

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Porovnání programů pro síťové výpočty

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstract

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na porovnání programů zabývajících se výpočty a analýzou elektrických sítí – zejména v oblasti ustáleného chodu soustavy. V první fázi je proveden teoretický rozbor problematiky, který plynule navazuje na tvorbu vlastní testovací sítě, jež je následně analyzována. Každý program je stručně uveden. Byla vybrána specifická kritéria, v rámci kterých bylo provedeno vzájemné porovnání. Výsledek porovnání je přehledně strukturován v tabulkách. Závěr práce je objektivní srovnání zvolených software.

Key words

Elektrické sítě, Elektrizační soustavy, Admitanční matice, Metoda uzlových napětí, Modelování sítí, Analýza toku výkonu v síti, Power flow analýza, Load flow analýza

Abstract

Submitted bachelor's thesis is focused on a comparison of programs that are dealing with calculations and power grid analysis – especially in the area of steady state of the system. In the first phase, there is done a theoretical opening which smoothly follows up with creation of own testing network that is further analysed. Each program is briefly introduced. Specific criteria was chosen, within which a mutual comparison has been conducted. The outcome of comparison is clearly structured in tables. The conclusion of this work is objective comparison of the chosen software.

Key words

Electrical networks, Electrical systems, Admittance matrix, Nodal method, Network modeling, Analysis of flow of power in the network, Power flow analysis, Load flow analysis

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou 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 bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 7.6.2018

Tomáš Stec

Poděkování

Rád bych zde poděkoval vedoucímu práce panu **Ing. Romanu Vykukovi** za cenné rady a odborné konzultace, které byly základním kamenem při tvorbě této práce.

Za spolupráci při řešení některých nejasností ohledně programu DNCalc a E-vlivy 3 bych rovněž chtěl poděkovat panu **Ing. Kysnarovi** ze společnosti EGC-EnerGoConsult ČB s.r.o.

Velké díky bych chtěl věnovat **celé své rodině** a také všem **dobrym přátelům**, že mne v mnohých případech podpořili a tím mi prakticky umožnili, abych se mohl soustředit na dokončení této práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1. TEORETICKÝ ÚVOD	11
1.1. VÝPOČTY V USTÁLENÉM STAVU	11
1.1.1. <i>Metoda uzlových napětí pro řešení chodu soustavy</i>	11
1.1.2. <i>Rovnice pro MUN a matici A</i>	13
1.2. VÝPOČTY V ČASOVÉ OBLASTI.....	14
1.3. KABELOVÁ A VENKOVNÍ VEDENÍ	15
1.3.1. <i>Venkovní</i>	15
1.3.2. <i>Kabelová</i>	16
1.3.3. <i>Náhradní schéma</i>	16
1.3.4. <i>Tabulkové parametry pro kabelová a venkovní vedení</i>	17
1.4. TRANSFORMÁTORY	19
1.4.1. <i>Náhradní schéma</i>	20
1.5. GENERÁTORY	21
1.6. NADŘAZENÁ SÍŤ	22
1.7. PŘIPOJOVANÁ ZÁTĚŽ	23
1.7.1. <i>Zátěž s konstantní velikostí proudu</i>	24
1.7.2. <i>Zátěž o konstantním výkonu</i>	24
1.7.3. <i>Zátěž o konstantní impedanci</i>	24
1.8. KOMPENZAČNÍ PRVKY	24
1.8.1. <i>Tlumivky zapojené paralelně</i>	24
1.8.2. <i>Kondenzátory zapojené paralelně</i>	25
1.9. PŘEVOD DO POMĚRNÝCH JEDNOTEK	26
1.10. PŘÍKLAD URČENÍ MATICE A POMOCÍ MUN.....	27
2. VLASTNÍ TESTOVACÍ SÍŤ	29
3. PŘEHLED POROVNÁVANÝCH PROGRAMŮ	31
3.1. POWER WORLD SIMULATOR.....	31
3.1.1. <i>Informace o programu (přehled balíčků)</i>	31
3.1.2. <i>Práce s programem</i>	34
3.2. ETAP	36
3.2.1. <i>Informace o programu (přehled balíčků)</i>	36
3.2.2. <i>Práce s programem</i>	38
3.3. EASYPOWER.....	43
3.3.1. <i>Práce s programem</i>	44
3.4. E-VLIVY 3 / DNCALC.....	49
3.4.1. <i>E-Vlivy 3 (základ pro DNCalc)</i>	49
3.4.2. <i>DNCalc (obsahuje výše zmíněné)</i>	50
3.4.3. <i>Práce s programem (E-Vlivy)</i>	51
3.5. PYPSA.....	54
3.5.1. <i>Práce s programem</i>	55
3.6. MATPOWER (VČETNĚ MOST).....	56
3.6.1. <i>Práce s programem</i>	56
3.7. PSAT.....	58
3.7.1. <i>Práce s programem</i>	59

4. TABULKOVÉ POROVNÁNÍ	62
4.1. TYPY DOSTUPNÝCH LICENCÍ	62
4.2. POČET PŘÍPOJNIC	62
4.3. FUNKCIONALITY	63
4.4. UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ PROGRAMŮ	64
4.5. PODPORA, TUTORIÁLY, INFORMAČNÍ TEXTY, CENOVÁ RELACE.....	64
4.6. ZPŮSOBY SDÍLENÍ – VÝSTUPY / VSTUPY	65
5. ZÁVĚR	66
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	67
PŘÍLOHY.....	A
PŘÍLOHA – CENÍK FUNKCIONALIT PRO PROGRAM PWS	A
PŘÍLOHA – PLNÁ VERZE PROGRAMU: SÍŤOVÁ LICENCE.....	B
PŘÍLOHA – PŮVODNÍ ZÁVĚR (NEREDUKOVANÝ) 1/2.....	C
PŘÍLOHA – PŮVODNÍ ZÁVĚR (NEREDUKOVANÝ) 2/2.....	D
PŘÍLOHA – UKÁZKA SPOLUPRÁCE	E
PŘÍLOHA – ODPOVĚDI NA DOTAZ (DNCALC, E-VLIVY3).....	F

Seznam zkratek

ES	Elektrizační soustava
SKM	Symbolicko-komplexní metoda
MUN	Metoda uzlových napětí
nn	Nízké napětí
vn	Vysoké napětí
vvn	Velmi vysoké napětí
AGT	Automatic generation trip
PSAT.....	Power systém analysis toolbox
PS	Přenosová síť
DS	Distribuční síť
ČR	Česká republika
OPF	Optimal power flow
PWS	Power World Simulator
GIS	Geografický informační systém
AC.....	Alternating current
DC.....	Direct current
IEC.....	International electrotechnical commision
ANSI.....	American national standards institute
PyPSA.....	Python for power systém analysis
SSSA.....	Small signal stability
EMT.....	Electromagnetic transient
MOST	Matpower optimal scheduling tool
AGC.....	Automatic generation control
OZE.....	Obnovitelné zdroje energie
ČSN.....	České technické normy
PNE.....	Podnikové normy energetiky

Úvod

Předmětem této práce je porovnání vybraných výpočetních programů, které se zabývají numerickými výpočty elektrizačních soustav. Cílem bylo nejen porovnat jednotlivé programy vzhledem k typům výpočtů, které mohou provést, ale také zhodnocení licenční politiky, zhodnocení podpory ze strany developerů a zhodnocení některých dalších zvolených parametrů.

Každý program je představen a pro lepší orientaci stručně popsán, aby tak bylo zřejmé, jaké jsou možnosti programu. Pro každý software je pak na několika stránkách nastíněno, jakým způsobem s programy pracovat resp. jak bylo postupováno při práci s nimi.

V závěru práce je provedeno porovnání, včetně doplňujících klíčových informací. Tuto práci lze rozdělit na několik částí a to sice:

- Teoretický úvod (*rozbor problematiky*)
- Tvorba testovací sítě
- Informace o programech a práce s nimi
- Tabulkové porovnání programů
- Shrnutí práce

1. Teoretický Úvod

1.1. Výpočty v ustáleném stavu

Ustálený chod ES¹ představuje takový stav, ve kterém uvažujeme, že nedochází k žádným přechodovým jevům. Jedná se o jistou idealizaci, která umožňuje použití SKM². V reálné ES dochází k neustálé změně poměrů a je tedy důležité si uvědomit, že „ustálený stav“ je koncept, který umožňuje základní výpočet poměrů na elektrické síti – nikoliv dynamiku. [1]

Výpočet ustáleného chodu sítě je prakticky základní analýza systému, která má za úkol poskytnout informace o provozním režimu soustavy. Tato analýza je založena na napěťových a proudových výpočtech poměrů v síti resp. přenášeném/dodávaném výkonu, včetně výpočtů ztrát³. Na základě analýzy v ustáleném stavu je sestrojen prvotní obraz soustavy, který může posloužit k dalším analýzám typu: analýza poruchových stavů, řešení přechod. dějů a jiné. [2]

ES je v konečném důsledku napájena prostřednictvím třífázových generátorů. V ideálním případě je do ES připojovaná zátěž: symetrická a třífázová. Většina spotřebičů není nutně třífázová, nicméně distribuční síť je navržena tak, aby se vůči generátoru tvářila co nejvíce symetricky. V této práci je uvažované pouze symetrické zatížení pro každou fázi. [3]

Předpoklady pro výpočet ustáleného stavu:

- Existence náhradního schéma ES (nutné znát topologii)
- Modely v síti jsou 3-fázové
- Nastavené parametry komponent ES
- Sinusový průběh napětí a proudu (umožňuje použít SKM)
- Uzlová napětí v normě (limity)
- Souměrnost pasivních parametrů

1.1.1. Metoda uzlových napětí pro řešení chodu soustavy

MUN⁴ se používá z toho důvodu, neboť dokáže pro velmi komplexní systém, jako je např. ES, zformulovat tzv. admitanční matici \underline{A} , díky které dokážeme určit fázory uzlových napětí v jednotlivých uzlech soustavy. Zároveň jsme schopni na základě MUN resp. admitanční matice \underline{A} zrealizovat efektivní algoritmy, které dokáží uspořít výpočetní výkon – což je vlastnost, která nabývá na důležitosti se zvyšujícím se počtem modelovaných přípojnic ES.

Za uzel lze považovat vstupní resp. výstupní „svorky“ prvku s tím, že uzlové napětí je může být uvažována jak sdružené tak fázové. Impedance se uvažují lineární a komplexní.

Jádrem této metody je sestrojení náhradního schéma pomocí dvojbranů. Dvojbrany jsou spojovány kaskádně v takovém pořadí, aby jejich zapojení odpovídalo v ES. Za základní prvky sítě se považují: vedení, transformátor, generátor (resp. nadřazená soustava), kompenzační prvky a zátěž. Každá komponenta, modelovaná pomocí dvojbranu, má určitá specifika. Jednotlivé typy komponent se od sebe liší jak admitanční interpretací, která popisuje jejich

¹ ES – Elektrizční Soustava

² SKM – Symbolicko-Komplexní Metoda

³ Ztrát – Každá komponenta v ES je modelována s ohledem na ztráty, které na ní resp. díky ní vznikají.

⁴ MUN – metoda uzlových napětí

vlastnosti navenek, tak i interními parametry dvojbranu (*prvky příčné a podélné větve*), které udávají fyzikální podstatu modelované komponenty. Záleží na působu pohledu na dvojbran.

Admitanční matice $\underline{\mathbf{A}}$ charakterizuje pasivní parametry dvojbranu. Pro zmíněnou matici $\underline{\mathbf{A}}$ platí, že téměř všechny mimo-diagonální prvky, které $\underline{\mathbf{A}}$ obsahuje, reprezentují nepropojené uzly – tyto prvky jsou nulové. Matice takového typu se označují za řídké. Výhodou řídkých matic je zabírání minimálního prostoru paměti, což na vede větší stabilitu algoritmů. Další výraznou výhodou je, že matice $\underline{\mathbf{A}}$ je symetrická podle diagonály – stačí ukládat např. horní trojúhelníkovou matici. Dolní pak lze získat výpočtem. Většina sítí je provozována paprskově. To rovněž pozitivně ovlivňuje celkový počet nulových prvků v $\underline{\mathbf{A}}$ směrem k řídkosti. Díky uvedeným vlastnostem docílíme vysoké rychlosti výpočtů a můžeme tak výsledný model považovat za real-time systém⁵.

Vysvětlení: Matice $\underline{\mathbf{A}}$ je jakýsi soubor řádků a sloupců. Každému uzlu v ES náleží jeden řádek a jeden sloupec v matici $\underline{\mathbf{A}}$. O některých kombinacích řádků a sloupců lze prohlásit, že jsou pouze možnou kombinací, nicméně tato kombinace není realizována – uzly nejsou spojeny. Takovéto nerealizované kombinace pak mají za následek nulovou hodnotu prvku v $\underline{\mathbf{A}}$.

Co se týče vhodné volby komponenty do náhradního schématu ES, je nutné, aby model složený z komponent skutečně reprezentoval fyzikální realitu v ES. Pro účely nahrazení vedení jsou společně s transformátory používány π -články. Generátory jsou charakterizovány pomocí uzlů typu **PU**. Spotřeba (*připojené zátěže*) pomocí typu **PQ**. Kompenzační prvky (*C nebo L*) jsou dvoj póly, které se zapojují paralelně k zemi a jsou charakterizovány **kompenzačním** uzlem.

Při používání uzlové metody rozlišujeme tyto druhy uzlů:

- **PQ** uzel – jsou známy výkony P a Q (zátěž)
- **PU** uzel – je znám výkon P a velikost napětí U (generátory, nadř.sít')
- **Kompenzační** – je znám výkon Q a velikost napětí U (kompezace)
- **Referenční** – je známá velikost napětí i jeho úhel (zvolený uzel)

PU označujeme takový uzel, na který je připojen generátor (*nutná podmínka*). Generátory jsou v tomto uzlu schopny zajistit přesnou hodnotu výkonu a napětí. To je hlavním důvodem pro označení těchto uzlů jako PU.

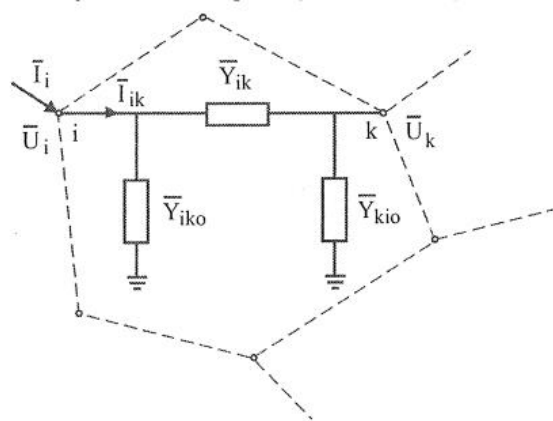
PQ označujeme uzel s připojenou zátěží. Hlavním důvodem pro označení těchto uzlů jako PQ je skutečnost, že jsme schopni za pomoci sofistikovaných statistických metod předpovědět hodnoty odebíraných výkonů P a Q pro tyto uzly. Nicméně existuje i více způsobů zadávání zátěže (*odběrů*), která může být definována jednotlivými kombinacemi parametrů P, Q, I, Z, $\cos\varphi$.

Referenční uzel neboli „**slack bus**“ je uzel, kde je úhel i velikost napětí pevně známa (*nastavena*). Všechna ostatní uzlová napětí vztahují svůj úhel napětí vůči úhlu napětí v tomto uzlu.

Tato kapitola byla vytvořena podle [4] [5] [6].

⁵ real-time systém – zpoždění mezi skutečnou a simulační hodnotou je minimální (probíhá v reálném čase)

1.1.2. Rovnice pro MUN a matici $\underline{\mathbf{A}}$



Obr. 1 – náhradní schéma π -článku (model pro odvození admitanční matice) [4]

Napětí a proudy v uzlech jsou zadány/počítány pomocí rovnic (1.1) (1.2). Ta identifikuje ve injektované všech uzlech proudy resp. fázová uzlová napětí. Matice $\underline{\mathbf{A}}$ resp. $\underline{\mathbf{Z}}$ charakterizují pasivní parametry dvojbranů v modelované síti. Je zřejmé, že je nutné nejdříve určit matici $\underline{\mathbf{A}}$.

$$\mathbf{I} = \underline{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{U}_f ; \quad \mathbf{U}_f = \underline{\mathbf{Z}} \cdot \mathbf{I} \quad (1.1) (1.2)$$

kde:

\mathbf{I} – vektor proudů injektovaných do uzlu	$\underline{\mathbf{A}}$ – uzlová admitanční matice (čtvercová)
\mathbf{U}_f – vektor fázových napětí pro uzly	$\underline{\mathbf{Z}}$ – uzlová impedanční matice (čtvercová)

Pro diagonální prvky výsledné admitanční matice platí následující odvozený vztah

$$A_{ii} = \sum_{k \neq i}^n (Y_{ik0} + Y_{ik}) \quad (1.3)$$

Mimodiagonální prvky admitanční matice jsou obdobně jako (1.3) odvozeny a platí tedy:

$$A_{ik} = -Y_{ik} ; \quad A_{ki} = -Y_{ki} \quad (1.4) (1.5)$$

Pomocí vztahů (1.3) (1.4) (1.5) bychom sestavili matici $\underline{\mathbf{A}}$. Demonstrace vytvoření matice $\underline{\mathbf{A}}$ bude pomocí rovnic (1.3) (1.4) (1.5) provedena až na příkladu v kap. 1.10 v rámci názornosti.

V případě potřeby je vždy možné určit matici $\underline{\mathbf{Z}}$ pomocí inverze matice $\underline{\mathbf{A}}$.

$$\underline{\mathbf{Z}} = \underline{\mathbf{A}}^{-1} \quad (1.6)$$

S každou rekonfigurací topologie sítě se generuje nová matice $\underline{\mathbf{A}}$. Jelikož matice $\underline{\mathbf{Z}}$ vychází z matice $\underline{\mathbf{A}}$, je pokaždé nutné provádět inverzi. Tato operce je výpočetně náročná. Z tohoto důvodu je patrné, že je výhodné pracovat s maticemi $\underline{\mathbf{A}}$.

Tato kapitola byla vytvořena podle [4] [5] [6].

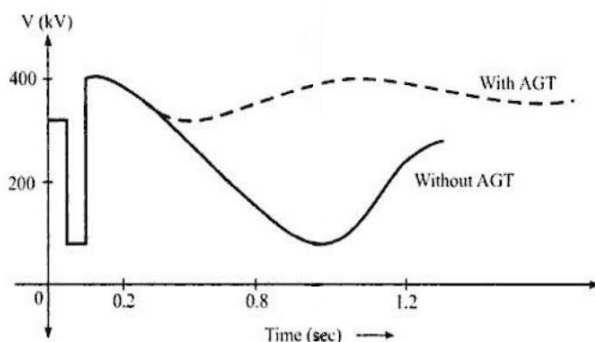
1.2. Výpočty v časové oblasti

Časté změny v topologii (*přepínání vypínačů apod.*), neustálá nevyváženost mezi dodávaným a odebíraným činným a jalovým výkonem kladou vysoké nároky na **ovládání** resp. **řízení** systému. Významnou roli hrají i přenosové limity jednotlivých komponent při nápravě poruchy.

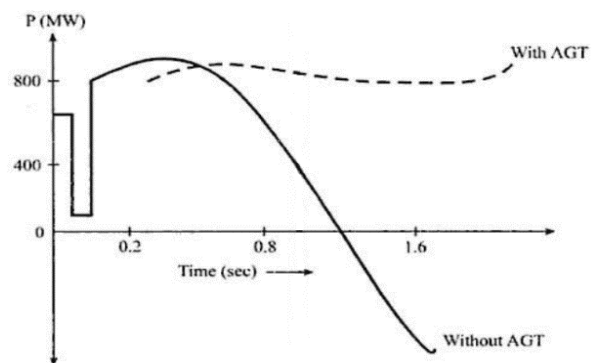
V případě chybně nastavených parametrů v řídicích systémech nebo v případě špatné součinnosti řídicích systému s ovládacími prvky se soustava může dostat za mez stability – tzn., že při přechodových dějích (*odpojování/připojování zátěží atd.*) v některých částech sítě může náhle poklesnout napětí, nebo naopak vzrůst nad stanovené **limity**. Takový scénář je nepřijatelný.

Napětí v síti musí splňovat určité kvalitativní požadavky. Pro hladinu **nn** je akceptovatelné napěťové rozmezí mezi **0,95-1,1** U_n . Pro hladiny **vn** a **vvn** (*mimo 400kV*) platí, že se napětí musí pohybovat v rozmezí od **0,9-1,1** U_n . Hladina **400kV** má být v rozmezí: **0,95-1,05** U_n .

Dosavadním trendem je potlačování vlivu přechodových jevů změnou parametrů generace. Tato metoda snižování dopadu přechodových jevů na síť se v anglické literatuře označuje jako **AGT**⁶. Ukázalo se, že se jedná o efektivní nástroj, který umožňuje zlepšení stability sítě po dobu přechodného děje. Dokáže totiž upravit dodávku činného výkonu tak, aby neklesala/nerostla frekvence. [6]



Obr. 2 – vlivu přech. dějů z hlediska napětí [6]



Obr. 3 – z hl. činného výkonu [6]

Pro výpočty přechodných jevů v elektrizační síti je možné použít speciální programy, které jsou schopné provádět výpočty a analýzu přechodových stavů. Mezi tyto softwary patří **Dynast**, **LTspice** či jiné další včetně **PSAT**. Výpočty v časové oblasti obnáší přípravu specifických dat, která nejsou potřeba např. pro výpočet ustáleného chodu soustavy.

Tato práce je zaměřena především na výpočty v **ustáleném stavu**, a tudíž v zájmu zachování přijatelného rozsahu se tato práce nebude již více zaměřovat na tuto problematiku.

⁶ AGT – automatic generation trip

1.3. Kabelová a Venkovní vedení

Vedení je základním kamenem jak PS⁷ tak DS⁸. Obecně vedení sestává z vodičů, izolačních materiálů či konstrukcí mezi dvěma body elektrické sítě resp. jejími uzly. Každý typ vedení má svá specifika z hlediska konstrukce.

Vedení dělíme na venkovní a kabelová. Pokud bychom porovnávaly některé jejich parametry, každé z těchto typů vedení má určité výhody i nevýhody. V praxi však platí, že tam kde se může použít venkovní vedení, tak tam se také použije a to zejména z peněžních důvodů. Výjimkou jsou sítě nn, kde je jasným trendem kabelizace. [7]

1.3.1. Venkovní

Venkovní vedení sestává z holých vodičů, které jsou vedeny vysoko nad terénem pomocí nosných stožárů. Vodiče jsou přichyceny ke stožárům pomocí izolátorů. Stožárů je několik druhů, přičemž jejich volba ovlivňuje některé elektrické parametry sítě. Přirozeně – vedení má mnoho typů ochran, která zajišťují ochranu jak proti přepětí, nadproudu, poklesu či vzestupu frekvence atd. [7]

Hladiny **220kV** a **400kV** jsou označovány jako přenosové, nebo také páteřní a zajišťují přenos elektrické energie ve velkých měřících od velkých zdrojů (*systemové elektrárny*) k rozvodnám. Zároveň slouží k propojení se zahraničními sítěmi (*zdroji*). Na přenosovou soustavu jsou kladeny velké nároky z hlediska spolehlivosti, a proto je nutné ji provozovat jako okružní, ačkoliv to sebou nese některá úskalí. [8]

Vedení **110kV** slouží k distribuci velkých výkonů z klíčových uzlů sítě (*el. stanice*) do míst s hustší koncentrací odběrů. Typicky města, či průmyslové zóny. Obvykle se provozuje jako okružní síť, ale může být i v provedení paprskové sítě.

Vedení **22kV**, **35kV** spadá do kategorie vn. S tímto typem venkovního vedení se primárně zásobují centra spotřeby jako například města či (*odlehlejší*) obce. Linky 22kV jsou vystavěny jako okružní (*zpravidla*), ale provozují se paprskově. Důvodem je snadnější identifikace poruchy a její rychlejší odstranění.

Vedení **0,4kV** - pokud je to možné, tak se v zástavbách používají kabelová vedení a venkovní vedení je spíše alternativou. Používají se v malých obcích s řídkou zástavbou u síťových výběžků, či samot. [7]

Pozn.: Napěťové úrovně vedení a jejich celk. délka v ČR: vedení 400 kV: 3 619 km; vedení 220 kV: 1 942 km; vedení 110 kV: 13 500 km; vedení vn: 76 500 km; vedení nn: 148 100km. [9]

⁷ PS – přenosová (páteřní) síť

⁸ DS – distribuční síť

1.3.2. Kabelová

Kabelová vedení mají své výhody jako: 100% ochrana před bleskem, nižší prostorová náročnost atd. Z hlediska nevýhod je nutno podotknout, že při vzniku poruchy v kabelových vedeních zpravidla dochází k trojfázové poruše, protože buď porucha vznikla na jedné fázi, může se snadno poškodit ochranná izolace, což může vést na třífázový zkrat. Kabelové vodiče mají přibližně 10x větší kapacitu, než je tomu u venkovního vedení. Výhody a nevýhody se prolínají a je zapotřebí zvolit vhodnou variantu na základě konkrétní situace.

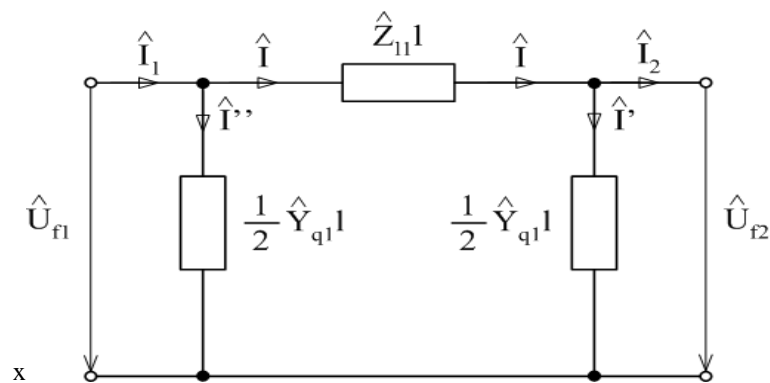
Kabelové linky **110kV** se nemohou stavět kdekoliv. Je zapotřebí brát v potaz podloží resp. terén. Můžeme se s nimi setkat v oblastech, kde je potřeba dodat velký výkon – obvykle průmyslové oblasti a velká města.

Kabelová vedení **sítí vn** jsou hojně zastoupena v rozvodech ve velkých městech, protože není přípustná výstavba venkovního vedení. Kabelové sítě 22kV se nejčastěji provozují jako okružové.

Kabelové rozvody v sítích **nn** jsou nejpoužívanější variantou vedení. Důvodem kabelizace sítí nn jsou nízké pořizovací náklady na kabel – není rozdíl mezi venkovním a kabelovým vedením nn z hlediska ceny. [7]

1.3.3. Náhradní schéma

Pro účely matematického popisu venkovních elektrických vedení se nejčastěji používá tzv. π -článek. Jedná se o dvojbran, který charakterizuje parametry vedení pomocí prvků, které jsou v něm umístěné.



Obr. 4 – náhradní schéma vedení (π -článek) [10]

V podélné větvi je naznačen prvek \mathbf{Z} , pod nímž se skrývá je do série umístěna rezistance a induktivní reaktance. Rezistance charakterizuje činný odpor R vodiče, zatímco induktivní reaktance X_L jeho celkovou indukčnost. Násobí se délkou vedení (*dvojbran se soustr. par.*)

V π -člátku jsou přítomny také dvě příčné větve $\frac{1}{2}\mathbf{Y}$, přičemž každá z nich sestává z paralelní kombinace kapacity C a svodu G . Odpor reprezentuje svod vedení a kapacita odpovídá celkové kapacitě vedení. Admittance příčné větve je dělena dvěma, protože dvojbran má celkem dvě příčné větve. [4]

1.3.4. Tabulkové parametry pro kabelová a venkovní vedení

Pro účely výpočtu jak kabelových, tak venkovních vedení bylo vybráno několik typů vodičů, které se pro jednu napěťovou hladinu odlišují pouze **průřezem**. Pro kabely je uvažováno uložení vedle sebe v zemi – transponované. Pro venkovní vedení je uvažováno symetrické rozložení vodičů, nebo transponované.

Kabely mají jistou nevýhodu v tom, že je třeba pro každý typ vypočítat jejich „elektrické parametry na kilometr“ – důvodem je obrovské množství typů kabelů. V praxi se používá mnoho variant, a tudíž je obtížné sehnat konkrétní tabulkovou hodnotu pro daný typ kabelu. V případě lan AIFe je situace příznivější. Není zde mnoho faktorů, které by odlišovaly jednotlivé typy AIFe lan. Tabulkové hodnoty jsou tedy snadněji k získání.

Pro hladiny nn byly vybrány nejčastěji používané kabely **AYKY** a **CYKY**. Pro hladinu vn často používané **AXEKVCEY** a **CXEKVCEY**. Pro hladinu 110kV byly vybrány kabely typu **AI XLPE**. Pro hladiny 220/400kV jsou uvedeny pouze vodiče **AIFe 4**, mimo kabely – důvodem je prakticky neexistence kabelizace vedení nad hladinu 110kV.

Tabulky pro vzdušné a kabelové vedení:

Tab. 1 – základní elektrické parametry nn – kabelová/venkovních vedení [11] [12]

		AYKY			CYKY			AIFe		
Napětí Un	(kV)	0,4			0,4			0,4		
Průřez vodiče fáze S	(mm ²)	70	95	120	70	95	120	70	95	120
Odpor R	(Ω.km ⁻¹)	0,513	0,378	0,299	0,269	0,198	0,157	0,501	0,369	0,271
Reaktance X	(Ω.km ⁻¹)	0,073	0,071	0,069	0,256	0,254	0,249	0,279	0,270	0,260

Tab. 2 – základní elektrické parametry vn – kabelová/venkovních vedení [11] [12]

		AXEKVCEY			CXEKVCEY			AIFe 6		
Napětí Un	(kV)	22			22			22		
Průřez vodiče fáze S	(mm ²)	120	185	240	120	185	240	70	95	110
Odpor R	(Ω.km ⁻¹)	0,253	0,164	0,125	0,153	0,099	0,075	0,434	0,319	0,259
Reaktance X	(Ω.km ⁻¹)	0,62	0,59	0,58	0,62	0,59	0,58	0,377	0,373	0,36
Kap. provozní Cp	(μF.km ⁻¹)	0,24	0,28	0,30	0,24	0,28	0,30	0,0096	0,0098	0,010

Tab. 3 – základní elektrické parametry vn – kabelová/venkovních vedení [11] [12]

		AXEXCY		AlFe 6	
Napětí Un	(kV)	35		35	
Průřez vodiče fáze S	(mm ²)	70	240	70	240
Odpor R	(Ω.km ⁻¹)	0,433	0,125	0,434	0,1181
Reaktance X	(Ω.km ⁻¹)	0,141	0,116	0,377	0,4057
Kap. provozní Cp	(μF.km ⁻¹)	0,14961	0,21963	0,009613	0,009067

Tab. 4 – základní elektrické parametry 110kV – kabelová/venkovních vedení [11] [12]

		Al XLPE			AlFe 6		
Napětí Un	(kV)	110			110		
Průřez vodiče fáze S	(mm ²)	630	240	800	185	2x185	2x240
Odpor R	(Ω.km ⁻¹)	0,062	0,156	0,0489	0,156	0,156	0,122
Reaktance X	(Ω.km ⁻¹)	0,116	0,132	0,113	0,404	0,400	0,388
Kap. provozní Cp	(μF.km ⁻¹)	0,23873	0,13051	0,25147	0,009	0,0091	0,0094

Tab. 5 – základní elektrické parametry 220/400kV – kabelová/venkovních vedení [11] [12]

		AlFe 4	AlFe 4
Napětí Un	(kV)	220	400
Průřez vodiče fáze S	(mm ²)	350	3x350
Odpor R	(Ω.km ⁻¹)	0,085	0,0283
Reaktance X	(Ω.km ⁻¹)	0,384	0,314
Kap. provozní Cp	(μF.km ⁻¹)	0,0095	0,0117

Možná zjednodušení pro uvedené napěťové hladiny:

- Zjednodušení pro **220kV** a **400kV** - $G \ll B$ zároveň $R \ll X$
- Zjednodušení pro **110kV** - $G \ll B$
- Zjednodušení pro **vn** (22kV) - $G \ll B$
- Zjednodušení pro **nn** (0,4kV) - $R \gg X$

Pro venkovní vedení o hladině 220kV a 400kV je možné zanedbat parametry odporu z náhradního schématu, jelikož platí, že $R \ll X$. Se snižující se napěťovou hladinou význam odporu nabývá na důležitosti. Již od napětí 110kV je nutné zvažovat, zdali je zanedbání odporu vhodné. Svod G je až na hladinu nn zanedbáván. [4] [7]

1.4. Transformátory

Transformátor je elektrický netočivý stroj, který funguje na principu elektromagnetické indukce. Slouží k přenosu elektrické energie mezi dvěma obvody, přičemž nutnou podmínkou je harmonický (*střídavý*) průběh proudu. Na transformátorech, ačkoliv se jedná o netočivé stroje, vznikají ztráty. Rozdělují se na ztráty v železe a ztráty ve vinutí.

Ztráty v železe ΔP_{Fe} jsou označovány jako ztráty naprázdno ΔP_0 . Ztráty naprázdno jsou dány ztrátami vířivých proudů a hysterezními ztrátami. Jejich vznik je dán neustálou změnou mag. toku. Tyto ztráty jsou nezávislé na zatížení – budou vždy přítomné a prakticky konstantní.

Ztráty ve vinutí ΔP_{Cu} nebo také ztráty nakrátko ΔP_K vznikají průchodem proudu skrze vinutí, které se díky tomu otepluje. Ztráty nakrátko pro jednu fázi jsou rovny $R_{Cu}I^2$. Je zřejmé, že tyto ztráty záleží na zatížení (*proudem*) a jsou proměnné. [7]

Pro určení jednotlivých prvků náhradního schématu je zapotřebí obdržet některé specifické informace o transformátoru, aby bylo možné jasně určit jednotlivé prvky, ze kterých sestává T-článek (*poté se přepočítává buď na π - nebo γ -článek*). Seznam potřebných informací:

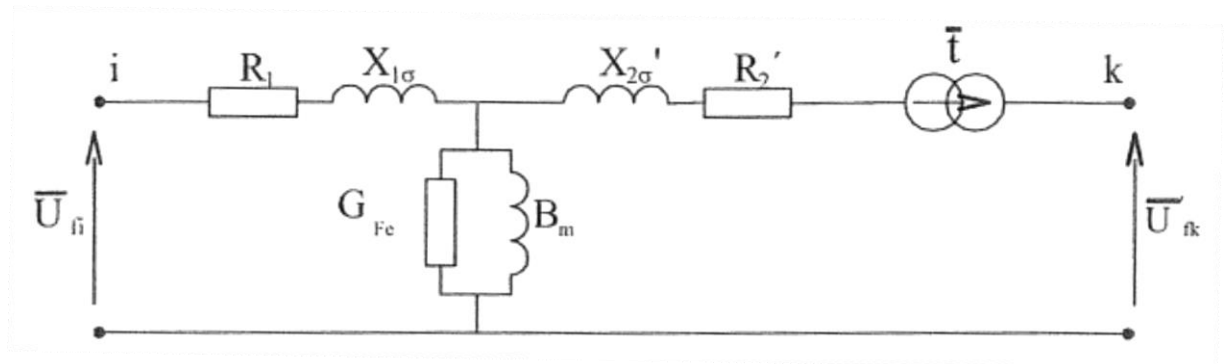
- Jmenovitý výkon – S_n (MVA)
- Napětí nakrátko – u_k (%)
- Napětí naprázdno – i_0 (%)
- Ztráty nakrátko – ΔP_{kn} (kW)
- Ztráty naprázdno – ΔP_0 (kW)
- Zapojení vinutí – *Hodinové číslo společně se sch. zap. všech fází*
- Převod transformátoru – *Jm. převod transf. s inf. o reg. rozsahu odboček*

Napětí nakrátko U_k je takové napětí na vstupní straně transformátoru, které svojí velikostí protlačuje jmenovitý proud I_n transformátorem, přičemž výstup je spojen nakrátko (*zkratován*). Napětí nakrátko se obvykle udává v poměrných jednotkách $u_{k\%}$ (*procentních*) vztahených vůči jmenovitému napětí. Napětí nakrátko zejména popisuje transformátor z hlediska impedančních poměrů, přičemž s téměř minimální chybou lze tvrdit, že impedance $Z_T \doteq X_T$.

Proud naprázdno I_0 je udáván v poměrných jednotkách $i_{0\%}$. Určuje chování transformátoru ve stavu naprázdno a to sice jaký proud transformátor spotřebovává, aniž by dodával jakýkoliv výkon. Určuje se rozpojením proudové cesty na výstupu s tím, že na vstupu je napětí jmenovité. Výsledný proud naprázdno je dán parametry a konstrukcí transformátoru. Modernější transformátory mohou mít i méně než 1%. Se stavem nakrátko jsou spojené některé další problémy jako např. pokles účinnosti atd.

Převod je definován při stavu naprázdno a je dán poměrem mezi stranou vyšší a nižší napěťové hladiny. Při připojení zátěže se na výstupní straně napětí sníží vlivem ztrát. Z toho důvodu jsou transformátory vybaveny odbočkami, které mohou zvýšit či snížit skutečný počet závitů a tím také napěťové poměry. Pro transformátory vvn/vn jsou odbočky nejčastěji řešeny automaticky to sice $\pm 8 \times 2\%$ od střední odbočky – ta odpovídá jmenovitému převodu. Transformátory vn/nn mají manuální regulaci odboček a to buď $\pm 2 \times 2,5\%$ nebo hruběji $\pm 2 \times 5\%$. [7] [13]

1.4.1. Náhradní schéma



Obr. 5 – Náhradní schéma transformátoru [4]

Pro účely popisu transformátoru se nejčastěji používá tzv. T-článek. Jedná se o dvojbran, který charakterizuje chování transformátoru. T-článek má dvě podélné větve, ve kterých se nacházejí odpory vinutí R_1 a R_2' a rozptylové reaktance transformátoru X_1 a X_2' . Odpory vinutí reprezentují činný odpor vinutí cívek transformátoru. Rozptylové reaktance charakterizují rozptylový magnetický tok, resp. ztráty, které jsou s ním spojené.

V příčné větvi se nalézá paralelní kombinace odporu železa R_{Fe} a magnetizační indukčnosti X_μ . Odpor železa odpovídá ztrátám v železe, které se skládají ze ztrát hysterezních a ztrát vířivými proudy. Magnetizační proud I_μ , který je dán velikostí indukčnosti příčné větve X_μ a zastupuje ztráty způsobené magnetickým tokem, který se uzavírá napříč magnetickým obvodem.

Prvky sekundární strany musí být **přepočteny** na hladinu napětí **uzlu i**. K tomu se používá převod transformátoru p_n (ve schématu označen „ t “). Pro účely modelování ES je zapotřebí přepočítat T-článek na π -článek, což je triviální operace, která je snadno proveditelná, pokud známe parametry T-člátku. [7] [13]

Tab. 6 – přehled používaných transformátorů v ČR⁹

S_n	[MVA]	0,25	0,40	0,40	25	40	63	250
p	(-)	22/04	22/04	35/04	110/23/6,3	110/23/6,3	110/36,75	400/121
u_k	(%)	6	6	6	9	9	10,5	12,5
i_0	(%)	1,8	1,5	1,5	2	1,8	2	1,6
ΔP_{kn}	(kW)	4,4	5,3	5,0	195	270	113	650
ΔP_0	(kW)	0,8	1,1	1,65	51	72	49	110

Pozn.: Počet transformátorů v ČR: 400/110 – 46; 400/220 – 4; 220/110kV – 21; 110/vn – 630; vn/vn – 67620. [9]

Text této kapitoly byl mimo uvedené citace (zdroje) rovněž vytvořen podle [4] [5].

⁹ EL-INSTA ENERGO s.r.o. – katalog transformátorů

1.5. Generátory

Synchronní generátor je točivý stroj fungující na principu elektromagnetické indukce. Je to točivý stroj, který se ve světě obvykle používá ke generování elektrické energie. Důvodem je jeho **vysoká účinnost** – pro velké stroje v systémových elektrárnách až **98-99%**. Skládá se ze dvou částí: stator a rotor (*příp. budič*).

Stator je vyroben z elektromagnetických plechů, které eliminují vliv vířivých proudů. Jeho součástí je také střídavé vinutí uložené do drážek. Rotor je ta část motoru, která je posazena na hřídel a společně s ní rotuje. Vinutí rotoru je buzené stejnosměrným proudem přes kroužky a kartáče. Buzení je nejčastěji zajištěno z cizích zdrojů – např. pomocí výkonových usměrňovačů.

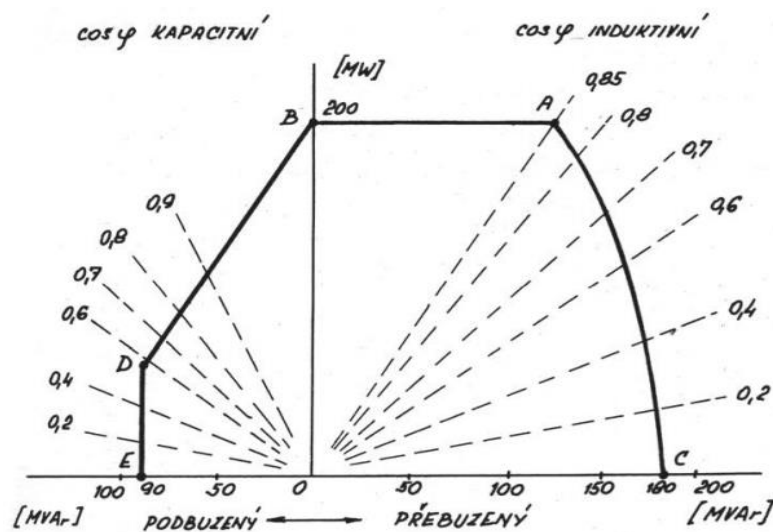
Vlivem vnější síly, která působí na hřídel, se začne rotor otáčet. Pohybující se vybuzený rotor indukuje napětí v závitech statorového vinutí. Velikost indukovaného napětí ve statoru závisí na buzení rotoru. Mechanické otáčky udávají frekvenci napětí a zároveň určují činný výkon stroje. [14]

Základní elektrické parametry, které je potřeba obdržet pro výpočty elektrických sítí jsou:

- Zdánlivý výkon generátoru - S_g (MVA)
- Jmen. napětí generátoru - U_g (kV)
- Účinník generátoru při chodu - $\cos\varphi$ (-)
- Hodnota rázové reaktance - x_d'' (-)

Informace ohledně dodávaného komplexního výkonu jsou dány/určeny/podmíněny mnoha parametry, mezi které patří např.:

- Oteplení statorového vinutí
- Oteplení rotorového budičového vinutí
- Oteplení magnetického jha statoru “železa”
- Oteplení tělesa rotoru
- Statická stabilita alternátoru



Obr. 6 – pracovní rozmezí synronního stroje jako generátoru [15]

Ve fázorovém diagramu je znázorněna hranice, po které se lze pohybovat tak, aby nedošlo k překročení žádných z mezních limitů stroje. Uvedený diagram nám dává informaci jak o výkonových poměrech, tak i o $\cos \varphi$, což jsou klíčové parametry pro další výpočty elektrické soustavy. V praxi je zatížení sítí proměnné a tudíž i parametry generace musí být do určité míry flexibilní.

Většina softwarů nabízí pouze nastavení mezních parametrů (regulace) pro daný generátor:

- Pmax
- Pmin
- Qmax
- Qmin

Tato kapitola vychází mimo uvedené citace (zdroje) také z [4] [9] [15].

1.6. Nadřazená síť

Při standardních výpočtech ustáleného stavu (*popř. i poruchového stavu*) se mnohdy setkáváme s případem, kdy jsou do modelované sítě připojeny nejen generátory, ale i tzv. nadřazená síť. Nadřazená síť nám simuluje připojení k vyšší napěťové hladině. Obvykle se jedná o PS (*přenosová síť*). V některých případech se může jednat o jinou než přenosovou síť, ale téměř výhradně se jedná o simulování spoje se zbytkem (*nadřazené*) soustavy. Síť nižšího napětí se pak projevují jako odběry resp. zátěž.

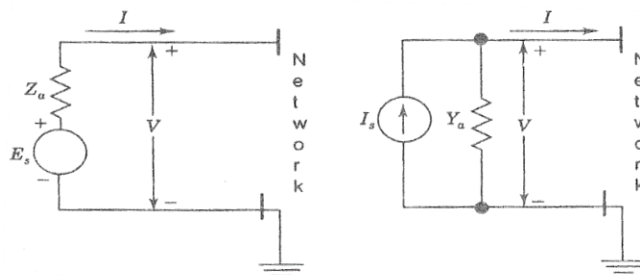
$$I_k'' = \frac{U_{výp}}{Z_s} \doteq \frac{U_{výp}}{X_s} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot X_s} \quad (1.7)$$

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k'' \quad (1.8)$$

Standardně se při výpočtech impedance sítě zanedbává odpor. Pokud je ale potřeba uvažovat i odpor, který je $R \ll X$, můžeme vyjít z tab. 7., kde je vyznačeno, jaký poměr z celkové impedance Z tvoří odpor R a reaktance X . V případě výpočtu reaktance nadřazené soustavy vycházíme z rovnice (1.7) kde:

$$Z_s \doteq X_s = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k''} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k''} \quad (1.9)$$

V levé části obrázku je nadřazená síť charakterizována pomocí napěťového zdroje, zatímco v pravé části je naznačeno nahrazení nadřazené sítě pomocí zdroje proudového.



Obr. 7 – náhradní schéma nadřazené soustavy pomocí zdroje napěťového resp. proudového [4]

Tab. 7 – charakteristické údaje pro jednotlivé napěťové úrovně přenosové a distribuční sítě [16]

U_n [kV]	I_k^{cc} (kA)	S_k^{cc} (GVA)	ΔU (%)	S_z (MVA)	S_p (MVA)	R (Ω)	X (Ω)
400	40 – 60	27,7 - 42	± 5	1250	550	0,10.Z	0,995.Z
220	20 – 30	7,6 - 11,5	± 10	250	150	0,10.Z	0,995.Z
110	14 – 29 (2x Tr)	2,7 - 5,5	± 10	90	30	0,10.Z	0,995.Z
110	9 – 15 (1x Tr)	1,7 - 2,9	± 10	90	30	0,10.Z	0,995.Z
22	15	0,57	+10 / -5	10	1,2	0,16.Z	0,987.Z
0,4	2 – 40	1,4 - 27,7	± 5	0,3 (pro 240mm ²)	-	0,30.Z	0,954.Z

kde:

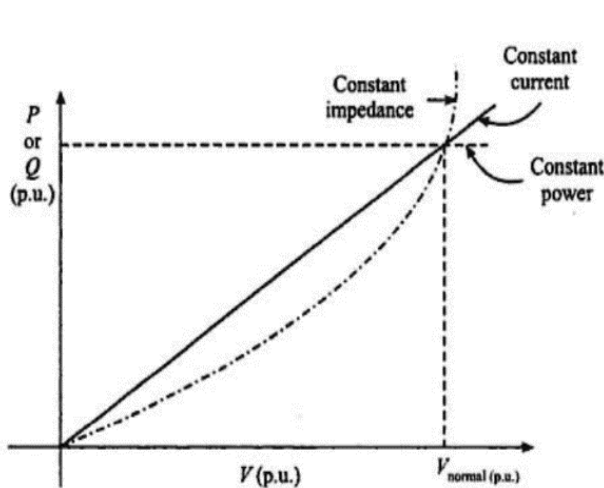
 I_k^{cc} – rázový zkratový proud S_k^{cc} – zkratový výkon sítě U_n – jmenovité napětí sítě ΔU – meze napětí S_p – přirozený výkon X_s – celková reaktance soustavy c – činitel zohledňující horní mez dovoleného napětí soustavy S_z – zatěžovací výkon

Text této kapitoly byl vytvořen podle [6] [9] [16].

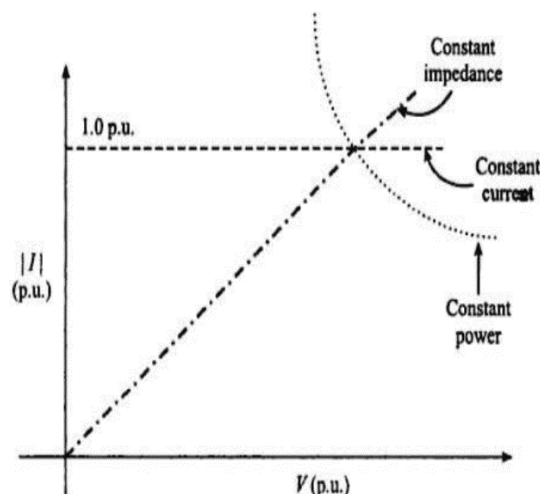
1.7. Připojovaná zátěž

Křivka spotřeby (*zatížení*) je parametrem, který nelze jednoduše vědecky popsat. Velikost zátěže se mění v čase a jen velmi obtížně lze přesně určit tuto hodnotu. Proto se využívá pokročilých statistických metod za účelem predikce zatížení pro určitá denní, týdenní či roční období. Charakteristické způsoby zadávání zátěže pro výpočty na ES:

- a) P, Q b) $P, \cos\varphi$ c) $I, \cos\varphi$ d) $S, \cos\varphi$ e) I, P f) Z



Obr. 8 – PU charakteristika zátěží [6]



Obr. 9 – IU charakteristika zátěží [6]

1.7.1. Zátěž s konstantní velikostí proudu

Tento typ zátěže uvažuje/předpokládá konstantní hodnotou proudu. Úhel θ je považován za konstantní, zatímco fázor napětí U může být proměnný. Tomuto typu zátěže odpovídají např. zářivky.

$$I = \frac{P-jQ}{U^*} = |I|_{\perp}(\delta - \theta) \quad ; \quad \theta = \tan^{-1} \frac{Q}{P} = \text{konst.} \quad (1.10)$$

$$\delta = \tan^{-1} \frac{Q}{P} \quad ; \quad U^* = |U|_{\perp}(\delta) \quad (1.11)$$

1.7.2. Zátěž o konstantním výkonu

Tato zátěž je specifikována jejím MW (*činným výkonem*) a MVA (*zdánlivým výkonem*). Předpokládá se, že uvedené výkony jsou neměnné – konstantní. Tento typ zátěže je charakteristický pro indukční motory.

1.7.3. Zátěž o konstantní impedanci

Zátěž tohoto typu je dána MW (*činným výkonem*) a MVA (*zdánlivým výkonem*) při jmenovitém napětí, kde se impedance Z předpokládá za konstantní $I = \frac{U}{Z}$. Mění se pouze proud v závislosti na napětí. Zátěž takovéto kvality je přiřazována ohřivačům, topným tělesům, různé domácí typy zátěží a žárovky.

Text této kapitoly byl vytvořen podle [3] [6].

1.8. Kompenzační prvky

Tlumivky se v trojfázové soustavě používají zejména pro kompenzaci. Tlumivka může být zapojena do série či paralelně, přičemž existuje více typů tlumivek. Liší se konstrukčním uspořádáním, či možností regulace. Dimenzování izolace rovněž závisí na zapojení tlumivky. Způsoby výpočtu reaktance paralelně zapojené tlumivky je proveden níže.

Kondenzátory, které bývají často označovány jako kondenzátorová baterie, jsou nástrojem pro kompenzaci induktivního výkonu.

1.8.1. Tlumivky zapojené paralelně

Tlumivky mají vzhledem ke své konstrukci téměř zanedbatelný odpor v poměru s jejich induktivní reaktancí $R_t \ll X_t$, proto při zanedbání rezistence platí vztah (pro 3x tlumivka-zem):

$$X_t = \frac{U_{tN}}{\sqrt{3}I_{tN}} = \frac{U_{tN}^2}{Q_{tN}} \quad (1.12)$$

kde: U_{tN} – sdružené napětí sítě I_{tN} – proud fází
 Q_{tN} – kompenzovaný výkon X_t – reaktance tlumivky

V izolovaných soustavách vysokého napětí (6 – 35kV) se využívá zhášecích tlumivek pro

snížení kapacitního proudu tekoucí zemí při poruše – zemní spojení. Zemní spojení je porucha, která se objevuje v izolovaných soustavách, kdy se vodič fáze, vlivem porušení izolace či jiné eventuality, spojí se zemí. Standardně se tento proud uzavírá přes provozní kapacity vedení jednotlivých fází a má tudíž kapacitní charakter. Připojením zhášecí tlumivky je možné zmírnit následky poruchy. Zhášecí tlumivky se připojují mezi uzel transformátoru a zem. Paralelní typ tlumivky je téměř vždy proměnný, čili je možné regulovat velikost indukčnosti při zemním spojení. Velikost připojované indukčnosti závisí na rozsáhlosti sítě.

Reaktance zhášecí tlumivky (*jedna celková tlumivka*) je specifikována na základě: jmenovitého (*sdrúženého*) napětí sítě a zdánlivým výkonem všech tří fází S_{tn} .

$$X_t = \frac{U_n^2}{3S_{tn}} \quad (1.13)$$

1.8.2. Kondenzátory zapojené paralelně

S paralelně zapojenými kondenzátory se můžeme setkat hlavně v sítích do 1kV, kde kompenzují účinník. Objevují se i na vyšších napětíových hladinách, ale pouze ojediněle.

Kondenzátorovou baterii lze zapojit do trojúhelníka či do hvězdy. Třífázový výkon pro daná zapojení:

$$Q_{CD} = 3 \cdot Q_f = 3 \cdot (U \cdot I_C) = 3 \cdot U^2 \omega C_D \quad (1.14)$$

$$Q_{CY} = 3 \cdot Q_f = 3 \cdot (U_f \cdot I_C) = U^2 \omega C_Y \quad (1.15)$$

kde: C_D – kapacita při zapojení do trojúhelníka C_Y – kapacita při zapojení do hvězdy
 I_C – proud kondenzátorem

Výpočet reaktance paralelně zapojeného kondenzátoru je dána napětím sítě U_n a vypočteným výkonem Q :

$$X_c = \frac{U_n^2}{Q_c} \quad (1.16)$$

Tato kapitola byla vytvořena podle [4].

1.9. Převod do poměrných jednotek

Převod do poměrných jednotek lze chápat jako podíl dvou veličin stejného typu. V literatuře se hodnota, ke které vztahujeme, označuje jako **základní**, **základ** nebo **vztažná**. Pakliže dělíme libovolnou hodnotu veličiny vztažnou hodnotou téže veličiny, výsledkem je vždy bezrozměrné číslo, které charakterizuje poměr mezi těmito veličinami. Tento poměr, nebo podíl se nazývá převod do poměrných jednotek. Výsledný podíl se označuje se **malým písmenem** příslušné veličiny (*např. napětí U [V] se po převodu do poměrných jednotek dále označuje jako u [-]*).

Přepočet impedancí na jednu napěťovou hladinu je nezbytné jak pro výpočty ustáleného, tak poruchového stavu. **Bezrozměrnosti** se např. výhodně využívá při výpočtech elektrických sítí, kde transformátor, jakožto transformační prvek, má napětí na vstupní i výstupní straně řádově v jiných velikostech (*transformace napětí*). Pokud bychom vyjádřili vstupní a výstupní napětí pomocí poměrných jednotek, lze se tím **vyhnout** některým **komplikacím** spojeným s převodem transformátoru a v případě numerických metod tak zjednodušit některé výpočetní algoritmy. Mimo to existuje i celá řada dalších výpočetních vzorců, ve kterých figurují veličiny v poměrných jednotkách (*napětí nakrátko, rázová reaktance generátoru apod.*). [5]

Za základní, základ resp. vztažnou veličinu se v energetice nejčastěji přijímají tyto:

- Základní (vztažný) výkon S_v (MVA)
- Základní (vztažné) napětí U_v (kV)

V praxi se jako výkonový základ volí tyto hodnoty: 1, 10, 100 a 1000 MVA. Pro výkony však nejčastěji **100MVA**. Pro napětí se za vztažný základ používá jmenovité napětí konkrétní napěťové hladiny. [4] [14]

Výkony P , Q resp. S můžeme převést do poměrných jednotek následujícím způsobem:

$$p = \frac{P}{S_v} ; q = \frac{Q}{S_v} ; s = \frac{S}{S_v} \quad (1.17) (1.18) (1.19)$$

Napětí U můžeme rovněž převést do poměrných jednotek. Jako základ se obvykle volí jmenovitá hodnota vybrané napěťové hladiny, pro kterou se momentálně provádí výpočet:

$$u = \frac{U}{U_n} \quad (1.20)$$

Impedance se vztahují vůči vztažným impedancím. Admittance vůči vztažným admittancím.

$$z = \frac{Z}{Z_v} ; y = \frac{Y}{Y_v} \quad (1.21) (1.22)$$

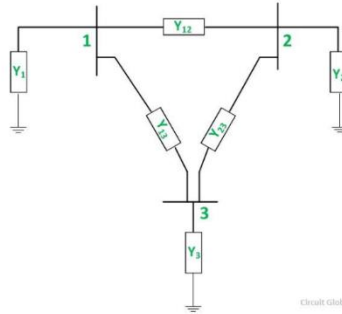
Veškeré impedance se musí převést do poměrných jednotek. Každá napěťová hladina má svoji vztažnou impedanci, která vychází ze jmenovitého napětí konkrétní hladiny U_n a vztažného výkonu S_v . Vztažná impedance Z_v je definována pro každou napěťovou hladinu zvlášť. Prvky dané napěťové hladiny jsou vztaženy vůči Z_v , čímž jsou převedeny do poměrných jednotek.

$$Z_v = \frac{U_n^2}{S_v} \quad (1.23)$$

1.10. Příklad určení matice **A** pomocí MUN

Zadání vzorového příkladu: (sestrojení admitanční matice)

Vedení vvn 110kV AlFe6 185mm² l = 50km R_{km} = 0,156Ω.km X_{km} = 0,404Ω.km C = 5,1μF.km



Obr. 10 – systém tří přípojníc [17]

Na obrázku je zobrazen systém tří přípojníc, propojených způsobem: okružní síť. Mezi jednotlivými uzly se nachází venkovní vedení 110kV s výše popsány parametry. Pro jednoduchost platí, že **všechna** venkovní vedení jsou **identická** (stejná délka, průřezy atd.).

Uvažujeme i příčné admittance v rámci řešení tohoto příkladu. Pro náhradu vedení bude použit standardně π -článek.

Jelikož jsou všechna vedení identická, jejich podélná impedance je také identická a lze tedy zjednodušeně počítat s impedancí Z_{ik} . Výpočet podélné admittance vychází ze znalosti odporu a rektance vedení na km. Hodnotu podélných admitancí pak lze charakterizovat stejným Y_{ik} .

$$Z_{12} = Z_{23} = Z_{31} = Z_{ik} \rightarrow Y_{12} = Y_{23} = Y_{31} = Y_{ik} \quad (1.24) \quad (1.25)$$

$$Y_{ik} = \frac{1}{R_{km} \cdot l + jX_{km} \cdot l} = \frac{1}{(0,156 \cdot 100 + j0,404 \cdot 100)} =$$

$$= (0,008317 + j0,021541) \Omega \quad (1.26)$$

Pro všechny tři vedení jsou **příčné admittance** taktéž **stejně** velké. Uvažujeme tedy pouze Y_{ik0} . Reálná složka příčné admittance (*svod*) je zanedbána. Pro výpočet Y_{ik0} stačí znát pouze kapacitu.

$$Y_1 = Y_2 = Y_3 = Y_{ik0} \quad (1.27)$$

$$Y_{ik0} = jB_{ik0} = j\omega C = j(0,001602) \Omega \quad (1.28)$$

Rozměr matice \underline{A} je dán **počtem přípojníc** analyzovaného systému. V našem případě se bude jednat o matici typu 3x3 protože máme 3 přípojnice. Ze vztahů (1.3) a (1.4) (1.5) poskládáme jednotlivé prvky matice \underline{A} v závislosti na jejich pozici v matici.

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} Y_1 + Y_{12} + Y_{13} & -Y_{12} & -Y_{13} \\ -Y_{12} & Y_2 + Y_{12} + Y_{23} & -Y_{23} \\ -Y_{13} & -Y_{23} & Y_3 + Y_{13} + Y_{23} \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

Dosazením a vyčíslením admitanční matice (I.29) získáme matici (I.30), která je určena na základě znalosti jednotlivých prvků admitanční matice – viz. (I.26) a (I.28).

$$\underline{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 0,03327 - 0,16627i & -0,01664 + 0,04308i & -0,01664 + 0,04308i \\ -0,01664 + 0,04308i & 0,03327 - 0,16627i & -0,01664 + 0,04308i \\ -0,01664 + 0,04308i & -0,01664 + 0,04308i & 0,03327 - 0,16627i \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

Nastavením vztažného výkonu $S_v = 100\text{MVA}$ nám umožňuje určit velikost vztažné impedance. Konkrétně pro hladinu napětí 110kV. Ze vztažného výkonu S_v se vypočítá velikost vztažné impedance/admittance. Vůči hodnotě Y_v je nyní možné **vztahovat** veškeré admittance na 110kV.

$$Z_v = \frac{U_n^2}{S_v} = \frac{(110 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 10^6} = 121 \Omega ; Y_v = \frac{1}{Z_v} = \frac{1}{121} = 0,0082645 \Omega \quad (1.31) (1.32)$$

Převodění **podélné** admittance do poměrných jednotek provedeme dělením vztažnou admittancí.

$$y_{ik_{pu}} = y_{12_{pu}} = \frac{Y_{12}}{Y_v} = \frac{0,008317 + j0,021541}{0,0082645} = (2,012881 - j5,212848) pu \quad (1.33)$$

Převodění **příčné** admittance do poměrných jednotek provedeme dělením vztažnou admittancí.

$$y_{ik0_{pu}} = y_{1_{pu}} = \frac{Y_1}{Y_v} = \frac{j0,001602}{0,0082645} = -9,693384 pu \quad (1.34)$$

Převod $\underline{\mathbf{A}}$ do pom. jednotek proběhne dosazováním prvků (I.33) a (I.34) do matice (I.29).

$$\underline{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 4,0258 - 20,119i & -2,0129 + 5,2129i & -2,0129 + 5,2129i \\ -2,0129 + 5,2129i & 4,0258 - 20,119i & -2,0129 + 5,2129i \\ -2,0129 + 5,2129i & -2,0129 + 5,2129i & 4,0258 - 20,119i \end{bmatrix} pu \quad (1.35)$$

Pozn.: Přepočtení parametrů vedení (prvků) do poměrných jednotek se zpravidla provádí na začátku úlohy. Další výpočty pak probíhají v poměrných jednotkách. V této kapitole byl ovšem zvolen opačný postup – přepočítání do poměrných jednotek je proveden až na závěr. Postup výpočtu admitanční matice je tak názornější.

Tato kapitola demonstruje, jakým způsobem se tvoří admitanční matice $\underline{\mathbf{A}}$. Díky znalosti admitanční matice $\underline{\mathbf{A}}$ je nyní možné začít určovat napěťové poměry v jednotlivých uzlech sítě. Je ovšem nutné obdržet/získat vektor proudů \mathbf{I} injektovaných do uzlů viz rovnice (I.1) (I.2).

Pro názornost byly v tomto ukázkovém příkladu **zanedbány** některé **triviální úpravy** či jiné následné dosazování tak, aby byl zejména vystižen princip tvorby matice $\underline{\mathbf{A}}$.

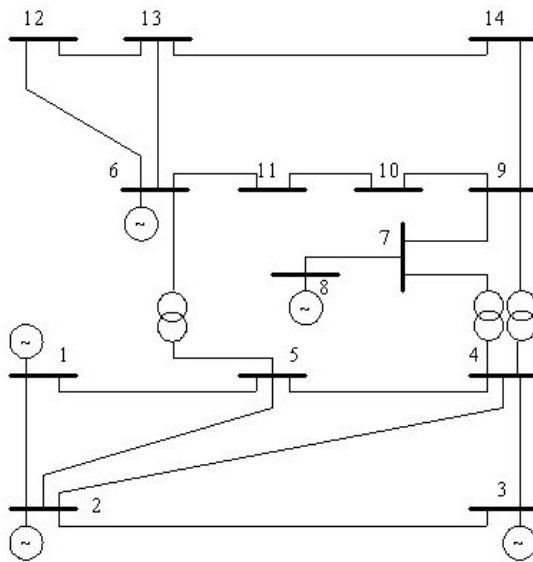
Tato kapitola vytvořena podle: [6] [14] [17] [18].

2. Vlastní testovací síť

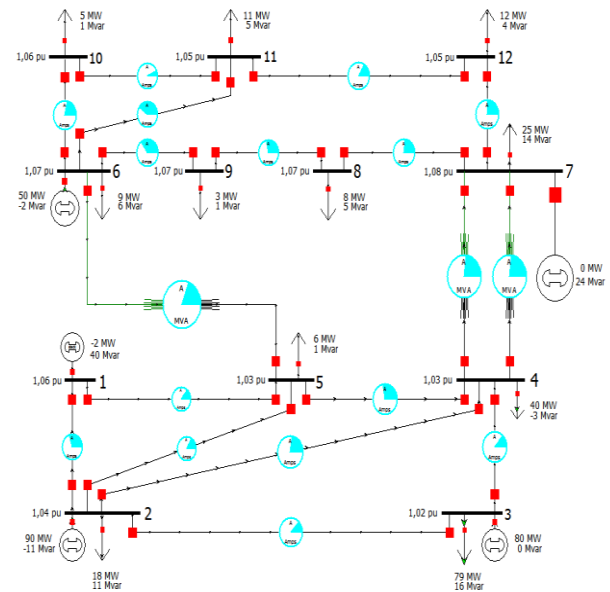
Pro účely porovnání výše uvedených programů byla vybrána 14-ti uzlová síť ze stránek „University Of Washington Electrical Engineering¹⁰“. Konkrétně v sekci „Power Systems Test Case Archive“, kde je umístěna „**14 Bus**“ síť včetně dalších podkladů.

Tato síť (jako celek) byla zvolena s ohledem na skutečnost, že se svými parametry blíží reálné síti, se kterou bychom se mohli v praxi setkat. Důležité také bylo, že pro tuto síť byla na stránkách zveřejněna „**Bus table**¹¹“ a „**Branch table**¹²“ čímž jsme získali klíčové informace ohledně délek vedení, rozložení zatížení, rozložení generace, parametrů transformátorů atd.

Při analyzování funkcionalit programů se ukázalo, že jeden z vybraných software nedokáže ve free verzi zpracovat s 14-ti uzlovou sítí. Konkrétně PWS¹³. Jelikož jsme chtěli tento program ponechat v našem porovnání, museli jsme provést zásahy v topologii původní **14 bus** sítě.



Obr. 11 – schéma originální sítě



Obr. 12 – nově upravená síť

Na základě konzultace byla vytvořena nová síť. V této síti jsme zrušili původní přípojnicí 7 a 8. Generátor na přípojnici 8 byl přesunut do uzlu 9. Vedení mezi uzlem 7 a 9 bylo také zrušeno. Transformátor původně připojený mezi uzly 4 a 7 je v nové topologii připojen mezi uzly 7 a 9. Transformátory mezi uzly 4 a 9 jsou v tzv. paralelním chodu.

Ačkoliv jsme měli veškeré informace, které byly zapotřebí pro sestavení nové sítě, naskytl se určitý problém. **14 Bus** síť je zahraniční a tedy v ní vyskytující se napěťové hladiny se lišily od těch tuzemských. Podružným cílem této práce bylo také sestavení „relevantní“ porovnané sítě, čili sítě, která by odpovídala Českým standardům a zvyklostem. Tento úkol vedl na další úpravy v obou **Bus** i **Branch** table. V následujících dvou tabulkách bude charakterizována námi nově formulovaná 12 bus síť.

¹⁰ <https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/>

¹¹ Bus table – definuje přípojnice a jejich parametry

¹² Branch table – definuje větve a jejich parametry

¹³ PWS – Power World Simulator

Tab. 8 – BUS table: přehled parametrů přípojníc pro vybranou topologii

Číslo přípoj.	Un [kV]	Napětí pu [-]	Napětí abs [kV]	Úhel nap. [°]	Zátěž [MW]	Zátěž [Mvar]	Gen [MW]	Gen [Mvar]
1	110	1,06	116,6	0			-2,46	40,45
2	110	1,045	114,95	0,78	18,08	10,58	90	-11,27
3	110	1,02489	112,738	-0,07	78,5	15,83	80	0
4	110	1,02801	113,081	-1,64	39,83	-3,25		
5	110	1,03265	113,591	-0,96	6,33	1,33		
6	35	1,07	37,45	-0,48	9,33	6,25	50	-2,11
7	35	1,07917	37,771	-2,83	24,58	13,83	0	24
8	35	1,06586	37,305	-2,41	7,5	4,83		
9	35	1,06563	37,297	-2,23	2,92	1,5		
10	35	1,05742	37,01	-1,68	5,08	1,33		
11	35	1,05251	36,838	-2,25	11,25	4,83		
12	35	1,05267	36,844	-3,74	12,42	4,17		

Bus table je tabulka, která je generována automaticky příslušným softwarem pro námi načrtnutou topologii. Její výhodou je přehlednost a jednoznačnost. V momentě kdy je v editoru vytvořen nový uzel se tato operace promítne jako zápis do tabulky. Pro každý software se může pořadí veličin lišit, nicméně výše uvedené hodnoty jsou zcela zásadní z pohledu přípojnice.

Tab. 9 – Branch table: přehled větví a jejich parametrů pro 12 Bus sít'

From	To	Branch Type	r	x	b	Lim MVA
1	2	Line	0,01899	0,0604	0,00661	109
1	5	Line	0,06208	0,19744	0,0216	109
2	3	Line	0,05462	0,17371	0,019	109
2	4	Line	0,05677	0,18056	0,01975	109
5	2	Line	0,05581	0,1775	0,01942	109
3	4	Line	0,06039	0,19207	0,02101	109
4	5	Line	0,0133	0,04228	0,00463	109
4	7	Transformer	0,00285	0,16664	0,0126	63
4	7	Transformer	0,00285	0,16664	0,0126	63
5	6	Transformer	0,00285	0,16664	0,0126	63
9	6	Line	0,07644	0,26259	0,00028	35
6	10	Line	0,09869	0,33902	0,00036	35
6	11	Line	0,07423	0,25501	0,00027	35
7	8	Line	0,05302	0,18215	0,00019	35
7	12	Line	0,10291	0,35352	0,00037	35
8	9	Line	0,00964	0,03312	0,00025	35
10	11	Line	0,13955	0,4794	0,00051	35
11	12	Line	0,13612	0,4676	0,00049	35

Branch table generována automaticky. Každé propojení přípojníc je zaznamenáno společně s parametry tohoto spojení. Uzly se spojují pomocí vedení, nebo transformátorů. Nelze umístit dva prvky do série mezi dvě přípojnice, nicméně je možné vytvořit více paralelních spojení.

3. Přehled porovnávaných programů

Tato práce je zaměřena na porovnání programů, které se zabývají analýzou resp. výpočty sítí v ustáleném stavu. Programy, které jsou zde vybrány, se od sebe v mnohém odlišují. Rozmanitost funkcionalit, provedení, možností úprav, sdílení či post-procesingu bude v následujících kapitolách pro každý z uvedených programů stručně nastíněna tak, aby bylo zřejmé, jakým způsobem programy pracují a co od nich lze očekávat. Seznam programů:

- Power World Simulator
- ETAP Matpower
- EasyPower
- E vlivy 3/ DNCalc
- PyPSA
- PSAT

3.1. Power World Simulator

Jedná se o plně funkční samostatný program, který je schopen řešit veškeré úkony spojené s rozvodem elektrické energie. Systém pojme **až 250 000 přípojnic** při návrhu. Rozděluje se na základní balíček a přídatné balíčky. Cena odpovídá typu licence a množství balíčků.

Tento program byl zvolen jako **referenční** – tzn., že 12 bus sít byla **poprvé** namodelována v **PWS**. Rovněž v něm byla z-optimalizována a výstupy (*Bus a Branch tables*) tohoto programu jsou brány jako směrodatné. Důvodem byl fakt, že PWS působil nejkonzistentnějším dojmem ze všech porovnávaných **Free/Student** programů a měl dostatečné množství návodů tak, aby mohla být síť opětovně upravována a nakonec vybudována.

3.1.1. Informace o programu (přehled balíčků)

Dostupná kapacita přenosu – umožňuje určení maximálního možného přenášeného výkonu. Používá se pro výpočet zatížení stávajících linek při uvažovaném připojení nových generátorů. Rovněž lze vypočítat, kolik energie může výrobce poskytnout zákazníkům, než dojde k překročení některých z limitů. Dokáže určit, které linky jsou méně zatěžované.

Analýza stability napětí – vyhodnocuje napěťové poměry v ustáleném stavu. Zobrazuje napěťové a výkonové poměry pro každou přípojnicí. Používá se k určení poklesu napětí v síti – jaký výkon lze přenášet, než napětí poklesne pod přijatelnou mez. Tento „add-on“ PVQV sestává ze dvou částí: PV a QV.

PV: Max. možný přenášený výkon dodávaný systémem předtím, než napětí poklesne pod stanovenou hodnotu. Možnost současného zobrazení napětí na přípojnicí společně s velikostí přenášené energie. Poskytuje i podružné parametry jako: úhly napětí; produkce energie na generátorech; odběr na zátěži, vedení či jiném rozhraní; změna dV/dQ .

QV: Určuje rozpětí jalového výkonu v určitých bodech systému. Vykreslení grafu znázorňujícího vliv odběru či dodávky jalové energie na napětí v síti. Možnost vykreslení dalších parametrů do jednoho grafu v závislosti na: napětí sítě či jalové složce výkonu. Používá se také např. k určení velikosti kompenzace, která musí být přítomna v systému v nebezpečí poklesu napětí.

PVQV: Zaznamená, kdy dojde k poklesu napětí na přípojnici pod přijatelnou mez, resp. vyhodnotí stav sítě jako chybný a podá hlášení, které indikuje pokles napětí. Během simulace možnost interakce s částmi systému – tvorba mezilehlých grafů. Tyto grafy jsou „live“ – mění se okamžitě kdykoliv dojde ke změnám v systému. Protože lze sledovat změny napětí „live“ můžeme provést kontingenční analýzu a sledovat vývoj krizové situace. Je tedy nejvhodnější aplikací (*balíček*) pro zjištění limitů systému.

Nástroj pro analýzu optimálního toku výkonu – (*OPF*¹⁴) jedná se o rozšíření základního balíčku. Zahrnuje všechny funkcionality základního balíčku. Je schopen simultánně řídit produkci a nastaví vhodné omezení pro odběr, takže nedojde k přetížení linek. Může spočítat marginální cenu dodávané energie až do místa přípojnice. Vykreslí mapu vybrané oblasti a graficky odliší cenu v různých částech dané oblasti. Export dat (*umí všechna rozšíření v PWS*).

Nástroj pro analýzu optimálního toku výkonu s bezpečnostním omezením – Je rozšířením OPF, který zohledňuje nejen (*nej*)výhodnější cenu, ale zároveň i bezpečnostní hledisko při možných kontingencích. Snaží se zachovat co neoptimálnější cenové poměry, vzhledem k možné kontingenci – tzn., že nalezne takový pracovní bod, při němž je systém schopný zvládnout (**N-1**) kritérium a zároveň být na nejlepší možné cenové bilanci pro tento stav. Lze využít i ke zjištění chování ceny při přetíženích. Nutné zakoupit OPF, jinak nespustí SCOPF¹⁵.

Nástroj pro analýzu optimální výkonové rezervy – nalezne optimální pracovní bod systému, přičemž zohledňuje jak standartní (*pomalé*) generátory (*zdroje*) tak i rezervní (*rychlé*) generátory (*zdroje*). Cena energie z rychlých zdrojů je přirozeně odměňována jiným způsobem, než je to u zdrojů pomalých a finanční výpočet je tudíž komplikovanější. U každého zdroje je třeba nastavit, při jaké ceně generuje (je ochoten začít generovat) energii. Každý zdroj či zátěž mají své vlastní ovládací prvky k obecnému modelování řízení, otáček atd. Řeší tedy ekonomickou stránku tzv. peaků (*špiček*), kdy je zapotřebí dodat rychlou a tudíž dražší energii skrze oba: pomalé a rychlé zdroje.

Daná soustava může být rozdělena do zón. Každá zóna má své specifické nároky na rezervní (*rychlé*) zdroje. Tyto nároky jsou ve velké míře určeny: regulační, operační či kontingenční rezervou. Nutné zakoupení OPF, jinak nelze spustit OPF-Reserves.

Simulační automatizační server – tato funkcionality zpřístupňuje prostředí Power World Simulatoru dalším aplikacím, či programům. Lze jej tedy otevřít v- resp. integrovat do externího programu, kde může Power World Simulator provádět všechny definované funkce. Možnost vyexportování dat např. v podobě MS excel tabulky.

Simulační automatizační server vystupuje na venek jako **COM objekt**, což znamená, že může být implementován pomocí externích programů (*resp. programovacích jazyků*), které jsou kompatibilní s tímto rozhraním. Pro představu jsou to např. tyto jazyky: **C++**, **Basic**, **Delphi** atd. Jedná se o cloud systém.

Kalkulátor parametrů přenosových linek – Používá se k výpočtům parametrů vedení vzhledem k danému typu vodiče, tvaru stožárů resp. umístění vodičů na stožáru. Vyhodnotí tyto parametry: odpor R, reaktanci X, susceptanci B, svod G. Výpočet lze provést se soustředěnými či rozprostřenými parametry vedení.

¹⁴ OPF – Optimal Power Flow

¹⁵ SCOPF – Security Constrained Optimal Power Flow

Analýza přechodné stability – Toto rozšíření umožňuje zkoumat vliv stability systému z mnoha perspektiv při předem nadefinované akci (sepnutí/kontingence). Vytvoří animovanou sekvenci, která formou barevných kontur vykreslí průběh sledované veličiny napříč systémem.

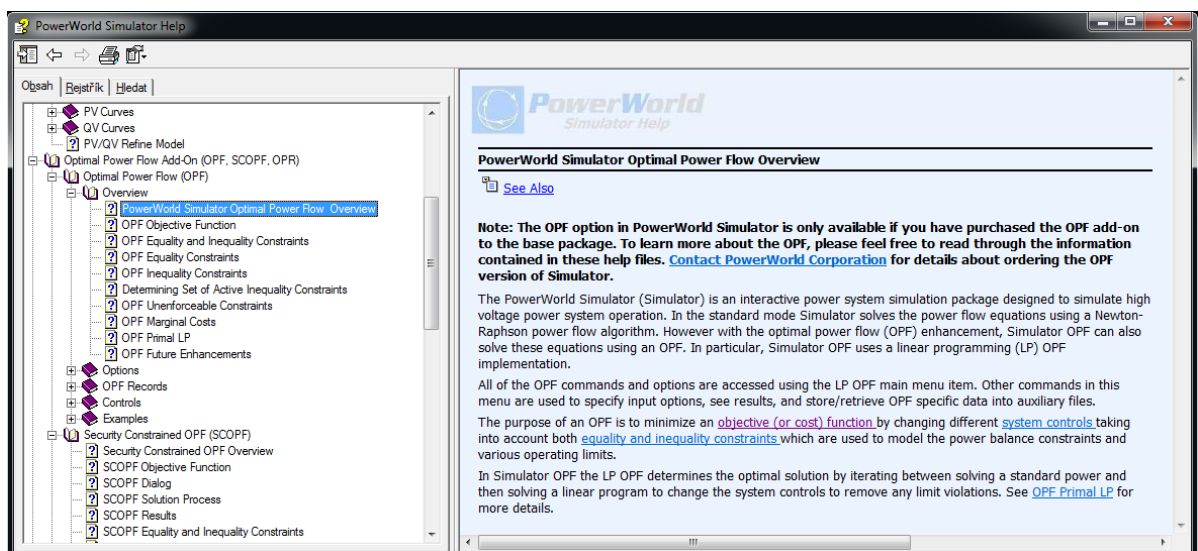
Geomagnetický indukovaný proud – používá se pro výpočet geomagnetických rušení, která mohou ohrožovat stabilitu systému. Je potřeba vložit některé neobvyklé *parametry (mimo standartní vstupy)* jako např. odolnost uzemnění stanice, geografické souřadnice rozveden. V případě chybějících údajů si simulátor nastaví defaultní hodnoty, nebo se pokusí o odhad.

Testování geomagnetického indukovaného proudu probíhá tak, že simulace vyvolá geomag. rušení, které závisí především na lokálním odporu (*rezistivitě*) země a geomag. zeměpisné šířce. Proudů jsou modelovány vložením DC zdrojů do každé fáze, přičemž se měří (*zemní*) proud mezi uzly blízkého a vzdáleného transformátoru.

Cloud výpočty na serverech PWS – Jedná se prakticky o balíček, který provádí kontingenční analýzu, dostupnou kapacitu přenosu (*vícenásobně*) a analýzu přechodné stability (*pro mnohočetnou kontingenci*). Součástí je i QV analýza.

- **Kontingenční analýza**
- **(ATC) Dostupná přenosová kapacita**
- **Analýza přechodové stability**
- **Analýza stability napětí**

Rozdíl oproti samostatným add-ons je v tom, že výpočet probíhá ve středisku PWS. Výstupy/vstupy se vhodným způsobem přenáší přes cloud do externích programů (*princip viz. SimAuto*). Je zapotřebí zakoupit add-on SimAuto, který umožňuje cloud komunikaci.



Obr. 13 – manuál resp. Power World Simulator Help [18]

Při dokumentaci výše zmíněných funkcionalit se vycházelo z oficiálních informačních zdrojů Power World Corporation, což je v podstatě důkladně rozpracovaný manuál¹⁶. Některé přístupné funkcionality byly přímo testovány v rámci testovací sítě. Zdroj: [18].

¹⁶ <https://www.powerworld.com/knowledge-base/powerworld-simulator-help-files>

3.1.2. Práce s programem

Práce v programu PWS obnáší v první řadě uvědomění si, co je cílem analýzy. Pakliže je cílem analýza ustáleného stavu (*již vytv.*) soustavy, stačí vesměs pouze měnit **vstupní** parametry, což jsou v našem případě **generátory** a **připojovaná** zátěž. Zbytek informací potřebný k výpočtu jednotlivých uzlových napětí je pak ponechán na programu, který spočítá, jaké budou napěťové poměry na každé z přípojnic. Samozřejmě existuje celá řada **jiných** údajů, které tvoří „vstup“.

Při výpočtu se program snaží udržovat **napětí** přípojnic mezi stanovenými **limity** (*např. 0,9-1,1 pu*). Napěťová stabilita je pro něj zásadní. Otázkou je, jestli vedení, či transformátory dokáží zvládnout přenést potřebný výkon tak, aby zajistili tento požadavek. Z toho důvodu je nutné u každého prvku dané sítě uvádět i maximální možný přenášený výkon (*resp. proud*). Tato hodnota je programem brána jako vztažený limit a podle konkrétního zatížení je přímo ve schématu naznačen kruhový grafický diagram (*viz. Obr. 14*), který zobrazuje míru přetížení. Barvu těchto kruhových diagramů lze nastavit, takže např. při 70% zatížení se změní jeho barva na oranžovou, nebo např. od 100% je barva již červená. Grafická kontrola je pak mnohem zřejmější. (*detailnější výsledky práce s programem jsou v kapitole č. 2 „Vlastní testovací síť“*)

Co se týče generátorů, tak ty mají vždy konstantně nastavenou hodnotu činného výkonu a mění se jim generace jalového výkonu. Vyjímou je slack-bus-generátor, který může měnit i hodnotu činného výkonu, čímž se snaží udržovat síť v rovnováze. Jalový výkon standardních generátorů může být rovněž fixován¹⁷, jako jejich činný výkon – to ale neumožňuje PWS, aby konal svojí práci (*regulace napětí*). Použije jiné generátory k regulaci napětí.

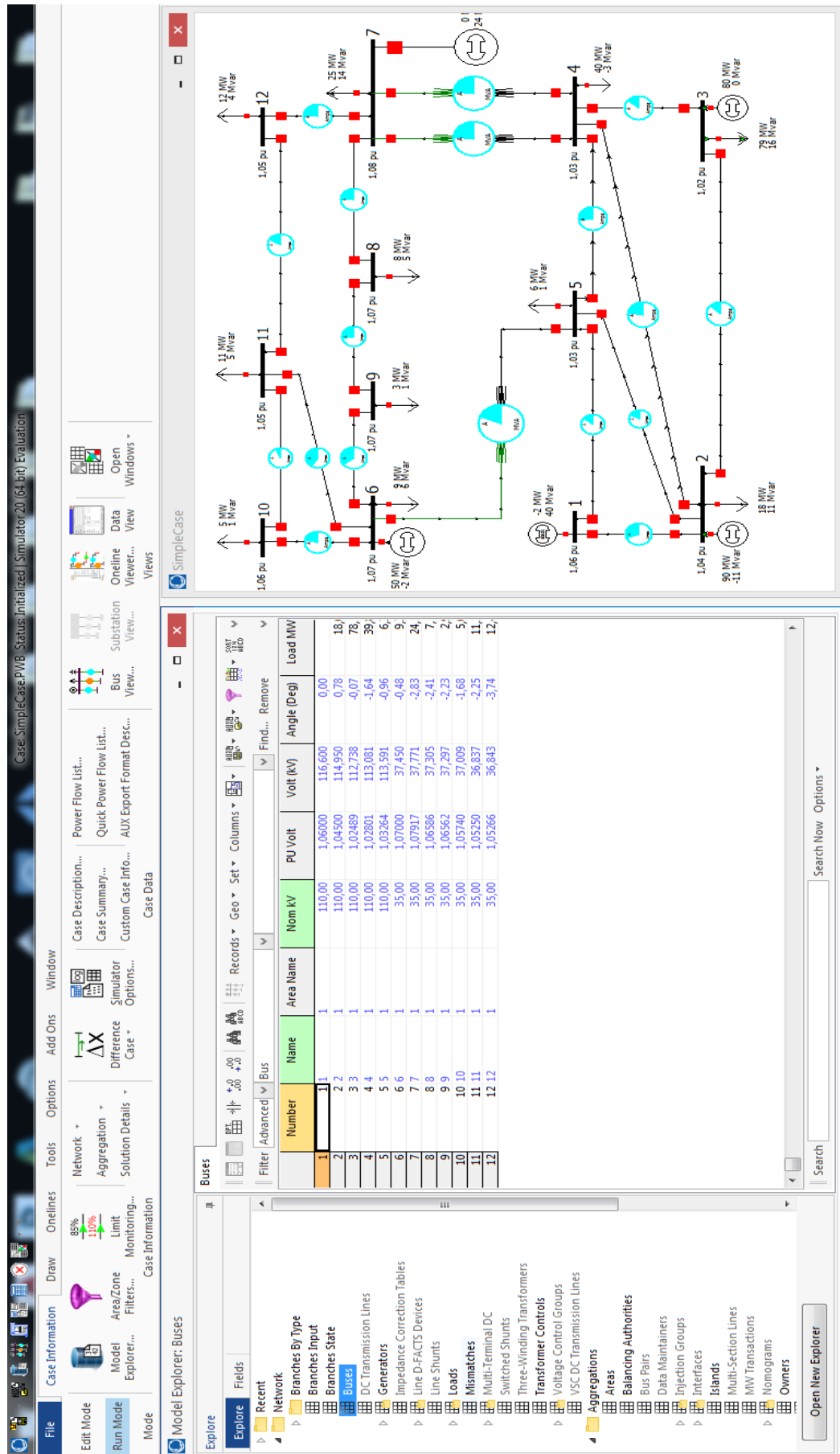
Při návrhu vlastní sítě byl využit právě tento program (*PWS*). Při návrhu se vycházelo především ze znalosti topologie. Parametry průřezů vodičů vedení, či maximální možný výkon trafa a typ trafa byl postupně vzájemně navrhnut, aby síť respektovala **63MVA** transformátory. Ukázalo se, že na obou hladinách můžeme použít vodiče AlFe4 240mm². Původně bylo použito pro všechny hladiny 110kV dvojitě vedení o průřezu AlFe4 240mm², ale na základě výpočtu se ukázalo, že by tyto linky byly málo zatížené (*předimenzované*) a proto bylo rozhodnuto, že bude plně postačovat **jednoduché** vedení o stejném průřezu. Hlíдалo se celkově více limitů.

Samozřejmě je možné vznést protest, že i tak jsou některé linky poměrně předimenzované (*viz. výsledek simulace*), ale je nutno brát v potaz, že např. ne všechny generátory momentálně pracují na maximum a zároveň pro tento výpočet (*pro ustálený stav*) neobjevuje bezpečnostní (**N-1**) kritérium. Pakliže by byla potřeba manipulovat se sítí, tato rezerva na některých linkách může být klíčová. Jedná se např. o linky mezi uzly: 1-5, 2-3 či 10-11.

Tento program je velmi komplexní a nabízí celou řadu dalších funkcionalit. Tímto způsobem byla stručně nastíněna práce v programu PWS. Detailní porovnání všech funkcionalit je provedeno v kapitole „Tabulkové porovnání“. Práce s programem je také naznačena v kapitole č. 2 „**Vlastní testovací síť**“.

Prostředí Power World Simulator je možné vidět na obrázku 14. Data potřebná pro všechny typy analýz jsou obsažena ve spodní části obrázku, kde je rozkliknuta sekce modely. Tam je možné vidět seznam tabulek (*matic*). Tabulky nesou veškeré informace o dané síti resp. prvcích včetně dalších globálních parametrů apod. Pro ilustraci je v programu rozkliknuta tabulka „Buses“.

¹⁷ Z PU generátorů se pak stávají PQ generátory.



Obr. 14 – nástin vizuálního prostředí PWS

3.2. ETAP

ETAP je velmi komplexní, robustní a **sofistikovaný** software od firmy „Electrical Power System Analysis & Operation Software“, který se skládá z několika balíčků. Je nutné zmínit, že některé **balíčky** jsou poskládány z **modulů**. Při rozhodování, který balíček zakoupit je nezbytné znát mnohá specifika každého balíčku, nicméně v případě tohoto software je k dispozici široká škála informačních dokumentů, včetně poučných videí a jiných forem supportu (*telefonisté*), které dokáží velmi jasně a stručně objasnit, co lze se kterým rozšířením provádět za typy analýz.

Všechny z uvedených modulů dokáží vytvořit, zanalyzovat a v poměrně vysoké kvalitě graficky zobrazit data a provést post-processing. Názvy jednotlivých balíčků typově odpovídají funkcionalitám, které pak balíček nabízí. Balíčky ale většinou obsahují **spektrum** funkcionalit.

3.2.1. Informace o programu (přehled balíčků)

Nastavení ochran a koordinace: Simuluje specifické nastavení ochran, které zahrnují vzdálenost, směrovost a vlivy připojované zátěže. Vykreslí impedanční charakteristiky (*ve zvolené oblasti*), takže uživatel nemusí pracně dopočítávat tento údaj. Umožňuje práci s impedančními relé (*nejen*). Nastavování probíhá prostřednictvím vyskakovacích oken v grafickém prostředí programu, ve kterém se přímo nastavují veškeré potřebné parametry (*typy „relé“ atd.*). Parametry jednotlivých relé se dělí na primární a sekundární. Program disponuje rozsáhlou knihovnou různých typů relé. Může pracovat s real-time daty, kde pak získává průběžně informace o systému.

Součástí je vložený modul pro výpočty výkonu toku v síti (*nutné pro práci s relé*). V tomto modulu jsou také analýza při poruše, sekvence operací při poruše, vícenásobná porucha (v mnoha částech sítě).

Vyhodnocení rizika poruchy: Provádí výpočty zkratů, které může prostřednictvím nástrojů analyzovat. Jedná se o výpočty typu linka-zem, linka-linka, popř. 3f zkrat. Nastavení ochranné sekvence operací, která se vykoná při zkratu. Spočítá minimální vzdálenost přiblížení k vodičům (*zohlední i práci s nástroji/nářadím*). Možnost nastavení vlastních parametrů různých koeficientů či vzdáleností. Pracuje s incidentními energiemi. Obsahuje další podružné funkcionality související s výpočty zkratů.

Trakční systém: Obsahuje nástroje pro vybudování a analýzu trakčních systémů, včetně přenosu a distribuce; také signalizaci. Obsahuje GIS, ochrany, plánování (*na základě jízdního řádu – možno vytvořit vlastní*). Zohledňuje více kolejových vozidel v systému. Vyhodnocuje mezní limity. Výměna dat s jinými aplikacemi. Zohledňuje práci s usměrňovači a jinými prvky specifickými pro trakci, jako třeba trakční transformátory, boostery apod. Umí řešit AC a DC systémy najednou včetně časové oblasti. Výpočty nákladů za spotřebu a další výpočty týkající se kolejových vozidel.

GIS a Výměna dat: Načte podkladnou mapu a nad ní vloží schéma sítě. Polohy všech prvků jsou určeny pomocí GPS souřadnic. Import a Export v mnoha formátech; zahrnuje **.xlsm** Uživatel může provádět změny parametrů všech elementů v síti, včetně polohy. Rozdělení do kategorií podle barev a vkládání popisků/poznámek.

Elektromagnetické přechodové jevy: Import modelů z jiných programů, nebo tvorba vlastních. Koordinace izolace, zapínání/vypínání, modely širokopásmové linky a kabely. Deterministická metoda, pravděpodobností metoda, jednopólová spínání, vysokorychlostní opětovné zapínání, přepínání kondenzátorů. Sub-synchronní rezonance. Blesky, indukované vlny, oscilace, vlivy svodičů včetně dalších výpočtů, které se ovšem běžně neprovádějí.

Obnovitelné zdroje a menší („mikro“) sítě: Model turbíny větrné elektrárny s automatickým odpojením dodávky včetně modelu pro řešení při poruše (*zkrat*). Modely pro solární panely a střídače pro fotovoltaiku – rovněž model pro testování při poruše, společně s vylepšeným ovládním proudu ve střídači. Modul dokáže zhodnotit stabilitu systému (*i při poruše*). Real-time vstupy ze sítě a jejich processing.

Monitorování a řízení: Dlouhodobá předpověď zatížení. Stahuje data o počasí. Simulátor, který umožní výcvik obsluhy. Plány obnov a rekonstrukcí – odstávky částí systému. Pracuje s replikacemi dat z minulosti. Simultální záloha dat při potenciální havárii (samoobnova).

Neomezené množství měřených signálů nahrávaných do systému. Real-time či historické reporty. Inteligentní odpojování zátěže ve špičce – monitorování rezerv a zátěží. Automatické či ruční ovládní. Reakce na odezvu je řádek desítek ms s dobře zvládnutou komunikací.

Interaktivní přidělení úkonů četám v poli přes aplikaci, kde potvrzují a průběžně informují o stavu. Plánovaný a aktivní prohlížeč objednávek. Klasifikace odpovědnosti jednotlivých dispečinků. Průběžná hlášení o údržbách a grafická prioritizace. Sleduje provozní náklady na personál a kalkuluje výnos/ztrátu.

Toky výkonu v časové oblasti: Tento modul naráz analyzuje AC a DC sítě a řeší problém poptávky a dodávky elektrické energie jak v ustáleném stavu, tak v časové oblasti. Jedná se v podstatě o klasický power-flow modul, kde je možné nastavovat jednotlivé parametry prvků, přičemž napětí sítě je udržováno v určitých mezích s tím, že jsou do maximální možné míry, pokud je to možné, respektovány limity jednotlivých prvků sítě.

Modelování systému: Tento modul zdokonaluje, tvobu schémat. Definování vlastních modelů, okamžitá synchronizace, import geodatabází z jiných programů, tepelně podbarvené schéma. Zohlední i detailní plán rozvodny. Součástí je GIS, který se rovněž synchronizuje s mapovým serverem. Klasifikace do zón barevně. Nahrávání dat z externích souborů. Zohledňuje počáteční podmínky některých dějů.

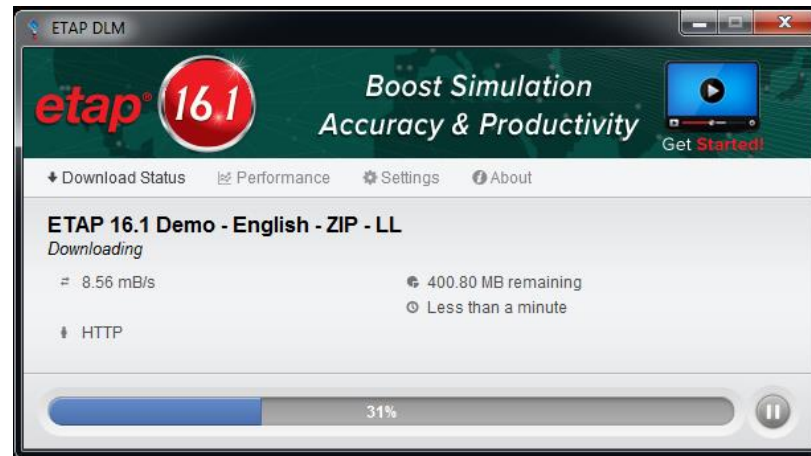
Obsahuje všechny elementy (*vedení, generátory, atd.*) z modulu „Toky výkonu v časové oblasti“ a všech zmíněných modulů. Jedná se o kompletní sadu, zatímco ostatní moduly nemají takto bohatou sadu modelů. Dále inteligentní zobrazování několika studií najednou v jednom grafu a tvorba šablon pro grafy (*uživatelé nadefinované grafy s makry*). Automatické označení komponent podle vzoru.

Modul analýzy: Harmonická analýza resp. analýza kvality napájení. Zkoumá pro vybranou oblast, jestli průběhy napětí a jiných veličin odpovídají nastavenému standardu (*normu/standard lze měnit*). Rozšířené napěťové a proudové vstupy. Řeší skin efekt pro motory a transformátory. Zdokonalené modelování kabelů, střídače. Rovněž obsahuje GIS.

Součástí je i modul posouzení spolehlivosti s kritérii, které jsou ekvivalentem Českých „SAIDI/SAIFI“. Umí provést výpočty v časové obl. související posouzením spolehlivosti. [19]

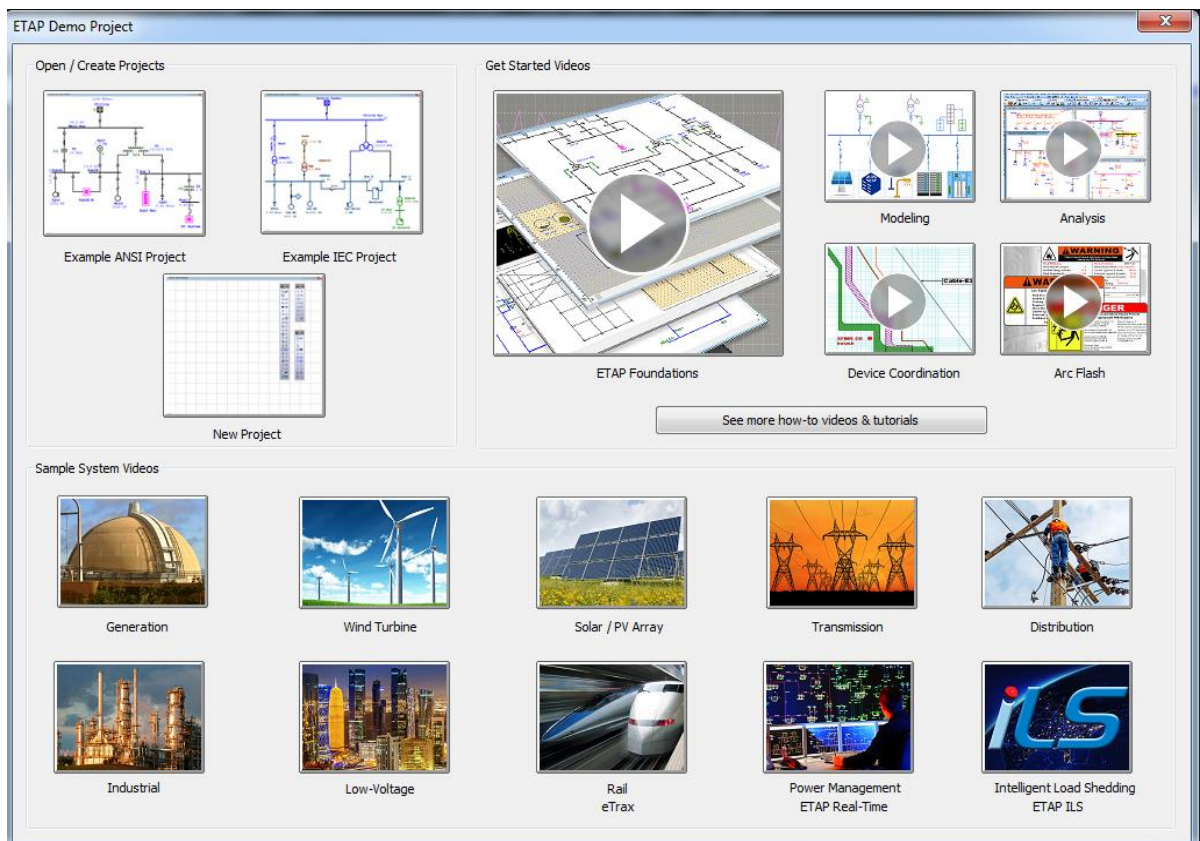
3.2.2. Práce s programem

Nejdříve je nutné program nainstalovat. Pro stažení DEMO verze je potřeba se zaregistrovat na stránkách <https://etap.com/> kde se stáhne instalační balíček, který se pak v počítači rozbálí. V rozbalené složce se nacházejí instrukce k nainstalování programu. Nutný přístup k internetu.



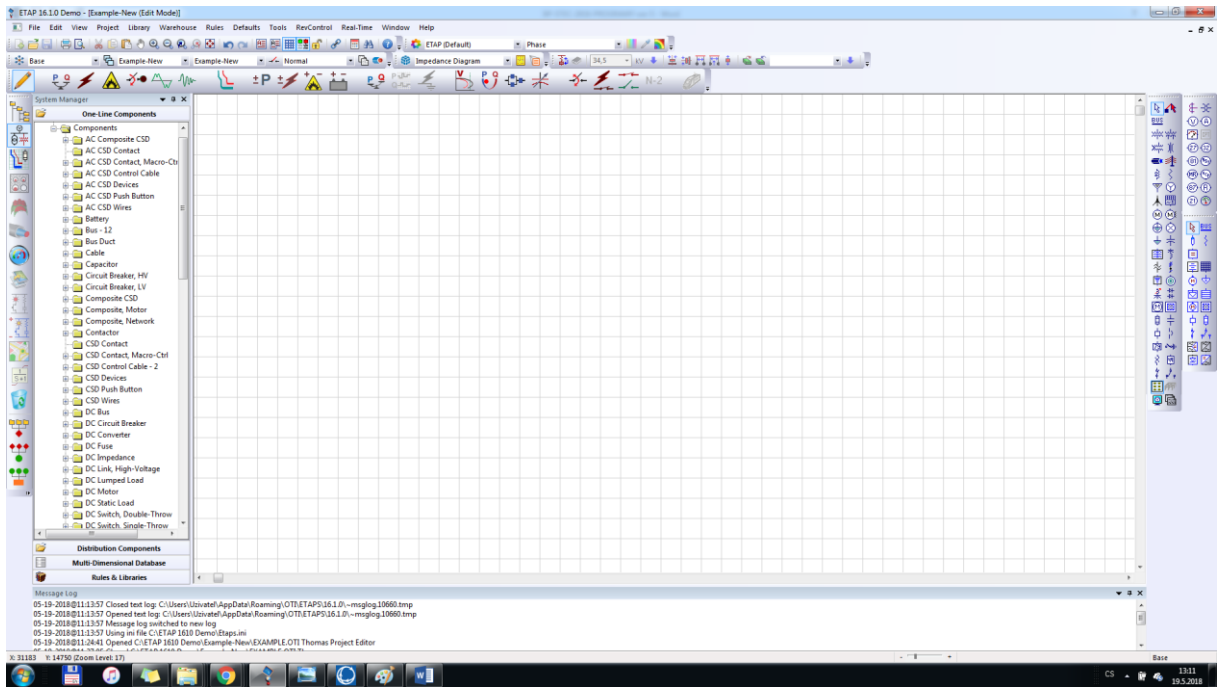
Obr. 15 – stahování instalačního souboru a instalace ETAP

Po instalaci: ve spodní části nabídky se nachází obrázky, které symbolizují různé problematiky elektrotechnického odvětví. Kliknutím na vybranou sekci se otevře cca. 15 minutový video tutoriál, který vysvětluje jak začít pracovat s programem v rámci zvolené problematiky. Pro založení nového projektu stačí kliknout na ikonku „New Project“ a začít s návrhem sítě.



Obr. 16 – Nabídka (menu) při zakládání nového projektu

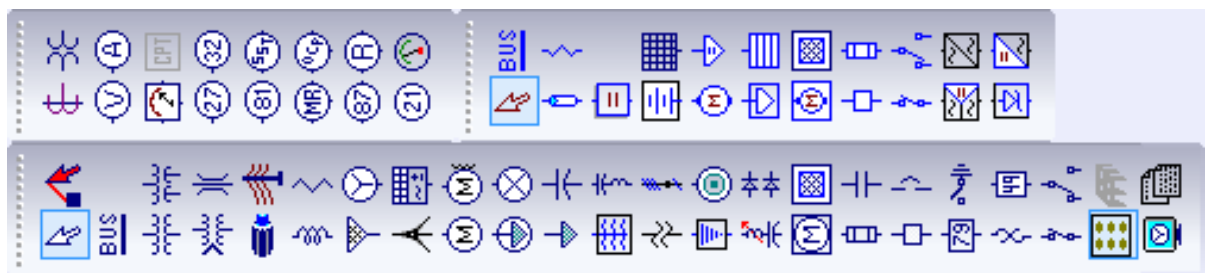
Objeví se prázdné okno, které zatím neobsahuje žádné prvky sítě. V pravé části obrazovky se nalézá lišta nástrojů, na níž jsou zobrazeny prvky, se kterými můžeme pracovat v demo verzi.



Obr. 17 – nástin vizuálního prostředí ETAP

Detailní pohled na lištu. Horní lišta obsahuje měřicí prvky jako transformátor proudu a napětí, voltmetr, ampérmetr. Objevují se zde napěťová relé, frekvenční relé, distanční relé a jiná.

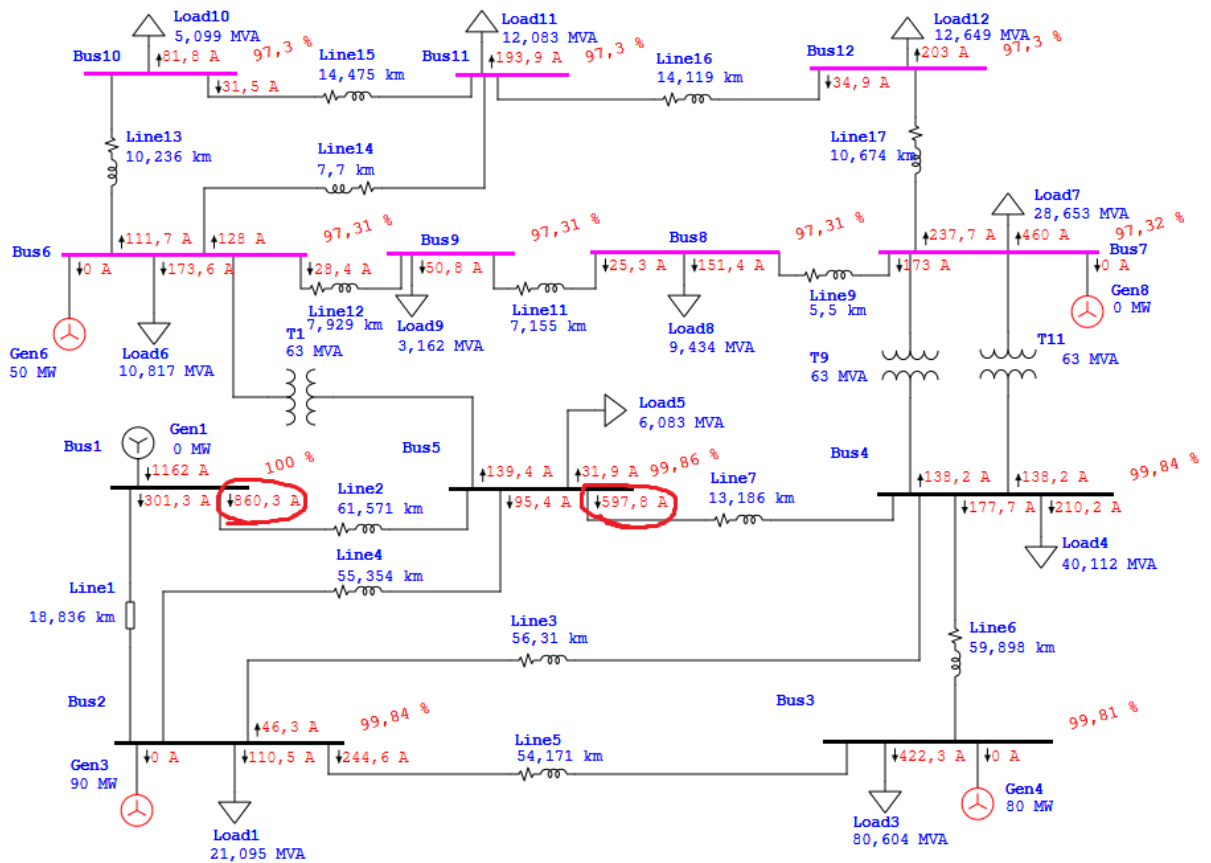
Na dolní liště jsou AC prvky: přípojnice (*Bus*), transformátory, vedení, reaktory, generátory, zátěže, motory, filtry, nadřazené sítě. Dále pojistky, relé, kondenzátory, spínač, přepínač atd.



Obr. 18 – stahování instalačního souboru a instalace ETAP

Dalším krokem je sestavení sítě. K sestavení sítě je nejlepší nejdříve umístit všechny přípojnice do schématu. Mezi přípojnice se pak vkládají jednotlivé prvky jako např. vedení, transformátor apod. Jejich parametry se v zápětí nastavují.

V této fázi je zatím hrubě načrtnuta síť. Nejsou nastaveny patřičné hodnoty daných prvků. V případě, že si uživatel nevšimne, nebo zapoměl vložit některý prvek sítě, může jej kdykoliv přidělat, nebo odmazat přebytečné prvky. ETAP umožňuje i **autobuild**, což je funkcionality, která samovolně skládá síť (*do série přesně v pořadí, jak uživatel nakliká*). Pokud chce uživatel využít **autobuild** pro již vybudovanou síť, musí označit místo, odkud se začne síť skládat.

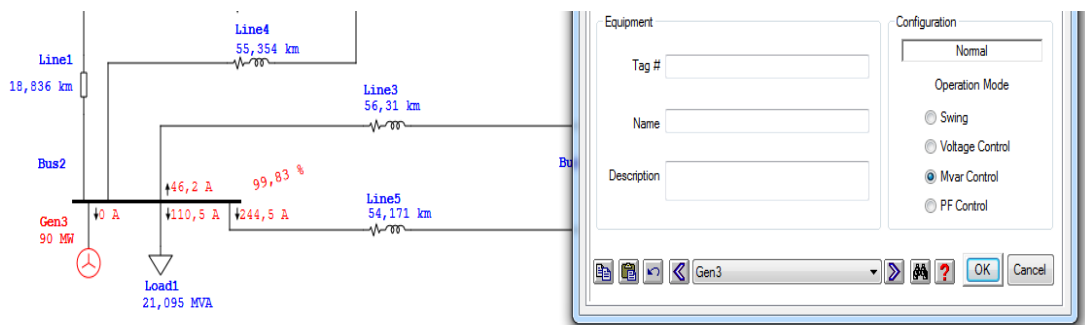


Obr. 19 – porovnávaná síť a nastavená síť dle PWS – disfunkční generace

Diskuze k obrázku 22: identicky modelovaná síť dle předlohy PWS. Při modelování sítě došlo ke komplikacím. Problémem bylo, že nejsou respektovány limity vedení. V demo verzi ETAP nelze provádět napěťovou stabilitu, ale pouze PQ analýzu. OPF a další pokročilé analýzy nejsou v demo verzi přístupné. Limit pro tato vedení je **572A** – zakroužkované značí překročení limitů.

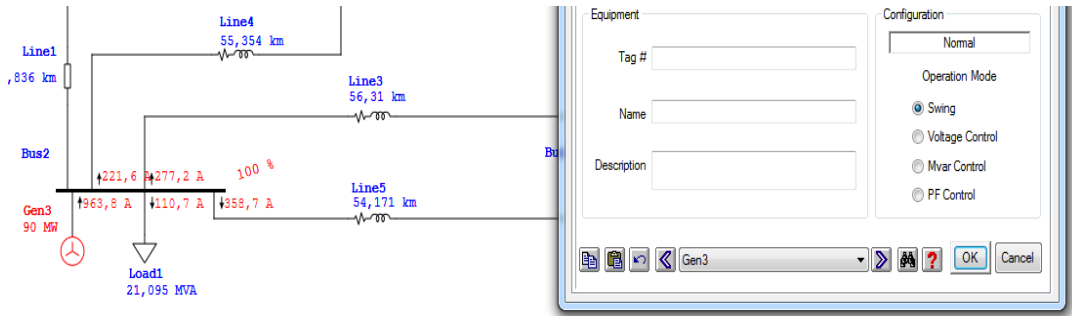
Problém při připojování generátorů. Po spuštění simulace **neakceptovaly** námi nastavené hodnoty generovaného činného výkonu – dodávaný výkon generátory je **nulový** (viz obr 20).

Demo verze respektuje pouze „Swing“ režim pro generátory – odpovídá **distribučované „slack bus generaci“**. Distribuovaný slack bus systém generace není na škodu, ale nelze provést porovnání s PWS, kde byly generátory typu „voltage control“. Generátor musí umožnit nastavení hodnoty P, abychom mohli posoudit, jakým způsobem by hrálo roli zvýšení/snížení.



Obr. 20 – změna Mvar pro konstantní hodnotu MW nefunguje

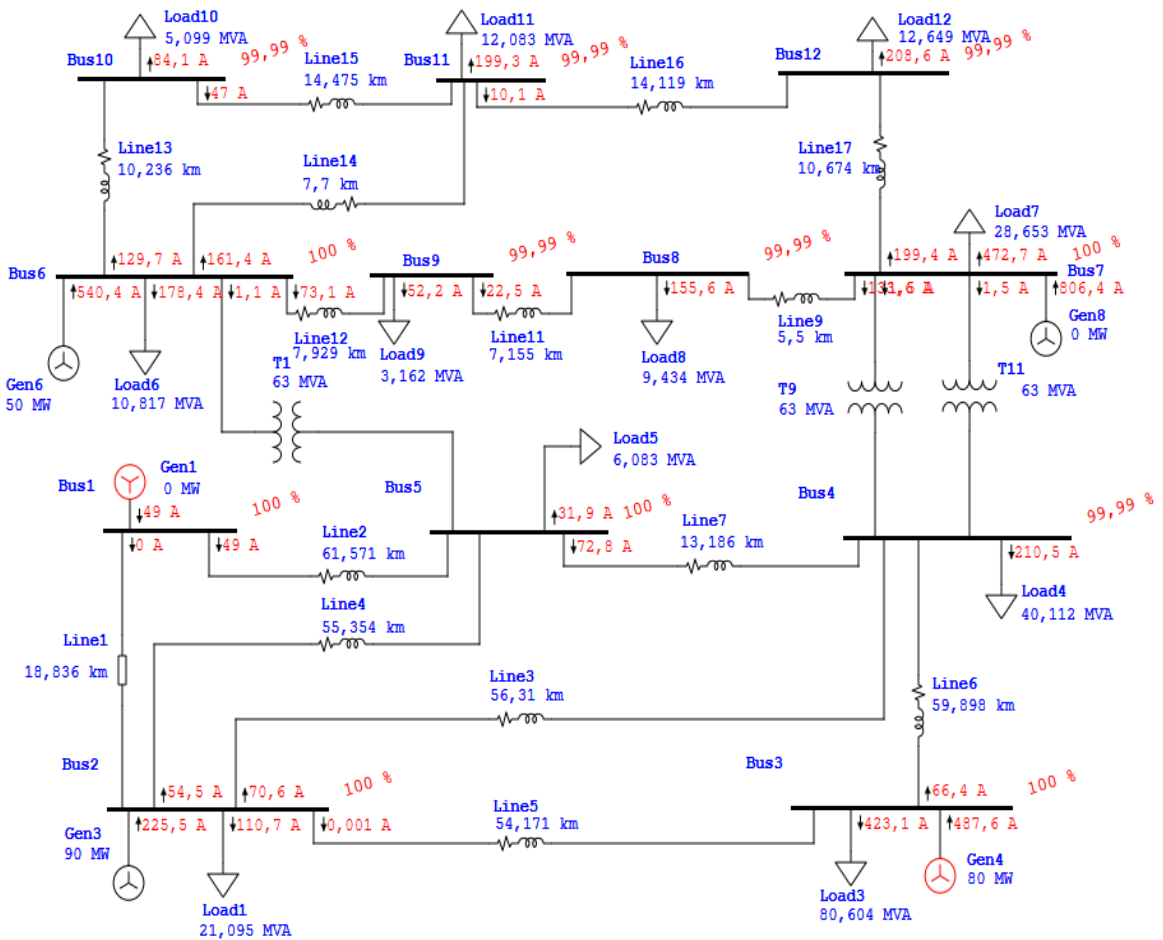
Po nastavení do „Swing“ režimu náhle začíná generovat takový výkon, aby zajistil 1.0pu hodnotu napětí na přípojnici.



Obr. 21 – změna do režimu „Swing“

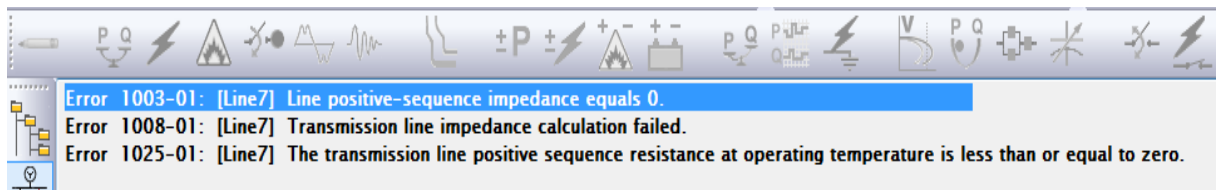
Závěrem lze konstatovat, že program **nerespektuje limity** prvků. S jedním slack bus generátorem **překročení** mezních limitů vedení mezi uzly 1-5 viz obr. 19 (*nicméně nikde nešlo nastavit tento limit – pravděpodobně dáno demo verzi – program nevěděl, že má tuto hodnotu omezit – každopádně obecně lze říci, že nerespektuje limity*).

Neumožňuje libovolně **měnit** parametry generace a díky těmto zjištěním **není možné** provést detailní porovnání vůči PWS, který byl nastaven jako vzor. Pro úplnost je níže uvedena síť, pakliže nastavíme všechny generátory jako do režimu „Swing“.



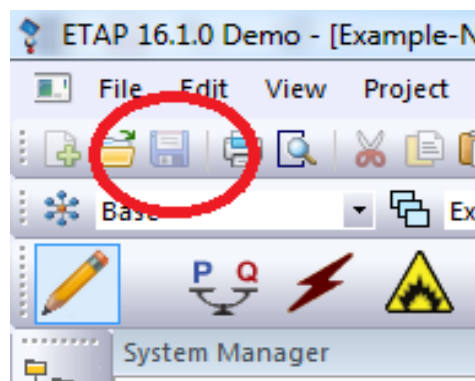
Obr. 22 – porovnávaná síť s distribuovanými slack bus generátory

Při špatně zadaných parametrech program zahlásí chybu a simulace neproběhne. Je nutné správně zadat **všechny** potřebné údaje pro daný typ analýzy. Rozkliknutím chybového hlášení program otevře prvek a zobrazí, které políčko je nutné doplnit/změnit.



Obr. 23 – chybová hlášení

Další nevýhodou demo verze je, že soubor **nelze** počas celé simulace **uložit** a tudíž se zavřením programu nenávratně veškerá práce zmizí. Export dat do excelu či jiných není povolený (*demo*).



Obr. 24 – nelze uložit

Demo verze slouží spíše pro ukázkou vizuálního prostředí. Při větším zájmu jsou kvalifikovaní pracovníci ETAP ochotni předvést/zpřístupnit některé další funkcionality v rámci demo verze.

3.3. EasyPower

Easypower je plnohodnotným (*placeným*) softwarem, který řeší veškeré problémy spojené s Power Flow analýzou včetně monitorování sítí a řešení ochran. Sládá se z modulů, které po zakoupení uživateli zpřístupní vykonávání určitých analýz. Některé moduly nemohou být zakoupeny samostatně, protože se mohou vázat na jiný modul – rozlišují se na stand-alone¹⁸ a párovatelné moduly. Developer ovšem uvádí informace o možných kombinacích.

EasyPower zahrnuje moduly: obloukový výboj, power flow, výpočty zkratů, koordinace ochran, dynamická stabilita, přechodové jevy, harmonická analýza a další. K programu lze dokoupit další software např. **OnSite**, což je mobilní aplikace, která umožňuje sběr dat v terénu ve formátu, který bude posléze jednoduše integrován do EasyPower. Existují další přidružené programy. Easypower nabízí již přednastavené **3** balíčky (*kteřé obsahují vhodně zkombinovaná, níže uvedená, rozšíření*) resp. možnost jejich modifikace či vytvoření vlastního balíčku – **názvy** balíčků jsou spíše **komerčního charakteru**¹⁹:

- **Protective Device Coordination** (*koordinace ochran*)
- **Arc Flash Hazard** (*riziko výboje*)
- **Automated Design** (*automatizovaný „dizajn“*)
- **Vlastní balíček***

Všechny z uvedených balíčků mají vlastní webovou stránku a podporu. Typově se hodí pro jiné skupiny uživatelů. Nezáleží na typu balíčku - všechny mají přístupné základní funkce:

Integrovaný one-line diagram: umožňuje vytváření schéma se všemy standardními modely pro power flow. **ScenarioManager™:** umožňuje modelovat a analyzovat tentýž systém v mnoha případech, čímž simuluje podmínky v reálném světě. **SendCAD™:** exportuje data všech dostupných CAD programů; exportování do excelu. **MCC & Panel Schedules:** Zanáší data o motorech a jejich ovládání do tabulky (*excel*). **SmartDuty™:** ověření nastavení funkce zařízení podle standardu ANSI, doplněného automatickým zvýrazněním problémových oblastí na jednom řádku. **SmartBreaker™:** Dynamická studie – změna podmínek v síti za pomoci one-line schématu. **Custom Text Blocks & One-line Symbols:** Možnost úpravy textu a symbolů ve schématu. Text se zobrazuje vedle jednotlivých modelů. Vzhled těchto modelů je možné přizpůsobit a měnit.

Rozšiřující moduly lze přikoupit, pokud již nejsou jejich součástí balíčku, (*resp. lze si poskládat vlastní balíček z nabízených modulů, jak již bylo zmíněno*) – stručný výpis a popis modulů:

SmartPDC™: kompletní a zjednodušená verze nastavování ochran přímo ve schématu. **ANSI ShortCircuit™ & IEC ShortCircuit™:** okamžité ověření a zhodnocení zařízení z hlediska zkratů, zahrnuje další podružné funkcionality včetně dopad rozběhů motorů. **PowerProtector™:** plnohodnotné a nezjednodušené nastavování ochran. **SmartDesign™:** automaticky nastavuje parametry linek, odpojovačů, pojistek, přípojnic a jiné. **ArcFlash™:** výpočty z hlediska rizik elektrických výbojů. **PowerFlow™:** nastaví a optimalizuje napětí, proudy resp. tok výkonu v síti. **Dynamic Stability:** analyzuje a simuluje interakce mezi sítí, připojovanou zátěží a reakcí ochran. **Transient Motor Starting:** přesně nastavuje spínání relé motorů, jejich moment a sleduje úbytek napětí v síti. **Spectrum™:** provede harmonickou analýzu a řeší problémy spojené s kvalitou energie. [20]

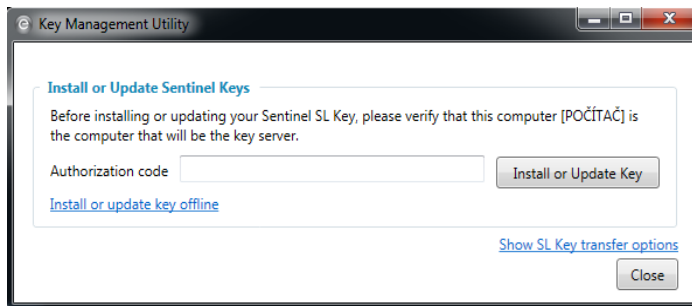
¹⁸ Moduly schopné činnosti sami o sobě – nepotřebují ke své funkci žádný jiný modul

¹⁹ <https://www.easypower.com/products/easypower>

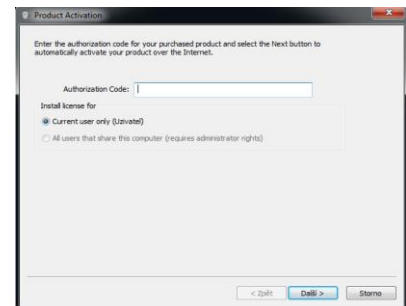
3.3.1. Práce s programem

První věc, kterou musí uživatel provést je registrace na stránkách EasyPower. Bez registrace není možné požádat o **autorizační kód** k programu. Po úspěšné registraci přijde na email zpráva, ve které je uživatel vyzván kontaktovat kontaktní osobu pro daný region. Ta má za úkol předat autorizační klíč.

Během dvou pracovních dní byla vyslyšena žádost o autorizační kód. Při spuštění programu je nutné se otevře dialog, který vyzívá ke vložení autorizačního kódu.

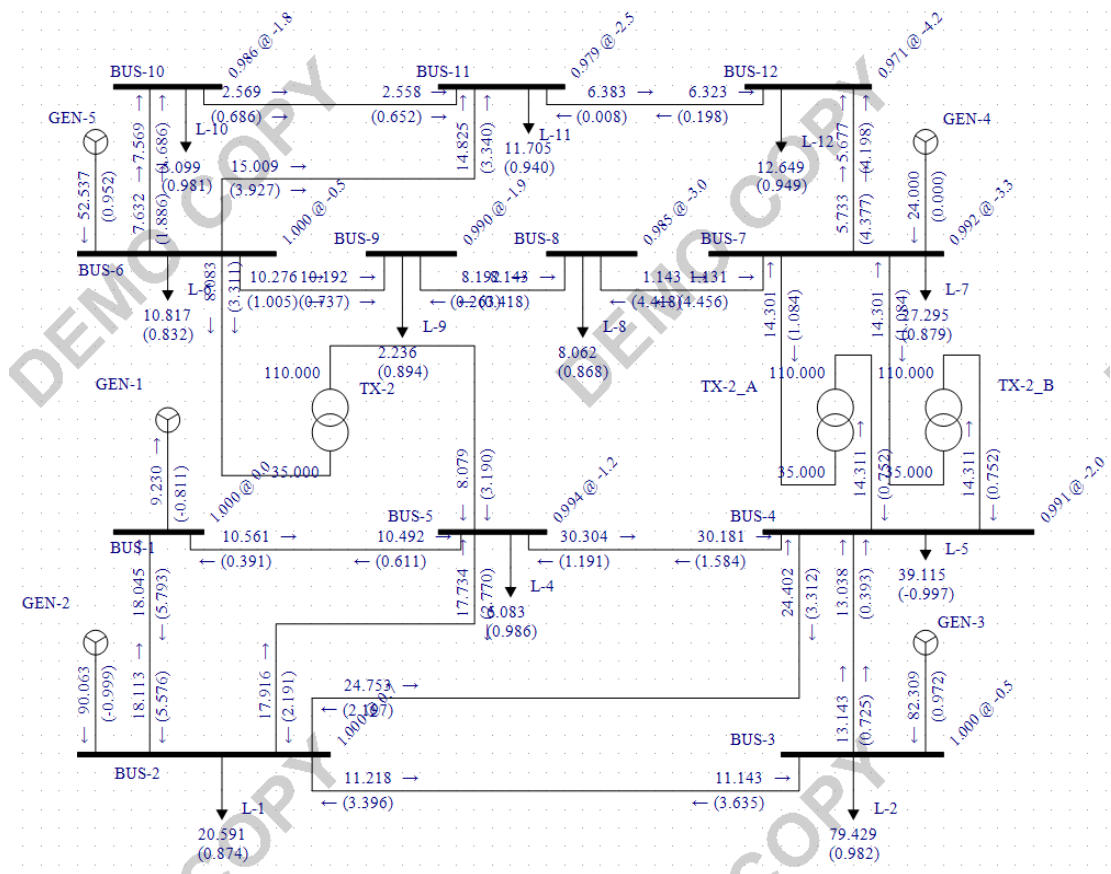


Obr. 25 – potvrzení autorizačním kódem a instalace



Obr. 26 – opětovné potvrzení

Po úspěšné autorizaci je potřeba nastavit výchozí nastavení programu. ANSI – standard pro US resp. severní ameriku. IEC – standard zbytek světa mimo US. Pro demo verzi **nelze rotovat** jednotlivé součástky. To přispívá k určité chaotičnosti a výsledné schéma může působit, v kombinaci s vodoznakem „DEMO COPY“ nepřehledně.



Obr. 27 – schéma analyzované sítě včetně výsledků

Pro každou přípojnicí je potřeba uvést její jmenovité napětí v kV. Je možné nastavovat parametry jako přidělení do zóny či další, které souvisí s konkrétními typy analýz.

V obrázku napravo se objevují pole, která charakterizují chování vzdušného vedení v rámci výpočtového modelu. Jedná se o odpor, reaktanci podélnou/příčnou vztahenou na km.

Obr. 28 – přípojnice

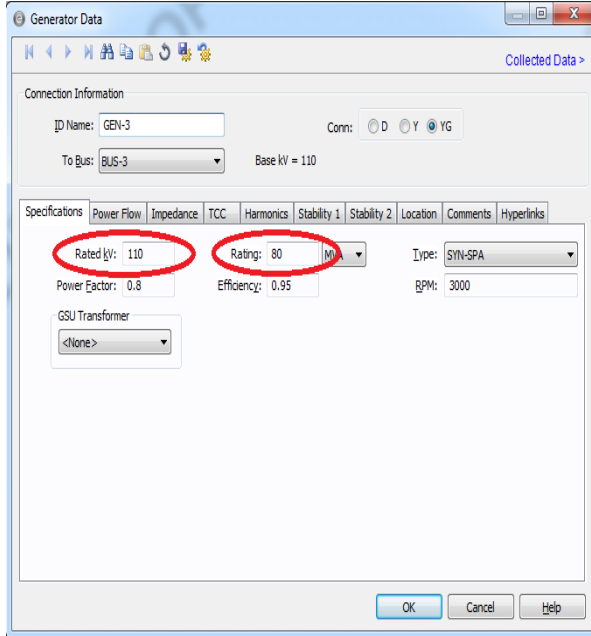
Obr. 29 – vedení

Pro nastavení parametrů transformátoru musíme nejprve zvolit, mezi které uzly transformátor připojíme a jakým způsobem budou zapojena vinutí transformátoru. Poté bude nastaveána velikost napětí na primární a sekundární straně. Musí být uveden i výkon transf. v MVA.

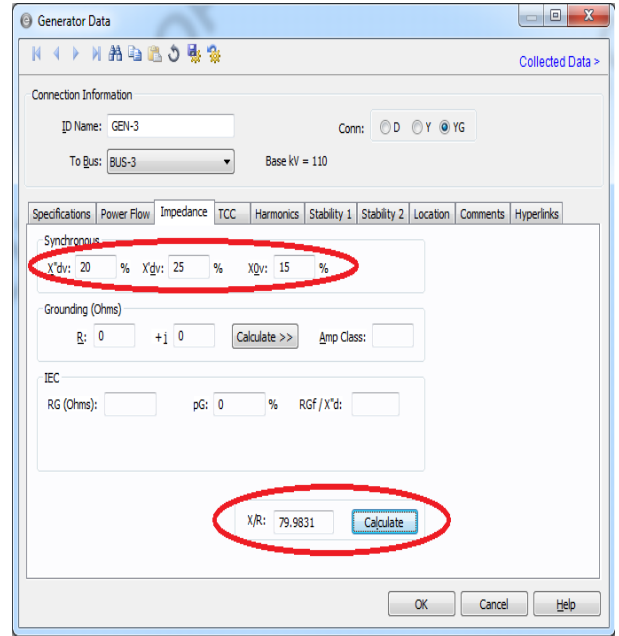
Obr. 30 – transformátor

Obr. 31 – transformátor impedance

Na obr. 31 – Impedance $Z\%$ odpovídá napětí $uk\%$, $Z0$ odpovídá impedanci naprázdno. X/R je poměr mezi X a R transf. V případě, že transf. není znám, je možné vybrat ze standardizovaných typů transformátorů (obr. 32), které vycházejí z katalogových hodnot. Na základě volby transf. si lze dopočítat parametry impedancí kliknutím na tlačítko „Calculate“. Získáme tak řádově hodnotu impedance, bez které nelze spustit simulaci – více manuál²⁰.



Obr. 32 – generátor



Obr. 33 – generátor reaktance

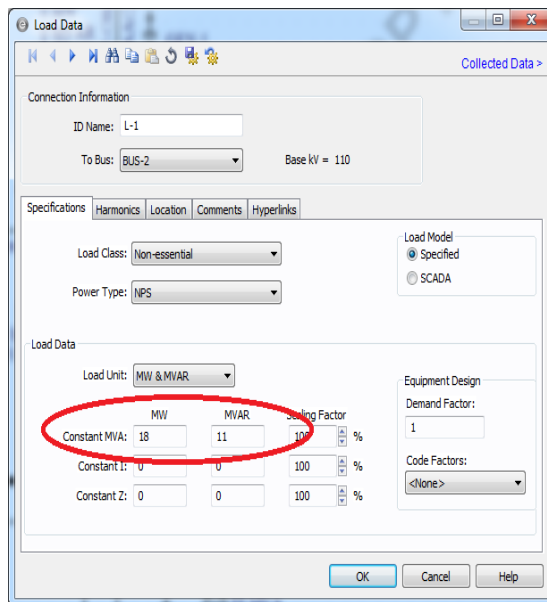
Tento program je natolik sofistikovaný, že vyžaduje zadat i takové parametry, jako jsou např. rázová či přechodová reaktance (viz. obr. 33). V teoretickém úvodu není zmíněna problematika výpočtu rázových reaktancí a vzhledem k tomuto nedostatku byla hodnota rázových reaktancí zvolena dle manuálu/předlohy, která v podstatě udává, v jakých mezích se hodnoty těchto reaktancí běžně pohybují. (zvolené hodnoty z rozmezí viz. obr. 34)

Option	Description
X''_{dv}	Subtransient reactance in percent on generators MVA base. Most synchronous generators have subtransient reactances in the 9-20% range ¹ . The subtransient reactance is used for ½ cycle, 5 cycle and 30 cycle short circuit calculations in accordance with ANSI Standards.
X'_{dv}	Transient reactance in percent on generators MVA base. This value typically ranges from 15-30%. The transient reactance is not used in ANSI standard calculations except for hydro and salient pole generators without amortisseur windings ($X_{pu} = 0.75X'$).
$X0v$	Zero sequence reactance in percent on generators MVA base. This value may range from 3-15% for typical generators. Zero sequence values are used in all ground fault calculations.

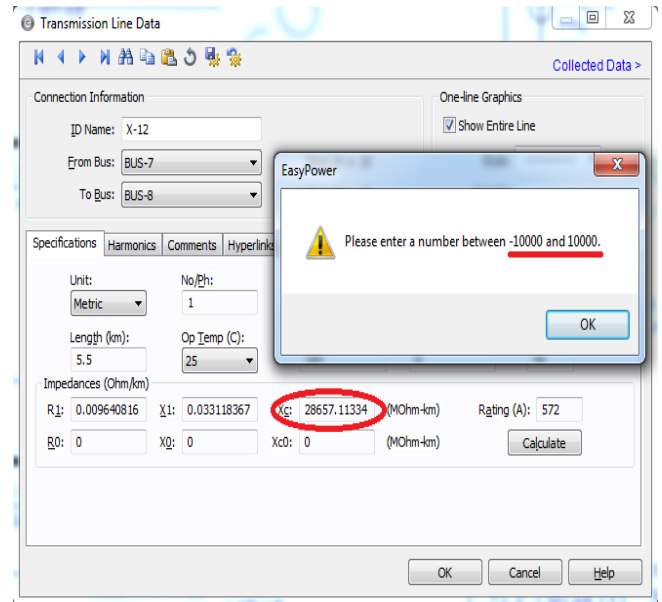
Obr. 34 – screenshot rázových reaktancí ze stránek supportu

²⁰ http://help.easypower.com/ezp/9.7/Content/13_Database_Technical_Ref/Database_Technical_Reference.htm

Zátěže se nastavují triviálně volbou požadovaného výkonu pro zvolenou zátěž. Tento program vyžaduje zadávat příčnou kapacitní reaktanci, která nesmí být více než 10000.



Obr. 35 – zátěž



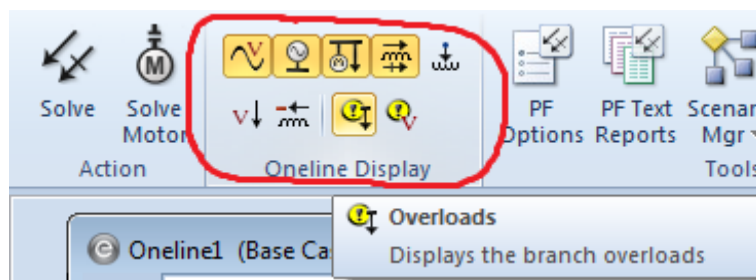
Obr. 36 – problém s příčnou kap.reaktancí

Po zadání všech potřebných parametrů stačí na liště analýz kliknout na **Power Flow** a dát **Solve**. Výsledek se analýzy se zobrazí přímo ve schématu vedle každé přípojnice.



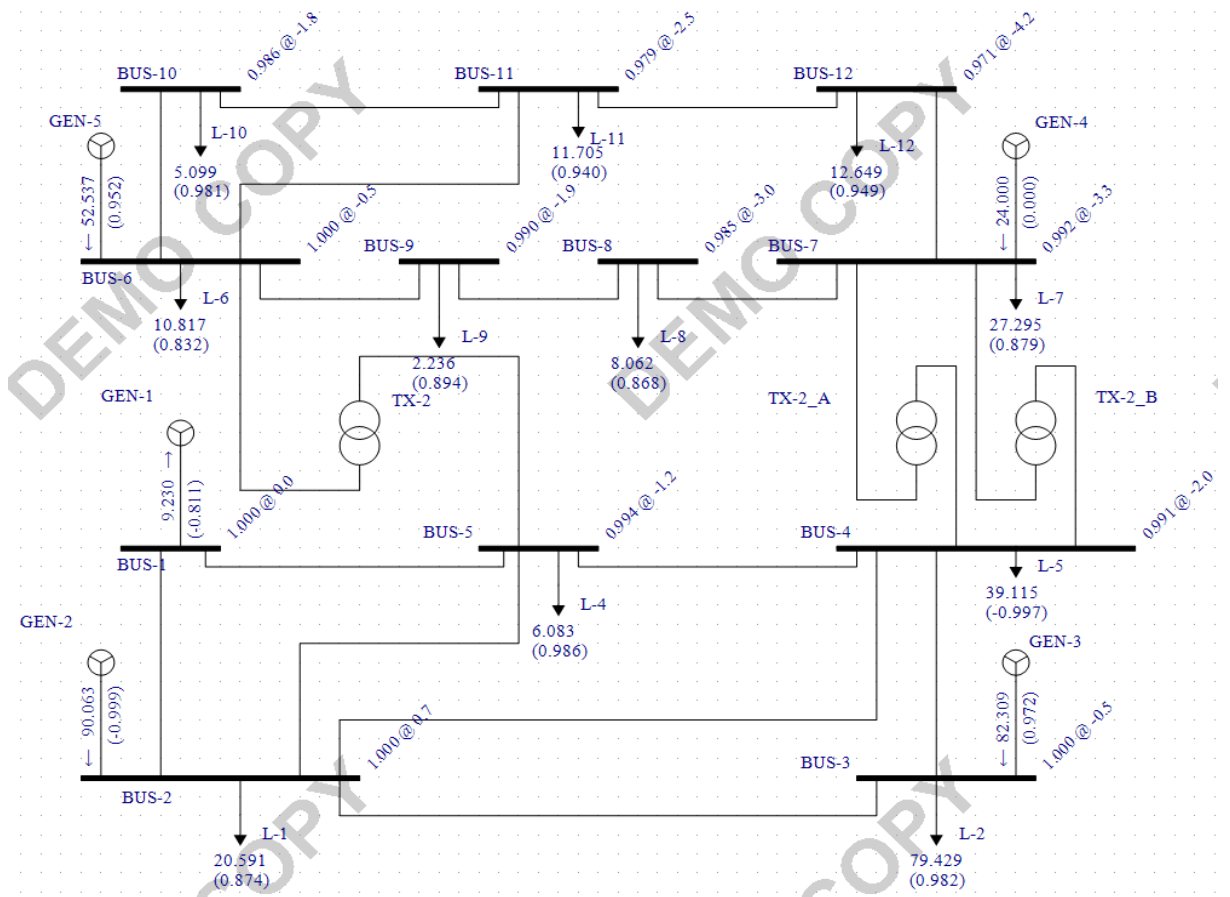
Obr. 37 – lišta pro spuštění jednotlivých druhů analýz

Hodnoty zobrazované v one-line diagramu lze navolit na ovládací liště viz. obr 38., která se zobrazí.



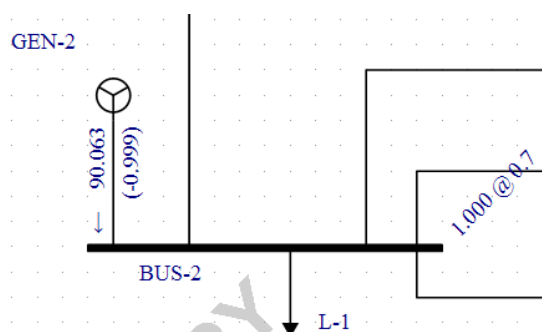
Obr. 38 – lišta pro zobrování výsledků a překročení limitů

Při pohledu na schéma z obr. 27, které obsahuje všechny zobrazitelné informace, je zřejmé, že schéma je poněkud zahlcené informacemi. Z toho důvodu je vhodné zobrazovat spíše klíčová data. Pakliže odebereme určité zobrazované parametry, docílíme větší přehlednosti viz. obr. 39.



Obr. 39 – schéma zobrazující pouze vybrané parametry

Generátor na obr. 40 dodává výkon $S=90,063\text{MVA}$. Na generátoru je ovšem nastavené, aby generoval $P=90\text{MW}$. Generátor pracující v PV uzlu má za úkol udržet konstantní napětí na přípojnici. Úbytek na přípojnici je přímo kompenzován generátorem. Je zřejmé, že pokud $P \neq S$ generator dodává Q. EasyPower zobrazuje zdánlivý výkon z generátorů oproti PWS, který vedle generátorů zobrazuje výkon P a Q.



Obr. 40 – lišta pro spuštění jednotlivých druhů analýz

Z vyplývajících screenshotů vyplývá, že EasyPower je spíše graficky orientovaný. Výsledky simulace se lišili jen minimálně vůči PWS. Drobné rozdíly jsou v interpretování výstupu (zobrazované veličiny). Neumožňuje export (demo verze), ale uvnitř programu je možné zobrazit výsledky tabulkově, které lze následně vyscreenovat. Nelze uložit ani sdílet (po zavření zmizí veškerá práce – demo verze).

3.4. E-Vlivy 3 / DNCalc

Výpočetní systém, který umožňuje komplexní analýzu rozsáhlých, hustě zauzlených elektrických sítí. Řeší úlohy spojené s provozem a rozvojem distribučních sítí. Dokáže provést analýzu chodu sítě v ustáleném stavu, poruchové stavy. Také ztráty činného a jalového výkonu. Mimo standardní funkcionality umožňuje i posouzení kvality elektřiny, připojitelnost obnovitelných zdrojů do distribučních sítí. Software obsahuje prvky Smart Grids.

Implementována je iterační výpočetní metoda Implicit Z bus. Výsledková sestava ustáleného chodu obsahuje vypočtené hodnoty napětí v uzlech a proudy, výkony ve větvích modelované sítě. Hodnoty napětí a proudů jsou interpretovány pomocí velikostí a úhlů fázorů. V každém uzlu je možné zobrazit hodnoty vypočteného zkratového výkonu resp. vypočtenou velikost napěťové nesymetrie. Výsledky jsou prezentovány pro každou fázi a ev. nulový vodič.

Software také zohledňuje různé způsoby regulace OZE i konvenčních zdrojů, automatiky transformátoru apod. Software umožňuje modelovat napěťovou citlivost zatížení. Výpočet ustáleného chodu se provede pro jeden časový řez, nebo lze využít výpočty časových rozvojų, kdy lze počítat se zadaným časovým krokem profil výkonů a napětí v zadaném období.

Metodika výpočtu zkratů je založena na metodě rozkladu trojfázového systému do systému souměrných složek, výpočtu Theveninovi zkratové admitanční matice a metodě ekvivalentního zdroje. Modelovat lze poruchy symetrické i nesymetrické. Zkrat lze uvažovat mezi fázemi, na zem, na nulový vodič v sítích nn, nebo libovolnou kombinací uvedeného. Výsledková sestava obsahuje velikost zkratového proudu v řešeném uzlu, toky poruchových proudů v každé modelované větvi, napětí v síti při poruše v uzlech, složkové impedance i složková napětí a proudy.

3.4.1. E-Vlivy 3 (základ pro DNCalc)

Balíček E-Vlivy 3 se skládá (*mimo základní balíček*) z celkem **tří modulů**:

Připojitelnost: Tato funkcionality umožňuje posouzení připojitelnosti odběrů a zdrojů k síti. Stanoví velikost napěťové změny vyvolané zařízením a porovná ji s limitními hodnotami.

Kvalita elektřiny: obsahuje nástroje pro komplexní posouzení zpětných vlivů (*dle ČSN a PNE*) odběrů či zdrojů jak v rámci současného stavu, tak i budoucího stavu – umožňuje připojení nových rušivých odběrů či úpravy v síti. Umožňuje výpočet harmonického znečištění sítě, kdy výsledkem je vypočtené spektrum harmonických napětí i proudů. Výpočtem lze stanovit a posoudit míru útlumu signálu HDO²¹ v síti vlivem připojených zařízení. Implementován je výpočet pro stanovení impedance sítě v každém uzlu na hladině nn pro potřeby porovnání se vztažnou hodnotou impedance. Dále lze výpočetně zohlednit rozběh asynchronních motorů. Implementován je výpočet šíření měřeného i modelovaného flikru, jehož výstupem je vypočtená hodnota Pst²² v každém uzlu.

Třífázové výpočty: Třífázové výpočty dávají uživateli rozšiřující možnosti z hlediska výpočtu v elektrických sítích při zohlednění nesymetrických zátěží nebo zdrojů. Tato funkcionality je zajímavá kvůli relativně preciznímu popisu poměrů v každém vodiči zvláště. Využívá se například pro připojení většího počtu 1-fázových výroben v sítích nn atd.

²¹ HDO – Hromadné Dálkové Ovládání

²² Pst – krátkodobá míra vjemu flikru

3.4.2. DNCalc (obsahuje výše zmíněné)

Jelikož DNCalc vychází z programu E-vlivy 3, jedná se taktéž o program zabývající se analýzou sítí a dalšími jevy s tím spojenými. Prakticky nabízí tytéž funkcionality jako **celý balíček E-vlivy 3** s tím, že disponuje **dalšími rozšířeními** v podobě nových modulů.

Modul Smart Grids: modul poskytuje nástroje a prvky, které umožňují uživateli analyzovat a modelovat rozptýlenou výrobu v síti. Rozptýlenou výrobou jsou zejména myšleny připojované obnovitelné zdroje, jako například solární elektrárny, či větrné turbíny. Dokáže provádět tuto analýzu napříč všemi napěťovými hladinami a obsahuje také další funkcionality.

Modul Spolehlivost: Spolehlivost je základním kamenem elektrizační soustavy. Tento modul umožňuje analýzu přínosu nasazení moderních spínacích prvků, změn řazení sítě a poté následný přínos ke zvýšení spolehlivosti z hlediska distribuce elektrické energie. Podružná funkcionality tohoto modulu je výpočet ekonomické návratnosti takovýchto zařízení. Ukazatele nepřetržitosti a Velikost nedodané energie.

GIS & Maps: Zakresluje el. schéma do mapových podkladů, takže je možné vidět jak terén, tak i příslušnou elektrickou část. Mapy je možno nahrávat z jiných softwarů na platformě typu GIS. Poskytuje nástroje pro úpravu map resp. elektrického schéma zakresleného nad mapou. Software obsahuje funkci vyhledání prvku v mapě podle zadaných parametrů.

On-line výpočty: Tento modul zahrnuje výpočty přes cloud (*on-line*). Zdroj dat poté určuje dané rozhraní. E-vlivy3 umožňují import dat z externích SCADA systémů, ale také systémy pro archivaci a hodnocení měření v elektrických sítích a další.

Konverze: V případě jednoznačně popsaného souboru je samozřejmě možné zpracovat rozhraní, z kterého bude DNCalc schopen rekonstruovat síť ve vlastním prostředí. Již nyní jsou implementovány verifikační nástroje, které kontrolují správnost (*nejen topologickou, ale i elektrickou*) modelovaného schématu.

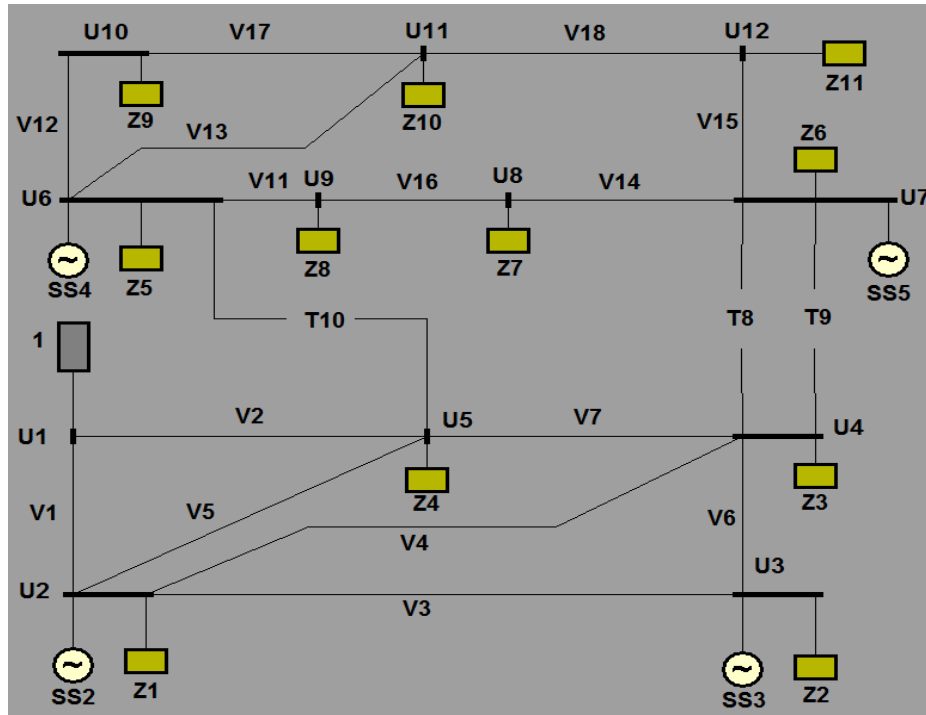
Na stránkách výrobce je uvedeno, že program E-vlivy 3 již dnes není rozvíjen, nicméně je udržována podpora pro stávající aplikace. Pro nově vznikající projekty se používá **DNCalc**, což je jakýmsi evolučním pokračováním E-Vlivy 3. **DNCalc i E-vlivy** jsou vyvíjeny společností EGC-EnerGoConsult ČB s.r.o.²³.

Tato kapitola byla vytvořena podle: [21]

²³ <https://www.egc-cb.cz/>

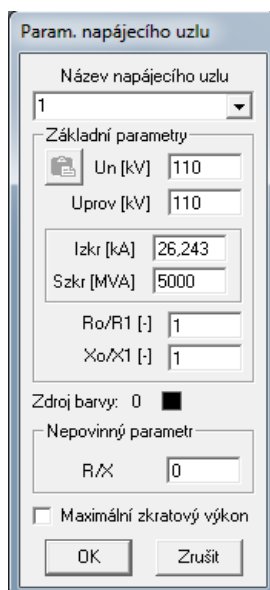
3.4.3. Práce s programem (E-Vlivy)

Ze všeho nejdříve byla vybudována testovací síť. Kontrola vstupních parametrů dle PWS. Program pracuje na principu umístění modelů do prostředí programu a následném nastavení těchto parametrů skrze rozklikávací okna. Komponenty se pouze propojí a zvolí se typ analýzy.

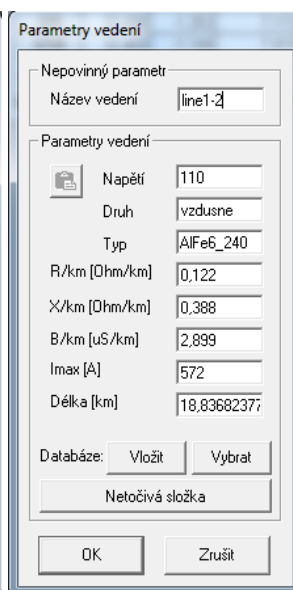


Obr. 41 – porovnávaná síť

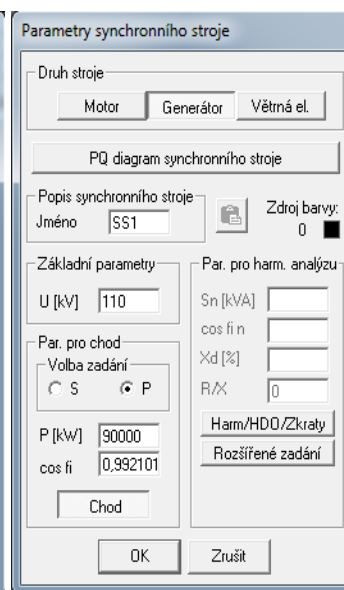
Schéma celé sítě se buduje prakticky sériově. To znamená, že se postupuje z uzlu do uzlu. Uzly je poté možno rozšířit a napojit na ně další prvky. Pro přehlednost byly některé přípojnice zdvojeny či ztrojeny. Při poklepání na jednotlivé prvky sítě se otevřou následující okna:



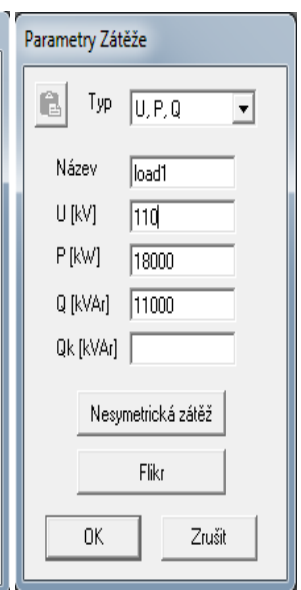
Obr. 42 – nap. uzel



Obr. 43 – vedení



Obr. 44 – generátor



Obr. 45 – zátěž

Evlivy se od ostatních programů odlišují tím, že mají specificky vyřešený „napájecí uzel“. Je to prvek označený ve schématu jako 1. Tento prvek vyžaduje zadání hodnot zkratového proudu, respektive zkratového výkonu, který se musí před simulací určit.

Při hledání hodnoty zkratového výkonu napájecího uzlu byla použita předloha výsledků z PWS. Bylo známo, kde má být jaké napětí a manuální iterací bylo dosaženo shody s výsledky s PWS. Hodnota zkratového výkonu pro tuto simulaci byla zvolena $S_{Vzkr} = 5000\text{MVA}$. Při větším nastavení S_{Vzkr} se proudy ve vzdálenějších větvích prakticky nemění. Určuje tvrdost.

V E-vlivech se parametry vedení nezadávají v poměrných jednotkách, ale uvede se R, X, B na kilometr a poté příslušná délka vedení. Do programu lze nahrát externí databázi vedení (*nejen*), popř. si vytvořit vlastní šablonu pro vedení. V případě této sítě je všude zvoleno jedno stejné vedení ve všech částech. Vytvořením jednoho záznamu vlastního vedení do datábeze urychlilo postup rozklikávání a nastavování parametrů všech vedení.

U generátorů kliknout na ikonku „Generátor“. U všech synchronních strojů byl zadáván činný výkon a $\cos(\varphi)$. Hladina pro všechny generátoru je 110kV.

Zátěží je v E-vlivech několik druhů, je potřebné vybrat správnou variantu. V našem případě zadáváme U, P, Q. Parametry P, Q se zadávají v kW resp. v kVar.

Uzel	U [kV]	Úhel [°]	dUn [%]	Zk [Ohm]	Úhel [°]	Sk [MVA]
U1	109,604	0,081	0,360	2,966	90,000	4487,031
U2	109,205	0,814	0,723	9,258	78,061	1437,678
U3	106,659	-0,169	3,037	22,424	74,818	593,556
U4	107,024	-1,732	2,705	14,883	75,998	894,301
U5	107,551	-0,969	2,226	13,601	76,300	978,611
U6	33,773	-0,190	3,506	2,851	81,248	472,639
U7	33,951	-3,168	2,997	2,324	80,241	579,833
U8	33,529	-2,948	4,202	3,694	76,969	364,788
U9	33,558	-1,819	4,120	4,134	76,908	325,938
U10	33,323	-1,556	4,790	5,174	76,955	260,458
U11	33,159	-2,066	5,259	4,303	77,421	313,176
U12	33,107	-3,893	5,407	4,869	75,917	276,755

Obr. 46 – výstupní hodnoty pro uzly

Evlivy nezohledňují, nebo nepracují s +10% přírůstek napětí, který je obvykle dovolený. Proto již na první přípojnicí vzniká drobný úbytek. PWS oproti E-vlivům ví, že může lehce zvednout napětí, pokud může a to sice v nastavených mezích (*obvykle +/-10%*). Zlepšuje tak profil napětí v jednotlivých přípojnicích – nicméně E-vlivy tak díky nižšímu napětí při konstantním odebraném výkonu S počítají s o něco menšími proudy.

Z tabulky pro výkony a proudy ve větvích si lze zjistit, zdali není nějaký prvek přetěžován. Červeně označená hodnota signalizuje zvýšenou hodnotu. Tabulka výsledků je generována v takovém pořadí, jak byla budována síť.

Proudy a výkony ve větvích								
Prvek	Uzel	I [A]	Úhel [°]	Z [Ohm]	Úhel [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]
1	U1	92,540	68,156	2,689	90,000	6560,090	-16296,204	17567,044
V1	U1	109,023	32,565	7,689	72,612	17458,647	-11114,259	20696,162
	U2	110,896	34,075	7,689	72,612	-17542,004	11501,897	20976,548
Z1	U2	109,159	-29,512	577,618	30,335	17820,957	10428,414	20647,962
V3	U2	67,877	146,859	25,117	72,624	-10648,872	-7173,000	12839,409
	U3	74,599	139,711	25,117	72,624	10534,638	8890,148	13784,533
V6	U3	72,343	-153,459	24,435	72,623	-11945,564	5999,936	13367,712
	U4	68,067	-161,490	24,435	72,623	11837,757	-4360,334	12615,269
V7	U4	160,291	-3,952	5,383	72,611	29684,779	1161,844	29707,507
	U5	160,200	-3,106	5,383	72,611	-29808,709	-1117,714	29829,657
V2	U5	69,034	-33,802	25,117	72,624	10799,710	6971,444	12854,368
	U1	63,570	-25,345	25,117	72,624	-10898,543	-5181,752	12067,675
T10	U5	58,862	47,398	2,042	89,021	7282,963	-8190,552	10960,232
	U6	184,994	47,398	2,042	89,021	-7286,544	7980,968	10806,922
T8	U4	76,667	171,363	2,042	89,021	-14105,337	-1713,636	14209,049
	U7	240,953	171,363	2,042	89,021	14099,263	1358,081	14164,519
T9	U4	76,667	171,363	2,042	89,021	-14105,337	-1713,636	14209,049
	U7	240,953	171,363	2,042	89,021	14099,263	1358,081	14164,519
V14	U7	115,898	85,512	2,245	72,611	160,884	-6811,195	6813,095
	U8	116,208	85,516	2,245	72,611	-187,996	6742,767	6745,387
V16	U8	128,065	15,254	2,921	72,611	7064,129	-2314,562	7433,647
	U9	128,187	15,425	2,921	72,611	-7107,119	2200,586	7440,008
V11	U6	169,199	-176,805	3,237	72,611	-9866,792	586,351	9884,199
	U9	169,167	-176,956	3,237	72,611	9783,729	-825,597	9818,501
V12	U6	128,724	166,329	4,179	72,611	-7313,029	-1751,024	7519,739
	U10	128,852	166,080	4,179	72,611	7250,885	1585,890	7422,289
V17	U10	46,732	170,194	4,179	72,611	-2664,203	-385,041	2691,883
	U11	46,814	169,504	4,179	72,611	2656,007	391,555	2684,714
V18	U11	103,057	-168,098	5,909	72,611	-5734,396	1430,935	5910,234
	U12	102,854	-168,530	5,909	72,611	5678,236	-1564,315	5889,775
V15	U7	131,577	131,889	4,357	72,611	-5471,652	-5467,019	7734,810
	U12	131,998	131,704	4,357	72,611	5403,798	5285,093	7558,654
V5	U2	95,744	173,449	22,583	72,621	-17960,729	-2324,258	18110,493
	U5	97,391	167,568	22,583	72,621	17772,022	3607,095	18134,384
V4	U2	131,612	174,382	22,973	72,621	-24737,978	-2792,487	24895,091
	U4	132,920	170,003	22,973	72,621	24377,562	3550,499	24634,764
Z2	U3	407,643	-11,530	151,099	11,401	73838,872	14890,054	75325,246
Z3	U4	204,034	2,954	302,785	-4,665	37689,400	-3075,334	37814,660
Z4	U5	33,179	-12,824	1870,686	11,866	6046,002	1270,329	6178,015
Z5	U6	178,510	-34,023	109,083	33,817	8663,845	5803,755	10428,125
Z6	U7	451,147	-32,500	43,434	29,364	23113,429	13004,829	26520,863
Z7	U8	140,900	-35,669	137,321	32,782	6876,145	4428,238	8178,671
Z8	U9	51,845	-28,969	373,164	27,190	2676,600	1374,966	3009,106
Z9	U10	82,309	-16,254	233,279	14,671	4586,681	1200,843	4741,273
V13	U6	233,257	167,227	3,143	72,611	-13299,836	-2964,933	13626,315
	U11	233,344	167,123	3,143	72,611	13146,441	2500,063	13382,048
Z10	U11	191,054	-25,345	100,057	23,235	10068,051	4322,550	10956,737
Z11	U12	204,144	-22,492	93,502	18,559	11082,037	3720,780	11689,985
SS2	U2	472,715	173,617	133,383	-172,794	-88710,514	-11216,168	89416,764
SS3	U3	407,234	179,872	151,250	-180,000	-75249,801	-0,004	75249,801
SS4	U6	795,499	177,386	24,478	-177,592	-46430,038	-1952,386	46471,068
SS5	U7	383,905	87,438	51,042	-90,573	-225,681	-22566,906	22568,035

Obr. 47 – výstupní hodnoty pro větve

3.5. PyPSA²⁴

PyPSA je free software **toolbox**, který se používá pro simulování a optimalizaci elektrických sítí. Není plnohodnotným softwarem (*na rozdíl např. od PSAT*), nicméně je určen pro účely výzkumu, plánování nebo jednoduchých transparentních analýz elektrizační soustavy. PyPSA toolbox může být na druhou stranu rozšířen o takřka neomezené množství rozšíření, které lze najít na „Github“²⁵ (*PyPSA podstupuje masivní vývoj a lze očekávat plno dalších rozšíření*). PyPSA zvládne i výpočty velmi rozsáhlých sítí čítající tisíce přípojnic.

Statickou (*klasickou*) power flow (*s použitím nelineárních či lineárních rovnic popisujících soustavu*). Optimální power flow (*lineární*). Optimální power flow s bezpečnostním omezením. Nástor pro nalezení nejlevnějších investic do sítě tak, aby ji co nejefektivněji optimalizovali (*používá lineární modely*). Podporuje AC i DC sítě. Zvládá výpočty s proměnou zátěží včetně výkonových rezerv (např. solární panely). Možnost provedení distribuovaného (aktivního) slack bus. Výpočty při zkratových poměrech. Jednoduché i složitější simulace přechodových dějů (*s rovnicemi pro kyvy u syn.gen.*). Schopnost udržovat stabilní napětí při drobných změnách zátěže (*SSSA*²⁶). Interaktivní grafy přístupné prostřednictvím webového rozhraní. Dynamické EMT²⁷ simulace. Obsahuje také globální omezení pro OPF (*hlídání CO2 emisí, ...*)

Standardizované řady vedení a transformátorů implementované v pandapower databázi. Nedoporučuje se měnit, ale uživatel si může nadefinovat vlastní parametry. Developer neručí za správnost parametrů těchto předdefinovaných vedení a transformátorů, takže je otázkou, zdali budou validní. Je zde také možnost vytvoření složitých modelů jako například tepelná čerpadla, modely elektřina-teplo atd, které mohou být poskládány z několika komponent dohromady.

Data uložené jsou uloženy v tzv. **Pandas DataFrames**²⁸ (*forma databáze/poli/matic – obdoba struktur ve workspace v Matlabu*) jsou používána pro výpočty. K tomu je využíváno rozšíření zvané NumPy²⁹, což je toolbox umožňující vědecké výpočty v Pythonu. Celkem rozlišujeme 3 typy Pandas struktur: *DataSeries(1D pole)*, *DataFrames(2D pole)* a *DataPanel(3D pole)*. Každá komponenta má svojí vlastní Pandas DataFrame (vedení, generátory, transf., atd.) ve které jsou uložena parametry modelů. Jakmile máme připravené DataFrames, můžeme vytvořit novou síť. Příkaz **network**. slouží jako kontejner, do kterého se „nahází“ potřebné DataFrames tak, aby program věděl, s čím může pracovat. Stačí postupovat dle manuálu a řídit se instrukcemi.

PyPSA nemá žádné grafické rozhraní, skrze které by zadával uživatel vstupy (*pouze práce s tabulkou*). PyPSA však tento nedostatek neřeší – místo toho se soustředí na kvalitní grafickou interpretaci výstupu prostřednictvím služby „Jupyter notebooks PyPSA“³⁰, což jsou v podstatě interaktivní grafy, které znázorňují napětí v síti, limity linek, výkonové rezervy a vše potřebné.

Možnost exportovat parametry sítě/komponent do formátu: **netCDF**, **CSV**, **HDF5**, **HDF**. Výběr formátu může hrát roli v rychlosti načítání. V rámci zrychlení procesu identifikace jsou zdroje očitovány přímo v poznámce pod čarou resp. text vytvořen dle: [22] [23] [24] [25] [26].

²⁴ PyPSA – Python for Power System Analysis

²⁵ GitHub – celosvětově uznávané uložení kódu (nejen): <https://github.com/>

²⁶ SSSA – Small Signal System Analysis: <https://www.slideshare.net/magician008/small-signal-stability-analysis>

²⁷ EMT – ElectroMagnetic Transient

²⁸ Pandas DataFrame – databáze <https://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/generated/pandas.DataFrame.html>

²⁹ NumPy – výpočtový toolbox pro Python <http://www.numpy.org/>

³⁰ Jupyter notes – tvorba grafů na základě tabulek <http://jupyter.org/>

3.5.1. Práce s programem

V tomto případě nebyla práce v prostředí PyPSA realizována vzhledem k náročnosti na programátorské zkušenosti, kterými musí uživatel disponovat. Faktorů bylo celkem několik.

Jeden z nich byl nedostatek kvalitních materiálů ať už v podobě manuálů, či návodů, tak i videí či jiných, které by dokázali zprůhlednit celý proces nastavení všech jednotlivých služeb dohromady. Některé služby, na které PyPSA spoléhá – jsou **placené**. V opačném případě je potřeba použít free alternativy, které **nemají** potřebnou **podporu** (*update, materiály, postupy*). Hrubý nástin, jakým způsobem realizovat práci s Pythonem je výše naznačen, přičemž vychází z anglické dokumentace, která se nachází na oficiálních stránkách PyPSA³¹. [24]

Postupným zprovoznění všech jednotlivých služeb se výsledně podařilo zjistit, co všechno by obnášel proces nastavení PyPSA a také jak principiálně funguje, nicméně časová náročnost pro plné zprovoznění všech analýz pomocí programování v Pythonu by byla nepřijatelně dlouhá a tedy neefektivní.

Ponaučením je, že programování v Pythonu je možné – lze naprogramovat téměř cokoliv – ale pro standardního uživatele to není příliš vhodná cesta, jak rychle a efektivně provést power flow analýzu.

Více informací o PyPSA poskytne konference:

„2017 | 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE-SCALE GRID INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY IN INDIA³²“.

³¹ PyPSA dokumentace - <https://pypsa.org/doc/index.html>

³² <https://www.youtube.com/watch?v=qqmkDHO-BEe>

3.6. MATPOWER (včetně MOST)

MATPOWER verze 6.0 16-Dec-2016 je balíček .m-filů (*Matlab*), které řeší pouze power flow a optimalní power flow. Hlavním úkolem MATPOWER je seznámit studenty a výzkumné pracovníky se simulacemi power flow s tím, že kód je psaný přehledně včetně komentářů, které vysvětlují, co která část programu zpracovává. Modifikace již připravených (*vyřešených*) sítí usnadňuje o to víc vstup do světa power flow. Kromě uvedených vlastností je snaha ze strany MATPOWER o co možná nejlepší výkon skze optimalizací algoritmů (*Matlab struktury atd.*).

Primárním úkolem je tedy řešení klasické power flow a po rozšíření i optimalní power flow. To obnáší přípravu vstupních dat, které budou definovat všechny parametry systému. Volání funkcí je nezbytné ke spouštění simulací. Výstupy jsou posílány buď na obrazovku, do výstupních struktur Matlabu, nebo do externího souboru.

Od verze 6.0 je MATPOWER schopen řešit extrémně komplikované sítě v ustáleném stavu, včetně problémů s plánováním (*výroba v čase, odstávky, apod.*). K tomu ovšem potřebuje implementovat MOST – Matpower Optimal Scheduling Tool. Jedná se prakticky o vylepšený MATPOWER, který zvládne jednodušší úkony spojené s obyčejnou power flow analýzou, ve které nejsou definovány žádné limity až po analýzu respektující bezpečnostní omezení, kombinovanou optimalní power flow s lokálními kontingencemi (*hlídá nárůsty cen a s tím spojené změny v rámci limitů sítě při odstavení vybraných jednotek generace*), výkonové rezervy (*obnovitelné zdroje*), odstřižení méně podstatných zátěží (*odložitelné požadavky*) a také ztrátové skladovací zdroje (*např. přečerpávací elektrárny*).

Pro spuštění simulace musí být nahrána vstupní data, která jsou specifikována jako set několika matic v .m-file. K tomu slouží příkazy **runpf** a **runopf**, které přijímají jako vstup buď jméno souboru, nebo Matpower „case“ strukturu (řešené sítě / možnost vytvoření a nahrání vlastní).

V případě že bychom chtěli modifikovat parametry modelů v síti (resp. topologii), můžeme použít příkaz **loadcase** jehož vstup je obdobný jako pro **runpf** a **runopf**. Provedené změny se uloží a lze pak provést simulaci s již pozměněnými hodnotami.

Defaultně se výsledky simulace vypíší na obrazovku. Mohou být uloženy rovněž do externího souboru. Výstup lze také uložit jako strukturu v matlabu ve workspace např. pod jménem **result=runpf('xx');**. Vstup obsahuje set dat (v podstatě veškerá power flow data potřebná k další analýze). Pro úplnost, tyto soubory mohou být přejmenovány, nebo mít defaultní název. [27]

3.6.1. Práce s programem

Na začátku práce s tímto programem byla použita jakási předloha již vytvořené sítě, která se nacházela v adresářích Matpoweru. To zajistilo, že všechny vazby mezi tabulkami atd. byly plně funkční. Stačilo pouze upravit obsah těchto tabulek. Tabulky byly naplněny údaji z referenčního programu – PWS. Jednalo se v podstatě o Bus a Branch table. Důvodem proč lze udělat tento krok je ten, že formát dat, který se předává mezi programy je unifikovaný (*až na drobné detaily*) a nebyla tedy potřeba znovu nějakým způsobem složitě vytvářet Bus a Branch tabulky. Ty by v obou případech vyšly stejně, protože oba programy vyžadují stejné vstupy. S touto znalostí byl částečně urychlen postup.

Poté byl spuštěn výpočet pomocí výše popsaného příkazu: `runpf('case14_to_12_CZ');`. Došlo k vyhodnocení sítě a výstupní data se v podstatě nelišila. Důvodem je to, že je použit stejný matematický aparát v obou programech a to sice Newtonova metoda. Výstup z programu vždy vytištěn na obrazovku resp. do workspace, odkud je možno jej dále zužitkovat.

Pozn.: case14_to_12_CZ je název upravené sítě obsahující potřebné/upravené vstupy

Matpower pracuje pouze s tabulkami, což se zprvu může jevit jako nevýhodné, ale někdy může být výhodnější pracovat pouze přehlednou tabulkou. Zejména pokud uživatel rozumí dané síti.

Bus Data						
Bus #	Voltage		Generation		Load	
	Mag (pu)	Ang (deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1.060	0.000*	-2.20	39.80	-	-
2	1.045	0.773	90.00	-3.95	18.08	10.58
3	1.010	0.171	80.00	-17.10	78.50	15.83
4	1.030	-1.691	-	-	39.83	-3.25
5	1.034	-0.983	-	-	6.33	1.33
6	1.070	-0.463	50.00	-6.28	9.33	6.25
7	1.090	-2.899	0.00	39.30	24.58	13.83
8	1.073	-2.444	-	-	7.50	4.83
9	1.072	-2.259	-	-	2.92	1.50
10	1.058	-1.674	-	-	5.08	1.33
11	1.055	-2.252	-	-	11.25	4.83
12	1.060	-3.762	-	-	12.42	4.17
Total:			217.80	51.77	215.82	61.23

Obr. 48 – výstupní data z Matpower pro přípojnice

Branch Data								
Brnch #	From Bus	To Bus	From Bus Injection		To Bus Injection		Loss ($I^2 * Z$)	
			P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1	2	-14.93	30.81	15.13	-30.90	0.202	0.64
2	1	5	12.73	8.99	-12.58	-10.89	0.147	0.47
3	2	3	11.84	16.33	-11.62	-17.63	0.221	0.70
4	2	4	26.00	0.12	-25.65	-1.13	0.352	1.12
5	5	2	-18.77	-1.43	18.95	-0.08	0.184	0.59
6	3	4	13.12	-15.30	-12.90	13.82	0.222	0.71
7	4	5	-31.02	0.10	31.14	-0.21	0.121	0.38
8	4	7	14.87	-4.77	-14.86	3.62	0.006	0.34
9	4	7	14.87	-4.77	-14.86	3.62	0.006	0.34
10	5	6	-6.13	11.21	6.13	-12.42	0.004	0.25
11	9	6	-12.38	4.46	12.50	-4.10	0.115	0.40
12	6	10	7.52	1.56	-7.47	-1.43	0.051	0.17
13	6	11	14.52	2.43	-14.38	-1.97	0.141	0.48
14	7	8	-1.90	10.97	1.95	-10.80	0.055	0.19
15	7	12	7.04	7.26	-6.95	-7.00	0.089	0.31
16	8	9	-9.45	5.97	9.46	-5.96	0.010	0.04
17	10	11	2.39	0.10	-2.38	-0.13	0.007	0.02
18	11	12	5.51	-2.73	-5.47	2.83	0.046	0.16
Total:							1.979	7.30

Obr. 49 – výstupní data z Matpower pro větve

3.7. PSAT

MATLAB Power System Analysis Toolbox, neboli PSAT je toolbox, který byl navržen pro výpočty týkající se power flow. Dokáže provést úkony od standardní power flow analýzy systému až po výpočet přechodových jevů v soustavě, včetně až natolik pokročilých funkcionalit jako je například **inteligentní AGC³³** (*nasazení vytrénovaných umělých neurovoných sítí*). Je plnohodnotným, graficky orientovaným softwarem, který ovšem také nabízí možnost zadávání příkazů pomocí příkazové řádky v Matlabu. Výstupní data mohou být zobrazena jak prostřednictvím tabulek, tak grafů.

PSAT řeší standardní Power Flow, Continuation Power Flow, Optimální Power Flow, Small Signal Stability Analýzu, simulace v časové oblasti a analýzy při zkratech. Součástí jsou i uživatelské (*výzkumné*) funkcionality, ale ty je třeba implementovat zvlášť.

PSAT také dokáže ohraničit, a tím zjednodušit, výpočetní síť tak, že eliminuje tu část sítě, kterou není potřeba analyzovat, nebo z jakýchkoliv důvodů je zde potřeba zjednodušit. Nadefinuje ekvivalent nadřazené/jiné sítě na okrajových přípojnicích.

Co se vstupů týče, PSAT potřebuje obdržet .m file, který obsahuje patřičné informace potřebné k vybranému typu analýzy, nebo je zde také možnost zadávání vstupu skrze soubor typu .mdl (Simulink). V případě že jsou vstupy jiného charakteru, PSAT nabízí možnost konverze pro celou řadu formátů. Pro složitější aplikace se doporučuje pracovat prostřednictvím příkazové řádky – vychází z architektury PSAT.

Schéma sítě je možné kreslit v MATLABu v prostředí Simulink. Jedná se o jakési grafické rozhraní, kam lze jednoduchým způsobem umístit (*přenesením*) námi vybrané komponenty z knihoven Simulinku (*resp. PSAT knihoven pro Simulink*). Mohou to být například generátory, přípojnice, vedení atd. Jejich vlastnosti se nastavují pro každý prvek zvlášť skrze rozkliknuté okno vlastností prvku (*možnost zadávání přes workspace - tabulky*). Simulink lze výhodně využít ke generování výpočtových matic.

PSAT disponuje kompletní a velmi sofistikovanou sadou modelů. Tyto modely reprezentují součásti přítomné v elektrizační soustavě. Mohou být importovány/exportovány v běžně se vyskytujících formátech pro powerflow např.: **PSS/E Raw** data, nebo **GE EPC** data.

Pozn.: Existuje speciální vstup – tzv. „perturbation“ nebo „disturbance“ files. Nejsou povinné a používají se v případě nastavování nezávislých proměných během simulace v časové oblasti.

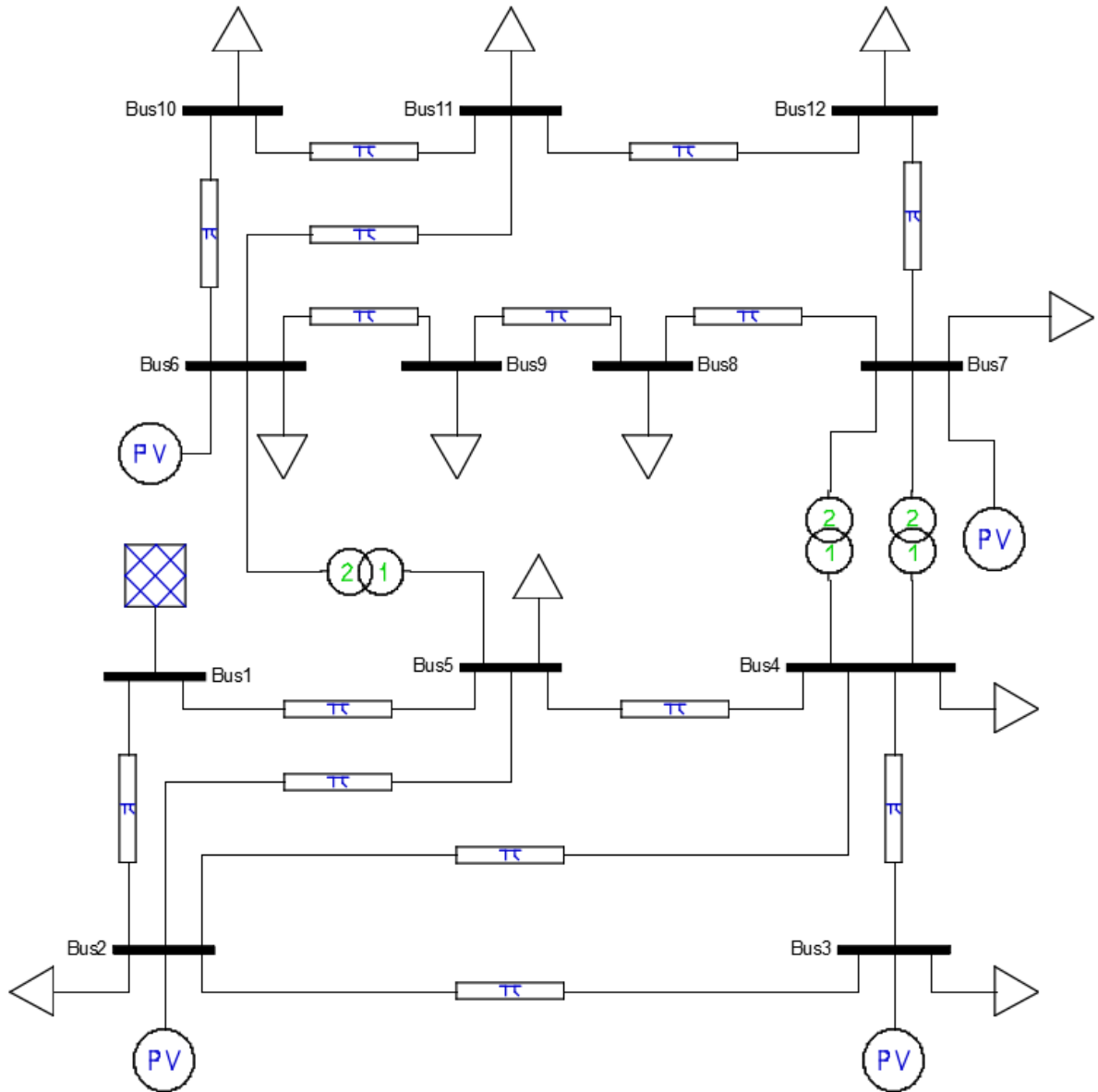
V PSAT je možné vytvořit několik grafů najednou, které mohou v jeden moment podávat výstup. Takovýto grafický výstup může reprezentovat část systému, přičemž lze nastavit, pokud jsou pro uživatele zajímavé, úroveň zobrazovaných detailů. Samozřejmostí je možnost exportování grafů. [28] [29]

Kromě vlastních maker je podporováno i skriptování v Pythonu. Pro implementaci jakékoliv přídavné uživatelské funkcionality do toolboxu PSAT je nutné upravit tzv. „classes“ a „structures“. Každá z těchto classes resp. structures je zodpovědná za vykonání určitých funkcí v PSAT a je definovaná separátním .m-file. Používá se například pro vytváření speciálních reportů. [30]

³³ AGC – Automatic Generation Control

3.7.1. Práce s programem

Při práci s tímto programem se opět vycházelo z dat, která poskytl PWS. Při práci s PSAT resp. simulinkem bylo nutné všechny parametry zadávat poklepáním na komponentu a manuálně nastavit patřičné údaje. V menu je přednastavena frekvence 50Hz, vztažný výkon 100MVA a jiné globální parametry – ty však lze měnit.



Obr. 50 – model sítě v PSAT (simulink)

Síť se opticky neliší od té, která byla vytvořena v PWS. Zásadní rozdíl oproti PWS je v zadávání parametrů. Reaktance a odpory vedení je nutné vztáhnout vůči vztažné impedanci – PSAT pracuje v poměrných jednotkách. Můžeme najít drobné nuance ve způsobu spouštění simulace, ale výsledek power flow analýzy je prakticky stejný – lze zkontrolovat pomocí textového výpisu, nebo prostřednictvím grafů.

POWER FLOW RESULTS

Bus	V [p.u.]	phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
Bus1	1	0	-0.01785	0.01267	0	0
Bus10	0.95476	-0.06501	0	0	0.0508	0.0133
Bus11	0.93442	-0.09374	0	0	0.1125	0.0483
Bus12	0.92067	-0.1596	0	0	0.1242	0.0417
Bus2	1	0.00868	0.9	-0.08357	0.1808	0.1058
Bus3	1	-0.01287	0.8	0.17061	0.785	0.1583
Bus4	0.99372	-0.03761	0	0	0.3983	-0.0325
Bus5	0.99636	-0.02374	0	0	0.0633	0.0133
Bus6	1	0.00167	0.5	0.1737	0.0933	0.0625
Bus7	1	-0.08303	0	0.31332	0.2458	0.1383
Bus8	0.96862	-0.07843	0	0	0.075	0.0483
Bus9	0.96979	-0.07142	0	0	0.0292	0.015

LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus1	Bus2	1	-0.14228	0.04181	0.00039	-0.00597
Bus4	Bus2	2	-0.26152	0.04034	0.00374	-0.00948
Bus7	Bus12	3	0.08607	0.0561	0.00311	0.01055
Bus12	Bus11	4	-0.04124	0.00385	0.00079	0.00256
Bus6	Bus11	5	0.13834	0.05552	0.00471	0.01611
Bus6	Bus10	6	0.07366	0.0274	0.00174	0.00589
Bus11	Bus10	7	-0.0209	-0.0076	0.00023	0.00061
Bus3	Bus2	8	-0.12262	0.02966	0.00083	-0.01806
Bus4	Bus3	9	-0.13657	-0.00207	0.00105	-0.01941
Bus5	Bus1	10	-0.12354	0.00856	0.0009	-0.02058
Bus4	Bus5	11	-0.34063	0.0395	0.00146	-0.00037
Bus5	Bus2	12	-0.18594	0.02889	0.00186	-0.01516
Bus9	Bus6	13	-0.09657	-0.00753	0.00218	0.00739
Bus8	Bus9	14	-0.06724	0.00785	0.00013	0.00038
Bus7	Bus8	15	0.00828	0.05786	0.00052	0.00172
Bus4	Bus7	16	0.17021	-0.02264	0.00013	0.0079
Bus4	Bus7	17	0.17021	-0.02264	0.00013	0.0079
Bus5	Bus6	18	-0.0959	-0.01087	4e-05	0.00248

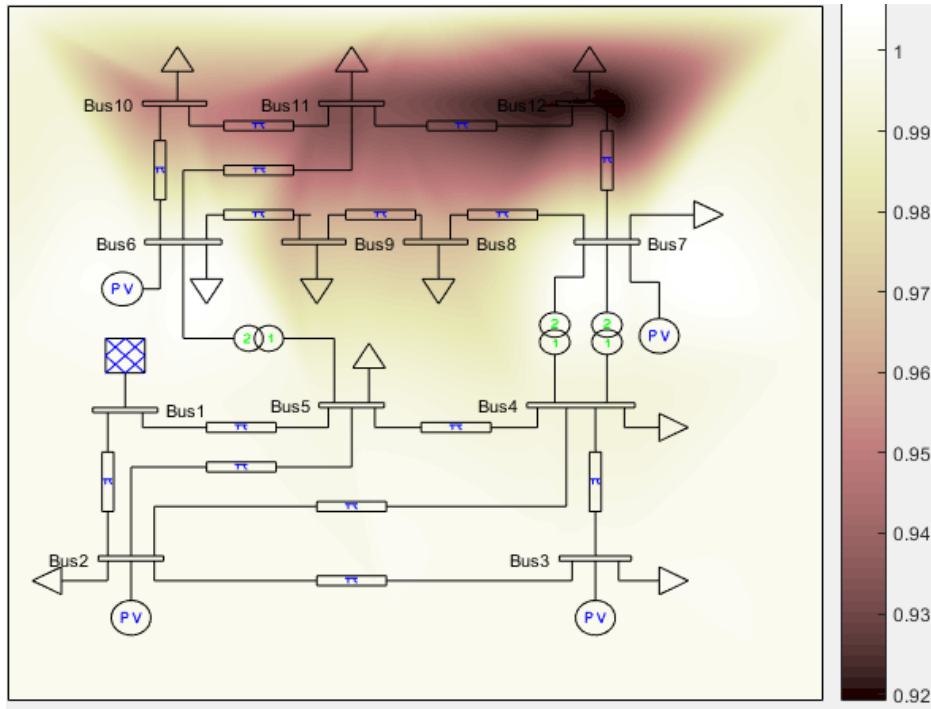
LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus2	Bus1	1	0.14267	-0.04778	0.00039	-0.00597
Bus2	Bus4	2	0.26527	-0.04982	0.00374	-0.00948
Bus12	Bus7	3	-0.08296	-0.04555	0.00311	0.01055
Bus11	Bus12	4	0.04203	-0.00129	0.00079	0.00256
Bus11	Bus6	5	-0.13363	-0.03941	0.00471	0.01611
Bus10	Bus6	6	-0.07192	-0.02151	0.00174	0.00589
Bus10	Bus11	7	0.02112	0.00821	0.00023	0.00061
Bus2	Bus3	8	0.12345	-0.04772	0.00083	-0.01806
Bus3	Bus4	9	0.13762	-0.01735	0.00105	-0.01941
Bus1	Bus5	10	0.12444	-0.02914	0.0009	-0.02058
Bus5	Bus4	11	0.34208	-0.03987	0.00146	-0.00037
Bus2	Bus5	12	0.18781	-0.04405	0.00186	-0.01516
Bus6	Bus9	13	0.09875	0.01492	0.00218	0.00739
Bus9	Bus8	14	0.06737	-0.00747	0.00013	0.00038
Bus8	Bus7	15	-0.00776	-0.05615	0.00052	0.00172
Bus7	Bus4	16	-0.17007	0.03053	0.00013	0.0079
Bus7	Bus4	17	-0.17007	0.03053	0.00013	0.0079
Bus6	Bus5	18	0.09594	0.01335	4e-05	0.00248

Obr. 51 – vyexportované výsledky simulace

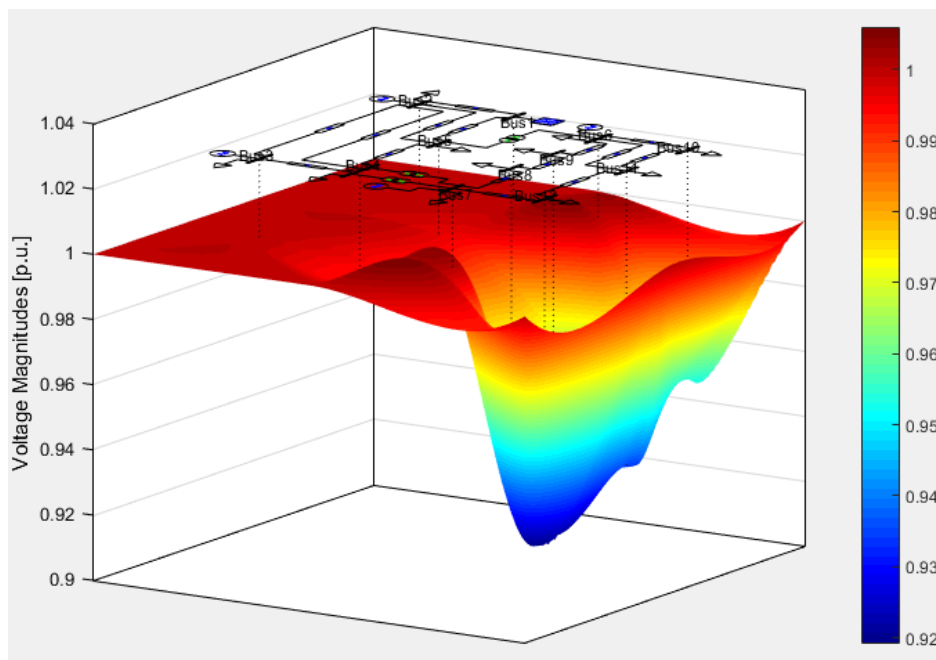
Grafické zobrazení úbytku napětí na přípojnicích. Tmavší barva odpovídá poklesu napětí. Je vidět, že v okolí generace – spodní část – nedochází téměř k žádnému úbytku.

Zjištěním bylo, že oproti PWS si PSAT neuvědomuje, že může zvednout napětí nad 1,0pu na přípojnicích s generátory. Snaží se udržovat 1,0 pu, ačkoliv by mohl v místě generace poskytnout 1.1pu (nastavené rozmezí 0,9 – 1,1pu). Zbytek sítě by pak měl mnohem lepší profil.



Obr. 52 – model sítě v PSAT - tepelná mapa

Výhodou PSAT je, že dokáže vykreslit 3D model sítě, na kterém je mnohem více patrné, jaká nastala situace v síti. Průběh napětí v síti je barevně odškálován v poměrných jednotkách.



Obr. 53 – 3D model sítě v PSAT - tepelná mapa

4. Tabulkové porovnání

Porovnání programů: **PWS, MATPOWER, PSAT, E-vlivy 3, DNCalc, PyPSA, ETAP, EasyPower** v rámci vybraných kritérií. Porovnání je založené na informacích poskytnutých/získaných od výrobce společně s testováním programů a ověřováním.

4.1. Typy dostupných licencí

Tab. 10 – Licenční politika tabulkové porovnání

Software	Free Licence	Student Licence	Demo Licence	Placená licence	Placené rozšíření
PWS	✓	✓	-	✓	✓
MATPOWER	✓	-	-	-	-
PSAT	✓	-	-	-	-
E-vlivy 3 / DNCalc	-	-	✓	✓	✓
PyPSA	✓	-	-	-	-
ETAP	-	-	✓	✓	✓
EasyPower	-	-	✓	✓	✓

Free licence – software je zdarma v plné verzi. **Student Licence** – uživatel se prokáže jménem instituce a je mu poskytnuta „plnější“ verze softwaru. **Demo licence** – Developeři nabízejí časem/funkcemi limitovaný produkt. **Placená licence** – Umožňuje koupit plné verze software. **Placené rozšíření** – nelze zakoupit bez předem zakoupeného software (otevřít funkcionality).

4.2. Počet přípojnic

Tab. 11 – Licenční politika tabulkové porovnání

Software	Free Licence	Student Licence	Demo Licence	Placená licence
PWS	13	40	-	250 000/(neomezeně)
MATPOWER	(neomezeně)	-	-	-
PSAT	(neomezeně)	-	-	-
E-vlivy3 / DNCalc	-	-	50	(neomezeně)
PyPSA	(neomezeně)	-	-	-
ETAP	-	-	12	(neomezeně)
EasyPower	-	-	25	(neomezeně)

Placené licence mohou mít několik úrovní nabízeného počtu přípojnic. Obecně však platí, že placené software **nemají** problém s počty přípojnic. Všechny typy limitovány výkonností PC.

4.3. Funkcionality

Tyto typy funkcionalit/výpočtů jsou obecně známy v power flow komunitě. Detailnější popis nabízených funkcionalit vždy pro každý program zvlášť v kapitolách „nabízené funkcionality“.

Tab. 12 – Nabízené funkcionality tabulkové porovnání

Software	Napěťová stabilita a limity	OPF standard	OPF výk. rezervy	OPF bezp. omez.	Přechodová stabilita
PWS	free/student	free/student	placené	placené	placené
MATPOWER (+MOST)	free	(free)	(free)	(free)	-
PSAT	free	free	free	-	free
E-Vlivy3 DNCalc	placené	vývoj	vývoj	vývoj	vývoj
PyPSA	free	free	free	free	free
ETAP	demo/placené	demo/placené	demo/placené	demo/placené	demo/placené
EasyPower	placené	placené	placené	placené	placené

Napěťová stabilita a limity – výpočet napěťových poměrů; hlásí překročení limitů.

OPF – vyhledá optimální cenovou bilanci generace při dodržení všech limitů.

OPF bezp. omez. – zohledňuje (N-1) kritérium, či více a nalezne pro tento stav optimum.

OPF výk. rezervy – pracuje s rozptýlenou generací a přitom hledá optimální stav generace.

Přechodová stab. – řeší drobné výkyvy vznikající proměnou zátěží.

Tab. 13 – Nabízené funkcionality tabulkové porovnání

Software	Výpočty Zkratů	Harmonická Analýza	Nastavení Ochrán	Tepelné Mapy	Cloud Výpočty
PWS	placené	-	-	placené	placené
MATPOWER (+MOST)	-	-	-	-	-
PSAT	free	-	-	free	-
E-Vlivy3 DNCalc	placené	placené	placené	placené	placené
PyPSA	free	free	-	free	free
ETAP	demo/placené	demo/placené	placené	demo/placené	placené
EasyPower	placené	placené	placené	placené	placené

Výpočty zkratů – simulace poruch a jejich dopady ve všech místech systému.

Harmonická Analýza – zkoumá kvalitu dodávky el. energie; vykresluje průběhy a posoudí je.

Nastavení Ochrán – nastavení ochranných prvků uvnitř systému; selektivita jištění.

Tepelné Mapy – pokročilé práce s grafy včetně tepelných map.

Cloud Výpočty – umožňuje spolupráci s výpočetním střediskem.

4.4. Uživatelské rozhraní programů

Tab. 14 – Uživatelské rozhraní tabulkové porovnání

Software	GIS	GUI	CAD
PWS	student/placené	free/placené	free/placené
MATPOWER	-	-	-
PSAT	-	free	free
E vlivy 3	-	placené	placené
DNCalc	placené	placené	placené
PyPSA	-	-	-
ETAP	placené	placené	placené
EasyPower	placené	placené	placené

GIS – možnost práce s geografickými podklady a mapami uvnitř programu. **GUI** – uživatelské rozhraní, skrze které se zadávají informace (opakem je práce s tabulky). **CAD** – možnost kreslit schéma el. sítě v programu. (rozdíl mezi GUI a CAD – zadávání dat do schématu graficky vs čisté kreslení schémat)

4.5. Podpora, Tutoriály, Informační texty, Cenová relace

Tab. 15 – Rozhraní tabulkové porovnání

Software	Základní informace	Detailní informace	Návody a Manuály	Video tutoriály	Online Podpora	Cenové relace
PWS	✓	✓	✓	✓	✓	uvádí
MATPOWER	✓	✓	✓	-	-	free
PSAT	✓	✓	✓	-	✓	free
E-Vlivy3 DNCalc	✓	(telefonicky)	✓	-	✓	neuvádí
PyPSA	✓	✓	-	-	-	free
ETAP	✓	✓	✓	✓	✓	neuvádí
EasyPower	✓	✓	✓	✓	✓	neuvádí

Základní informace – popis v hrubých rysech (komerční reklama). **Detailní informace** – funkcionality jsou vypsané/popsané, ale není nastíněno jak s nimi pracovat. **Návody a Manuály** – přímo definované vstupy, výstupy; detailně rozepsané funkcionality. **Video tutoriály** – pro daný program existují video tutoriály na internetu, které popisují práci s programem. **Online podpora** – možnost řešit problém s kont. osobou. **Cenová relace** – ceny: programů / modulů / služeb (pokud **neuvádí** - nutný kontakt).

4.6. Způsoby sdílení – výstupy / vstupy

Všechny uvedené programy podporují export do více formátů, přičemž některé z nich jsou přímo uvedeny v rámci porovnání. Rovněž všechny mají nějakým způsobem nadefinovaný vlastní datový formát, který je ať už v menší nebo větší míře kompatibilní s ostatními software. Obecně platí, že všechny software dokáží pracovat s četnými variantami formátů.

Tab. 16 – Rozhraní tabulkové porovnání

Software	Výstupy				Vstupy				
	Konverze	.xml .csv	.m	Další formáty	Konverze	.raw .aux	.xml .csv	.m	Další formáty
PWS	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓
MATPOWER	vytvořit	✓	✓	✓	vytvořit	-	✓	✓	✓
PSAT	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
E vlivy 3	domluva	✓	-	✓	domluva	✓	✓	-	✓
DN-Calc	domluva	✓	-	✓	domluva	✓	✓	-	✓
PyPSA	vytvořit	✓	✓	✓	vytvořit	-	✓	✓	✓
ETAP	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓
EasyPower	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓

Konverze – program dokáže otevřít projekty, které byly vytvořeny v jiných programech. Například od verze ETAP 12.0.0 Jan. 2013 umožňuje ETAP otvírat projekty EasyPower apod.

- *Import from SKM[®] Captor[™]*
- *Import from EasyPower[®]*

Obr. 54 – Příklad možné konverze z jiných programů pro program ETAP (uvádí developer) [31]

Tab. 17 – Rozhraní tabulkové porovnání

Software	GIS import				GIS export			
	.shp	.dbf	.shx	.kml	.shp	.kml	-	-
PWS								
DN-Calc	*	*	*	*	*	*	*	*
ETAP	.shp	.gdb	*	*	.shp	.gdb	*	*
EasyPower	.dxf	*	*	*	.dxf	*	*	*

Pozn.: Značka “*” z načí blíže nespecifikovaný formát – existující nezjištěná/n espec. varianta.
Pozn.: Značka “-” neexistuje, není definována, nebo není přístupná ve ver. v které se pracovalo

5. Závěr

Na základě zjištěných skutečností ohledně jednotlivých programů bylo provedeno porovnání. Z hlediska typu licence se programy dělí do třech kategorií: svobodné, demo/student a placené.

Free programy mají velkou výhodu v tom (*kromě toho, že jsou zdarma*), že **mnohdy** konkurují placeným software. Zároveň se neustále vyvíjí a nejsou pozadu. Jsou vyvíjeny z části univerzitami z celého světa, které spolupracují s power flow komunitou.

Demo/student verze programů slouží spíše k nalákání uživatele ke koupi plné verze, nicméně v některých demo verzích lze relativně dobře provádět i složitější analýzy.

U placených software žádná ze společností neuvádí specifickou částku, za kterou by si mohl uživatel software pořídit (*mimo PWS – rozbor ceny v příloze*). Placené programy se vždy skládají z modulů. Každý modul umožňuje provádět jiný typ analýzy. Výrobci neuvádí ceny modulů z toho důvodu, že spoléhají na vyjednávání. (*Rozsáhlejší shrnutí / doporučení ohledně všech typů licencí a software je z důvodu zachování přijatelného rozsahu umístěn v příloze.*)

V této práci je uvedeno **tabulkové porovnání** programů, které jednoduchým způsobem shrnuje, co který software umožňuje. Takto se lze rychle **orientovat** mezi softwary. Pakliže si **není** uživatel **jistý**, které rozšíření by potřeboval, aby vyřešil svůj problém – uvnitř práce je stručně nastíněno, jaké typy výpočtů umožňují daná rozšíření.

Práce rovněž pojednává o tom, jaký rozsah onliny podpory je pro software poskytován. Začínající uživatel si spíše zvolí program, který má dostatek zpracované literatury. Je zde rovněž uvedeno porovnání pro funkcionalitu **GIS**, která poskytuje geografickou vrstvu pro znázornění topologie sítě jako vazby na reálný svět.

Mezi free softwary **není možné jednoznačně určit**, který je lepší nebo horší. Každý program umožňuje něco jiného, popř. se jejich možnosti překrývají. Pro placené softwary platí, že dokáží spočítat prakticky cokoliv, pakliže si je zato uživatel ochoten zaplatit.

Cena za placený software se může pohybovat v jednotkách statisíců až miliónů za licenci. Z toho by mělo být patrné, jak důležité je vědět, které rozšíření koupit. Program se s každým zakoupeným modulem značně prodražuje. Na jednu zakoupenou licenci lze obvykle registrovat více počítačů, přičemž – najednou pak lze spustit jen jednu.

Při zakoupení některého z placených software by se pověřená osoba bez předchozí zkušenosti s programem (*se znalostí teorie*) **zaučovala** minimálně **3-6 měsíců**, než by dosáhla kvalitativně dostačujícího stupně znalosti programu. Kvalifikovanému odborníkovi přibližně 1-2 měsíce.

Do budoucna by bylo dobré, aby se fakulta pokusila studentům zajistit přístup k obdobným software, kde by takto mohli získat **mnohem rychleji** vzhled do energetiky.

Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] HALUZÍK, Evžen. *Řízení provozu elektrizačních soustav*. 2. vyd. Brno : Vysoké učení technické, 1987.
- [2] NOHÁČ, Karel. [online]. [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~nohac/PJS/MODES/Rizeni_a_stabilita_elektrizacni_soustavy_Cast3.pdf
- [3] GRAINIGER, J., STEVENSON, D. *Power system analysis*. Singapore: McGraw-Hill, 1994.
- [4] MERTLOVÁ, J., HEJTMÁNKOVÁ, P., TAJTL, T. *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004.
- [5] HODINKA, M., FECKO, Š., NĚMEČEK, F. *Přenos a rozvod elektrické energie*. Praha: SNTL, 1989.
- [6] CHAKRABARTI, A., HALDER, S. *POWER SYSTEM ANALYSIS Operation and Control*. New Delhi: PHI LEARNING, 2006.
- [7] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Praha: ČVUT v Praze, 2011.
- [8] ŠVEC, A. *Rozvodné energetické sítě* [Online]. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: http://www.spssecb.cz/cs/files/dokumenty_pro_studenty/Rozvodne_energeticke_site.pdf
- [9] TESAŘOVÁ, M., *Elektrizační soustava ČR* [Online]. [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~tesarova/EE2/Soubory/PrednaskaEE2-1.pdf>.
- [10] MATOUŠEK, V. *Trojfázová vedení vvn, Přenosové soustavy, mezinárodní připojení*. [Online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/138154-Trojfazova-vedeni-vvn-prenosove-soustavy-mezinarodni-propojeni-cil-vztah-pomeru-na-obou-koncich-zraty-ucinnost-rlgc-vedeni-s-rovnomerne.html>
- [11] HORÁK, Karel. *Výpočet elektrických sítí*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1980.
- [12] TESAŘOVÁ, M. *Tabulky pro dimenzování vodičů*. [Online]. [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~tesarova/PE/Soubory/Dimenzovani-zkraceno.pdf>.
- [13] Skala, B. *Přednášky z předmětu TESI*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2018. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/tes1/prednasky.html>
- [14] GROSS, Ch. *Power system analysis*. Singapore: John Wiley & Sons, Inc., 1986.
- [15] NOHÁČ, K. *Pracovní oblast a provozní diagram alternátoru* [Online]. [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~nohac/E2/Elektrarny2-cast09-v2.pdf>

- [16] ŠTROBLOVÁ, M. *Elektroenergetika – Podklady pro cvičení*. Plzeň: ZČU, 1998.
- [17] circuitglobe. *bus admittance matrix building* [Online]. [cit. 2018-02-23]. Dostupné z: <https://circuitglobe.com/>
- [18] powerworld. *Product releases* [Online]. [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <https://www.powerworld.com/knowledge-base/powerworld-simulator-help-files>
- [19] ETAP. *Product releases* [Online]. [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <https://etap.com/product-releases/etap18-release>
- [20] EasyPower. *Products* [Online]. [cit. 2018-03-02]. Dostupné z: <https://www.easypower.com/products/easypower>
- [21] EnerGoConsult. *Produkty pro energetiku* [online]. [cit. 2018-4-15]. Dostupné z: <https://www.egc-cb.cz/produkty-pro-energetiku/>
- [22] PyPSA. *PyPSA documentation* [online]. [cit. 2018-4-26]. Dostupné z: <https://pypsa.org/doc/index.html>
- [23] slideshare. *Small Signal Stability Analysis of Power System* [online]. [cit. 2018-4-27]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/magician008/small-signal-stability-analysis>
- [24] pandas. *pandas 0.23.0 documentation* [online]. [cit. 2018-4-28]. Dostupné z: <https://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/generated/pandas.DataFrame.html>
- [25] NumPy. *Numpy* [online]. [cit. 2018-4-28]. Dostupné z: <http://www.numpy.org/>
- [26] jupyter. *Jupyter* [online]. [cit. 2018-4-29]. Dostupné z: <http://jupyter.org/>
- [27] pserc.cornell.edu. *MATPOWER manual* [online]. [cit. 2018-5-01]. Dostupné z: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/MATPOWER-manual.pdf>
- [28] eva.fing.edu. *PSAT Manual* [Online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/71801/mod_resource/content/1/PSAT-Manual.pdf
- [29] profs.basu. *Quick Reference Manual for PSAT version 2.1.2* [Online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: https://profs.basu.ac.ir/smr_tousi/free_space/psat-2.1.2-ref.pdf
- [30] ieee.org. *Implementation of Intelligent AGC in PSAT for Optimal Use in Smart Grids* [Online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6874176&tag=1>
- [31] ETAP. *ETAP 14.0* [Online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: https://etap.com/docs/default-source/technical-papers/etap14-1_readme.pdf?sfvrsn=6

Přílohy

Příloha – ceník funkcionalit pro program PWS

Základní balíček začíná na 10 000 dolarech, což je při cca **1 USD = 22 CZK** přibližně **220 000kč**. Pokud se uživatel rozhodne ke koupi dalších licencí 4 – obdrží na tyto slevu **50%**. Síťová licence je omezena na geografickou lokalitu – **neomezeno** uživatelů v okruhu 1km.

Simulator Pricing with no Add-ons	
First License	US\$10,000
License 2-5	Each US\$5,000
Site License ^{*see below}	US\$30,000

příloha – cena základního balíčku

Jednotlivé ceny za modul vzhledem k typu licence. Moduly jsou podrobněji popsány výše. Koupě každého nového rozšiřujícího modulu v rámci jednoho uživatele se pohybuje přibližně mezi **110 000 – 220 000kč** ročně. Síťová licence za modul vyjde na **330 000 – 660 000kč**.

Simulator Add-on	First License	License 2-5 (Each)	Site License ^{* see below}
ATC	US\$5,000	US\$2,500	US\$15,000
PVQV	US\$5,000	US\$2,500	US\$15,000
OPF	US\$8,000	US\$4,000	US\$24,000
SCOPF ^{**}	US\$3,000	US\$1,500	US\$9,000
Reserves ^{**}	US\$5,000	US\$2,500	US\$15,000
SimAuto	US\$5,000	US\$2,500	US\$15,000
ITP	US\$10,000	US\$5,000	US\$30,000
Transient Stability	US\$10,000	US\$5,000	US\$30,000
GIC	US\$10,000	US\$5,000	US\$30,000
Scheduled Actions	US\$5,000	US\$2,500	US\$15,000
TransLineCalc	US\$2,000	US\$1,000	US\$6,000
Distributed Contingency ^{***}			No Cost
Distributed ATC ^{****}			US\$15,000
Distributed Transient Stability ^{****}			US\$30,000

příloha – cena jednotlivých modulů

Příloha – plná verze programu: síťová licence

Product	Sub-Total
Simulator Site License	US\$30,000
ATC Add-on for Site	US\$15,000
PVQV Add-on for Site	US\$15,000
OPF Add-on for Site	US\$24,000
SCOPF Add-on for Site	US\$9,000
OPF Reserves Add-on for Site	US\$15,000
SimAuto Add-on for Site	US\$15,000
ITP Add-on for Site	US\$30,000
Transient Stability Add-on for Site	US\$30,000
GIC Add-on for Site	US\$30,000
Scheduled Actions Add-on for Site	US\$15,000
TransLineCalc Add-on for Site	US\$6,000
Distributed Contingency Add-on for Site	No Cost
Distributed ATC Add-on for Site	US\$15,000
Distributed Transient Stability Add-on for Site	US\$30,000
Site License	US\$279,000

příloha – cena pro síťovou licenci se všemi funkcionalitami

Cena za zakoupení všech nabízených modulů v rámci jedné lokality (rádius 1km) pro neomezený počet osob přijde celkem na **6 138 000 Kč**³⁴. Při zakoupení 5 licencí vyjde cena **stejně** jako pro neomezeno (geograficky omezeno). Lze konstatovat, že se vyplatí kupovat síťovou licenci pouze v případě, že se bude pracovat na 5 a více počítačích. S PWS by se dalo nicméně domluvit na tzv. float licenci. **Float** umožňuje, že např. pro 3 licence může pracovat např. 10 lidí, přičemž **najednou** pouze 3 uživatelé, čímž se cena kompletu dostává na cca **3,6 mil** ročně. Nejrozumnější se jeví zakoupení síťové licence pouze pro vybrané moduly, které budou užitečné – cena (non-full) síťové licence by pak vycházela na přibližně na **1-3 mil** ročně.

³⁴ <https://www.powerworld.com/download-purchase/how-to-purchase/pricing>

Příloha – původní závěr (neredukovaný) 1/2

Z tabulkového porovnání na **stránce 63** můžeme okamžitě vidět, které **zásadní** funkcionality dané softwaru nabízí. Jelikož každý software obvykle disponuje **spektr**em nabízených funkcionalit a typů výpočtů, nelze brát tuto tabulku za směrodatnou a plně popisující. Tabulka pouze porovnává programy vůči zvoleným kritériím.

Pro každý program je vždy stručně zpracována samostatná kapitola, kde je proveden detailnější rozbor nabízených funkcionalit. Jedná se o stručný popis. Pro každý program obvykle existuje základní dokumentace čítající **minimálně** 150 stran, čili tato práce zároveň mimo porovnání provedla i celkové shrnutí nabízených funkcionalit v kostce.

Vzhledem k časovým nárokům **nebyla** práce se softwarem DNCalc a PyPSA **realizována**. Při popisu nabízených typů výpočtu se vždy vycházelo z oficiálních stránek developera. Na základě omezených znalostí těchto programů je nelze vůči ostatním software objektivně porovnat. Nicméně je **lze kategorizovat** v tabulkovém porovnání, které vychází ze získaných informací. Při tvorbě popisu pro E-vlivy 3 a DNCalc dohlížel na **správnost údajů** pan Ing. Kysnar (hl. programátor). Při popisu PyPSA bylo vycházeno (čistě) z oficiálních informačních materiálů tvůrce software. Tvorba popisu pro zbytek softwarů probíhala na rovněž na základě online informačních zdrojů, přičemž některé funkcionality byly přímo testovány na vlastní testovací síti.

Programy ETAP a EasyPower **nejsou optimálním řešením** z hlediska používání **DEMO** verze, neboť pokaždé když se vypne počítač, veškerá práce **zmizí**. Tento problém vedl k tomu, že počítač, na kterém probíhala simulace, musel být permanentně zaplý několik dní, aby mohla být provedena kompletní analýza programu. Zároveň jedním omylným nedopatřením došlo k vypnutí počítače, na kterém byly vybudovány sítě v obou těchto programech, čímž byla zmařena mnohahodinová práce a síť musela být kompletně znovu vybudována (nelze uložit). Proces znovu-vytvoření sítě je ale poměrně snadný, jakmile jednou uživatel pochopí, které parametry program potřebuje.

Na rozdíl od ETAP a EasyPower je při práci s **PWS** resp. **DNCalc / E-vlivy 3** možné v demo (resp. student) verzi **ukládat**. Tím upevňují svoje postavení vůči free programům, které žádné omezení ohledně ukládání nemají.

PWS, ETAP a EasyPower jsou evolučně na **stejně** úrovni. Nicméně pro ETAP a EasyPower, by se personál **nemohl školit** na **DEMO** verzi (protože nelze ukládat). Proces školení by musel probíhat na placených licencích a tím by se vše prodražilo.

Na **stránce 64** je vyznačeno, které programy mají nejlépe zpracovaný support. Práce s PyPSA nebyla díky nedostatku tutoriálů a další dokumentace realizována. Je zřejmé, že je nutné tento fakt při výběru programu důkladně zvážit. PWS má **nejpropracovanější** materiály a videa resp. ostatní mají některé propracovanější materiály volně dostupné na internetu, ale situace působí dojmem, že výrobce nasdílí potřebnou detailní dokumentaci až po zakoupení programu.

Při zakoupení některého z placených software by se pověřená osoba bez předchozí zkušenosti s programem (se znalostí teorie) **zaučovala** minimálně **3-6 měsíců**, než by dosáhla kvalitativně dostačujícího stupně znalosti programu. Odborníkovi by pak zaučení mohlo trvat přibližně 1-2 měsíce. U free softwarů zaučení závisí na jejich komplexnosti. Nelze jednoznačně určit dobu.

Příloha – původní závěr (neredukovaný) 2/2

Z tabulkového porovnání plyne, že DNCalc oproti PWS **nedokáže** provádět některé **složitější** výpočty. Ovšem DNCalc nabízí spektrum dalších, jiných, typů výpočtů, které nespadají do tabulkového porovnání (více v popisu programu). DNCalc zaznamenává vývoj v několika oblastech včetně dynamiky a je využíván v praxi.

U PWS, ETAP a EasyPower je otázkou spíše jak uživateli vyhovuje dané vizuální prostředí. Liší se od sebe pouze v některých bodech a navzájem si konkurují.

Součástí bakalářské práce bylo **porovnat licenční politiku**, což byl obzvláště **problém** z hlediska cenových relací. Po krátkém telefonátu s hlavním programátorem DNCalc (E-vlivy), bylo zjištěno, že záležitosti ohledně ceny se **veřejně neprojednávají** a také, že se cena může lišit dle požadavků klienta/typu zakázky. Čili **je možné získat cenu**, ale nikde neexistuje pevně definované číslo. Obdobně se vyjádřil i nejmen. zástupce ze společnosti **EasyPower** resp. další.

Závěrem je tedy skutečnost, že **žádný** z porovnávaných placených software, mimo **PWS**, neuvádí **pevně** definované ceny licencí **veřejně**, jejich kombinací či dalších nadstavbových služeb. V příloze je proveden rozbor ceny pro PWS (jediný veřejně tabeluje ceny).

Pro akademické účely je v rámci (čistě) free verzí nejvhodnějším kandidátem **PSAT**, který má easy-to-use grafický interface v prostředí Matlab – Simulink. Z tabulkového porovnání je vidět, že obsahuje celou řadu nabízených funkcionalit a je možné do něj interně zasahovat. Zároveň určitý optimismus přináší i fakt, že **PSAT** že se dále/stále vyvíjí (ačkoliv je free). Méně vhodným, nicméně pro akademické účely plně postačujícím softwarem se jeví **MATPOWER**. Obsahuje nastavbu **MOST**, která značně rozšiřuje jeho možnosti v oblasti Optimal Power Flow. Rozšířením **MOST** naznačuje tento software určitý vývoj do budoucna. Posledním kandidátem na akademické využití (mimo již zmíněné PWS), nicméně nejobtížnější volbou, je **PyPSA**. Práce s tímto softwarem klade vyšší nároky na uživatelské schopnosti v oblasti **programování** (Python resp. obecně znalost škály onlinových služeb na internetu), kde uživatel může strávit hodiny zajišťování a nastavování příslušných služeb.

Python je v mnoha odvětvích velmi perspektivní a zažívá určitý rozmach. Navzdory počáteční komplikaci a neúspěšnému nastavení **PyPSA** bych doporučil další zkoumání tohoto projektu, nebo minimálně věnovat pozornost obdobným snahám.

Příloha – ukázka spolupráce

Vzhledem k časové náročnosti nebyl dostatečný prostor pro detailní zmapování programu, a proto jsem se, s částečně vytvořenou zprávou, obrátil na pana Ing. Kysnara ze společnosti EGC-EnerGoConsult ČB s.r.o., který uvedl věci na pravou míru. Upozornil na některé pravopisné jevy a neznalosti problematiky (které se studují ve vyšších ročnících), přičemž provedl odbornou korekci textu.

3.4. E-Vlivy 3 / DNCalc

Výpočetní systém, který umožňuje komplexní analýzu rozsáhlých, hustě zauzlených elektrických sítí. Řeší úlohy spojené s provozem a rozvojem distribučních sítí.

Dokáže provést analýzu chodu sítě v ustáleném stavu, poruchové stavu. Také ztráty činného a jalového výkonu. Mimo standardní funkcionality umožňuje i posouzení kvality elektřiny, připojitelnost obnovitelných zdrojů do distribučních sítí. **Smart Grids a další, které jsou momentálně ve vývoji.**

Implementována je iterační výpočetní metoda Implicit Z bus. Výsledková sestava ustáleného chodu obsahuje vypočtené hodnoty napětí v uzlech a proudy a výkony ve větvích modelované sítě. Hodnoty napětí a proudů jsou interpretovány pomocí velikostí a úhlů fázorů. V každém uzlu je možné zobrazit hodnoty vypočteného zkratového výkonu a vypočtenou velikost napětíové nesymetrie. Výsledky jsou prezentovány pro každou fázi a ev. nulový vodič.

Také zohledňuje různé způsoby regulace OZE i konvenčních zdrojů, automatiky transformátoru apod. **Umožňuje** modelovat napětíovou citlivost zatížení. **Výpočet** provede pro jeden časový řez, nebo **využije** výpočty časových rozvoji, kdy lze počítat se zadaným časovým krokem pro profil výkonů a napětí v zadaném období.

3.4.1. E-Vlivy 3 (základ pro DNCalc)

Balíček E-Vlivy 3 se skládá (mimo základní balíček) z celkem **tří modulů**

Připojitelnost: Tato funkcionality umožňuje posouzení připojitelnosti odběrů a zdrojů k síti. Stanoví velikost napětíové změny vyvolané zařízením a porovná ji s limitními hodnotami. **Implementován je výpočet šíření měřeného i modelovaného flickru, jehož výstupem je vypočtená hodnota PST²⁰ v každém uzlu. Implementován je výpočet šíření měřeného i modelovaného flickru, jehož výstupem je vypočtená hodnota PST v každém uzlu.**

Kvalita elektřiny: Tento modul obsahuje nástroje pro komplexní posouzení zpětných vlivů (dle ČSN²¹ a PNE²²) odběrů či zdrojů jak v rámci současného stavu, tak i budoucího stavu. Umožňuje připojení nových rušivých odběrů a úpravy v síti. Umožňuje výpočet harmonického znečištění sítě, kdy výsledkem je vypočtené spektrum harmonických napětí a proudů. Výpočet lze stanovit a posoudit míru utlumu signálu HDO²³ v síti vlivem připojených zařízení. Implementován **výpočet** pro stanovení impedance sítě v každém uzlu na hladině nn pro potřeby porovnání se vztažnou hodnotou impedance. Dále lze výpočetně zohlednit rozběh asynchronních motorů.

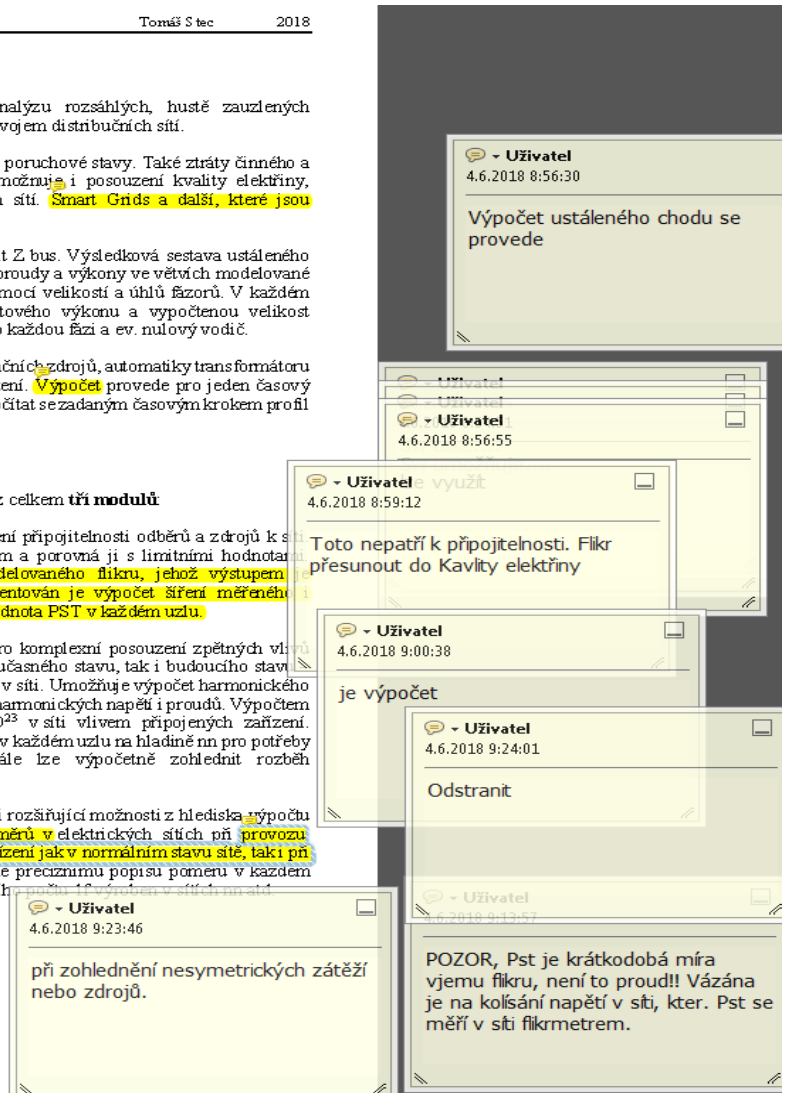
Třífázové výpočty Třífázové výpočty dávají uživateli rozšiřující možnosti z hlediska výpočtu na více vodičích, což vede na přesnou analýzu poměrů v elektrických sítích při provozu. **Připojení a odpojení symetrických i nesymetrických zařízení jak v normálním stavu sítě, tak i při poruše.** Tato funkcionality je zajímavá kvůli relativně preciznímu popisu poměrů v každém vodiči zvláště. Využívá se například pro připojení větších

²⁰ PST – Proudý Teloucí do Uzlu

²¹ ČSN – číselné označení výraz „Česká technická norma“

²² PNE – Podnikové Normy Energetiky

²³ HDO – Hromadné Dálkové Ovládání



příloha – verifikace informací zodpovědnou osobou

Příloha – odpovědi na dotaz (DNCalc, E-vlivy3)

Vyjmutá část textu v rámci email komunikace (odpovědi):

Dokáže program E-Vlivy3 resp. DNCalc provést konverzi z jiných formátů?

V současné době sw DNCalc nedisponuje konverzí z cizích formátů. Vnitřní konstrukce sw je tvořena s ohledem na aktuální požadavky na tyto typy sw, tedy včetně respektování požadavků na interoperabilitu. V případě jednoznačně popsaného souboru je samozřejmě možné zpracovat rozhraní, z kterého bude sw DNCalc schopen rekonstruovat síť ve vlastním prostředí. Již nyní jsou implementovány verifikační nástroje, které kontrolují správnost (nejen topologickou, ale i elektrickou) modelovaného schématu.

Měl bych ještě takový dotaz ohledně toho, jestli by E-Vlivy3 resp. DNCalc zvládnul:

- Optimal Power Flow-Ne
- Optimal Power Flow s hledáním výkonových rezerv-Ne
- Optimal Power Flow s bezpečnostním omezením-Ne
- Zda-li zvládá provádět výpočty s proměnnou zátěží v čase-Ano
- Harmonická analýza-Ano
- Nastavování ochran-Částečně, např. díky vypočteným složkovým impedancím sítě a zkratovým výkonům
- Vykreslit mapu sítě s konturami (pro DNcalc)-Ano, je implementován mapový podklad, do kterého je možné přenést schéma modelované sítě

Importovat/exportovat mapy pro GIS

Vazba na GIS je ve fázi přípravy u vybraných zákazníků. Vnitřní struktura je vyvinuta pro rekonstrukci schémat z GIS včetně prezentace převzatých schémat a údajů z GIS.

Mohl bych poprosit o zaslání ceníku služeb, popř. ceny za jednotlivé balíčky/moduly?

Cenová nabídka sw DNCalc je nastavena vždy individuálně dle konkrétního zákazníka a jeho potřeb a požadavků. Není zpracován obecný ceník, který je možné zveřejnit.

Pozn.: Obdobným způsobem bylo třeba postupovat, pakliže neexistoval jednoznačný materiál, který by vyloženě popsal, že program disponuje hledanou funkcionalitou. (obdobných dotazů na různé developery bylo položeno více)