

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Analýza možností změny topologie distribuční soustavy
s ohledem na velikost vyrovnávacího proudu**

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá rozbohem a stanovením bezpečných spínacích podmínek při rekonfiguraci sítí 22 kV a 110 kV distribuční soustavy, v závislosti na rozdílovém úhlu fázorů spínaných napětí. Práce obsahuje rozbor závislosti rozdílového úhlu fázorů spínaných napětí na zatížení vývodů 22 kV a lokální výrobě v těchto sítích. Dále predikci rozkladu vyrovnávacího proudu v sítích 110 kV, která je podložena měřeními v rozvodně 110 kV Veselí. Výstupem práce je nástroj pro predikci rozkladu vyrovnávacího proudu v síti 110 kV, pro spínání v rozvodnách 110 kV Tábor, Pacov, Veselí a Hradec.

Práce vznikla za podpory společnosti E.ON Česká republika, s.r.o.

Klíčová slova

Distribuční soustava, rekonfigurace, kruhování, vyrovnávací proud, úsekový odpínač

Abstract

The diploma thesis deals with the study of 22 kV and 110 kV network reconfiguration with respect of voltage phasor angle difference between switched substations. This thesis describes dependence of voltage phasor angle on load of middle voltage lines and local production. Next part is focused on prediction of circulating current distribution between HV power lines. This prediction is based on measurement in substation 110 kV Veselí. Output of this thesis is tool (in program Microsoft Excel 2010), which predicts decomposition of circulating current in high voltage lines, for switching in substations Tábor, Pacov, Veselí and Hradec.

This work was made in cooperation with company E.ON Czech Republic.

Key words

Distribution system, network reconfiguration, fielder interconnection, circulating current, sectionalizing switch

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 27.4.2016

Jan Hlavnička

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval zejména vedoucí práce doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. a konzultantovi Ing. Janu Jiříčkovi, za jejich ochotu, trpělivost, vstřícný přístup a cenné rady při řešení problémů, které při řešení této práce nastaly.

Velké poděkování také patří Ing. Liboru Kolářovi a Ing. Davidu Šafářovi, bez jejichž přičinění by tato práce nikdy nevznikla.

V neposlední řadě patří můj obrovský dík mým rodičům, kteří mi dali možnost studovat na prestižní vysoké škole a tím mi dali možnost uplatnění na trhu práce v tak nelehké době.

Závěrem bych chtěl také poděkovat své dlouholeté přítelkyni Lence Beránkové za podporu, péči a trpělivost, kterou mne zahrnovala po celou dobu mého studia.

Obsah

ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 REGULACE KVALITY DODÁVEK ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	10
1.1 UKAZATELÉ NEPŘETRŽITOSTI DODÁVKY SAIDI A SAIFI.....	11
1.2 MOTIVAČNÍ REGULACE KVALITY	13
2 REKONFIGURACE DISTRIBUČNÍ SÍTĚ.....	15
2.1 ZMĚNY TOPOLOGIE SÍTĚ 22 kV	15
2.2 MOŽNOSTI SPÍNÁNÍ DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY	16
2.3 KRUHOVÁNÍ SÍTĚ VN.....	19
2.4 DRUHY SPÍNÁNÍ V SÍTÍCH 22 kV	20
2.4.1 Vypínání (zapínání) části sítě 22 kV	21
2.4.2 Vypínání (zapínání do kruhu) části sítě 22 kV v blízkosti konců vývodů	21
2.4.3 Vypínání (zapínání do kruhu) části sítě 22 kV v blízkosti začátku jednoho z vývodů 22 kV	22
2.4.4 Vypínání (zapínání do kruhu) části sítě 22 kV v blízkosti konců vývodů, oba vývody jsou napájeny z různých uzlových oblastí 110 kV	23
2.4.5 Vypínání (zapínání do kruhu) části sítě 22 kV v blízkosti začátku jednoho z vývodů 22 kV, oba vývody jsou napájeny z různých uzlových oblastí 110 kV	23
3 VYROVNÁVACÍ PROUD	25
3.1 TEORETICKÝ ROZBOR	25
3.2 VYROVNÁVACÍ PROUD PRO SÍTĚ 22 kV	27
3.3 VYROVNÁVACÍ PROUD PRO SÍTĚ 110 kV	28
4 VLIV ZÁTĚŽE A LOKÁLNÍ VÝROBY NA VELIKOST ROZDÍLOVÉHO ÚHLU SPÍNANÝCH NAPĚTÍ.....	29
4.1 POUŽITÝ MODEL.....	29
4.2 VLIV ZÁTĚŽE NA VELIKOST ROZDÍLOVÉHO ÚHLU SPÍNANÝCH NAPĚTÍ Δ	31
4.3 VLIV LOKÁLNÍ VÝROBY NA VELIKOST ROZDÍLOVÉHO ÚHLU SPÍNANÝCH NAPĚTÍ Δ	34
4.4 VYHODNOCENÍ.....	36
5 SPÍNÁNÍ V SÍTÍCH 110 kV	38
5.1 SPÍNÁNÍ V ROZVODNĚ 110 kV TÁBOR (TAB)	39
5.2 SPÍNÁNÍ V ROZVODNĚ 110 kV PACOV (PAC).....	41
5.3 SPÍNÁNÍ V ROZVODNĚ 110 kV HRADEC (HRA)	42
6 SPÍNÁNÍ V TRANSFORMOVNĚ 110/22 kV VESELÍ (VES).....	45
6.1 SPÍNÁNÍ NA ÚROVNI 110 kV V ROZVODNĚ VESELÍ (VES)	46
6.2 SPÍNÁNÍ NA ÚROVNI 22 kV – PROPOJENÍ LINEK ŘEČICE (VES) A ŘEČICE (HRA)	48
6.3 PREDIKCE VELIKOSTI VYROVNÁVACÍHO PROUDU	50
6.4 ROZLOŽENÍ VYROVNÁVACÍHO PROUDU	52
6.5 PŘÍKLAD VÝPOČTU	55
7 PROGRAM „PREDIKCE VYROVNÁVACÍHO PROUDU“	58
ZÁVĚR.....	60
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	61
PŘÍLOHY	62

Úvod

Přenos a dodávka elektrické energie je v současné době velmi ovlivněna legislativou České republiky. Ta vyvíjí nátlak na distributory elektrické energie, aby dodržovali stále větší požadavky na kvalitu elektrické energie. Kvalita elektrické energie je definována vyhláškou č. 540/2005 (novelizována v roce 2010), ve které jsou definovány tzv. standardy a dále Pravidly provozování distribuční soustavy normou ČSN EN 50 160.

Nepřetržitost dodávky elektrické energie je hodnocena na základě ukazatelů nepřetržitosti dodávky SAIDI (System Average Interruption Duration Index) a SAIFI (System Average Interruption Frequency Index). Na základě těchto ukazatelů je distributor hodnocen Energetickým regulačním úřadem (ERÚ) a bonifikován nebo penalizován na základě tzv. parametru Q. Z těchto důvodů jsou distributoři elektrické energie nuceni rekonstruovat distribuční sítě, nasazovat nové prvky do distribuční soustavy a hledat řešení, jak kvalitu a nepřetržitost dodávky zlepšit.

Na základě uvedených skutečností je snaha minimalizovat manipulace v distribuční soustavě tzv. na tmu, při kterých dochází ke krátkodobým výpadkům dodávky elektrické energie. V případě kruhování sítí 22 kV, změnách topologie distribuční soustavy, protéká kruhovanými linkami vyrovnávací proud. Predikcím velikostí vyrovnávacího proudu, jeho šířením v sítích 22 kV a 110 kV a stanovením limitních hodnot se věnuje předložená diplomová práce.

Cílem této diplomové práce je stanovení mezního rozdílového úhlu fázorů napětí spínaných oblastí v závislosti na bezpečnosti provozu distribuční soustavy v daných bodech. Práce popisuje vznik vyrovnávacího proudu a predikuje jeho velikost pro několik bodů distribuční soustavy, ve kterých může dojít k jeho vzniku. Veškeré výpočetní hodnoty použité v této práci jsou skutečné hodnoty distribuční soustavy získané z oficiálního jednání se zástupcem společnosti E.ON České republika, s.r.o.

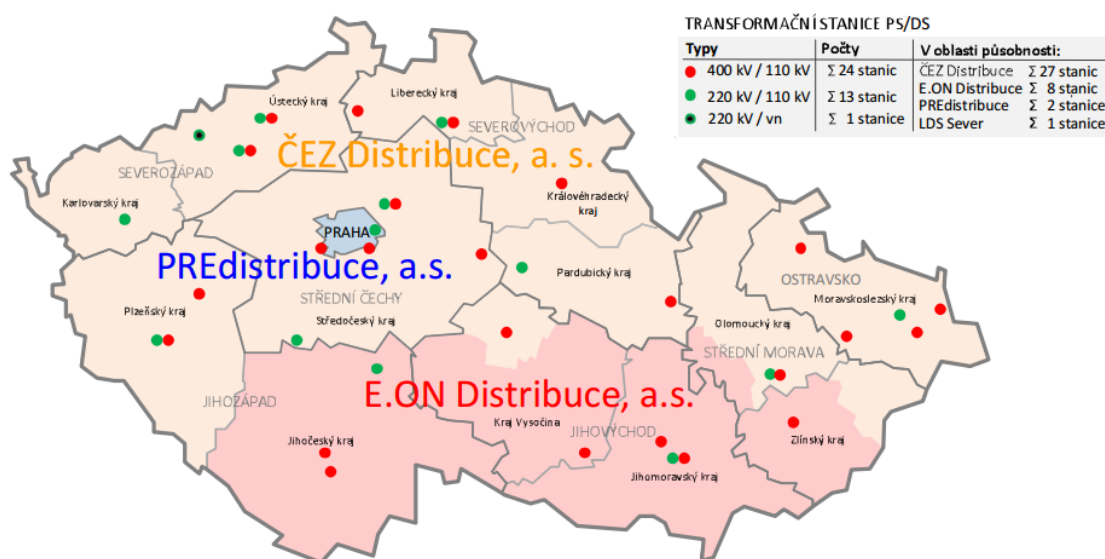
Seznam symbolů a zkratek

NN	nízké napětí
VN	vysoké napětí
VVN	velmi vysoké napětí
SAIDI	System Average Interruption Duration Index
SAIFI	System Average Interruption Frequency Index
CAIDI	Customer Average Interruption Duration Index
ERÚ	Energetický regulační úřad
I_{VYR}	Vyrovnávací proud (A)
U	Elektrické napětí (V)
Z.....	Impedance (Ω)
l.....	vzdálenost (m)
Sp.....	spotřeba v bodě (kW)
DOÚ	dálkově ovládaný úsečník

1 Regulace kvality dodávek elektrické energie

Elektrizační soustava v České republice je rozdělena do dvou úrovní. Na soustavu přenosovou a soustavu distribuční. Přenosová soustava, pokrývající linky velmi vysokého napětí 220 kV a zvláště vysokého napětí 400 kV, je v současnosti provozovaná společností ČEPS a. s., zajišťuje přenos elektrické energie mezi důležitými uzly na dlouhé vzdálenosti a na mezinárodní úrovni. Distribuční soustava naopak zajišťuje přenos elektrické energie z předávacích míst společnosti ČEPS a.s. (rozvodny 110 kV) ke koncovému odběrateli. Jedná se tedy o provoz linek 110 kV, VN a NN několika napěťových úrovní. V současné době je v České republice několik desítek distributorů elektrické energie. Tito distributoři jsou v převážné většině pouze lokální, takže v případě rozdělení distribuční soustavy v České republice můžeme hovořit pouze o třech velkých distribučních společnostech.

- **ČEZ Distribuce, a.s.**
- **PREdistribuce, a.s.**
- **E.ON Distribuce, a.s.**



Obr. 1.1 Územní působnost velkých distribučních společností a napájecí body z PS [1]

Tato diplomová práce vznikla na základě spolupráce se společností E.ON Česká republika s.r.o., proto veškeré použité údaje, výpočty a predikce budou uvažovány pro provoz distribuční soustavy na území společnosti E.ON Distribuce, a.s. Společnost E.ON v současné době provozuje na území Jižních Čech, Střední a Jižní Moravy, podle údajů

z výroční zprávy energetického regulačního úřadu pro rok 2014, 1 541 418 odběrných míst, 27 031 km kabelových vedení a 38 880 km venkovních vedení.

Chod distribuční soustavy je v současné době podmíněn Pravidly provozování distribuční soustavy, normou ČSN 50 160, která definuje kvalitu napětí. V posledních letech jsou ale distributoři elektrické energie hodnoceni na základě tzv. ukazatelů nepřetržitosti dodávky SAIDI a SAIFI.

1.1 Ukazatelé nepřetržitosti dodávky SAIDI a SAIFI

- **SAIDI** (System Average Interruption Duration Index) – jedná se o průměrnou dobu přerušení dodávky elektrické energie na jedno odběrné místo za jeden kalendářní rok. V této době jsou zahrnuty plánované i neplánované výpadky elektrické energie. Do tohoto ukazatele spadají všechna přerušení, která jsou delší než 3 minuty.
- **SAIFI** (System Average Interruption Frequency Index) – ukazatel průměrného počtu výpadků elektrické energie na jedno odběrné místo za jeden kalendářní rok. V této hodnotě jsou zahrnuty plánované i neplánované výpadky elektrické energie.

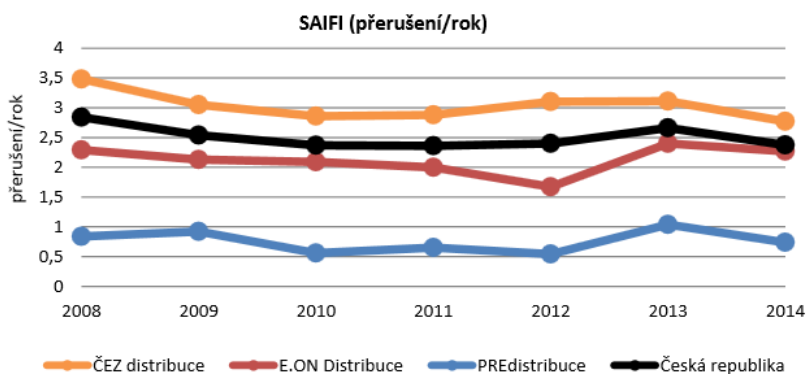
Na základě ukazatelů nepřetržitosti dodávky SAIDI a SAIFI je možné spočítat ukazatel CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index), který určuje průměrnou délku jednoho přerušení na jednoho odběratele.

Spolehlivostní ukazatelé mohou být uvažovány pro určitou oblast, např. konkrétní vývod nebo obec, mohou být uvažovány čistě z pohledu poruch nebo plánovaných odstávek. Distributor však vždy vykazuje Energetickému regulačnímu úřadu tzv. celosystémové spolehlivostní ukazatele, které zahrnují informaci o celém distribučním území, poruchách i plánovaných odstávkách.

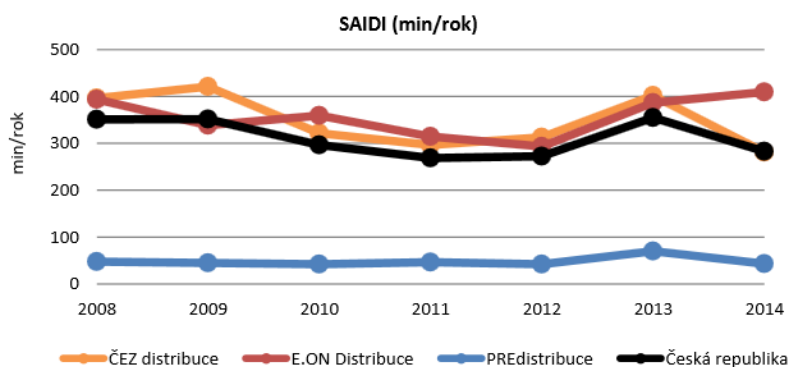
Jak vyplývá z definice těchto spolehlivostních ukazatelů, je možné jejich hodnotu ovlivnit počtem vypnutí odběratele nebo délkou trvání jednoho přerušení. Na základě spolehlivostních ukazatelů lze usuzovat, zda distributor elektrické energie vynaložil své prostředky do modernizace distribuční soustavy, či použil jiné řešení pro zajištění dodávky elektrické energie (např. zajištění náhradního napájení mobilním dieselgenerátorem).

Poruchovou část spolehlivostních ukazatelů mohou ovlivnit včasné revize zařízení (např. vývodových vypínačů) nebo použití prvků s nižší poruchovostí (izolované vodiče

v lesních průsecích apod.). Část spolehlivostních ukazatelů, která obsahuje informaci o plánovaných odstávkách, je možné ovlivnit několika způsoby, jedné z nich se věnuje tato diplomová práce. Predikcí velikosti vyrovnávacího proudu, který vzniká při spínání rozdílných fází napětí, je možné snížit nutnost manipulovat tzv. na tmu.



Obr. 1.2 Vývoj ukazatele nepřetržitosti dodávky SAIFI [1]



Obr. 1.3 Vývoj ukazatele nepřetržitosti dodávky SAIDI [1]

Jak již bylo zmíněno, distributor elektrické energie je hodnocen na základě spolehlivostních ukazatelů. Hodnotu těchto ukazatelů definuje Energetický regulační úřad vždy pro nastávající regulační období. Nové regulační období nastává rokem 2016. Hodnoty, které by měli největší distributoři elektrické energie na území České republiky dodržet znázorňují následující tabulky.

Tab. 1.1 Nastavení požadovaných hodnot ukazatele nepřetržitosti dodávky SAIFI [4]

SAIFI ₀	Referenční hodnota	Roční zpřísňování	Požadovaná hodnota pro rok 2016	Požadovaná hodnota pro rok 2017	Požadovaná hodnota pro rálního pásma rok 2018	Hranice neut- rálního pásma	Maximální bonus/penále
ČEZ Distribuce	2,360	1,25%	2,331	2,301	2,273	± 5%	± 15%
E.ON Distribuce	1,570	0,75%	1,558	1,547	1,535	± 5%	± 15%
PREDistribuce	0,440	25%, 3%, 3%	0,330	0,320	0,310	± 10%	± 25%

Tab. 1.2 Nastavení požadovaných hodnot ukazatele nepřetržitosti dodávky SAIDI [4]

SAIDI _o	Referenční hodnota	Roční zpřísňování	Požadovaná hodnota pro rok 2016	Požadovaná hodnota pro rok 2017	Požadovaná hodnota pro rok 2018	Hranice neutrálního pásma	Maximální bonus/penále
ČEZ Distribuce	262,700	2,5%	256,133	249,729	243,486	± 5%	± 15%
E.ON Distribuce	275,360	5%	261,592	248,512	236,087	± 5%	± 15%
PREdistribuce	37,370	5%	35,502	33,726	32,040	± 10%	± 25%

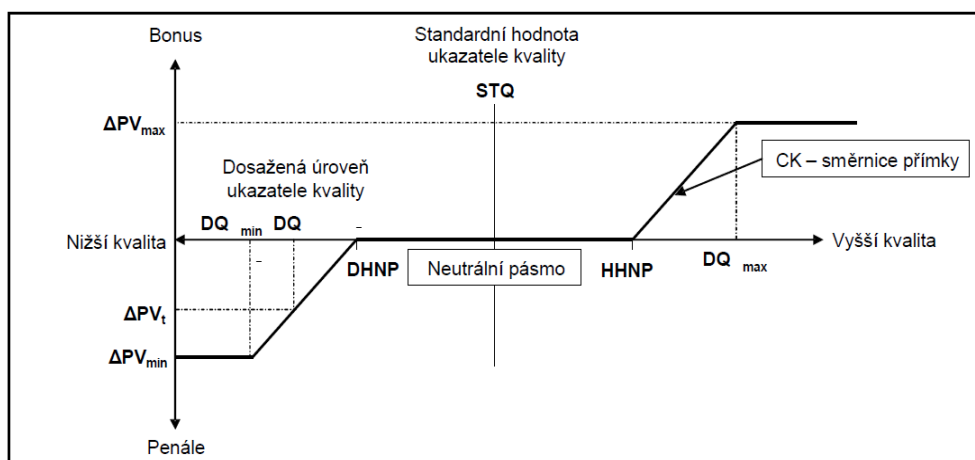
1.2 Motivační regulace kvality

Pro III. regulační období, které bylo v letech 2010 – 2015, zavedl energetický regulační úřad tzv. motivační regulaci kvality. Jedná se o metodiku, jejímž cílem je nastavení požadované úrovně kvality dodávky elektrické energie ve vztahu k její ceně. Tento mechanismus má na rozdíl od vyhlášky o kvalitě za cíl pozitivně ovlivnit kvalitu dodávek elektrické energie v celém systému, respektive distribuční soustavě. Vzorec pro výpočet upravených povolených výnosů byl tak doplněn o člen, který upravuje hodnotu povolených výnosů o finanční vyjádření penále nebo bonusu za dosaženou úroveň kvality. Tímto doplňujícím členem je tzv. parametr Q.

Parametr Q udává, jakou spolehlivost dodávky na základě spolehlivostních ukazatelů musejí distributoři dodržovat. Pokud tohoto parametru nedosáhnou, mohou být za své jednání v rámci provozu distribuční soustavy penalizováni, v opačném případě naopak bonifikováni. Parametr Q se skládá z ukazatelů nepřetržitosti dodávky SAIDI a SAIFI, které jsou stanoveny Energetickým regulačním úřadem pro daný kalendářní rok. Tito spolehlivostní ukazatelé však nezahrnují kategorie událostí: poruchy způsobené poruchou mající původ v zařízení distribuční soustavy provozovatele soustavy nebo jejím provozu za nepříznivých povětrnostních podmínek, poruchy způsobené v důsledku zásahu nebo jednání třetí osoby, dále vynucené, mimořádné a v důsledku události mimo soustavu a u výrobce. Jinými slovy, do parametru Q vstupují pouze spolehlivostní ukazatelé, které může distributor ovlivnit, tedy poruchy zapříčiněné selháním prvku distribuční soustavy za normálního provozního stavu nebo plánované odstávky..

Metodika hodnocení distributora na základě hodnotícího parametru Q je znázorněna na Obr. 1.4. Parametr Q disponuje pěti procentním tolerančním pásmem, poté nastupuje pásmo penalizace nebo bonifikace (od 5 do 15 % rozdílu od požadovaného parametru Q), které je postupného charakteru. Nad 15% bariérou penalizačního nebo bonifikačního pásu je naopak pásmo maximálního bonusu nebo penalizace. Velikost tohoto bonusu nebo

penalizace vycházejí ze zisku distribuční společnosti a činí 3% ze zisku pro daný rok. Tak tomu bylo ve III. regulačním období. Pro IV. regulační období stanovuje energetický regulační úřad vyšší maximální bonifikace nebo penalizace na 4% ze zisku distributora.



. Obr. 1.4 Závislost mezi regulovanými příjmy a kvalitou služeb s uplatněním limitů a neutrálního pásma [2]

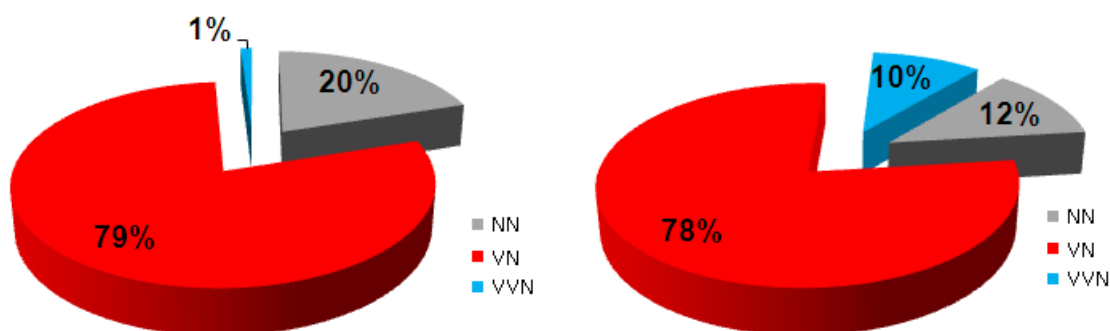
IV. regulační období zavádí nový prvek – klouzavý průměr. Tento prvek znázorňuje průměr hodnot ukazatelů nepřetržitosti dodávky SAIDI_Q a SAIFI_Q (ukazatele, které spadají do parametru Q) za poslední dva kalendářní roky. Distributor tak nebude hodnocen pouze na základě hodnot z jednoho roku. Tímto se eliminují meziroční kolísání spolehlivostních ukazatelů.

Parametr Q je součástí výpočtu upravené hodnoty povolených výnosů provozovatele distribuční soustavy na jednotlivých napěťových úrovních pro regulovaný rok (oficiálně značeno jako UPV_{dxei}). Hodnota povolených výnosů se projevuje v jednotkové ceně za roční rezervovanou kapacitu na napěťových úrovních VVN A VN, udává se v Kč/MW/rok (oficiálně značeno s_{dxei}). Celá metodika výpočtu je stanovena Energetickým regulačním úřadem v dokumentu *Zásady cenové regulace pro období 2016-2018 pro odvětví elektroenergetiky, plynárenství a pro činnosti operátora trhu v elektroenergetice a plynárenství*.

Z uvedených důvodů dochází v současné době k testování a projednávání nových myšlenek a zařízení, které mohou vést ke zlepšení ukazatelů nepřetržitosti dodávky SAIDI a SAIFI. V současnosti je nutné začít nasazovat tato nová koncepční řešení převážně na linky 22 kV. Tyto linky jsou nejrozsáhlejší, velmi často venkovního provedení a z tohoto důvodu je na nich i velký procentuální výskyt poruch.

2 Rekonfigurace distribuční sítě

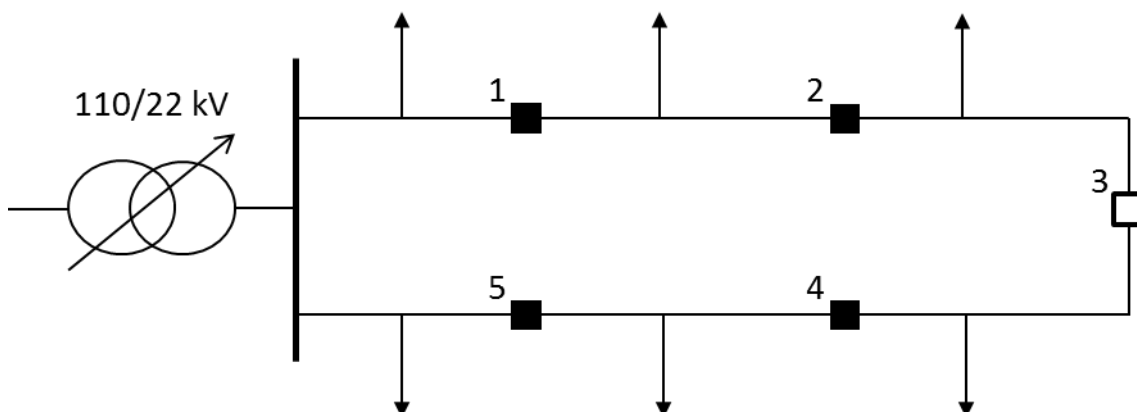
Tato kapitola se věnuje popisu distribuční soustavy, jak je provozovaná společností E.ON v současné době. Distribuční soustava se skládá ze tří základních napěťových úrovní a to linek 110 kV (VVN), které jsou převážně užívány jako transportní pro přenos elektrické energie od zdroje do rozvodny, nebo mezi rozvodnami 110 kV. Dále se jedná o linky 22 kV (VN), které slouží k přenosu elektrické energie ke koncovému odběrateli, nebo do distribučních trafostanic 22/0,4 kV, kde přecházejí na napěťovou úroveň 0,4 kV (NN), která slouží k přívodu elektrické energie koncovému odběrateli. V případě, že porovnáme ukazatele spolehlivosti elektrické energie jednotlivých napěťových úrovní (Obr. 2.1), je patrné, že největší zastoupení v rozložení tohoto ukazatele odpovídá hladině 22 kV. Samozřejmě že v tomto ukazateli jsou zahrnuty i neplánované výpadky sítě 22 kV, které jsou způsobeny největší poruchovostí těchto sítí, ale i přesto se jedná o nejpočetnější zastoupení ve všech napěťových hladinách. Jednou z možností snížení spolehlivostních ukazatelů elektrické energie je uvažování změny topologie sítí 22 kV v případě plánované odstávky části této sítě a „vymanipulování“ pouze potřebného úseku pro plánovanou odstávku.



Obr. 2.1 Grafické znázornění procentuálního obsazení ukazatelů nepřetržitosti dodávky SAIDI (vlevo) a SAIFI (vpravo) v napěťových hladinách distribuční soustavy ČR (Zdroj: **Vyhodnocení plynulosti 1. ½ 2009, EGC**)

2.1 Změny topologie sítě 22 kV

Změna topologie distribuční soustavy umožňuje provozovateli distribuční soustavy možnost napájení odběrných míst, která by musela být odpojena např. při odstraňování poruchy nebo v době plánované odstávky. Důvody pro změnu topologie jsou tedy v případě poruch nebo v případě plánovaných odstávek nebo např. při potřebě přepojení části odběrných míst pod jinou rozvodnu. Situaci si popíšme pomocí Obr. 2.2.



Obr. 2.2 Zjednodušený náčrt sítě 22 kV

Na Obr. 2.2 jsou znázorněny dva vývody 22 kV z rozvodny 110/22 kV. Tyto vývody jsou rozděleny na jednotlivé úseky očíslovanými spínacími prvky (rozboru spínacích prvků se věnuje kapitola 2.2) a na svém konci rozpojeny pomocí spínacího prvku č. 3. Linky 22 kV se standardně provozují jako síť paprskové, ale změnou topologie sítě může dojít k propojení linek do paralelního chodu. Z tohoto důvodu mají tyto linky na konci své kmenové části spínací prvek, který umožňuje propojení s kmenovým úsekem jiné linky.

V případě, že budeme uvažovat odstavení části vývodu mezi č. 4 a 5, například z důvodu opravy či poruchy na části sítě 22 kV, sepneme spínací prvek č. 3, vymanipulujeme požadovanou část vývodu spínacími prvky č. 4 a 5. V tomto případě nedojde k odstavení odběrných míst, která jsou napájena z části sítě mezi body č. 3 a 4, jako by tomu bylo v případě, že odpojíme celou linku spínacím prvkem č. 5.

Podobné změny topologie distribuční soustavy umožňují provozovateli distribuční soustavy omezit počet odběrných míst, která jsou zasažena plánovanou odstávkou nebo opravováním poruchy na minimum a to vede ke snížení spolehlivostních ukazatelů. Tyto změny v distribuční soustavě jsou doprovázeny následnými vyrovnávacími proudy, které mohou způsobit problém při změnách topologie, nebo tyto změny dokonce znemožnit. Příčinám vzniku a velikosti vyrovnávacího proudu se věnuje podrobně kapitola 3.

2.2 Možnosti spínání distribuční soustavy

Spínací prvky v distribuční soustavě slouží nejen k možnosti změny topologie distribuční soustavy, ale zároveň k jejímu kompletnímu řízení. Slouží k vymanipulování poškozených úseků, odstavování částí sítí, apod. Pro spínání celých vývodů se používají vývodové vypínače v rozvodně 110/22 kV a vývodové odpojovače. Vývodové vypínače

linek 110 kV a 22 kV, nebo příčné spínače přípojnic v rozvodnách 110 kV disponují dostatečným spínacím výkonem pro manipulace v distribuční soustavě, proto jejich bližší rozbor není uveden v následujícím výčtu spínacích prvků.

Pro spínání v kmenech a odbočkách linek 22 kV se v současnosti používají následující prvky.

- **Úsekový odpínač (úsečník)** – jedná se o nejrozšířenější prvek pro členění vývodů linek 22 kV. Jako základní varianta se používá tzv. růžkový odpínač, který umožňuje spínat pouze provozní proudy, na které je dimenzovaný, pro zhasnutí případného oblouku disponuje pouze opalovacími růžky. Úsekové odpínače je ale také možné osadit olejovou komorou pro zhasnutí oblouku, čímž navýšíme jeho spínací schopnost, nebo také dálkovým ovládním. Tyto odpínače mají nejčastěji označení FLA.



Obr. 2.3 Úsekový odpínač růžkový

- **Dálkově ovládaný úsekový odpínač** – konstrukčně se jedná o stejný úsekový odpínač, který byl popsán v předchozím bodě, pouze je dovybaven dálkovým ovládním. Dálkové ovládní může být pomocí rádiového signálu, nebo v dnešní době již také pomocí GPRS modemu. Tyto úsečníky pak musejí být také osazeny motory pro ovládní spínacího mechanismu. Dálkově ovládané úsečníky umožňují dispečerovi rychlejší vymanipulování místa poruchy než klasické úsekové odpojovače. Za předpokladu, že by ve vývodu 22 kV vznikla porucha a dispečer by měl k dispozici pouze klasické úsekové odpínače, musí do terénu vyslat montážní čet, která bude poruchu lokalizovat tím, že bude jednotlivé úsekové odpojovače spínat ručně. Průměrná doba takového vymanipulování místa poruchy je 75 minut. Za předpokladu, že ve stejné situaci má dispečer k dispozici dálkově ovládané úsekové odpínače,

vymanipuluje stejnou poruchu přibližně za 10 minut (uvažujeme-li situaci, kdy bude porucha mezi spínacími prvky stejného druhu).



Obr. 2.4 Dálkově ovládaný úsekový odpínač s olejovými komorami pro zhášení oblouku

- **Recloser** - nejmodernější způsob řízení distribuční soustavy v kmenech jednotlivých vývodů 22 kV. Jedná se o vypínač s funkcí opětovného zapnutí, který je umístěn přímo na podpěrném bodě vývodu 22 kV. Tento prvek je schopen, ve spolupráci s dalšími prvky tohoto typu, zcela autonomního režimu, pomocí něhož vymanipuluje místo poruchy a předá dispečerovi informaci o místě poruchy. Může také spolupracovat s dálkově ovládanými úsekovými odpínači, čímž dostává možnost vymanipulování místa poruchy ve větším měřítku a omezení tak menšího množství odběrných míst. Tyto prvky ve svém autonomním režimu dokáží změnit topologii distribuční soustavy, propojovat vývody 22 kV a to vše ve velmi krátkém časovém horizontu. Současným trendem společnosti E.ON je nasazování těchto moderních prvků do distribuční soustavy a to vždy do kmene linky a na místo, kde je možné propojit dvě různé linky 22 kV.



Obr. 2.4 Recloser výrobce Tavrida Electric využitý pro pilotní testování ve společnosti E.ON

Další možností spínání kmene nebo odbočky venkovních linek 22 kV je tzv. inteligentní odpínač. Tento prvek je obdobou dálkově ovládaného úsečníku, navíc je osazen měřením a směrovou ochranou. Jeho výhodou je hlášení místa poruchy, zda je před odpínačem, nebo za ním. Umožňuje také práci v jakém si autonomním režimu (v tomto režimu se v současnosti nepoužívá). To znamená, že odepne poškozený úsek a předá tuto informaci dispečerovi. Nedisponuje ale funkcí opětného zapínání jako recloser.

Norma společnosti E.ON uvádí, v jakých podmínkách je možné s daným prvkem manipulovat a jaké proudy daným spínacím prvkem mohou téct. Tuto interní normu musejí výrobci a dodavatelé spínacích prvků respektovat. Na základě uvedených spínacích schopností a na základě znalosti chování sítě ve spínaném úseku rozhoduje dispečer o bezpečné manipulaci s prvkem.

Tab. 2.1 Spínací možnosti prvků sítě 22 kV

Typ úsečníku	DRIBO Fla 15/60	IVEP VLK	DRIBO Flb	DRIBO Flb 6400
Popis	Komorový rovinný	Růžkový rovinný	Růžkový rovinný	Růžkový svislý
Jmenovitý zkratový proud (kA)	11	6,3	16	3,5
Jmenovitý vypínací proud (A), $\cos \varphi = 0,7$	630	36	31,5	17
Jmenovitý vypínací proud obvodu uzavřené smyčky (A)	400	30	31,5	17

2.3 Kruhování sítí VN

Při spínání částí sítí 22 kV je potřeba postupovat jako při fázování generátoru elektrické energie k nadřazené soustavě. Jedná se tedy o spínání dvou částí, které mohou mít odlišné parametry. V tomto případě nehovoříme o fázování, ale o tzv. kruhování (tento pojem se používá, pokud hovoříme o spínání dvou sítí se shodným kmitočtem). Pro bezpečné kruhování dvou částí distribuční soustavy je nutné zajistit následující fázovací podmínky:

- **Stejný sled fází**
- **Stejný kmitočet**
- **Shodná jmenovitá napětí**
- **Shodné fázory napětí** (stejná velikost i fázové natočení)

Při kruhování vývodů distribuční soustavy je velmi problematické zajištění poslední podmínky. Stejný sled fází je v distribuční soustavě standardem, kmitočet soustavy je zajištěn soustavou nadřazenou, přenosovou, ale dodržení stejné velikosti napětí a jejich fázového posuvu je v místě spínání problematické. Z tohoto důvodu při spínání v distribuční soustavě dochází ke vzniku vyrovnávacího proudu, jehož teoretický rozbor je uveden v kapitole 3.

Fázování generátorů elektrické energie je v současnosti zajištěno elektronickými fázovacími soupravami, které ohlídnají veškeré podmínky pro fázování a připnou generátor k síti v pravý okamžik. Vývodové vypínače linek VVN disponují synchronizačními soupravami, které hlídají podmínky kruhování. Jedná se o podobný princip jako u připojování generátoru k síti. Spínání vývodů distribuční soustavy je problematické zejména z hlediska neznalosti informace o napětích v bodě spínání. Spínání může probíhat např. v polovině nebo na konci linky. Velikost napětí je měřena v rozvodně 110/22 kV i na vývodech sítě 22 kV. Velikost fázorů napětí je možné měřit pomocí systémů synchronního měření fázorů WAMS (Wide Area Monitoring System). Systémy WAMS jsou v současnosti umístěny na všech rekonstruovaných rozvodnách 110 a 22 kV, kde měří úhel na přípojnicích těchto rozvodů. Setkáme se ale také s rozvodnami, kde dochází pouze k měření proudů či napětí vývodů a informace o úhlu není dostupná.

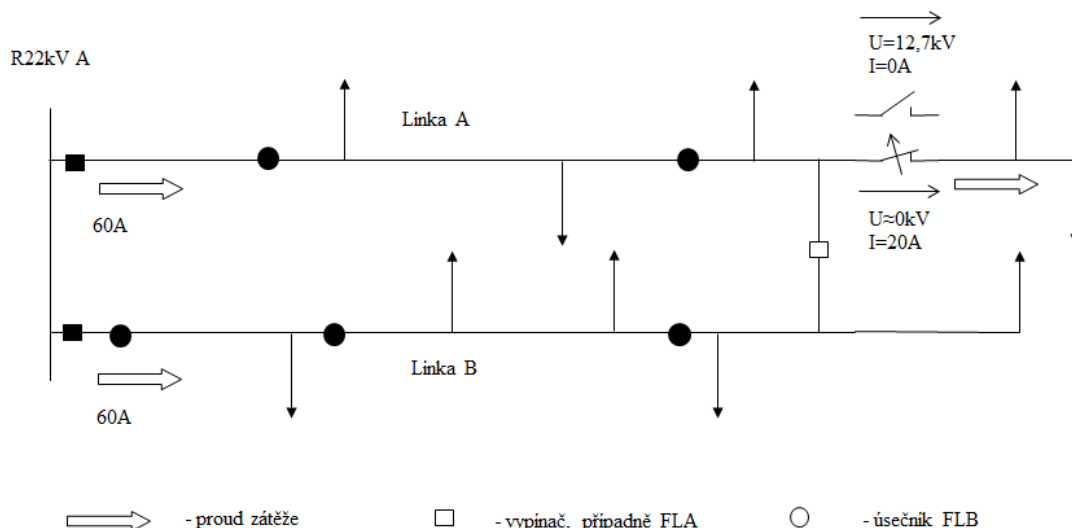
2.4 Druhy spínání v sítích 22 kV¹

V této kapitole jsou uvedeny nejčastěji prováděné manipulace v sítích 22 kV. Jedná se o rozbor vypínání (zapínání) v různých částech distribuční hladiny VN. Na průběh vypínacího přechodového děje má vliv především velikost vypínaného proudu, existence a parametry náhradních tras proudu při rozpojování kruhu a koncový rozdíl napětí mezi rozpojenými kontakty odpínače v ustáleném stavu. Následující počáteční a ustálené hodnoty jsou vypočteny na základě uvažování vývodů 22kV o délkách 20km/vývod a zatížení cca 2MW/vývod. Použité spínací prvky v následujících schématech jsou nejčastěji úsekové odpínače FLA (olejová zhášecí komora) a FLB (klasický růžkový odpínač).

¹ Tato kapitola byla s drobnými úpravami převzata z [3]

2.4.1 Vypínání (zapínání) části sítě 22 kV

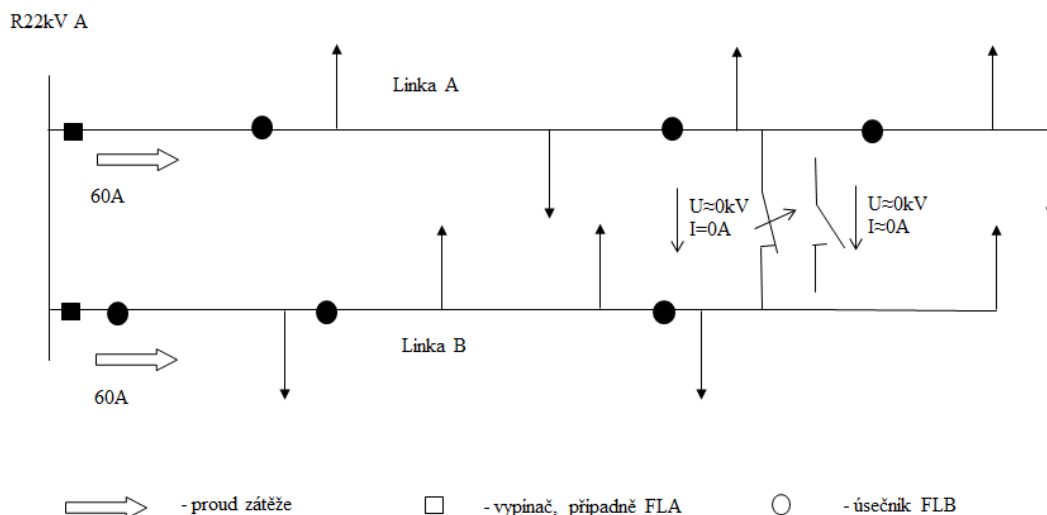
Při spínání části sítě 22kV, kdy po vypnutí části sítě 22kV zůstane vypínaná část bez napětí, dochází k maximálnímu namáhání spínaného prvku. Spínací prvek musí uhasit oblouk, který je „živený“ plným fázovým napětím sítě 22kV (12,7kV).



Obr. 2.4.1 Vypínání (zapínání) části sítě 22 kV

2.4.2 Vypínání (zapínání do kruhu) části sítě 22 kV v blízkosti konců vývodů

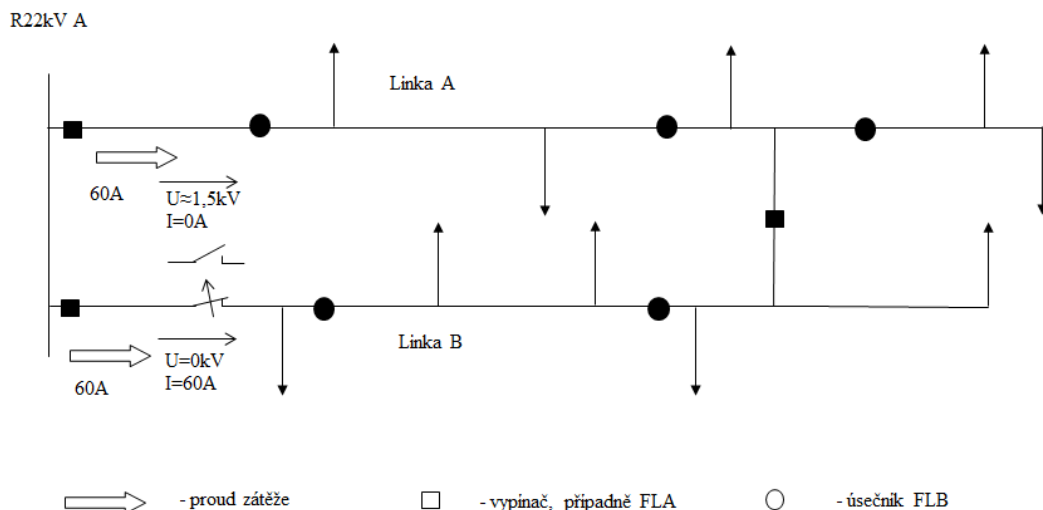
Při spínání dvou linek 22kV v blízkosti konců vývodů napájených ze stejné přípojnice 22kV se neočekává výrazný proud tekoucí prvkem spojujícím obě linky. Tato situace platí za předpokladu obdobně zatížených linek 22kV. Pokud by se jednalo o značně rozdílné linky, kdy jedna je např. z důvodu připojených zdrojů výkonově přebytková a druhá bez zdrojů pouze odběrová, lze očekávat na konci rozdíl napětí až 0,6kV. Z porovnání Obr. 2.4.1 s Obr. 2.4.2 jsou zřetelné značně výhodnější spínací podmínky v případě kruhování linek 22kV než vypínání části sítě 22kV. V případě rozpojování z kruhu rozdílně zatížených linek 22kV nedochází k vypínání proudu, spíše se jedná o převádění proudu z jednoho vývodu na druhý. Obdobná situace nastává při manipulaci s odpojovači při převádění vývodu mezi přípojnici.



Obr. 2.4.2 Kruhování linek 22 kV napájených ze stejné přípojnice 22 kV na konci vývodu

2.4.3 Vypínání (zapínání do kruhu) části sítě 22 kV v blízkosti začátku jednoho z vývodů 22 kV

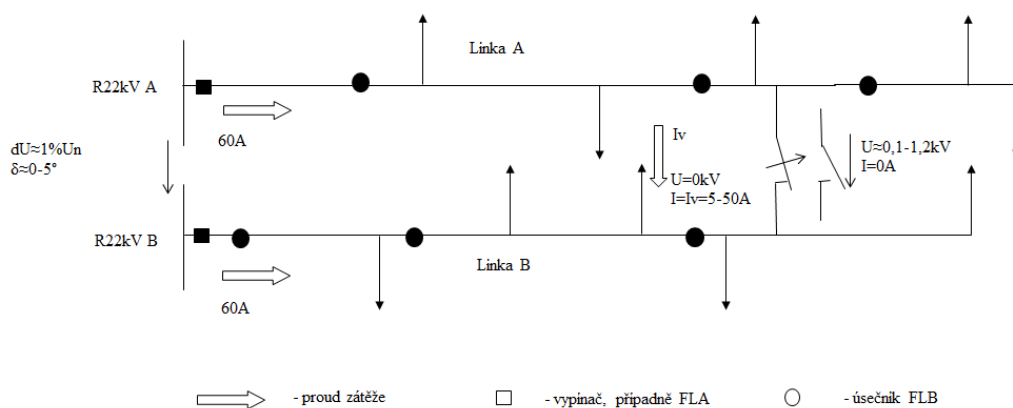
Při spínání dvou linek 22kV v blízkosti začátku jednoho z vývodů napájených ze stejné přípojnice 22kV je očekáván výrazný proud tekoucí prvkem spojujícím obě linky. Při rozpojování kruhu v blízkosti rozvodny 22kV teče rozpojovaným prvkem proud celého jednoho vývodu (60A). Z principu se nejedná o ekvivalent podle Obr. 2.4.1, nicméně z vypočteného napětí na svorkách rozpojeného prvku při délce jednoho vývodu 20km a zatížení 60A/vývod je možné očekávat rozdíl napětí až 1,5kV. Toto spínání nelze považovat za potenciálně bezproblémové jako při uspořádání na Obr. 2.4.2.



Obr. 2.4.3 Kruhování linek 22 kV napájených ze stejné přípojnice 22 kV v blízkosti rozvodny 22 kV

2.4.4 Vypínání (zapínání do kruhu) části sítě 22 kV v blízkosti konců vývodů, oba vývody jsou napájeny z různých uzlových oblastí 110 kV

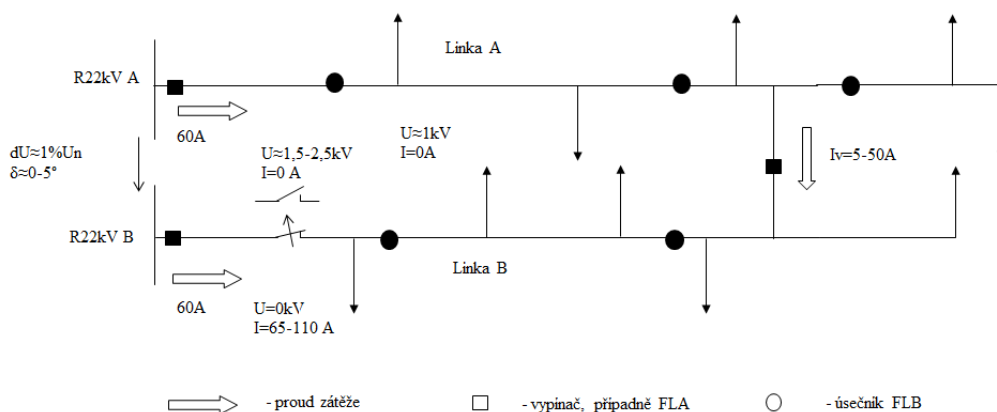
Při spínání dvou linek 22kV napájených z různých uzlových oblastí 110kV je nutné počítat s vyrovnávacím proudem z důvodu rozdílných velikostí napětí a různého fázového posunu napětí. Pokud se spínání uskutečňuje v blízkosti konců vývodů a vývody jsou přibližně stejně zatíženy, lze říci, že velikost napětí na obou koncích je přibližně stejná. Z důvodu velikosti jedné odbočky TR 110/23kV (2%) a třídy přesnosti měření napětí v rozvodnách je nutné uvažovat vždy s rozdílem velikosti napětí 1%. Rozhodující pro možnost spínání je velikost vyrovnávacího proudu, která je závislá na rozdílu natočení napětí mezi spínanými rozvodnami 22kV.



Obr. 2.4.4 Kruhování linek 22 kV napájených z různých přípojníc 22 kV na konci vývodu

2.4.5 Vypínání (zapínání do kruhu) části sítě 22 kV v blízkosti začátku jednoho z vývodů 22 kV, oba vývody jsou napájeny z různých uzlových oblastí 110 kV

Tato možnost spínání se v praxi použije pouze velice zřídka. Z důvodu značné velikosti součtového proudu jednoho vývodu a vyrovnávacího proudu je možné manipulaci provést pouze vypínačem, nebo úsečníkem FLA.



Obr. 2.5 Kruhování linek 22kV napájených z různých přípojníc 22kV v blízkosti R22kV

Tab. 2.3 Porovnání jednotlivých spínacích manipulací z pohledu počátečních podmínek vypínání a konečného ustáleného stavu

	Počáteční podmínky		Konečný ustálený stav	
	Vypínání 22 kV	$U = 0 \text{ kV}$	$I \approx 20 \text{ A}$	$U = 12,7 \text{ kV}$
Vypínání z kruhu na konci vývodu 22 kV	$U = 0 \text{ kV}$	$I = 0 \text{ A}$	$U \approx 0 \text{ kV}$	$I \approx 0 \text{ A}$
Vypínání z kruhu na začátku vývodu 22 kV	$U = 0 \text{ kV}$	$I \approx 60 \text{ A}$	$U \approx 1,5 \text{ kV}$	$I \approx 0 \text{ A}$
Vypínání z kruhu různých oblastí 22 kV na konci vývodu 22 kV, $\delta = 0-5^\circ$	$U = 0 \text{ kV}$	$I = 0 \text{ A}$	$U \approx 0 - 1,5 \text{ kV}$	$I \approx 5 - 50 \text{ A}$
Vypínání z kruhu různých oblastí 22 kV na začátku vývodu 22 kV, $\delta = 0-5^\circ$	$U = 0 \text{ kV}$	$I = 65 - 110 \text{ A}$	$U \approx 1,5 - 2,5 \text{ kV}$	$I = 0 \text{ A}$

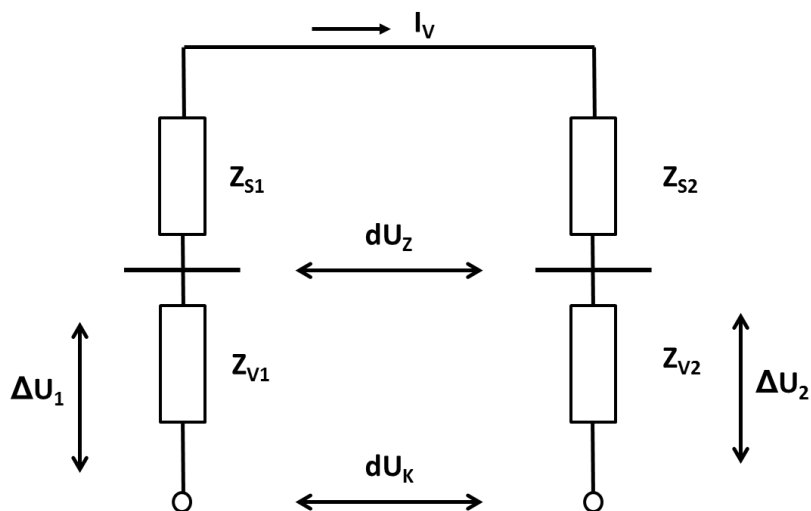
Z uvedených skutečností vyplývá, že největší problém s velikostí vyrovnávacího proudu nastane v situacích, kdy spínáme linky 22 kV, které jsou napájeny z různých uzlových oblastí 110 kV. Společnost E.ON potvrdila v této věci, že spínání linek 22 kV nebývá problém do chvíle, dokud nedojde právě k tomuto druhu spínání.

3 Vyrovnávací proud

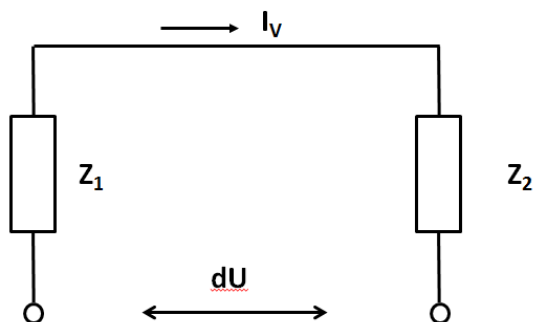
Vznik vyrovnávacího proudu při kruhování dvou různých linek je závislý na dodržení fázovacích podmínek. V místě spojení není možné dodržet shodnou velikost napětí spínaných linek, ani úhel fázorů těchto napětí. Rozdílná velikost napětí spínaných úseků je způsobena rozdílnými velikostmi úbytků napětí na spínaných linkách. V praxi není možné tuto podmínku dodržet, neboť linky nemají 100% shodné parametry, nejedná se pouze o použitý materiál, ale také zatížení spínaných linek.

3.1 Teoretický rozbor

Náhradní schéma pro výpočet vyrovnávacího proudu je znázorněno na *Obr. 3.1*. Na uvedeném obrázku jsou znázorněny čtyři impedance, z nichž Z_{S1} a Z_{S2} znázorňují impedance nadřazené soustavy včetně impedance transformátoru, který napájí danou linku, dále Z_{V1} a Z_{V2} , které znázorňují impedance vývodů. Na impedancích vývodů vznikají neznámé úbytky napětí ΔU_1 a ΔU_2 . V rozvodnách, které dané vývody napájí, máme informaci o napětích a můžeme si dopočítat známý rozdíl napětí dU_Z . Na konci vývodů, kde dochází ke spínání, je neznámý rozdíl napětí linek dU_K . Náhradní schéma je možné zjednodušit sečtením impedancí jedné a druhé strany. Zjednodušené schéma je na *Obr. 3.2*.



Obr. 3.1 Náhradní schéma pro výpočet vyrovnávacího proudu



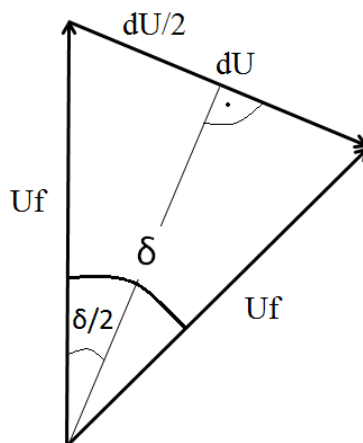
Obr. 3.2 Zjednodušené náhradní schéma pro výpočet vyrovnávacího proudu

Ze zjednodušeného náhradního schématu je možné odvodit vztah pro velikost vyrovnávacího proudu:

$$|\bar{I}_v| = \frac{|\overline{dU}|}{|\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2|} \quad (3.1.)$$

Velikost rozdílu napětí dU je závislá zejména na posunu fázorů napětí spínaných linek, fázorový diagram je znázorněn na Obr. 3.3. Pro toto schéma lze odvodit rovnici pro výpočet rozdílu napětí dU :

$$dU = 2 * U_f * \sin \frac{\delta}{2} \quad (3.2.)$$



Obr. 3.3 Fázorový diagram vzniku rozdílu napětí dU

Z fázorového diagramu na Obr. 3.3 je patrné, že velikost fázových napětí spínaných linek je shodná. Tato varianta je možná pouze při teoretické úvaze. Ve výpočtu reálného rozdílu napětí je nutné uvažovat různá fázová napětí s chybou rovnou 1% U_n . Chyba 1% vyplývá z velikosti odbočky transformátoru 110/23 kV (v případě výpočtu spínání

linek 22 kV), která je 2%. Z této skutečnosti a taktéž z přesnosti měničů napětí (0,5%) je zřejmé, že nejsme schopni dvě napětí srovnat s vyšší přesností než 1%.

3.2 Vyrovnávací proud pro síť 22 kV

Dle uvedených vztahů v kapitole 3.1 je vypočten rozdíl napětí a velikost vyrovnávacího proudu. Zvolené hodnoty pro výpočet (zvolené zkratové impedance jsou pro fiktivní linky 22kV, hodnoty vznikly jako průměrná čísla z velikostí zkratových impedancí více linek):

- $U_s = 23 \text{ kV}$
- $Z_1 = 5,5 + i10,6 \ \Omega$ (této hodnotě odpovídá zkratový výkon 40,53 MVA)
- $Z_2 = 4,9 + i7,7 \ \Omega$ (této hodnotě odpovídá zkratový výkon 53,03 MVA)
- $\delta = 0^\circ - 20^\circ$

S využitím uvedených parametrů spínané sítě a vzorců 3.1. a 3.2. byla dopočtena *Tab. 3.1.* Tato predikce nezohledňuje rozdíl velikosti fázorů napětí, ale pouze jejich natočení o rozdílový úhel fázorů spínaných napětí δ .²

Tab. 3.1 Obecný výpočet vyrovnávacího proudu pro spínání na linkách 22 kV

δ	(°)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
dU	(kV)	0,23	0,46	0,70	0,93	1,16	1,39	1,62	1,85	2,08	2,31
Iv	(A)	11,0	22,0	33,0	44,0	55,0	66,0	77,0	88,0	99,0	110,0

δ	(°)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
dU	(kV)	2,55	2,78	3,01	3,24	3,47	3,70	3,93	4,15	4,38	4,61
Iv	(A)	121,0	131,9	142,8	153,8	164,7	175,6	186,5	197,4	208,3	219,1

Z uvedeného výpočtu vyplývá, že například při rozdílném úhlu fázorů napětí 10° spínaných linek 22 kV bude po sepnutí těchto linek protékat linkami vyrovnávací proud 110 A. To znamená, že místem sepnutí poteče proud o tuto hodnotu větší. Tímto se dostáváme do pásma nemožnosti vypnutí tohoto proudu běžnými úsekovými odpínači (limitní hodnoty viz. *Tab. 2.1*). Zanikají nám tedy možnosti změny konfigurace distribuční soustavy.

² Všechny predikce velikostí vyrovnávacích proudů vypočtené v této diplomové práci, byly dopočteny pomocí vzorců 3.1. a 3.2.

3.3 Vyrovnávací proud pro sítě 110 kV

Linky 110 kV je možné spínat pouze v rozvodnách, není možné je sepnout v poli. Sepnutí a vypnutí tedy provádí výkonové vypínače. Tyto vypínače jsou schopny spínat i nadproudy, jejich spínací schopnost není tak omezená, jako při spínání a rozepínání linek 22 kV. Pro výpočet velikosti vyrovnávacího proudu na linkách 110 kV volíme hodnoty:

- $U_s = 115 \text{ kV}$
- $Z_1 = 3 + i13 \ \Omega$ (této hodnotě odpovídá zkratový výkon 906,93 MVA)
- $Z_2 = 2,5 + i17 \ \Omega$ (této hodnotě odpovídá zkratový výkon 704,19 MVA)
- $\delta = 0^\circ - 20^\circ$

Tab. 3.2 Obecný výpočet vyrovnávacího proudu pro spínání na linkách 110 kV

δ	(°)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
dU	(kV)	1,16	2,32	3,48	4,63	5,79	6,95	8,11	9,26	10,42	11,57
Iv	(A)	38,0	76,0	114,0	151,9	189,9	227,9	265,8	303,7	341,6	379,5

δ	(°)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
dU	(kV)	12,73	13,88	15,03	16,18	17,33	18,48	19,63	20,77	21,92	23,06
Iv	(A)	417,3	455,1	492,9	530,6	568,3	605,9	643,5	681,1	718,6	756,0

Opět si vezměme případ, že rozdílový úhel napětí spínaných oblastí je 10° . V tomto případě bude sepnutým vedením linek 110 kV protékat vyrovnávací proud 379,5 A. Velikost vyrovnávacího proudu je velikost nadproudu, který vedením protéká navíc oproti jmenovitému proudu. V případě, že linkou 110 kV protéká jmenovitý proud 100 A, po sepnutí s jinou linkou 110 kV začne linkami protékat vyrovnávací proud a výsledný proud tekoucí vedením je tedy 479,5 A. Velikost tohoto proudu může pro některá vedení přesahovat velikost maximálního dovoleného provozního proudu. To by znamenalo reagování ochrany vývodu a jeho okamžité vypnutí.

Tato predikce platí pochopitelně pouze v případě, že výkon procházející vedením, má stejný účinek před sepnutím i po sepnutí. To je skutečnost, která není v žádném případě zanedbatelná a v reálném spínání vzácná. Z tohoto důvodu je predikovaná hodnota 463 A pro spínání uvedené linky hodnotou maximální. Pro skutečnou predikci velikosti proudu po sepnutí je tedy potřeba znát více parametrů než jen procházející proud. Tento vliv je také zanedbán při predikování velikostí proudů po sepnutí v kapitole 5.

4 Vliv zátěže a lokální výroby na velikost rozdílového úhlu spínaných napětí

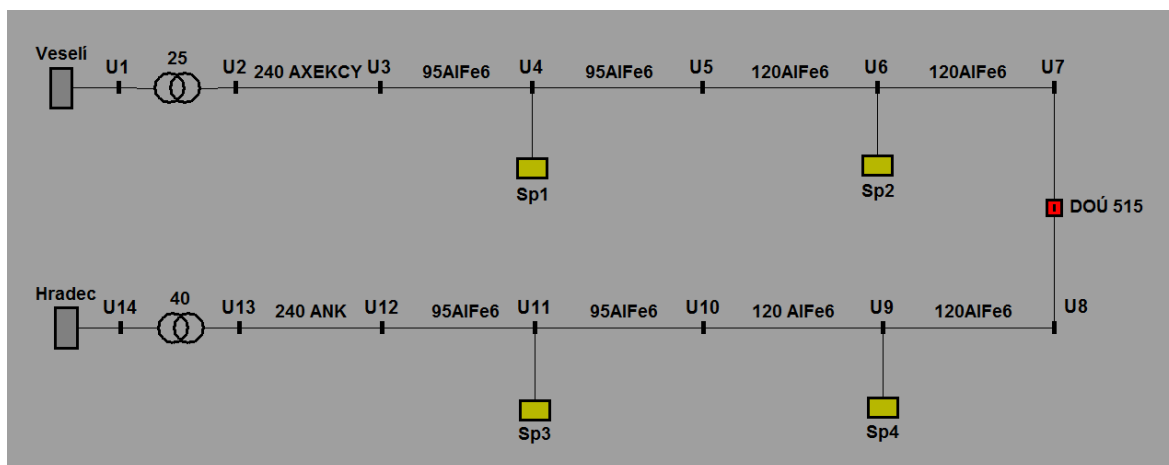
Pro uvažování vlivu zátěže a rozprostřené výroby na rozdílový úhel spínaných napětí δ byl v programu Evlivy, který je vyvíjen společností EnerGoConsult ČB, s.r.o., sestaven model skutečných vývodů sítě 22 kV. Z tohoto modelu vzešly všechny vypočtené hodnoty uvedené v této kapitole. Jedná se o vývody Řečice (HRA) a Řečice (VES), které vycházejí z rozvodu 110/22 kV Hradec (označení HRA) a Veselí (označení VES). Tyto linky byly využity pro predikci vyrovnávacího proudu, která byla jedním z cílů této diplomové práce. Uvedené linky VN je možné propojit dálkově ovládaným úsekovým odpínačem č. 515.

4.1 Použitý model

Do modelu vstupují hodnoty pro napájecí uzly rozvodu 110 kV Veselí ($I_K = 4,04$ kA; $S_K = 769,723$ MVA; $R/X = 0,2$; Transformátor 110/23 kV $S_T = 25$ MVA; $u_k = 11\%$) a Hradec ($I_K = 4,97$ kA; $S_K = 946,912$ MVA; $R/X = 0,2$; Transformátor 110/23 kV $S_T = 40$ MVA; $u_k = 11,5\%$). Dále informace o konstrukci kmenu linek Řečice (VES) (linka se skládá z kabelového vývodu 240AXEKCY, délky 78 m, dále z venkovního vedení 95AlFe6 délky 6,407 km a 120AlFe6 délky 3,992 km) a Řečice (HRA) (linka se skládá z kabelového vývodu 240ANK, délky 118 m, dále z venkovního vedení 95AlFe6 délky 8,157 km a 120AlFe6 délky 5,449 km).

Dle provozních zkušeností, získaných ze společnosti E.ON, jsou vývody linek 22 kV zatěžovány odebíranými výkony většinou v rozmezí 0,5 – 2,5 MW, v extrémních případech se může jednat až o hodnotu 8 MW, tato hodnota však do výpočtu zahrnuta nebude. Uvedené rozmezí hodnot odebíraného výkonu uvádí hodnoty výkonů naměřené pro linku 22 kV v rozvodně. Tato hodnota je součtem všech odebíraných výkonů na dané lince. Stanovení přesného rozložení odebíraného výkonu podél celého vývodu je velmi pracné, z tohoto důvodu je při výpočtu uvažováno se spojitým zatížením, které alespoň částečně respektuje rozložení výkonu podél celé linky. Rozložení výkonu uvažujeme do dvou odběrů pro každou linku, bloky odběrů jsou na *Obr. 4.1* označeny Sp1 a Sp2 pro linku Řečice (VES), Sp3 a Sp4 pro linku Řečice (HRA).

Model, na kterém bude simulován vliv zátěže rozdílového úhlu spínaných napětí δ , je znázorněn na *Obr. 4.1*.



Obr. 4.1 Model linek 22 kV Řečice (VES) a Řečice (HRA) – uvažování pouze spotřeby

Z teorie spojitého zatížení vyplývá, že odběr je rovnoměrně rozložen podél celého vedení, je rovnoměrně klesající od maximálního zatížení k nule. Pro výpočty úbytků napětí je uvažována náhrada jedním odběrem, který respektuje veškerý výkon dané linky. Tento odběr se umísťuje do poloviny linky nebo na její konec. V případě, že odběr umístíme na konec vývodu, bude jeho velikost poloviční oproti hodnotě naměřené v rozvodně. V případě, že odběr umístíme do poloviny linky, budeme uvažovat maximální výkon tak, jak bude změřen na vývodu v rozvodně. Tato varianta bude použita při výpočtu vlivu zatížení linek 22 kV na rozdílový úhel spínaných napětí δ . Pro zpřesnění výpočtu budeme uvažovat zavedení dvou odběrů pro každou z modelovaných linek 22 kV.

Modelované linky Řečice (VES) a Řečice (HRA) obsahují kabelový vývod, který vyvádí linku ven z rozvodny, délka tohoto vývodu je zanedbatelná v porovnání s délkami venkovního vedení jednotlivých linek. Dále se každá linka skládá z venkovního vedení, z vodiče 95AlFe6 (jeho délku definujeme jako délku l_1), na který navazuje vodič 120AlFe6 (jeho délku definujeme jako délku l_2). Uvažujme tedy, že linka se skládá vždy z dvou rozdílných úseků. Do poloviny z každého úseku umístíme jeden odběr v závislosti na délkách l_1 a l_2 . Tyto odběry budou spočítány pomocí vztahů 3.1. – 3.4., ve kterých je uvedený celkový odběr linky změřený v rozvodně, značený O s indexem dané linky a délky l_1 a l_2 opět s indexem dané linky.

$$Sp1 = O_{(VES)} * \frac{l_1(VES)}{l_1(VES) + l_2(VES)} \quad (3.1.)$$

$$Sp2 = O_{(VES)} * \frac{l_2(VES)}{l_1(VES) + l_2(VES)} \quad (3.2.)$$

$$Sp3 = O_{(HRA)} * \frac{l_1 (HRA)}{l_1 (HRA) + l_2 (HRA)} \quad (3.3.)$$

$$Sp4 = O_{(HRA)} * \frac{l_2 (HRA)}{l_1 (HRA) + l_2 (HRA)} \quad (3.4.)$$

Uvažujme zatížení linek Řečice (VES) a Řečice (HRA) v definovaném rozmezí 0,5 – 2,5 MW po kroku 0,5 MW. S využitím vzorců 3.1. – 3.4. získáme tabulky jednotlivých odběrů pro model těchto linek *Tab. 4.1* a *Tab. 4.2*.

Tab. 4.1 Rozklad celkového výkonu linky Řečice (VES) do dílčích odběrů pro výpočetní model

Řečice (VES)	(kW)	500	1000	1500	2000	2500
Sp1	(kW)	308	616	924	1232	1540
Sp2	(kW)	192	384	576	768	960

Tab. 4.2 Rozklad celkového výkonu linky Řečice (HRA) do dílčích odběrů pro výpočetní model

Řečice (HRA)	(kW)	500	1000	1500	2000	2500
Sp1	(kW)	300	600	899	1199	1499
Sp2	(kW)	200	400	601	801	1001

4.2 Vliv zátěže na velikost rozdílového úhlu spínaných napětí δ

Pro zjištění vlivu zátěže na velikost rozdílového úhlu spínaných napětí δ budeme uvažovat zátěž linek totožnou, ale i rozdílnou. Pro tuto analýzu byly do modelu, připraveném v programu Evlivy, vkládány postupně všechny kombinace celkového výkonu odebíraného linkami Řečice (VES) a Řečice (HRA). Pro každou kombinaci byla vyhotovena programem Evlivy tabulka, která je uvedena na *Obr. 4.2*. Tato tabulka uvádí stav napětí, impedance, jejich úhly a zkratový výkon pro každý bod modelované sítě. Jednotlivé body jsou patrné z *Obr. 4.1*.

Uzel	U [kV]	Úhel [°]	dUn [%]	Zk [Ohm]	Úhel [°]	Sk [MVA]
U1	109,800	-0,184	0,182	15,717	78,698	769,885
U2	22,873	-0,830	-3,968	2,908	85,827	166,439
U3	22,871	-0,834	-3,961	2,924	85,654	165,520
U4	22,723	-1,115	-3,287	4,281	73,917	113,058
U5	22,666	-1,224	-3,029	5,730	67,958	84,469
U6	22,638	-1,294	-2,901	6,574	66,709	73,620
U7	22,638	-1,294	-2,901	7,421	65,745	65,220
U8	22,609	-1,177	-2,767	8,041	61,284	60,195
U9	22,609	-1,177	-2,766	6,876	61,789	70,395
U10	22,649	-1,077	-2,949	5,711	62,500	84,746
U11	22,724	-0,934	-3,290	3,811	68,298	126,995
U12	22,913	-0,577	-4,148	2,024	84,855	239,092
U13	22,915	-0,574	-4,159	2,009	85,337	240,859
U14	109,847	-0,152	0,139	12,777	78,696	946,994

Obr. 4.2 Ukázka vyhodnocení situace zatížení linek Řečice (VES) a Řečice (HRA) (maximální zátěž 2,5 MW na obou vývodech) v programu Evlivy

Při této analýze jsou zásadní informace o napětích a úhlech fázorů spínaných napětí δ , tedy v bodě umístění spínacího prvku – dálkově ovládaného úsečníku č. 515. Tyto body jsou na *Obr. 4.1* a *Obr. 4.2* znázorněny jako uzly U7 a U8. V případě výpočtu rozdílového úhlu fázorů spínaných napětí vezmeme tedy hodnoty úhlů napětí v těchto bodech a učiníme jejich rozdíl, který v absolutní hodnotě zaznamenává *Tab. 4.3*. Obdobným způsobem byl vyhodnocen také rozdíl sdružených napětí v těchto bodech. Ty uvádí *Tab. 4.4*.

Tab. 4.3 Absolutní hodnoty rozdílového úhlu fázorů spínaných napětí δ v místě spínání pro různá zatížení linek Řečice (HRA) a Řečice (VES)

Hodnoty v místě spínání (DOÚ 515)		Řečice (VES) (kW)				
δ (°)		500	1000	1500	2000	2500
Řečice (HRA) (kW)	500	0,021	0,280	0,539	0,796	1,052
	1000	0,215	0,044	0,303	0,560	0,816
	1500	0,449	0,190	0,069	0,326	0,582
	2000	0,682	0,423	0,164	0,093	0,349
	2500	0,941	0,655	0,396	0,139	0,117

Tab. 4.4 Absolutní hodnoty rozdílu sdružených napětí v místě spínání pro různá zatížení linek Řečice (HRA) a Řečice (VES)

Hodnoty v místě spínání (DOÚ 515)		Řečice (VES) (kW)				
dU (kV)		500	1000	1500	2000	2500
Řečice (HRA) (kW)	500	0,001	0,071	0,141	0,211	0,281
	1000	0,077	0,007	0,063	0,133	0,203
	1500	0,154	0,084	0,014	0,056	0,126
	2000	0,232	0,162	0,092	0,022	0,048
	2500	0,309	0,240	0,169	0,099	0,029

Z *Tab. 4.3* je patrné, že pokud jsou linky Řečice (VES) a Řečice (HRA) přibližně stejně zatíženy, rozdílový úhel fázorů spínaných napětí δ je téměř zanedbatelný. Při rozdílném zatížení se tento úhel zvětšuje až do maximální hodnoty přibližně 1° pro velmi rozdílná zatížení (v případě, že je jedna linka velmi zatížená a druhá téměř odlehčená). Obdobně jako rozdílový úhel fázorů spínaných napětí je možné vyhodnotit také rozdíl sdružených napětí v bodě spínání. Pokud jsou linky obdobně zatíženy, rozdíl napětí je zanedbatelný, při rozdílném zatížení však dojde k rozdílu až 0,3 kV.

Uvedená hypotéza platí pro případ, že dispečer zná parametry sítě v místě spínání na kmeni linky 22 kV. Ve skutečnosti dispečer disponuje pouze hodnotami změřenými v rozvodně. Ze získaných hodnot z analýzy v programu Evlivy je možné získat také rozdíl úhlů fázorů napětí přímo v rozvodnách. Tuto predikci spočítáme jako rozdíl úhlu fázorů

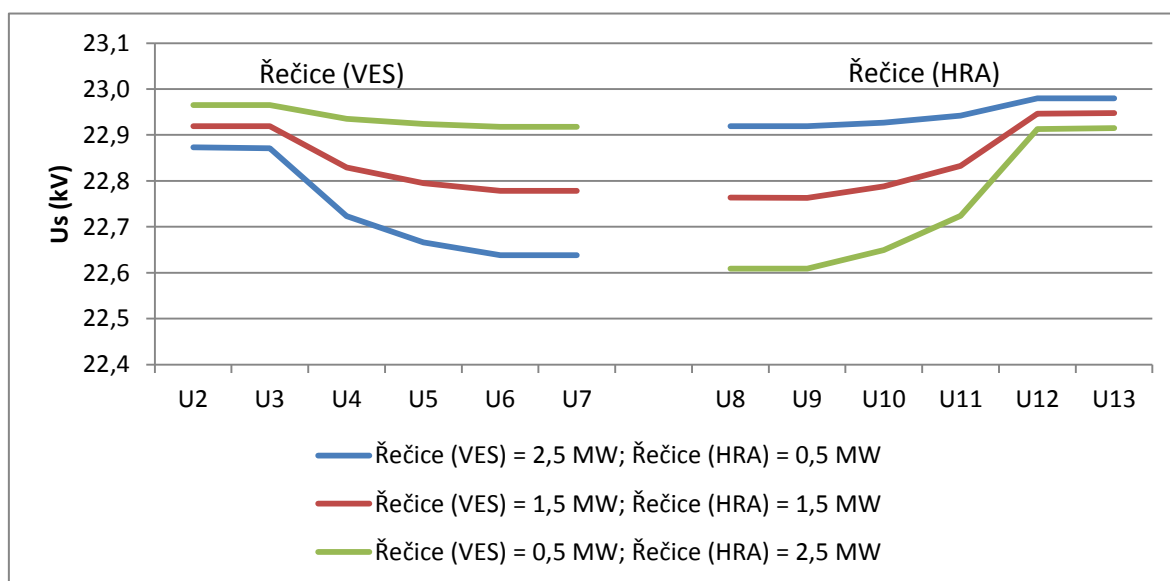
napětí v bodech U2 a U13, které jsou patrné z Obr. 4.1 a Obr. 4.2. Tento rozdíl znázorňuje Tab. 4.5.

Tab. 4.5 Absolutní hodnoty rozdílového úhlu fázorů spínaných napětí δ v rozvodnách pro různá zatížení linek Řečice (HRA) a Řečice (VES)

Hodnoty v rozvodnách		Řečice (VES) (kW)				
δ (°)		500	1000	1500	2000	2500
Řečice (HRA) (kW)	500	0,049	0,216	0,382	0,547	0,711
	1000	0,066	0,101	0,267	0,432	0,596
	1500	0,180	0,013	0,153	0,318	0,482
	2000	0,293	0,126	0,040	0,205	0,369
	2500	0,406	0,239	0,073	0,092	0,256

Porovnáme-li hodnoty uvedené v Tab. 4.3 (hodnoty v bodě spínání, které dispečer v okamžiku spínání nezná) s hodnotami uvedenými v Tab. 4.5 (hodnoty, které si může dispečer dopočítat, protože má informaci o úhlech fázorů napětí v rozvodně), shledáme průměrný rozdíl těchto hodnot v 2,3 násobku hodnot, tj. hodnota rozdílového úhlu fázorů spínaných napětí δ na konci vedení může být až 2,3x větší než hodnota tohoto úhlu v rozvodně. Tento předpoklad se však vztahuje na úhly malé. U větších úhlů již nenastává tak rapidní rozdíl.

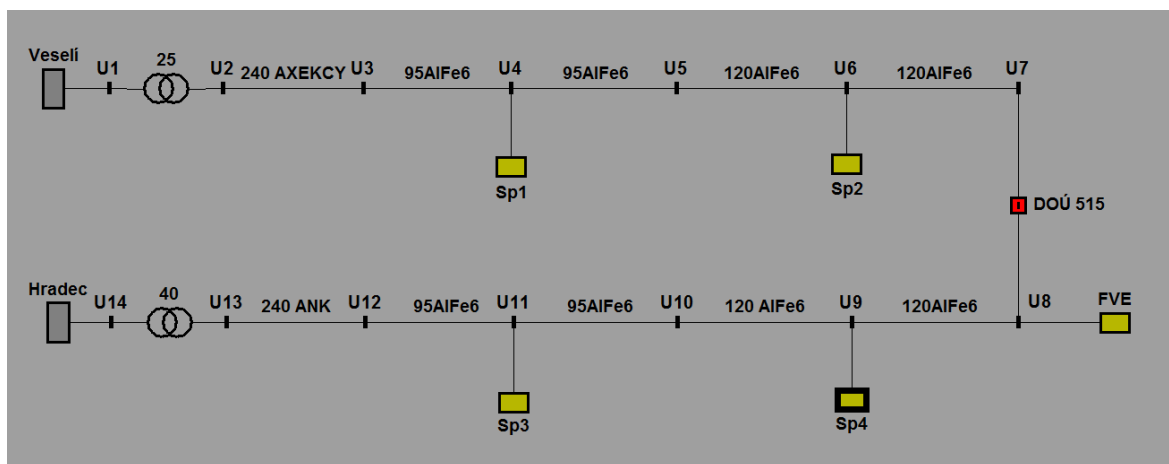
Úbytek napětí na linkách 22 kV Řečice (VES) a Řečice (HRA) respektuje graf na Obr. 4.3. Body U2 – U13 na Obr. 4.3 jsou patrné na Obr. 4.1. Dálkově ovládaný úsekový odpojovač č. 515 (místo spínání) respektuje v Obr. 4.3 mezeru v grafu. Z Obr. 4.3 je patrný zvyšující se rozdíl spínaných napětí se zvyšujícím se rozdílem zatížení jednotlivých linek 22 kV.



Obr. 4.3 Úbytek napětí na linkách 22 kV Řečice (VES) a Řečice (HRA) pro různá zatížení těchto linek

4.3 Vliv lokální výroby na velikost rozdílového úhlu spínaných napětí δ

Pro posouzení vlivu lokální výroby na velikost rozdílového úhlu fázorů spínaných napětí δ byla do modelu na konec vývodu Řečice (HRA) přidána výrobná, která je na Obr. 4.4 znázorněna boxem s označením FVE. Výpočetní model pro tuto predikci je znázorněn na Obr. 4.4.



Obr. 4.4 Výpočetní model definovaný v programu Evlivy pro predikci vlivu lokální výroby na rozdílový úhel fázorů spínaných napětí δ

Pro tento model byl zvolen výkon výrobní stanoven na hodnoty 1000 kW, 2000 kW a 3000 kW. Celkové výkony linek Řečice (VES) a Řečice (HRA) se opět pohybují v rozmezí 0,5 – 2,5 MW po kroku 0,5 MW. Maximální možný výkon výrobní připojený v tomto bodě je dle PPDS přibližně 4000 kW (zdroj připojený do distribuční soustavy nesmí způsobit změnu napětí v místě připojení větší než 2%). Vypočtené hodnoty rozdílového úhlu fázorů spínaných napětí δ a rozdílu sdružených napětí v bodě spínání jsou uvedeny v Tab. 4.6 – Tab. 4.11 (v těchto tabulkách jsou uvedeny vždy hodnoty v místě spínání – DOÚ 515). Způsob výpočtu uvedených hodnot je identický s postupem výpočtu v kapitole 4.2.

Tab. 4.6 Absolutní hodnoty rozdílového úhlu fázorů spínaných napětí δ v místě spínání pro různá zatížení linek Řečice (HRA) a Řečice (VES) – výkon výrobní 1000 kW

δ (°)		Řečice (VES) (kW)				
		500	1000	1500	2000	2500
Řečice (HRA) (kW)	500	0,859	1,118	1,377	1,634	1,890
	1000	0,620	0,879	1,138	1,395	1,651
	1500	0,383	0,642	0,901	1,158	1,414
	2000	0,147	0,406	0,665	0,922	1,178
	2500	0,088	0,171	0,430	0,687	0,943

Tab. 4.7 Absolutní hodnoty rozdílu sdružených napětí v místě spínání pro různá zatížení linek Řečice (HRA) a Řečice (VES) – výkon výroby 1000 kW

dU (kV)		Řečice (VES) (kW)				
		500	1000	1500	2000	2500
Řečice (HRA) (kW)	500	0,184	0,254	0,324	0,394	0,464
	1000	0,106	0,176	0,246	0,316	0,386
	1500	0,028	0,098	0,168	0,238	0,308
	2000	0,050	0,020	0,090	0,160	0,230
	2500	0,127	0,057	0,013	0,083	0,153

Tab. 4.8 Absolutní hodnoty rozdílového úhlu fázorů spínaných napětí δ v místě spínání pro různá zatížení linek Řečice (HRA) a Řečice (VES) – výkon výroby 2000 kW

δ (°)		Řečice (VES) (kW)				
		500	1000	1500	2000	2500
Řečice (HRA) (kW)	500	1,711	1,970	2,229	2,486	2,742
	1000	1,469	1,728	1,987	2,244	2,500
	1500	1,228	1,487	1,746	2,003	2,259
	2000	0,989	1,248	1,507	1,764	2,020
	2500	0,751	1,010	1,269	1,526	1,782

Tab. 4.9 Absolutní hodnoty rozdílu sdružených napětí v místě spínání pro různá zatížení linek Řečice (HRA) a Řečice (VES) – výkon výroby 2000 kW

dU (kV)		Řečice (VES) (kW)				
		500	1000	1500	2000	2500
Řečice (HRA) (kW)	500	0,364	0,434	0,504	0,574	0,644
	1000	0,286	0,356	0,426	0,496	0,566
	1500	0,208	0,278	0,348	0,418	0,488
	2000	0,131	0,201	0,271	0,341	0,411
	2500	0,053	0,123	0,193	0,263	0,341

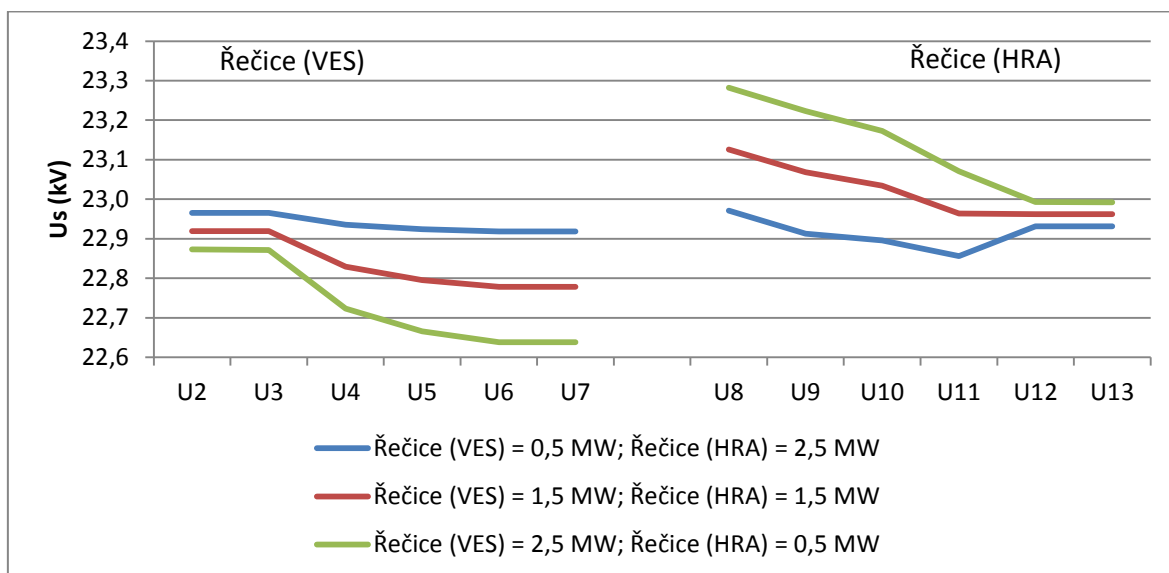
Tab. 4.10 Absolutní hodnoty rozdílového úhlu fázorů spínaných napětí δ v místě spínání pro různá zatížení linek Řečice (HRA) a Řečice (VES) – výkon výroby 3000 kW

δ (°)		Řečice (VES) (kW)				
		500	1000	1500	2000	2500
Řečice (HRA) (kW)	500	2,222	2,481	2,740	2,997	3,253
	1000	2,330	2,589	2,848	3,105	3,361
	1500	2,086	2,345	2,604	2,861	3,117
	2000	1,844	2,103	2,362	2,619	2,875
	2500	1,603	1,862	2,121	2,378	2,634

Tab. 4.11 Absolutní hodnoty rozdílu sdružených napětí v místě spínání pro různá zatížení linek Řečice (HRA) a Řečice (VES) – výkon výroby 3000 kW

dU (kV)		Řečice (VES) (kW)				
		500	1000	1500	2000	2500
Řečice (HRA) (kW)	500	0,453	0,523	0,593	0,663	0,733
	1000	0,464	0,534	0,604	0,674	0,744
	1500	0,386	0,456	0,526	0,596	0,666
	2000	0,309	0,379	0,449	0,519	0,589
	2500	0,231	0,301	0,371	0,441	0,511

Úbytek napětí na linkách 22 kV Řečice (VES) a Řečice (HRA) pro různá zatížení linek a uvažování výrobní na lince Řečice (HRA) o výkonu 2000 kW respektuje graf na Obr. 4.5. Body U2 – U13 na Obr. 4.5 jsou patrné na Obr. 4.1. Dálkově ovládaný úsekový odpojovač č. 515 (místo spínání) respektuje v Obr. 4.5 mezeru v grafu. Z Obr. 4.5 je patrný vliv zatížení linky Řečice (HRA) na dodávce výkonu z výrobní.



Obr. 4.5 Úbytek napětí na linkách 22 kV Řečice (VES) a Řečice (HRA) pro různá zatížení těchto linek – výkon FVE 2000 kW

4.4 Vyhodnocení

Z analýzy dat uvedených v kapitolách 4.2 a 4.3 je zřejmé, že rozdílový úhel fázorů spínaných napětí δ se může pohybovat v rozmezí $0^\circ - 3,3^\circ$ v závislosti na velikosti zatížení linek Řečice (VES) a Řečice (HRA) a dodávaném výkonu výrobního zdroje připojeného do linky Řečice (HRA). Pro predikci velikosti vyrovnávacího proudu, který vznikne v případě spínání takto velkého rozdílového úhlu byly v programu Pas Daisy Bizon stanoveny zkratové impedance obou linek do místa spínání (dálkově ovládaný úsekový odpínač č. 515). Zkratová impedance spínané oblasti Veselí je $Z_1 = 3,162 + i6,55 \Omega$ (této hodnotě odpovídá zkratový výkon 66,55 MVA), oblasti $Z_2 = 7,301 + i13,833 \Omega$ (této hodnotě odpovídá zkratový výkon 30,94 MVA). Výpočet predikce vyrovnávacího proudu provedeme pro sdružené napětí 22 kV a rozsah rozdílového úhlu fázorů spínaných napětí $\delta 0^\circ - 3,3^\circ$ s využitím vztahů 3.1 a 3.2. Výslednou predikci uvádí Tab. 4.12.

Tab. 4.12 Predikce velikosti vyrovnávacího proudu při spínání linek Řečice (VES) a Řečice (HRA)

δ	($^{\circ}$)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1
dU	(kV)	0,02	0,04	0,07	0,09	0,11	0,13	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24
I _{vyr}	(A)	1,42	2,83	4,25	5,67	7,09	8,50	9,92	11,34	12,76	14,17	15,59

δ	($^{\circ}$)	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2
dU	(kV)	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,38	0,40	0,42	0,44	0,47	0,49
I _{vyr}	(A)	17,01	18,42	19,84	21,26	22,68	24,09	25,51	26,93	28,34	29,76	31,18

δ	($^{\circ}$)	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3	3,1	3,2	3,3
dU	(kV)	0,51	0,53	0,55	0,58	0,60	0,62	0,64	0,66	0,69	0,71	0,73
I _{vyr}	(A)	32,60	34,01	35,43	36,85	38,26	39,68	41,10	42,51	43,93	45,35	46,76

Tab. 4.12 uvádí velikost vyrovnávacího proudu až cca 47 A. Tato hodnota již není zanedbatelná, vzhledem k tomu, že se jedná o velikost nadproudu, který linkami teče oproti jmenovitému stavu. Tato hodnota je z hlediska spínacích schopností některých spínacích prvků sítě 22 kV nadlimitní (viz. Tab. 2.1).

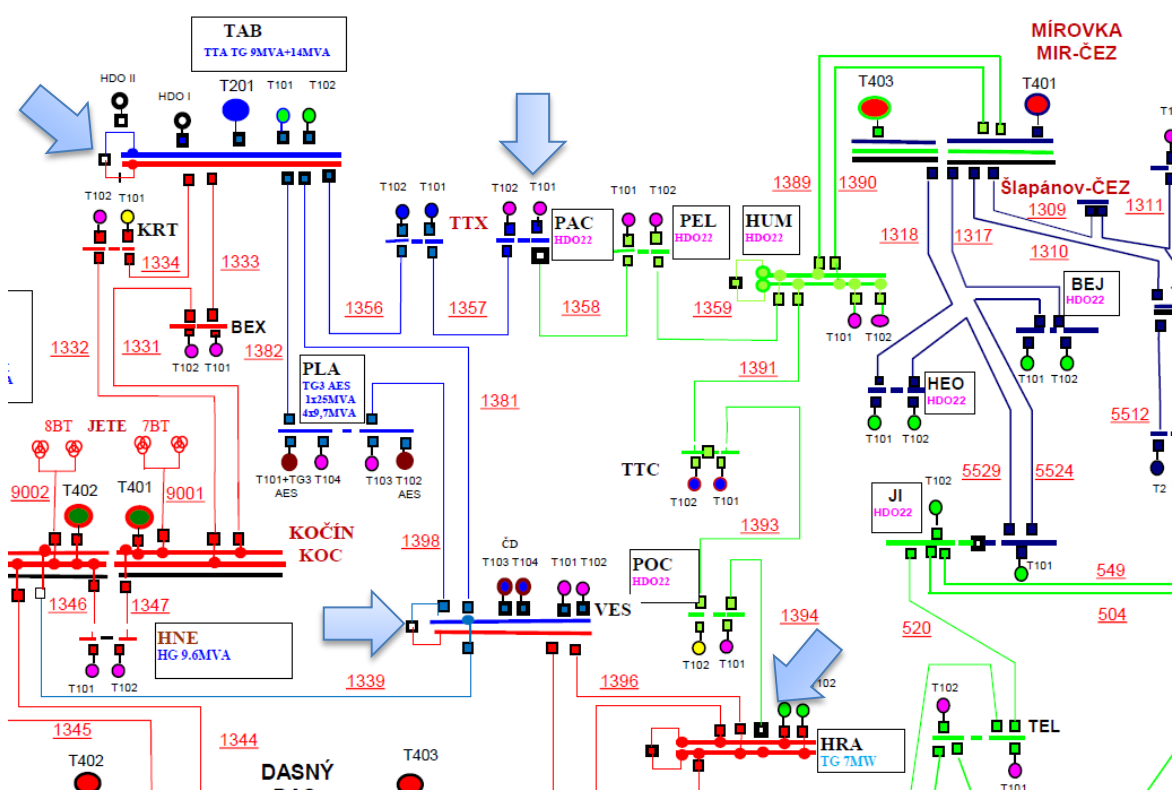
Pokud bude dispečer spínat linky 22 kV, které mají stejné elektrické parametry (tj. odebíraný výkon, impedance linek), nezapříčiní vznik velkého vyrovnávacího proudu, manipulace bude bezpečná. Pokud bude spínat rozdílné výkony, nebo linky s velkým vyráběným výkonem, je potřeba tyto manipulace zvážit. Jediným prostředkem, který má dispečer k dispozici, aby mohl zlepšit rozdílový úhel fázorů spínaných napětí δ , je částečná možnost dálkového odpojení výrobních zdrojů. V případě, že je rekonfigurace sítě nutná a nejsou dostupné prostředky pro změnu velikosti tohoto úhlu, je k bezpečné manipulaci dostupná pouze možnost rekonfigurace pouze s omezením dodávky elektrické energie.

Provozní předpisy společnosti E.ON definují, že dispečer smí manipulovat s ružkovým odpínačem, pokud rozdílový úhel spínaných napětí odečtený v rozvodně není větší než 3° . V případě komorového odpínače se jedná o hodnotu 10° . Jsou to však hodnoty v rozvodnách, nikoli na konci linky.

Definovaný výpočetní model zanáší do výpočtu jistou chybu, vzhledem k tomu, že uvažuje s připojením rozveden 110/22 kV Veselí a Hradec do jedné uzlové oblasti. Model, který by respektoval skutečnost lépe, je nad rámec zadání této diplomové práce. Tato problematika je blíže zpracována ve zdroji [12]. Zdroj predikuje situaci spínání rozdílných uzlových oblastí.

5 Spínání v sítích 110 kV

Úkolem této diplomové práce je stanovení mezních parametrů pro bezpečné manipulování v sítích 110 kV s ohledem na velikost vyrovnávacího proudu. Pro tyto účely bylo rozhodnuto o stanovení mezních parametrů pro spínání v bodech, kde se setkávají sítě 110 kV, které jsou napájeny z jiných uzlových oblastí nadřazené přenosové soustavy. Na území jižních Čech připadají v úvahu čtyři body. Pro tyto body bude predikována velikost vyrovnávacího proudu a stanovena mezní velikost úhlu rozdílu fázorů napětí v závislosti na bezpečném provozu linek 110 kV. Body pro které bude provedena analýza predikce, jsou označeny modrou šipkou na *Obr. 5.1* a blíže popsané níže.



Obr. 5.1 Část schématu sítě 110 kV

- Spínání v rozvodně Tábor (na *Obr. 5.1* označení TAB) – v této rozvodně dochází ke spínání příčného spínače přípojníc a tím k propojení dvou rozdílných napájecích oblastí. Do rozvodny Tábor je přivedena linka 220 kV, jejíž napájecí oblast je znázorněna modrou barvou. Červeně znázorněná oblast je napájena z uzlů na můstku Dasný/Kočín.

- Spínání v rozvodně Pacov (na *Obr. 5.1* označení PAC) – V této rozvodně dochází k propojení uzlových oblastí napájených z rozvodu Tábor (modrá oblast) a Mírovka (zelená oblast).
- Spínání v rozvodně Hradec (na *Obr. 5.1* označení HRA) – sepnutím vývodového vypínače dojde k propojení uzlových oblastí napájených z rozvodu Mírovka (zelená oblast) a můstku Dasný/Kočín (červená oblast).
- Spínání v rozvodně Veselí (na *Obr. 5.1* označení VES) – sepnutím příčného spínače přípojnic dojde k propojení uzlových oblastí napájených z rozvodu Tábor (modrá oblast) a můstku Dasný/Kočín (červená oblast). Rozbor tohoto spínání je podložen měřeními ze skutečné spínací události, bližší specifikace je uvedena v kapitole 6.

Pro výpočet byly vždy pomocí programu Pas Daisy Bizon stanoveny zkratové impedance spínaných oblastí Z_1 a Z_2 .

5.1 Spínání v rozvodně 110 kV Tábor (TAB)

Při spínání příčného spínače přípojnic v rozvodně 110 kV Tábor dojde k propojení uzlových oblastí Tábor a můstek Dasný/Kočín. Detail řešené oblasti je vidět na *Obr. 5.2*. Při tomto spínání dojde ke vzniku vyrovnávacího proudu, který se bude rozkládat na linkách V1333 a V1334, dále pak na linkách V1331 a V1332. Vliv vyrovnávacího proudu na linky V1356, V1381 a V1382 není při tomto spínání posuzován, jelikož na těchto linkách žádný vyrovnávací proud nevzniká. Ke kompletnímu posouzení spínané oblasti by bylo potřeba data z měření tohoto spínání, tyto informace však v rámci diplomové práce nebyly k dispozici. Posuzované linky V1331, V1332, V1333 a V1334 jsou ze stejného AlFe vodiče průřezu 240/40 s maximálním provozním proudem 572 A. Vstupní hodnoty výpočtu velikosti vyrovnávacího proudu:

- $U_s = 119$ kV
- $Z_1 = 0,447 + i5,137 \Omega$ (zkratová impedance oblasti Tábor – modrá barva, této hodnotě zkratové impedance odpovídá zkratový výkon 2750 MVA)
- $Z_2 = 2,856 + i10,234 \Omega$ (zkratová impedance oblasti můstek Dasný/Kočín – červená barva, této hodnotě zkratové impedance odpovídá zkratový výkon 1330 MVA)
- $\delta = 1^\circ - 20^\circ$

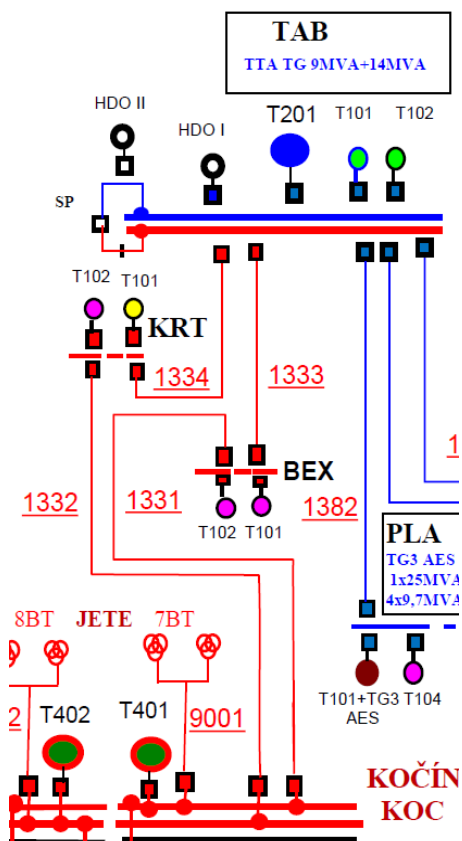
V Tab. 5.1 je uvedena predikce velikosti vyrovnávacího proudu, který poteče příčným spínačem přípojníc v rozvodně Tábor po jeho sepnutí. Uvažujme, že se tento vyrovnávací proud bude dělit na linky V1333 a V1334 v poměru 1:1. Předpoklad rozkladu vyrovnávacího proudu v poměru 1:1 vychází ze skutečnosti, že součet linek V1334 a V1332 je stejný jako linek V1333 a V1331, cca 40,6 km. S uvážením skutečnosti, že se jedná o stejné vodiče shodných délek, jejich impedance bude za stejných provozních podmínek totožná.

Tab. 5.1 Predikce velikosti vyrovnávacího proudu, tekoucího spínačem přípojníc v rozvodně 110 kV Tábor

δ	($^{\circ}$)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
dU	(kV)	1,20	2,40	3,60	4,80	5,99	7,19	8,39	9,59	10,78	11,98
I _{vyr}	(A)	76,3	152,5	228,8	305,0	381,2	457,4	533,6	609,7	685,7	761,7

δ	($^{\circ}$)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
dU	(kV)	13,17	14,36	15,56	16,75	17,94	19,12	20,31	21,50	22,68	23,86
I _{vyr}	(A)	837,7	913,6	989,4	1065,1	1140,8	1216,4	1291,9	1367,2	1442,5	1517,7

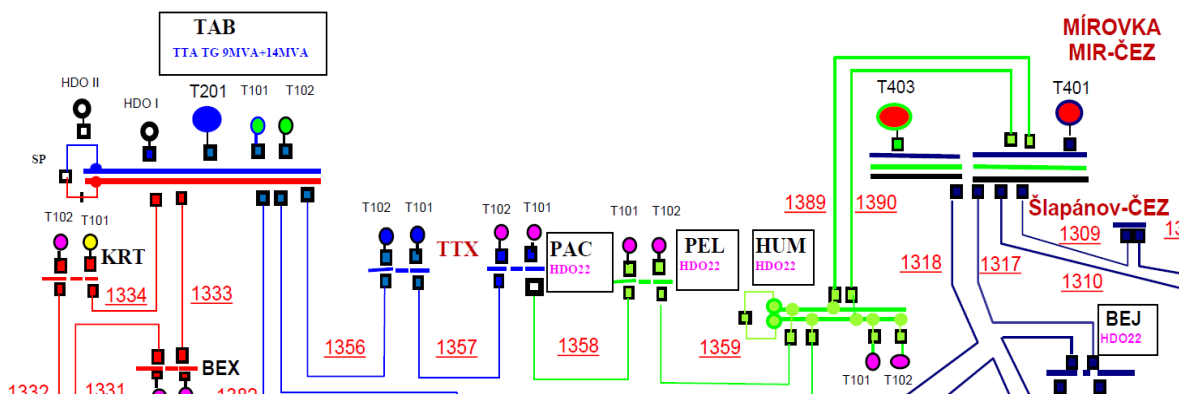
Předpokládejme, že každá z uvedených linek bude zatížena jmenovitým proudem 100 A (tato hodnota je zvolena na základě snadné kalkulace výsledků, hodnoty proudů na linkách 110 kV se pohybují v okolí zvolené hodnoty). Vzhledem k velikosti maximálního zatěžovacího proudu těchto linek 572 A, je maximální velikost rozdílového úhlu δ rovna 12° , vzhledem k velikosti vyrovnávacího proudu tímto rozdílovým úhlem způsobeným. Spínání vyššího úhlu by způsobilo přetížení těchto linek a následnou reakci ochran. Tato predikce je však závislá na velikosti jmenovitého proudu, který danými linkami protékal před sepnutím. Tato predikce opět vychází z předpokladu shodného účinníku před sepnutím a po sepnutí.



Obr. 5.2 Detail oblasti – spínání v rozvodně 110 kV Tábor (TAB)

5.2 Spínání v rozvodně 110 kV Pacov (PAC)

Detail oblasti tohoto spínání je znázorněn na Obr. 5.3. Sepnutím vývodového vypínače linky V1358 v rozvodně Pacov dojde k propojení dvou rozdílných uzlových oblastí, konkrétně oblasti napájené z uzlu Tábor (modrá barva) a oblasti napájené z uzlu Mírovka (zelená barva). Vyrovnávací proud se bude šířit linkami V1356, V1357, V1358 a V1359. Linky V1356, V1357 a V1358 mají maximální provozní proud 572 A. Vedení V1358 slouží jako vedení spojovací a v základní konfiguraci je odpojeno. Jeho maximální provozní proud 420 A je limitním provozním parametrem.



Obr. 5.3 Detail oblasti – spínání v rozvodně 110 kV Pacov (PAC)

Vedením V1358 nebude v základním provozním stavu protékat proud. V případě sepnutí vývodového vypínače linky V1358 v rozvodně Pacov bude tímto vedením protékat pouze vyrovnávací proud. Predikce velikosti vyrovnávacího proudu pro tuto spínanou oblast je vypočtena a znázorněna v *Tab. 5.2*.

Vstupní hodnoty výpočtu velikosti vyrovnávacího proudu:

- $U_s = 115 \text{ kV}$
- $Z_1 = 7,73 + i25,128 \ \Omega$ (zkratová impedance oblasti Tábor – modrá barva, této hodnotě zkratové impedance odpovídá zkratový výkon 503,04 MVA)
- $Z_2 = 8,376 + i25,521 \ \Omega$ (zkratová impedance oblasti můstek Mírovka – zelená barva, této hodnotě zkratové impedance odpovídá zkratový výkon 492,36 MVA)
- $\delta = 1^\circ - 20^\circ$

Tab. 5.2 Predikce velikosti vyrovnávacího proudu, tekoucího vývodovým vypínačem v rozvodně 110kV Pacov

δ (°)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
dU (kV)	1,16	2,32	3,48	4,63	5,79	6,95	8,11	9,26	10,42	11,57
I_{vyr} (A)	17,5	34,9	52,4	69,8	87,2	104,7	122,1	139,5	156,9	174,3

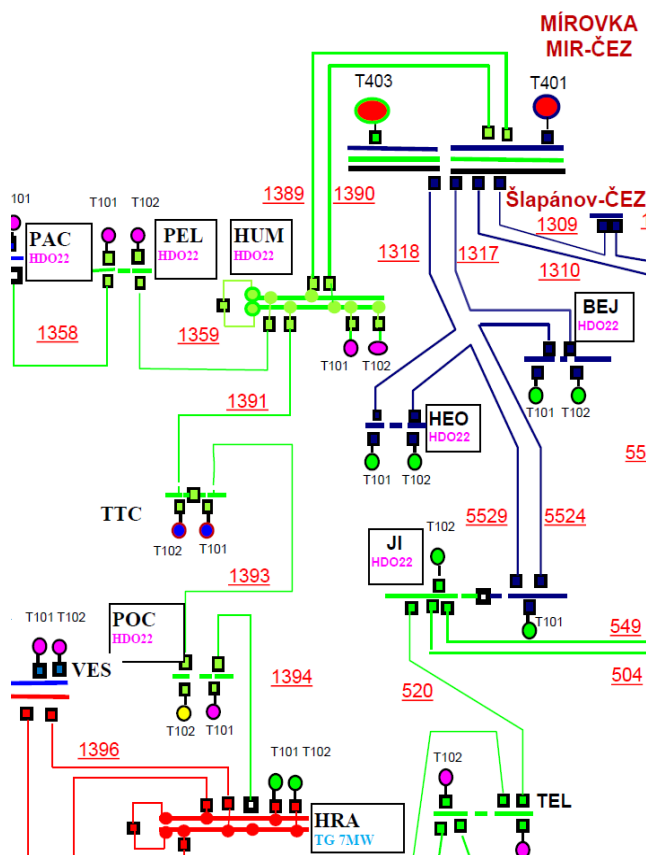
δ (°)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
dU (kV)	12,73	13,88	15,03	16,18	17,33	18,48	19,63	20,77	21,92	23,06
I_{vyr} (A)	191,7	209,1	226,4	243,7	261,1	278,4	295,6	312,9	330,1	347,3

Vzhledem k velké zkratové impedanci obou spínaných oblastí, nevznikne tak velký vyrovnávací proud, jaký by ohrozil bezpečný provoz tohoto vedení. V případě, že linkami V1356, V1357 a V1359 protéká jmenovitý proud 100 A, nedojde ani v tomto případě k ohrožení bezpečného provozu těchto vedení (nebude překročena limitní provozní hodnota proudu vedení 572A). Predikce velikosti vyrovnávacího proudu pro tuto spínanou oblast zachycuje *Tab. 5.2* Výsledný proud je opět závislý na hodnotě účinníku přenášeného výkonu před sepnutím a po sepnutí vývodového vypínače linky V1358 v rozvodně Pacov.

5.3 Spínání v rozvodně 110 kV Hradec (HRA)

Schéma spínané oblasti je znázorněno na *Obr. 5.4*. Sepnutím vývodového vypínače linky V1394 v rozvodně Hradec dojde k propojení dvou rozdílných uzlových oblastí, konkrétně oblasti napájené z uzlu můstek Dasný/Kočín (červená barva) a oblasti napájené

z uzlu Mírovka (zelená barva). Vzniklý vyrovnávací proud poteče linkami V1391, V1393 a V1394. Limitním proudem v tomto případě je maximální provozní proud vedení V1394, který je 483 A.



Obr. 5.4 Detail oblasti – spínání v rozvodně 110 kV Hradec (HRA)

Vedení V1394 slouží jako spojovací vedení mezi rozvodnami Hradec (HRA) a Počátky (POC), ve vypnutém stavu vývodového vypínače v rozvodně 110 kV Hradec jím nebude protékat žádný proud. Po sepnutí tohoto vypínače tímto vedením poteče pouze vyrovnávací proud. Výpočet velikosti vyrovnávacího proudu pro tuto oblast je znázorněn v Tab. 5.3.

Vstupní hodnoty výpočtu velikosti vyrovnávacího proudu:

- $U_s = 115 \text{ kV}$
- $Z_1 = 2,988 + i10,695 \ \Omega$ (zkratová impedance oblasti můstek Dasný/Kočín – červená barva, této hodnotě zkratové impedance odpovídá zkratový výkon 1190 MVA)
- $Z_2 = 8,982 + i32,576 \ \Omega$ (zkratová impedance oblasti Mírovka – zelená barva, této hodnotě zkratové impedance odpovídá zkratový výkon 391,37 MVA)

- $\delta = 1^\circ - 20^\circ$

Tab. 5.3 Predikce velikosti vyrovnávacího proudu, tekoucího vývodovým vypínačem v rozvodně 110 kV Hradec

δ	($^\circ$)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
dU	(kV)	1,16	2,32	3,48	4,63	5,79	6,95	8,11	9,26	10,42	11,57
I_{vyr}	(A)	25,8	51,6	77,4	103,2	129,0	154,8	180,6	206,3	232,1	257,8

δ	($^\circ$)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
dU	(kV)	12,73	13,88	15,03	16,18	17,33	18,48	19,63	20,77	21,92	23,06
I_{vyr}	(A)	283,5	309,2	334,8	360,5	386,1	411,6	437,2	462,7	488,2	513,6

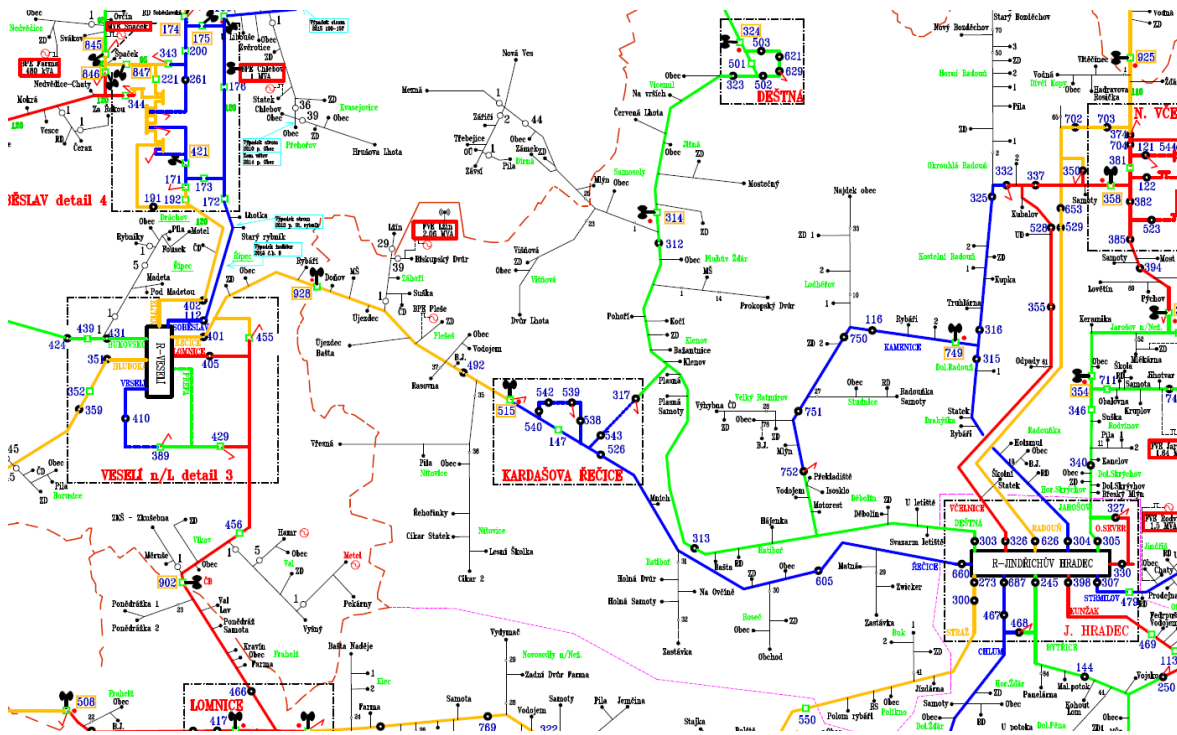
Aby byla dodržena bezpečnost provozu vedení, nesmí být rozdílový úhel fázorů napětí spínaných oblastí δ větší než 18° . Tato podmínka platí také v případě, že linky V1391 a V1392 jsou zatíženy před sepnutím vývodového vypínače jmenovitým proudem 100A. Jejich maximální provozní proud je 572 A. Vše se opět odvíjí od velikosti jmenovitého proudu, který teče inkriminovanými linkami v době sepnutí vývodového vypínače vedení V1394 v rozvodně Hradec.

6 Spínání v transformovně 110/22 kV Veselí (VES)

Predikce vyrovnávacího proudu, které byly stanoveny v kapitole 5, vycházejí z předpokladu, že účinník sítě bude stejný před sepnutím spínacího prvku i po něm. Tento předpoklad je však poněkud nepřesný, nicméně v rozsahu této diplomové práce nebylo možné tento předpoklad vyvrátit či potvrdit na základě měření. Jedinou spínanou oblastí, kde tato predikce mohla být potvrzena, je spínání příčného spínače přípojnic v rozvodně 110 kV Veselí. Tato predikce je založená na skutečném měření, čímž bylo dosaženo velmi přesného výpočtu podloženého skutečnou událostí. Dne 12. 1. 2016 v dopoledních hodinách mezi 9:57 a 9:59 došlo ke spínání dvou uzlových oblastí nejprve na úrovni 110 kV a poté na napěťové úrovni 22 kV.

Rozvodny 110 kV Veselí a Hradec je možné propojit nejen na úrovni 110 kV, ale také na úrovni 22 kV pomocí linek Řečice (VES) a Řečice (HRA). Standardně jsou tyto linky rozděleny dálkově ovládaným úsekovým odpínačem č. 515. Konfigurace sítě 22 kV znázorňuje *Obr. 6.1*. Dne 12. 1. 2016 došlo k události O1600299 označené jako revize dálkově ovládaného úsekového odpínače č. 515. Při této události provedla četa práce pod napětím revizi dálkově ovládaného úsekového odpínače a pro ověření jeho správné funkce bylo potřeba s tímto odpínačem manipulovat.

Protože jsou rozvodny Veselí a Hradec napájeny z jiné uzlové oblasti nadřazené přenosové soustavy, je potřeba manipulovat nejprve na úrovni 110 kV, poté až na úrovni 22 kV. Manipulace na úrovni 110 kV proběhla sepnutím příčného spínače přípojnic v rozvodně 110 kV Veselí, kdy došlo k vyrovnání napěťových poměrů rozdílných uzlových oblastí, a tím ke vzniku vyrovnávacího proudu mezi spínanými oblastmi. Poté proběhla bezpečná zkouška funkce revidovaného dálkově ovládaného úsekového odpínače č. 515 na úrovni 22 kV. Po jeho opětovném rozepnutí byl rozepnut také příčný spínač přípojnic v rozvodně 110 kV Veselí.

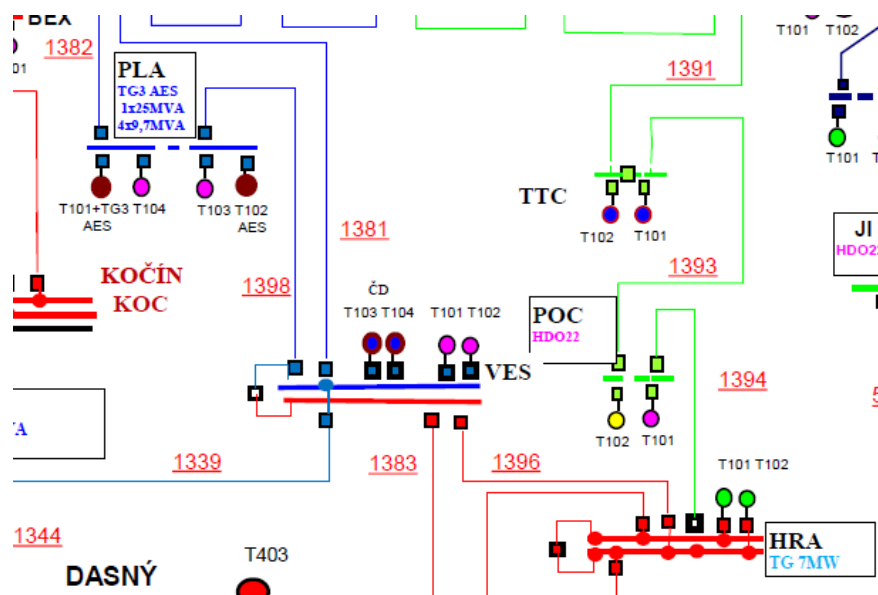


Obr. 6.1 Konfigurace sítě 22 kV v oblasti rozveden 110 kV Veselí a Hradec

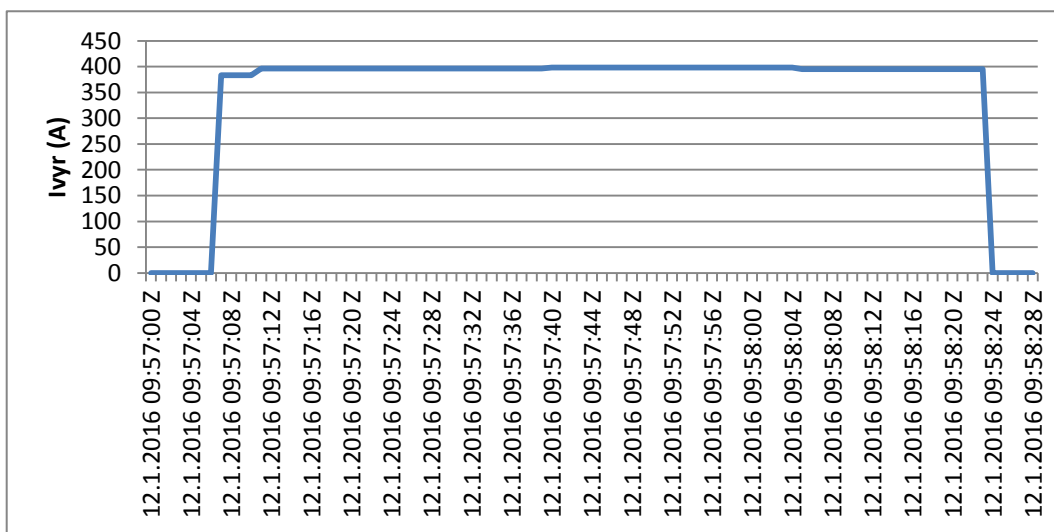
6.1 Spínání na úrovni 110 kV v rozvodně Veselí (VES)

Sepnutím příčného spínače přípojnic v rozvodně 110 kV Veselí dojde k propojení uzlových oblastí Tábor (na Obr. 6.2 znázorněna modrou barvou) a oblasti napájené z můstku Dasný/Kočín (na Obr. 6.2 znázorněna červenou barvou). Výsledný vyrovnávací proud bude protékat příčným spínačem přípojnic a rozkládat se na vedeních V1398, V1381, V1386 a V1396.

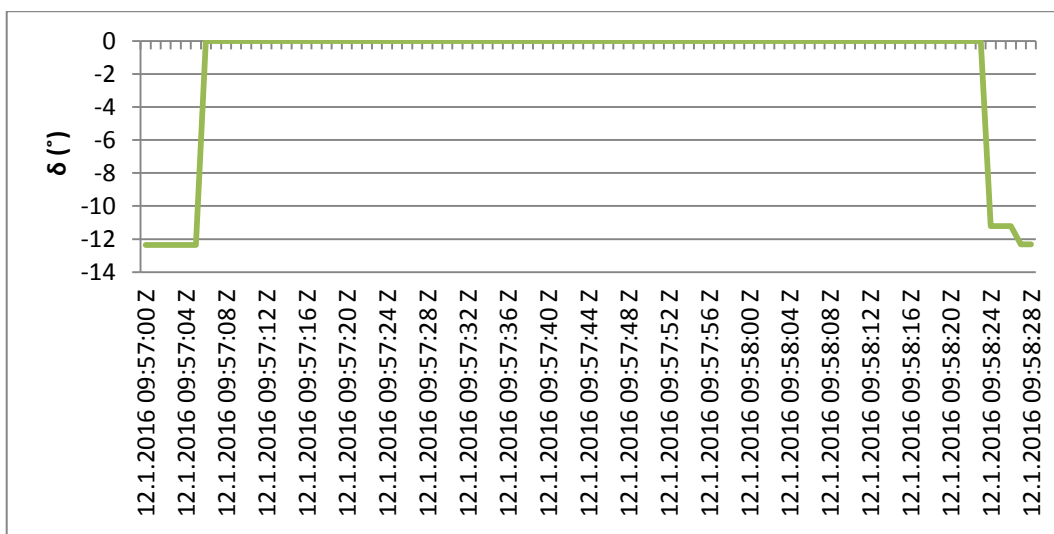
Po sepnutí příčného spínače přípojnic v rozvodně 110 kV Veselí, začal tímto prvkem protékat vyrovnávací proud, jehož průběh znázorňuje Obr. 6.3. Maximální proud, který tímto prvkem tekł, byl 398,069 A. Rozvodna Veselí disponuje systémem WAMS pro měření úhlu napěťových fázorů, v době před sepnutím byl rozdílový úhel δ spínaných napětí $12,349^\circ$ (průběh úhlu δ v době spínání je znázorněn na Obr. 6.4). Velikost sdruženého napětí spínaných oblastí na přípojnicích v rozvodně 110 kV byla přibližně shodná a to 116,1 kV. Veškerá zde uvedená data z měření byla získána z centrálního řídicího systému SCADA společnosti E.ON.



Obr. 6.2 Detail oblasti – spínání v rozvodně 110 kV Veselí



Obr. 6.3 Průběh vyrovnávacího proudu, tekoucího příčným spínačem přípojníc



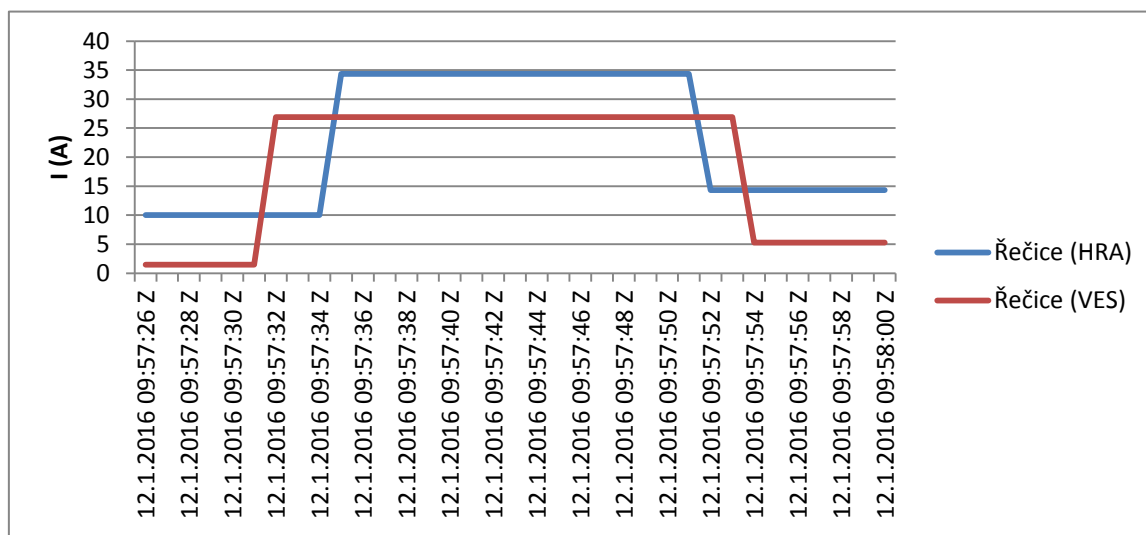
Obr. 6.4 Průběh rozdílového úhlu fází spínaných napětí δ

6.2 Spínání na úrovni 22 kV – propojení linek Řečice (VES) a Řečice (HRA)

Po manipulaci v síti 110 kV došlo k manipulaci i na úrovni 22 kV. Pro analýzu tohoto spínání jsou k dispozici proudy pro oba vývody linek 22 kV Řečice (VES) a Řečice (HRA), dále měření ze systému WAMS v rozvodně v Hradci a Veselí a napětí v rozvodně Hradec a Veselí. Průběh proudů tekoucími linkami Řečice (HRA) a Řečice (VES) znázorňuje Obr. 6.5. Stav velikosti proudů v průběhu spínání a změny konfigurace specifikuje Tab. 6.1.

Tab. 6.1 Velikost proudů tekoucími linkami Řečice (HRA) a Řečice (VES) v době sepnutí a provádění manipulací

	Řečice (HRA)	Řečice (VES)
Před sepnutím (A)	10,02	1,49
V době sepnutí (A)	34,37	26,89
Po rozepnutí (A)	14,33	5,27

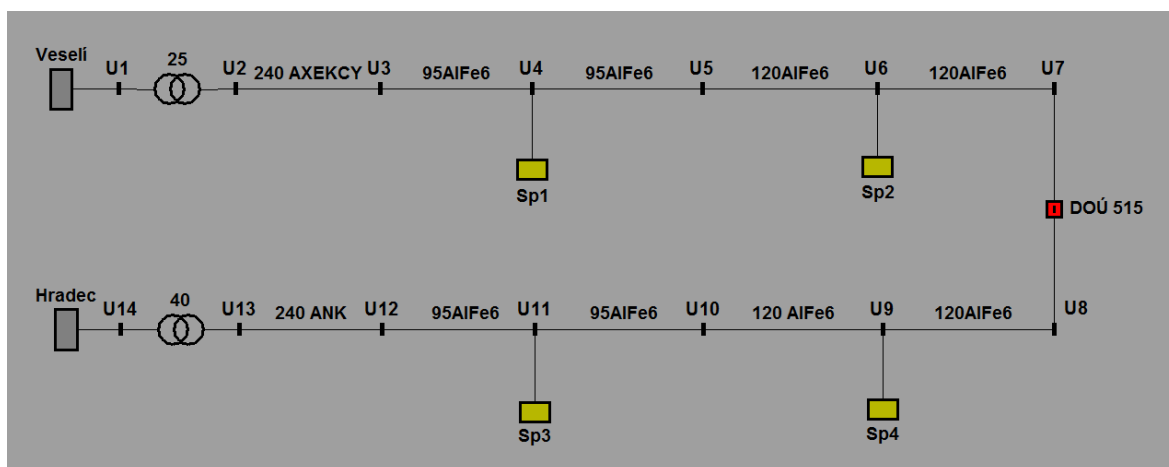


Obr. 6.5 Průběh proudu linkami 22 kV Řečice (HRA) a Řečice (VES)

Z naměřených hodnot proudů vyplývá, že v době sepnutí dálkového úsekového odpínače č. 515 protékal linkami proud průměrně o 24,86 A vyšší než při rozepnutém stavu. Tuto hodnotu považujeme za velikost vyrovnávacího proudu. Pro rozvodnu Hradec byla změřena velikost sdruženého napětí v době spínání 23,55 kV. Do výpočtu opět vstupuje velikost zkratové impedance obou spínaných úseků, která byla spočtena programem Pas Daisy Bizon. Zkratová impedance spínané oblasti Veselí je $Z_1 = 3,162 + i6,55 \Omega$, oblasti Hradec $Z_2 = 7,301 + i13,833 \Omega$. Využitím těchto parametrů a úpravou rovnic 3.1. a 3.2. je možné dopočítat rozdílový úhel fázorů napětí spínaných oblastí δ .

$$\delta = 2 * \sin^{-1} \left(\frac{dU}{2 * U_f} \right) = 2 * \sin^{-1} \left(\frac{|\bar{I}_V| * |\bar{Z}|}{2 * U_f} \right) \quad (6.1.)$$

Vypočtený rozdílový úhel spínaných napětí je $\delta = 1,64^\circ$. To je ovšem hodnota, která nezohledňuje úbytky napětí na uvedených linkách 22 kV. Tuto hodnotu se nyní pokusíme zpřesnit. Linky Řečice (HRA) a Řečice (VES) byly za tímto účelem namodelovány v programu Evlivy společnosti EnerGoConsult ČB, s.r.o. Model této sítě je znázorněn na Obr. 6.6.



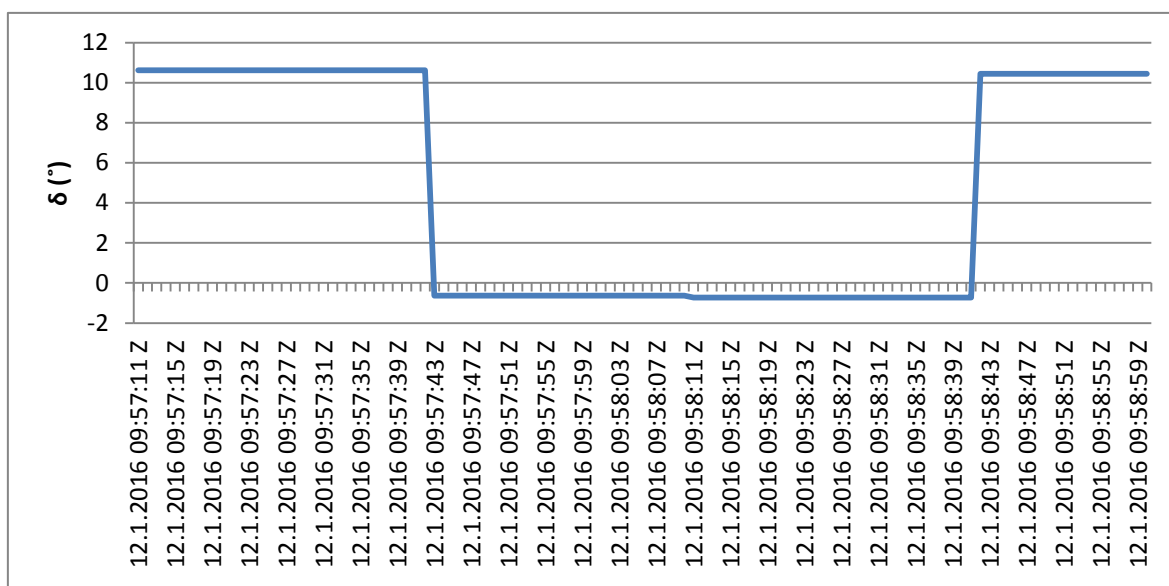
Obr. 6.5 Model sítě 22 kV – spojení linek Řečice (HRA) a Řečice (VES)

Model sítě je zjednodušen, není v něm uvažováno s rozložením spotřeby v průběhu celého vývodu, ale je uvažováno spojitě rozložení odběru symbolizováno bloky Sp1 a Sp2 pro linku Řečice (VES), Sp3 a Sp4 pro linku Řečice (HRA). Velikost odběrů Sp1 – Sp4 je určena na základě vztahů 4.1. – 4.4. Teorii určení spojitého zatížení a podrobnému výpočtu se věnuje kapitola 4. Před sepnutím dálkově ovládaného úsekového odpínače č. 515 byla linka Řečice (HRA) zatížena odběrem 0,324 MW (odběry Sp3 = 194 kW, Sp4 = 130 kW) a linka Řečice (VES) byla velmi odlehčena, zatížena odběrem pouze 0,06 MW (odběry Sp1 = 37 kW, Sp2 = 23 kW). Výsledné hodnoty napětí spočtené na základě měření:

- Řečice (HRA), rozvodna 23,55 kV, v místě spínání 23,48 kV
- Řečice (VES), rozvodna 22,84 kV, v místě spínání 22,82 kV

Pro výpočet velikosti rozdílového úhlu fázorů δ použijeme aritmetický průměr výsledných napětí v místě spínání 23,15 kV. Pro toto napětí s využitím již uvedených zkratových impedancí a velikostí vyrovnávacího proudu dostaneme rozdílový úhel δ rovný $1,668^\circ$ spočítaný na základě vztahu 6.1.

Skutečnou velikost rozdílového úhlu fázorů spínaných napětí znázorňuje *Obr. 6.7*. Na tomto obrázku je patrný okamžik sepnutí v síti 110 kV, kdy došlo ke značnému poklesu rozdílového úhlu δ . Maximální velikost tohoto úhlu pro spínání na úrovni 22 kV je v absolutní hodnotě $0,73^\circ$. Toto je však hodnota, která udává rozdíl úhlů fázorů napětí v rozvodně. V kapitole 4.2 bylo výpočtem dokázáno, že hodnota v místě spínání může být až 2,3x větší (v případě malých úhlů), než je hodnota v rozvodně. Při uvažování této predikce není hodnota rozdílového úhlu fázorů spínaných napětí $0,73^\circ$ ale $1,679^\circ$. V porovnání s dopočtenou hodnotou $1,668^\circ$ je odchylka výpočtu pouhých 0,66%.



Obr. 6.7 Průběh velikosti rozdílového úhlu δ v době spínání

Jak vyplývá z průběhu na *Obr. 6.4*, rozdílový úhel spínaných napětí δ je měřením stanoven na hodnotu $12,349^\circ$, oproti tomu z *Obr. 6.7* je patrné, že úhel ve stejný okamžik je $10,622^\circ$. Tato odchylka je přisouzena místu měření (před transformátorem 110/23 kV na úrovni 110 kV a na vývodech linek 22 kV na úrovni 22 kV způsobeno vlivem transformátoru) a přesnosti měření.

6.3 Predikce velikosti vyrovnávacího proudu

Podobně jako u spínání uzlových oblastí, popsaných v kapitole 5, i při spínání uzlových oblastí v rozvodně 110 kV Veselí bylo přistoupeno k predikci velikosti vyrovnávacího proudu. Tato predikce je podložena měřením ze skutečného spínání. Pro spínání v rozvodně byly spočteny programem Pas Daisy Bizon zkratové impedance spínaných zkratových oblastí, zbývající hodnoty pro výpočet byly použity ze skutečného měření.

Vstupní hodnoty výpočtu predikce vyrovnávacího proudu:

- $U_s = 116,1 \text{ kV}$
- $Z_1 = 3,476 + i14,198 \ \Omega$ (zkratová impedance oblasti můstek Dasný/Kočín – červená barva, této hodnotě zkratové impedance odpovídá zkratový výkon 922 MVA)
- $Z_2 = 3,107 + i19,487 \ \Omega$ (zkratová impedance oblasti Tábor – modrá barva, této hodnotě zkratové impedance odpovídá zkratový výkon 683 MVA)
- $\delta = 12,349^\circ$ (pro další predikci také $1^\circ - 20^\circ$)

Z uvedených parametrů byl spočten vyrovnávací proud pro danou spínanou situaci 420,6 A. Změřený vyrovnávací proud byl 398,069 A (data ze SCADA). Uvážíme-li toleranci měření $\pm 0,5\%$, získáme skutečnou velikost vyrovnávacího proudu 400,059 A. V porovnání s vypočtenou hodnotou získáme přesnost výpočtu 4,88%. Tuto odchylku přisuzujeme rozdílné zkratové impedanci vypočtené programem Pas Daisy Bizon a skutečné zkratové impedanci. Tento rozdíl může být způsoben ne zcela přesnou konfigurací sítě ve výpočetním modelu, ale také klimatickými podmínkami a vlivem okolního působení na distribuční síť.

Tab. 6.2 Predikce velikosti vyrovnávacího proudu při sepnutí příčného spínače přípojnic v rozvodně 110 kV Veselí

δ (°)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
dU (kV)	1,17	2,34	3,51	4,68	5,85	7,02	8,19	9,36	10,53	11,70
I _{vyr} (A)	34,12	68,25	102,36	136,47	170,57	204,65	238,72	272,78	306,81	340,81

δ (°)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
dU (kV)	12,86	14,03	15,19	16,36	17,52	18,68	19,84	21,00	22,15	23,31
I _{vyr} (A)	374,79	408,75	442,67	476,56	510,41	544,22	577,99	611,72	645,40	679,03

Predikce velikosti vyrovnávacího proudu proběhla i pro spínání v síti 22 kV. Pro tuto predikci byly použity hodnoty shodné s hodnotami použitými pro výpočet velikosti rozdílového úhlu fázorů spínaných napětí δ , který byl počítán v kapitole 6.2.

Tab. 6.3 Predikce velikosti vyrovnávacího proudu při sepnutí dálkově ovládaného úsekového odpínače č. 515 při propojování linek 22 kV Řečice (HRA) a Řečice (VES)

δ (°)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
dU (kV)	0,23	0,46	0,69	0,92	1,15	1,38	1,61	1,84	2,07	2,30
I _{vyr} (A)	14,71	29,41	44,11	58,81	73,51	88,19	102,88	117,55	132,22	146,87

δ (°)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
dU (kV)	2,53	2,76	2,98	3,21	3,44	3,67	3,90	4,12	4,35	4,58
I _{vyr} (A)	161,51	176,15	190,76	205,37	219,96	234,53	249,08	263,62	278,13	292,62

V případě, že by nedošlo k sepnutí příčného spínače přípojnic v rozvodně 110 kV Veselí před manipulací v síti 22 kV, vyrovnávací proud, který by tekla sítí 22 kV, by byl mnohem vyšší. Rozdílový úhel fázorů napětí δ byl v rozvodně 110 kV Veselí před sepnutím 12,349°. Tento úhel by byl přičten k rozdílovému úhlu fázorů napětí δ na úrovni 22 kV, který byl před sepnutím na úrovni 22 kV 0,73°. Výsledný rozdílový úhel fázorů spínaných napětí δ na úrovni 22 kV by tedy byl přibližně 13°. Této hodnotě odpovídá velikost vyrovnávacího proudu z Tab. 6.3 190,76A. K tomuto vyrovnávacímu proudu je potřeba přičíst aktuální zatížení linky 22 kV, limitní hodnota pro velikost proudu je nastavení nadproudé ochrany (240A). Z důvodu přiblížení k limitní hodnotě proudu, bylo provedeno nejprve spínání na úrovni 110 kV.

6.4 Rozložení vyrovnávacího proudu

Predikce rozkladu vyrovnávacího proudu na linky 110 kV vycházejících z rozvodny Veselí je založena na hodnotách z měření. Z rozvodny vycházejí 4 linky 110 kV, vedení V1398, V1381, V1383 a V1396. Ze všech těchto linek jsou dostupné hodnoty napětí, proudů a výkonů, dále pak hodnoty proudu a rozdílového úhlu δ na příčném spínači přípojnic. Hodnoty v době měření jsou znázorněny v Tab. 6.4. V této tabulce je výčet hodnot před sepnutím (čas 9:57:00) a v době sepnutí, kdy tekla příčným spínačem přípojnic nejvyšší vyrovnávací proud (čas 9:57:55). Z uvedených hodnot byl dopočten účinník, zdánlivý výkon a pomocí symbolicko komplexní metody byl rozložen proud tekoucí daným prvem na reálnou a imaginární část.

Tab. 6.4 Změřené a dopočtené hodnoty při spínání příčného spínače přípojnic v rozvodně 110 kV Veselí

Čas	Vývod	I (A)	P (MW)	Q (MVar)	U12 (kV)	S (MVA)	cos φ	Re I (A)	Im I (A)
9:57:00	SP	0	-	-	-	-	-	-	-
9:57:55	SP	398,07	-	-	-	-	-	-	-
9:57:00	V1381	61,07	12,53	3,17	117,11	12,92	0,97	59,20	14,98
9:57:55	V1381	152,26	-30,86	12,35	116,31	33,24	-0,93	-141,36	56,57
9:57:00	V1398	30,70	5,94	0,69	116,92	5,98	0,99	30,50	3,55
9:57:55	V1398	166,68	-33,09	11,79	116,18	35,13	-0,94	-157,01	55,94
9:57:00	V1383	104,30	22,06	4,91	116,34	22,60	0,98	101,81	22,67
9:57:55	V1383	371,35	79,68	-8,75	116,05	80,16	0,99	369,13	-40,55
9:57:00	V1396	107,82	-21,52	-4,64	116,37	22,02	-0,98	-105,39	-22,74
9:57:55	V1396	45,70	2,90	-12,37	116,11	12,71	0,23	10,44	-44,50

Z dopočtených hodnot je na první pohled patrné, že při spínání různých uzlových oblastí, není účinník spínaných oblastí neměnný, z tohoto důvodu není predikce spínání v rozvodnách 110 kV Tábor, Pacov a Hradec zcela přesná. Dále je z naměřených hodnot

zřejmé, že na všech linkách 110 kV dojde k navýšení protékajícího proudu kromě vedení V1396, kde došlo k poklesu.

Z Obr. 6.2 je patrné, že vyrovnávací proud, který protéká příčným spínačem přípojnic, bude součtem nadproudů vzniklých na linkách V1398 a V1381 (dále v tomto textu uváděno jako modrá oblast). Stejná velikost vyrovnávacího proudu bude také součtem nadproudů procházející linkami V1383 a V1396 (dále v tomto textu uváděno jako červená oblast). Tuto predikci opět ověříme výpočtem. Odečteme-li rozdíly proudů tekoucí linkami před a po sepnutí a tyto rozdíly pro dané oblasti sečteme, opět s využitím symbolicko komplexní metody, získáme absolutní hodnotu proudu tekoucího ze strany modré oblasti 399,29 A, ze strany červené oblasti pak 392,46 A (viz. Tab. 6.5). Uvážíme-li skutečně změřenou hodnotu vyrovnávacího proudu, který tekla příčným spínačem přípojnic 398,069 A, dosáhli jsme tedy výpočtem poměrně přesné shody.

Pro predikci rozkladu vyrovnávacího proudu při spínání v rozvodně 110 kV Veselí je potřeba znát poměr, v jakém se tento proud rozkládá při skutečné spínané situaci. Uvažujme, že v tomto poměru se bude vyrovnávací proud rozkládat vždy. K určení daného poměru je potřeba znát účinník spínaných oblastí před sepnutím a po něm. Tab. 6.4 doposud uváděla účinníky jednotlivých linek, Tab. 6.5 uvádí rozklad vyrovnávacího proudu do modré a červené oblasti. Výsledný vyrovnávací proud vzniká jako součet rozdílů proudů tekoucích linkami jednotlivých oblastí. Pomocí činného a jalového výkonu jednotlivých linek je možné dopočítat výsledný zdánlivý výkon a účinník spínaných oblastí (viz. Tab. 6.6).

Tab. 6.5 Vypočtené hodnoty rozdílů proudů tekoucích linkami 110 kV a výsledná velikost vyrovnávacího proudu

		Rozdíl I (A)		Součet rozdílů I (A)		
		Re	Im	Re	Im	Abs
Modrá oblast	V1381	-200,6	41,59	-388,07	93,97	399,29
	V1398	-187,5	52,39			
Červená oblast	V1383	267,3	-63,22	383,15	-84,97	392,46
	V1396	115,8	-21,76			

Tab. 6.6 Dopočtené hodnoty zdánlivého výkonu a účinníku spínaných oblastí po sepnutí příčného spínače přípojnic

		P _{po} (MW)	Q _{po} (MVar)	P _{po} (MW)	Q _{po} (MVar)	S _{po} (MVA)	cos φ _{po}
Modrá oblast	V1381	-30,86	12,35	-63,96	24,14	68,36	-0,936
	V1398	-33,09	11,79				
Červená oblast	V1383	79,68	-8,75	82,58	-21,12	85,24	0,969
	V1396	2,90	-12,37				

Nyní rozložíme vyrovnávací proud, který teče modrou i červenou oblastí (pro přesnost výpočtu tyto proudy rozlišujeme, ale jedná se o ten samý proud tekoucí příčným spínačem přípojníc v rozvodně 110 kV Veselí). Rozdíly proudů tekoucí jednotlivými linkami porovnáme s vyrovnávacím proudem dané oblasti, vždy zvlášť reálnou a imaginární část, získáme poměry, které jsou také uvedeny v Tab. 6.7.

Tab. 6.7 Rozklad vyrovnávacího proudu a stanovení poměrného rozložení tohoto proudu na jednotlivé vývody 110 kV

	I _{vyr}		Poměr		
	(A)		V1381	Re (-)	
Modrá oblast	(A)	399,29	V1381	Re (-)	0,537
	cos φ	-0,936	V1381	Im (-)	0,295
	Re (A)	-373,56	V1398	Re (-)	0,502
	Im (A)	141,01	V1398	Im (-)	0,372
Červená oblast	(A)	392,46	V1383	Re (-)	0,703
	cos φ	0,969	V1383	Im (-)	0,650
	Re (A)	380,22	V1396	Re (-)	0,305
	Im (A)	-97,25	V1396	Im (-)	0,224

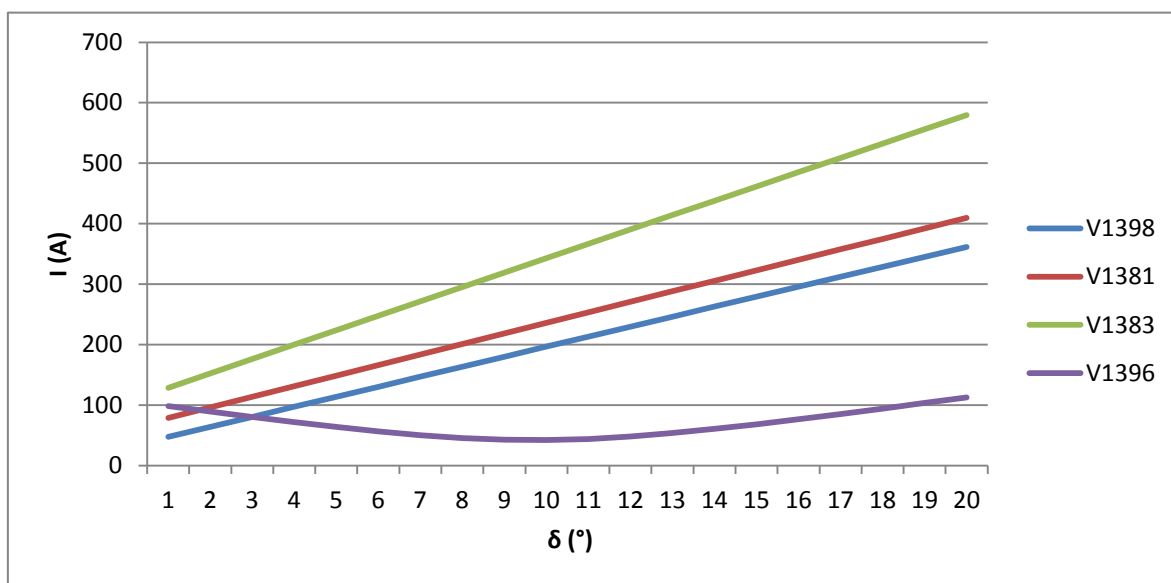
Vypočtený poměr stanovuje, jak velká část vyrovnávacího proudu, s respektováním účinníku vyrovnávacího proudu dané oblasti, poteče daným vedením. Uvážíme-li, že vedením potečou stejné proudy se stejnými účinníky, jako tomu bylo v případě analyzovaného spínání, získáme predikci vyrovnávacího proudu, který respektuje účinníky před sepnutím i po něm. Tyto proudy v absolutních hodnotách znázorňuje Tab. 6.8.

Tab. 6.8 Výsledná predikce rozložení vyrovnávacího proudu pro různé velikosti rozdílového úhlu fázorů napětí δ

δ (°)	I _{vyr} (A)	V1398 (A)	V1381 (A)	V1383 (A)	V1396 (A)
0	0	0	0	0	0
1	34,12	47,21	78,56	128,18	98,45
2	68,25	63,78	96,06	152,06	89,28
3	102,36	80,38	113,55	175,94	80,37
4	136,47	96,98	131,05	199,82	71,82
5	170,57	113,59	148,54	223,68	63,78
6	204,65	130,20	166,02	247,54	56,45
7	238,72	146,80	183,50	271,38	50,15
8	272,78	163,40	200,96	295,22	45,31
9	306,81	179,98	218,42	319,04	42,43
10	340,81	196,56	235,86	342,84	41,91
11	374,79	213,12	253,29	366,62	43,83
12	408,75	229,67	270,71	390,39	47,89
13	442,67	246,21	288,11	414,13	53,60
14	476,56	262,73	305,50	437,85	60,49
15	510,41	279,23	322,86	461,54	68,21
16	544,22	295,72	340,21	485,21	76,48

17	577,99	312,18	357,53	508,84	85,15
18	611,72	328,62	374,83	532,45	94,11
19	645,40	345,04	392,11	556,03	103,27
20	679,03	361,44	409,36	579,57	112,58

Vypočtená predikce rozkladu opět závisí na zatížení jednotlivých linek 110 kV, ale pracuje s účinníky jednotlivých spínaných oblastí. Správnost výpočtu a predikování potvrzuje i průběh proudů, který je znázorněn na Obr. 6.8, z něj je patrný pokles proudu na lince V1396 v době spínání. Jak ale ukazuje výpočet, tento pokles je pouze pro některá spínání rozdílového úhlu fázorů napětí δ .



Obr. 6.8 Grafické znázornění průběhu proudů linkami 110 kV, vycházejících z rozvodny 110 kV Veselí, v závislosti na spínaném rozdílovém úhlu fázorů napětí δ

Maximální provozní proud linek 110 kV, které vycházejí z rozvodny 110 kV Veselí, je pro linky V1398 a V1381 483 A, pro linky V1383 a V1396 572 A. Uvažujeme-li přetížení těchto linek v závislosti vzniklého vyrovnávacího proudu, k přetížení dojde pouze u linky V1383 při spínání rozdílového úhlu fázorů napětí δ větším než 19°. To za předpokladu, že linky budou zatíženy stejnými proudy, jako tomu bylo u analyzovaného spínání před sepnutím příčného spínače přípojníc v rozvodně 110 kV Veselí.

6.5 Příklad výpočtu

Z důvodu složitosti popisu výpočtu rozkladu vyrovnávacího proudu na linky 110 kV v rozvodně Veselí, který byl popsán v kapitole 6.4, je v této kapitole uveden kompletní výpočet pro hodnotu rozdílového úhlu spínaných napětí $\delta = 10^\circ$. Základní určení poměrového rozkladu vychází ze vstupních hodnot uvedených v Tab. 6.4. Vzorce pro dopočtení hodnot uvedených v této tabulce:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (6.2.)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (6.3.)$$

$$Re(I) = I * \cos \varphi \quad (6.4.)$$

$$Im(I) = I * \sin^{-1}(\cos \varphi) \quad (6.5.)$$

Ze složkových hodnot proudů jednotlivých vedení je vypočten rozdíl proudu před sepnutím a po sepnutí a ten je pak sečten pro jednotlivé oblasti (modrá nebo červená). Příklad výpočtu uveďme pro modrou oblast obsahující vedení V1381 a V1398 (zobrazeno v Tab. 6.5).

$$Re(I_{V1381}) = I_{po} - I_{před} = -141,36 - 59,20 = -200,57 A \quad (6.6.)$$

$$Im(I_{V1381}) = I_{po} - I_{před} = 56,57 - 14,98 = 41,59 A \quad (6.7.)$$

$$Re(I_{V1398}) = I_{po} - I_{před} = -157,01 - 30,50 = -187,51 A \quad (6.8.)$$

$$Im(I_{V1398}) = I_{po} - I_{před} = 55,94 - 3,55 = 52,39 A \quad (6.9.)$$

$$Re(I_{vyr}) = Re(I_{V1381}) + Re(I_{V1398}) = -200,57 - 187,51 = -388,07 A \quad (6.10.)$$

$$Im(I_{vyr}) = Im(I_{V1381}) + Im(I_{V1398}) = 41,59 + 52,39 = 93,97 A \quad (6.11.)$$

$$I_{vyr} = \sqrt{Re(I_{vyr})^2 + Im(I_{vyr})^2} = \sqrt{-388,07^2 + 93,97^2} = 399,29 A \quad (6.12.)$$

Celkové činné a jalové výkony uvedené v Tab. 6.6 jsou součtem výkonů jednotlivých linek po sepnutí příčného spínače přípojníc v rozvodně 110 kV Veselí, zdánlivý výkon a účinník je doložen pomocí vztahů 6.2. a 6.3. Známý vyrovnávací proud, který byl vypočten na základě vztahu 6.12., nyní rozložíme na reálnou a imaginární část pomocí znalosti účinníku modré oblasti po sepnutí $\cos \varphi = -0,936$ (viz. Tab. 6.5) a využitím vztahů 6.4. a 6.5. Nyní provedeme porovnání reálných a imaginárních částí proudů jednotlivých linek po sepnutí a reálných a imaginárních částí vyrovnávacího proudu (tyto poměry jsou vypočteny v Tab. 6.7).

$$\frac{Re(I_{V1381})}{Re(I_{vyr})} = \frac{-200,57}{-373,56} = 0,537 \quad (6.13.)$$

$$\frac{Im(I_{V1381})}{Im(I_{vyr})} = \frac{41,59}{141,01} = 0,295 \quad (6.14.)$$

$$\frac{\operatorname{Re}(I_{V1398})}{\operatorname{Re}(I_{\text{vyr}})} = \frac{-187,51}{-373,56} = 0,502 \quad (6.15.)$$

$$\frac{\operatorname{Im}(I_{V1398})}{\operatorname{Im}(I_{\text{vyr}})} = \frac{52,39}{141,01} = 0,372 \quad (6.16.)$$

Pro určení rozkladu vyrovnávacího proudu $I_{\text{vyr}} = 340,81 \text{ A}$, který vznikne při velikosti rozdílového úhlu spínaných napětí $\delta = 10^\circ$, určíme reálnou a imaginární část tohoto proudu pomocí známého účinníku $\varphi = -0,936$ po sepnutí příčného spínače přípojnic v rozvodně 110 kV Veselí. $\operatorname{Re}(I_{\text{vyr}}) = -317,85 \text{ A}$, $\operatorname{Im}(I_{\text{vyr}}) = 120,36 \text{ A}$. Tyto hodnoty vynásobíme poměry stanovenými pro jednotlivé části proudu pro jednotlivé linky určenými ve vztazích 6.13. – 6.16. Tím získáme reálné a imaginární části rozložení vyrovnávacího proudu, který protéká danými linkami. Skutečný proud před sepnutím rozložíme pomocí skutečného účinníku v daný čas na reálnou a imaginární složku a tyto části přičteme k již získaným hodnotám reálné a imaginární části vyrovnávacího proudu pro jednotlivé linky.

Princip tohoto výpočtu je proveden ve všech případech pro rozdílný úhel spínaných napětí $\delta = 0^\circ - 20^\circ$ pro všechny linky spínané oblasti.

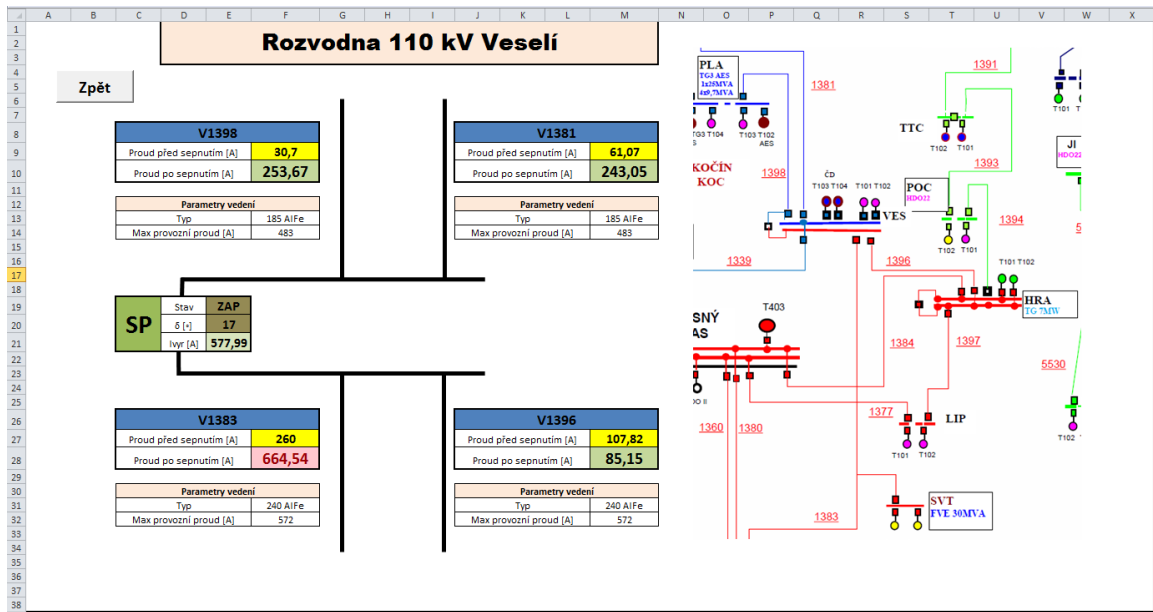
7 Program „Predikce vyrovnávacího proudu“

Přihlédneme-li k okolnostem, že veškeré predikce velikosti vyrovnávacího proudu jsou závislé na předchozím zatížení jednotlivých linek a oblastí, je velmi obtížné stanovit maximální velikost rozdílového úhlu fázorů napětí δ . Z tohoto důvodu jsem nad rámec zadání této diplomové práce sestavil jednoduchý nástroj pracující v běžně dostupném prostředí programu Excel, kancelářského balíku Microsoft Office 2010. Tento program umožňuje dispečerovi zadat aktuální hodnoty stavu sítě ve spínané oblasti a ihned bude zobrazena predikce velikosti proudu po sepnutí daného spínacího prvku.

Programem je možné predikovat velikost vyrovnávacího proudu v oblasti distribuční soustavy – Jižní Čechy, která byla i teoreticky řešena v této diplomové práci. Umožňuje jednoduché výpočty a predikce na úrovni 110 kV pro spínání v rozvodnách Tábor, Pacov, Hradec a Veselí. Tento program uvažuje vliv skutečného toku výkonů a změnu účinníků pouze v rozvodně 110 kV Veselí. V ostatních rozvodnách tento rozbor nemohl být bohužel proveden, protože nebylo možné získat záznam skutečného měření.

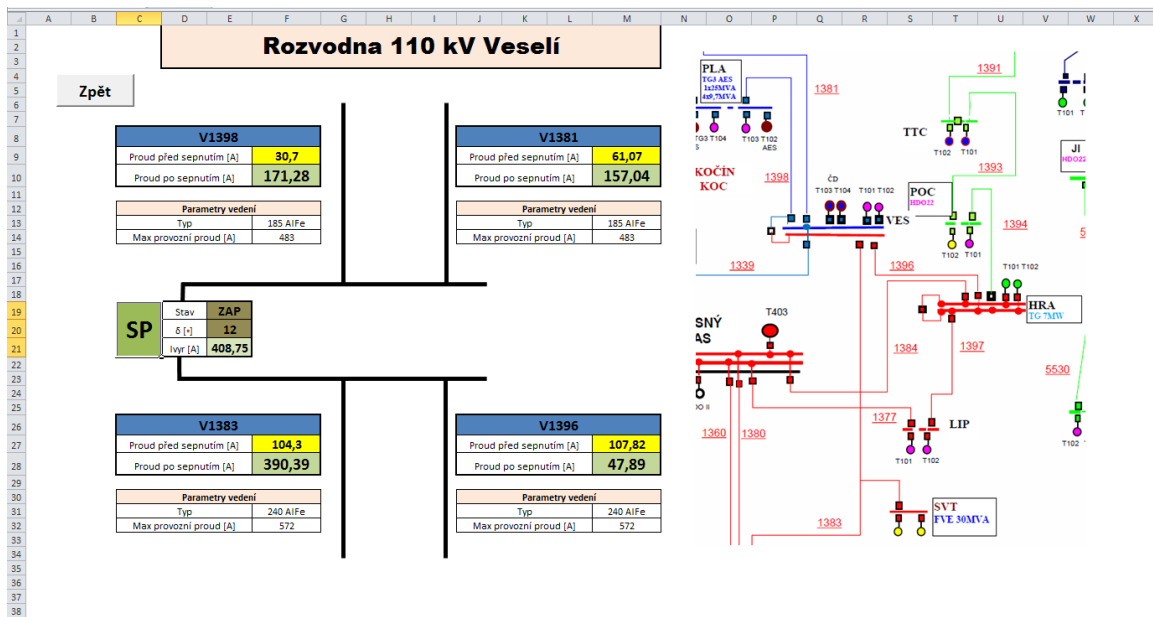
Ukázka programu pro spínání v rozvodně 110 kV Veselí je znázorněna na *Obr. 7.1*. Tomuto obrázku odpovídá následující popis.

- Dispečer zadá do žlutých políček aktuální hodnoty proudu linek V1398, V1381, V1383 a V1396.
- Nastaví aktuální hodnotu rozdílového úhlu spínaných napětí δ na příčném spínači přípojnic a přepne tlačítko stavu spínače na ZAP (příčný spínač přípojnic a hodnoty, které se tohoto spínače týkají, jsou v boxu u pole s označením SP).
- Po přepnutí příčného spínače přípojnic do polohy ZAP je zobrazena velikost vyrovnávacího proudu, který tímto spínačem protéká. Zároveň dojde k zobrazení stavu proudu na linkách V1398, V1381, V1383 a V1396. Tento proud je v zelených polích hned pod žlutými poli.
- V případě, že dojde k překročení maximálního provozního proudu nějaké linky, zelené pole, symbolizující stav proudu tekoucí linkou po sepnutí příčného spínače přípojnic, zčervená. To je pro dispečera signálem, že by došlo k přetížení linky, nesmí tedy manipulovat.



Obr. 7.1 Program „Predikce vyrovnávacích proudů“ – spínání v rozvodně 110 kV Veselí

Program je ve formátu xslm, po jeho zapnutí je potřeba povolit spouštění maker. V opačném případě nefungují vodící buňky, které zajišťují přepínání mezi okny sešitu.



Obr. 7.2 Výpočet stavu, který byl podkladem pro výpočet a predikci velikosti vyrovnávacího proudu a jeho rozkladu po linkách 110 kV v rozvodně Veselí

Závěr

Tato diplomová práce je věnována rozboru vyrovnávacího proudu, který vzniká při spínání v distribuční síti a jeho dopadu na bezpečný provoz distribuční sítě. Vyrovnávací proud je závislý na aktuálním stavu sítě a jeho predikce není zcela přesná.

Současná legislativa České republiky motivuje distributory elektrické energie ke zlepšování ukazatelů nepřetržitosti dodávky SAIDI a SAIFI, proto se minimalizují manipulace tzv. na tmu, rekonfigurace sítě probíhá pod zatížením a tím dochází k provozu sítě s vyrovnávacím proudem. Motivaci, rekonfiguraci, možnosti spínání a limitními hodnotami spínacích prvků se zabývají kapitoly 1 a 2.

Kapitola 3 popisuje vznik vyrovnávacího proudu při spínání dvou linek 22 kV (nebo 110 kV). Vznik vyrovnávacího proudu je závislý na velikosti rozdílového úhlu fázorů spínaných napětí δ . Čím je tento úhel větší, tím je také větší vyrovnávací proud. Pro některé spínací prvky může velikost vyrovnávacího proudu přesáhnout hodnotu vypínacího proudu daného spínacího prvku. Vyrovnávací proud představuje navýšení zatížení linky, který bude sepnutými linkami protékat navíc oproti běžnému provoznímu stavu.

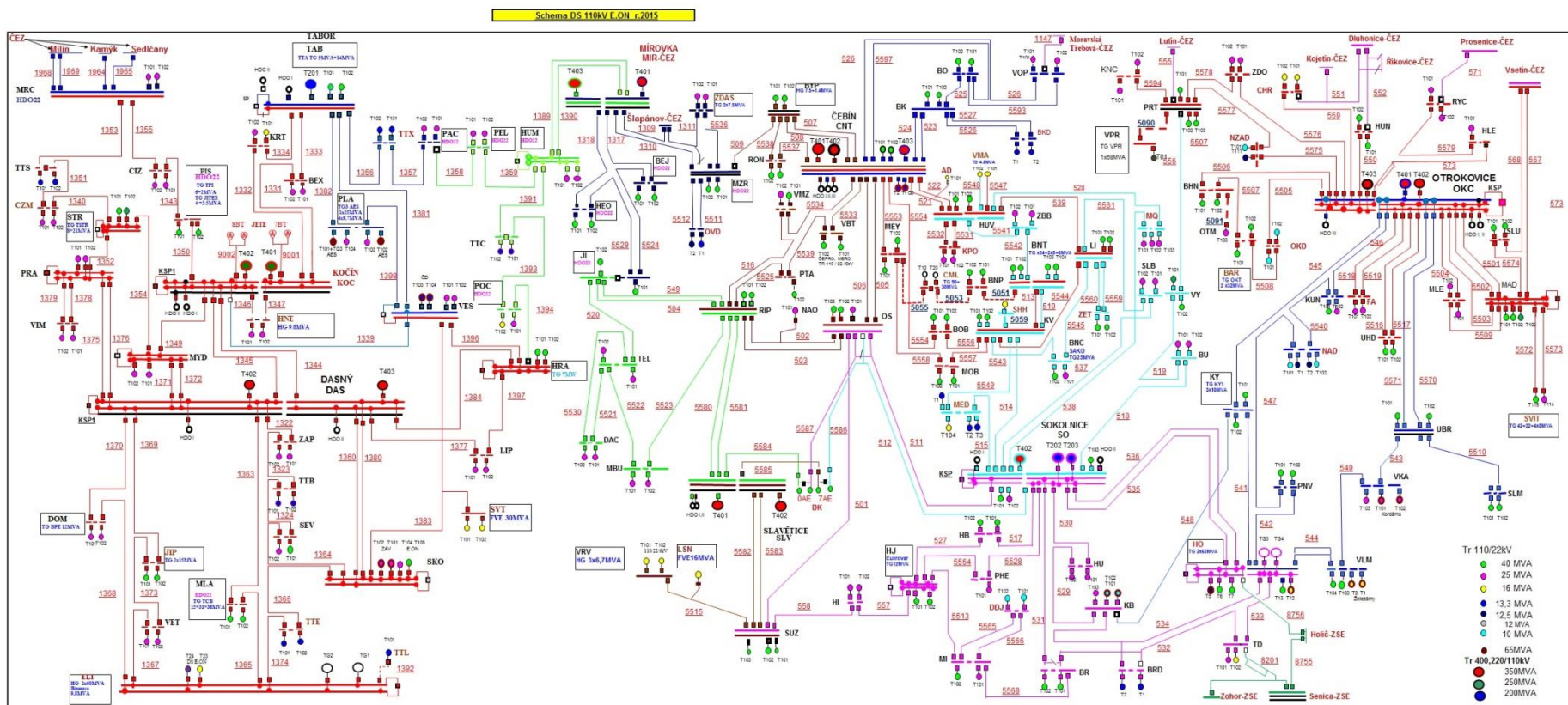
Vliv zatížení a lokální výroby na rozdílový úhel fázorů spínaných napětí δ je proveden v kapitole 4. Tato kapitola obsahuje model skutečných linek 22 kV Řečice (VES) a Řečice (HRA). Závěrem této kapitoly je skutečnost, že dispečer vždy musí dávat pozor na to, jaké linky (oblasti) spíná. Pokud mají linky obdobné elektrické parametry (impedance, výkony,...), rekonfigurace bude bezproblémová, s narůstajícím rozdílem zatížení nebo lokální výroby narůstá riziko manipulace. Dispečer má k dispozici pouze hodnotu rozdílového úhlu spínaných napětí δ v rozvodně.

Kapitoly 5 a 6 se věnují spínání a predikci vyrovnávacího proudu na úrovni 110 kV, dále pak konkrétním spínáním na úrovni 22 kV a 110 kV, která jsou podložena skutečným měřením. Toto měření odhalilo chování toků proudů linek 110 kV před sepnutím a po sepnutí a propojení různých napájecích uzlových oblastí. Z celkové analýzy vychází skutečnost, že vyrovnávací proud je mimo jiné závislý na předchozím zatížení linky a proto určení jeho limitních hodnot není jednoznačné. Z důvodu nejednoznačnosti určení limitních hodnot vyrovnávacího proudu byl vyvinut nástroj v prostředí Microsoft Excel 2010, který umožňuje zadání aktuálních hodnot sítě a predikci velikosti proudu tekoucího danou linkou po propojení různých uzlových oblastí.

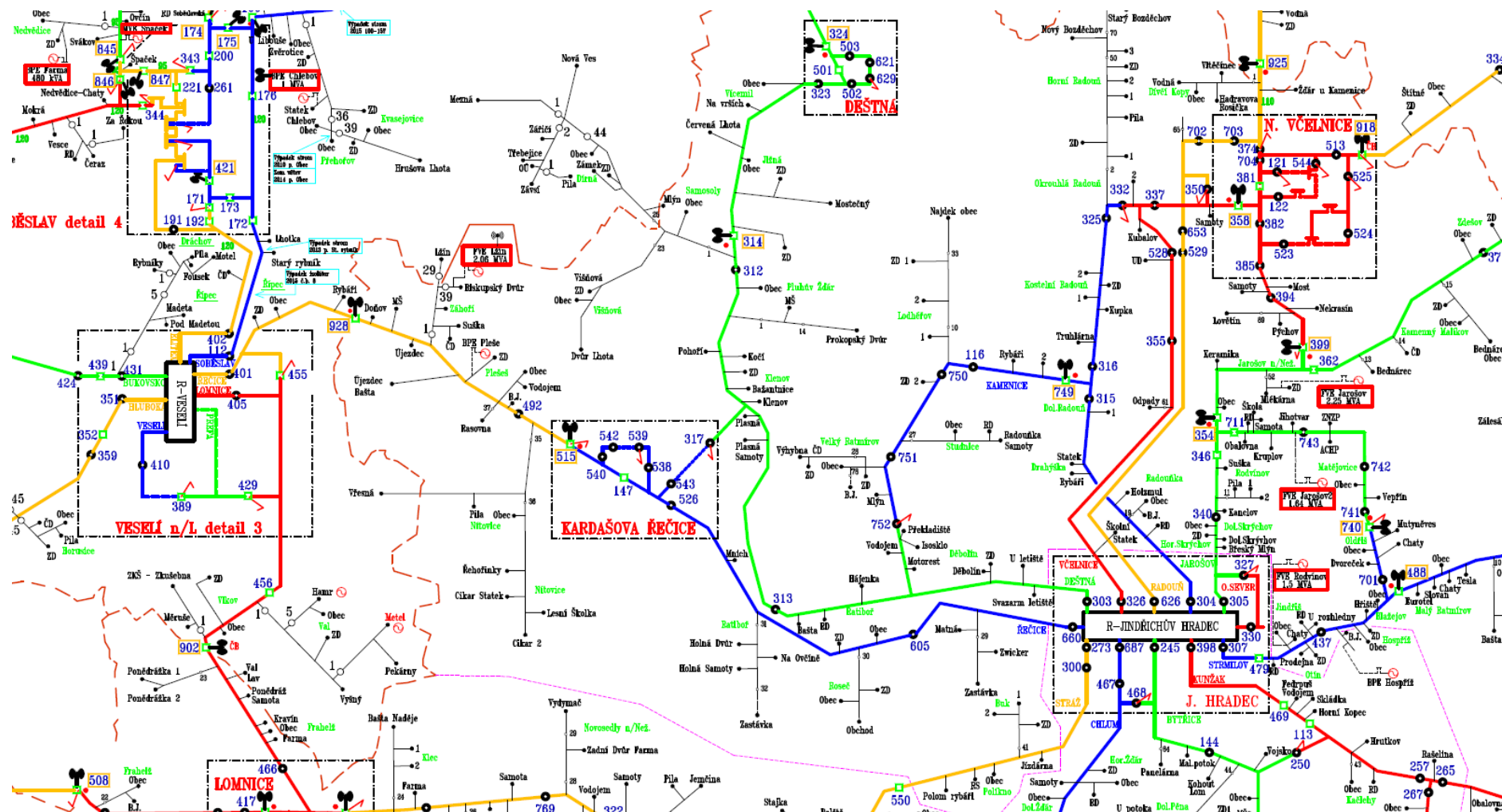
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. Výroční zpráva o provozu ES ČR pro rok 2014
- [2] KOLÁŘ, Libor, KOPT, Miroslav, HLAVNIČKA, Jan. Závěrečná zpráva projektu „Automatizace sítí VN s využitím prvků typu RECLOSER“
- [3] JIŘIČKA, Jan, TESAŘOVÁ, Miloslava, CHROMÝ, Jan, ŠTĚPKA, Vratislav. Použití WAMS v podmínkách distribuční soustavy za účelem podpory spínání různých oblastí 22kV – vyhodnocení praktických měření, Aktuální otázky a vybrané problémy řízení elektrizační soustavy. Praha: EGÚ Praha Engineering, a.s., 2015. IBSN: 978-80-87774-29-8.
- [4] ŠEFRÁNEK, Jan. Regulace kvality dodávek elektřiny, Příspěvek z konference ČK CIREC 2015.
- [5] TESAŘOVÁ, Miloslava, JIŘIČKA, Jan, CHROMÝ, Jan. Posouzení možnosti spínání uzlových oblastí 22 kV na základě vyhodnocení synchronního měření fázorů v transformovnách 110/22 kV, Sborník XI. konference „Energetické rušení v distribučních a průmyslových sítích“ ERU 2014, Brno 2014, IBSN 978-80-905933-0-5.
- [6] Sborník XI. Konference, Energetické rušení v distribučních a průmyslových sítích, ERU 2014, Brno, 2014, IBSN 978-80-905933-0-5.
- [7] Pravidla provozování distribuční soustavy, 2012.
- [8] VARGA, Ladislav, ILENIN, Stanislav, LEŠČINSKÝ, Peter. Prenos a rozvod elektrickej energie, Košice, 2003.
- [9] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. Zásady cenové regulace pro období 2016 – 2018 pro odvětví elektroenergetiky, plynárenství a pro činnosti operátora trhu v elektroenergetice a plynárenství, 2015.
- [10] MERTLOVÁ, Jiřina, ŠTROBOVÁ, Milada. Simulátor elektrických stanic a sítí – metodické návody ke cvičení, Ediční středisko VŠSE, 1989.
- [11] ČESKÉ ENERGETICKÉ ZÁVODY KONCERN PRAHA. Skriptum pro výuku na simulátoru elektrických stanic I. Díl, 1978.
- [12] JIŘIČKA, Jan, CHROMÝ, Jan, ŠTĚPKA, Vratislav, TESAŘOVÁ, Miloslava, VYKUKA, Roman. Využití synchronního měření fázorů k eliminaci negativních dopadů na odběratele při spínání různých sítí 22 kV, Příspěvek z konference ČK CIREC 2015.

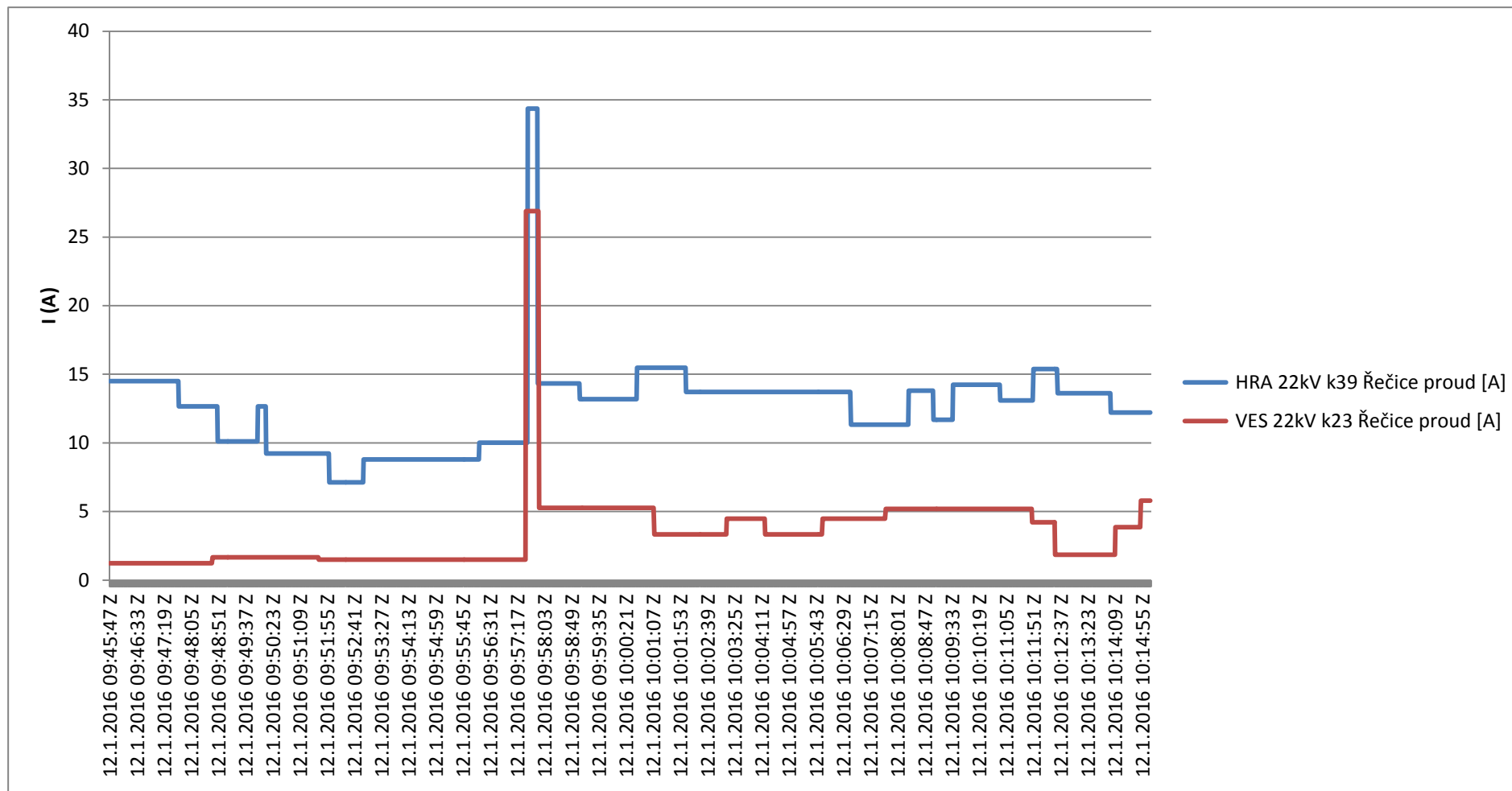
Přílohy



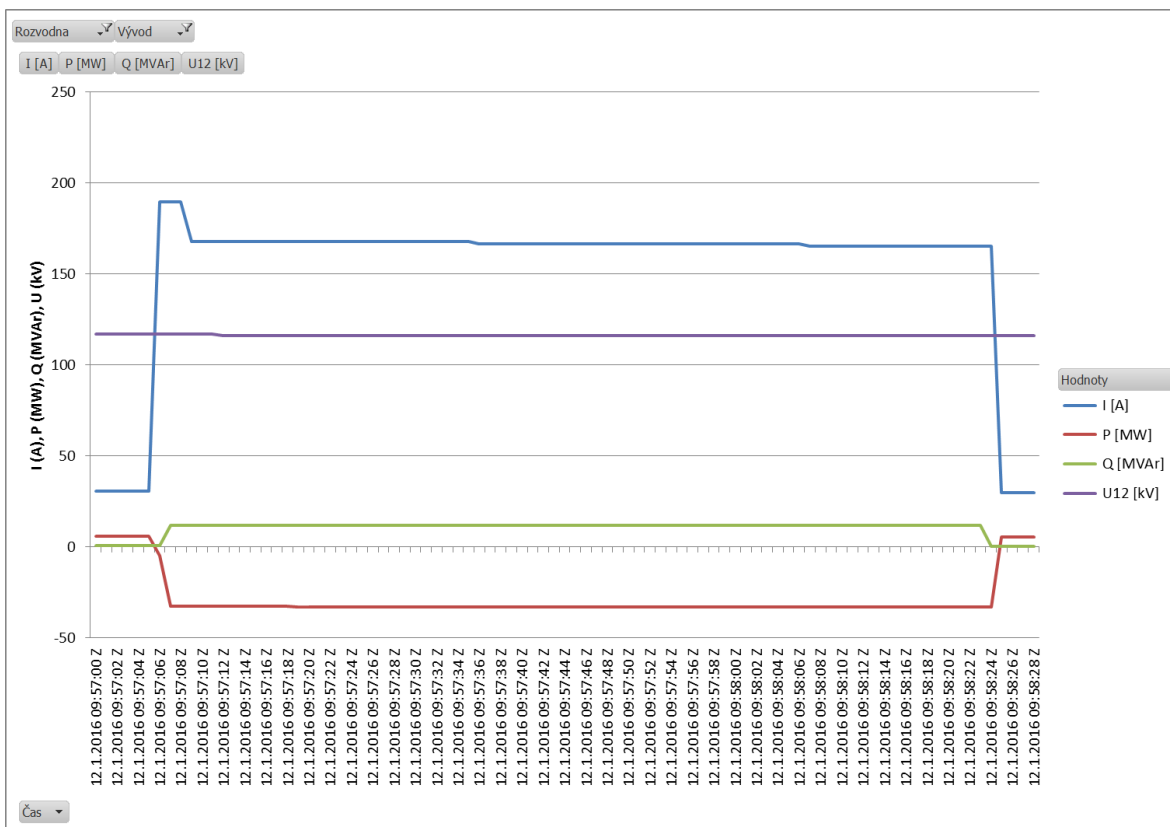
Obr. P1 Schéma sítě 110 kV provozovaných společností E.ON Distribuce, a.s. na území České Republiky



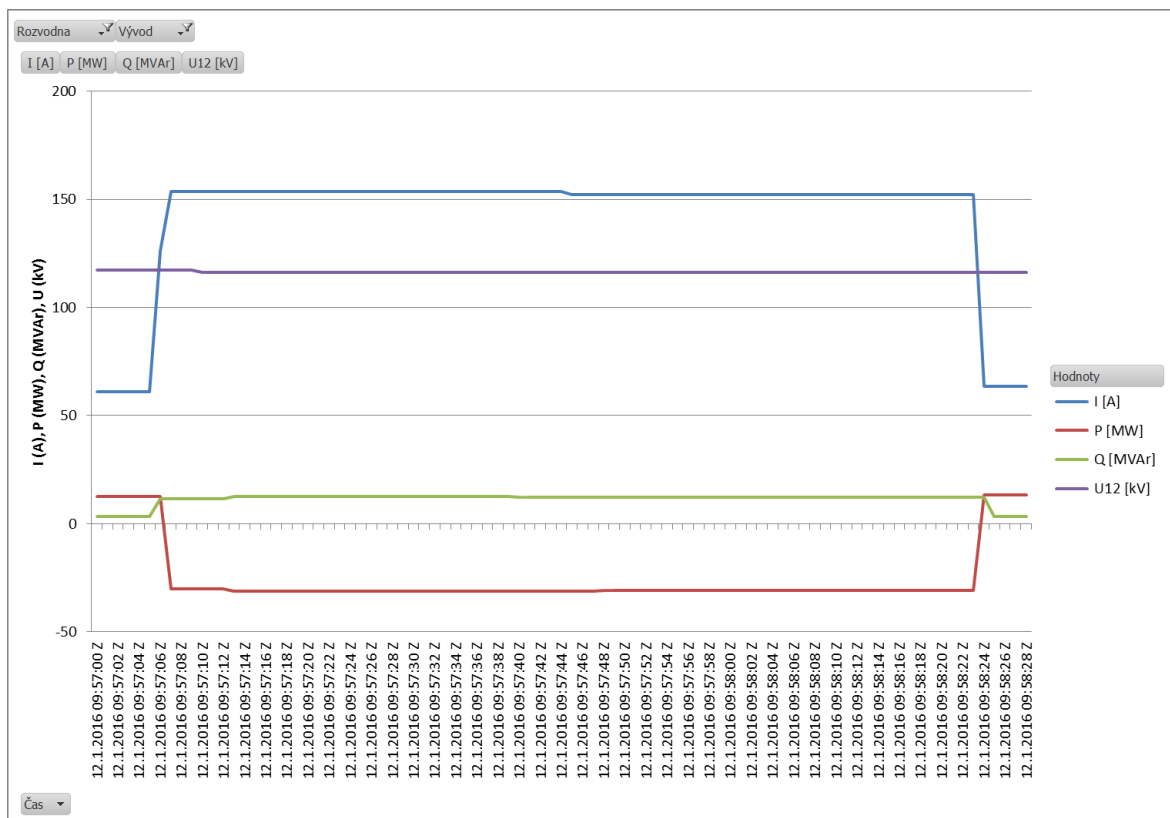
Obr. P2 Detail sítě 22 kV, linky Řečice (VES) a Řečice (HRA) na kterých došlo k propojení dvou rozdílných uzlových oblastí



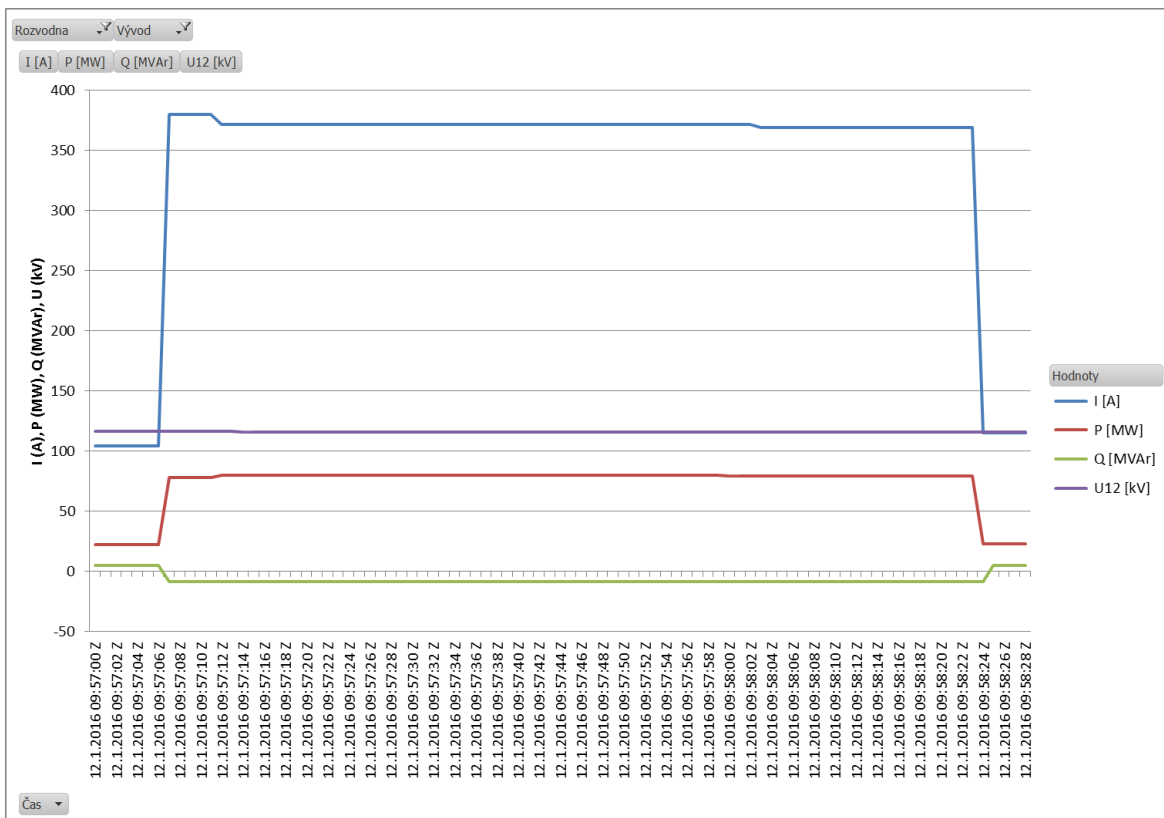
Obr. P3 Kompletní průběh proudů linek Řečice (VES) a Řečice (HRA) při měření, které bylo podkladem pro tuto diplomovou práci



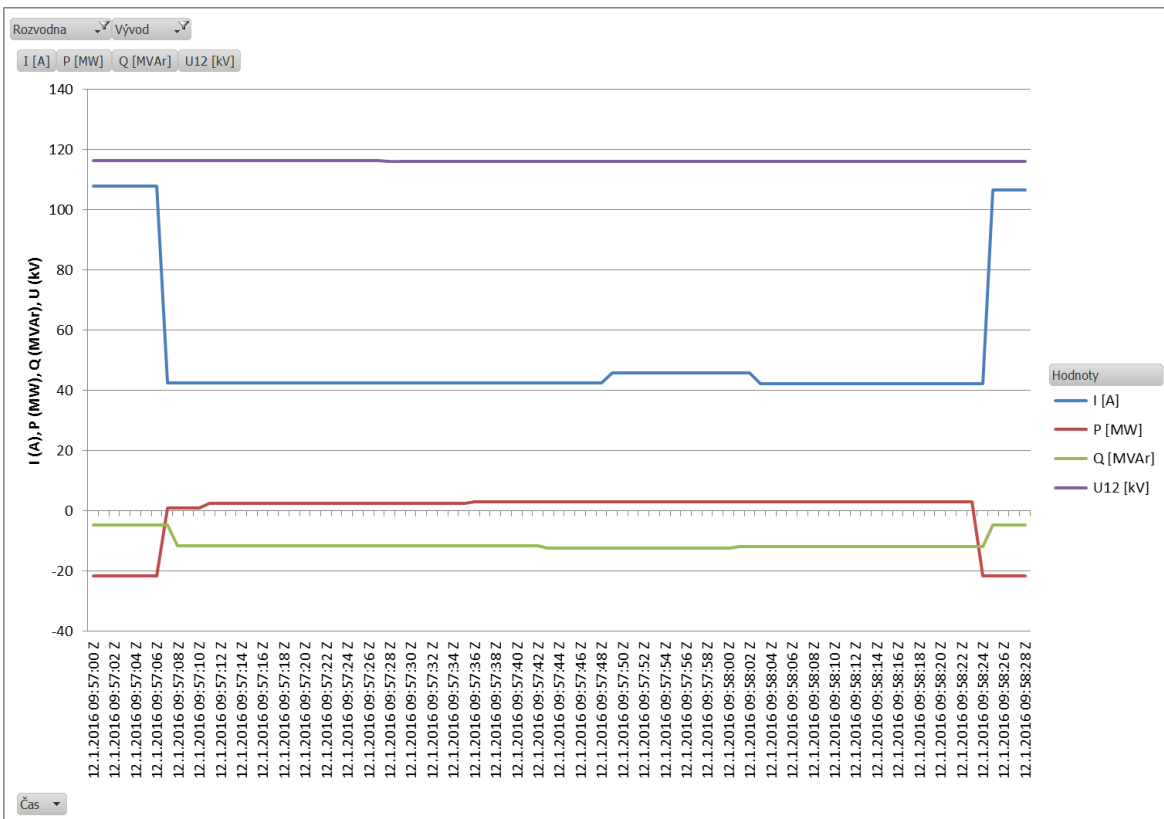
Obr. P4 Průběh měřených veličin v rozvodně 110 kV Veselí – linka V1398



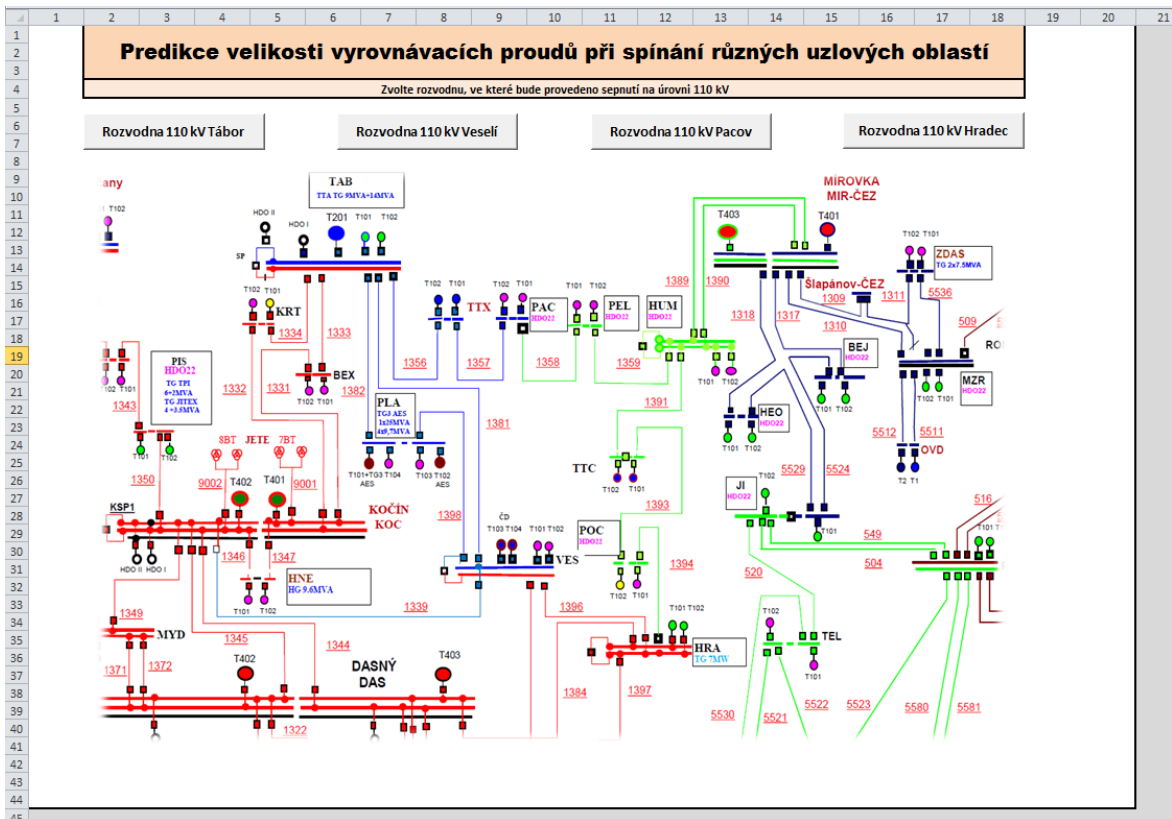
Obr. P5 Průběh měřených veličin v rozvodně 110 kV Veselí – linka V1381



Obr. P6 Průběh měřených veličin v rozvodně 110 kV Veselí – linka V1383



Obr. P7 Průběh měřených veličin v rozvodně 110 kV Veselí – linka V1396



Obr. P8 Program „Predikce vyrovnávacího proudu“ – úvodní obrazovka

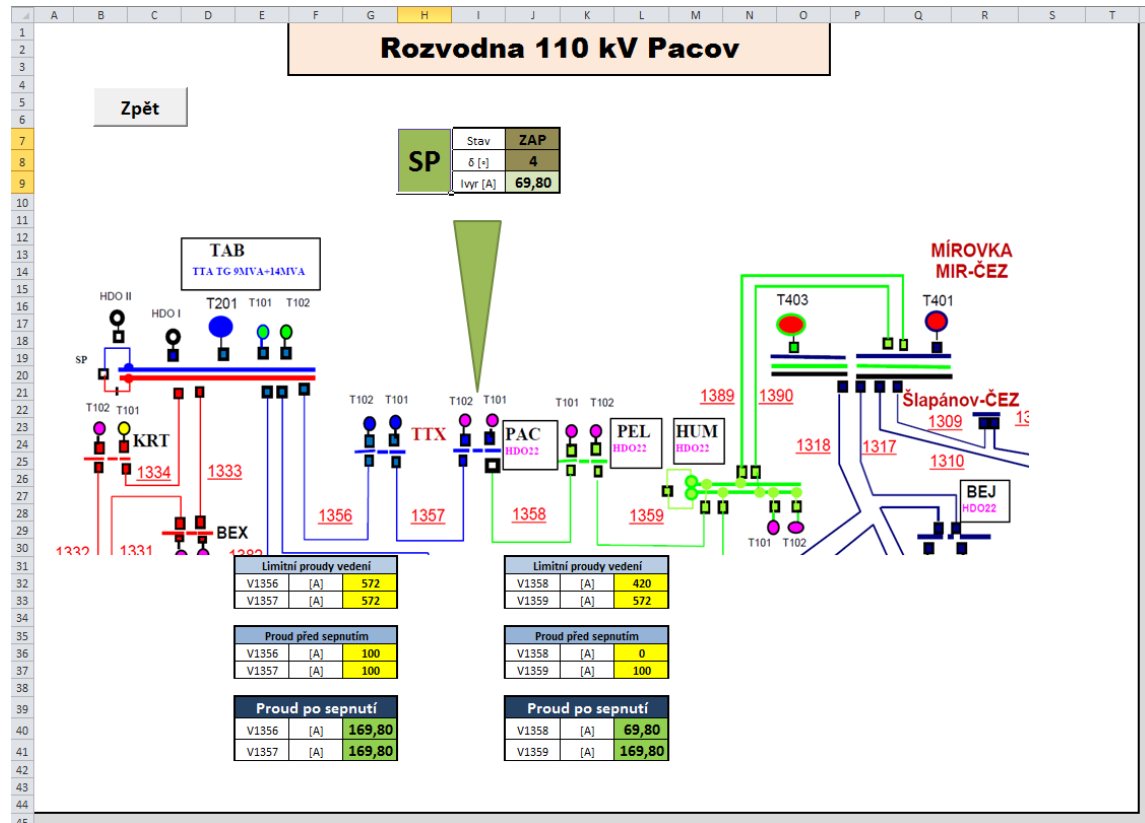
SP	Stav	ZAP
	δ [s]	3
	I _{vyř} [A]	228,79

Limitní proudy vedení		
V1334	[A]	572
V1333	[A]	572
V1331	[A]	572
V1332	[A]	572

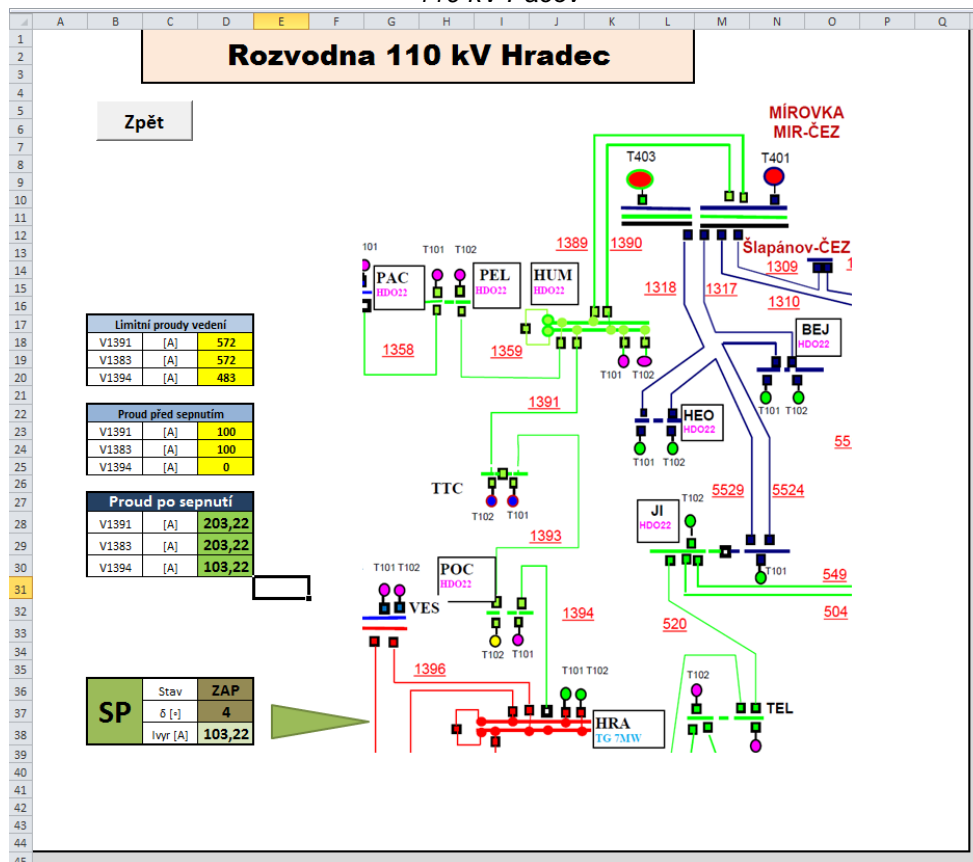
Proud před sepnutím		
V1334	[A]	100
V1333	[A]	100
V1331	[A]	100
V1332	[A]	100

Proud po sepnutí		
V1334	[A]	214,39
V1333	[A]	214,39
V1331	[A]	214,39
V1332	[A]	214,39

Obr. P9 Program „Predikce vyrovnávacího proudu“ – karta pro predikci spínání v rozvodně 110 kV Tábor



Obr. P10 Program „Predikce vyrovnávacího proudu“ – karta pro predikci spínání v rozvodně 110 kV Pacov



Obr. P11 Program „Predikce vyrovnávacího proudu“ – karta pro predikci spínání v rozvodně 110 kV Hradec