jednoduše zobecnit. Lokace problematického úseku silně závisí na aktuálních podmínkách, tj. zatížení sítě, rozdílovém úhlu napětí, umístění, aktuální produkci a provozním režimu připojených zdrojů. Z provedených simulací dále vyplývá, že všemi spínacími prvky v poli vn lze bezpečně manipulovat do 2° až 3° rozdílového úhlu mezi napájecími uzly, což odpovídá provozní zkušenosti. Pro spínání při větších rozdílových úhlech je nutné disponovat nástrojem, který dokáže na základě stavu sítě identifikovat pásma rizikového spínání, nebo posoudit dostatečnou vypínací schopnost pro konkrétní spínací prvek.

Vyvinuté postupy a metody byly aplikovány pro analýzu reálné sítě vn s cílem ověřit zákonitosti zjištěné pro modelový případ a analyzovat i další varianty stavu sítě. Nejprve byly provedeny simulace pro napájení každého vývodu ze samostatného transformátoru. Oproti modelovému obvodu byly simulovány oba stavy kladného i záporného rozdílového úhlu mezi napájecími stanicemi. Z výsledků analýz vyplývá, že zákonitosti chování modelového obvodu platí i pro vývody reálné sítě vn. Pro napájení vývodů ze společného transformátoru byly analyzovány i napěťové poměry při radiálním a paralelním napájení a náhradních provozech. Paralelní napájení vede v tomto případě k narovnání napěťového profilu. Nárůst či snížení napětí v daném vývodu je dáno původním zatížením a také lokací a provozem připojených zdrojů. Při náhradním napájení se projevuje výrazný vliv lokálních zdrojů na napěťové poměry zejména v případě, kdy jsou zdroje instalovány ve vzdálenějším vývodu od místa napájení. Obecně lze říci, že poměr výkonu lokálních zdrojů k zatížení vývodů je klíčový při posuzování vlivu na napěťový profil.

Obecně se usuzuje, že paralelní provoz vývodů je jednoduchým řešením jak zvýšit připojitelný výkon lokálních zdrojů. Pro paralelní napájení vývodů ze společného transformátoru byla tedy provedena analýza možného navýšení připojitelného výkonu zdrojů v různém režimu provozu. Rovnoměrnější rozložení proudu při tomto napájení se příznivě promítne i do napěťových poměrů a v konečném důsledku i do navýšení připojitelného výkonu z hlediska posuzování změny napětí. U konkrétní sítě bylo prokázáno možné navýšení přibližně o 50 % při jednotkovém účinníku. Při induktivním účinníku zdroje ($\text{odběr } Q$) $\cos \varphi = 0,95$ však došlo pouze k minimálnímu navýšení připojitelného výkonu oproti radiálnímu napájení. Provoz zdroje s induktivním účinníkem nezpůsobí tak výrazné zvýšení napětí. Je tedy možné připojit vyšší výkony zdrojů, nicméně je potřeba počítat s navýšením proudového zatížení vývodu v důsledku navýšení výkonu, ale i toku jalového výkonu. Paralelní provoz pak může zajistit rovnoměrnější rozložení proudu oproti radiálnímu provozu. Z analýz připojitelnosti zdrojů dále vyplývá, že z hlediska max. proudové zatížitelnosti je nejvíce limitující varianta vzájemného náhradního napájení obou vývodů.

Pro účely rozvoje zkruhované sítě byla v rámci této práce navržena metodika a postupy automatizovaného zpracování topologických dat s využitím trasovacích úloh pro identifikaci kmenů a odboček sítě vn. Klasifikace odboček z hlediska vhodnosti k zakruhování byla provedena na základě počtu napájených DTS, odběrných míst a hodnocení technického stavu. Ukázka aplikace dané metodiky byla provedena pro klasifikaci odboček reálné sítě, jejichž konce jsou ve vzdálenosti do tří kilometrů a byly vytipovány jako potenciálně vhodné k zakruhování.

7.1 Zhodnocení vlastních přínosů

Hlavním přínosem práce je poskytnutí systematického pohledu na chování sítí vn při paralelním provozu vývodů. Rozsáhlejší analýzy podobného typu nebyly v našich podmínkách dosud prováděny. Výsledky analýz proto mohou v tomto směru poukázat na silné a slabé stránky uvedených schémat napájení a tím přispět k rozvoji sítí a být východiskem pro návazné studie. Důležitým přínosem je dále stanovení metodiky výpočtu vyrovnávacího proudu. Implementace vlastního algoritmu pro modelování konstantního úhlu napětí mezi napájecími stanicemi umožňuje provádět stovky variantních výpočtů pro různé úhlové a výkonové poměry se zohledněním vlivu lokálních zdrojů.

Další přínos práce spočívá v návrhu postupů pro automatizovanou identifikaci kmenových linek, odboček sítě a jejich klasifikace dle hlediska technického stavu zařízení, počtu DTS a dalších parametrů. Tyto postupy byly začleněny do navržené metodiky rozvoje zkruhované sítě vn a implementovány do nástroje, pomocí něhož bylo demonstrováno použití metodiky nad konkrétní sítí. Obdobné analýzy se doposud prováděly převážně ručním zpracováním dat s využitím znalostí a provozních zkušeností techniků rozvoje. Implementace navržené metodiky společně s automatizovaným zpracováním dat poskytují přehledné agregované výstupy, které mají potenciál praktického využití pro podporu při rozhodování a prioritizaci v rámci procesů plánování a rozvoje DS.

Práce rovněž přináší nový pohled na posuzování připojitelnosti zdrojů pro sítě s paralelně provozovanými vývody. Upozorňuje na faktory, které omezují maximální připojitelný výkon zdrojů a identifikuje slabá místa, kterým by měla být při dalším rozvoji sítě přidělena priorita. Posouzení připojitelnosti při paralelním napájení vývodů nebyla doposud věnována pozornost, neboť jde zatím o ojedinělý způsob napájení. Výsledky práce by mohly představovat první krok sestavení ucelené metodiky pro posuzování připojitelnosti zdrojů v paralelně napájených sítích.

7.2 Možnosti v pokračování výzkumu

Perspektivní směr pokračování výzkumu autor spatřuje ve vytvoření společného modelu sítí 110 kV a vn pro účely rozsáhlých výpočtových simulací různých schémat napájení v rámci uzlové oblasti. Při paralelním provozu vývodů vn lze očekávat silnější vzájemné ovlivňování chodu obou sítí. Tento typ simulací by bylo možné použít i k analýze trvalého propojení vývodů vn napájených z různých stanic 110 kV. Zatížení linek by se poté dalo posoudit pro různé stavy na základě kontingenční analýzy pro kritérium N-1 na obou hladinách.

S ohledem na rostoucí rozsah měřených dat zejména v poli sítě vn se nabízí jejich využití pro zpřesnění síťových výpočtů v daném časovém řezu, například pomocí stavové estimace. Jako perspektivní se jeví využití těchto dat zejména pro účely zpřesnění rozložení zátěže mezi jednotlivé DTS.

Další možný směr pokračování výzkumu tkví v provedení detailnějších analýz dopadu zdrojů připojovaných do sítě vn a to z hlediska jejich velikosti, kombinace umístění a produkce při zohlednění různých režimů provozu.

Literatura

- [1] ČSN EN 50 160 – *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [2] *PPDS – Pravidla provozování distribuční soustavy* [online]. ČEZ Distribuce, a.s., 2018
- [3] *Vyhláška č. 540/2005 Sb. o kvalitě dodávek elektřiny a souvisejících služeb v elektroenergetice*
- [4] *Zásady cenové regulace pro období 2016-2018 pro odvětví elektroenergetiky, plynárenství a pro činnosti operátora trhu v elektroenergetice a plynárenství*. Praha: Energetický regulační úřad, 2015
- [5] *Roční zpráva o provozu ES ČR 2017*. Praha: Oddělení statistiky a sledování kvality ERÚ, 2017.
- [6] *Dílčí výstupy národního akčního plánu pro smart grids, pracovní skupiny A9,13* Praha: České sdružení regulovaných elektroenergetických společností, 2017.
- [7] *Souhrnná zpráva o dosažené úrovni kvality distribuce elektřiny a souvisejících služeb* [online]. ČEZ Distribuce a.s., 2015
- [8] KOLÁŘ L., KOUBA D., ČELEDA J., MÚDRY P. *Automatizace VN sítí - Recloser*. Konference ČK CIRED 2014, 2014.
- [9] ŠEFRÁNEK J. *Vyhodnocení kvality dodávek elektřiny za rok 2017* Konference ČK CIRED 2018, 2018.
- [10] L. Tang, F. Yang and J. Ma, A survey on distribution system feeder reconfiguration: Objectives and solutions, 2014 *IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT ASIA)*, Kuala Lumpur, 2014, pp. 62–67. doi: 10.1109/ISGT-Asia.2014.6873765
- [11] S. W. Wang, C. Y. Hung and D. C. Lin, Loop-type feeder models for fast distribution system calculations, 2012 *10th International Power and Energy Conference (IPEC)*, Ho Chi Minh City, 2012, pp. 611–615. doi: 10.1109/ASSCC.2012.6523338
- [12] DURK, S., S. LATEEF a Y. BAGHZOUZ, Feeder switch currents during load transfer. In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004*. IEEE, 2004, s. 28–31. DOI: 10.1109/PES.2004.1372743. ISBN 0-7803-8465-2.

- [13] TESAŘOVÁ M., JIŘIČKA J., CHROMÝ J., Posouzení možnosti spínání uzlových oblastí 22 kV na základě vyhodnocení synchronního měření fázorů v transformovnách 110/22 kV. In: *IX. Konference Energetické rušení v distribučních a průmyslových sítích*. 2014. ISBN 978-80-905933-0-5.
- [14] BERMAN A., MARKUSHEVICH N., Analysis of three-phase parallel distribution feeders fed from different substations. In: *IEEE PES T&D 2010*. IEEE, 2010, s. 1–8. DOI: 10.1109/TDC.2010.5484260. ISBN 978-1-4244-6546-0.
- [15] YANG W.C., HUANG W. T., GU Y. D., Analysis of Interconnected Distribution Feeders Under Unbalanced Operation Conditions Using OrCAD PSpice, *IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, Bangkok, 2006, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICCIS.2006.252324
- [16] BERNARDON D.P., COMASSETTO L., VEIGA F.D., CANHA L.N., Studies of parallelism in distribution networks served by different-source substations, *Electric Power Systems Research*, Volume 78, Issue 3, March 2008, Pages 450–457, ISSN 0378-7796
- [17] Podpora spínání v distribučních sítích. AIS spol. s r.o. [online]. Brno [cit. 2016-08-19]. Dostupné z: <<http://www.ais-brno.cz/switching-distribution-networks.php>>
- [18] PFITSCHER L.L., BERNARDON D.P., CANHA L.N., MONTAGNER V.F., GARCIA V.J., ABAIDE A.R., Intelligent system for automatic reconfiguration of distribution network in real time, *Electric Power Systems Research*, Volume 97, April 2013, Pages 84–92, ISSN 0378-7796
- [19] PFITSCHER L.L., BERNARDON D.P., CANHA L.N., MONTAGNER V.F., ABAIDE A.R., SALDANHA J.J.A., A methodology for real time analysis of parallelism of distribution networks, *Electric Power Systems Research*, Volume 105, December 2013, Pages 1–8, ISSN 0378-7796
- [20] The revised Renewable Energy Directive [online]. Brusel [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/directive_renewable_factsheet.pdf>
- [21] Clean Energy For All Europeans. Brusel, 2016. Dostupné z: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52016DC0860>>
- [22] Národní akční plán pro chytré sítě (NAP SG). Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, 2015. Dostupné z: <<https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/52353/60358/633373/priloha003.pdf>>

- [23] Národní akční plán čisté mobility (NAP ČM). Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, 2015. Dostupné z: <https://www.dataplan.info/img_upload/7bdb1584e3b8a53d337518d988763f8d/nap-cm-final.pdf>
- [24] KOUBA D., KOPT M., CHRÁŠŤANSKÝ F., SLÁDKOVÁ V., BROŽ F. *Optimalizace nasazení investičních opatření vzhledem ke spolehlivosti DS* Příspěvek na ČK CIRED 2014. Tábor, 2014.
- [25] KAŠPÍREK M., JIŘIČKA J., MIKULÁŠ L. *Vyhodnocení parametrů kvality napětí v nn sítích s rozptýlenou výrobou* Příspěvek na ČK CIRED 2016. Tábor, 2016.
- [26] ŠVEC J., KŮLA J., DERNER P., HES S. *Integrace výroben s U/Q regulací do distribučních sítí vn* Příspěvek na ČK CIRED 2018. Tábor, 2018.
- [27] ŠVEC J., KŮLA J., DERNER P., HES S. *Možnosti zvýšení připojitelnosti výroben s autonomními regulačními charakteristikami na hladině nn* Příspěvek na ČK CIRED 2018. Tábor, 2018.
- [28] CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group. SG-CG/M490/F Overview of SG-CG Methodologies Technical Report CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group. Brussels, Belgium, 2014.
- [29] TESAŘOVÁ, M. Posouzení možnosti spínání uzlových oblastí 22 kV na základě vyhodnocení synchronního měření fázorů v transformovnách 110/22 kV. E.ON Česká republika, s.r.o., 2014.
- [30] ZIMMERMAN, R. D. AC Power Flows, Generalized OPF Costs and their Derivatives using Complex Matrix Notation. [online]. [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/TN2-OPF-Derivatives.pdf>
- [31] CHAKRABARTI A., HALDER S. Power system analysis: operation and control. 3rd ed. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2010. ISBN 978-812-0340-152.
- [32] KUNDUR, P. Power system stability and control. New York: McGraw-Hill, 1994. ISBN 978-007-0635-159
- [33] VELEBA J. Acceleration and stability techniques for conventional numerical methods in load flow analysis. Článek na konferenci ELEN 2010.
- [34] DAVIDS, T. A. Direct Methods for Sparse Linear Systems. Soc. for Industrial and Applied Math., Philadelphia, PA, USA 2006. ISBN: 978-0-89871-613-9.

- [35] GHOSH B. Breadth First search and Depth First search – Finding connected components [online]. Indian Statistical Institute, Delhi Centre [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.isid.ac.in/~deepayan/ICP2017/projects/Biswadeep_Ghosh/report.pdf>
- [36] TERINGL A., KAŠPAR D. *Simulace obnovy majetku v ČEZ Distribuce a.s.* Příspěvek na ČK CIRED 2018. Tábor, 2018.
- [37] DUAN Y., WANG C., ZHOU W. Topology modeling of distribution network based on open-source GIS. In: 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). IEEE, 2011, s. 527-530. DOI: 10.1109/DRPT.2011.5993948. ISBN 978-1-4577-0364-5.

Vlastní publikace

Recenzované příspěvky na mezinárodních konferencích v databázi WoS a SCOPUS

- [A1] TESAŘOVÁ, M., VYKUKA, R. Impact of distributed generation on power flows along parallelly operated MV feeders. In Conference Proceedings 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC /I&CPS Europe). Piscataway: IEEE, 2018. s. 614-619. ISBN: 978-1-5386-5186-5
- [A2] VYKUKA, R., NOHÁČOVÁ, L. Sensitivity factors for contingency analysis. In Proceedings of the 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, 2015. s. 551-554. ISBN: 978-1-4673-6788-2 , ISSN: 2376-5623
- [A3] NOHÁČOVÁ, L., VYKUKA, R., ŽÁK, F., KROPÁČEK, V. Electrical distribution networks with isolated neutral point : the value of the capacitive earth-fault current and impact on the operation of these network. In Proceedings of the 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA 2015). Košice: Technical University of Košice, 2015. s. 73-76. ISBN: 978-80-553-2187-5
- [A4] VYKUKA, R., TESAŘOVÁ, M. Evaluation of power distribution along interconnected middle voltage feeders. In Proceedings of the 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Prague: Czech Technical University in Prague, 2016. s. 91-96. ISBN: 978-1-5090-0907-7
- [A5] TESAŘOVÁ, M., VYKUKA, R. Loading of interconnected feeders fed from different substations. In Proceedings of the 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA 2015). Košice: Technical University of Košice, 2015. s. 97-100. ISBN: 978-80-553-2187-5

Recenzované příspěvky na mezinárodních konferencích v databázi WoS

- [A6] VYKUKA, R., NOHÁČOVÁ, L. Fast-Decoupled Method for Contingency Analysis. In Proceedings of 15th International Scientific Conference on ELECTRIC POWER ENGINEERING. Brno: University of Technology, 2014. s. 35-38. ISBN: 978-1-4799-3806-3

Recenzované příspěvky na mezinárodních konferencích

- [A7] TESAŘOVÁ, M., VYKUKA, R., KAŠPÍREK, M. Impact of wind power plant operation on MV distribution grids. In 24th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2017): /USB proceedings/. Glasgow: Institution of Engineering and Technology, 2017. s. 1-5. ISBN: 978-1-78561-483-5, ISSN: 2032-9644
- [A8] VYKUKA, R., NOHÁČOVÁ, L. CONTINGENCY ANALYSIS COMPUTED BY REPEATING POWER FLOW ANALYSIS. In Proceedings of the 11th International Scientific Conference Control of Power Systems. Tatranské Matiare, Slovakia: Slovak University of Technology in Bratislava, 2014. s. 525-528. ISBN: 978-80-89402-72-4

Příspěvky na tuzemských konferencích

- [A9] VYKUKA, R., TESAŘOVÁ, M. Analýza výkonových toků na distribučních trafostanicích 22/0,4kV. In Referáty 21. konference ČK CIRED. Praha: Český komitét CIRED, 2017. s. 1-7. ISBN: 978-80-905014-6-1
- [A10] VYKUKA, R., TESAŘOVÁ, M. Vyhodnocení vlivu lokálních výroben na výkonové a proudové poměry podél propojených vývodů 22 kV. In Elektrotechnika a informatika 2016. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. s. 197-200. ISBN: 978-80-261-0516-9
- [A11] TESAŘOVÁ, M., VYKUKA, R., KAŠPÍREK, M. Hodnocení provozu větrných elektráren připojených do distribuční sítě 22 kV. In Referáty 20. konference ČK CIRED. Praha: Český komitét CIRED, 2016. s. 1-16. ISBN: 978-80-905014-5-4
- [A12] VYKUKA, R. Porovnání metod pro kontingenční analýzu obecně rozsáhlých sítí. In Elektrotechnika a informatika 2013. Část 3., Elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013. s. 37-40. ISBN: 978-80-261-0234-2
- [A13] VYKUKA, R. Návrh a vývoj softwaru pro kreslení, vizualizaci a výpočty elektrizačních soustav. In Elektrotechnika a informatika 2014. Část 3., Elektrotechnika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. s. 37-40. ISBN: 978-80-261-0368-4
- [A14] VYKUKA, R., TESAŘOVÁ, M. Vyhodnocení výkonových a proudových poměrů podél propojených vývodů 22 kV. In Elektrotechnika a informatika 2015. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. 259-262. ISBN: 978-80-261-0514-5
- [A15] TESAŘOVÁ, M., VYKUKA, R., KAŠPÍREK, M. Hodnocení provozu větrných elektráren připojených do VN distribuční sítě. In Sborník XII. konference

- ERU 2016. Brno: ELCOM a.s., 2016. s. 110-126. ISBN: 978-80-905933-1-2
- [A16] JIŘIČKA, J., CHROMÝ, J., ŠTĚPKA, V., TESAŘOVÁ, M., VYKUKA, R. Využití synchronního měření fázorů k eliminaci negativních dopadů na odběratele při spínání různých sítí 22 kV. In Referáty 19. konference ČK CIRED. Praha: Český komitét CIRED, 2015. s. 1-24. ISBN: 978-80-905014-4-7

Příspěvky v recenzovaných časopisech bez impakt faktoru

- [A17] TESAŘOVÁ, M., VYKUKA, R., KAŠPÍREK, M. Impact of wind power plant operation on MV distribution grids. In CIRED : Open Access Proceedings Journal, Iss. 1. Stevenage: Institution of Engineering and Technology, 2017. s. 724-728. ISBN: neuvedeno , ISSN: 2515-0855
- [A18] TESAŘOVÁ, M., VYKUKA, R. Vyhodnocení výkonových toků na rozhraní napěťových hladin vn/nn. Energetika : odborný časopis pro elektrárství, teplárství a užití energie, 2017, roč. 67, č. 6, s. 394-398. ISSN: 0375-8842
- [A19] TESAŘOVÁ, M., VYKUKA, R. Vyhodnocení výkonových toků v sítích VN a na rozhraní napěťových hladin VVN/VN. Energetika : odborný časopis pro elektrárství, teplárství a užití energie, 2017, roč. 67, č. 5, s. 313-317. ISSN: 0375-8842
- [A20] NOHÁČ, K., NOHÁČOVÁ, L., TESAŘOVÁ, M., VELEBA, J., VYKUKA, R. Využití aplikací WAMS-BIOZE-Detektor a MVA-Schematic v sítích s připojenými OZE. Energetika: recenzovaný neimpaktovaný měsíčník pro elektrárství, teplárství a užití energie, 2015, roč. 65, č. 12, s. 627-630. ISSN: 0375-8842

Kapitoly v knize

- [A21] VYKUKA, R., NOHÁČOVÁ, L. Comparison of methods for contingency analysis. In Electric Power Engineering and Ecology - Selected Parts VI. Praha: BEN - odborná literatura, 2017, s. 66-75. ISBN: 978-80-7300-551-1

Výzkumné zprávy

- [A22] TESAŘOVÁ, M., VYKUKA, R. Posouzení bezpečného spínání uzlových oblastí 22 kV v závislosti na rozdílu úhlu napětí v napájecích bodech sítě a na umístění vypínacího prvku podél propojených vývodů. E.ON Česká republika, s.r.o., 2015.
- [A23] TESAŘOVÁ, M., VYKUKA, R. Hodnocení provozu větrných elektráren připojovaných do distribuční sítě VN. E.ON Česká republika, s.r.o., 2016.

Vyvinutý software

[A24] VYKUKA, R., NOHÁČOVÁ, L. MVA Schematic. 2014.

Přednášky v zahraničí

[A25] VYKUKA, R. Numerical Methods for Secure Operation of Transmission Systems. Deggendorf Institute of Technology, Deggendorf, Germany, 2014.

Závěrečné zprávy ze zahraniční stáže

[A26] VYKUKA, R. Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Germany. 2016.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

AMM	Advanced Metering Management
ASDŘ	Automatizované systémy dispečerského řízení
ASEK	Aktualizovaná státní energetická koncepce
BPS	Bioplynová stanice
BFS	Breadth-First Search
BOM	Bus Oriented Model
BROM	Breaker Oriented Model
ČR	Česká Republika
CEP	Čistá energie pro všechny Evropany
CENELEC	Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice
DECE	Decentrální zdroje energie
DFS	Depth-First Search
DTS	Distribuční trafostanice
DTR	Distribuční transformátor
DS	Distribuční soustava
EU	Evropská unie
ES	Elektrizační soustava
ERÚ	Energetický regulační úřad
FVE	Fotovoltaická elektrárna
HDO	Hromadné dálkové ovládání
HTS	Hodnocení technického stavu
KZL	Kombinované zemní lano
Load Flow	Výpočet ustáleného chodu soustavy
MAIFI	Momentary Average Interruption Frequency Index
MVE	Malá vodní elektrárna
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
NAP-SG	Národní akční plán pro chytré sítě
nn	Nízké napětí
NR	Newton-Raphson numerická metoda
OM	Odběrné místo
OZ	Automatika opětovného zapnutí
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PS	Přenosová soustava
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav
RTU	Remote Terminal Unit
SAIDI	System Average Interruption Duration Index
SAIFI	System Average Interruption Frequency Index

vn	Vysoké napětí
vvn	Velmi vysoké napětí
WAMS	Wide Area Monitoring System
zvn	Zvláště vysoké napětí
V^*	Veličina komplexně sdružená
$V^{(p)}$	Hodnota veličiny v p iteraci
V_i	hodnota veličiny v i prvku
V_{ik}	Hodnota veličiny mezi uzly i a k
j	Komplexní jednotka
n_b, n_l	Počet uzlů respektive větví sítě
nq, nuq	Počet PQ uzlů respektive PU+PQ uzlů
U	Velikost sdruženého napětí
U	Fázor sdruženého napětí
U_f	Fázor fázového napětí
$U_{i\ set}$	Velikost napětí udržovaného v uzlu i
U_n	Velikost jmenovitého napětí
ϑ	Úhel fázoru napětí
p	Komplexní převod transformátoru
I	Fázor proudu
I_k	Velikost zkratového proudu
Z	Komplexní impedance prvku
R, X, G, B	Odpor, reaktance, vodivost (svod), susceptance
S	Zdánlivý výkon
S	Komplexní výkon
P_z	Činný výkon zátěže
P, Q	Činný a jalový výkon
P_g, Q_g	Generovaný činný a jalový výkon
P_i, Q_i	Injektovaný činný a jalový výkon
P_l, Q_l	Odebíraný činný a jalový výkon
$Q_{g\ max}$	Maximální generovaný jalový výkon
$Q_{g\ min}$	Minimální generovaný jalový výkon
Y_{ik}, Y_{ik0}	Podélná a příčná komplexní admitance π -článku
B_{sh}, G_{sh}	Kompenzační susceptance a vodivost (moderují injekci P, Q do uzlu)
ε	Mezní odchylka výpočtu
JAC	Jacobiho matice
H, N, J, L	Submatice Jacobiho matice
A	$nb \times nb$ admitanční matice
A_{ik}	prvek v admitanční matici v řádku i a sloupci k
I_{bus}	$nb \times 1$ vektor fázorů proudů

\mathbf{S}_{bus}	$nb \times 1$ vektor komplexních výkonů
\mathbf{U}_{bus}	$nb \times 1$ vektor fázorů napětí
U_{bus}	$nb \times 1$ vektor velikostí napětí
\mathbf{U}_{diag}	$nb \times nb$ diagonální matice s vektorem \mathbf{U}_{bus} na diagonále
\mathbf{U}_{norm}	$nb \times nb$ diagonální matice s vektorem \mathbf{U}_{bus}/U_{bus} na diagonále
\mathbf{I}_{diag}	$nb \times nb$ diagonální matice s vektorem \mathbf{I}_{bus} na diagonále
\mathbf{G}_u^S	$nb \times nb$ matice s hodnotami parciálních derivací \mathbf{S}_{bus} podle U
\mathbf{G}_ϑ^S	$nb \times nb$ matice s hodnotami parciálních derivací \mathbf{S}_{bus} podle ϑ

Seznam příloh

A Přílohy	114
A.1 Seznam testovacích sítí	114
A.2 Fotodokumentace spínacích prvků v poli vn	115

A Přílohy

A.1 Seznam testovacích sítí

Tab. A.1: Seznam sítí použitých pro testování Load Flow výpočtů

Sít	Název, popis, zdroj
EPS0059	Simplified 59-Bus 14-Generator Test Case (SE Australia) Case C, peak load conditions (G 25430 MW, L 24800 MW) Zdroj: Gibbard / Vowles, 2008
IEEE145	IEEE 145 Bus Test Case Year 1990, Summer Season: 50-Gen Case Zdroj: IEEE Working Group, 1990
IEEE300	IEEE 300 Bus Test Case (US) Year 1991, Summer Season Zdroj: CYME INTERNATIONAL, 1991
EPS0734	734Bus Test Case (UK) Scotland+WalesArea – modified var limits Zdroj: Jan Veleba, ZČU, Pilsen, 2009
EPS2736	Polish 400, 220, 110 kV networks Summer 2004 peak conditions Zdroj: Silesian University of Technology, Gliwice, Poland, 2004
EPS2746	Polish 400, 220, 110 kV networks Winter 2003–04 off-peak conditions Zdroj: Silesian University of Technology, Gliwice, Poland, 2004
EPS3012	Polish 400, 220, 110 kV networks Winter 2007–08 evening peak Zdroj: Silesian University of Technology, Gliwice, Poland, 2008
EPS3120	Polish 400, 220, 110 kV networks Summer 2008 morning peak Zdroj: Silesian University of Technology, Gliwice, Poland, 2008

A.2 Fotodokumentace spínacích prvků v poli vn



Obr. A.1: Úsečník pružinový (na rovinné konzoli)



Obr. A.2: Úsečník se zhášecí komorou (na rovinné konzoli)



Obr. A.3: Dálkově ovládaný úsečník se zhášecí komorou a měřením U, I (na rovinné konzoli)



Obr. A.4: Dálkově ovládaný úsečník se zhášecí komorou a měřením U, I (na vedení typu pařát)



Obr. A.5: Dálkově ovládaný úsečník se zhášecí komorou na rozhraní vývodů (v rozepnutém stavu)



Obr. A.6: Odpojený recloser



Obr. A.7: Recloser v provozu