

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Provoz propojených vývodů VN

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Josef HLUBUČEK**
Osobní číslo: **E15B0180P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Provoz propojených vývodů VN**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Vypracujte ucelený pohled na problematiku propojování vývodů VN a provozu sítí v tomto zapojení.

1. Popište výhody i nevýhody provozu vývodů VN v uzavřené smyčce.
2. Vypracujte na základě práce se zahraniční literaturou přehled použití tohoto zapojení ve světě.
3. Porovnejte na modelovém příkladu napěťové, proudové a výkonové poměry podél rozpojených a propojených vývodů VN.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. CHAKRABARTI A., HALDER S. Power system analysis: operation and control. 3rd ed. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2010. ISBN 978-812-0340-152.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Roman Vykuka


Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2018


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na provoz propojených vývodů vysokého napětí, zkoumá přínos konfigurace uzavřené smyčky oproti paprskově napájené síti. Uzavřená smyčka přináší zlepšení z pohledu spolehlivosti dodávky elektrické energie a zvýšení tvrdosti napětí v uzlech uzavřené smyčky. Je zde zkoumána problematika s tím spojená, tj. zvýšení zkratového výkonu celé smyčky, což úzce souvisí s problémy při vypínání zkratových proudů. Tato práce přináší resumé ze zahraniční literatury, kde bylo zvažováno několik různých variant propojení vývodů vysokého napětí. V poslední části práce je ukázka analytického výpočtu a simulace v programu E-vlivy pro různá zatížení vývodů a zhodnocení výkonových, napěťových a proudových poměrů.

Klíčová slova

Vývody vysokého napětí, propojení vývodů, uzavřená smyčka, napájení ze dvou stran, distribuční soustava, radiální síť, zkratový výkon, úsekový odpojovač, recloser.

Abstract

This bachelor thesis is devoted to the operation of interconnected medium voltage feeder, and examines the contribution of the closed loop over the radial configuration. Closed loop arrangement improved power supply reliability and increases network hardness in closed loop nodes. The problematic around it is further investigated, and the problem connected with it, i.e. the increase of the short-circuit power of the whole loop, which is related to the problems with switching off short-circuit currents. This work is supplemented by a foreign literature review, where several different variants of the connection of medium voltage feeders were considered. In the last part of the thesis, there is a demonstration of simulation in the E-vlivy software for different feeders loads and evaluation of power, current flows and nodal voltages.

Keywords

Medium voltage feeder, feeders interconnection, closed loop, two-sided power supply, distribution system, radial grid, short-circuit, disconnector, recloser.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2018

Josef Hlubuček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Romanu Vykukovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 14 |
| 1 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA V ČESKÉ REPUBLICCE..... | 15 |
| 1.1 HISTORIE..... | 15 |
| 1.2 PŘENOSOVÁ SOUSTAVA..... | 16 |
| 1.3 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA | 18 |
| 1.4 PŘEDÁVACÍ MÍSTA PŘENOSOVÉ A DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY..... | 20 |
| 1.5 TOPOLOGIE SÍTÍ..... | 23 |
| 1.5.1 Prvky a vlastnosti vedení VN..... | 23 |
| 1.5.2 Distribuční trafostanice..... | 24 |
| 1.5.3 Síť paprskové..... | 25 |
| 1.5.4 Síť okružní..... | 26 |
| 1.5.5 Síť mřížové | 27 |
| 1.6 PRVKY KE ZMĚNĚ TOPOLOGIE SÍTÍ VN | 29 |
| 1.6.1 Úsekový odpínač - úsečník | 29 |
| 1.6.2 Recloser..... | 30 |
| 1.7 VÝKONOVÉ POMĚRY Z HLEDISKA VÝROBY A SPOTŘEBY..... | 31 |
| 1.8 UKAZATELE SPOLEHLIVOSTI – SAIDI, SAIFI | 32 |
| 2 PROPOJOVÁNÍ VÝVODŮ VN..... | 36 |
| 2.1 PROPOJOVÁNÍ VÝVODŮ VN V ZAHRANIČÍ | 36 |
| 2.1 VÝPOČET VYROVNÁVACÍCH PROUDŮ | 41 |
| 3 VÝPOČET NA MODELOVÉM OBVODU..... | 44 |
| 3.1 ANALYTICKÝ VÝPOČET PRO RADIÁLNĚ NAPÁJENÝ OBVOD | 44 |
| 3.2 ANALYTICKÝ VÝPOČET PŘI NAPÁJENÍ ZE DVOU STRAN..... | 48 |
| 3.3 VÝPOČET V SIMULAČNÍM PROGRAMU E-VLIVY | 49 |
| 3.3.1 Výpočet pro modifikované zadání – 2. příklad..... | 52 |
| 3.3.2 Výpočet pro modifikované zadání – 3. příklad..... | 54 |
| 3.4 ZHODNOCENÍ VÝPOČTŮ A SIMULACÍ..... | 56 |
| ZÁVĚR | 57 |
| SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ | 59 |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| OBRÁZEK 1 - PŘENOSOVÁ SOUSTAVA V ČR [1] | 17 |
| OBRÁZEK 2 - DISTRIBUTOŘI V ČR [6] | 18 |
| OBRÁZEK 3 - ELEKTRICKÁ STANICE V KLETNÉ [11] | 21 |
| OBRÁZEK 4 - H SCHÉMA | 22 |
| OBRÁZEK 5 - PRINCIPÁLNÍ ŘEŠENÍ JEDNOTLIVÝCH NAPĚŤOVÝCH ÚROVNÍ [15] | 23 |
| OBRÁZEK 6 - TOPOLOGIE SÍTÍ [17]..... | 24 |
| OBRÁZEK 7 - GRAF ZATÍŽENÍ DTR [18] | 25 |
| OBRÁZEK 8 – PŘÍKLAD PROVOZOVÁNÍ SOUSTAVY VN | 26 |
| OBRÁZEK 9 – OKRUŽNÍ SÍŤ [20] | 27 |
| OBRÁZEK 10 – JEDNOSYSTÉMOVÁ MŘÍŽOVÁ SÍŤ | 28 |
| OBRÁZEK 11 - DVOUSYSTÉMOVÁ MŘÍŽOVÁ SÍŤ..... | 28 |
| OBRÁZEK 12 - TECHNICKÉ PARAMETRY ÚSEKOVÝCH ODPÍNAČŮ DRIBO [23]..... | 29 |
| OBRÁZEK 13 - PŘÍKLADY ZAPOJENÍ RECLOSERU [27] | 31 |
| OBRÁZEK 14 - VÝVOJ VÝROBY ELEKTŘINY BRUTTO Z OZE [4]..... | 32 |
| OBRÁZEK 15 - GRAF VÝVOJE VÝROBY ELEKTŘINY BRUTTO Z OZE [4]..... | 32 |
| OBRÁZEK 16 - UKAZATELE NEPŘETRŽITOSTI DISTRIBUCE V ROCE 2016 [4]..... | 33 |
| OBRÁZEK 17 - UKAZATEL SAIFI [4] | 34 |
| OBRÁZEK 18 - UKAZATEL SAIDI [4] | 34 |
| OBRÁZEK 19 - PODÍL KABELOVÉHO A VENKOVNÍHO VEDENÍ NA VN (2016) [4] | 35 |
| OBRÁZEK 20 - KONFIGURACE ROZVODNY PRO VÝPOČET [33] | 37 |
| OBRÁZEK 21 - NAPĚŤOVÝ PROFIL PODÉL VÝVODŮ PRO ÚČINÍK 0,707 [33]..... | 38 |
| OBRÁZEK 22 - NAPĚŤOVÝ PROFIL PODÉL VÝVODŮ PRO ÚČINÍK 0,85 [33]..... | 38 |
| OBRÁZEK 23 - NAPĚŤOVÝ PROFIL PODÉL VÝVODŮ PRO ÚČINÍK 0,95 [33]..... | 38 |
| OBRÁZEK 24 - ZÁVISLOST REDUKOVÁNÍ ZTRÁT NA ZATÍŽENÍ VÝVODŮ [33]..... | 39 |
| OBRÁZEK 25 - SCHÉMA ROZVODNÉ SÍTĚ 115 kV v CHIANG MAI [34]..... | 40 |
| OBRÁZEK 26 - ZLEPŠENÍ SPOLEHLIVOSTI PŘI PŘECHODU Z RADIÁLNÍ SÍTĚ DO OKRUŽNÍ [34] | 41 |
| OBRÁZEK 27 - VZNIK ROZDÍLU NAPĚTÍ V DŮSLEDKU NATOČENÍ FÁZE [35]..... | 42 |
| OBRÁZEK 28 – NÁHRADNÍ SCHÉMA PRO VÝPOČET VYROVNÁVACÍCH PROUDŮ..... | 43 |
| OBRÁZEK 29 - SCHÉMA ZAPOJENÍ PRO PRAKTICKÝ VÝPOČET..... | 44 |
| OBRÁZEK 30 - VÝPOČET PŘI NAPÁJENÍ ZE DVOU STRAN | 48 |
| OBRÁZEK 31 - SIMULACE PRO RADIÁLNĚ NAPÁJENÝ OBVOD | 49 |
| OBRÁZEK 32 - NAPĚŤOVÉ POMĚRY PODÉL VÝVODŮ | 51 |
| OBRÁZEK 33 - PROUDOVÉ POMĚRY | 51 |
| OBRÁZEK 34 - VÝKONOVÉ POMĚRY ZKRATOVÉHO VÝKONU | 52 |
| OBRÁZEK 35 - PROUDOVÉ POMĚRY PRO 2. PŘÍKLAD..... | 53 |
| OBRÁZEK 36 - NAPĚŤOVÉ POMĚRY PRO 2. PŘÍKLAD | 53 |
| OBRÁZEK 37 - PROUDOVÉ POMĚRY PRO 3. PŘÍKLAD..... | 54 |
| OBRÁZEK 38 - NAPĚŤOVÉ POMĚRY PRO 3. PŘÍKLAD | 55 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| TABULKA 1 - ČEZ DISTRIBUCE [7] | 19 |
| TABULKA 2 - E-ON DISTRIBUCE [9] | 19 |
| TABULKA 3 - PRE DISTRIBUCE [10], [11], [12]..... | 20 |
| TABULKA 4 - UVAŽOVANÉ DRUHY ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORU [34]..... | 39 |
| TABULKA 5 - ZTRÁTY PŘI RŮZNÉM USPOŘÁDÁNÍ A PŘI JINÉM POMĚRU ZATÍŽENÍCH [34]..... | 40 |
| TABULKA 6 - SNÍŽENÍ ODCHYLKY NAPĚTÍ [34] | 41 |
| TABULKA 7 - ZADANÉ HODNOTY PRO ANALYTICKÝ VÝPOČET | 44 |
| TABULKA 8 – NAPĚTÍ V UZLECH PRO RADIÁLNĚ NAPÁJENÝ OBVOD | 49 |
| TABULKA 9 - NAPĚTÍ V UZLECH PRO SÍŤ NAPÁJENOU ZE DVOU STRAN | 49 |
| TABULKA 10 - PROUDY A VÝKONY VE VĚTVÍCH PRO RADIÁLNĚ NAPÁJENÝ OBVOD | 50 |
| TABULKA 11 - PROUDY A VÝKONY VE VĚTVÍCH PRO SÍŤ NAPÁJENOU ZE DVOU STRAN | 50 |
| TABULKA 12 - ZADANÉ HODNOTY PRO 2. PŘÍKLAD..... | 52 |
| TABULKA 13 - ZADANÉ HODNOTY PRO 3. PŘÍKLAD..... | 54 |
| TABULKA 14 - ANALYTICKY VYPOČÍTANÉ HODNOTY PRO ROZPOJENÝ OBVOD | 56 |
| TABULKA 15 - HODNOTY ZE SIMULAČNÍHO PROGRAMU PRO ROZPOJENÝ OBVOD | 56 |

Seznam symbolů a zkratek

| | |
|------------------------|---|
| AlFe | Lano z několika hliníkových žil, kde nosné jádro je z pozinkované oceli |
| c | Napěťová konstanta (-) |
| Cosφ | Účinník (-) |
| ČEPS | Česká energetická přenosová soustava |
| ČEZ | České energetické závody |
| DS | Distribuční soustava |
| DTR | Distribuční transformátor |
| DTS | Distribuční trafostanice |
| dU | Velikost rozdílu napětí (V) |
| E- ON | Provozovatel distribuční soustavy |
| ENTSO – E | Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny |
| ERÚ | Energetický regulační úřad |
| Fla | Úsečník se zhašecími maloolejovými komorami (firma DRIBO) |
| Flb | Úsečník růžkového typu (DRIBO) |
| Flc | Úsečník pružinového typu (DRIBO) |
| FVE | Fotovoltaická elektrárna |
| HDO | Hromadné dálkové ovládání |
| I | Elektrický proud (A) |
| I ₀ | Proud naprázdno (A) |
| I _{εV1} | Elektrický proud činného charakteru v prvním úseku vedení (A) |
| I _{jV1} | Elektrický proud jalového charakteru v prvním úseku vedení (A) |
| I _{k*} | Zkratový proud (A) |
| I _v | Vyrovňovací proud (A) |
| I _{V1} | Komplexní elektrický proud v prvním úseku vedení (A) |
| I _z | Elektrický proud v zátěži (A) |
| JEDU | Jaderná elektrárna Dukovany |
| JETE | Jaderná elektrárna Temelín |
| l _k | Vzdálenost mezi odběry (km) |
| N1 | Napájecí síť 1 |
| N-1 | Systém zálohování při výpadku zdroje |
| N2 | Napájecí síť 2 |
| NN | Nízké napětí |

| | |
|-----------------------|---|
| OZ | Opětovné zapnutí |
| OZE | Obnovitelné zdroje energie |
| P | Činný výkon (W) |
| PRE | Pražská energetická |
| PS | Přenosová soustava |
| PST | Transformátor s možností posunutí fáze napětí |
| P _{V1} | Činný výkon v prvním úseku vedení (W) |
| P _Z | Činný výkon zátěže (kW) |
| Q | Jalový výkon (VAr) |
| Q _{V1} | Jalový výkon v prvním úseku vedení (Var) |
| R | Elektrický odpor (Ω) |
| R/X | Poměr elektrické odporu k reaktanci elektrické sítě (-) |
| R ₁ | Elektrický odpor vedení na vzdálenosti pět kilometrů (Ω) |
| R _k | Elektrický odpor vedení (Ω/km) |
| R _s | Elektrický odpor sítě (Ω) |
| R _{S1} | Elektrický odpor sítě a prvního vedení (Ω) |
| S | Zdánlivý výkon (VA) |
| SAIDI | Spolehlivostní ukazatel, jak dlouho je zákazník bez elektrické energie za jeden rok (minut/rok) |
| SAIFI | Spolehlivostní ukazatel, kolikrát došlo k přerušení dodávky elektrické energie za jeden rok (přerušení/rok) |
| Sk" | Zkratový výkon (MVA) |
| TR | Transformátor |
| U | Elektrické napětí (V) |
| U ₀ | Navýšené napětí sítě (V) |
| U ₁ | Hodnota napětí v prvním uzlu (V) |
| U _f | Fázové napětí |
| U _{ni} | Napětí v uzlu vypočtené pomocí iterací |
| VN | Vysoké napětí |
| VVN | Velmi vysoké napětí |
| X ₁ | Reaktance vedení na vzdálenosti pět kilometrů (Ω) |
| X _k | Reaktance vedení (Ω/km) |
| X _s | Reaktance sítě (Ω) |
| X _{S1} | Reaktance sítě a prvního vedení (Ω) |

| | |
|-----------------------|--|
| Z | Impedance (Ω) |
| Z_S | Impedance sítě (Ω) |
| Z_{S1} | Impedance sítě a prvního vedení (Ω) |
| Z_T | Impedance transformátoru (Ω) |
| Z_V | Impedance vedení (Ω) |
| δ | Úhel rozdílu napětí ($^\circ$) |
| ΔU_1 | Sdružený úbytek na prvním úseku vedení (V) |
| ΔU_{f1} | Fázový úbytek na prvním úseku vedení (V) |

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na propojování vývodů vysokého napětí.

Text je rozdělen do tří částí. První část se zabývá elektrizační soustavou České republiky, kde je popisována přenosová i distribuční soustava, rozhraní přenosové soustavy a distribuční. Dále je práce zaměřena na distribuční soustavu, respektive na hladinu vn, jaká topologie sítě se používá, který typ vodičů se nachází v DS, spolehlivost dodávky elektrické energie, v této části je zmíněna studie ohledně ekonomického osazování distribučních transformátorů na hladině vn. Také je věnována pozornost úsekovým odpínačům a recloserům, se zaměřením na jejich vypínací schopnosti. V práci jsou zmíněny i výkonové poměry v ES, a to z pohledu nárůstu instalovaného výkonu z obnovitelných zdrojů elektrické energie za posledních několik let.

Druhá část práce popisuje výhody a nevýhody spojování vývodů VN, konkrétně spolehlivost systému při přechodu radiální sítě do okružní, kde je zkoumán napěťový, proudový a výkonový profil podél vývodů vn. V této části práce je nastíněn výpočet vyrovnávacího proudu, který je důležitý z pohledu vypínací schopnosti odpínačů. Tímto problémem se zabývala rovněž distribuční společnost E-ON distribuce a.s., která zkoumala vliv fázového rozdílu napájecích napětí na velikosti vyrovnacího proudu. Také se zde nachází vypracovaný přehled, jak se k dané problematice staví ve světě, kde bylo zkoumáno několik variant přechodu z radiální na okružní síť.

V poslední části práce je nastíněn příklad analytického výpočtu rozpojených a propojených vývodů vn. Dále byl výpočet ověřen simulací v programu E-vlivy pro oba typy zapojení vývodů VN, a také pro různé zatížení vývodů. V závěru práce jsou zhodnoceny simulace a je proveden rozbor, zda byly potvrzeny teoretické předpoklady.

1 Elektrizace soustava v České republice

Je souborem všech zařízení potřebných pro výrobu, přenos, transformaci či distribuci elektriny, včetně přípojek a přímých vedení. Také ji tvoří systémy, které nesou funkci měřicí, ochranou, řídicí, telekomunikační a v neposlední řadě informační. Elektrizace soustava se dělí na přenosovou a distribuční. [1]

1.1 Historie

Elektrifikace na území České republiky byla zahájena na přelomu devatenáctého a dvacátého století. Elektrifikace českých zemí byla provedena kvůli požadavkům zemědělství a průmyslu. Postupně začaly vznikat menší elektrárny, které měly vlastní distribuční síť v okolí elektrárny, měly však různé proudové systémy, napětí a kmitočty. Až po 1. světové válce docházelo k postupnému sjednocování sítí a jejich propojování. V roce 1919 byl uveden v platnost zákon o všeobecné elektrifikaci. Na území současné České republiky vzniklo zhruba dvacet elektrárenských společností, a to v letech 1920 – 1930, které měly povinnost dodávky elektriny každému, kdo o ni jevil zájem, pokud to bylo možné v rámci technické proveditelnosti.

Ve 30. letech vznikaly další větší elektrárny, které již v dnešní době neexistují anebo po přestavbě slouží jako teplárny. Již na konci 30. let bylo elektrifikováno 70% všech obcí. Elektrifikaci pozastavila až 2. světová válka. Po válce se většina stávajících elektráren zmodernizovala, což přineslo navýšení výkonů dvakrát až třikrát od původních. Byly vybudovány nové elektrárny v Opatovicích, Mělníku a také Vltavská kaskáda, které jsou v provozu dodnes.

Na počátku 60. let se začaly budovat uhelné elektrárny s bloky na 200 MW. V této době elektrizační soustava České republiky začala spolupracovat se soustavami okolních zemí. Byla vytvořena společnost Československé energetické závody (ČEZ), které se rozdělily na konci 60. na České a Slovenské. Nejdůležitější výstavba elektrárny pro českou energetiku byla zahájena v roce 1978, kdy začala stavba Jaderné elektrárny Dukovany (JEDU). Její první blok byl uveden do provozu v roce 1985. Po Sametové revoluci prodělala česká energetika zásadní změny, jelikož ze státního podniku ČEZ, byly vyčleněny podniky teplárenské, opravárenské, montážní, také několik společností, které zajišťovaly distribuci konečným zákazníkům. V konečné fázi i ČEPS (provozovatel a vlastník přenosové soustavy v ČR). V této době došlo k odsíření uhelných elektráren, kvůli eliminaci síry a popílku, které se uvolňovaly do ovzduší.

Poté se naše elektrizační soustava plně propojila se západoevropskou soustavou. Od roku 2000 začal vyrábět první blok Jaderné elektrárny Temelín (JETE), který patřil k nejmodernějším v celé Evropě. [2]

1.2 Přenosová soustava

Skládá se ze sítí 400 kV a 220 kV a je takzvanou páteří elektrizační soustavy, která je na určitých místech propojena. Jejím hlavním úkolem je přenos výkonů na velké vzdálenosti a zajišťuje propojení elektrizační soustavy se soustavami zahraničními a také se používá pro vyvedení výkonů z velkých systémových elektráren. Délky vedení na území ČR jsou: 400 kV – zhruba 3 600 km a u 220 kV okolo 1900 km. V této síti je připojeno 41 transformoven, které převádějí 400 kV, 220 kV na úroveň distribuční 110 kV. V přenosové soustavě jsou až na provozní výjimky všechna vedení a transformátory propojeny, tím pádem při výpadku nějakého prvku sítě ho lze okamžitě nahradit jiným. Pokud dojde k poruše jednoho či více vedení a transformátorů, převezmou jejich zátěž ostatní prvky, které stále pracují bez poruchy. Tento princip zálohy se nazývá bezpečnostní kritérium N-1, rovněž distribuční sítě napěťové úrovně 110 kV mají tento systém zálohy. [1, 2]

Použití vyšších napětí slouží ke snížení ztrát při přenosu, jelikož při průchodu proudu vodičem vzniká na vedení úbytek napětí. Proud působí na vodič v kvadrátu. Proto transformujeme napětí na vyšší, abychom snížili procházející proud, a tudíž i ztráty na vedení. Například pro rok 2016 byly ztráty na vedení v přenosové soustavě 962,5 GWh, oproti tomu v distribuční soustavě až 3117,6 GWh. [3] [4]

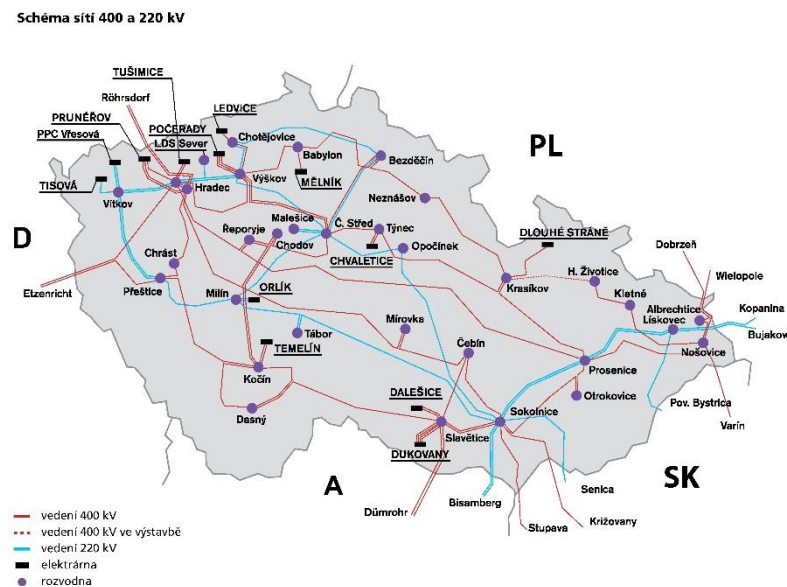
V české přenosové soustavě se nepoužívá vyšší napětí než uvedených 400 kV, protože při transformování na vyšší napětí vzniká korona, která je způsobena překročením elektrické pevnosti vzduchu v okolí vodičů. Korona má za následek ztráty, proto se používá svazek vodičů, který omezuje ztráty korunou a projev skinefektu. [3]

Vlastníkem přenosové soustavy je Česká energetická přenosová soustava (ČEPS), což je akciová společnost, která na základě liberalizace trhu v České republice (1998) byla rozdělena na výrobu, přenos a distribuci elektrické energie. Ačkoliv je to akciová společnost, jediným akcionářem je Ministerstvo průmyslu a obchodu, proto je ČEPS, a.s., pouze státním podnikem. Má za úkol zajistit spolehlivý provoz přenosové soustavy a také její rozvoj. Reguluje výrobu a spotřebu elektřiny, aby nedocházelo k nedostatku výkonu v síti, či přetěžování vedení. Proto se také využívá například akumulace energie, přičemž se nejčastěji používají přečerpávací

elektrárny. Ty mají za úkol při malém odběru ze sítě využít kinetickou energii vody jejím přečerpáním ze spodní nádrže do horní. Tato kinetická energie vody je využita při špičkové spotřebě, kdy je potřeba dodat do sítě požadovaný výkon v krátkém čase. [5]

Jednotlivé činnosti společnosti ČEPS, a.s., se rozdělují do několika kategorií:

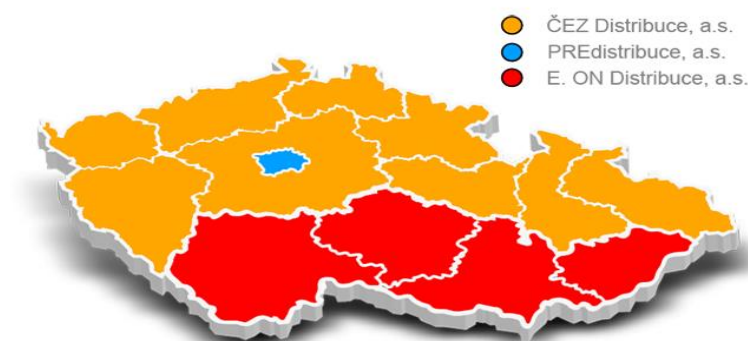
- Systémové služby (SyS) – mají za úkol zajištění kvality a spolehlivosti dodávky elektrické energie.
- Přenosové služby – mají na starosti přenos elektrické energie od výrobců ke spotřebitelům.
- Podpůrné služby (PpS) – prostřednictvím PpS se koriguje spotřeba nebo výkon zdrojů.
- Dispečerské řízení – probíhá v dispečinku ČEPS, a.s., a napomáhá zajištění spolehlivého a bezpečného provozu elektrizační soustavy.
- Zahraniční spolupráce – ČEPS je členem evropského sdružení ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity). A také úzce spolupracuje s PPS sousedních zemí.
- Technická infrastruktura – zabývá se zejména údržbou a rozvojem přenosové soustavy.[5]



Obrázek 1 - Přenosová soustava v ČR [1]

1.3 Distribuční soustava

Slouží k distribuci elektrické energie ke koncovým odběratelům. Distribuční soustava je tvořena jak sítěmi VVN 110 kV, VN (35 kV – 22 kV – 10 kV – 6 kV), tak i NN (400/230 V). Má za úkol přenášet výkon na kratší vzdálenosti než přenosová soustava. Také jsou do této sítě připojeny elektrárny nižších výkonů. [7]



Obrázek 2 - Distributoři v ČR [6]

Distribuční území je tvořeno třemi největšími společnostmi a to ČEZ distribuce, E-on distribuce, PRE distribuce a také desítkami dalších poskytovatelů, kteří jsou však připojeni na již zmíněné distribuce. Každý distributor elektřiny je zodpovědný za spolehlivý přenos elektřiny v rámci distribuční soustavy a také i za její správu ve své oblasti působení. Všechny zmíněné distribuce podléhají regulaci ze strany Energetického regulačního úřadu (ERÚ), tím pádem si nemůže distributor dělat, co se mu zlíbí a to i v případě změny cen za elektřinu. [7]

ČEZ distribuce, a.s., vznikla roku 2005 a je největším výrobcem elektřiny v České republice, také však dodává teplo i plyn. Společnost působí v ČR ve většině krajů, a to v Plzeňském, Karlovarském, Středočeském, Ústeckém, Libereckém, Královehradeckém, Pardubickém, Olomouckém a Moravskoslezském. Skupina ČEZ nepůsobí pouze v České republice, ale má zastoupení i v zahraničí, kde se nejvíce angažuje do obnovitelných zdrojů (větrných a vodních elektráren). Společnost ČEZ se nezabývá pouze výrobou elektřiny, ale také těžbou surovin, telekomunikací, informatikou. Zejména také výstavbou a údržbou energetických zařízení, ale i jaderným výzkumem. ČEZ se věnuje i dalším činnostem, které úzce souvisí s výrobou elektřiny. Je velice aktivní v řadách inovací a vědy a také rozvíjí chytré sítě a elektromobilitu. Společnost se pyšní instalovaným výkonem 14,9 GW k 30. 6. 2017. [7]

Tabulka 1 - ČEZ distribuce [7]

| Pro rok 2016 | | | |
|------------------------------|---------|--------|-------|
| ČEZ distribuce | nn | vn | vvn |
| Délka kabelových vedení (km) | 55 452 | 10 469 | 23 |
| Délka venkovních vedení (km) | 47 717 | 40 189 | 9 830 |
| Celková délka vedení (km) | 163 680 | | |

Společnost E. ON distribuce, a.s., vznikla roku 2000, spravuje a rozvíjí distribuční síť, připojuje zákazníky a nabízí služby související s distribucí elektřiny, plynu a s výrobou elektrické energie. Má na starosti distribuční soustavu elektrické energie v jižních Čechách a na jižní Moravě a distribuci plynu na jihu Čech. Také funguje jako kontaktní subjekt ve vztahu k Energetickému regulačnímu úřadu, kde se zodpovídá za dlouhodobé plánování rozvoje distribuční sítě elektřiny a plynu, dále i za přípravu dohod o připojení nových zdrojů k síti. Společnost samozřejmě klade důraz na obnovitelné zdroje a energetickou efektivitu. Instalovaný výkon k roku 2017 je 2130 MW. [8]

Tabulka 2 - E-ON distribuce [9]

| Pro rok 2016 | | | |
|------------------------------|--------|--------|-------|
| E-ON distribuce | nn | vn | vvn |
| Délka kabelových vedení (km) | 22 981 | 3 900 | 13 |
| Délka venkovních vedení (km) | 15 931 | 18 576 | 3 915 |
| Celková délka vedení (km) | 65 316 | | |

PRE, a.s., vznikla roku 2005, zajišťuje distribuci elektřiny na území hlavního města Prahy a Roztok u Prahy. Oproti předešlým distributorům se nezabývá dodávkou a výrobou tepla, ale má na starosti havarijní službu a zodpovídá za poruchy veřejného osvětlení, přisvětlení přechodů pro chodce, slavnostní nasvícení budov a dalších doplňků v majetku hlavního města Prahy. PRE distribuce se podílí na rozvoji elektromobility. V jejich nabídce můžeme najít prodej elektromobilů na leasing nebo i prodej elektrokol. Samozřejmě jsou vystavěné nabíjecí stanice po celém hlavním městě, kde se mohou nabít elektromobily, elektrokola. U elektromobilů na leasing je nabíjení na PREpointech zdarma, ostatní musí platit poplatek za nabíjení. V neposlední řadě se podílí repasování baterií do elektrokol. [9]

Tabulka 3 - PRE distribuce [10], [11], [12]

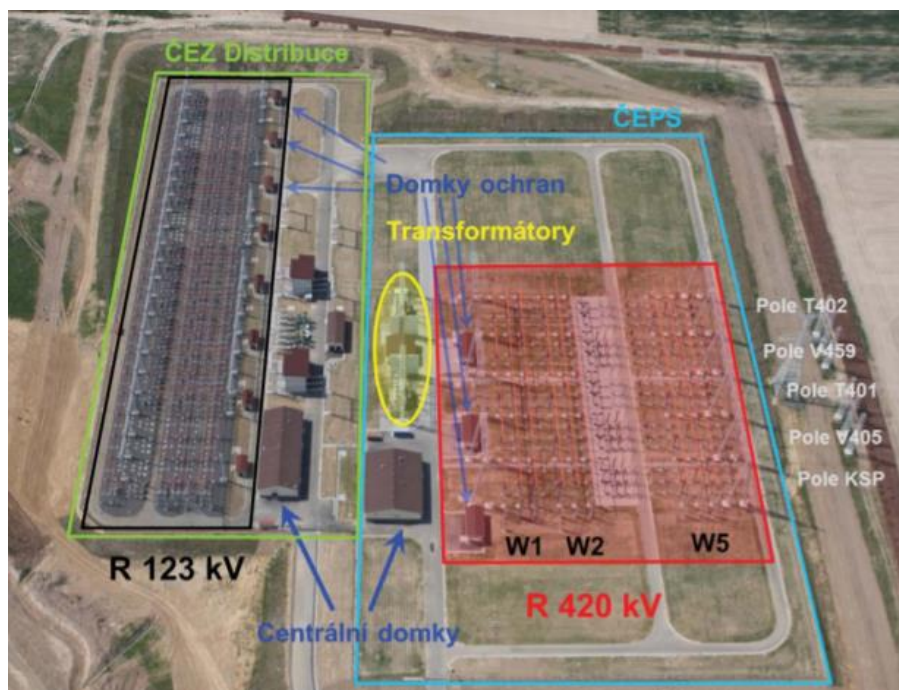
| Pro rok 2016 | | | |
|------------------------------|--------|-------|-----|
| PRE distribuce | nn | vn | vvn |
| Délka kabelových vedení (km) | 7 901 | 3 769 | 63 |
| Délka venkovních vedení (km) | 73 | 103 | 144 |
| Celková délka vedení (km) | 12 054 | | |

1.4 Předávací místa přenosové a distribuční soustavy

Tento pojem označuje místo, kde se transformuje napětí ze 400/220 kV, 400/110 kV nebo 220/110 kV. Předávací místa jsou v rozvodnách Hradec u Kadaně (západ), zde se nachází i transformátor typu PST, který reguluje přeshraniční toky. Další rozvodny, kde se nacházejí transformátory 400/220 kV jsou v Sokolnici, Čechy - Střed, Prosenice. Rozvodny v Přešticích, Bezděčíně, Vyškově a Chotějovicích, což je zapouzdřená rozvodna. Tyto transformátory pracují 400/110 kV a 220/110 kV do paralelní přípojnice 110 kV. [13]

Systémové transformátory 400/220 kV a některé starší druhy transformátorů 220/110 kV jsou složeny ze čtyř jednofázových jednotek - z toho tři jednotky jsou stále v provozu a čtvrtá jednotka je jako záložní. Ostatní transformátory jsou v trojfázovém provedení. [13]

Každé předávací místo přenosové a distribuční soustavy se skládá ze dvou částí a to část, kterou vlastní provozovatel přenosové soustavy ČEPS, a.s., a část, kterou vlastní distributor v dané oblasti, v našem případě ČEZ distribuce, a.s., což je vidět na Obrázek 3, což elektrické stanice v Kletné. Ve stanici jsou dva transformátory 400/110kV, které zajišťují propojení přenosové a distribuční soustavy. [13]

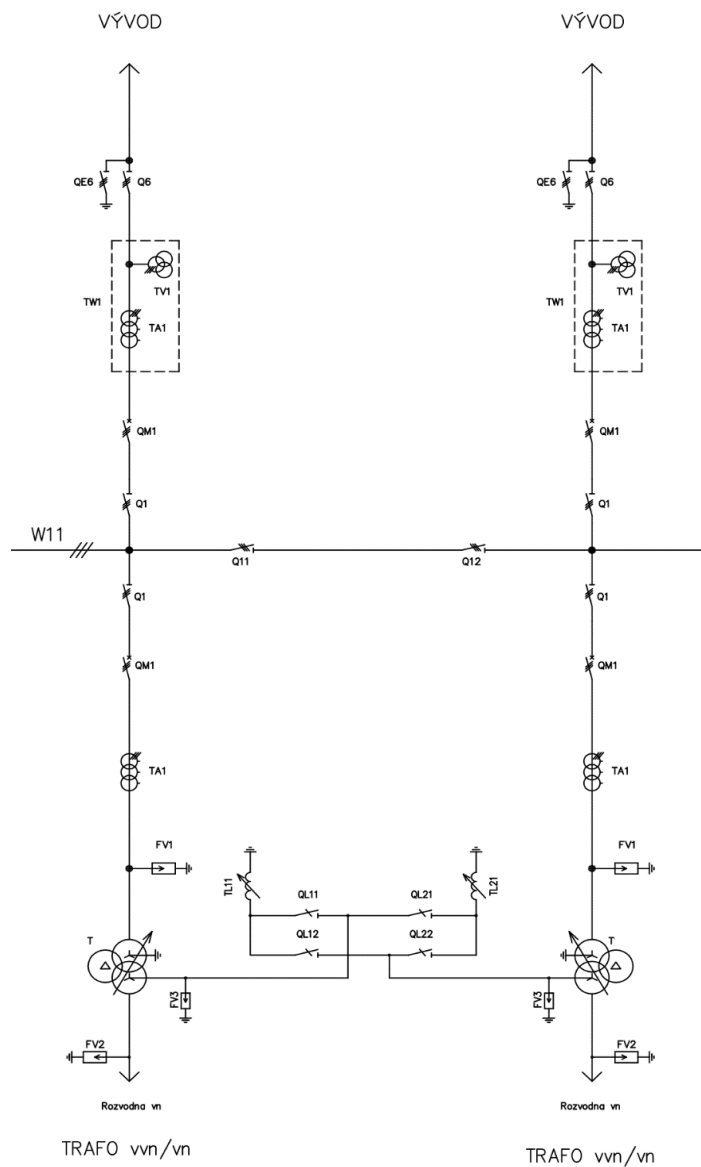


Obrázek 3 - Elektrická stanice v Kletné [11]

U dosud nerekonstruovaných elektrických stanic s místní obsluhou je vždy pouze jeden centrální domek pro celou stanici, ve kterém obsluha řídí stanici z velína. V centrálním domku se také nachází veškerá sekundární technika (všechny ochrany a řídicí systém rozvodny). [13]

U nových dálkově ovládaných a zrekonstruovaných stanic mají části provozované provozovateli distribuční a přenosové soustavy odděleny. V každé části se nachází centrální domek a v polích rozveden jsou vystaveny domky ochran (ochrany, dolní úroveň řídicího systému). U takto umístěných domků ochran je z důvodu snížení vzdálenosti přenosu elektrických údajů za účelem zvýšení přesnosti. [13]

Rozhraní mezi napěťovými hladinami VVN/VN je nejčastěji tvořeno rozvodnami tvaru písmene H. Jedná se o rozvodnu s jednou či dvěma poli vývodů vedení nebo vývodů transformátorů VVN/VN s malým počtem odboček, maximálně šesti. Rozvodna je vždy vybavena podélným dělením s odpojovací buďto v řadě, nebo ve dvojitém systému přípojníc ve tvaru písmene H. [14]



¹Obrázek 4 - H schéma

¹ Materiály poskytnuté společností ČEZ

1.5 Topologie sítí

Distribuční sítě jsou zapojeny podle požadované spolehlivosti a kvality dodávky elektrické energie. Sítě dělíme dle zapojení na: paprskové, okružní, mřížové (zauzlené).

| | Napětová úroveň | Jmenovité napětí | Uspořádání rozvodu | Spojení uzlu transformátoru |
|----------------------|----------------------------------|------------------|--|---|
| Nadřazená soustava | vvn | 400 kV | Okružní | Účinně uzemněný |
| | | 220 kV | | |
| Distribuční soustava | vn | 110 kV | Okružní, paprskový | Neúčinně uzemněný - většinou kompenzovaný |
| | | 22 kV, 35 kV | | |
| | | 10 kV | | |
| | nn | 6 kV | Průběžný, paprskový, dvojpaprskový (obvykle s možností spojení do okružního) | Neúčinně uzemněný, nebo izolovaný |
| | | 500 V | | |
| 400/230 V | Průběžný, paprskový, mřížová síť | Izolovaný | | |
| | | | Účinně uzemněný s vyvedeným středním vodičem | |

Obrázek 5 - Principiální řešení jednotlivých napětových úrovní [15]

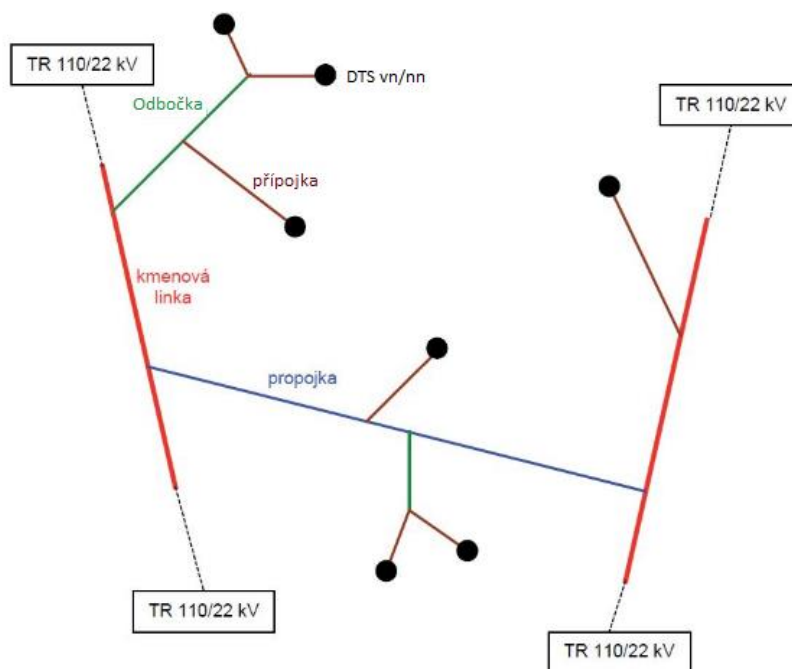
1.5.1 Prvky a vlastnosti vedení VN

Hlavní vedení, takzvaná kmenová linka, je nejčastěji propojení dvou napájecích transformátorů nebo transformátoru a spínací stanice na straně vn. Při volbě průřezu venkovních vedení je nutno zohlednit nejen stávající využití vedení, ale i výhledový stav sítě. Vývody z transformátorů venkovním vedením jsou zpravidla navrhovány jako dvojnásobná vedení s tím, že je možné jeden potah ponechat nevyzbrojený jako rezervu pro budoucí nárůst zatížení. [16] [17]

Používané průřezy na kmenových linkách jsou pro venkovní vedení AlFe 3x110/22 mm², u kabelových vedení jsou použity kabely o průřezu 3x120 mm² nebo i 3x1x240 mm², což například používá PRE distribuce. Pro změnu topologie, rozdělení vedení na části, platí určitá pravidla. Používají úsečníky nebo novější reclosery, podrobněji v kapitole 1.6. [16] [17]

Propojky, které slouží k propojení dvou kmenových linek, kde se používají například lana AlFe 3x110/22 mm², 70/11-1 mm².

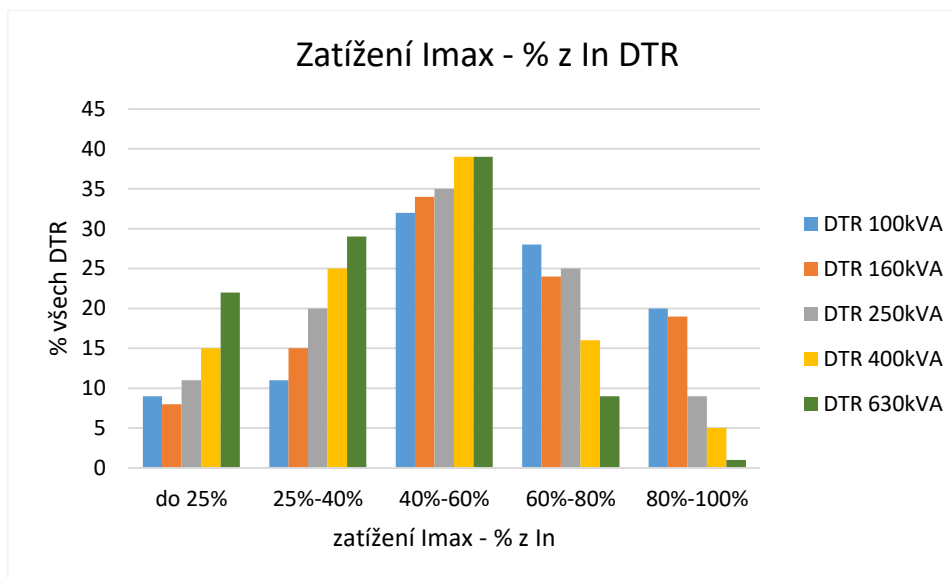
V místě odbočení od kmenové linky je do odbočky i obou směrů kmenové linky řazen úsečník. Odbočky slouží k připojení více transformátorů na kmenovou linku, průřez vodičů už je menší než na kmenové lince z důvodu menšího výkonového zatížení. Používané vodiče na odbočkách jsou typicky lana AlFe $3 \times 35 \text{ mm}^2$ nebo $3 \times 42 \text{ mm}^2$. Při požadavku na vyšší zkratovou odolnost jsou používány AlFe $3 \times 50 \text{ mm}^2$ a $3 \times 70 \text{ mm}^2$. Přípojky slouží k připojení jednotlivých transformačních stanic. [16] [17]



Obrázek 6 - Topologie sítí [17]

1.5.2 Distribuční trafostanice

Zde dochází k transformaci z VN/NN, které je dále rozváděno k jednotlivým odběratelům. Je několik typů provedení, například pro venkovní vedení jsou věžové, příhradové a také sloupové, které jsou nejpoužívanější a stavějí se doposud. U kabelového provedení jsou buďto zděné nebo kioskové, které patří k nejmodernějším trafostanicím, jejich výstavba je rychlá a mají nízké provozní náklady. Transformátory DTR jsou převážně olejové a hermeticky uzavřené ve výkonové řadě 50, 100, 160, 250, 400 a 630 kVA. Transformátory o výkonu 630 kVA se umísťují do center měst a průmyslových zón, kde je vyšší koncentrace spotřeby. [18]

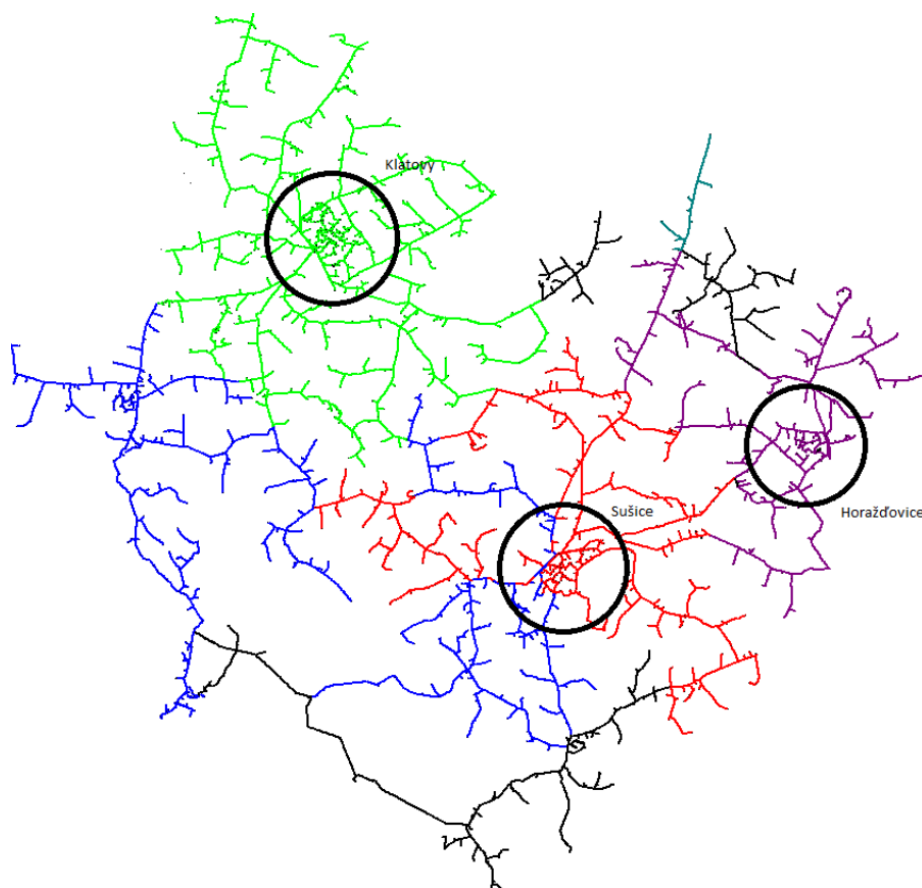


Obrázek 7 - Graf zatížení DTR [18]

Z Obrázek 7 vyplývá, že nejvíce transformátorů se provozuje se zatížením do 60 % jmenovitého zatížení, což se považuje za hospodárnou mez zatížení transformátorů. Analýza zatížení DTR, kdy u velkých strojů 400 kVA a 630 kVA bylo prokázáno neúčelné nasazení. To je patrné z grafu, kde téměř 90 % DTR o výkonu 630 kVA lze nahradit stroji o výkonu 400 kVA bez jejich přetížení (za normálních provozních podmínek bez uvažování náhradního napájení). Data, která byla vyhodnocena, jsou za 1 rok. Tato analýza byla provedena z důvodu úspory ve společnosti E. ON distribuce, a.s., jelikož při nutnosti výměny transformátoru se při poruše stroje 630 kVA vyplatí nasadit výkonově nižší stroj 400 kVA, a tím ušetřit 42 000 Kč. Částka není nijak zanedbatelná, protože v síti se nachází cca 3 000 kusů DTR 630 kVA. [18]

1.5.3 Síť paprskové

Jsou to sítě, které jsou provozovány buďto kabelovým nebo venkovním vedením. Jsou vyvedeny z napájecího uzlu, což může být spínací stanice nebo transformovna, a ty napájí jednotlivé odbočky, nebo se jednotlivé paprsky dále dělí na více dílčích paprsků. Používá se na VN, protože je jeho provoz nejlevnější a nejpřehlednější. Tato topologie má však i své úskalí, a to v provozní spolehlivosti. Tím pádem při výpadku odbočky dojde k přerušení dodávky elektrické energie v celé větvi. Tento typ se používá převážně na venkově, malých městech a v průmyslu pro napětí 110 kV, 35 kV a 22 kV. A také u 400/230 V, kde není nutná vysoká spolehlivost dodávky elektrické energie. Na koncích vedení se může projevovat značné kolísání napětí a přerušení dodávky může trvat několik hodin, dokonce i několik dnů. [19]



²Obrázek 8 – Příklad provozování soustavy VN

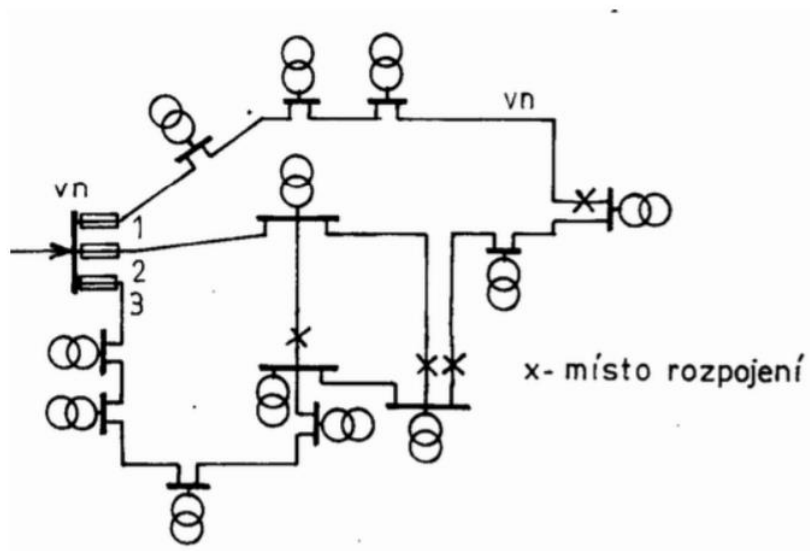
Na Obrázek 8 je vidět reálné provedení sítě, která je vystavěna jako síť okružní, ale je provozována jako síť paprsková, a to z důvodu, že v paprskové síti lze lépe detekovat poruchy na vedení, a také je v tomto případě nižší zkratový výkon. Zokruhování se provádí pouze v případě poruchy nebo při údržbě. Každá barva představuje napájení z jiného napájecího bodu. Tečky zobrazené na rozvodech představují distribuční transformátory z VN/NN.

1.5.4 Síť okružní

Tyto sítě jsou provozovány tak, že konce jsou připojeny na totéž napájecí místo, tím se může každý odběr napájet ze dvou stran, což zlepšuje bezpečnost dodávky elektrické energie při výpadku. Okružní sítě se vyznačují menším kolísáním napětí, a také zde mohou být použity menší průřezy než u paprskových sítí. Ale konfigurace ochran je zde složitější. Tyto sítě jsou také vhodné pro paralelní chod několika elektráren spojených v jejich okruhu, jelikož se zabezpečí dodávka energie mezi elektrárnami, ale i do společné odběrové oblasti. Tento typ

² Materiály poskytnuté společností ČEZ

rozvodu se využívá především k napájení větších měst a větších obcí jak pro nízké, tak i vysoké napětí. [15]



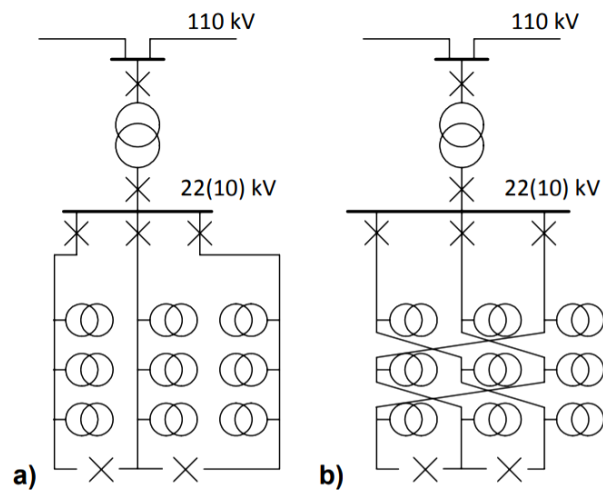
Obrázek 9 – Okružní síť [20]

1.5.5 Síť mřížové

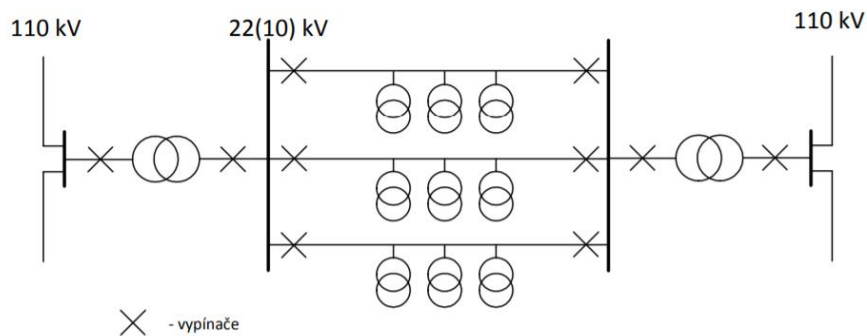
1) Zjednodušená mřížová síť – lze je vytvořit, pokud pracují do společné sítě alespoň dva transformátory VN/NN. Mezi těmito transformátory je spojení hlavními vedeními, takzvanými kmeny sítě, ty jsou obvykle s většími průřezy, jištěné pomocí hlavních výkonových pojistek na vývodech z DTS. Dále je vedení vybaveno slabšími pojistkami, které jsou umístěny na vhodných místech, aby při zkratu došlo k vypnutí co nejbližší k místě poruchy. Distribuční transformovny jsou většinou napájeny jedním vedením, buďto venkovním nebo kabelovým vedením. [21]

2) Klasická mřížová síť – provozuje se tímto způsobem NN vedení a zpravidla ve větších městech s měrnou hustotou 1 MW/km a více, kde se nachází několik transformoven s nejméně dvěma až pěti napáječi VN. Kabelové vedení NN se spojí na křižovatkách ulic do uzlu. Jsou to skříňe s pojistkami zazděné na vhodných místech. Je zde zajištěná vyšší spolehlivost dodávky elektrické energie než v ostatních typech sítí. Pokud dojde k poruše na napáječi VN, teče zkratový proud do místa zkratu jak z místa napájení VN, tak i ze strany sítě NN. Pro tento stav jsou na straně NN každého transformátoru spínače ovládané směrovými relé, která dají signál k vypnutí vadného napáječe v případě toku výkonu z NN do VN. Téměř současně vypne spínač ve stanici VN, takže napáječ zůstane bez napětí, ale zásobování sítě zůstane bez poruchy. [21]

Tyto sítě dělíme podle počtu napájecích transformátorů 110 kV, na které jsou dále připojeny distribuční transformátory VN/NN a to na jednosystémové, dvousystémové nebo vícesystémové. Schéma napájení jednosystémové mřížové sítě s prostřídávanými napáječi je na Obrázek 10 – b). Při poruše jednoho napáječe se tak zatížení rozloží na ostatní napáječe rovnoměrněji. [21]



Obrázek 10 – Jednosystémová mřížová síť
[15]



Obrázek 11 - Dvousystémová mřížová síť
[15]

1.6 Prvky ke změně topologie sítí VN

Změna topologie v DS je realizována spínacími prvky, kterými se manipuluje místně nebo dálkově přes dispečink. Dělíme je na úsečníky a reclosery.

1.6.1 Úsekový odpínač - úsečník

Úsečník se podobá svojí konstrukcí odpojovači, ale na rozdíl od odpojovače je vybaven zhášecím mechanismem. Oblouk je zhášen mezi opalovacími kontakty volně ve vzduchu, přičemž dochází k oddalování kontaktů a následnému uhasnutí oblouku. Na oblouk také působí magnetické pole, které je vhodně tvarované pomocí proudové dráhy, což přispívá k uhasnutí oblouku. Úsečník je používán na venkovních vedeních do 38 kV ke spínání úseků, odboček vedení nebo přípojek k menším transformovněm až do jmenovitého proudu úsečníku. Jsou tři druhy provedení, a to s maloolejovými zhášecími komorami, ale také růžkový nebo pružinový. Liší se hlavně svými vypínacími schopnostmi zobrazenými na Obrázek 12.

| Fla 15/60 | | | | |
|---|------------|------------------|---------|---------|
| jmenovité napětí | U_r | kV | 25 | 38,5 |
| jmenovitý proud | I_r | A ¹⁾ | 400/630 | 400/630 |
| jmenovitý krátkodobý proud | I_k | kA | 20 | 20 |
| jmenovitý dynamický proud | I_p | kA | 50 | 50 |
| jmenovitý zkratový zapínací proud | I_{ma} | kA ²⁾ | 18 | 11 |
| jmenovitý vypínací proud při převážně činné zátěži | I_{load} | A | 630 | 400 |
| jmenovitý vypínací proud obvodu uzavřené smyčky | I_{loop} | A | 400 | 400 |
| jmenovitý vypínací proud nezatíženého transformátoru | I_{nitr} | A | 53 | 10 |
| jmenovitý vypínací proud nezatíženého kabelového vedení | I_{cc} | A | 20 | 20 |
| jmenovitý vypínací proud zemního spojení | I_{eft} | A | 56 | 40 |
| DRIBO Fib | | | | |
| jmenovité napětí | U_r | kV | 25 | 38,5 |
| jmenovitý proud | I_r | A ¹⁾ | 400/630 | 400/630 |
| jmenovitý krátkodobý proud | I_k | kA | 20 | 20 |
| jmenovitý dynamický proud | I_p | kA | 50 | 50 |
| jmenovitý zkratový zapínací proud | I_{ma} | kA ²⁾ | 16 | 3,15 |
| jmenovitý vypínací proud při převážně činné zátěži | I_{load} | A | 31,5 | 18 |
| jmenovitý vypínací proud obvodu uzavřené smyčky | I_{loop} | A | 31,5 | 16 |
| jmenovitý vypínací proud nezatíženého transformátoru | I_{nitr} | A | 4 | 4 |
| jmenovitý vypínací proud nezatíženého kabelového vedení | I_{cc} | A | 16 | 10 |
| jmenovitý vypínací proud zemního spojení | I_{eft} | A | 40 | 15 |
| DRIBO Fic | | | | |
| jmenovité napětí | U_r | kV | 25 | 38,5 |
| jmenovitý proud | I_r | A ¹⁾ | 400/630 | 400/630 |
| jmenovitý krátkodobý proud | I_k | kA | 20 | 20 |
| jmenovitý dynamický proud | I_p | kA | 50 | 50 |
| jmenovitý zkratový zapínací proud | I_{ma} | kA ²⁾ | 10 | 10 |
| jmenovitý vypínací proud při převážně činné zátěži | I_{load} | A | 35 | 18 |
| jmenovitý vypínací proud obvodu uzavřené smyčky | I_{loop} | A | 20 | 18 |
| jmenovitý vypínací proud nezatíženého transformátoru | I_{nitr} | A | 8 | 4 |
| jmenovitý vypínací proud nezatíženého kabelu | I_{cc} | A | 16 | 15 |
| jmenovitý vypínací proud nezatíženého vedení | I_{ic} | A | 16 | 15 |
| jmenovitý vypínací proud zemního spojení | I_{eft} | A | 50 | 36 |
| jmenovitý vypínací proud nezatíženého kabelového a venkovního vedení v podmínkách zemního spojení | I_{eft2} | A | 21 | 18 |

Obrázek 12 - Technické parametry úsekových odpínačů Dribo [23]

Na Obrázek 12 je vidět, že nejlepší vypínací schopnost má úsečník s maloolejovými zhášecími komorami Fla 15/60, který je schopen vypnout i značný proud. Svými vypínacími schopnostmi jsou na tom dost podobně úsečníky typu Flb (růžkový) a Flc (pružinový). Důvod, proč se udává vypínací schopnost odpínačů je ten, abychom při zokruhování vedení nepřesáhli jejich maximální vypínací schopnost. Když dojde k nárůstu proudu ve smyčce, za určitých podmínek může dojít k přesáhnutí vypínací schopnosti vypínače, což potvrzuje i zahraniční článek. Pak nastává veliký problém při vypínání. Ke snížení vypínací schopnosti také přispívá i to, že když klesá účinnost, klesá i vypínací schopnost prvků. [23] [24]

1.6.2 Recloser

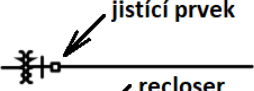
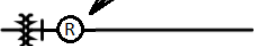
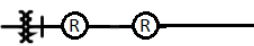
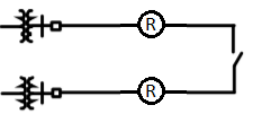
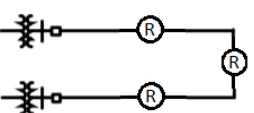
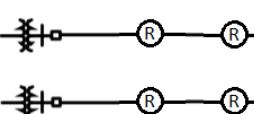
Je to dálkově ovládaný vypínač umístěný na venkovním vedení. Je vybaven měřicími prvky a řídicí jednotkou. Svým vybavením plní funkci ochrany vývodu. V případě poruchy dojde k automatickému přerušení v daném místě, aniž by musela zapůsobit ochrana v rozvodně. Vzhledem k tomu, že je možné umístit recloser kamkoliv na vedení, pokryje tak i poruchy, které by ochrana vývodu z důvodu velké vzdálenosti rozvodny obtížně zaznamenala. Hlavní výhodou je však autonomní provoz, který současně s ostatními prvky zabezpečí automatizaci části vedení distribuční sítě. Zpravidla se nasazují na dlouhá vedení, kde se požaduje rozdělení na více částí. Při zkratu dojde k automatickému vydělení místa poruchy a obnovení napájení do nepostižených oblastí bez dělení vedení a zapínání do poruchy. [25] [26]

Oproti dálkově řízeným úsečníkům mají tyto výhody: automatické vypínání v minimálních časech a funkce OZ, nezávislé funkce na dispečerském řízení, možnost automatického vydělení místa poruchy a obnovení napájení do nepostižených částí sítě bez dělení sítě a zapínání do poruchy, možnost nové filozofie provozování (zapojení) venkovních distribučních sítí, vypínání a zapínání zkratových proudů, vysoký počet cyklů ZAP/VYP až 30 000, vysokou spolehlivost. Také se instalují z důvodu, že plní funkci spojovacího členu pro paralelní provoz. [25] [26]

Recloser ve speciálním provedení (recloser s vakuovým vypínačem) vydrží až 150 000 sepnutí. Dokáže vypínat zkratové proudy až 20 kA a jmenovité proudy do 630 A. [25] [26]

Z pohledu selektivity se reclosery instalují v součinnosti s dálkově ovládanými odpínači. Ty jsou opatřeny elektronickým systémem pro automatické vypnutí odpínače při neúspěšném OZ nadřazeného vypínače (recloseru). [25] [26]

Recloser měří tyto hodnoty: fázové proudy, proud I_0 , fázová napětí, napětí U_0 , souslednou složku I_1 , U_1 a jejich fázový posun. [25] [26]

| | SAIDI h/r | %* | |
|---|---|-----|------|
|  | Příklad 1 - Bez opětovného zapnutí | 8.8 | ---- |
|  | Příklad 2 - Recloser u rozvodny | 3.3 | 63% |
|  | Příklad 3 - Řada recloserů | 2.6 | 70% |
|  | Příklad 4 - Smyčka s manuálním vypínačem | 2.3 | 74% |
|  | Příklad 5 - Smyčka s automatickým obnovením (3xR) | 2.1 | 76% |
|  | Příklad 6 - Smyčka s automatickým obnovením (5xR) | 1.7 | 81% |

*% Zlepšení v porovnání s příkladem 1

Obrázek 13 - Příklady zapojení recloseru [27]

Na Obrázek 13 je znázorněno možné zapojení recloseru, čímž se zabývala firma ABB, která zkoumala vliv zapojení z pohledu spolehlivosti. Je vidět, že použitím recloseru se značně sníží ukazatel SAIDI. Měření bylo prováděno v různých státech v USA. [27]

1.7 Výkonové poměry z hlediska výroby a spotřeby

Výroba elektrické energie brutto byla za rok 2016 83 302 GWh. Z toho OZE bylo necelých 13%, na Obrázek 14 je vidět, že od roku 2009 se dramaticky zvedl instalovaný výkon, a tím výroba z fotovoltaiky, jelikož stát začal přispívat na výrobu z FVE (zelená úspora). S tím souviselo to, že podle Evropské unie musí být podíl z OZE 13 % do roku 2020. Před připojením FVE musí být vypracována studie připojitelnosti, která řeší hlavně změny napětí vyvolané trvalým provozem výroby, změny napětí při spínání, útlum HDO, rychlé změny napětí (flickr), příspěvek vyšších harmonických proudů a další. [28] [29]

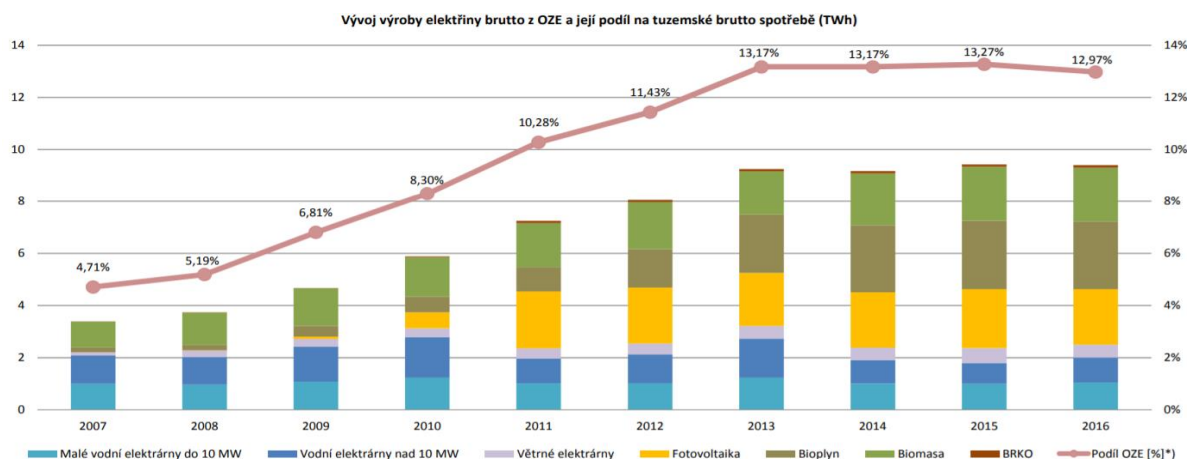
Spotřebu elektrické energie dělíme podle napěťové hladiny, a to z VVN, kde byla spotřeba velkoodběratelů 7 616,4 GWh. A další je spotřeba na hladině VN, která se dále dělí na velkoodběratele, kde byla spotřeba 23 607,4 GWh, dále maloodběratele (podnikatelé) se spotřebou 8 027,3 GWh a maloodběratele (domácnosti) se spotřebou 14 819,1 GWh. Veškerá spotřeba je uvedena za kalendářní rok 2016 podle ERÚ. [4]

| | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|--------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Celkem OZE [MWh] | 3 393 509 | 3 738 459 | 4 668 514 | 5 886 915 | 7 247 504 | 8 055 026 | 9 243 382 | 9 169 709 | 9 422 950 | 9 395 450 |
| Malé vodní elektrárny do 10 MW | 1 001 845 | 966 884 | 1 082 683 | 1 238 819 | 1 017 878 | 1 026 254 | 1 236 978 | 1 011 674 | 1 001 797 | 1 053 100 |
| Vodní elektrárny nad 10 MW | 1 077 493 | 1 057 451 | 1 346 937 | 1 550 655 | 945 276 | 1 102 912 | 1 497 762 | 897 549 | 793 010 | 947 388 |
| Větrné elektrárny | 125 098 | 244 661 | 288 067 | 335 493 | 397 003 | 415 817 | 480 519 | 476 544 | 572 612 | 496 957 |
| Fotovoltaika | 1 754 | 12 937 | 88 807 | 615 702 | 2 182 018 | 2 148 624 | 2 032 654 | 2 122 869 | 2 263 846 | 2 131 455 |
| Bioplyn | 182 699 | 213 632 | 414 235 | 598 755 | 932 576 | 1 472 142 | 2 241 300 | 2 566 699 | 2 614 188 | 2 600 546 |
| Biomasa | 993 360 | 1 231 210 | 1 436 848 | 1 511 911 | 1 682 563 | 1 802 591 | 1 670 327 | 2 007 039 | 2 090 855 | 2 067 443 |
| BRKO | 11 260 | 11 684 | 10 937 | 35 580 | 90 190 | 86 686 | 83 842 | 87 335 | 86 642 | 98 561 |

zdroj dat: předchozí roční zprávy, výkaz ERÚ-1, OTE, a.s. (od roku 2013)

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Tuzemská brutto spotřeba [MWh] | 72 045 200 | 72 049 267 | 68 600 000 | 70 961 700 | 70 516 541 | 70 453 278 | 70 177 356 | 69 622 096 | 71 014 254 | 72 418 279 |
| Podíl OZE [%]* | 4,71% | 5,19% | 6,81% | 8,30% | 10,28% | 11,43% | 13,17% | 13,17% | 13,27% | 12,97% |

Obrázek 14 - Vývoj výroby elektřiny brutto z OZE [4]



Obrázek 15 - Graf vývoje výroby elektřiny brutto z OZE [4]

1.8 Ukazatelé spolehlivosti – SAIDI, SAIFI

Kvalita spolehlivosti dodávky elektrické energie je měřena prostřednictvím kombinace ukazatelů SAIDI a SAIFI. Distributor se z hlediska ukazatelů nepřetržitosti dodávky musí držet mezi stanovených ERÚ pro dané regulační období. Při dosažení lepších ukazatelů je distributor odměněn, v opačném případě penalizován. Tím pádem jsou distributoři nuceni předcházet výpadkům, například tím, že implementují inteligentní prvky na vedení (smart grids), což jsou dálkově ovládané prvky, které komunikují s dispečerským řízením, například reclosery. Dalším způsobem, jak snižují výpadky je opětovné vypnutí a zapnutí při poruše (OZ). Jiným opatřením

může být přechod provozu sítě s uzemněným uzlem přes odporník na síť kompenzovanou, tj. na síť s uzemněným uzlem přes tlumivku. Také například zvyšují vzdálenost vodičů a okolních větví, tím je menší pravděpodobnost, že při silném větru dojde k pádu větve na vodiče. A v neposlední řadě provoz propojených vývodů vysokého napětí, což má řadu výhod, ale také nevýhod, podrobněji viz kapitola 2. Kromě geografických podmínek má zásadní vliv také podíl kabelových vedení vůči nadzemním, dále struktura zákazníků, způsob zapojení sítě a hustota odběru. [30]

SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) – Tento ukazatel udává, jak často je průměrný zákazník bez dodávky elektrické energie za jeden rok a patří mezi základní ukazatele spolehlivosti. Je definován vztahem. [30]

$$SAIFI = \frac{\sum \text{celkový počet zákazníků postižených přerušením}}{\text{celkový počet připojených zákazníků}} = \frac{\sum N_i}{N_T} \quad (1)$$

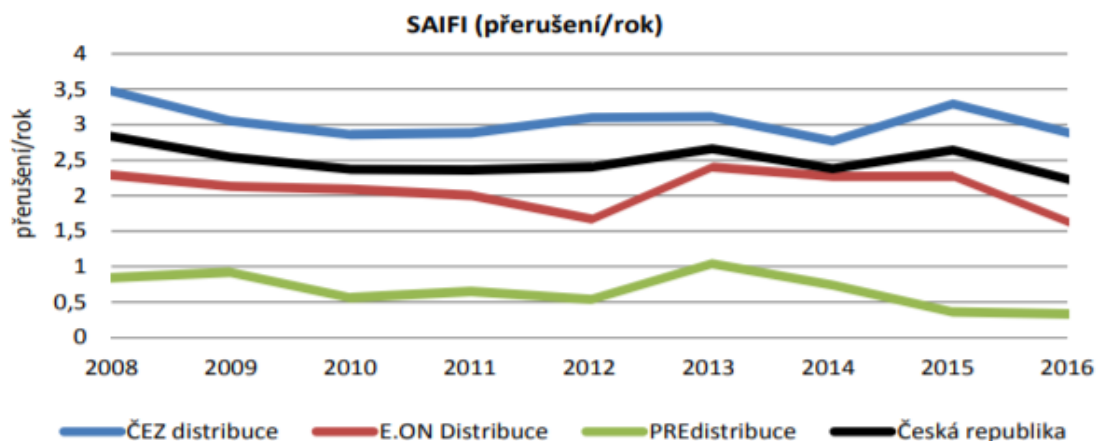
SAIDI (System Average Interruption Duration Index) – Tento ukazatel udává celkovou dobu, kterou je průměrný zákazník bez dodávky elektrické energie za jeden rok a je definován vztahem. [30]

$$SAIDI = \frac{\sum \text{doba trvání dlouhodobého přerušení u zákazníka}}{\text{celkový počet připojených zákazníků}} = \frac{\sum r_i N_i}{N_T} \quad (2)$$

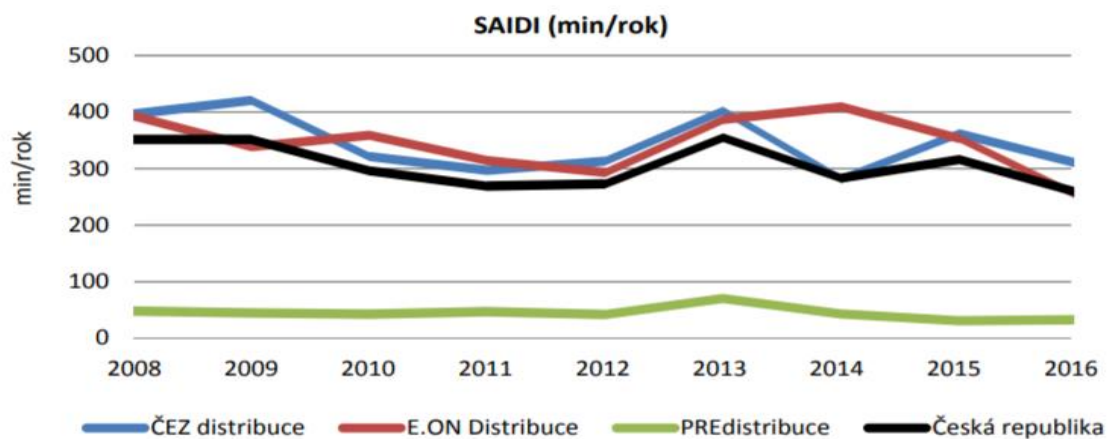
r_i – je doba trvání dlouhodobého přerušení (způsobeného danou událostí) [30]

| Ukazatele nepřetržitosti distribuce v roce 2016 | SAIFI [přerušení/rok] | SAIDI [min/rok] | CAIDI [min] |
|---|--------------------------|--------------------|----------------|
| Česká republika | 2,21 | 258,29 | 116,96 |
| ČEZ Distribuce | 2,87 | 309,64 | 107,86 |
| E.ON Distribuce | 1,6 | 252,14 | 157,56 |
| PREdistribuce | 0,33 | 32,52 | 99,34 |

Obrázek 16 - Ukazatele nepřetržitosti distribuce v roce 2016 [4]

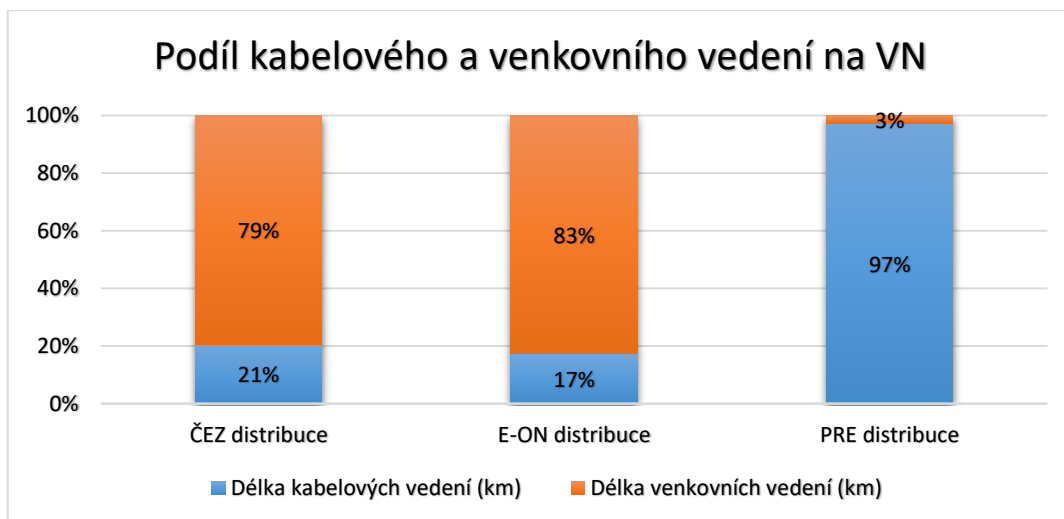


Obrázek 17 - Ukazatel SAIFI [4]



Obrázek 18 - Ukazatel SAIDI [4]

Označením Česká republika v Obrázek 18 je myšlen průměr SAIDI, SAIFI všech tří distributorů, kteří působí na území ČR.



Obrázek 19 - Podíl kabelového a venkovního vedení na VN (2016) [4]

Z grafů je patrné, že z hlediska ukazatelů SAIDI, SAIFI je na tom nejlépe PRE distribuce, její téměř celé distribuční území je napájeno kabelovou sítí, která je oproti venkovnímu vedení méně náchylná k poruchám. Z toho důvodu je v současné době i přes vysokou nákladnost patrný trend nahrazování venkovních vedení kabelovými.

2 Propojování vývodů VN

Propojování vývodů VN se realizuje zejména z důvodu pozitivního ovlivnění ukazatelů spolehlivosti dodávky elektrické energie. Obvod je napájen minimálně ze dvou stran, takže při výpadku jednoho zdroje nenastane odpojení od napájení. Tímto zapojením dojde ke zlepšení ukazatelů SAIDI a SAIFI o nemalá procenta. Další výhodou je, že se uzly v obvodu jeví jako tvrdý zdroj napětí. Nevýhodou je to, že nám ve smyčce narostou zkratové proudy a výkony, proto na to musí být dimenzované kabely a všechny přístroje, které jsou ve smyčce.

Paralelní provoz umožní, že v případě poruchy může dojít k odpojení nejmenšího počtu odběrných míst. To zabezpečí napájení ze dvou stran a automatická funkce recloseru a jeho ochran, které umožňují vymanipulování jen nezbytně nutného počtu odběrných míst. To však klade vyšší nároky na nastavení ochran. Při přechodu do paralelního provozu dochází k nárůstu zkratového výkonu na koncích vedení. V mnoha případech může řešit problémy změn napětí způsobené obnovitelnými zdroji či významným kolísáním zátěže. V případě paprskového provozu sítě by to znamenalo vypnutí celého vývodu VN linky postiženého poruchou při obecně jednoduchém nastavení selektivity ochran. [25]

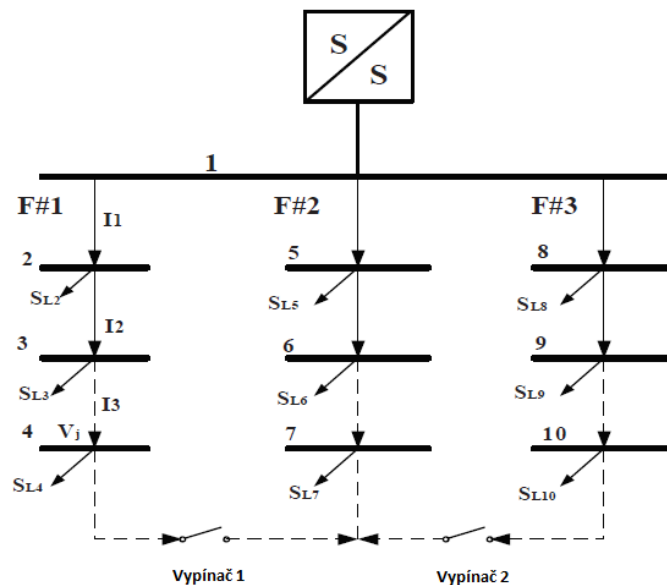
2.1 Propojování vývodů VN v zahraničí

Problematikou spojování vývodů VN se zabýval článek [31]. Kde se zkoumala jednotlivá zapojení a jejich vliv na síť, a to z pohledu výhod a nevýhod propojování vývodů. Pro případ, kdy jsou vývody napájeny ze stejného transformátoru, došli k závěru, že dojde ke zlepšení SAIDI a SAIFI, a také se dramaticky sníží nároky na údržbu. Spojení vývodů, konkrétně tří smyček napájených ze stejného transformátoru, bylo provedeno v hlavním městě Taipei. Toto spojení potvrdilo studii ve všech bodech. Konkrétně bylo doporučeno společnosti Taipower (státní společnost, která poskytuje dodávku elektřiny ve státu Taiwan) i zapojení vývodů, kde každý vývod je napájen z jiného transformátoru, ale ze stejné rozvodné stanice. To vše je nezbytné pro nové výstavby vědecky založených průmyslových parků a pro některé konkrétní oblasti, kde je požadována vyšší spolehlivost. Typ zapojení, kdy jsou vývody zapojeny z jiné rozvodné stanice, zatím nebyl vážně zvažován, a to z důvodu, že je potřeba brát v úvahu mnoho faktorů a bylo by to velice nákladné. [31]

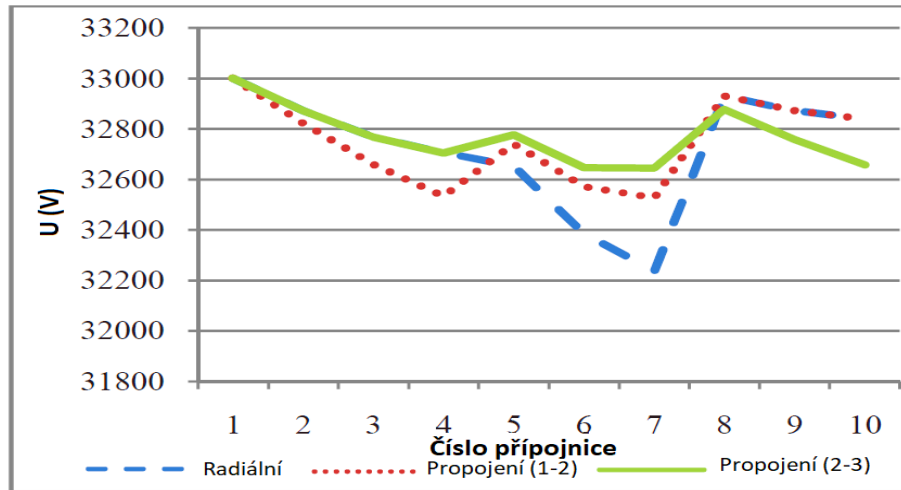
V dalším článku ohledně spojování vývodů VN bylo zaměřeno konkrétně na automatizaci vývodů VN, kde byla provedena analýza vlivu kritického fázového úhlu na napětí v reálném čase a také vyrovnávacího proudu mezi rozvodnami. Bylo zjištěno, že kritický fázový úhel mezi

paralelními vývody je závislý na impedanci vývodů a na jejich zatížení. Při praktickém příkladu propojení vývodů z různých rozveden se ukázalo, že úhel napětí může být výrazně odlišný. V některých případech může dojít k radikálnímu zvýšení kritického rozdílového úhlu při změně odbočky na transformátoru. [32]

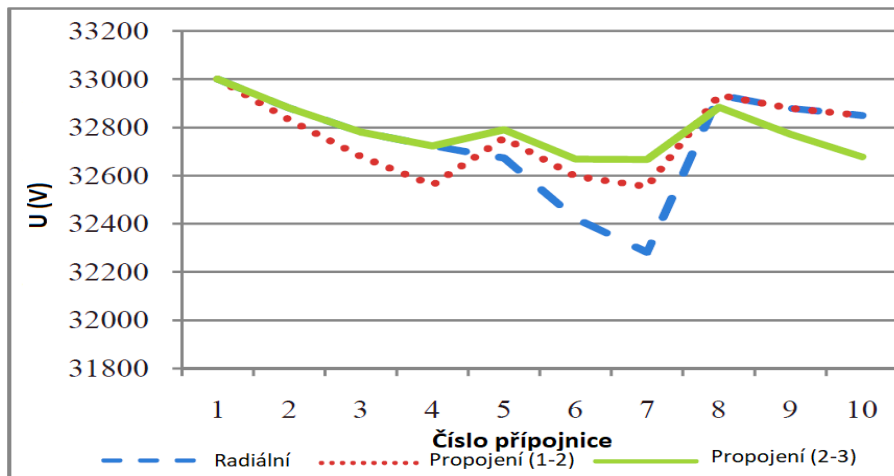
Zpracovaný článek [33] se zabýval výhodami propojování vývodů, byl zaměřen na vliv ztrát a napěťovém profilu podél vývodů. Byl proveden analytický výpočet pro rozvodnu 132/33 kV, se zatížením 30 MVA, kde rozvodna má tři vývody, což je vidět na Obrázek 20. Vývod F#1 zásobuje příměstskou oblast, vývod F#2 napájí menší průmyslovou oblast a poslední vývod F#3 napájí městskou oblast. Dále byla simulace rozdělena do tří možností, a to: za a) rozvodna pracuje s účinnkem rovným 0,707, b) rozvodna pracuje s účinnkem rovným 0,85, c) rozvodna pracuje s účinnkem rovným 0,95. Všechny uvedené případy jsou simulovány ve třech různých stavech. Stav 1: všechny tři vývody pracují radiálně, stav 2: spojení vývodů F#1 a F#2, vývod F#3 je provozován radiálně, stav 3: spojení vývodů F#2 a F#3, vývod F#1 je provozován radiálně. [33]



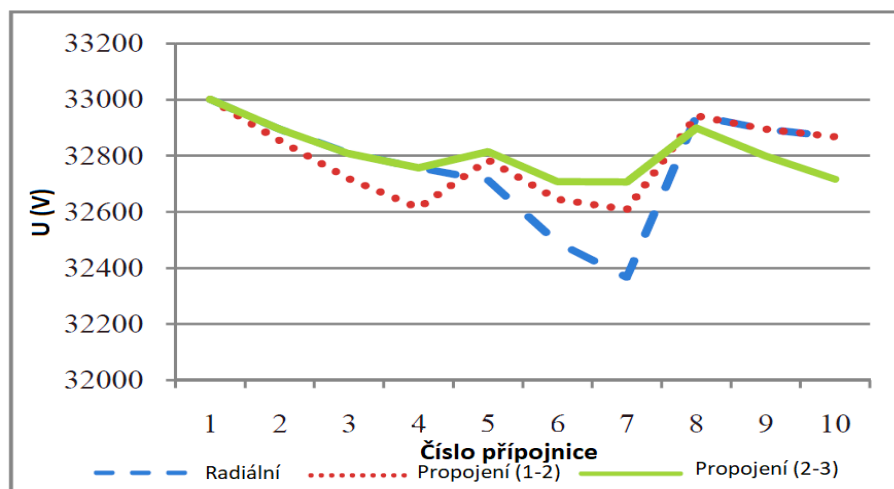
Obrázek 20 - Konfigurace rozvodny pro výpočet [33]



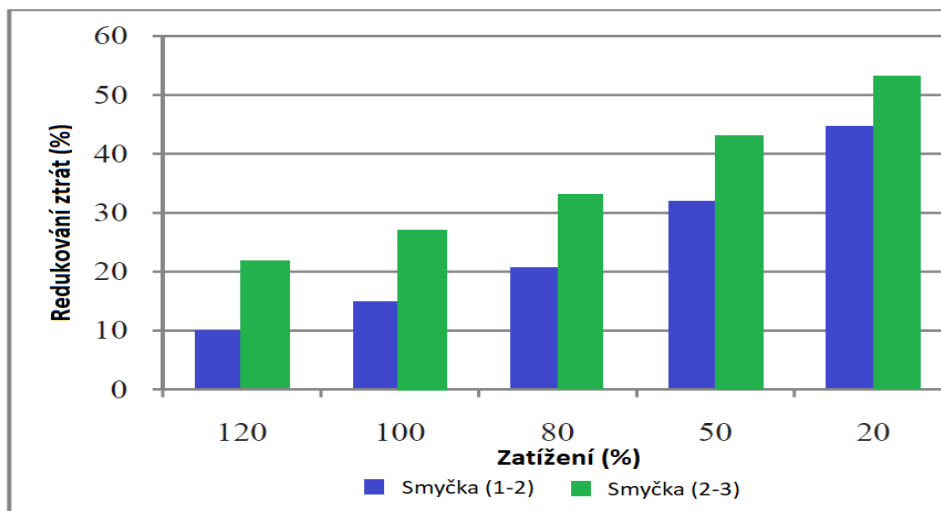
Obrázek 21 - Napěťový profil podél vývodů pro účinník 0,707 [33]



Obrázek 22 - Napěťový profil podél vývodů pro účinník 0,85 [33]



Obrázek 23 - Napěťový profil podél vývodů pro účinník 0,95 [33]



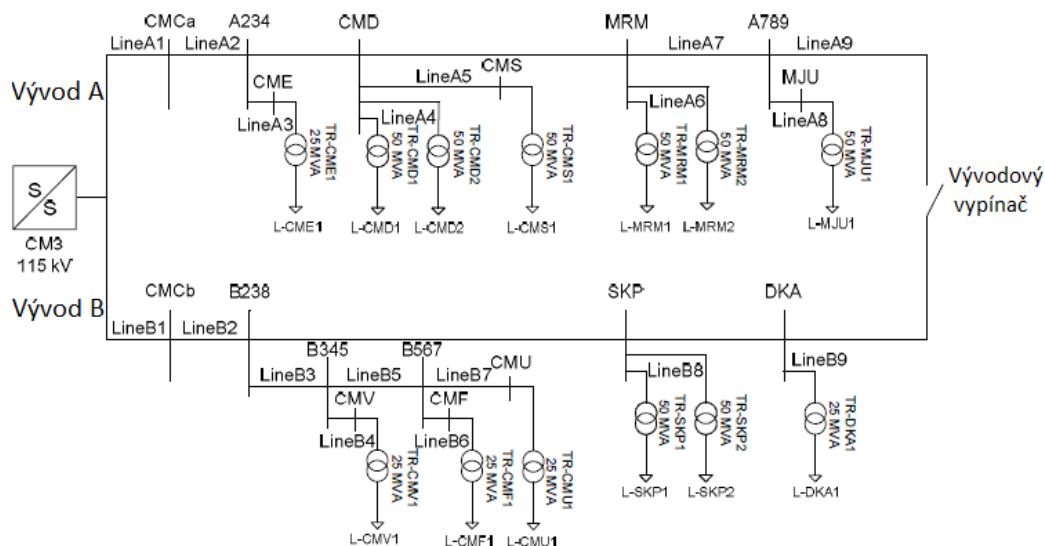
Obrázek 24 - Závislost redukování ztrát na zatížení vývodů [33]

Autoři došli k závěru, že nastalo skutečné zlepšení napěťových poměrů (Obrázek 21, Obrázek 22, Obrázek 23) a také k nezanedbatelnému snížení ztrát (Obrázek 24), a to u všech tří uvažovaných stavů (účinník roven 0,707; 0,85; 0,95), a to jak při spojení vývodu 1-2, tak i u vývodů 2-3. Graf o redukování ztrát byl vložen pouze pro případ, kdy byl účinník roven 0,95, ve zbylých případech se redukování ztráty lišily minimálně. Simulace potvrdila předpoklad, že přechod z radiálního provozování sítě do okružního přináší větší spolehlivost a také lepší tvrdost sítě. Ale při zvažování přechodu radiální sítě na okružní se musí počítat se značnými náklady na rekonstrukci sítě a doplnění patřičných prvků k automatickému provozu sítě. [33]

Další článek, který se zabýval propojením vývodů v již existujícím distribučním systému. Simulaci, která byla prováděna v programu DlgSILENET PowerFactory, se získaly hodnoty výkonu v distribučním systému, a to včetně redukování ztrát, zatížení vývodů, napěťovém profilu, a také ve spolehlivosti systému. Byla vybrána radiálně provozovaná síť 115 kV se dvěma primárními vývody v provincii Chiang Mai v Thajsku. Dále byla zkoumána simulace při změně zatížení vývodů transformátoru, při radiálním provozování sítě a okružním provozování sítě. A to při zatížení vývodů viz Tabulka 4. [34]

Tabulka 4 - Uvažované druhy zatížení transformátoru [34]

| Stav | Zatížení transformátoru v % | |
|--------|-----------------------------|---------|
| | Vývod A | Vývod B |
| Stav 1 | 20 | 20 |
| Stav 2 | 20 | 80 |
| Stav 3 | 80 | 20 |
| Stav 4 | 80 | 80 |



Obrázek 25 - Schéma rozvodné sítě 115 kV v Chiang Mai [34]

Tabulka 5 - Ztráty při různém uspořádání a při jiném poměru zatížení [34]

| Uspořádání vývodů | Činné ztráty (kW) | | | |
|--------------------------------|---|--------|---------|--------|
| | Zatížení transformátoru ve vývodu A a B (%) | | | |
| | 20:20 | 20:80 | 80:20 | 80:80 |
| Vývod A: Radiálně | 408 | 408 | 4,766 | 4,766 |
| Vývod B: Radiálně | 260 | 2,671 | 260 | 2,671 |
| Celkem | 668 | 3,079 | 5,026 | 7,437 |
| Vývod A: Smyčka | 377 | 827 | 3,116 | 3,977 |
| Vývod B: Smyčka | 287 | 1,946 | 840 | 3,287 |
| Celkem | 664 | 2,773 | 3,956 | 7,264 |
| Redukování ztrát výkonu | 0.60 % | 9.94 % | 21.29 % | 2.33 % |

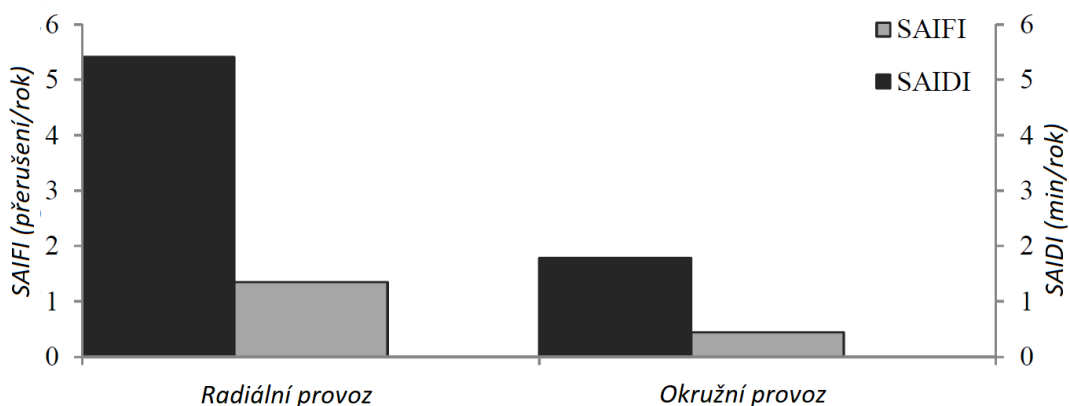
Z tabulky je vidět, že při propojení vývodů došlo k omezení ztrát hlavně při zatížení 80:20% a to o 21%. Tím se jeví velice efektivní provozovat uzavřenou smyčku, pokud by se zatížení vývodů blížilo těmto hodnotám. [34]

Dále byl simulován napěťový profil podél obou vývodů, kde se potvrdil předpoklad, že dojde k zlepšení napěťových poměrů, a to se nejvíce projevilo při zatížení 80:20 % a 20:80 %. Z toho plyne, že čím větší je rozdíl zatížení vývodů, tím větší je zlepšení napěťového profilu sítě při provozu ve smyčce. Zlepšení napěťového profilu bylo o více než 30 % viz Tabulka 6. Potvrdilo se, že při přechodu z radiálního do okružního provozu získáme tvrdší síť. [34]

Tabulka 6 - Snížení odchyšky napětí [34]

| Uspořádání vývodů | Odchyška napětí | | | |
|--------------------------------|---|---------|---------|--------|
| | Zatížení transformátoru ve vývodu A a B (%) | | | |
| | 20:20 | 20:80 | 80:20 | 80:80 |
| Vývod A: Radiálně | 0.29 | 0.29 | 0.21 | 0.21 |
| Vývod B: Radiálně | 0.25 | 0.15 | 0.25 | 0.15 |
| Celkem | 0.54 | 0.44 | 0.46 | 0.36 |
| Vývod A: Smyčka | 0.29 | 0.23 | 0.17 | 0.19 |
| Vývod B: Smyčka | 0.24 | 0.05 | 0.15 | 0.15 |
| Celkem | 0.53 | 0.28 | 0.32 | 0.34 |
| Snížení odchyšky napětí | 1.85 % | 36.36 % | 30.44 % | 5.56 % |

Poslední článek [34] rovněž potvrdil, v případě, kdy došlo k okružnímu provozu sítě, se spolehlivostní ukazatelé SAIDI a SAIFI snížily o více než polovinu, což potvrzuje všechny dosavadní studie. [34]



Obrázek 26 - Zlepšení spolehlivosti při přechodu z radiální sítě do okružní [34]

2.1 Výpočet vyrovnávacích proudů

Při výpočtu vyrovnávacích proudů je nutné znát napětí v napájecích a celkovou impedanci soustavy. Vyrovnávací proudy jsou závislé na fázovém rozdílu napájecích napětí. Pokud fázový posun roste, roste tím i rozdílové napětí a tedy i rozdílový proud. Tento rozdílový proud je nutné znát z pohledu vypínacích schopností ovládacích prvků sítě. [35]

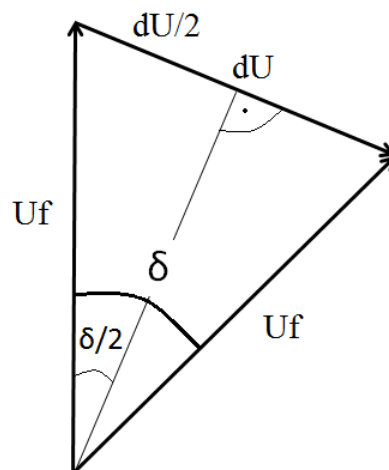
Z měření, které prováděla společnost E-ON distribuce na napěťové hladině 22 kV, kde byl zkoumán mezní úhel napětí, vyplývá, že mezní úhel napětí pro různé odpínače a různá místa spínání se pohybuje v rozmezí 1,33 – 5,33°. V závěru bylo rovněž konstatováno, že není

problém sepnout dvě rozdílně napájené oblasti sítí 22 kV jakýmkoli spínacím prvkem. Při nízkých rozdílech natočení napětí do $1,33^\circ$ je možné v případě rozvoden 22 kV vzdálených více jak 40 km provést rozepnutí jakýmkoli prvkem. Při vyšším rozdílu napětí, kde by šlo o vzdálenost rozvoden do 40 km, je nutné brát v úvahu typ odpínače a impedance sítě. Obecně se může říci, že vyrovnávací proud v případě rozvoden vzdálených 40 km a více lze bez problému vypínat odpínačem Fla. Pokud není možno z hlediska vyrovnávacího proudu a vypínací schopnosti úsečníku rozpojit vývody 22 kV, je nutné provést rozpojení na nejbližším prvku s dostatečnou vypínací schopností a poté tzv. přepojit na tmu s vypnutím pouze části sítě 22 kV, a nikoliv celého vývodu 22kV. [35]

Při výpočtu, kde se uvažuje shodná velikost fázových napětí, by výpočet vypadal takto: Kde dU je velikost rozdílu napětí, U_f je velikost fázového napětí a δ je úhel rozdílu napětí. [35]

$$\sin \frac{\delta}{2} = \frac{dU}{2U_f} \quad (3)$$

$$dU = 2 \cdot U_f \cdot \sin \frac{\delta}{2} \quad (4)$$

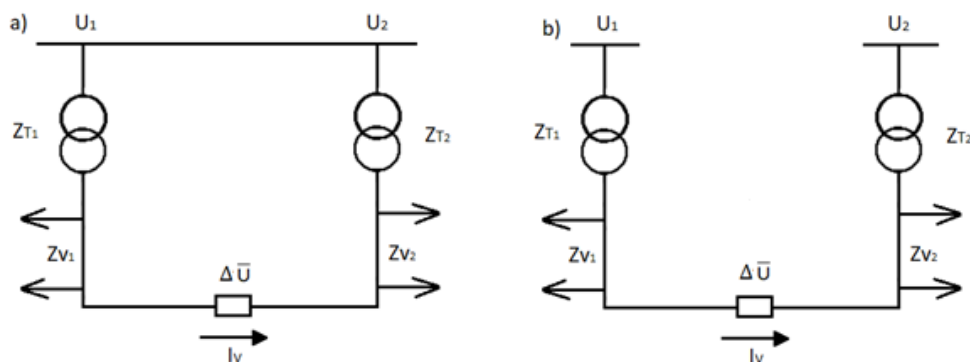


Obrázek 27 - Vznik rozdílu napětí v důsledku natočení fáze [35]

Ve výpočtu reálného rozdílu napětí je nutné brát v úvahu různá fázová napětí s chybou rovnou 1 % U_n . Chyba 1% plyne z velikosti odbočky transformátoru 110/23 kV, která je 2 %. Z této skutečnosti a také z přesnosti měničů napětí (1%) je zřejmé, že není možné srovnat dvě napětí s přesností vyšší než 1%. [35]

Pro výpočet rozdílu napětí při různé velikosti fázových napětí je nutné použít práci s vektory. Kde $\overline{\Delta U}$ je rozdíl vektoru napětí.

$$\overline{\Delta U} = \overline{U}_{f1} - \overline{U}_{f2} \quad (5)$$

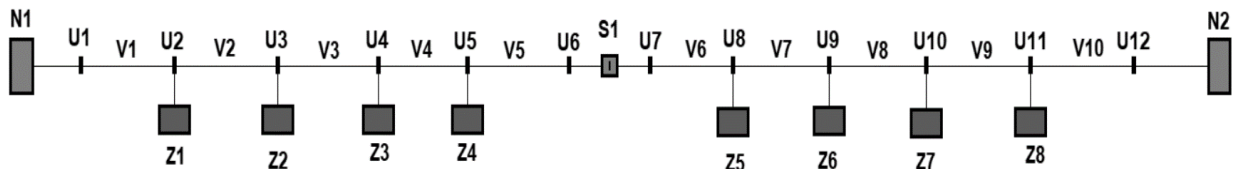


Obrázek 28 – Náhradní schéma pro výpočet vyrovnávacích proudů

$$I_v = \frac{\overline{U}}{z} = \frac{\Delta \overline{U}}{(z_{T1} + z_{v1} + z_{T2} + z_{v2})} = \frac{\overline{U}_1 - \overline{U}_2}{(z_{T1} + z_{v1} + z_{T2} + z_{v2})} \quad (6)$$

3 Výpočet na modelovém obvodu

Pro praktický výpočet bylo zadáno schéma zapojení zobrazené na Obrázek 29. A to nejprve pro radiálně napájený obvod a poté obvod napájený ze dvou stran. V prvním kroku byl proveden analytický výpočet a v druhém kroku byl proveden výpočet v simulačním programu E-vlivy. Zadané hodnoty jsou zobrazeny jako Tabulka 7.



Obrázek 29 - Schéma zapojení pro praktický výpočet

Tabulka 7 - Zadané hodnoty pro analytický výpočet

| | |
|-----------------------|-------|
| S_k'' (MVA) | 40 |
| R/X (-) | 0,52 |
| U_0 (kV) | 23 |
| U_n (kV) | 22 |
| R_k (Ω /km) | 0,259 |
| X_k (Ω /km) | 0,368 |
| l_k (km) | 5 |
| P1-P4 (kW) | 375 |
| P5-P8 (kW) | 200 |
| $\cos\varphi$ (-) | 0,95 |

3.1 Analytický výpočet pro radiálně napájený obvod

Pro analytický výpočet jsou zadány tyto parametry viz Tabulka 7. Oba zdroje mají stejné parametry a také použité vodiče jsou stejné v celém obvodu. Uvedené výpočty platí jak pro první obvod napájený ze zdroje N1, tak i pro obvod napájený ze zdroje N2.

Nejprve se spočítala reaktance sítě (7) ze zdrojového napětí, konstanty reprezentující navýšení zdrojového napětí a zkratového výkonu.

$$X_s = \frac{c * U_n^2}{S_k''} = \frac{1,1 * 22000^2}{40000000} = 13,31 \Omega \quad (7)$$

Dále se vypočítala reaktance sítě ze zadaného poměru, když $R_s/X_s = 0,52$. Z toho se vyjádřila reálná složka impedance (8), z čehož se dostal vztah:

$$R_s = X_s * 0,52 = 13,315 * 0,520 = 6,921 \Omega \quad (8)$$

Tím se vypočítalo z Pythagorovy věty velikost impedance sítě.

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = \sqrt{6,921^2 + 13,315^2} = 15,000 \Omega \quad (9)$$

Následoval výpočet odporu (10) a reaktance (11) vedení v jednotlivých bodech, které jsou od sebe vzdáleny pět kilometrů.

$$R_1 = R_k * l_k = 0,259 * 5 = 1,295 \Omega \quad (10)$$

$$X_1 = X_k * l_k = 0,368 * 5 = 1,840 \Omega \quad (11)$$

Analogicky se postupovalo při výpočtu zbylých odporů a reaktancí vedení, které jsou totožné.

Dále se vypočítal odpor (12) a reaktance (13) od zdroje.

$$R_{S1} = R_s + R_1 = 6,921 + 1,295 = 8,216 \Omega \quad (12)$$

$$X_{S1} = X_s + X_1 = 13,310 + 1,840 = 15,150 \Omega \quad (13)$$

Z vypočítaných parametrů vedení (12) a (13)(14) se dopočítala velikost celkové impedance (14).

$$Z_{S1} = \sqrt{R_{S1}^2 + X_{S1}^2} = \sqrt{8,216^2 + 15,15^2} = 17,235 \Omega \quad (14)$$

Pak se vypočítal proud zátěží ze zadaného činného výkonu (P_z).

$$I_z = \frac{P_z}{\sqrt{3} * U_n * \cos\varphi} = \frac{375000}{\sqrt{3} * 22000 * 0,95} = 10,359 \text{ A} \quad (15)$$

Vypočítal se odebíraný činný výkon (16), který je součtem jednotlivých činných výkonů v zátěži (P_z). V tomto případě, kde jsou stejné výkony, se mohl výpočet provést tímto způsobem:

$$P_{V1} = P_z * 4 = 375000 * 4 = 1500000 \text{ W} \quad (16)$$

Dále se vypočítal odebíraný jalový výkon (17), který se vypočítal z trojúhelníku výkonů.

$$\begin{aligned} Q_{V1} &= \text{tg}(\arccos(\cos\varphi)) * P_{V1} = \text{tg}(\arccos(0,95)) * 15 * 10^5 \\ &= 493026 \text{ VAR} \end{aligned} \quad (17)$$

Potom se vypočítaly proudy v jednotlivých větvích, které se rozdělily na činnou (18) a jalovou (19) složku.

$$I_{\check{c}V1} = \frac{P_{V1}}{\sqrt{3} * U_n} = \frac{1500000}{\sqrt{3} * 22000} = 39,365 \text{ A} \quad (18)$$

$$I_{jV1} = \frac{Q_A}{\sqrt{3} * U_n} = \frac{493026}{\sqrt{3} * 22000} = 12,939 \text{ A} \quad (19)$$

Z činné (18) a jalové složky (19) proudu se vypočítala velikost proudu.

$$I_{V1} = \sqrt{I_{\check{c}V1}^2 + I_{jV1}^2} = \sqrt{39,365^2 + 12,939^2} = 41,437 \text{ A} \quad (20)$$

Fázový úbytek napětí je dán vztahem:

$$\begin{aligned} \Delta U_{f1} &= R_S * I_{\check{c}V1} + X_S * I_{jV1} = 6,921 * 39,365 + 14,545 * 12,939 \\ &= 444,664 \text{ V} \end{aligned} \quad (21)$$

Z fázového úbytku (21) se vypočítal sdružený úbytek.

$$\Delta U_1 = \Delta U_{f1} * \sqrt{3} = 444,664 * \sqrt{3} = 770,181 \text{ V} \quad (22)$$

Ze sdruženého úbytku (22) se vypočítalo napětí v jednotlivých bodech.

$$U_1 = U_o - \Delta U_1 = 23000 - 770,181 = 22229,819 \text{ V} \quad (23)$$

Analogicky pro další napětí v bodech.

Dále se vypočítaly zkratové proudy (24) v jednotlivých bodech. Z toho se dopočítaly zkratové výkony (25) v jednotlivých bodech.

$$I_{k''1} = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * Z_{S1}} = \frac{1,1 * 22000}{\sqrt{3} * 15} = 931,458 \text{ A} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} S_{k''1} &= \sqrt{3} * U_n * I_{k''} = \sqrt{3} * 22000 * 931,458 \\ &= 35,493 * 10^6 \text{ VA} \end{aligned} \quad (25)$$

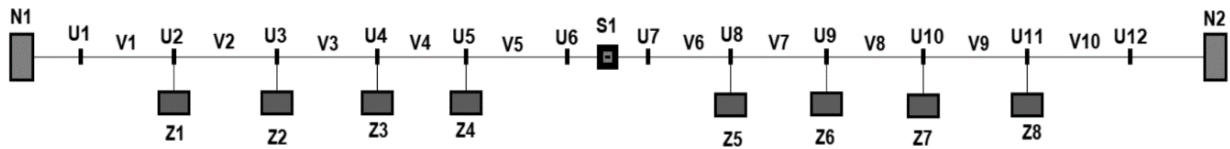
Pokud by byla požadována vyšší přesnost, muselo by se počítat pomocí iterací, pomocí nichž počítá i simulační program. Výpočet zkratových proudů a výkonů pomocí iterací vyšel přesněji než v případě, kdy bylo všude počítáno se jmenovitým napětím 22 000 kV.

$$I_{k''1} = \frac{c * U_{ni}}{\sqrt{3} * Z_{S1}} = \frac{1,1 * 22138}{\sqrt{3} * 15} = 937,178 \quad (26)$$

$$\begin{aligned} S_{k''1} &= \sqrt{3} * U_{ni} * I_{k''} = \sqrt{3} * 22138 * 937,178 \\ &= 35,935 * 10^6 \text{ VA} \end{aligned} \quad (27)$$

3.2 Analytický výpočet při napájení ze dvou stran

Při tomto výpočtu se uvažovalo napájení ze dvou zdrojů se stejnými parametry.



Obrázek 30 - Výpočet při napájení ze dvou stran

Nejprve se vypočítal proud, který dodával zdroj N1 pomocí proudových momentů, kde se v součtu nachází součin délky vedení a proudu zátěže vydělený celkovou délkou vedení.

$$I_{N1} = \frac{\sum l_k I_k}{l} = \frac{(5 * 10,359 + \dots + 40 * 6,906)}{45} = 31,188 \text{ A} \quad (28)$$

Následně se vypočítal celkový dodaný proud.

$$I_N = 4 * I_Z + 4 * I_{Z'} = 4 * 10,359 + 4 * 6,906 = 68,685 \text{ A} \quad (29)$$

Z celkového proudu se vypočítal proud I_{N2} , jako:

$$I_{N2} = I_N - I_{N1} = 68,685 - 31,188 = 37,497 \text{ A} \quad (30)$$

A pak se vypočítaly jednotlivé proudy ve větvích.

$$I_{2-3} = I_{N1} - I_Z = 31,188 - 10,359 = 20,826 \text{ A} \quad (31)$$

$$I_{3-4} = I_{N1} - 2 * I_Z = 31,188 - 2 * 10,359 = 10,470 \text{ A} \quad (32)$$

$$I_{4-5} = I_{N1} - 3 * I_Z = 31,188 - 3 * 10,359 = 0,111 \text{ A} \quad (33)$$

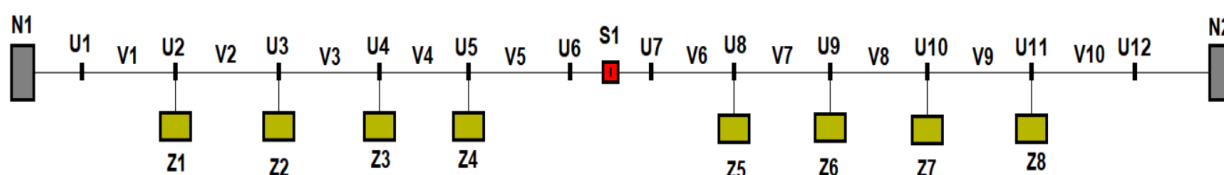
$$I_{8-9} = I_{N2} - 3 * I_{Z'} = 37,497 - 3 * 6,906 = 16,779 \text{ A} \quad (34)$$

$$I_{9-10} = I_{N2} - 2 * I_{z'} = 37,497 - 2 * 6,906 = 23,685 \text{ A} \quad (35)$$

$$I_{10-11} = I_{N2} - I_{z'} = 37,497 - 6,906 = 30,591 \text{ A} \quad (36)$$

3.3 Výpočet v simulačním programu E-vlivy

Simulace byla provedena pro oba případy napájení radiálně, okružně. Jsou zde vyneseny grafy proudových a napěťových poměrů podél vývodů. Zadané hodnoty jsou na Tabulka 7.



Obrázek 31 - Simulace pro radiálně napájený obvod

Tabulka 8 – Napětí v uzlech pro radiálně napájený obvod

| Uzel | U [kV] | Úhel [°] | dUn [%] | Zk [Ohm] | Úhel [°] | Sk [MVA] |
|------|--------|----------|---------|----------|----------|----------|
| U1 | 22,301 | -1,682 | -1,370 | 14,795 | 62,535 | 35,984 |
| U2 | 22,172 | -1,931 | -0,782 | 17,028 | 61,517 | 31,267 |
| U3 | 22,075 | -2,119 | -0,343 | 19,264 | 60,735 | 27,637 |
| U4 | 22,011 | -2,245 | -0,051 | 21,502 | 60,117 | 24,760 |
| U5 | 21,979 | -2,308 | 0,095 | 23,743 | 59,616 | 22,424 |
| U6 | 21,979 | -2,308 | 0,094 | 24,863 | 59,400 | 21,413 |
| U7 | 22,317 | -1,565 | -1,442 | 24,863 | 59,400 | 21,413 |
| U8 | 22,317 | -1,565 | -1,442 | 23,743 | 59,616 | 22,424 |
| U9 | 22,339 | -1,522 | -1,540 | 21,502 | 60,117 | 24,760 |
| U10 | 22,382 | -1,438 | -1,737 | 19,264 | 60,735 | 27,637 |
| U11 | 22,447 | -1,312 | -2,032 | 17,028 | 61,517 | 31,267 |
| U12 | 22,534 | -1,144 | -2,427 | 14,795 | 62,535 | 35,984 |

U – napětí v uzlu, dUn – procentní úbytek napětí, Zk – Impedance, Sk – zkratový výkon

Tabulka 9 - Napětí v uzlech pro síť napájenou ze dvou stran

| Uzel | U [kV] | Úhel [°] | dUn [%] | Zk [Ohm] | Úhel [°] | Sk [MVA] |
|------|--------|----------|---------|----------|----------|----------|
| U1 | 22,393 | -1,465 | -1,788 | 10,401 | 61,213 | 51,186 |
| U2 | 22,281 | -1,681 | -1,276 | 11,202 | 60,418 | 47,527 |
| U3 | 22,201 | -1,835 | -0,914 | 11,804 | 59,892 | 45,104 |
| U4 | 22,154 | -1,927 | -0,699 | 12,206 | 59,571 | 43,620 |
| U5 | 22,139 | -1,955 | -0,631 | 12,407 | 59,418 | 42,913 |
| U6 | 22,147 | -1,938 | -0,670 | 12,432 | 59,399 | 42,826 |
| U7 | 22,147 | -1,938 | -0,670 | 12,432 | 59,399 | 42,826 |
| U8 | 22,156 | -1,921 | -0,710 | 12,407 | 59,418 | 42,913 |
| U9 | 22,195 | -1,844 | -0,886 | 12,206 | 59,571 | 43,620 |
| U10 | 22,255 | -1,726 | -1,160 | 11,804 | 59,892 | 45,104 |
| U11 | 22,337 | -1,566 | -1,533 | 11,202 | 60,418 | 47,527 |
| U12 | 22,441 | -1,365 | -2,005 | 10,401 | 61,213 | 51,186 |

U – napětí v uzlu, dUn – procentní úbytek napětí, Zk – Impedance, Sk – zkratový výkon

Z Tabulka 8,10 jsou vytvořeny grafy napět'ových a výkonových poměrů podél vývodů.

Tabulka 10 - Proudění a výkony ve větvích pro radiálně napájený obvod

| Prvek | Uzel | I [A] | Úhel [°] | Z [Ohm] | Úhel [°] | P [kW] | Q [kVAr] | S [kVA] |
|-------|------|--------|----------|---------|----------|-----------|----------|----------|
| N1 | U1 | 41,421 | 160,199 | 13,444 | 62,548 | -1520,622 | -497,556 | 1599,955 |
| V1 | U1 | 41,420 | 160,200 | 2,248 | 54,830 | -1520,614 | -497,545 | 1599,943 |
| V1 | U2 | 41,449 | 160,076 | 2,248 | 54,830 | 1513,944 | 491,691 | 1591,787 |
| V2 | U2 | 31,009 | 160,146 | 2,248 | 54,830 | -1133,065 | -366,468 | 1190,855 |
| V2 | U3 | 31,038 | 159,982 | 2,248 | 54,830 | 1129,326 | 364,737 | 1186,765 |
| V3 | U3 | 20,643 | 160,134 | 2,248 | 54,830 | -751,746 | -240,585 | 789,305 |
| V3 | U4 | 20,671 | 159,889 | 2,248 | 54,830 | 750,088 | 241,782 | 788,093 |
| V4 | U4 | 10,307 | 160,226 | 2,248 | 54,830 | -374,702 | -118,352 | 392,949 |
| V4 | U5 | 10,335 | 159,735 | 2,248 | 54,830 | 374,288 | 121,299 | 393,453 |
| V5 | U5 | 0,046 | -92,435 | 1,124 | 54,830 | -0,004 | 1,760 | 1,760 |
| V5 | U6 | 0,000 | 132,073 | 1,124 | 54,830 | 0,004 | 0,004 | 0,006 |
| V6 | U7 | 0,000 | 127,404 | 1,124 | 54,830 | -0,006 | -0,008 | 0,010 |
| V6 | U8 | 0,047 | 88,631 | 1,124 | 54,830 | 0,006 | 1,827 | 1,827 |
| V7 | U8 | 6,991 | -19,399 | 2,248 | 54,830 | 257,260 | 82,767 | 270,247 |
| V7 | U9 | 6,963 | -18,661 | 2,248 | 54,830 | -257,450 | -79,394 | 269,414 |
| V8 | U9 | 13,975 | -19,195 | 2,248 | 54,830 | 515,211 | 164,150 | 540,728 |
| V8 | U10 | 13,947 | -18,826 | 2,248 | 54,830 | -515,968 | -161,572 | 540,674 |
| V9 | U10 | 20,973 | -19,098 | 2,248 | 54,830 | 774,726 | 246,651 | 813,042 |
| V9 | U11 | 20,944 | -18,852 | 2,248 | 54,830 | -776,433 | -245,403 | 814,291 |
| V10 | U11 | 27,990 | -19,018 | 2,248 | 54,830 | 1036,695 | 330,977 | 1088,247 |
| V10 | U12 | 27,962 | -18,833 | 2,248 | 54,830 | -1039,736 | -331,598 | 1091,333 |
| N2 | U12 | 27,961 | 161,167 | 13,444 | 62,548 | -1039,735 | -331,595 | 1091,331 |

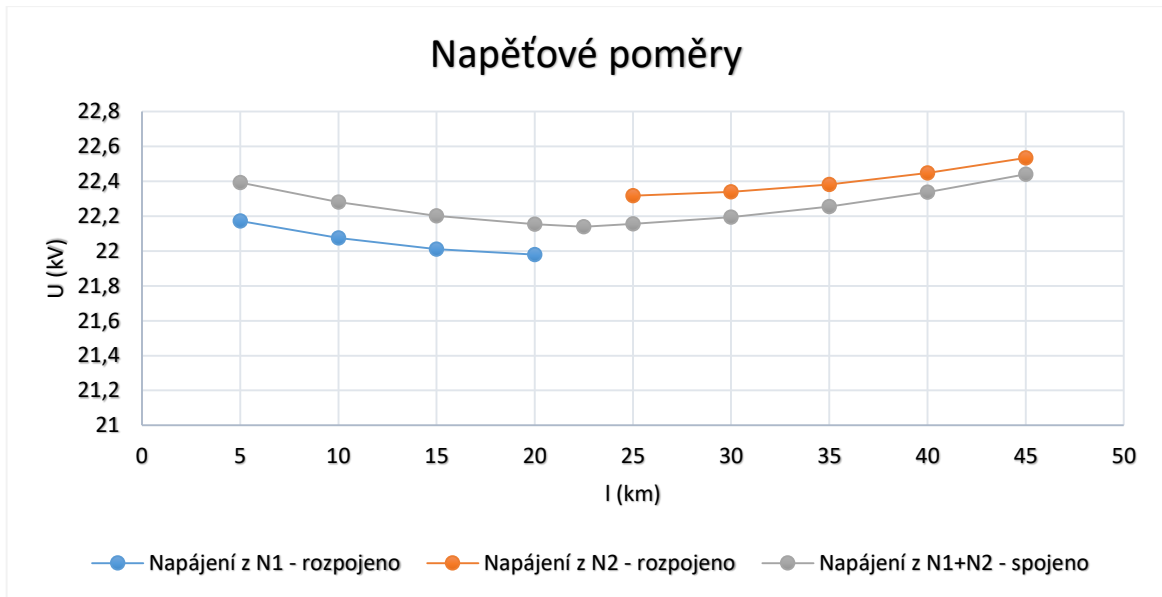
I – proud ve větvi, Z – impedance větve, P – činný výkon ve větvi, Q – jalový výkon ve větvi, S – zdánlivý výkon ve větvi

Tabulka 11 - Proudění a výkony ve větvích pro síť napájenou ze dvou stran

| Prvek | Uzel | I [A] | Úhel [°] | Z [Ohm] | Úhel [°] | P [kW] | Q [kVAr] | S [kVA] |
|-------|------|--------|----------|---------|----------|-----------|----------|----------|
| N1 | U1 | 36,055 | 160,452 | 13,444 | 62,548 | -1329,379 | -434,071 | 1398,451 |
| V1 | U1 | 36,055 | 160,452 | 2,248 | 54,830 | -1329,376 | -434,068 | 1398,448 |
| V1 | U2 | 36,084 | 160,310 | 2,248 | 54,830 | 1324,322 | 430,539 | 1392,549 |
| V2 | U2 | 25,593 | 160,388 | 2,248 | 54,830 | -939,691 | -304,076 | 987,665 |
| V2 | U3 | 25,622 | 160,188 | 2,248 | 54,830 | 937,144 | 304,074 | 985,241 |
| V3 | U3 | 15,168 | 160,343 | 2,248 | 54,830 | -555,254 | -178,502 | 583,241 |
| V3 | U4 | 15,196 | 160,008 | 2,248 | 54,830 | 554,358 | 180,823 | 583,104 |
| V4 | U4 | 4,765 | 160,301 | 2,248 | 54,830 | -174,107 | -55,805 | 182,831 |
| V4 | U5 | 4,794 | 159,238 | 2,248 | 54,830 | 174,018 | 59,261 | 183,832 |
| V5 | U5 | 5,631 | -19,640 | 1,124 | 54,830 | 205,724 | 65,595 | 215,928 |
| V5 | U6 | 5,617 | -19,187 | 1,124 | 54,830 | -205,785 | -63,892 | 215,476 |
| V6 | U7 | 5,617 | -19,186 | 1,124 | 54,830 | 205,783 | 63,888 | 215,472 |
| V6 | U8 | 5,603 | -18,730 | 1,124 | 54,830 | -205,844 | -62,183 | 215,031 |
| V7 | U8 | 12,558 | -19,502 | 2,248 | 54,830 | 459,419 | 145,571 | 481,930 |
| V7 | U9 | 12,530 | -19,095 | 2,248 | 54,830 | -460,030 | -142,847 | 481,698 |
| V8 | U9 | 19,497 | -19,434 | 2,248 | 54,830 | 714,479 | 226,508 | 749,524 |
| V8 | U10 | 19,469 | -19,171 | 2,248 | 54,830 | -715,953 | -224,993 | 750,474 |
| V9 | U10 | 26,455 | -19,370 | 2,248 | 54,830 | 971,776 | 309,095 | 1019,749 |
| V9 | U11 | 26,426 | -19,176 | 2,248 | 54,830 | -974,492 | -309,319 | 1022,405 |
| V10 | U11 | 33,438 | -19,300 | 2,248 | 54,830 | 1232,226 | 394,072 | 1293,706 |
| V10 | U12 | 33,410 | -19,146 | 2,248 | 54,830 | -1236,567 | -396,570 | 1298,601 |
| N2 | U12 | 33,410 | 160,854 | 13,444 | 62,548 | -1236,566 | -396,569 | 1298,600 |

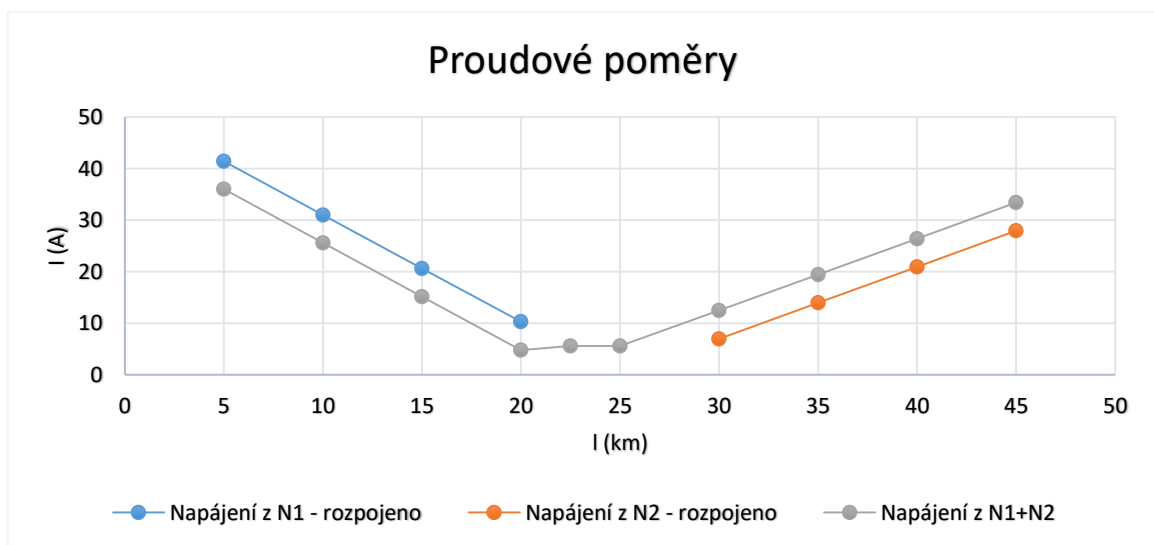
I – proud ve větvi, Z – impedance větve, P – činný výkon ve větvi, Q – jalový výkon ve větvi, S – zdánlivý výkon ve větvi

Z Tabulka 10,12 je vytvořen graf s proudovými poměry podél vývodů.



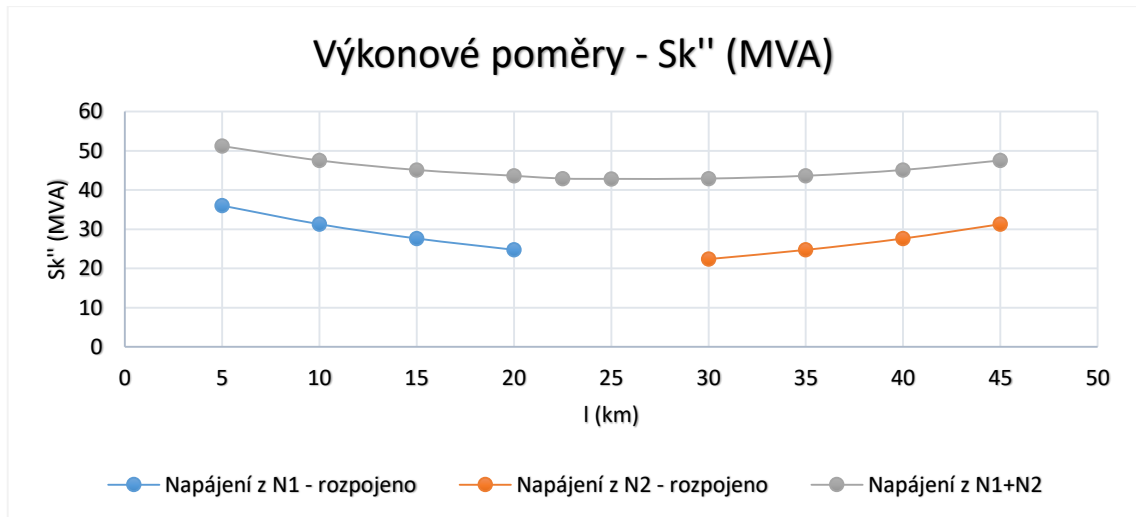
Obrázek 32 - Napěťové poměry podél vývodů

Obrázek 32 znázorňuje, jak se zlepšily napěťové poměry podél vývodů, při napájení ze dvou stran. Tím se síť jeví jako tvrdší, nedochází totiž k takovému úbytku napětí, jako u radiálně napájené sítě. To potvrzuje všechny dosavadní studie, jak české, tak i zahraniční.



Obrázek 33 - Proudové poměry

Z Obrázek 33 je vidět, že při napájení ze dvou stran je vyrovnávací proud 5 A.



Obrázek 34 - Výkonové poměry zkratového výkonu

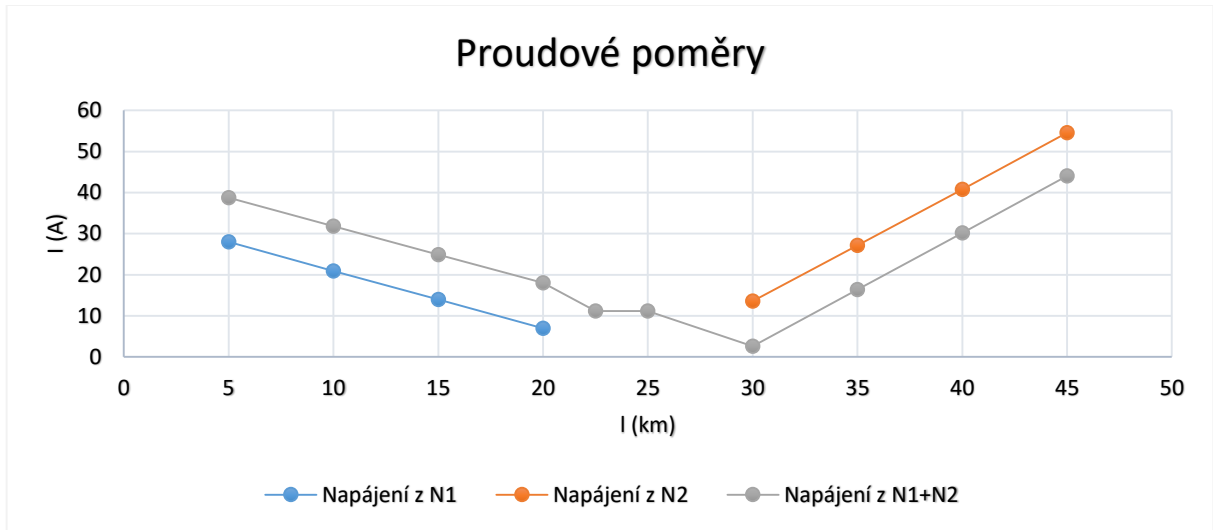
Obrázek 34 dokládá nárůst zkratového výkonu, proto na to musí být patřičně dimenzované všechny vodiče a přístroje ve smyčce.

3.3.1 Výpočet pro modifikované zadání – 2. příklad

Dalším uvažovaným případem je změna zatížení vývodů. První vývod je zatížen 1 MW a druhý vývod 2 MW.

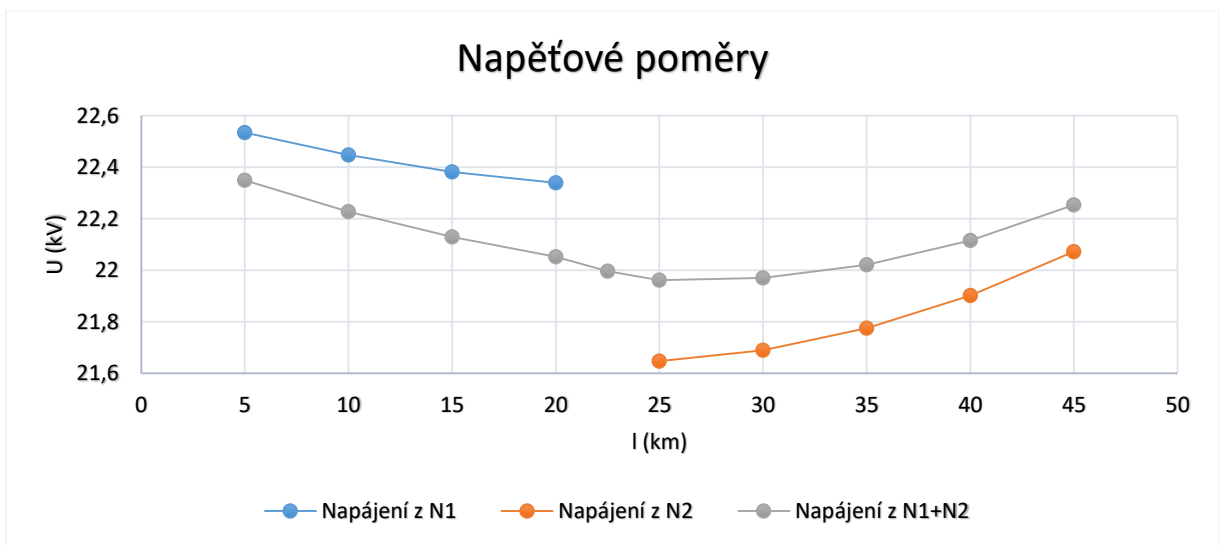
Tabulka 12 - Zadané hodnoty pro 2. příklad

| | |
|-----------------------|-------|
| S_k'' (MVA) | 40 |
| R/X (-) | 0,52 |
| U_0 (kV) | 23 |
| U_n (kV) | 22 |
| R_k (Ω /km) | 0,259 |
| X_k (Ω /km) | 0,368 |
| l_k (km) | 5 |
| P1-P4 (kW) | 250 |
| P5-P8 (kW) | 500 |
| $\cos\varphi$ (-) | 0,95 |



Obrázek 35 - Proudové poměry pro 2. příklad

Na Obrázek 35 je vidět, že hodnota vyrovnávacího proudu je 10 A, ten je důležitý z pohledu vypínacích schopností prvků na vedení.



Obrázek 36 - Napěťové poměry pro 2. příklad

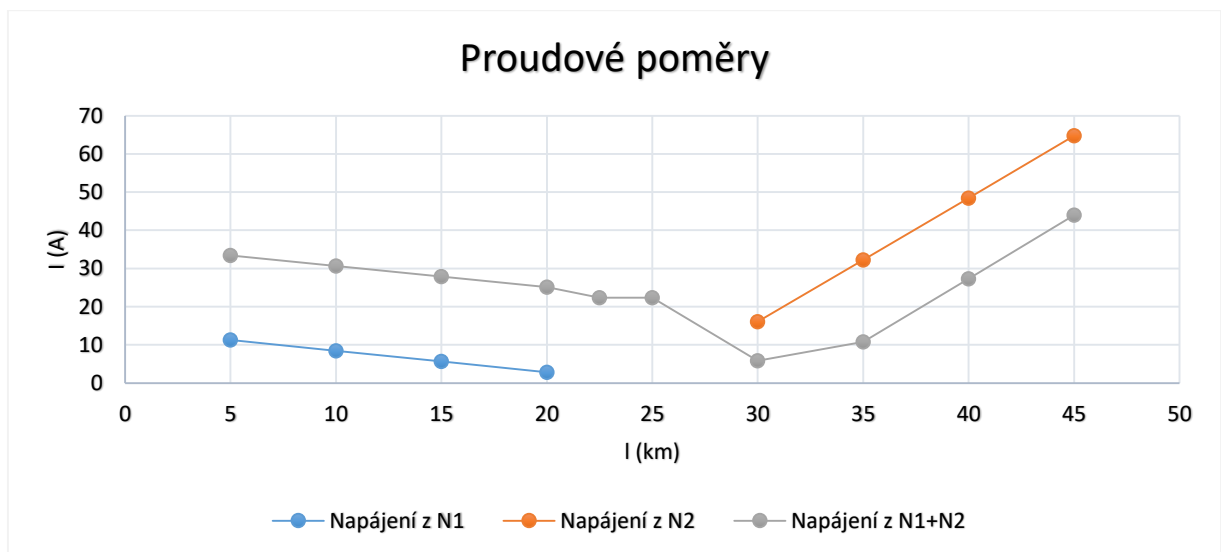
Z Obrázek 36 je vidět, že se značně zlepšily napěťové poměry při zapojení ve smyčce.

3.3.2 Výpočet pro modifikované zadání – 3. příklad

Pro tento příklad je znovu uvažované jiné zatížení vývodů, zatížení prvního vývodu je pouze 500 kW a zatížení druhého vývodu je 2 MW.

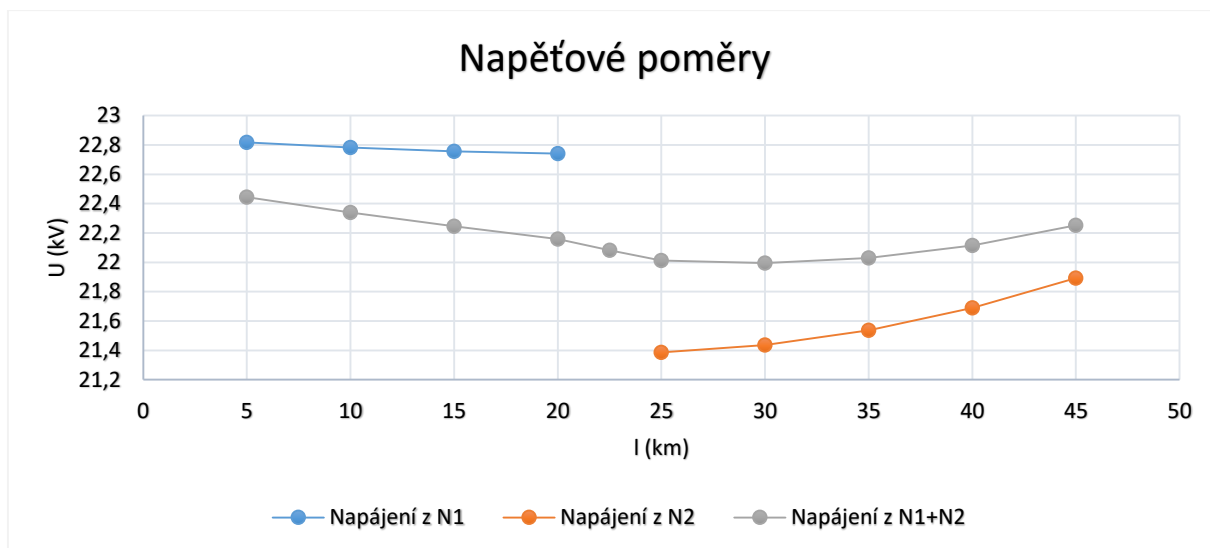
Tabulka 13 - Zadané hodnoty pro 3. příklad

| | |
|-----------------------|-------|
| S_k'' (MVA) | 40 |
| R/X (-) | 0,52 |
| U_0 (kV) | 23 |
| U_n (kV) | 22 |
| R_k (Ω /km) | 0,259 |
| X_k (Ω /km) | 0,368 |
| l_k (km) | 5 |
| P1-P4 (kW) | 100 |
| P5-P8 (kW) | 500 |
| $\cos\varphi$ (-) | 0,95 |



Obrázek 37 - Proudové poměry pro 3. příklad

Z Obrázek 37 vyplývá, že došlo ke zlepšení proudových poměrů. Vyrovnávací proud v tomto případě je dvojnásobný než v předchozích variantách.



Obrázek 38 - Napětové poměry pro 3. příklad

Na Obrázek 38 je znovu vidět zlepšení napětových poměrů podél vývodů. V tomto případě došlo k největšímu zlepšení napětových poměrů při uzavřené smyčce.

3.4 Zhodnocení výpočtů a simulací

V simulovaných příkladech s různým zatížením, došlo ke zlepšení napěťových poměrů podél vývodů ve všech uvažovaných případech. Po přepojení z radiální sítě do propojené, dostaneme lepší napěťové poměry než, kdyby byly vývody stejně zatížené, což potvrzuje i studie, kterou se zabýval článek [34].

Z Tabulka 14 a Tabulka 15 je vidět, že analyticky vypočítané hodnoty pro radiální obvod se téměř neliší od simulovaných hodnot výpočetního softwaru. V dalším kroku byl proveden výpočet a simulace pro propojené vývody a zde se hodnoty rozcházely o 14 % u napájecích proudů, protože program provádí iterační výpočet s napěťově závislou zátěží, kde se mění proud zátěží. Tím simulační program získá přesnější výsledky.

Tabulka 14 - Analyticky vypočítané hodnoty pro rozpojený obvod

| | | | | | |
|----------|--------|----------|-------|-------------|--------|
| lv1 (A) | 41,437 | U1 (kV) | 22230 | Sks"1 (MVA) | 35,935 |
| lv2 (A) | 31,077 | U2 (kV) | 22100 | Sk"2 (MVA) | 31,28 |
| lv3 (A) | 20,721 | U3 (kV) | 22003 | Sk"3 (MVA) | 27,687 |
| lv4 (A) | 10,359 | U4 (kV) | 21938 | Sk"4 (MVA) | 24,832 |
| | | U5 (kV) | 21906 | Sk"5 (MVA) | 22,049 |
| | | | | | |
| lv7 (A) | 6,906 | U8 (kV) | 22271 | Sk"8 (MVA) | 22,68 |
| lv8 (A) | 13,812 | U9 (kV) | 22292 | Sk"9 (MVA) | 25,021 |
| lv9 (A) | 20,718 | U10 (kV) | 22335 | Sk"10 (MVA) | 27,899 |
| lv10 (A) | 27,624 | U11(kV) | 22400 | Sk"11 (MVA) | 30,892 |
| | | U12 (kV) | 22487 | Sk"12 (MVA) | 35,489 |

Tabulka 15 - Hodnoty ze simulačního programu pro rozpojený obvod

| | | | | | |
|----------|--------|----------|-------|-------------|--------|
| lv1 (A) | 41,421 | U1 (kV) | 22301 | Sks"1 (MVA) | 35,984 |
| lv2 (A) | 31,009 | U2 (kV) | 22172 | Sk"2 (MVA) | 31,267 |
| lv3 (A) | 20,643 | U3 (kV) | 22075 | Sk"3 (MVA) | 27,637 |
| lv4 (A) | 10,307 | U4 (kV) | 22011 | Sk"4 (MVA) | 24,76 |
| | | U5 (kV) | 21979 | Sk"5 (MVA) | 22,424 |
| | | | | | |
| lv7 (A) | 6,991 | U8 (kV) | 22317 | Sk"8 (MVA) | 22,424 |
| lv8 (A) | 13,975 | U9 (kV) | 22339 | Sk"9 (MVA) | 24,76 |
| lv9 (A) | 20,973 | U10 (kV) | 22382 | Sk"10 (MVA) | 27,637 |
| lv10 (A) | 27,99 | U11(kV) | 22447 | Sk"11 (MVA) | 31,267 |
| | | U12 (kV) | 22534 | Sk"12 (MVA) | 35,984 |

Závěr

V této práci je vypracován přehled o elektrizační soustavě České republiky. Je zde pospáno provozování distribuční soustavy. Na prvním místě jsou vždy ekonomické požadavky. S tím souvisí zmíněná studie ohledně osazování transformátorů, kde bylo prokázáno neúčelné osazování distribučních transformátorů o výkonu 630 kVA. Téměř 90 % všech strojů o tomto výkonu by mohlo být nahrazeno stroji o nižším výkonu 400 kVA, bez jejichž přetěžování.

Dále jsou zde vyhodnoceny výhody provozu propojených vývodů vysokého napětí. Přechodem ze sítě radiální do sítě okružní se zlepší napěťový profil podél vývodů. Dosáhne se tím menších úbytků a tím i ztrát na vedení. Nejmarkantnější narovnění napěťového profilu se projeví, pokud je jeden vývod mnohem víc zatížený než druhý, to se projeví i snížením ztrát, jelikož dojde ke snížení úbytků napětí. K tomu jevu dochází například při zatížení prvního vývodu na 80 % a druhého na zbylých 20 %, to je ověřeno simulací, ale i podloženo zahraniční studií. Také je vhodné použít uzavřenou smyčku, tam kde se nachází vnořená výroba na hladině VN v podobě obnovitelných zdrojů elektrické energie. Jelikož po připojení OZE se navýší napětí v místě připojení, které ke všemu není konstantní, například z důvodu nízkého slunečního svitu (FVE). Další výhodou je zvýšení spolehlivosti, to se projeví zlepšením spolehlivostních ukazatelů SAIDI a SAIFI o více než 50 %, což potvrdila zahraniční studie. Důvod je takový, že v síti je minimálně druhý zdroj, proto při výpadku nedojde k přerušení dodávky elektrické energie.

Provozem propojených vývodů, ale nastávají i problémy, které nejsou nijak zanedbatelné v poruchovém. Po připojení dalšího zdroje dojde k nárůstu zkratového výkonu ve smyčce, ten je závislý na celkové impedanci smyčky a zdrojovém napětí. Největší zkratový výkon je v blízkosti zdroje, protože impedance sítě je na tomto místě nejmenší a obvod tedy musí být dimenzován jako zkratově odolnější. Dalším problémem je vyrovnávací proud, který je nutné znát z důvodu vypínacích schopností ovládacích prvků sítě. Tento proud závisí také jako zkratový výkon na impedanci sítě a ještě na fázovém rozdílu napájecích napětí. Měření, která prováděla společnost E-ON distribuce, a.s., zkoumala mezní úhel napětí pro různé odpínače a různá místa spínání. Studie došla k závěru, že mezní úhel napětí se pohybuje v rozmezí 1,33 - 5,33°. Obecně lze říci, že pokud se vypínací prvek nachází alespoň 40 km a více od rozvodny, lze provést bezproblémové vypnutí úsečnickem typu Fla.

V poslední části práce byl proveden analytický výpočet a simulace ve výpočetním softwaru jak pro radiálně napájenou síť, tak okružně napájenou síť. V prvním případě se výsledky analytického výpočtu od výsledků simulace téměř nelišily. U výpočtu zokruhované sítě činil rozdíl ve výsledku 14 %, což bylo zapříčiněno skutečností, že analytický výpočet nebyl proveden iteračně. Z toho důvodu byl nastíněn pouze výpočet proudových poměrů. Všechny simulace různě zatížených vývodů, potvrzují teoretické předpoklady a zmíněné výhody a nevýhody provozu propojených vývodů VN.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] GALETKA, Martin. Přenosová soustava elektrické energie. *TZB-info* [online]. [vid. 2017-10-03]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/13676-prenosova-soustava-elektricke-energie>
- [2] E.ON DISTRIBUCE. *Přenosová a distribuční soustava 1. část - vedení velmi vysokého napětí (VVN) | E.ON Distribuce* [online]. [vid. 2017-10-03]. Dostupné z: <https://www.eon-distribuce.cz/o-nas/novinky/media/prenosova-a-distribucni-soustava-elektricke-energie>
- [3] *ELEKTRINA* [online]. 3. říjen 2017 [vid. 2017-10-15]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/4-4.htm>
- [4] *Roční zpráva o provozu ES ČR - 2016* [online]. B.m.: Energetický regulační úřad. [vid. 2017-04-11]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2016.pdf/800e5a09-a58a-4a73-913f-abc30cda42a5
- [5] BUDÍN, Jan. ČEPS, a.s. - profil společnosti a činnosti. *OEnergetice.cz* [online]. 1. březen 2015 [vid. 2017-10-03]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/ceps-s-profil-spolecnosti-cinnosti/>
- [6] S.R.O, Ušetřeno.cz. *Distributor, nebo dodavatel? Kdo je kdo?* [online]. [vid. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/distribuce-elektriny>
- [7] *Profil Skupiny ČEZ | Skupina ČEZ | Skupina ČEZ* [online]. 16. říjen 2017 [vid. 2017-10-16]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-spolecnosti/skupina-cez/o-skupine-cez/profil-skupiny-cez.html>
- [8] *Co zajišťujeme | E.ON Distribuce* [online]. [vid. 2018-02-20]. Dostupné z: <https://www.eon-distribuce.cz/o-nas/o-spolecnosti/co-zajistujeme>
- [9] *O nás | PREDistribuce, a. s.* [online]. [vid. 2018-02-20]. Dostupné z: <https://www.predistribuce.cz/cs/o-spolecnosti/o-nas/>
- [10] *Technická data | ČEZ Distribuce* [online]. [vid. 2018-02-20]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/cs/distribucni-soustava/technicka-data.html>
- [11] *Výroční zprávy | PREDistribuce, a. s.* [online]. [vid. 2018-02-20]. Dostupné z: <https://www.predistribuce.cz/cs/o-spolecnosti/vyrocnizpravy/>
- [12] *Dosahovaná úroveň kvality distribuce elektriny | ČEZ Distribuce* [online]. [vid. 2018-02-20]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/cs/distribucni-soustava/uroven-kvality-distribuce-elektriny.html>
- [13] RENÉ HONIŠ, Milan KONEČNÝ, Martin GALETKA a Petr ULLMAN. *Přenosová soustava České republiky* [online]. 1. leden 2013 [vid. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://partnerstvi-energetiky.msek.cz/wp-content/uploads/2013/01/01-Prenosova-soustava-Ceske-republiky.pdf>
- [14] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení* [online]. 2007 [vid. 2018-03-19]. Dostupné

- z: <http://docplayer.cz/16989703-Rozvodna-zarizeni-autor-textu-ing-jaroslava-orsagova.html>
- [15] ORSÁGOVÁ, Jaroslava, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Petr TOMAN, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. *Provoz distribučních soustav* [online]. 2011 [vid. 2018-04-08]. Dostupné z: http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-7-Provoz.pdf
- [16] MIŠINGER, Ondřej. *Návrh úprav a konfigurace sítě 22 kV po instalaci transformace 110/22 kV ve spínací stanici Brno-sever - Diplomová práce* [online]. 2013 [vid. 2018-04-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65475
- [17] *Přenosová a distribuční soustava 4. část - vedení vysokého (VN) a nízkého napětí (NN) | E.ON Distribuce* [online]. [vid. 2018-04-11]. Dostupné z: <https://www.eon-distribuce.cz/o-nas/novinky/media/prenosova-a-distribucni-soustava-4-cast-vedeni-vysokeho-a-nizkeho-napeti-vn-nn>
- [18] KAŠPÍREK, Martin a Michal VOGEL. *Analýza zatížení transformátorů 22/0,4kV, 110/22kV a VVN/110kV*. B.m.: E- ON distribuce. 2011
- [19] JANDA, Petr. *Analýza můstkového provozu distribuční sítě na úrovni VN- Bakalářská práce* [online]. 2017 [vid. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/69553/F3-BP-2017-Janda-Petr-Analyza?sequence=1>
- [20] TESAŘOVÁ, Miloslava. *Topologie sítí* [online]. [vid. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~tesarova/PE/Soubory/Site.pdf>
- [21] ŠVEC, Antonín. *Rozvodné energetické sítě* [online]. 2014 [vid. 2018-04-10]. Dostupné z: http://www.spssecb.cz/cs/files/dokumenty_pro_studenty/Rozvodne_energeticke_site.pdf
- [22] ZDENĚK, VÁVRA a Jaromír VANĚK. *Skripta elektrické přístroje část 2*. nedatováno.
- [23] *Venkovní odpínače Fla 15/60, DRIBO Flb a DRIBO Flc* [online]. B.m.: dribo, s.r.o. 2014 [vid. 2018-04-12]. Dostupné z: http://www.dribo.cz/pdf/CZ_Fla_Flb_Flc.pdf
- [24] DURK, Scott, Shazad LATEEF a Yahia BAGHZOUZ. *Feeder Switch Currents During Load Transfer*. 2005
- [25] KOLÁŘ, Libor, Daniel KOUBA, Peter MÚDRY a Jiří ČELEDA. *AUTOMATIZACE VN SÍTÍ - RECLOSER Konference ČK CIRED*. 5. listopad 2014
- [26] ŠOUSTAL, Petr. *ochrany venkovních vedení VN a jejich koordinace s automatizovanými úsečníky* [online]. 2009 [vid. 2017-04-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15147
- [27] *Overhead Distribution Systems Reliability* [online]. B.m.: ABB. 2002 [vid. 2018-05-03]. Dostupné z: http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/switchgear/presentations/tp_files/2002-2_Lunch_Goodin.pdf
- [28] *ČSRES: FVE a VTE až po analýze reálných dopadů jejich výroby na bezpečnost a*

- spolehlivost provozu sítě distribuční soustavy. Technický limit pro bezpečné a spolehlivé fungování soustavy je naplněn.* | ČEZ Distribuce [online]. [vid. 2018-04-13]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/189.html>
- [29] ONDROUŠEK, Luděk. *Připojování fotovoltaických zdrojů k distribuční síti - diplomová práce* [online]. 2009 [vid. 2018-04-13]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=13439
- [30] ŠAFRÁNEK, Jan. *Disertační práce- spolehlivost dodávky elektrické energie* [online]. [vid. 2018-03-05]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/60902/Disertace_Sefranek_2014.pdf?sequence=1
- [31] TSAI-HSIANG CHEN, WEI-TZER HUANG, JYH-CHERNG GU, GUAN-CHIH PU, YEN-FENG HSU a YEN-FENG HSU. *Feasibility Study of Upgrading Primary Feeders From Radial and Open-Loop to Normally Closed-Loop Arrangement - IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*. 2004
- [32] BERMAN, Alex a Nokhum MARKUSHEVICH. *Analysis of Three-Phase Parallel Distribution Feeders Fed from Different Substations*. 2009
- [33] PALETI, Srikanth, M Arjun YADAV a Manohar POTLI. *Benefit of Network Reconfiguration on Three Feeder Radial Distribution System*. 2015
- [34] JIRAPONG, Peerapol, Phattamaporn BUNCHOO, Panida THARARAK, Authaporn SUPANNON a Sattawat BURANA. *Effect of Upgrading Primary Feeders from Radial to Loop Arrangement on Electrical Distribution System Performance*. 2015
- [35] JIŘIČKA, Jan. *Spínání různých uzlových oblastí v distribuční síti 22 kV*. B.m.: E- ON distribuce. 13. říjen 2017