



FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

**Rozvoj a provoz distribučních sítí se zaměřením na
zabezpečení a kvalitu dodávek elektrické energie**

Autoreferát disertační práce
k získání akademického titulu doktor v oboru
Elektroenergetika

Ing. Roman Vykuka

**Rozvoj a provoz distribučních sítí se zaměřením na
zabezpečení a kvalitu dodávek elektrické energie**

Školitel: doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.
Datum státní doktorské zkoušky: 28. 11. 2016

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 zhášecí 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 zkruhování.

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. disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie. Vedoucí práce: doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.

Obsah

1 Úvod	5
1.1 Motivace	5
1.2 Současný stav řešené problematiky	6
1.3 Cíle dizertační práce	6
2 Postupu řešení a souhrn výsledků práce	8
2.1 Vyhodnocení očekávaných poměrů v síti s propojenými vývody vn . .	8
2.2 Vývoj vlastních nástrojů pro síťové výpočty a analýzy	9
2.2.1 Výpočet ustáleného chodu soustavy	9
2.2.2 Výpočet vyrovnávacího proudu simulací chodu soustavy	10
2.2.3 Trasování kmenů a odboček sítě vn	11
2.3 Analýza proudových a výkonových poměrů v síti s propojenými vý- vody vn	14
2.3.1 Vyhodnocení výkonových profilů	15
2.3.2 Vyhodnocení proudových profilů	16
2.3.3 Vyhodnocení vlivu režimu vnořené výroby	18
2.3.4 Vyhodnocení oblastí rizikových z hlediska spínání	19
2.4 Případová studie analýzy vývodů vn	20
2.4.1 Analýza propojených vývodů při napájení ze společného trans- formátoru	20
2.4.2 Analýza propojených vývodů napájených z různých transfor- mátorů	22
3 Závěr	24
3.1 Zhodnocení provedené práce a vlastní přínos	24
3.2 Možnosti v pokračování výzkumu	24
Literatura	26
Vlastní publikace	30
Seznam symbolů, veličin a zkratk	34

1 Úvod

1.1 Motivace

Změny v oblasti distribuce elektrické energie, zejména tlak na vyšší podíl OZE a zvyšování spolehlivosti dodávek, si vynucují přistoupit k inteligentnímu řízení DS a rovněž přehodnotit stávající design a způsob provozování sítí vn a nn, viz Národní akční plán pro chytré sítě (NAP-SG). Ve spojení s tlakem ERÚ na zvyšování kvality dodávek to prakticky znamená přistoupit ke kruhování vývodů či paralelnímu provozu napájeců. V současné době je trvalý paralelní provoz vývodů vn velmi ojedinělý. Vývody vn jsou většinou provozovány jako paprskové s možností propojení do uzavřené smyčky se sousedním nebo protějším vývodem, což poskytuje možnost alternativního napájení v době plánovaného přerušení dodávky nebo při odstraňování poruchy.

Při spínání vývodů je ale potřeba zajistit, aby rozdíl fázorů napětí v uzlech, kde dochází k propojování vývodů, byl pokud možno stejný co do velikosti a úhlu, jinak obvodem začne protékat vyrovnávací proud. Jelikož rozdíl velikostí napětí lze v praxi snadno ovlivnit vhodným nastavením odboček na transformátorech 110 kV/vn, limitujícím faktorem je rozdíl úhlu fázorů napětí, který je dán zejména aktuálním zapojením a zatížením nadřazené soustavy a může být výrazně ovlivněn i produkcí lokálních zdrojů připojených především do vývodů vn. V případě velkého rozdílu úhlů fázorů napětí může vyrovnávací proud v součtu s provozním proudem vést k přetížení některých prvků (např. úsek s nižším průřezem vodičů), reakci nadproudových ochran či překročení vypínací schopnosti úsekových odpínačů, což může v konečném důsledku způsobit přerušení dodávky. V případě nedostačené vypínací schopnosti úsekového odpínače je potřeba k manipulaci volit jiný odpínač s dostatečnou schopností, což může vést k většímu rozsahu sítě postižené dočasným přerušením dodávky.

Tlak na zlepšování ukazatelů nepřetržitosti dodávek nutí provozovatele DS intenzivněji se zabývat problematikou propojování vývodů vn, např. vypínací schopností úsekových odpínačů při spínání uzlových oblastí vn [29]. Pro komplexní analýzu však nebyl dispozici nástroj, který by pro zadaný rozdílový úhel mezi napájecími stanicemi vyšetřil proudové a výkonové poměry. To bylo prvotním impulsem ke vzniku této disertační práce. Původní nosné téma práce bylo v průběhu řešení doplněno např. o úlohu automatizované identifikace kmenů a odboček, posouzení sítě z hlediska možného propojování vývodů a připojitelnosti zdrojů. Další doprovodné úlohy, jako např. řízení sítí, systémy chránění a optimální nasazení distribuční automatizace nejsou v této práci řešeny.

1.2 Současný stav řešené problematiky

Problematika rekonfigurace sítě na hladině vn patří mezi živá témata u nás i v zahraničí [10]–[19]. 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 napěťového profilu podél propojených vývodů lze aplikovat celou řadu výpočetních postupů, které představuje například článek [10], kde jsou prezentovány i moderní heuristické metody. Podstatně jednodušší a přímočařejší výpočet napěťového profilu s nerovnoměrným zatížením podél vývodů lze najít v článku [11]. Při propojování vývodů je nutné rozlišovat, zda jsou oba napájeny ze stejné nebo dvou různých stanic 110 kV/vn [12, 13]. 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 napěťové poměry (velikost i úhel) v místě sepnutí vývodů. Tyto údaje však nejsou v praxi k dispozici. Pro zpřesnění odhadu poměrů lze využít systémy měření synchronních fázorů, které se začínají instalovat i ve stanicích vvn/vn [17]. Dalším z trendů posledních let, který se uplatňuje zatím zejména v zahraničí, je nasazování systémů pokročilé distribuční automatizace [18]. Tyto systémy využívají vzájemnou komunikaci a ovládání prvků pasivních (měření) a aktivních (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]. Jak ukazují i zmíněné publikace, řešeny jsou obvykle pouze dílčí problémy (rekonfigurace sítě z důvodu snížení ztrát či optimalizace počtu a umístění spínacích prvků), většinou odděleně od sebe. Minimum prací se věnuje otázce vypínacích schopností spínacích prvků.

1.3 Cíle dizertační práce

Práce se zaměřuje na paralelní provoz vývodů vn, úskalí a omezení s tím spojená, včetně doprovodných úloh, které jsou pro vyhodnocení a posouzení tohoto provozu potřeba řešit. Pro jednotlivé oblasti jsou uvedeny cíle disertační práce včetně jejich odůvodnění.

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 a dopad aktuálních trendů na distribuční soustavu, její provoz a rozvoj.

Metody pro provádění analýz distribučních soustav

Ať už trvalý paralelní provoz vývodů, či dočasné propojení při tvorbě náhradního napájení 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 ke 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, ale i analýzu topologie sítě.

Analýza propojování vývodů vn

Cílem této části práce je na základě dostupných měření vyhodnotit chování obvodu při propojení vývodů. S využitím vlastních výpočetních knihoven bude nejprve navržena metodika provádění analýz propojených vývodů. Pro modelový příklad budou analyzovány proudové a výkonové poměry 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 velikosti, umístění a provozního režimu lokálního zdroje. Budou posouzeny spínací schopnosti úsekových odpínačů instalovaných na vývodech a stanovena pásma rizikového spínání. Dále bude popsán způsob analýzy topologie sítě vn s ohledem na identifikaci kmenů a klasifikaci odboček, a vypracován návrh metodiky pro rozvoj zkruhované sítě.

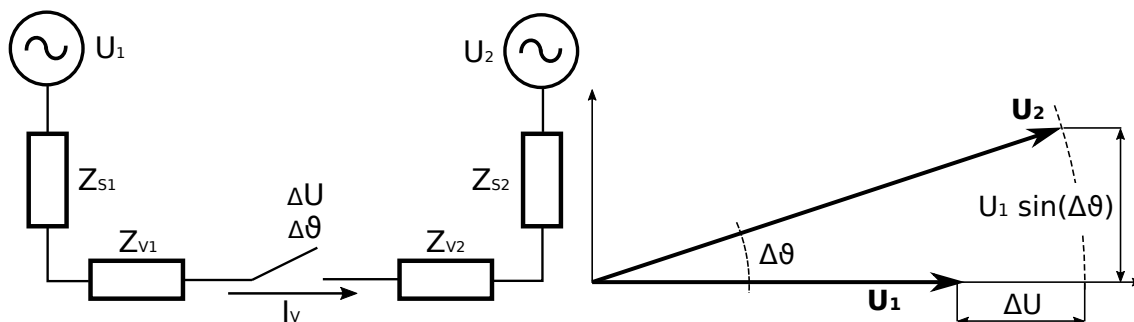
Analýza propojení vývodů vn reálné sítě

Cílem je vyvinuté postupy a metody aplikovat pro analýzu reálné sítě vn, ověřit zákonitosti zjištěné pro modelový případ a analyzovat i další varianty stavu a zapojení sítě (základního, náhradního napájení a varianty paralelního provozu dvou vývodů napájených z jednoho nebo dvou různých transformátorů) a to jak z hlediska proudových a výkonových toků, tak i profilu napětí. Obecně se usuzuje, že paralelní provoz vývodů představuje jednoduché řešení pro navýšení připojitelného výkonu lokálních zdrojů. Dalším cílem práce je ověřit tuto myšlenku a případně přinést nový pohled na posuzování připojitelnosti zdrojů do hladiny vn v případě paralelního provozu vývodů v základním stavu.

2 Postupu řešení a souhrn výsledků práce

2.1 Vyhodnocení očekávaných poměrů v síti s propojenými vývody vn

Pro zmapování poměrů, které se dají očekávat při spínání vývodů, byly použity výstupy synchronního měření fázorů napětí osazené v transformovnách 110 kV/vn, jejichž vývody mohou být při manipulacích propojovány. Vyhodnocení měření fázorů napětí v napájecích stanicích ukázalo, že rozdílový úhel napětí mezi stanicemi se mění co do denní doby výskytu, ale i rozsahu naměřených hodnot. Mezi transformovkami 110 kV/vn napájenými z různých uzlových oblastí vvn byly změřeny značné rozdílové úhly, v některých případech více než 20°. Rozdílový úhel napětí byl ovlivněn i produkcí zdrojů připojených ve vývodech vn, byla vysledována souvislost mezi odlehčením vývodu v důsledku zvýšené výroby a změnou rozdílového úhlu.

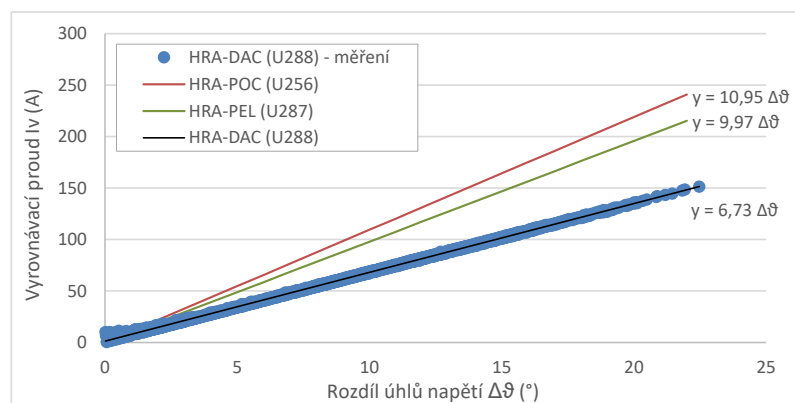


Obr. 2.1: Vyrovnávací proud při spínání vývodů vn (Z_s – impedance napájecí sítě a transformátoru, Z_v – impedance vývodu)

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

$$I_v = \frac{U_1 - U_2}{Z_{S1} + Z_{V1} + Z_{S2} + Z_{V2}} = \frac{R\Delta U_{Re} + X\Delta U_{Im}}{R^2 + X^2} - j \frac{X\Delta U_{Re} + R\Delta U_{Im}}{R^2 + X^2} \quad (2.1)$$

V případě, kdy je rozdíl velikosti napětí velmi malý, závisí velikost vyrovnávacího proudu I_v především na rozdílovém úhlu napětí a tato závislost je víceméně lineární. Pro dvojice napájecích rozveden byla podle (2.1) odhadnuta velikost vyrovnávacího proudu tekoucího mezi nimi a stanovena jeho závislost na rozdílovém úhlu napětí Obr. 2.1. Tuto závislost lze použít pro prvotní posouzení bezpečnosti manipulací s úsekovými odpínači, kdy rozepínaný proud nesmí překročit vypínací schopnost odpínače.



Obr. 2.2: Závislosti vyrovnávacího proudu na rozdílovém úhlu napětí mezi propojovanými stanicemi

2.2 Vývoj vlastních nástrojů pro síťové výpočty a analýzy

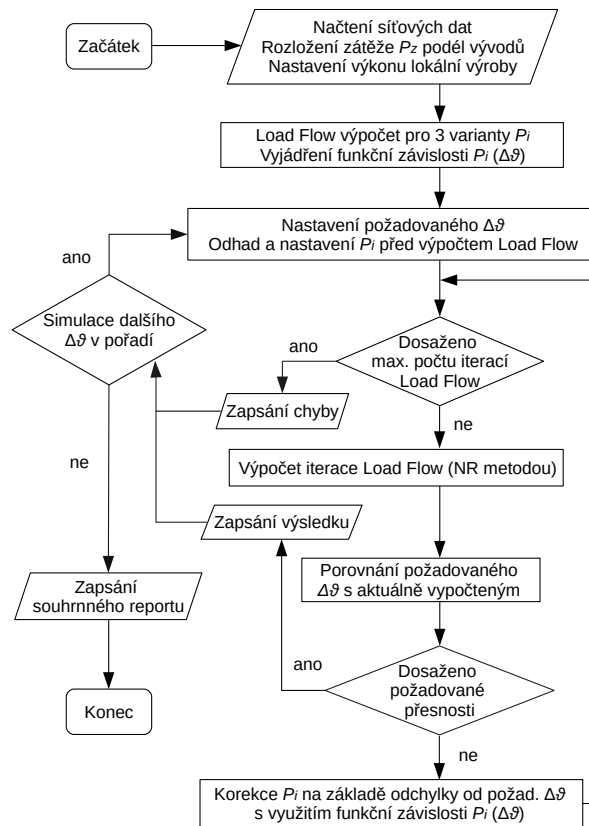
Pro získání výsledků prezentovaných v této disertační práci byly prováděny výpočtové simulace a analýzy nad obvody, jejichž stav byl inspirován nebo přímo vycházel z obrazu vybrané části reálné distribuční sítě. Z tohoto důvodu byly vyvinuty vlastní postupy a aplikovány algoritmy, které dokáží zpracovat a validovat vstupní data reprezentující rozsáhlé distribuční sítě. Postupně byly vyvinuty nástroje pro výpočet ustáleného chodu soustavy, dále pro výpočet výkonových proudových a napěťových poměrů při propojování vývodů vn a rovněž nástroje pro analýzu topologie za účelem identifikace kmenů a odboček sítě vn.

2.2.1 Výpočet ustáleného chodu soustavy

Pro výpočtové simulace ustáleného chodu soustavy byla v prostředí jazyka Python implementována Newton-Raphson metoda (NR). Z důvodu zvýšení její numerické stability byl dále implementován stabilizační algoritmus ořezávání velkých přírůstků ΔU a $\Delta\theta$. Pro možnost zahrnutí zdrojů s regulací Q byla doplněna logika přepínání PU uzlu na PQ a zpět, s ohledem na porušení mezí jalového výkonu. Vyvinutá výpočetní knihovna byla úspěšně validována na vzorku soustav různého rozsahu a i pro sítě s více než 3000 uzly trval výpočet do 0,5 sekundy. Rychlost výpočtu byla klíčová pro variantní analýzy obvodu v různém stavu, kdy byly dávkově spouštěny řádově stovky simulací.

2.2.2 Výpočet vyrovnávacího proudu simulací chodu soustavy

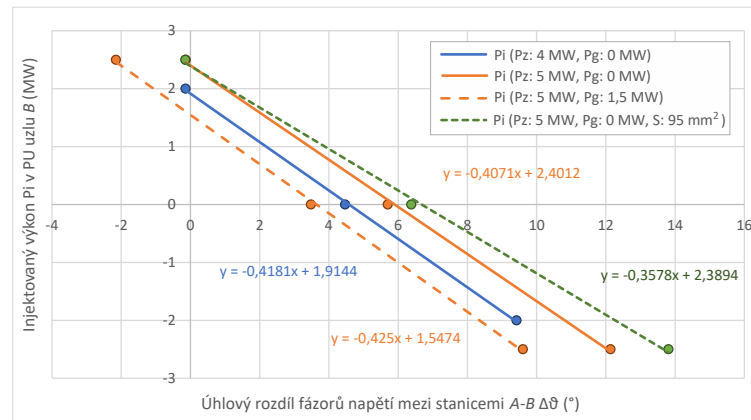
Při analýzách propojení vývodů vn lze s určitými zjednodušeními odhadnout vyrovnávací proud na základě znalosti impedance obvodu a rozdílu fázorů napětí, viz (2.1). Pro podrobnější analýzy nad rozsáhlou sítí s nerovnoměrně rozloženou zátěží a lokálními zdroji však není tento zjednodušený odhad dostatečný 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 zamýšlené analýzy. Pro účely provádění analýz nad propojenými vývody vn, byla vypracována vlastní metodika a algoritmus výpočtu vyrovnávacího proudu, viz Obr. 2.3.



Obr. 2.3: Vývojový diagram modifikovaného výpočtu Load Flow – pro dané P_z a P_g vypočte požadované varianty $\Delta\theta$ (zpravidla od 0° do 8°)

Vlastní navržený algoritmus modifikuje Newton–Raphson numerickou metodu a je schopen moderovat požadovaný rozdíl úhlů napětí injekcí činného výkonu ve druhém napájecím uzlu. Pro každý stav obvodu je nejprve pomocí tří výpočtů Load Flow sestavena linearizovaná charakteristika závislosti moderovaného injektovaného výkonu P_i na rozdílu úhlů $\Delta\theta$. Charakteristika je použita jak pro počáteční odhad P_i pro zadaný rozdíl úhlů, tak následnou korekci P_i v každé iteraci na základě rozdílu

zadaného a aktuálního $\Delta\vartheta$. Na Obr. 2.4 jsou znázorněny charakteristiky pro různé zatížení obvodu P_z , výrobu lokálního zdroje P_g i variantu snížení průřezu kmenových linek ze 110 mm^2 na 95 mm^2 .



Obr. 2.4: Závislost rozdílového úhlu $\Delta\vartheta$ na injektovaném výkonu P_i

Pomocí takto modifikovaného výpočtu chodu soustavy je pro každou variantu, která je tvořena kombinací rozdílového úhlu napětí, zatížení a produkcí lokální výroby, nalezen výsledek zpravidla do šesti iterací NR metody.

Navržený algoritmus byl úspěšně verifikován porovnáním s výsledky měření výkonových a proudových poměrů po propojení vývodů napájených z různých rozveden vn, které poskytl provozovatel DS, viz Tab. 2.1.

Tab. 2.1: Porovnání simulace a měření

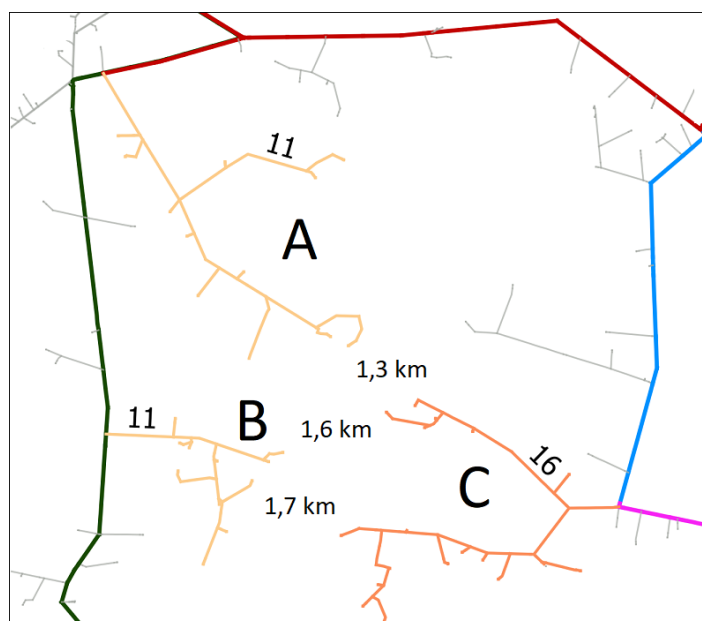
Místo	Metoda	U (kV)	P (kW)	Q (kVAr)	I (A)	$\cos\varphi$
Vývod Kunžak	simulace	23,37	3725	-1207	96,76	0,95 kap.
	měření	23,47	3720	-1180	96	0,95 kap.
Vývod Slavonice	simulace	23,05	-518	2005	51,88	0,25
	měření	23,33	-545	1930	49,5	0,27
Úsečník 288	simulace	-	-	-	66,56	0,75
	měření	-	-	-	65,5	0,72/0,83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

2.2.3 Trasování kmenů a odboček sítě vn

Vedle elektrických výpočtů jsou nedílnou součástí analýzy elektrických soustav i grafové úlohy pracující s topologickým modelem sítě [35]. Pro účely této práce byl použit

zejména algoritmus prohledávání do hloubky (DFS), který je díky tzv. backtrackingu schopen vyhledávat i zkruhovanou topologii. S použitím trasovacích algoritmů byly navrženy např. postupy pro vyhledávání ostrovů v síti, vyhledávání zkruhované topologie, identifikaci kmenových linek a odboček, tvorbu napájecích stromů a další.

S využitím zmíněných postupů automatizovaného zpracování topologických dat byla navržena metodika rozvoje zkruhované sítě. Nejprve jsou vyhledány kmeny a poté odbočky klasifikované z hlediska vhodnosti k zakruhování na základě počtu napájených DTS, odběrných míst a hodnocení technického stavu (HTS), které je reprezentováno číselným indexem zohledňujícím např. frekvenci poruch, náklady na jejich odstranění, výsledky diagnostiky zařízení a další parametry.



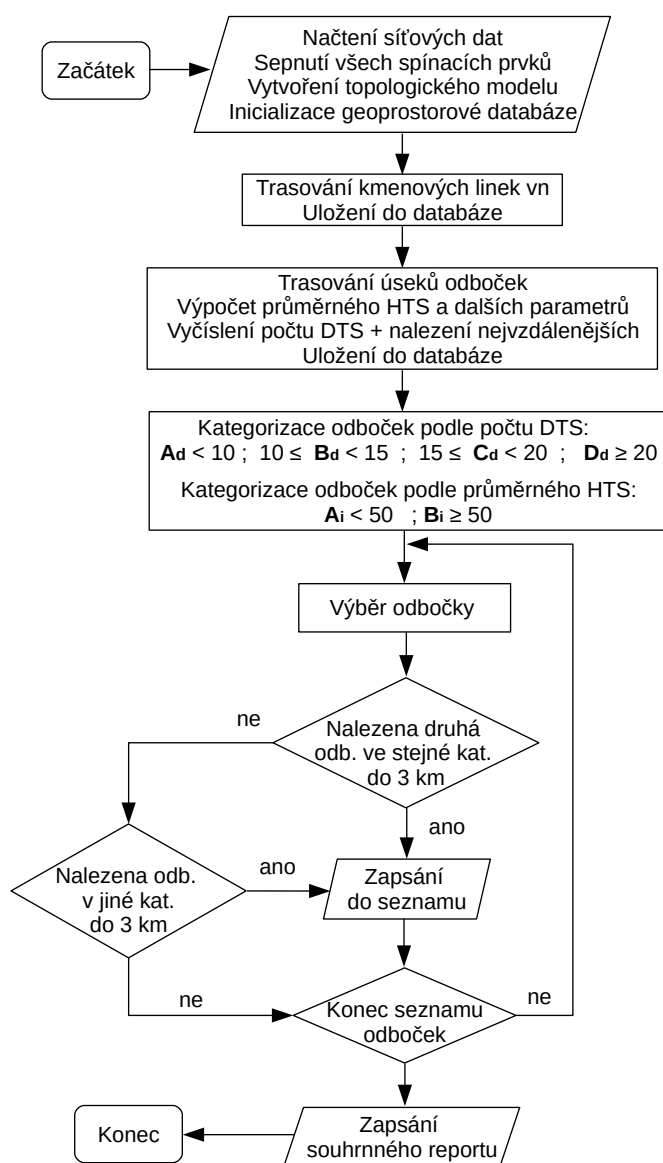
Obr. 2.5: Identifikace kmenů a odboček – tučnou čarou kmeny, tenkou odbočky označené písmenem, uvedeny jsou počty DTS v odbočce a vzdálenosti vrcholů

U každé odbočky jsou dále 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. 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.

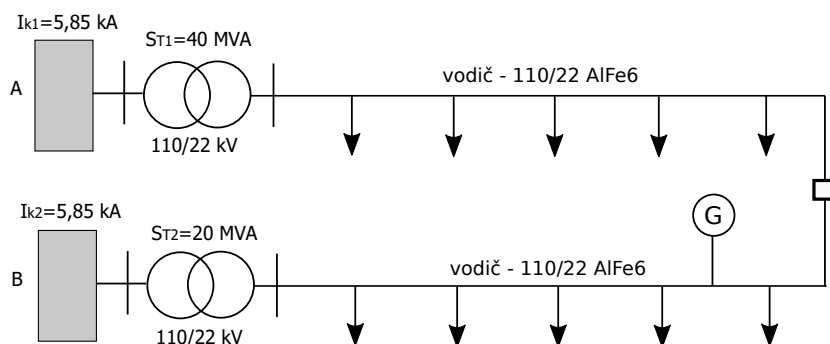
V praxi je důležitá především zmíněná základní klasifikace (na základě počtu DTS a HTS), která slouží pro prioritizaci projektů. Podrobné posouzení vhodnosti zakruhování z hlediska proveditelnosti a nákladů stále vyžaduje lidskou práci, protože do celého procesu vstupují například jiné projekty, majetkoprávní 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 podporu v rámci procesu rozvoje distribuční infrastruktury. V současné době se navržená metodika a postupy testují ve společnosti ČEZ Distribuce a.s.



Obr. 2.6: Vývojový diagram procesu klasifikace odboček

2.3 Analýza proudových a výkonových poměrů v síti s propojenými vývody vn

Analýza proudových a výkonových poměrů v síti s propojenými vývody byla provedena pro modelový případ napájení ze dvou různých transformátorů, viz Obr. 2.7. Cílem bylo na jednoduchém případě demonstrovat, jak a v jaké míře jsou proudové a výkonové poměry na propojených vývodech ovlivněny rozdílovým úhlem napětí mezi transformovkami, zatížením vývodů a produkcí připojených decentrálních zdrojů. Výsledky vybraných variant simulačních výpočtů byly vzájemně porovnány pro účely stanovení obecnějších zákonitostí chování obvodu v závislosti na vstupních parametrech.



Obr. 2.7: Schéma obvodu pro simulační výpočty

Při simulacích bylo uvažováno stejné zatížení obou vývodů (1–3 MW) při rovnoměrném rozložení podél jejich délky. Ve variantách simulací zahrnujících zdroj připojený do vývodu *B* byly uvažovány dodávané výkony (0–2 MW). Simulace byly provedeny i pro varianty s různým umístěním zdroje a různým režimem regulace Q . Napětí ve stanici *A* předbíhalo napětí ve stanici *B*, rozdíl úhlů napětí byl ve studii uvažován pro hodnoty 0–8°. Předmětem analýzy bylo i vyhodnocení odlišných velikostí napětí v napájecích stanicích *A* a *B*. 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.

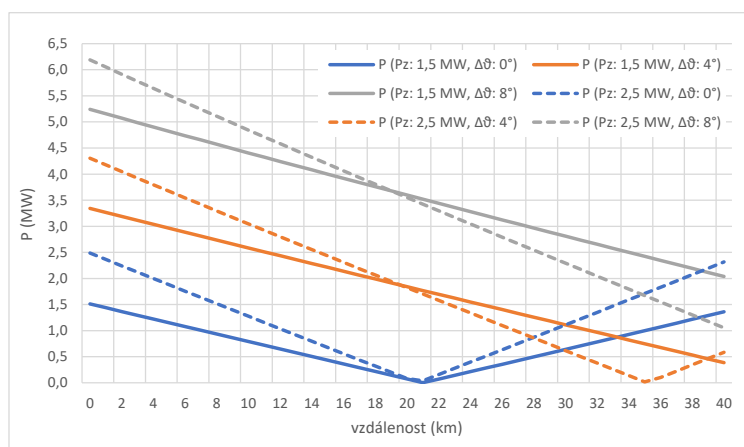
Pro jednotlivé varianty byla dále stanovena pásma rizikového spínání, tj. úseky na vývodech, kde úsekové odpínače bez zhášecí komory nejsou schopny bezpečně rozepnout propojené vývody. Pro posouzení této schopnosti je potřeba znát nejen velikost, ale i účinník procházejícího proudu, neboť při nízkém účinníku klesá vypínací schopnost odpojovače. Pro vyhodnocení bezpečného spínání se vycházelo z těchto

limitních hodnot: 100 A pro účinník vyšší než 0,7, pro nižší účinník pouze 35 A. Účinník procházejícího proudu závisí na výkonových poměrech v daném místě, proto byly vyhodnoceny profily P a Q podél propojených vývodů.

2.3.1 Vyhodnocení výkonových profilů

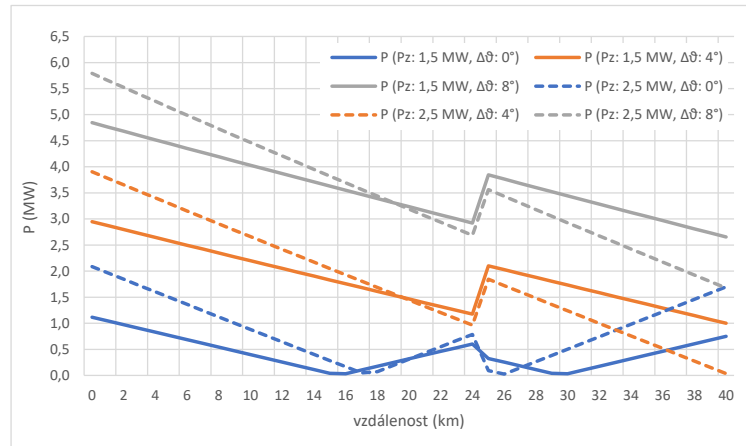
Na Obr. 2.8 jsou znázorněny profily činného výkonu pro variantu bez lokální výroby. Je vidět, že s rostoucím rozdílovým úhlem $\Delta\vartheta$ narůstá vyrovnávací činný výkon a s ním i tok vyrovnávacího proudu podél vývodů. Křivka profilu P připomínající písmeno „V“ se poté posouvá stále více doprava, 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 dále na Obr. 2.8 vidět, 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 (viz oranžovou a šedou křivku).

Obr. 2.9 znázorňuje variantu s připojeným lokálním zdrojem o velikosti 1 MW. Je zřejmé, že v místě připojení zdroje dochází k navýšení profilu P . Jeho vytažení směrem nahoru závisí na zatížení vývodu, velikosti připojené výroby i velikosti rozdílového úhlu napětí $\Delta\vartheta$ mezi spínanými stanicemi. 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 .

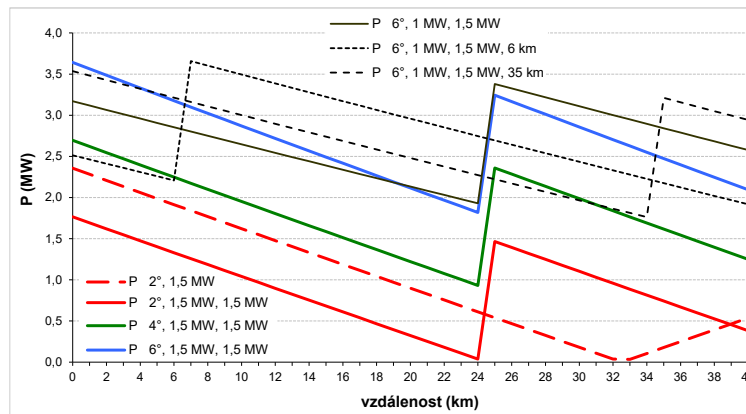


Obr. 2.8: Profil P podél propoj. vývodů – $P_z = 2 \times 1,5$ MW, 2,5 MW

Porovnání variant s různým umístěním zdroje i bez něj je dále shrnuto na Obr. 2.10. Při nízkém zatížení vývodů a velké výrobě (černá křivka plnou čarou) 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



Obr. 2.9: Profil P podél propoj. vývodů $P_z = 2 \times 1,5 \text{ MW}$, $2,5 \text{ MW}$, $P_g = 1 \text{ MW}$



Obr. 2.10: Profil P podél propoj. vývodů – různé umístění zdroje (6., 24. a 35. km), velikost P_g i P_z (veličiny v legendě: $\Delta\vartheta$, P_z , P_g)

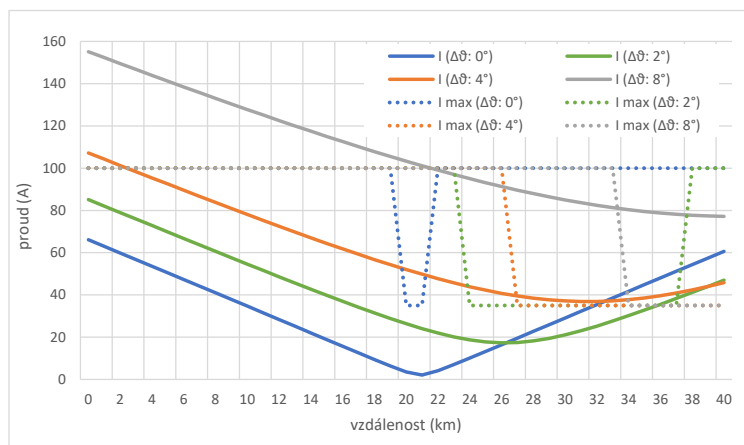
poměru výroby a zatížení a také na rozdílovém úhlu $\Delta\vartheta$. Jak je vidět na Obr. 2.9, při velkém rozdílu úhlů $\Delta\vartheta$ dochází k výraznému vyrovnávacímu toku činného výkonu ze stanice A do B . Při větším zatížení vývodů se vliv lokální výroby snižuje.

V práci byly vyhodnoceny i profily jalového výkonu. Při velkých rozdílových úhlech $\Delta\vartheta$ dochází k přetoku jalového výkonu z rozvodny B do rozvodny A (při daném natočení fázorů napětí v napájecích stanicích).

2.3.2 Vyhodnocení proudových profilů

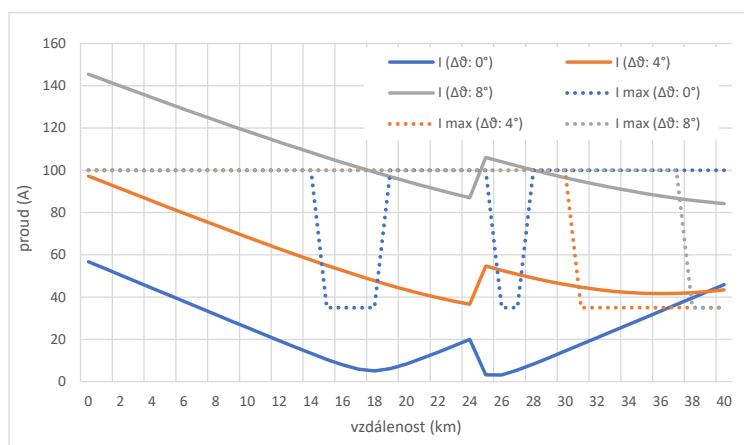
Na Obr. 2.11 jsou znázorněny proudové profily pro variantu bez vnořené výroby. Pro malé rozdílové úhly napětí je křivka proudu (plnou čarou) pod uvažovanou mezí pro bezpečné rozepnutí vývodů (tečkovanou čarou). Snížení proudu pro bezpečné rozepnutí obvodu je patrné v oblasti propojení vývodů na 20. km, kde teče relativně

malý proud, avšak s nízkým účínkem. 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 účínkem dochází k překročení limitu vypínacího proudu pro nízký účíník (35 A), viz oranžovou křivku na Obr. 2.11. Šířka této oblasti se opět rozšiřuje s rostoucím zatížením.



Obr. 2.11: Profil I podél propoj. vývodů – $P_z = 2 \times 2,5 \text{ MW}$

Rozdílné poměry mezi P a Q , při připojení lokálního zdroje (na 24. km) se oproti stavu bez vnořené výroby promítnou do velikosti, ale i účínku proudu tečoucího vývody. Opět lze nalézt úseky, kde tečou relativně nízké proudy (jednotky či pár desítek A), avšak s velmi nízkým účínkem. V takových oblastech může opět nastat problém s vypínáním malých jalových proudů.

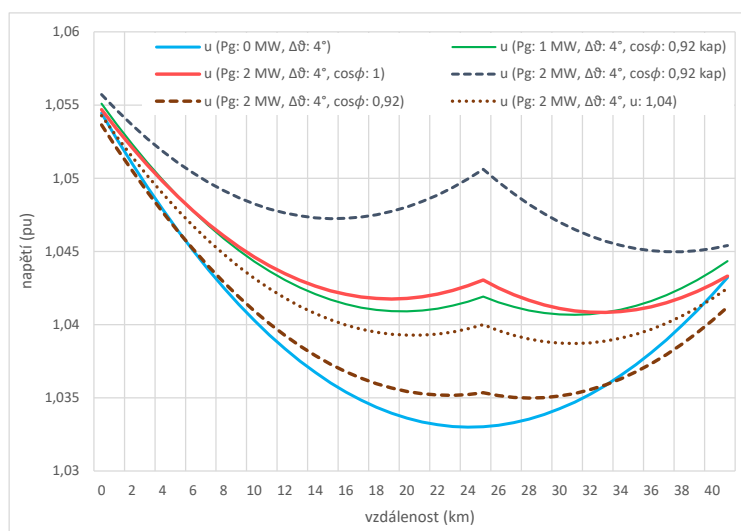


Obr. 2.12: Profil I podél propoj. vývodů – $P_z = 2 \times 2,5 \text{ MW}$, $P_g = 1 \text{ MW}$

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. 2.12 s variantou bez zdroje (viz Obr. 2.11) je vidět, že vnořená výroba může posunout nebo zúžit (v extrémním případě úplně odstranit) pásmo problematické z hlediska spínání.

2.3.3 Vyhodnocení vlivu režimu vnořené výroby

Dále byly simulovány různé režimy provozu zdroje, velikosti a charakteru účinníku, s nímž zdroj pracuje (dodávka či odběr Q). Vliv regulace jalového výkonu má vliv na pozici a šířku pásma potenciálně problematického z hlediska spínání. To je znát zejména v případě nízkých hodnot rozdílového úhlu napětí, kdy je i činná složka vyrovnávacího proudu malá. Dodávka jalového výkonu zužuje šířku pásem rizikového spínání.



Obr. 2.13: Vliv regulace Q na profil U podél vývodů

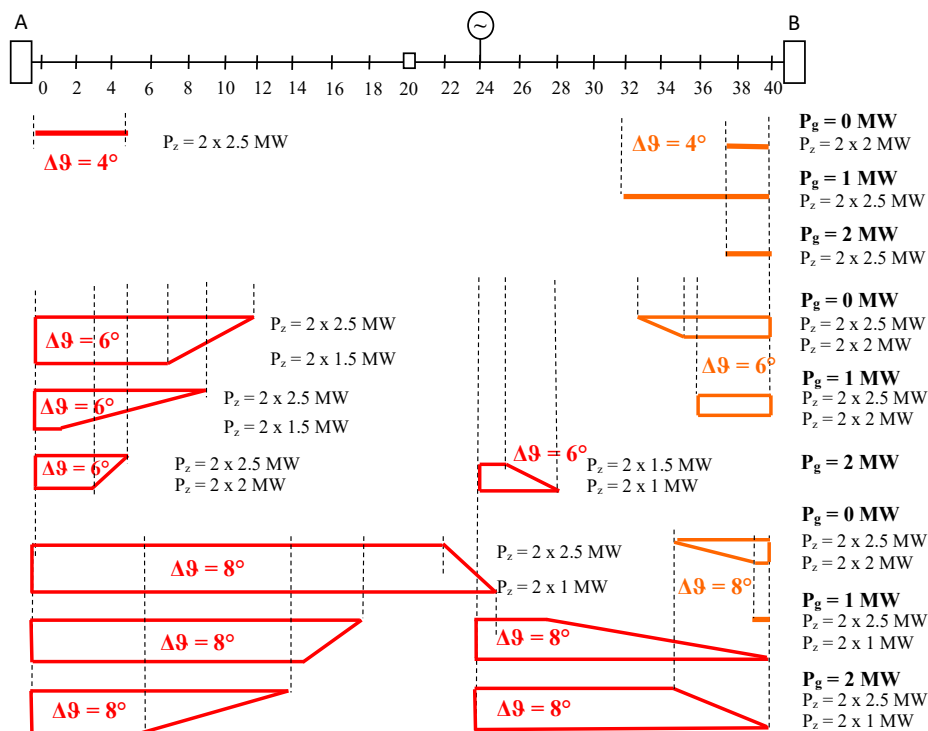
Navržené postupy a vytvořenou knihovnu pro výpočet Load Flow lze použít i pro analýzu vlivu režimu regulace Q lokálního zdroje na napěťový profil (při paralelním provozu vývodů). Na základě provedené jednoduché analýzy lze určit rozsah velikostí napětí vhodných pro nastavení regulace Q pro podporu U v síti. Pro případ na Obr. 2.13 by regulace na konstantní napětí měla být nastavena na hodnotu U , která je v místě zdroje v rozmezí určeném dvěma limitními křivkami (hnědá a modrá čárkovaná křivka), odpovídající krajním hodnotám pásma povoleného účinníku zdroje.

Se zpřísněnými požadavky na regulaci Q lokálních zdrojů je nyní téma nastavení regulačních charakteristik v závislosti na lokálních podmínkách diskutovaným téma-

tem. Výsledky podobných simulací by mohly být základem pro stanovení parametrů regulace zdrojů v síti vn.

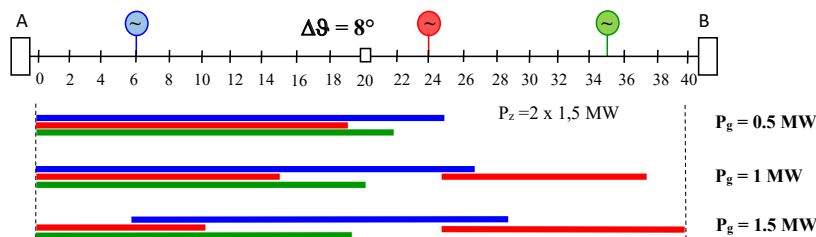
2.3.4 Vyhodnocení oblastí rizikových z hlediska spínání

Pro jednotlivé varianty byla stanovena pásma rizikového spínání. Cílem bylo nalézt jednoduché pravidlo, podle něhož by bylo možné lokalizovat pásma rizikového spínání.



Obr. 2.14: Oblasti s nedostatečnou vypínací kapacitou úsečníků

Obr. 2.14 ukazuje oblasti s nedostatečnou vypínací schopností pro varianty zatížení vývodů od 2×1 do $2 \times 2,5$ MW a výkonu zdroje od 0 do 2 MW při jednotkovém účinníku.



Obr. 2.15: Vliv velikosti a pozice zdroje na nebezpečná pásma spínání

Obr. 2.15 ilustruje, že nejen velikost, ale i umístění zdroje podstatným způsobem ovlivňují pásma rizikového spínání. Problematická pásma jsou vyhodnocena pro případ, kdy byl rozdíl úhlu 8° a zatížení vývodů $2 \times 1,5$ MW.

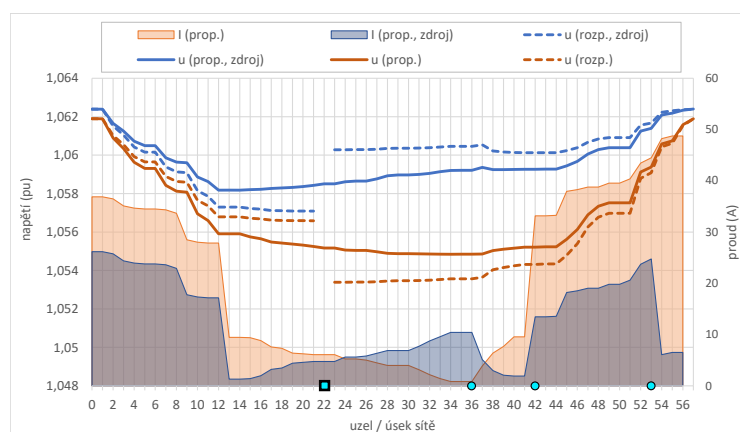
Z provedených simulací vyplývá, že určení pásem rizikového spínání nelze jednoduše zobecnit. Lokace problematického úseku silně závisí na aktuálních podmínkách, tj. zatížení sítě, rozdílovém úhlu napětí, umístění, aktuální produkci a provozním režimu připojených zdrojů. Bylo ověřeno, že všemi spínacími 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.

2.4 Případová studie analýzy vývodů vn

Vyvinuté postupy a metody byly aplikovány pro analýzu reálné sítě 35 kV s cílem ověřit zákonitosti zjištěné pro modelový případ a analyzovat i další varianty stavu sítě.

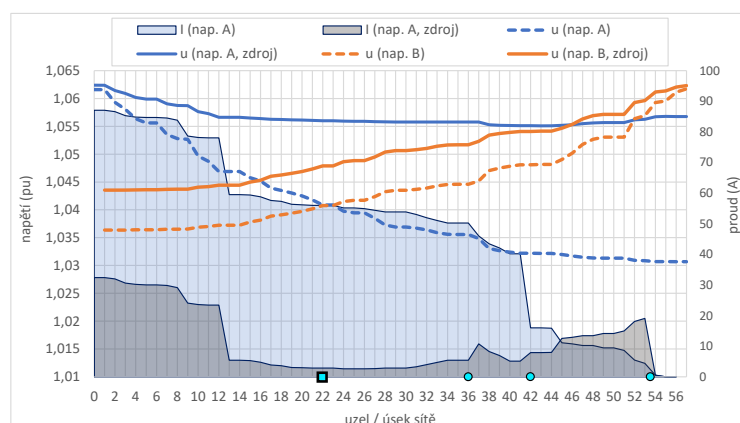
2.4.1 Analýza propojených vývodů při napájení ze společného transformátoru

Nejprve byly provedeny simulace pro napájení obou vývodů ze společného transformátoru 110/35 kV, což je hlavním předpokladem pro dlouhodobý paralelní provoz vývodů. Z výsledků analýz vyplývá, že zákonitosti chování modelového obvodu platí i pro vývody reálné sítě vn.



Obr. 2.16: Profil U, I podél vývodů pro různé zapojení sítě

Paralelní napájení vede v tomto případě k narovnání napětového profilu, viz Obr. 2.16. Nárůst či snížení napětí v daném vývodu je dáno původním zatížením a také lokací a provozem připojených zdrojů. Při náhradním napájení, viz Obr. 2.17, se projevuje výrazný vliv lokálních zdrojů na napětové 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 napětový profil.



Obr. 2.17: Profil U, I propoj. vývodů při náhradním napájení ze stanice A nebo B

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 napětových poměrů a v konečném důsledku i do navýšení připojitelného výkonu z hlediska posuzování změny napětí.

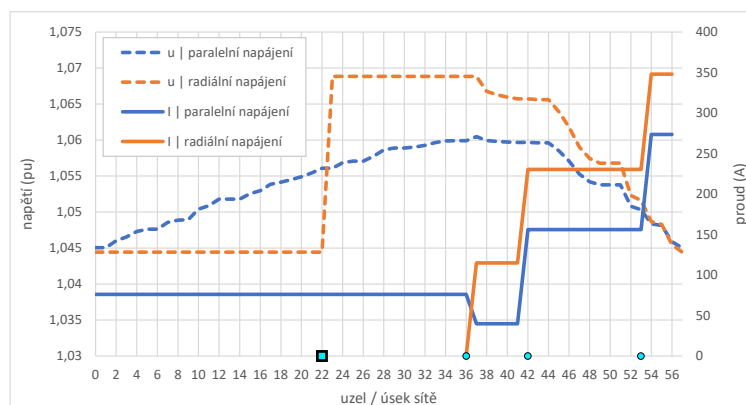
Tab. 2.2: Max. připojitelný P_g zdrojů ve vývodu B dle kritéria ΔU

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	$3 \times 8,1$	$P_g > 3 \times 10$	$P_g > 3 \times 10$

Jak vyplývá z Tab. 2.2, při paralelním napájení bylo prokázáno možné navýšení přibližně o 50 % při jednotkovém účinníku. Při induktivním účinníku zdroje (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 Q .

Při pohledu na proudový profil na Obr. 2.18 je vidět pozitivní vliv paralelního napájení, které proud na začátku vývodu B sníží z hodnoty 348 na 274 A. 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 oproti hodnotám v Tab. 2.2 k výrazné korekci připojitelného výkonu směrem dolů.



Obr. 2.18: Vliv připojeného zdroje $3 \times 7,1 \text{ MW} (\cos \varphi = 0,95)$ na profil U, I

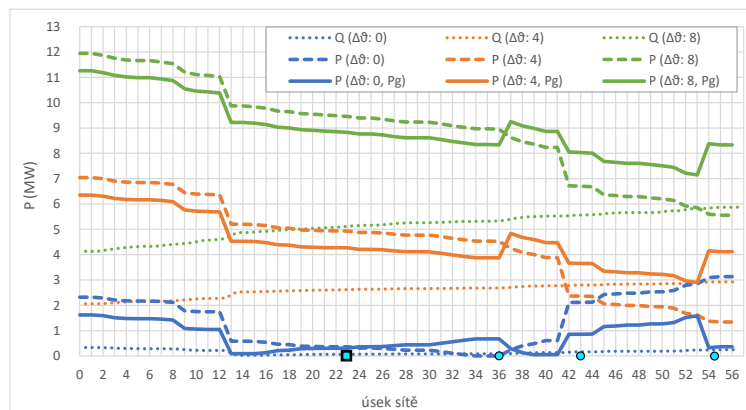
Se zohledněním max. proudu 225 A (odpovídá AlFe6 70 mm² – nejmenšímu průřezu v kmeni) bude hodnota max. připojitelného výkonu společná a přerozdělitelná mezi oba vývody činit přibližně $3 \times 4,3 \text{ MW}$.

Varianta vzájemného náhradního napájení vývodů A a B se pro účely posouzení připojitelnosti jeví jako limitující z hlediska max. proudové zatížitelnosti. Pakliže není k dispozici alternativní způsob náhradního napájení, musí být propojené kmeny schopny přenést výkon zdrojů v obou vývodech.

2.4.2 Analýza propojených vývodů napájených z různých transformátorů

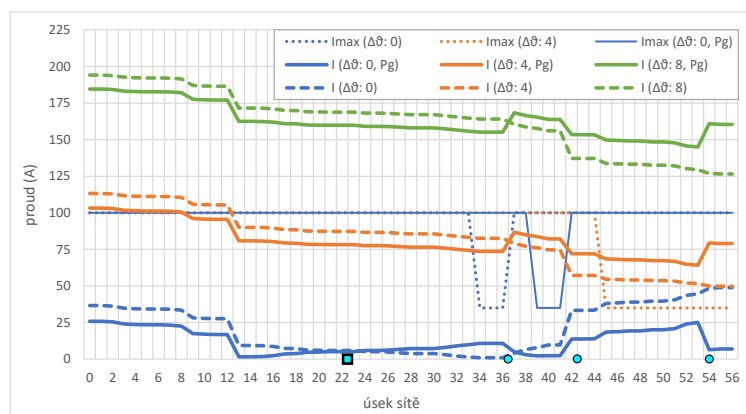
Na Obr. 2.19 jsou znázorněny profily činného a jalového výkonu pro tři vybrané rozdílové úhly napětí. Křivky pro nulový úhel kopírují trend, kdy byl obvod napájen ze společného transformátoru. Již pro úhly $\Delta\vartheta > 2^\circ$ dochází při daném zatížení k přetoku činného výkonu (tučné čáry) ze 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. V porovnání s modelovým příkladem

dochází i zde pro $\Delta\vartheta > 2^\circ$ k odlehčení vývodu B , ale zároveň výraznému nárůstu zatížení první poloviny vývodu A .



Obr. 2.19: Profil P, Q při toku I_v ze stanice A do B

Proudové profily na Obr. 2.20 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 se odrazí ve snížení hodnoty proudu pro bezpečné rozepnutí vývodů bezkomorovými úsečníky (tenkou čarou). 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.



Obr. 2.20: Profil I při toku I_v ze stanice A do B

3 Závěr

3.1 Zhodnocení provedené práce a vlastní přínos

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 z 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 k sestavení ucelené metodiky pro posuzování připojitelnosti zdrojů v paralelně napájených sítích.

3.2 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, 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 transformovných 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 Matliare, 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, teplárenství 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, teplárenství 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, teplárenství 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 zkratk

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
$U_{i \text{ set}}$	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
$Q_{g \text{ max}}$	Maximální generovaný jalový výkon
$Q_{g \text{ min}}$	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