

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

SIMULACE VYBRANÝCH ENERGETICKÝCH JEVŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN KOCHÁNEK

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Martin Kochánek

ID: 120601

Ročník: 3

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Simulace vybraných energetických jevů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Problematika provozu rozptýlených zdrojů elektrické energie.
2. Navržení elektrické sítě malého rozsahu a do této sítě integrovat různé druhy zdrojů elektrické energie (např. FV, VTE, kogenerace).
3. Simulace běhu sítě NN v ostrovním provozu, měřit a vyhodnocovat vybrané parametry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Jan Šlezingr

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

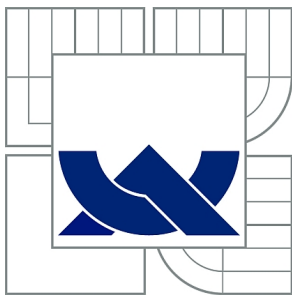
Bibliografická citace práce:

KOCHÁNEK, M. *Simulace vybraných energetických jevů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Šlezingr.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

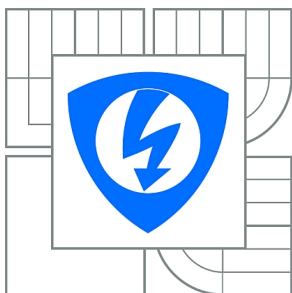
Zároveň bych chtěl tímto poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Šlezingrovi za cenné rady, připomínky k mé práci a poskytnutou literaturu.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

SIMULACE VYBRANÝCH ENERGETICKÝCH JEVŮ

SIMULATION OF SELECTED POWER ENERGY PHENOMENA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN KOCHÁNEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN ŠLEZINGR

BRNO 2011

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou provozu rozptýlených zdrojů elektrické energie v elektrické síti, možností využití virtuální elektrárny a inteligentních distribučních sítí. Cílem této práce je sestavení modelu elektrické distribuční sítě v simulačním prostředí. Do této sítě připojit rozptýlené zdroje elektrické energie a simulovat vybrané energetické jevy, které mohou v této síti nastat a při těchto jevech měřit a vyhodnocovat vybrané parametry.

KLÍČOVÁ SLOVA: rozptýlené zdroje; elektrická síť; virtuální elektrárna; inteligentní distribuční síť; prostředí PSCAD;

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the operation of dispersed generation of electricity in the electrical network, the possibilities use of virtual power plant and smart distribution grid. The aim of this work is to build a model of electrical distribution networks in the simulation environment. Connect dispersed generation of electricity to the network and simulate events that may occur in the network and the phenomena to measure and evaluate selected parameters.

KEY WORDS: dispersed generation; electrical network; virtual power plant; smart distribution grid; environment PSCAD

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD	13
2 NÁRODNÍ AKČNÍ PLÁN ČESKÉ REPUBLIKY PRO ENERGII Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ	14
3 ROZPTÝLENÉ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE	15
3.1 FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY	15
3.1.1 VÝHODY FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN	15
3.1.2 NEVÝHODY FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN	15
3.1.3 TYPY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	16
3.2 VODNÍ ELEKTRÁRNY	16
3.2.1 VÝHODY VODNÍCH ELEKTRÁREN	17
3.2.2 NEVÝHODY VODNÍCH ELEKTRÁREN	17
3.3 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	17
3.3.1 VÝHODY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN.....	17
3.3.2 NEVÝHODY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	18
3.4 KOGENERAČNÍ JEDNOTKY	18
3.4.1 VÝHODY KOGENERAČNÍCH JEDNOTEK	18
3.4.2 NEVÝHODY KOGENERAČNÍCH JEDNOTEK	18
3.4.3 PLYNOVÉ TURBÍNY	18
3.4.4 SPALOVACÍ MOTORY.....	19
3.4.5 MIKROTURBÍNY	19
4 PROBLÉMY PŘIPOJOVÁNÍ ROZPTÝLENÝCH ZDROJŮ DO SÍTĚ	20
4.1 PŘIPOJOVÁNÍ FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN DO SÍTÍ VN A NN.....	20
4.2 PŘIPOJOVÁNÍ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN DO SÍTÍ VN A NN	21
5 VIRTUÁLNÍ ELEKTRÁRNY A SMART GRIDS	23
5.1 VIRTUÁLNÍ ELEKTRÁRNY	23
5.1.1 ŘÍZENÍ SPOTŘEBOU	23
5.1.2 PROPOJENÍ SÍTÍ.....	23
5.1.3 OSTROVNÍ REŽIM	23
5.1.4 VÝPADEK ZDROJE	24
5.2 PRINCIP VIRTUÁLNÍ ELEKTRÁRNY.....	24
5.2.1 VÝHODY VIRTUÁLNÍ ELEKTRÁRNY	24
5.2.2 NEVÝHODY VIRTUÁLNÍ ELEKTRÁRNY	24
5.3 SMART GRIDS -INTELIGENTNÍ DISTRIBUČNÍ SÍTĚ	25
5.3.1 PŘÍNOSY SMART GRIDS	26
6 PŘECHODNÉ JEVY V DISTRIBUČNÍ SÍTI S ROZPTÝLENÝMI ZDROJI	27

6.1 ZKRATY	27
6.1.1 ZEMNÍ SPOJENÍ	27
6.2 STABILITA PŘENOSOVÉ SOUSTAVY	27
6.2.1 STATICKÁ STABILITA PŘENOSOVÉ SOUSTAVY	27
6.2.2 DYNAMICKÁ STABILITA SOUSTAV	28
6.3 OCHRANA SOUSTAVY PŘED PORUCHAMI.....	28
6.4 VLIV OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ PŘI PORUCHÁCH V SÍTI.....	28
7 PROSTŘEDÍ PSCAD	30
7.1 ÚVOD.....	30
7.1.1 PRACOVNÍ PROSTOR.....	30
7.1.2 KNIHOVNA	30
7.2 SIMULACE	31
7.2.1 MOŽNOSTI SIMULOVANÝCH ZDROJŮ	31
8 SIMULACE ENERGETICKÝCH JEVŮ	34
8.1 MODEL SÍTĚ.....	34
8.1.1 PRVKY MODELU SÍTĚ	35
8.2 SIMULACE ZKRATŮ V SÍTI.....	38
8.2.1 SIMULACE CHOVÁNÍ SÍTĚ PŘI JEDNOFÁZOVÉM ZEMNÍM ZKRATU V ZÁVISLOSTI NA VELIKOSTI VÝKONU VTE	40
8.2.2 SIMULACE CHOVÁNÍ SÍTĚ PŘI JEDNOFÁZOVÉM ZEMNÍM ZKRATU V ZÁVISLOSTI NA MÍSTĚ ZKRATU	43
8.2.3 SIMULACE CHOVÁNÍ SÍTĚ PŘI JEDNOFÁZOVÉM ZEMNÍM ZKRATU V ZÁVISLOSTI NA TYPU GENERÁTORU VTE	46
9 ZÁVĚR.....	50
POUŽITÁ LITERATURA	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 4-1 Dodávka činného výkonu FVE Netolice	20
Obr. 4-2 Nejnižší a nejvyšší denní výroba větrného parku Kryštofovy Hamry	21
Obr. 4-3 Typické odchylky rychlosti větru od střední hodnoty	22
Obr. 5-1 Koncepční schéma virtuální elektrárny	24
Obr. 5-2 Schéma Smard Grid	26
Obr. 6-1 Požadavky síťových kodexů na odolnost VTE při blízkém zkratu	29
Obr. 7-1 Pracovní prostor prostředí PSCAD	30
Obr. 7-2 Knihovna prostředí	31
Obr. 8-1 Model sítě	34
Obr. 8-2 Modely transformátorů	35
Obr. 8-3 Modely vedení	35
Obr. 8-4 Modely odběru	36
Obr. 8-5 Modely poruch	36
Obr. 8-6 Modely měřících prvků	36
Obr. 8-7 Model asynchronního generátoru	37
Obr. 8-8 Model synchronního generátoru	37
Obr. 8-9 Model rekordéru	38
Obr. 8-10 Hodnoty napětí při jednofázovém zemním zkratu	39
Obr. 8-11 Průběh proudu na svorkách transformovny při jednofázovém zemním zkratu	39
Obr. 8-12 Průběh proudu na svorkách transformátoru VTE při jednofázovém zemním zkratu	39
Obr. 8-13 Model sítě pro simulaci jednofázového zemního zkratu	40
Obr. 8-14 Hodnoty napětí na svorkách transformovny v závislosti na velikosti výkonu VTE	41
Obr. 8-15 Průběh proudu postižené fáze na svorkách transformovny v závislosti na velikosti výkonu VTE	41
Obr. 8-16 Hodnoty napětí na svorkách transformátoru VTE v závislosti na velikosti výkonu VTE	42
Obr. 8-17 Průběh proudu postižené fáze na svorkách transformátoru VTE v závislosti na velikosti výkonu VTE	42
Obr. 8-18 Model sítě pro simulaci zkratu simulovaného mezi větrnými zdroji	43
Obr. 8-19 Model sítě pro simulaci větrného zdroje připojeného vlastním vedením	44
Obr. 8-20 Hodnoty napětí na svorkách transformovny v závislosti na místě zkratu	44
Obr. 8-21 Průběh proudu postižené fáze na svorkách transformovny v závislosti na místě zkratu	45

Obr. 8-22 Hodnota napětí na svorkách transformátoru VTE v závislosti na místě zkratu	45
Obr. 8-23 Průběh proudu postižené fáze na svorkách transformátoru VTE v závislosti na místě zkratu	46
Obr. 8-24 Hodnota napětí na svorkách transformovny v závislosti na typu generátoru VTE	47
Obr. 8-25 Průběh proudu postižené fáze na svorkách transformovny v závislosti na typu generátoru VTE	47
Obr. 8-26 Hodnota napětí na svorkách transformátoru VTE v závislosti na typu generátoru VTE	48
Obr. 8-27 Průběh proudu postižené fáze na svorkách transformátoru VTE v závislosti na typu generátoru VTE	48

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Cíl NAP</i>	<i>14</i>
-------------------------------	-----------

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

I	Proud
NO _x	Oxidy dusíku
P	Jmenovitý činný výkon
p	Odchylka od střední rychlosti větru během dne
t	Čas
U	Napětí

ČR	Česká republika
DTS	Distribuční trafostanice
ES ČR	Elektrizační soustava České republiky
EU	Evropská unie
FVE	Fotovoltaická elektrárna
NAP	Národní akční plán
nn	Nízké napětí
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PDS	Provozovatel distribuční soustavy
PSCAD	Power systems computer aided design
vn	Vysoké napětí
VTE	Větrná elektrárna
vvn	Velmi vysoké napětí

1 ÚVOD

V České republice bylo v minulých letech, v souladu s požadavky Evropské unie, přistoupeno ke zvýšení podílu výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů na celkové domácí výrobě. Aby toho bylo dosaženo, je nutné připojit k síti nové zdroje elektrické energie, jejichž charakter výroby je zpravidla obtížně předvídatelný a špatně říditelný. Zároveň se jedná o zdroje malého výkonu, které jsou rozptýleny na velké rozloze. Tyto vlastnosti, pokud je takových zdrojů dostatečné množství, mohou ohrozit stabilitu elektrizační soustavy, zhoršit kvalitu dodávané energie či kontinuitu její dodávky.

Je tedy zapotřebí učinit technická opatření, která z nepředvídatelných zdrojů učiní zdroje s alespoň částečně předpověditelnou výrobou, které ve spolupráci s plně říditelnými a záložními zdroji umožní dodávku elektrické energie v kvalitě, která byla a je dosahována u dosavadních výroben.

Jedním z takových technických opatření je tzv. virtuální elektrárna, která využívá možností tzv. chytrých sítí. Tato práce si klade za cíl popsat toto technické řešení a zabývat se možnostmi jeho skutečného nasazení, včetně stanovení výhod a nevýhod tohoto systému. Toto stanovení by mělo být založeno mimo jiné na simulaci vybraných jevů v elektrické síti s virtuální elektrárnou.

Aby bylo možné simulovat chování sítě s rozptýlenou výrobou v prostředí PSCAD, je nutné zjistit, jakým způsobem jsou jednotlivé zdroje v tomto prostředí reprezentovány a jak je lze parametrizovat, stejně jako další prvky sítě, tj. vedení a transformátory.

Byly provedeny simulace dle pokynů vedoucího práce a jejich výsledky jsou diskutovány v závěru. Původní rozsah zadání byl vedoucím práce redukován.

2 NÁRODNÍ AKČNÍ PLÁN ČESKÉ REPUBLIKY PRO ENERGIÍ Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ

Národní akční plán České republiky pro energii z obnovitelných zdrojů (NAP) obsahuje opatření a definuje způsob dosažení závazných a průběžných dílčích cílů podílů energie z obnovitelných zdrojů stanovených rozhodnutím Evropské unie. Současný platný NAP byl schválen Vládou ČR dne 25.8.2010. Národní akční plán je sestaven tak, aby naplnil požadované cíle v oblasti využívání energie z OZE, a to na základě současných a připravovaných reálných projektů a na očekávané reálné predikci budoucího vývoje. V oblasti elektroenergetiky je požadavek připravovaných projektů konfrontován s bezpečností a spolehlivostí elektrizační soustavy. NAP a jeho naplňování vyhodnocuje Ministerstvo průmyslu a obchodu nejméně jednou za dva roky a o výsledcích informuje vládu a předkládá aktualizace národního akčního plánu. [1]

Aktuální cíl národního akčního plánu je 11,7 TWh elektřiny vyrobené v roce 2020 v obnovitelných zdrojích (tab. 2-1). Jedním z hlavních cílů NAP je finanční podpora vzniku obnovitelných zdrojů energie do splnění požadavků EU. Nad tyto hodnoty bude již provozování OZE považováno za podnikání jako každé jiné. [1]

Tab. 2-1 Cíl NAP

Zdroje	2010		2020	
	MW	GWh	MW	GWh
Vodní	1 047	2 109	1 125	2 274
Geotermální	0	0	4,4	18,4
Fotovoltaické	1 650	578	1 695	1 726
Větrné	243	454	743	1 496
Biomasa	-	1 930	-	6 165

Podíl energie z obnovitelných zdrojů při výrobě elektřiny se má oproti roku 2010, kdy bylo v obnovitelných zdrojích vyrobeno 7,4 % z celkové výroby elektrické energie, zvýšit do roku 2020 na 14,3 % z celkové výroby. [2]

3 ROZPTÝLENÉ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Těmto zdrojům se také někdy říká disperzní zdroje a většinou jsou to zdroje obnovitelné. Mezi obnovitelné zdroje patří: fotovoltaické elektrárny, větrné elektrárny, vodní elektrárny, geotermální elektrárny a zdroje spalující biomasu. Dále můžeme do rozptýlené výroby zahrnout: kogenerační jednotky, plynové turbíny, spalovací motory, mikroturbíny, Stirlingovy motory. Jsou to většinou zdroje malých výkonů rozmístěné po určitém prostoru, tedy nejsou centralizované. Důvody proč se zvětšuje objem výroby v obnovitelných zdrojích, jsou jak ekologické tak ekonomické. [3]

3.1 Fotovoltaické elektrárny

Fotovoltaické elektrárny využívají buď přímé, nebo nepřímé přeměny. Přímá přeměna využívá fotovoltaického jevu, při kterém se v určité látce působením světla (fotonů) uvolňují elektrony. Tento jev nastává v některých polovodičích, jako je křemík, germanium, selen, kadmia aj. Fotovoltaický článek je většinou tvořen tenkou destičkou z monokrystalu křemíku. Nepřímá přeměna využívá teplo pomocí slunečních sběračů. V ohniscích sběračů jsou termočlánky, které mění teplo v elektřinu. Tyto způsoby generují stejnosměrný signál, který se střídači převádí na střídavý. Dále se využívá sluneční energie ve slunečních tepelných elektrárnách, kde se soustřeďuje pomocí mnoha otáčivých rovinných zrcadel sluneční záření do jednoho místa, kde je kotel, pak už jde o princip tepelné elektrárny. [4]

Ke dni 30.9.2010 činil instalovaný výkon fotovoltaických elektráren v ČR podle energetického regulačního úřadu 799,01 MW. Narůst od konce roku 2009 je 334,43 MW instalovaného výkonu. Za necelé 2 roky je nárůst instalovaného výkonu ve fotovoltaických elektrárnách razantní, protože na konci roku 2008 byl instalovaný výkon fotovoltaických elektráren 39,51 MW. [5][6]

3.1.1 Výhody fotovoltaických elektráren

Výhody fotovoltaické elektrárny jsou nízké provozní náklady, neboť sluneční energie je zdarma. Fotovoltaické elektrárny nejsou náročné na obsluhu. Zařízení má dlouhou dobu životnosti. Ta je obvykle garantována na 15 - 20 let. Po uplynutí této doby dochází k postupnému snižování účinnosti, přičemž zařízení vydrží funkční až 50 let. Další výhodou fotovoltaických elektráren je úspora fosilních paliv a tím menší znečištění životního prostředí. [7]

3.1.2 Nevýhody fotovoltaických elektráren

Protože přísun slunečního záření během roku kolísá, nelze tento zdroj využít jako samostatný zdroj. Nevýhodou je poměrně vysoká počáteční finanční investice, malá účinnost fotovoltaických článků což způsobuje velkou zastavenou plochu. Při připojování a vypínání k vedení vn způsobuje fotovoltaická elektrárny kolísání napětí a frekvence a také vliv vyšších harmonických na síť. [7] [8]

3.1.3 Typy fotovoltaických článků

3.1.3.1 Monokrystalické články

Tyto články se skládají z jediného krystalu. Jsou v našich podmínkách nejpoužívanější. Krystaly křemíku jsou větší než 10 cm a vyrábí se tažením z roztaveného křemíku. Účinnost těchto článků se pohybuje v rozmezí 13 až 17%. [9]

3.1.3.2 Polykrystalické články

Skládají se z mnoha různě orientovaných krystalů. Jejich výroba je ale v porovnání s monokrystalickými panely mnohem jednodušší, tedy i levnější a rychlejší. Účinnost polykrystalických článků se pohybuje od 12 do 14%. [9]

3.1.3.3 Amorfni články

U amorfni článků je základem křemíková vrstva, která je v tenké vrstvě nanесena na sklo nebo fólii. Účinnost těchto článků je nižší, pohybuje se v rozmezí 7 až 9%. [9]

3.2 Vodní elektrárny

Vodní elektrárny fungují na jednoduchém principu, kde voda roztáčí turbínu, která je na společné hřídeli s elektrickým generátorem. To dohromady tvoří turbogenerátor. Mechanická energie vody se tak mění na elektrickou. Turbíny se používají podle spádu, nejčastěji se používá Francisova nebo Kaplanova turbína v mnoha modifikacích, jsou to turbíny reakčního typu. Pro vysoké spády se používá akční Peltonova turbína. V přečerpávacích vodních elektrárnách se používají turbíny s reverzním chodem a s přestavitelnými lopatkami. V malých vodních elektrárnách se převážně využívá malá horizontální Bánkiho turbína spolu s upravenou jednoduchou Francisovou turbínou.

Vedle průtokových vodních elektráren jsou nejznámějším typem vodních elektráren elektrárny akumulací. Jsou součástí vodních děl (nádrží). Tato vodní díla kromě akumulace vody pro výrobu elektrické energie stabilizují průtoky říčním korytem, chrání před povodněmi a podporují plavební možnosti toku. Umístění vlastní elektrárny může být různé podle tvaru terénu, výškových a spádových možností a podle množství vody. Existují elektrárny zabudované přímo do tělesa hráze, jinde je elektrárna vystavěna hluboko v podzemí. Voda se k ní přivádí tlakovým potrubím a odvádí se podzemním kanálem.

K využití potenciálu vodních toků v ČR slouží také malé vodní elektrárny, jsou to zdroje s instalovaným výkonem do 10 MW. Většina malých vodních elektráren slouží jako sezónní zdroje. Průtoky toků, na kterých jsou zřizovány, jsou kolísavé a silně závislé na počasí a na ročním období.

V době energetické špičky se využívá přečerpávací vodní elektrárna. Je to soustava dvou výškově rozdílně položených vodních nádrží s tlakovým potrubím, kde je v dolní části umístěna turbína s tlakovým generátorem. Ten v době energetické potřeby vyrábí elektřinu a v době útlumu se přečerpává voda z dolní nádrže do horní, kde její potenciální energie čeká na využití. [4]

Instalovaný výkon ve vodních elektrárnách v ČR činil k 30.9.2010 146,88MW. V roce 2005 byl instalovaný výkon vodních elektráren v ČR 1019,47 MW. To naznačuje hydroenergetický

potenciál ČR je již do značné míry vyčerpán a volné jsou spíše lokality s nízkým spádem, investoři v současné době projevují o tento typ obnovitelných zdrojů velmi malý zájem [1]. U přečerpávacích vodních elektráren k 30.9.2010 činil instalovaný výkon 1146,75 MW podle energetického regulačního úřadu. [10][6]

3.2.1 Výhody vodních elektráren

Vodní elektrárny neznečišťují ovzduší, nedevastují krajinu a povrchové či podzemní vody těžbou a dopravou paliv a surovin, jsou bezodpadové, nezávislé na dovozu surovin a vysoce bezpečné. Pružným pokrýváním spotřeby a schopností akumulace energie zvyšují efektivnost elektrizační soustavy. Vysokým stupněm automatizace přispívají k vyrovnávání změn na tocích a vytvářejí nové možnosti pro revitalizaci prostředí (prokysličování vodního toku). Velkou předností vodních elektráren je schopnost přirázování do elektrifikační sítě s plným výkonem v několika minutách. [4]

3.2.2 Nevýhody vodních elektráren

Malé vodní elektrárny jsou závislé na aktuálním počasí a na počasí, protože průtok vodních toků, na kterých jsou zřizovány je značně kolísavý. Další nevýhodou jsou vysoké náklady na stavbu vodní elektrárny. [4]

3.3 Větrné elektrárny

Působením aerodynamických sil na listy rotoru převádí větrná turbína umístěná na stožáru energii větru na rotační energii mechanickou. Ta je poté prostřednictvím generátoru zdrojem elektrické energie. Podél rotorových listů vznikají aerodynamické síly; listy proto musejí mít speciálně tvarovaný profil, velmi podobný profilu křídel letadla. Kvůli vzrůstající aerodynamické síle vzrůstající se silou větru je třeba zajistit efektivní a rychle pracující regulaci výkonu rotoru, tak aby se zabránilo přetížení. Obsluha větrné elektrárny je automatická. [4]

Větrné elektrárny používají asynchronní nebo synchronní generátory. Asynchronní generátory se používají s kotvou na krátko, poháněné přes převodovku. Kde se otáčky mohou měnit o 1 až 2 %. Další možností je použití asynchronního generátoru s vinutou kotvou, kde se dá plynule měnit odpor připojený do obvodu kotvy. Otáčky se mohou měnit o 10 %. Poslední zapojení je tzv. dvojitě napájený asynchronní generátor, kde se využívá asynchronního generátoru s vinutou kotvou. Rotorové vinutí je napájeno přes frekvenční měnič. Otáčky se mohou měnit o 30 %. Synchronní generátory jsou poháněny přímo nebo přes převodovku. Generátory připojené přes převodovku se můžou připojit přímo k síti a bezpřevodovkové uspořádání používá nízkootáčkové generátory, které mají poměrně velké rozměry a k síti jsou připojené přes měniče kmitočtu. [3]

Větrné elektrárny v ČR měly k 30.9.2010 instalovaný výkon 198,79 MW, jejich nárůst oproti roku 2005 činil 176,8 MW podle energetického regulačního úřadu [10][6].

3.3.1 Výhody větrných elektráren

Větrná energetika neprodukuje tuhé či plynné emise a odpadní teplo, nezatěžuje okolí odpady, ke svému provozu nepotřebuje vodu. Větrná elektrárna nezabírá velké plochy zemědělské půdy, minimální jsou i nároky na staveniště. [4]

3.3.2 Nevýhody větrných elektráren

Nevýhodou je složitá instalace elektrárny. Větrné elektrárny lze instalovat pouze na místech s optimálními větrnými podmínkami. Jejich výroba je závislá na aktuální rychlosti větru, proto větrné elektrárny nelze použít jako samostatný zdroj. [11]

3.4 Kogenerační jednotky

Kogenerační jednotky jsou zařízení, které spalováním paliva vyrábí současně elektrický proud a teplo. Efektivně využívají primární stav energie se ztrátou přibližně 15 %. Elektrická energie je vyráběná generátorem, tepelnou energii se získává z chlazení spalovacího motoru. Jako palivo pro spalovací motor kogenerační jednotky se používá zemní plyn, různé druhy bioplynu s vyšším obsahem metanu, uhelný plyn, butan, propan, nízkovýhřevný plyn získaný zplyňováním biomasy, kapalný plyn, lehké topné oleje, motorová nafta, atd. Používají se kogenerační jednotky s plynovými spalovacími motory, plynovými spalovacími turbínami, parními turbínami. Kogenerační jednotky menších výkonů (do 100 kW) bývají většinou vybaveny asynchronními generátory pro paralelní provoz ze sítí. Jednotky větších výkonů bývají vybaveny synchronními generátory, mají vyšší účinnost a mohou pracovat nejen paralelně se sítí, ale i nezávisle na ní. [12]

Plynové a spalovací elektrárny v ČR měly k 30.9.2010 instalovaný výkon 411,28 MW. Nárůst od roku 2005 činí 205,05 MW po dle energetického regulačního úřadu [10][6].

3.4.1 Výhody kogeneračních jednotek

Mezi výhody použití kogenerační jednotky patří minimalizace nákladů na rozvod energie, jelikož teplo i elektřina vznikají najednou a v místě své spotřeby, čímž jsou minimalizovány náklady na přípojky energií a rozvody. Současně se tím redukuje ztráty v rozvodných sítích. Při použití kogenerace se ušetří asi 40 % paliva oproti běžným výrobnám elektřiny, z ekologického hlediska tedy tento systém výroby energií zatěžuje méně životní prostředí. V případě nouze se dále nabízí využití kogeneračních jednotek jako záložních zdrojů elektrické energie, které jsou nezávislé na výpadcích sítě. V kogenerační jednotce lze po připojení absorpčního výměníku též vyrábět chlad např. pro klimatizaci budov. Tento systém se nazývá trigenerace a jedná se o kombinovanou výrobu elektřiny, tepla a chladu zároveň. [13]

3.4.2 Nevýhody kogeneračních jednotek

Investiční náklady na pořízení kogenerační jednotky jsou poměrně vysoké, protože je například nutné zajistit ochranu proti hluku. Návratnost této investice je závislá na využití vyrobeného tepla a elektrické energie. [12]

3.4.3 Plynové turbíny

Jsou nejrozšířenějšími pohony kogenerace, jejich instalovaný výkon se pohybuje mezi 1 až 100 MW. Pracuje na principu hoření paliva ve spalovací komoře za přítomnosti vzduchu dodávaného kompresorem. Žhavé stlačené plyny o teplotě kolem 1200 °C otáčejí řadou lopatek turbíny, které jsou připevněny na hřídeli. Tím vzniká mechanická energie, která je použita k výrobě elektřiny generátorem. Spaliny z parní turbíny jsou použity buď přímo, nebo přes parogenerátor pro místní spotřebu tepla. Také se dá požívat k výrobě tepla v kotli na odpadní teplo, potom je využíváno pro průmyslové procesy, nebo k výrobě elektrické energie expanzí v parní turbíně. [3]

3.4.4 Spalovací motory

Tyto motory pracují na stejném principu jako automobilové motory v úpravě pro spalování plynu. Mají větší elektrickou účinnost než plynové turbíny, ale je problematičtější využít vyrobené teplo, které je téměř rovnoměrně rozděleno mezi spaliny a chladio motoru. Většinou je teplo získané z chladících okruhů a spalin kaskádně uspořádáno k výrobě jednoho výstupu tepla. Nejčastěji je vyráběna horká voda o teplotě kolem 100 °C. [3]

3.4.5 Mikroturbíny

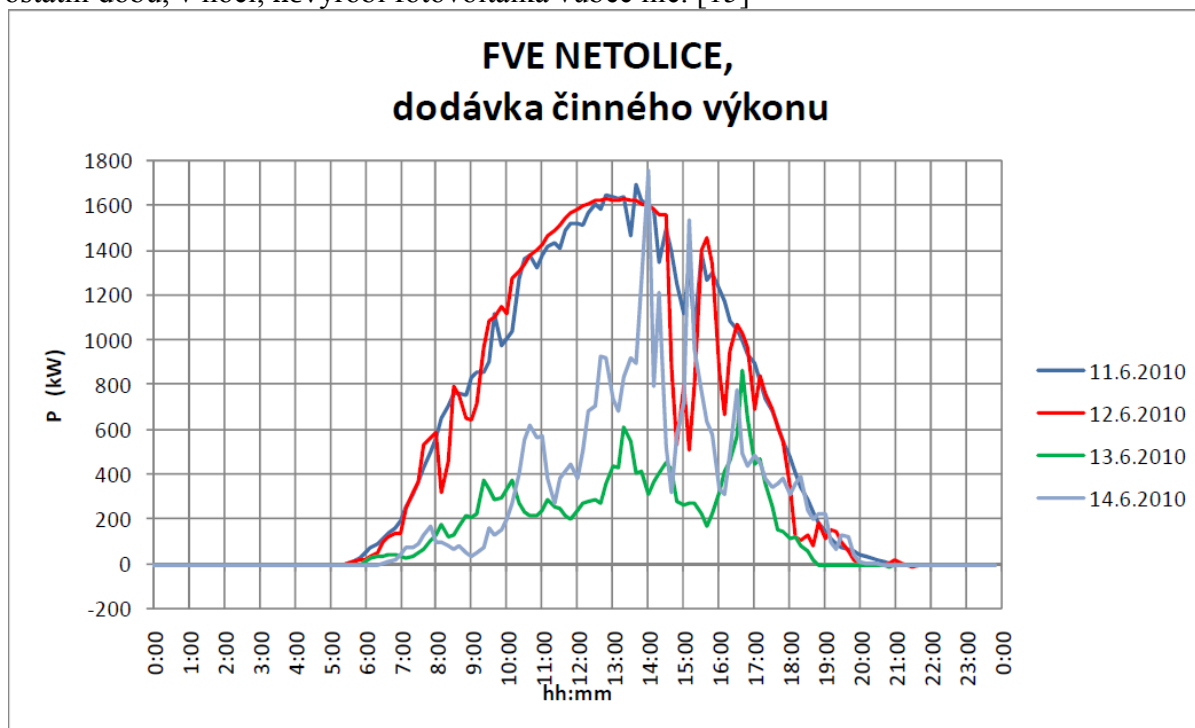
Do nedávné doby ekonomické analýzy ukazovaly, že spalovací turbíny o výkonu menším než 1 MW jsou neekonomické. Ukazuje se však, že v současnosti technologický vývoj tuto bariéru překonal. Dnes již se vyrábějí mikroturbíny o výkonu dokonce jen 25 kW. Mikroturbíny mohou být navrženy v celém rozsahu elektrického výkonu od 25 kW až po 250 kW. Jsou to velmi kompaktní malé vysokootáčkové stroje obsahující kompresor, spalovací komoru, regenerační výměník, turbínu a generátor. Všechny jsou jednohřídelové a mají převod výkonu do sítě pomocí frekvenčního měniče. Mikroturbíny mají pouze jednu rotační část, užívají vzduchem chlazená ložiska a nepotřebují mazací olej. Jako palivo používají především zemní plyn, mohou však pracovat i s naftou, benzinem, nebo jinými vysoce výhřevnými čistými palivy. Probíhá i vývoj možného použití bioplynu. Pro účely kogenerace se mikroturbíny zapojují obdobným způsobem jako malé spalovací turbíny. Dodávku tepla je vhodné uskutečnit pomocí teplé nebo horké vody. Mikroturbíny jsou menší než konvenční spalovací motory a nižší jsou rovněž jejich investiční náklady a náklady na údržbu. Mají také environmentální výhody, včetně nižších emisí NO_x v rozpětí 10 až 25 ppm i nižší. Mikroturbíny mohou být použity jako decentralizované zdroje elektřiny pro výrobce i spotřebitele vč. průmyslu a obchodu a v budoucnu pravděpodobně i pro pokrývání potřeby elektřiny a tepla v bytové a komunální sféře. Své místo nacházejí také jako nouzové zdroje elektřiny. [9]

4 PROBLÉMY PŘIPOJOVÁNÍ ROZPTÝLENÝCH ZDROJŮ DO SÍTĚ

Jedním z limitů zvětšování podílu obnovitelných zdrojů elektřiny, zejména fotovoltaických a větrných elektráren je proměnlivost jejich výroby závislá na meteorologických podmínkách. Pokud jejich podíl ve skladbě zdrojů přesáhne určitou mez, nastanou problémy s udržením výkonové rovnováhy a je tedy ohrožena spolehlivost soustavy. Vyrůstající instalovaný výkon může negativně ovlivnit provoz ES ČR z hlediska regulovatelnosti činného výkonu a dodržování dovolených hodnot odchylek výkonu a energie. Proměnlivost výkonu dodávaného fotovoltaickou i větrnou elektrárnou negativní vliv na provoz soustavy a to jak z hlediska regulace napětí, tak zejména z hlediska regulace činných výkonů. [14]

4.1 Připojování fotovoltaických elektráren do sítí vn a nn

Fotovoltaický zdroj má stochastický charakter, jako je znázorněno na obr. 4-1. Kromě okamžitého osvitu se na výrobě fotovoltaické elektrárny samozřejmě projeví i délka dne, která se mění podle dnů v roce a pohybuje se od 8 h v den zimního slunovratu po 16 h při nástupu léta. V ostatní dobu, v noci, nevyrábí fotovoltaika vůbec nic. [15]



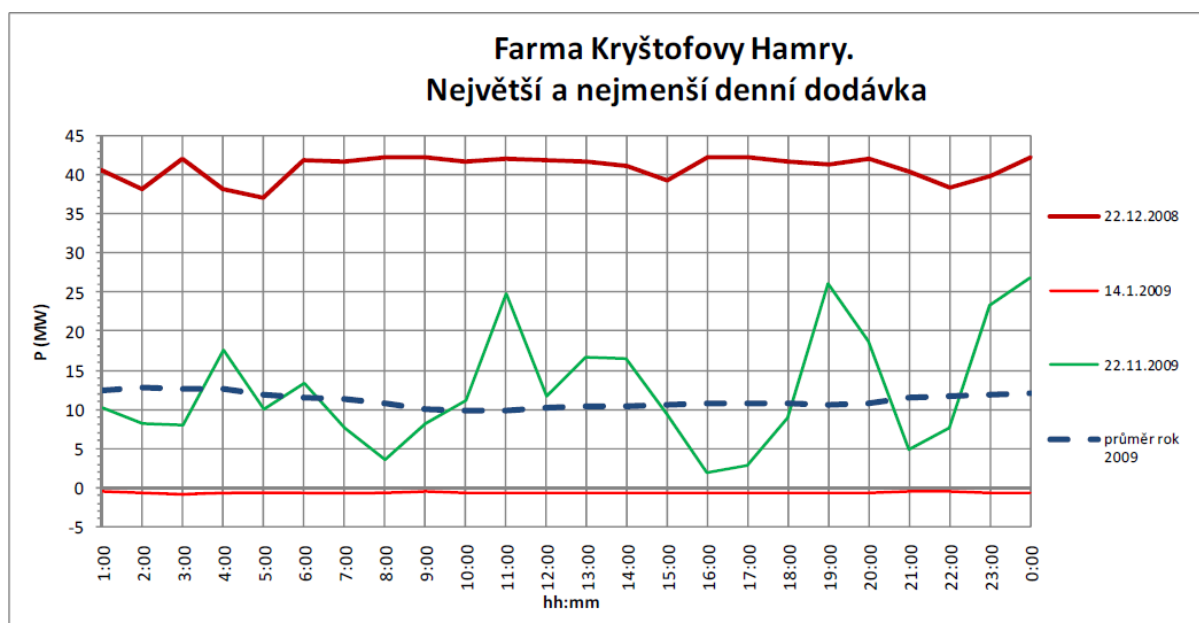
Obr. 4-1 Dodávka činného výkonu FVE Netolice

Fotovoltaické zdroje většího výkonu jsou instalované na značné ploše, což vyžaduje relativně dlouhé kabelové rozvody vnitřního rozvodu fotovoltaického zdroje. Pokud je navíc lokalita instalace výrazněji vzdálena od bodu připojení do distribuční sítě, přidává se ke kapacitnímu výkonu vnitřního rozvodu samozřejmě i jalový výkon kabelového vývodu vyvedení výkonu z takového zdroje, aby zdroje o takto rozsáhlé vnitřní kabelové síti splňovaly připojovací podmínky PDS je nezbytné jejich vybavení jednak střídači s dostatečným regulačním rozsahem jalového výkonu a jednak pro dobu, kdy není možné eliminovat negativní vliv vnitřní kabelové sítě

střídači, dekompenzačním zařízením, zpravidla tlumivkami. Pokrytí negativního vlivu vnitřní kabelové sítě vlastnostmi střídačů vyvolá snížení činného výkonu. Nabízí se tedy řešení, kdy požadovanou regulaci zajistí přídavné dekompenzační zařízení s dostatečným výkonovým rozsahem. Pro optimální stanovení způsobu a rozsahu dekompenzace však musíme vzít v úvahu řadu dalších aspektů. Mezi ně zcela nepochybně patří posouzení nejenom realizačních, ale i provozních nákladů (ztráty dekompenzační tlumivky se pohybují zhruba kolem 1,5 % jejich výkonu a mohou tak výrazněji zasáhnout do celkových ztrát na vyvedení výkonu daného zdroje). [16]

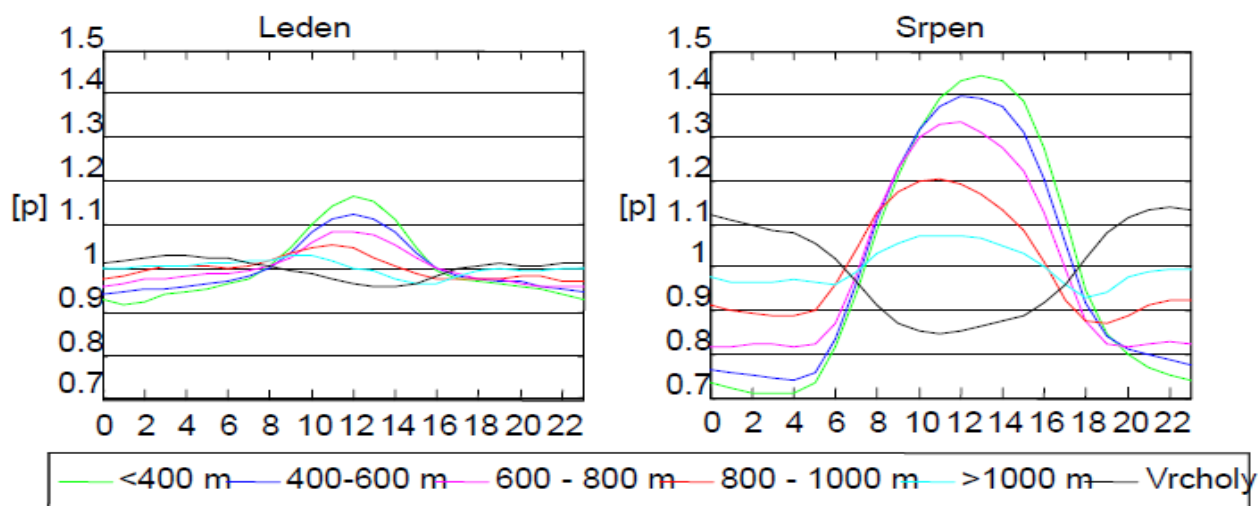
4.2 Připojování větrných elektráren do sítí vn a nn

U větrných elektráren je problém obdobný jako u zdrojů fotovoltaických, jedná se také o zdroje se stochastickým charakterem, jak je vidět na *obr. 4-2*. Kde je výroba závislá na aktuální síle větru. Podrobná studie větrného parku Kryštofovy Hamry ukázala, že větrné elektrárny přibližně 80 % času budou dodávat méně než 50% instalovaného výkonu, více než 50% instalovaného výkonu maximálně po 20 % času. Výkon vyšší než 80 % instalovaného výkonu po méně než 7 % času. Ovšem každá lokalita pro větrné parky je jiná a výsledky se mohou lišit. [17]



Obr. 4-2 Nejvyšší a nejnižší denní výroba větrného parku Kryštofovy Hamry

Nelze najít zákonitost, kterou by se řídil okamžitý výkon větrné farmy. Pokud podstatně naroste výkon větrných elektráren, mohl by se v některých dnech projevit ještě jeden fenomén - tzv. denní chod větru (*obr.4-3*), kdy vítr se v ranních a večerních hodinách utiší a výroba začne pravidelně cyklovat [15].



Obr. 4-3 Typické odchylky rychlosti větru od střední hodnoty

Proměnná p charakterizuje odchylku od střední rychlosti větru během dne.

5 VIRTUÁLNÍ ELEKTRÁRNY A SMART GRIDS

5.1 Virtuální elektrárny

Virtuální elektrárnou se obecně rozumí skupina decentralizovaných zdrojů energie, kterými mohou být zdroje jak obnovitelné nebo neobnovitelné, a to například kogenerační jednotky nebo mikrokogenerace, větrné elektrárny, malé vodní elektrárny, fotovoltaické elektrárny apod. Podstatnou charakteristikou této skupiny zdrojů je skutečnost, že je provozována pomocí společného řídicího systému, fyzicky mohou být jednotlivé zdroje od sebe značně vzdáleny. Instalovaný výkon virtuální elektrárny je dán součtem výkonu jednotlivých zdrojů, které ji tvoří. Předem dohodnutý řídicí program může vést k dodatečnému efektu v oblastech špičkového výkonu. V závislosti na struktuře složení a velikosti mohou virtuální elektrárny sloužit jak v základním, tak i ve špičkovém, případně záložním režimu a to tím více, čím více se strana spotřeby bude přibližovat konceptu řízení stranou poptávky, resp. čím lépe se strana spotřeby přizpůsobí charakteru převažujících zdrojů. V současnosti se virtuální elektrárny poměrně snadno přizpůsobí stávajícímu fungování a řízení přenosových soustav, jejich správa umožňuje regulovat instalovaný výkon podle potřeby sítě. Budoucnost by měla patřit efektivnímu řízení dodávky elektřiny podle strany poptávky, která relativně pružně reaguje na technologický vývoj. Princip virtuální elektrárny vyplývá z její definice a je založen na propojení více jednotek v jednom řídicím systému, který zajišťuje maximálně efektivní výrobu elektřiny v čase a místě spotřeby. Z technického hlediska se jedná o využití dostupných technologií jak výroby energie, tak jejího řízení, přičemž hlavním parametrem je spotřeba, tj. princip řízení podle potřeby. Důležitý je účel, za jakým je virtuální elektrárna vytvořena, ale předpokládá se, že obvykle jej lze charakterizovat snahou docílit co nejstabilnější období klasické elektrárny, ale při využití výhod decentralizované výroby. Virtuální elektrárna by tak měla být vždy efektivnější a bezpečnější. [18]

5.1.1 Řízení spotřebou

Jednou ze základních charakteristik elektroenergetiky je nutnost výroby v reálném čase, neboť elektřinu nelze jednoduchým způsobem skladovat a je potřeba ji dodávat do místa spotřeby právě v okamžiku, kdy je v daném místě poptávána (spotřebovávána). Moderní řídicí systémy přenosu a distribuce elektřiny virtuální elektrárny toto zvládají zcela spolehlivě, ale mají své limity, zejména s ohledem na rozmístění a velikost zdrojů v soustavě. [18]

5.1.2 Propojení sítí

Nejdůležitějšími technologiemi pro virtuální elektrárny jsou moderní komunikační a řídicí systémy. Potřebné je zařízení, které propojuje jednotlivé elektrárny a vytváří denní plán využití zdrojů na základě aktuálních cen elektřiny a poptávky zákazníků a určuje, které elektrárny budou dodávat do sítě a kdy. Decentralizovaný systém energetického řízení je velmi moderní, protože umožňuje regionální energetické řízení a přináší do sítě inteligenci. [19]

5.1.3 Ostrovní režim

Masivní nasazení obnovitelných zdrojů bude velmi negativně ovlivňovat stabilitu elektrické sítě. Problém byl vyřešen tím, že při nevyrovnané bilanci výroby a spotřeby předpokládají občasný přechod postižené části sítě do tzv. ostrovního režimu. Ostrovní režim je však v podstatě

havarijní stav spojený s výrazným kolísáním frekvence a napětí v ostrovní síti, což by mohlo ve svém důsledku způsobit poškození popř. zničení elektrických a elektronických spotřebičů. Nehledě na to, že z hlediska parametrů je takto „nekvalitní“ elektrická energie naprosto nepřijatelná pro dnešní náročné průmyslové technologie. Rovněž proces opětovného připojení k el. síti (tzv. resynchronizace) je technicky náročný a je vázán na přesně definované technické podmínky. [20]

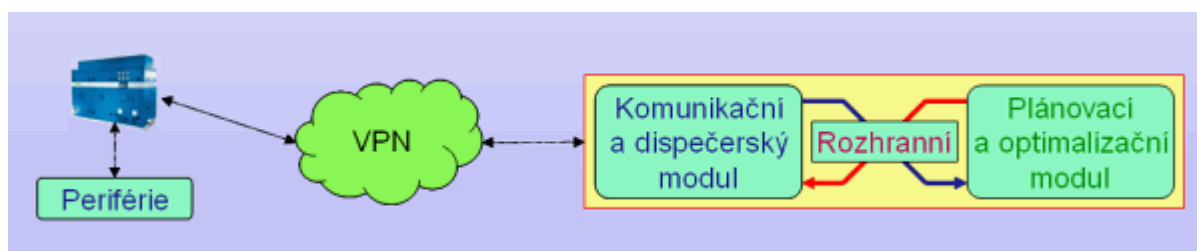
5.1.4 Výpadek zdroje

Výhodou má být skutečnost, že výpadek zdroje malého výkonu v řádu jednotek MW v decentralizovaném systému postihne podstatně menší počet spotřebitelů než výpadek zdroje o výkonu několika set až jednotek tisíců MW v centralizovaném systému. Toto tvrzení je nepochybně pravdivé, avšak neúplné. Decentralizovaný systém skutečně nemá problémy s výpadky jednotlivých zdrojů malého výkonu, nýbrž zcela „na opačném konci“ – a to s „poskládáním“ stovek popř. tisíců malých obnovitelných zdrojů do jednotné elektrické soustavy tak, aby byla zajištěna stabilní dodávka elektrické energie v požadovaném čase, množství a kvalitě. [20]

5.2 Princip virtuální elektrárny

Koncepční řešení rozptýlené elektrárny je s ohledem na možnosti dalšího rozšiřování strukturováno modulově dle následujícího zjednodušeného schématu (obr. 5-1):

- komunikační a dispečerský modul
- modul databázového rozhraní
- plánovací a optimalizační modul [21]



Obr. 5-1 Koncepční schéma virtuální elektrárny

5.2.1 Výhody virtuální elektrárny

- Celkově nižší investiční nároky než nové klasické elektrárny
- Bezemisní nebo téměř bezemisní zdroje
- Vytvářejí místní pracovní místa
- A tím multiplikační ekonomický efekt, to znamená, že prostředky vynakládané na energii zůstávají z podstatné části v regionu [18]

5.2.2 Nevýhody virtuální elektrárny

- Energetická efektivnost je omezený koncept, je limitována množstvím spotřebovované energie a virtuální elektrárny založené právě na konceptu postupného snižování spotřeby a řízení potřebou tak mají malý vliv rámci „velké energetiky“

- Sluneční a větrná energie jsou zdroje s nespojitou a obtížně regulovatelnou výrobou
- Převaha těchto zdrojů v energetických sítích je rizikem pro spolehlivost dodávek energie
- Výroba energie na straně spotřebitele vyvolává problémy integrace do sítí a řízení a regulace na straně distributorů energie [18]

5.3 Smart Grids -Inteligentní distribuční síť

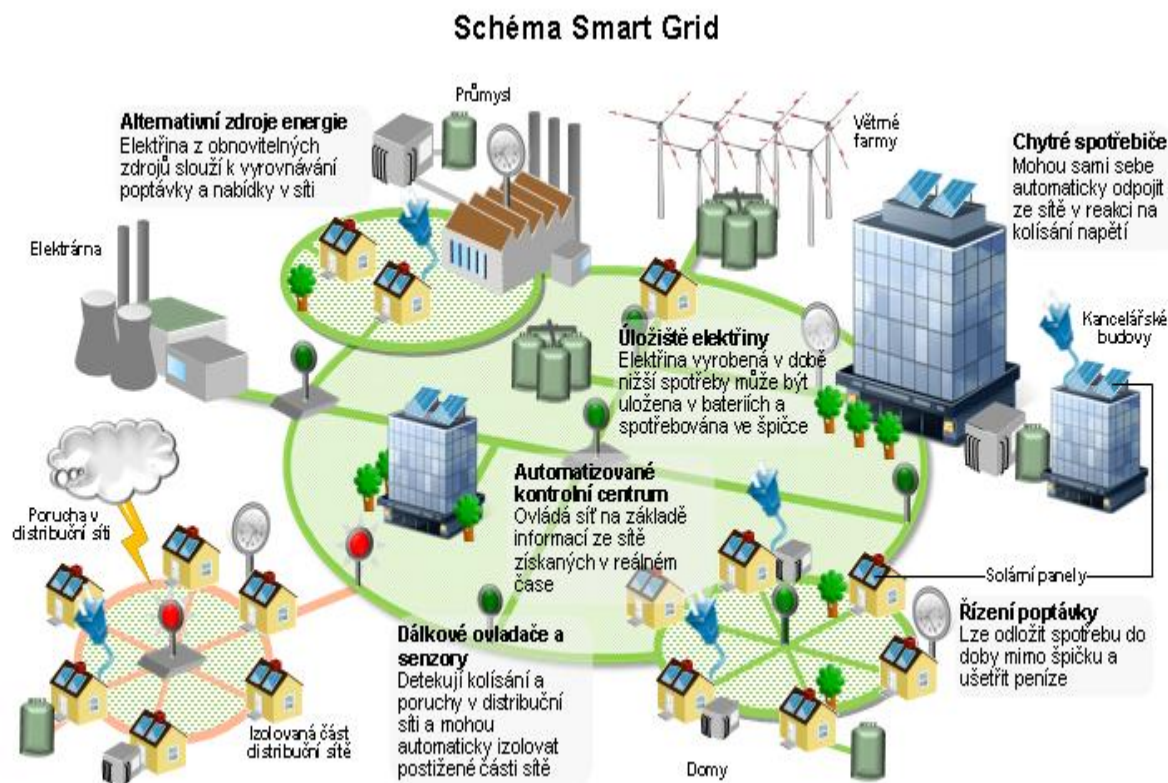
Smart Grids jsou inteligentní, spolehlivé, samo se monitorující distribuční síť elektřiny. Propojují celý řetězec dodávek elektrické energie a informací – výrobu, distribuci a zákazníky – s tím, že komunikační tok již nemusí být výhradně jednosměrný, jak tomu bylo dosud.

Smart Grids dokáží efektivně zapojit i alternativní zdroje elektrické energie a výhodně je kombinovat se zdroji tradičními. Inteligentní síť rozpozná přetížení distribuční sítě a přesměrováním toku energie sníží přetížení v určitém místě. Především tak výpadku dodávek elektřiny v dané lokalitě. Zároveň monitoruje děje a technický stav distribuční sítě, řeší poruchy a výpadky a dává podněty k obnově distribuční sítě. Je významné, že Smart Grids komunikují se zákazníkem v reálném čase a optimalizují jeho spotřebu s přihlédnutím k ceně elektřiny a k zátěžím životního prostředí. Umožňuje to schopnost lépe integrovat obnovitelné zdroje elektřiny.

Dosavadní model distribuční sítě se s připojením alternativních zdrojů výroby energie vyrovnával mnohem hůře než u klasických zdrojů energie. Inteligentní síť může lépe vyrovnat poptávku a nabídku energie v síti. Obousměrný tok údajů, automatizované řídicí centrum, dálkové ovladače a senzory zlepšují komunikaci a rozhodování. Distribuce může počítat v budoucnu i s úložišti elektřiny, která budou vyrovnávat výrobu a spotřebu elektřiny. U zákazníka se budou moci automaticky zapojovat a odpojovat spotřebiče k distribuční soustavě a třeba i odkládat spotřebu mimo špičku odběru elektřiny.

Při srovnání diagramu tradiční distribuční sítě a sítě typu Smart Grids je na první pohled patrná změna její topologie (*obr. 5-2*). Jednosměrný tok energie a komunikace se mění na obousměrný. Přibude automatické monitorování stavu sítě a její rychlejší obnova v případě poruch. Případný problém tak zůstane izolován na určitý „ostrov“, nebude se šířit dále. Jiná je v systému Smart Grids i úloha zákazníka a jeho začlenění do systému.

Současné elektroměry, jejichž obsluha vyžaduje pravidelné „manuální“ odečty spotřeby na číselníku v jejich okénku a odesílání údajů do centra na zpracování prostřednictvím stohů papírů, budou již zanedlouho minulostí. Nahradí je automatické inteligentní přístroje, které dokáží samy průběžně předávat údaje o spotřebě energie elektřiny, do centrály distribuční firmy. Využijí přitom nejen možnost přenosu informací po komunikačních sítích, ale třeba i po silnoproudých rozvodech nebo dokonce bezdrátově. Lepší integrace spotřeby a výroby umožní začlenit do Smart Grids zákazníka, a to ve dvou rolích: jako spotřebitele i jako dodavatele energie, především z obnovitelných zdrojů. [22]



Obr. 5-2 Schéma Smart Grid

5.3.1 Přínosy Smart Grids

Tím, že se lépe využijí dosavadní velké zdroje energie a efektivně se zapojí zdroje obnovitelné, zkvalitní se životní prostředí. Podstatná je také schopnost Smart Grids lépe uspokojit nároky na růst spotřeby energie. Uspoří také náklady, zejména zjištěním a včasným odstraněním potenciálního problému v distribuční síti. A to ještě před jeho vznikem, protože dokáže nebezpečí blížícího se problému včas odhalit. I v případě výpadku se parametry sítě rychleji obnoví. Touto cestou budou zákazníci lépe informováni o využití elektrické energie a budou moci ke svému prospěchu změnit a zefektivnit svoje dlouhodobé spotřebitelské návyky. Určitě také uvítají kratší výpadky dodávek elektriny. Lepší integrace alternativních zdrojů zlepší kvalitu sítě v místech, kde je dosavadní kapacita omezena. [22]

6 PŘECHODNÉ JEvy V DISTRIBUČNÍ SÍTI S ROZPTÝLENÝMI ZDROJI

Ustálený stav sítě je takový stav, při kterém je rovnováha všech veličin charakterizujících její chod. Při přechodné stavu sítě vznikají nenormální jevy v důsledku náhlého porušení izolace nebo ovládním soustavy. Tímto vzniká přechodný stav soustavy, ve kterém přechodné složky veličin chodu elektrizační soustavy zanikají nejčastěji formou tlumených oscilací a soustava přechází do ustáleného stavu. Přechodné děje rozdělujeme podle doby trvání zániku přechodných složek veličin chodu a jejich periody ve srovnání s periodou proudu s jmenovitým kmitočtem. Pomalé (elektromechanické) přechodné děje souvisí s náhlou změnou zatížení zdrojů, při kterém vzniká nerovnováha mezi elektrickým a mechanickým momentem na hřídeli generátorů, která ohrožuje synchronní chod. Středně rychlé (elektromagnetické) přechodné děje jsou způsobeny náhlou změnou izolačního odporu mezi krajními vodiči, středním vodičem nebo zemí v uzemněné soustavě. Nejrychlejší přechodové děje vznikají při úderu blesku do některého z prvků soustavy nebo do jejich těsné blízkosti.[23]

6.1 Zkratky

Zkrat je elektromagnetický přechodový děj, který je reprezentován náhlou změnou impedance na svorkách zdrojů. Zkratová porucha má za následek přechodný děj ve všech prvcích soustavy. Velkým zkratovým proudem se poruší rovnováha mezi polem magnetickým a elektrickým v prostoru soustavy do rovnovážného stavu přechází soustava pomocí přechodných složek proudu a napětí s vlastní periodou. Zkratky se rozdělují na souměrné, nesouměrné, jednofázové, dvoufázové a třífázové. U venkovních vedení se vyskytují většinou zkratky jednofázové a u kabelových sítí převažují zkratky třífázové. [23]

6.1.1 Zemní spojení

V sítích s izolovaným uzlem nebo v kompenzovaných sítích spojených se zemí přes zhášecí tlumivku nebo pomocí zhášecího transformátoru, vzniká při spojení vodiče fáze se zemí zemní spojení. Při tomto nežádoucí spojení nepůsobí zkratový proud, ale pouze malý proud kapacitního charakteru, a proto nezapůsobí zkratové ochrany. Místa zemního spojení se obtížně hledají. [23]

6.2 Stabilita přenosové soustavy

Stabilita přenosové soustavy je definována jako schopnost soustavy udržet rovnovážný stav během normálního provozu i po přechodných dějích způsobených vnějšími vlivy, dispečerským řízením i poruchovými výpadky zařízení a jinými rozruchy. Rozruchy jsou myšlené například změny provozního charakteru, poruchy zařízení způsobené skrytými vadami, poruchy způsobené klimatickými vlivy, poruchy způsobené lidským faktorem. [24]

6.2.1 Statická stabilita přenosové soustavy

Přenosová soustava je kompaktní celek vykazující vysoký stupeň statické stability. K narušení meze statické stability dojde až v případě zvýšení výkonů, které překročí přenosové

schopnosti jednotlivých přenosových profilů nebo ve výjimečných poruchových stavech. Proti ztrátě statické stability chrání vypínací funkce distančních ochrany na vedeních a transformátorech přenosové soustavy, která rozpozná nebezpečí narušení statické stability. [25]

6.2.2 Dynamická stabilita soustav

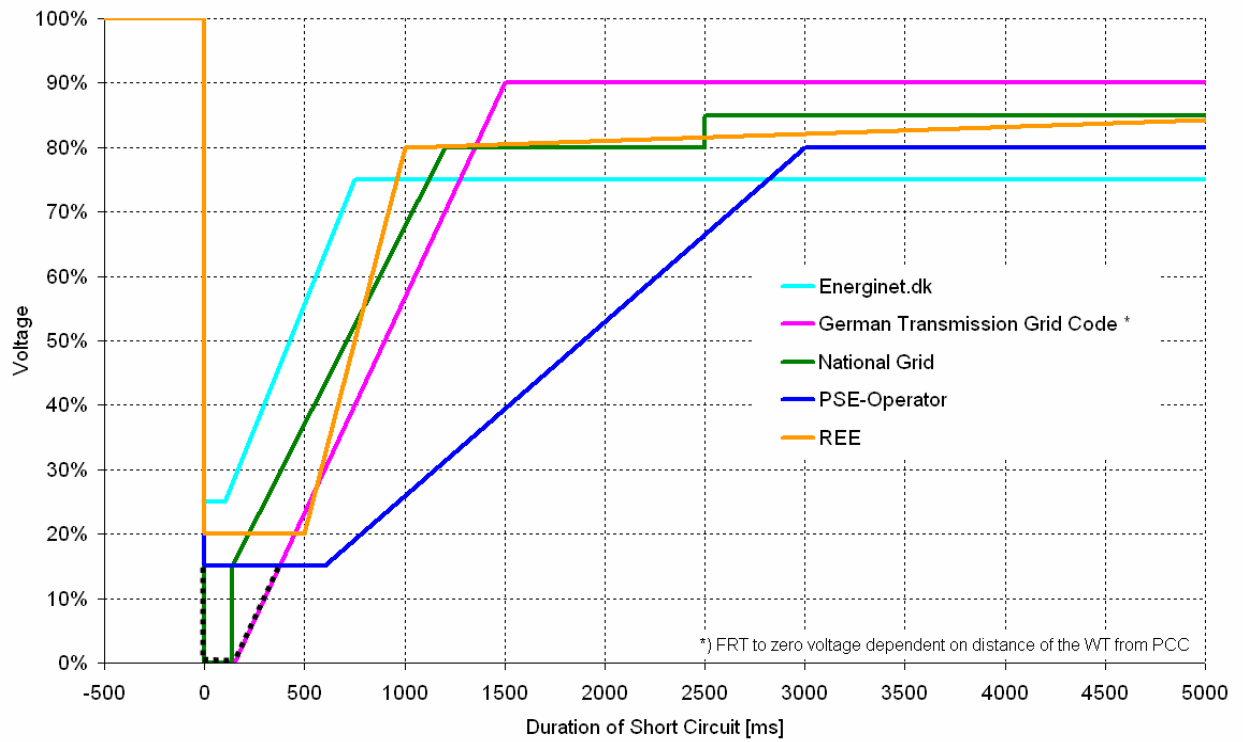
Dynamická stabilita rozvodných a distribučních soustav je schopnost udržet se v synchronním chodu i při náhlých velkých změnách. V rozvodnách jsou kontrolovány výpočtem maximální povolené doby trvání třípólového zkratu, aby nedošlo k narušení dynamické stability blízkých generátoru. Tato kontrola uvažuje i případy selhání vypínače. Generátory o výkonu větším jsou vybavovány ochranou proti ztrátě stability. [25]

6.3 Ochrana soustavy před poruchami

V distribučních sítích vn se využívají stupňovité nebo srovnávací ochrany. Stupňovité ochrany pro získání selektivního jištění a vzájemného zálohování potřebují časové zpoždění, které je vhodně odstupňované. Jako stupňovité ochrany se používají nadproudové a distanční ochrany. Stupňovité ochrany jsou časově odstupňované tak aby nejdříve působil prvek, který je nejbližší poškozené části vedení a odpojil od zdroje pouze tento úsek. Ochrany srovnávací pracují na principu srovnání daných fyzikálních veličin na vstupu a na výstupu chráněného objektu. Tyto ochrany sledují na vstupu a na výstupu veličiny jako jsou například fázory proudů, výkon, fázový posun mezi proudy. Vypnutí bývá provedeno okamžitě, či s předem nastaveným zpožděním. Protože se srovnávací ochrany starají pouze o svůj chráněný objekt, nepotřebují se časově přizpůsobovat dalším ochranám. Pro ochranu před zemním spojením se používají směrová watová či jalová relé. Ve spolupráci s těmito ochranami pracují také automatiky opětného zapínání, které zkracují u přechodných poruch dobu výpadku. [26]

6.4 Vliv obnovitelných zdrojů při poruchách v síti

Pokud nastane blízký zkrat u některého z rozptýlených zdrojů, musí jejich ochrany reagovat podle síťového kodexu, je zapotřebí zajistit ochranu proti podpětí, přepětí, podfrekvence a nadfrekvence. Negativním vlivem rozptýlených zdrojů většího výkonu je vypínání těchto zdrojů od sítě při menších odchylkách napětí a frekvence sítě než u běžných konvenčních zdrojů, kvůli chránění citlivé a drahé výkonové elektroniky. Například u větrných elektráren se odpojení zdroje určuje při zkratech v síti podle poklesu napětí v předacím místě podle grafu, kde se rozlišují zdroje s nízkým a vysokým zkratovým příspěvkem. Pokud napětí v předacím místě neklesne pod křivku, jak je znázorněno na *obr. 6-1*, nesmí být větrná elektrárna odpojena od sítě. [27] [28]



Obr. 6-1 Požadavky síťových kodexů na odolnost VTE při blízkém zkratu

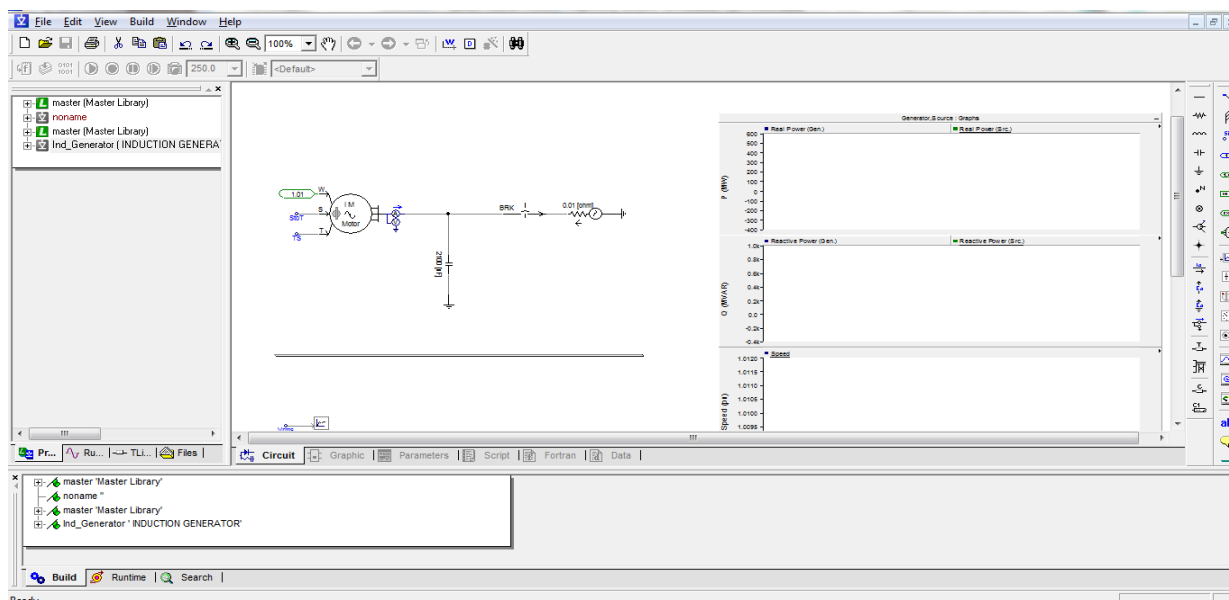
7 PROSTŘEDÍ PSCAD

7.1 Úvod

PSCAD je profesionální nástroj pro simulaci a analýzu energetických systémů. Práce probíhá v grafickém prostředí. Grafické rozhraní značně zvyšuje použitelnost simulačního prostředí. To umožňuje uživateli schematicky postavit obvod, spustit běh simulace, analyzovat výsledky a spravovat data. Prostředí je navrženo tak, aby se simulované modely chovaly jako skutečné energetické systémy. [29]

7.1.1 Pracovní prostor

V prostředí PSCAD je základním grafickým rozhraním pracovní prostor, kde se nachází prostor pro kreslení, panel se základními prvky, nástroj pro vyhledání dat nebo chyb, okno pro zobrazení zpráv prostředí, editor komponent pro vytváření nebo úpravu vlastních komponent a knihoven, programovací prostředí Fortran 95 pro rychlejší nalezení chyb. [29]



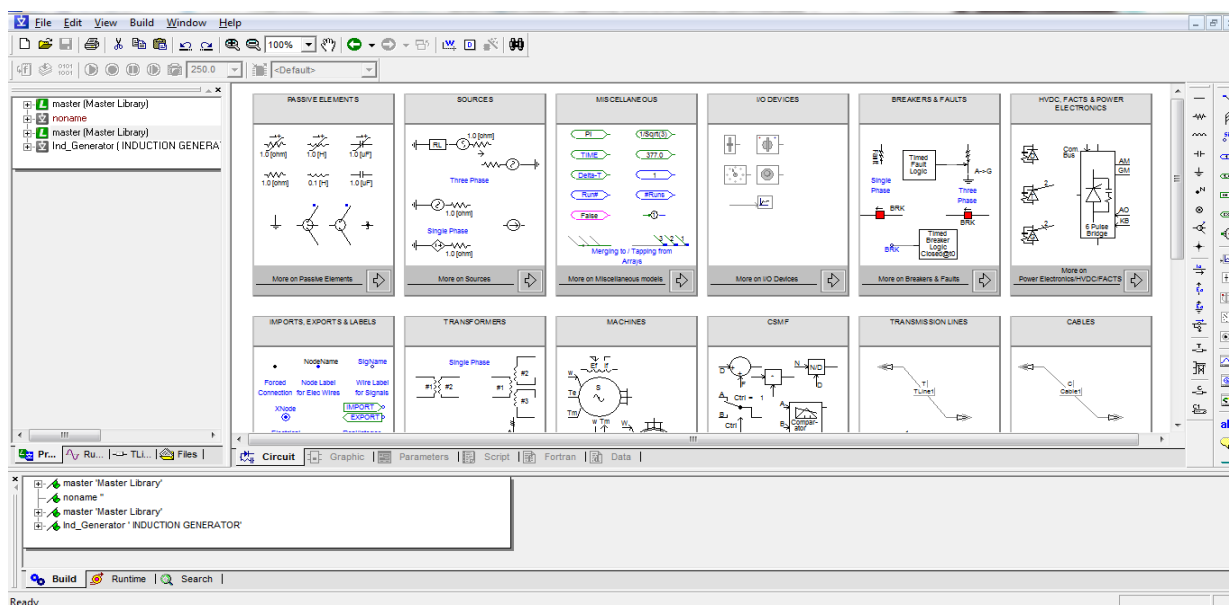
Obr. 7-1 Pracovní prostor prostředí PSCAD

7.1.2 Knihovna

Knihovna prostředí PSCAD obsahuje více než 280 komponent, které umožňují vytváření modelů energetických systémů kombinujících výrobu, přenos, distribuci elektřiny, stejně jako chování výkonové elektroniky při těchto procesech. Knihovna obsahuje tyto základní kategorie komponentů:

- Pasivní prvky
- Zdroje
- Vstupy/Výstupy
- Jističe a Závady

- Prvky výkonové elektroniky
- Analogové a digitální ovládací prvky
- Stroje
- Transformátory
- Přenosové linky a kabely
- Sekvenční komponenty [29]



Obr. 7-2 Knihovna prostředí

7.2 Simulace

Úkolem bakalářské práce byl návrh elektrické sítě v rozsahu jedné DTS v prostředí PSCAD. Tento úkol byl při konzultacích s vedoucím přehodnocen, aby bylo možno zapojit do soustavy elektrárny pracující i do sítě vysokého napětí. Simulovaná elektrická síť je tedy jedním vývodem transformovny 110/22 kV, ke které jsou připojeny jak distribuční trafostanice, tak rozptýlené zdroje různých výkonů.

Byly provedeny simulace zkratových poruch v různých místech této sítě a porovnávány parametry napětí a proudu ve vybraných bodech v závislosti na typu zkratu, typu výroben připojených do sítě a jejich výkonu.

7.2.1 Možnosti simulovaných zdrojů

Dále je potřeba říci, co všechno nám dovolí simulační prostředí PSCAD u jednotlivých zdrojů, které budeme chtít simulovat.

7.2.1.1 Vodní elektrárna

Vodní elektrárnu v prostředí PSCAD můžeme simulovat jako hydrogenerátor s asynchronním, synchronním nebo stejnosměrným generátorem s budičem a vodní turbínou s regulací.

U vodní turbíny můžeme regulovat, jestli je vodní sloupec proměnlivý, jestli má vodní elektrárna vyrovnávací komoru, stav turbíny, počáteční podmínky a jmenovité podmínky. Dále lze regulovat u vodní turbíny mechanické vlastnosti pro využití energie vody na výrobu elektrické energie. Dále lze nastavovat u generátoru typ generátoru, počet turbín, výkon stroje, frekvenci, synchronní otáčky stroje, konstanty setrvačnosti turbín i stroje a další vlastnosti. Pro buzení stroje se dá nastavit 5 typů běžně používaných budičů. Jako vodní elektrárnu lze simulovat i přečerpávací vodní elektrárnu, kde je ovšem výroba časově omezena.

7.2.1.2 Větrná elektrárna

Větrná elektrárna je v simulačním prostředí již obsažena v knihovně a skládá se z vstupního regulátoru větru, z větrné turbíny s generátorem a regulátoru větrné turbíny. U regulátoru větru můžeme nastavovat rychlost větru, průměrnou rychlost větru v referenční výšce, porывy větru, útlumy větru, časovou konstantu útlumu a další vlastnosti větru. U větrné turbíny s generátorem můžeme regulovat výkon generátoru, otáčky generátoru, radius rotoru, hustotu vzduchu, převodový poměr a další vlastnosti. U regulátoru větrné turbíny můžeme nastavovat jmenovitou frekvenci stroje, jmenovitý výkon turbíny, jmenovitý výkon stroje.

7.2.1.3 Fotovoltaická elektrárna

Fotovoltaický zdroj lze simulovat jako stejnosměrný zdroj s měničem napětí. U stejnosměrného zdroje lze regulovat charakter a hodnotu vlastní impedance a parametry výstupního signálu.

7.2.1.4 Kogenerační jednotky

Kogenerační jednotky lze simulovat buď jako kogenerační jednotky s parní turbínou a synchronním nebo asynchronním generátorem. U parní turbíny můžeme regulovat mechanické vlastnosti turbíny a u generátoru vlastnosti, které již byly popsány výše. Nebo lze simulovat kogenerační jednotky se spalovacím motorem, kde u motoru můžeme regulovat výkon motoru jmenovité otáčky motoru, účinnost převodovky, převodový poměr, počet válců motoru a počet taktů motoru.

7.2.1.5 Spalovna biomasy

Spalovny biomasy, které používají pevná paliva nebo plyn, pracují principiálně stejně jako tepelné elektrárny, které využívají turbogenerátoru v prostředí PSCAD, jak již je zmíněno výše. Lze regulovat vlastnosti parní turbíny a vlastnosti generátoru. Na zpracování zplyněné biomasy lze také použít spalovací motory, o jejichž simulaci je zmíněno u simulace kogeneračních jednotek.

7.2.1.6 Simulace závad

V prostředí PSCAD lze simulovat i závady a jištění proti těmto závadám. Závady lze simulovat jako zkratky vedení, kde můžeme regulovat uzemnění, načasování poruchy, dobu trvání poruchy a další vlastnosti.

7.2.1.7 Transformátory

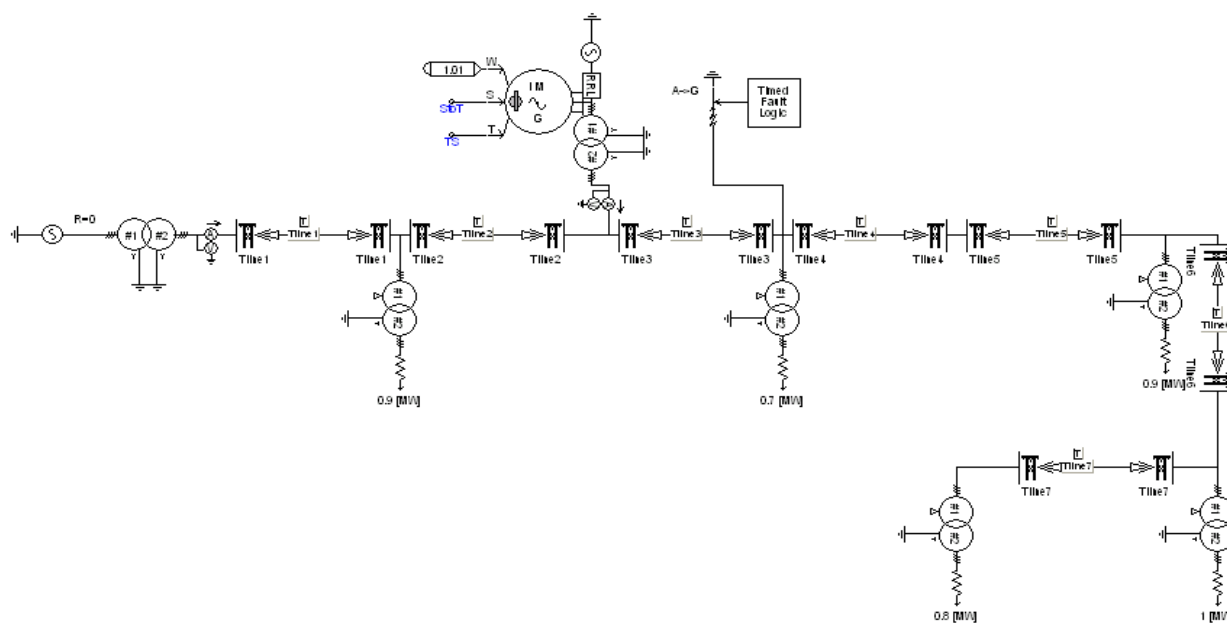
Pro simulaci zdrojů budeme také potřebovat transformátory. Simulační prostředí nabízí možnost výběru transformátorů s různými počty vinutí a můžeme regulovat vstupní i výstupní napětí transformátoru, jeho výkon, operační frekvenci, zapojení vinutí do trojúhelníka nebo do hvězdy atd.

8 SIMULACE ENERGETICKÝCH JEVŮ

Praktická část této práce je zaměřena na simulaci distribuční sítě 22 kV s reálnými parametry, do které jsou umístěny větrné elektrárny rozdílných výkonů podle podmínek pro připojitelnost zdrojů do simulované sítě a s různými typy generátorů. Simulace této sítě jsou zaměřeny na poruchové stavy sítě, převážně na jednofázový zemní zkrat, protože se v distribučních soustavách objevuje nejčastěji. Provedené simulace sítě jsou pro větrné elektrárny připojené ve více variantách místa připojení do sítě a pro poruchy na různých místech sítě. Při těchto alternativách byly sledovány hodnoty napětí a proudu na svorkách transformovny 110/22 kV z rozvodné sítě a na svorkách transformátoru, kterým je připojena větrná elektrárna k síti 22 kV.

8.1 Model sítě

Z parametrů reálné distribuční sítě 22 kV byla sestavena síť v prostředí PSCAD. Tato síť obsahuje transformovnu z rozvodné soustavy vvn 110 kV, venkovní vedení vn, které je provedeno sloupy s trojúhelníkovým uspořádáním vodičů. Dále jsou v jednotlivých místech sítě umístěny transformovny 22/0,4 kV, kde je síť 230/400 V reprezentována hodnotou odběru této sítě. Odběry jsou pro zjednodušení zastoupeny pouze odporovým charakterem. Do této sítě byly připojeny větrné elektrárny, které jsou připojeny do sítě přes transformátor. Větrné elektrárny jsou simulovány pomocí modelu asynchronních a synchronních generátorů připojené pomocí tyristorového měniče nebo pouze přes transformátor.



Obr. 8-1 Model sítě

8.1.1 Prvky modelu sítě

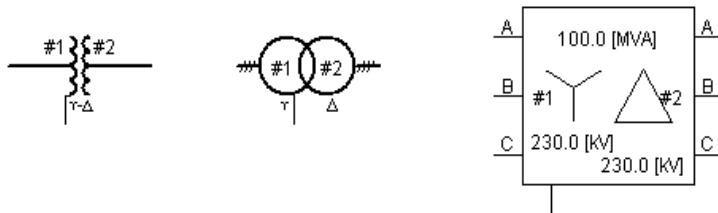
8.1.1.1 Sít' 110 kV

Parametry sítě vvn 110 kV jsou zastoupeny v modelu ideálním zdrojem, kde lze měnit napětí, dobu dosažení jmenovitých hodnot zdroje po zapnutí, frekvenci a fázový posun.

8.1.1.2 Transformátory

V modelované síti jsou použity modely klasických třífázových transformátorů. Jako napájecí transformátor z hladiny 110 kV byl použit transformátor 110/22 kV o jmenovitém zdánlivém výkonu 63 MVA v zapojení YnDYN, jako transformátory větrných zdrojů byli použity transformátory 22/22 kV o jmenovitých zdánlivých výkonech 0,63- 2 MVA v zapojení YnDYN, dále byli použity distribuční transformátory 22/0,4 kV s jmenovitými zdánlivými výkony 1-1,5MVA v zapojení DYN1.

U klasických modelů transformátorů lze nastavovat jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru, frekvenci zapojení jednotlivých vinutí do hvězdy nebo do trojúhelníku, ztráty na prázdno, ztráty v mědi, jmenovité hodnoty napětí na jednotlivých vinutích, dále také vlastnosti saturace, jako jsou bod nasycení, magnetizační reaktance a magnetizační proud.

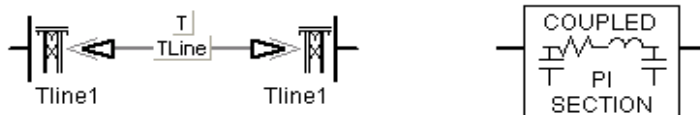


Obr. 8-2 Modely transformátorů

8.1.1.3 Venkovní vedení

V simulačním prostředí PSCAD lze nahradit vedení buď pomocí π -članků, kde se parametry vedení zadávají přímo nebo pomocí modelu vedení, kde je nastavení více specifické. V simulované síti byl použit model vedení, kde byly použity stožáry pro síť 22kV s trojúhelníkovým uspořádáním vodičů. Byly zvoleny vodiče AlFe6 95, jejichž průřez byl ověřen výpočtem podle dovoleného úbytku napětí pro tuto síť.

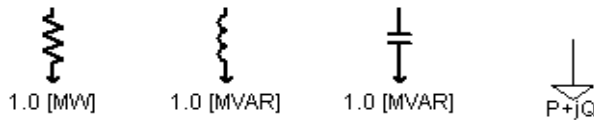
Při návrhu vedení v prostředí PSCAD se nejprve určuje délka vedení, frekvence sítě a počet vodičů. Dále se pak v editačním prostředí zvolí typ stožáru a jeho rozměrové parametry jako je vzdálenost vodičů od země a vzdálenost mezi vodiči. Lze zde také zadat počet zemnicích vodičů tohoto vedení. V editační části se také zadává poloměr vodiče a jeho měrný odpor. Také odpor vedení vůči zemi a relativní permeabilitu vůči zemi.



Obr. 8-3 Modely vedení

8.1.1.4 Odběry

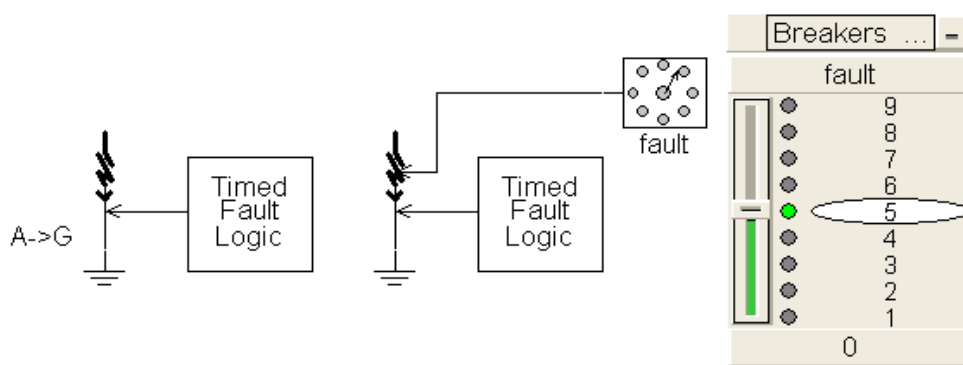
V simulované síti byly zvoleny odběry s odporovým charakterem, v knihovně prostředí PSCAD lze najít ještě zátěže s čistě indukčním a kapacitním charakterem a také odběr charakterizovaný činnou a jalovou složkou výkonu.



Obr. 8-4 Modely odběru

8.1.1.5 Poruchy

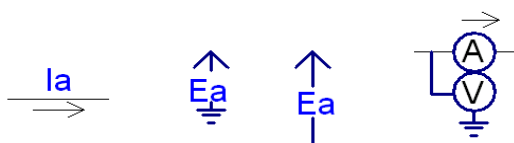
Pro simulaci poruch se v prostředí PSCAD slouží speciální prvek. V tomto prvku lze nastavit, o jaký druh poruchy se jedná, je možnost zvolit jednofázový zemní zkrat, dvoufázový zemní zkrat, třífázový zemní zkrat, dvoufázový zkrat a třífázový zkrat. Poruchový prvek je nutné řídit v závislosti na čase ovládacím prvkem. Dále je možno tento prvek řídit pomocí externích přepínačů v závislosti na druhu poruchy.



Obr. 8-5 Modely poruch

8.1.1.6 Měřicí prvky

V knihovně prostředí PSCAD se nachází měřicí prvky zastupující ampérmetry, voltmetry pro měření fázového i sdruženého napětí a také multimetr, kterým je možno měřit okamžitý proud, okamžité napětí, efektivní proud, efektivní napětí, činný výkon, zdánlivý výkon, fázový posun. Měřené hodnoty z těchto prvků se exportují pro další použití pomocí datového připojení, které má stejný název jako měřené hodnoty pojmenované v nastavovacím menu měřícího prvku. Tento systém má výhody v dalším využití pro grafické zobrazení průběhu měřených veličin nebo pro připojení tohoto žádaného průběhu bez nutnosti spojení vodiči, to vede v složitějších zapojeních k přehlednosti.

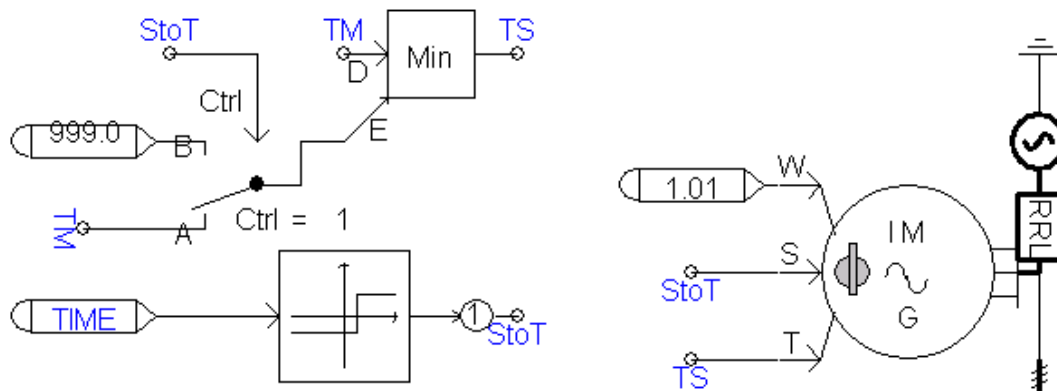


Obr. 8-6 Modely měřících prvků

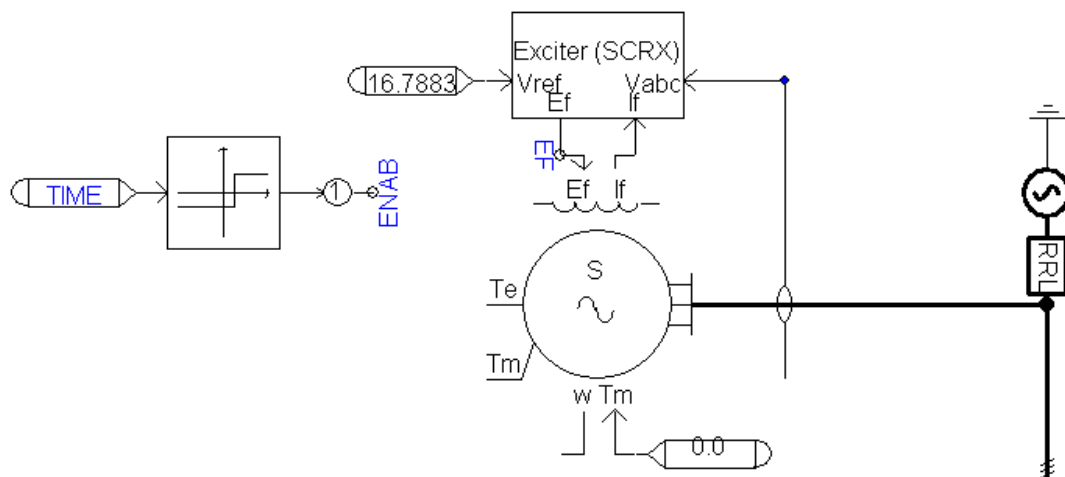
8.1.1.7 Větrné elektrárny

V simulované síti jsou použity modely větrných elektráren s asynchronním, synchronním generátorem, připojené buď s měničem, nebo bez měniče. Pro účely simulace pouze větrných elektráren, jako jsou závislosti na větrných podmínkách nebo závislosti přechodných stavů těchto zdrojů, je jako příloha programu knihovna s modely těchto zdrojů, které jsou přednastaveny na určité druhy simulací. Pro naši simulaci postačily pouze modely synchronních a asynchronních generátorů. Pro jejich připojení k síti byl využit také model tyristorového měniče.

U modelů generátorů je třeba zadat parametry, jako jsou výstupní napětí a proud, výstupní frekvenci, rezistanci statoru, odpor vinutí, reaktance statoru, magnetickou reaktanci, reaktanci rotoru, moment setrvačnosti a mechanické tlumení. U každého ze zmíněných generátorů se volené parametry liší. Dále je u modelu generátoru nutné zadat vstupní hodnoty, což jsou u asynchronního generátoru otáčky, elektrický točivý moment a mechanický točivý moment. U asynchronního generátoru jsou tyto vstupní hodnoty stejné a ještě jako vstupní hodnota přibývá buzení, které je zajištěno budičem, který lze najít v knihovně.



Obr. 8-7 Model asynchronního generátoru



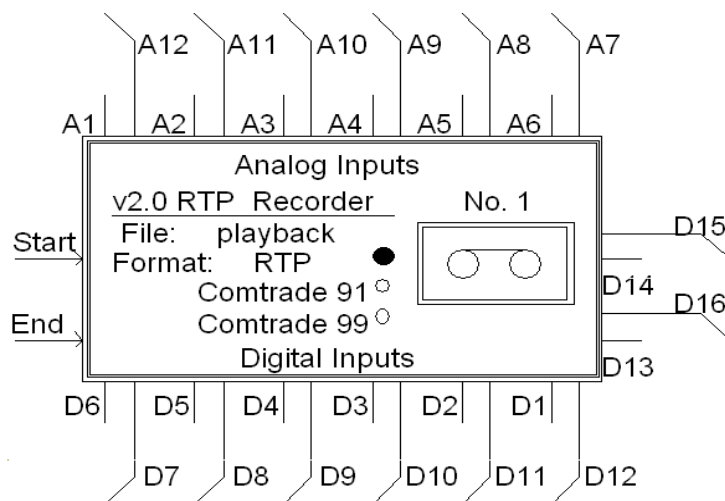
Obr. 8-8 Model synchronního generátoru

8.1.1.8 Rekordér

Pro export dat získaných simulacemi slouží speciální prvek, který se nazývá rekordér. Dokáže exportovat data z měřicích prvků přes datové připojení. Umožňuje připojení až 28 těchto datových vstupů, z toho může být 12 analogových a 16 digitálních. Tyto data lze ukládat v datových formátech RTP, COMTRADE 91, COMTRADE 99.

Při nastavování rekordéru se musí zadat formát výstupu, časový krok záznamu, frekvenci zaznamenávaného systému, počet analogových a digitálních vstupů, způsob kódování výstupních dat, meze výstupních hodnot. Dále pak pro jednotlivé vstupy je potřeba určit jednotky měřené veličiny a měřítko.

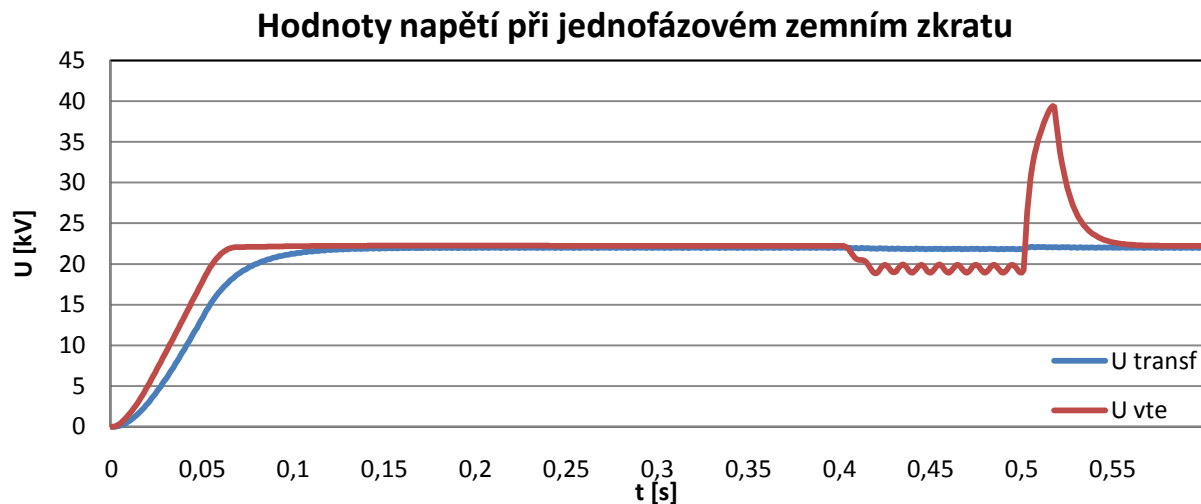
V simulaci byl použit datový formát COMTRADE 99 s osmi analogovými vstupy. I když byly meze výstupních hodnot nastaveny dostatečné, bylo potřeba hodnoty v datovém souboru přepočítat pomocí konstant které jsou také výstupem, než bylo možné je použít v programu excel. Protože výstupní data jsou automaticky upravována pro použití grafických programů, pracujících z tímto formátem.



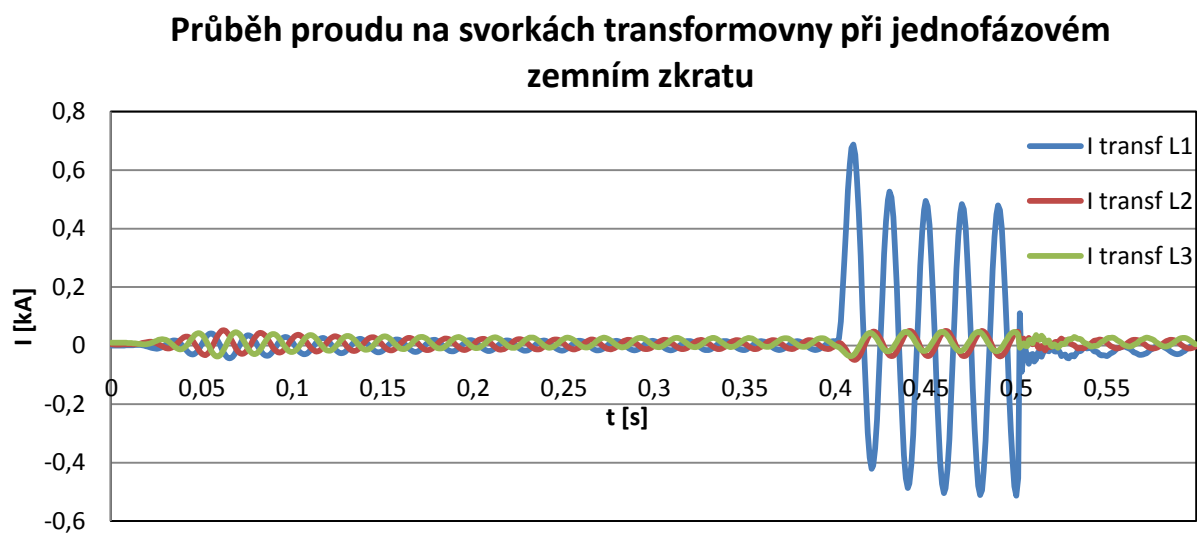
Obr. 8-9 Model rekordéru

8.2 Simulace zkratů v síti

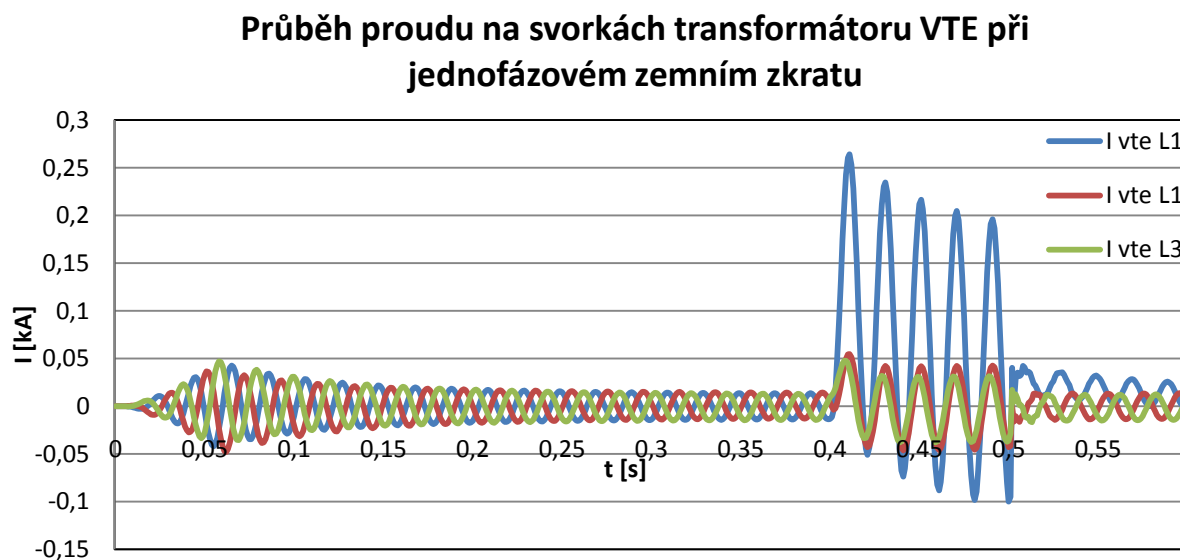
V modelované síti byl umístěn model větrné elektrárny, pro tuto síť byl spočítán výkon zdroje, který je možné do této sítě připojit podle výpočtů podmínek připojení zdroje do sítě. Dále bylo při simulacích zohledněné místo připojení modelu větrné elektrárny a k tomu místo zkratu v síti. A také závislost chování synchronních a asynchronních generátorů připojených přes měnič nebo bez měniče. V simulacích byl zkoumán převážně jednofázový zemní zkrat. Při této poruše bylo sledováno chování sítě s větrnou elektrárnou při těchto parametrech zdroje a sítě. Byly odečítány hodnoty proudů a napětí na výstupních svorkách transformovny z napěťové hladiny 110 kV a na výstupních svorkách transformátoru větrné elektrárny. Simulace jsou dlouhé 0,6 s a zkrat nastává v čase 0,4 s a trvá po dobu 0,1 s.



Obr. 8-10 Hodnoty napětí při jednofázovém zemním zkratu



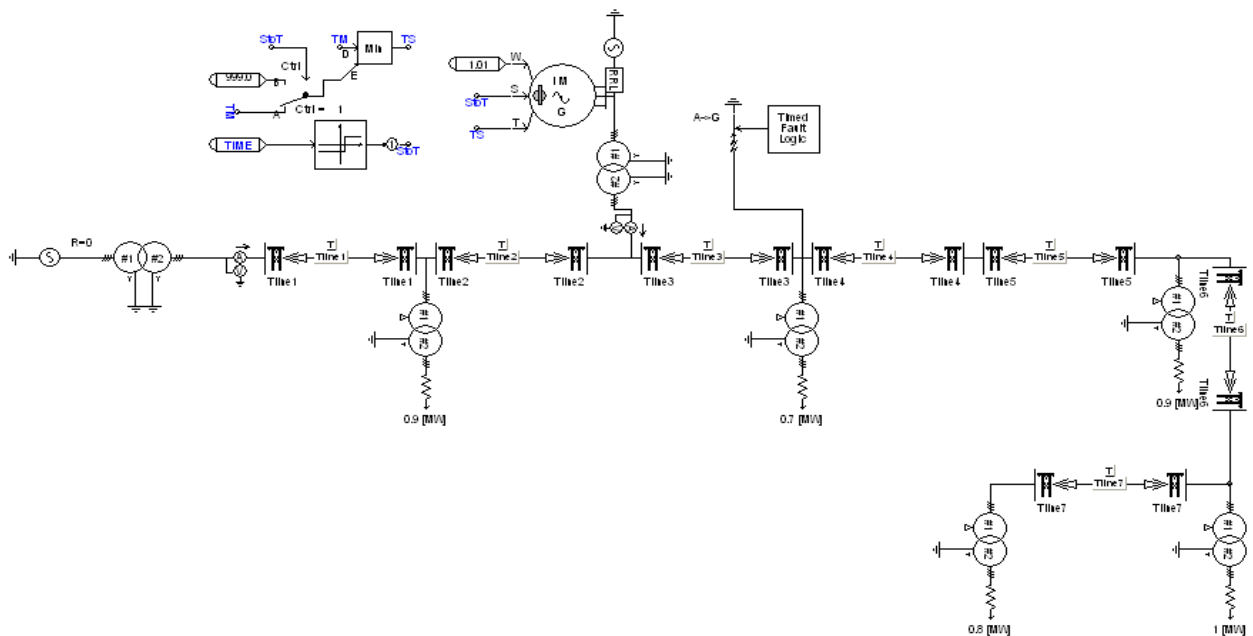
Obr. 8-11 Průběh proudu na svorkách transformovny při jednofázovém zemním zkratu



Obr. 8-12 Průběh proudu na svorkách transformátoru VTE při jednofázovém zemním zkratu

Tyto hodnoty jsou získané ze sítě s velikostí výkonu větrné elektrárny 0,5 MVA se synchronním generátorem, větrná elektrárna se nachází v jedné třetině sítě. A zkrat se nachází za větrnou elektrárnou, jako znázorněno na *obr. 8-13*.

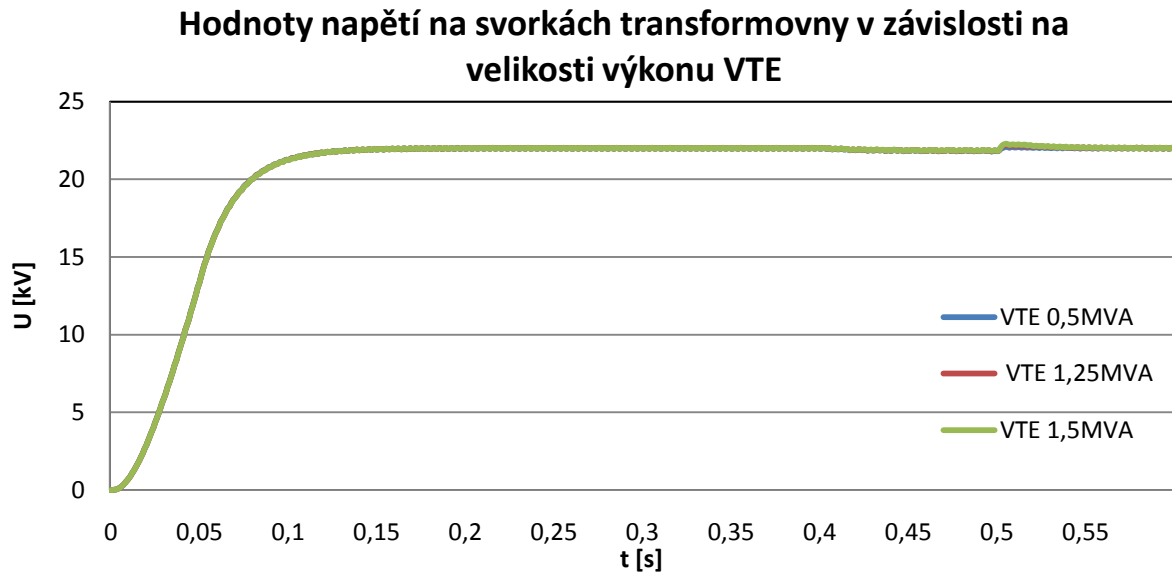
Jednofázový zemní zkrat v síti způsobil pokles napětí, který je na svorkách transformátoru větrné elektrárny větší než na svorkách transformovny. Při ukončení jednofázového zemního zkratu dochází k rychlému krátkodobému nárůstu napětí, který se projevuje také především na svorkách transformátoru větrné elektrárny. Průběh proudu postižené fáze zkratem se na svorkách transformovny a transformátoru větrné elektrárny liší, na svorkách transformovny dochází v první periodě k zvýšení amplitudy zkratového proudu, avšak v dalších periodách je zkratový proud ustálen a dosahuje své jmenovité hodnoty. Na svorkách transformátoru větrné elektrárny dosahují amplitudy proudu ze začátku působení zkratu téměř dvojnásobku zkratového proudu, tyto hodnoty se postupně přibližují ustálenému průběhu proudu, kterého za dobu zkratu 0,1 s nedosáhnou. Amplituda proudu nepostižených fází zkratem je zvýšená přibližně na trojnásobnou hodnotu. Při působení zkratu se frekvence proudu nemění.



Obr. 8-13 Model sítě pro simulaci jednofázového zemního zkratu

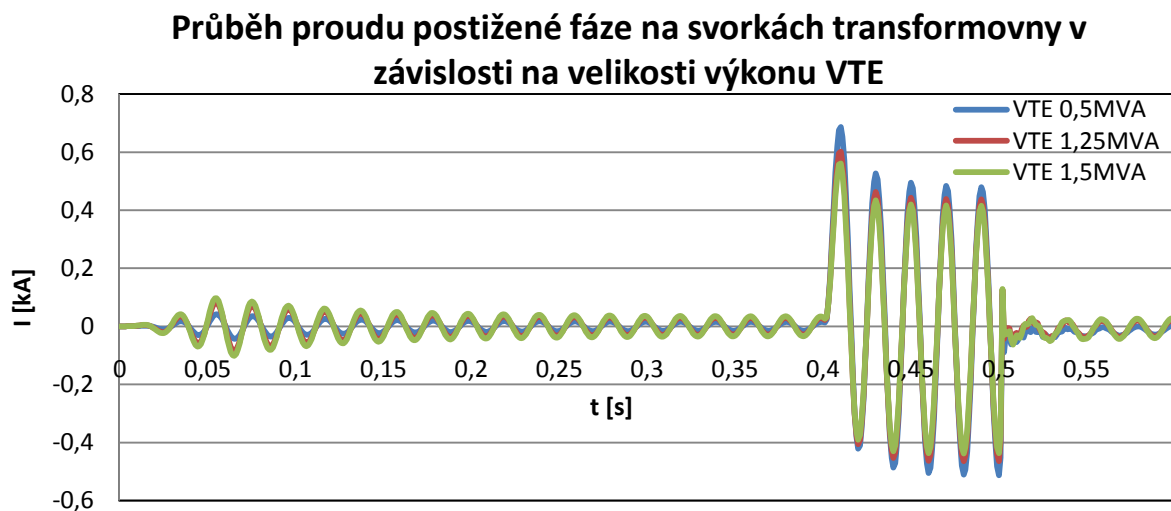
8.2.1 Simulace chování sítě při jednofázovém zemním zkratu v závislosti na velikosti výkonu VTE

Při této simulaci byla zvolena síť která je znázorněna na *obr. 8-13*, to znamená síť s větrnou elektrárnou umístěnou v jedné třetině sítě a zkratem umístěným za větrnou elektrárnou. Pro simulovanou síť 22 kV byly vypočítány hodnoty maximálního výkonu zdrojů, podle podmínek připojitelnosti, které je možné připojit do této sítě. Vypočítaná hodnota maximálního výkonu zdroje připojitelného k této síti je 1,26 MVA. Proto byly zvoleny zdroje s výkonem nižším, než je tato hodnota, s výkonem na hranici připojitelnosti a s výkonem vyšším. Reálné hodnoty připojených zdrojů jsou 0,5 MVA, 1,25 MVA, 1,5 MVA. Pro síť s těmito zdroji byly sledovány hodnoty napětí a proudu na výstupních svorkách transformovny z napěťové hladiny 110 kV a na výstupních svorkách transformátoru větrné elektrárny. Průběhy sledovaných hodnot jsou zobrazeny na obrázcích.



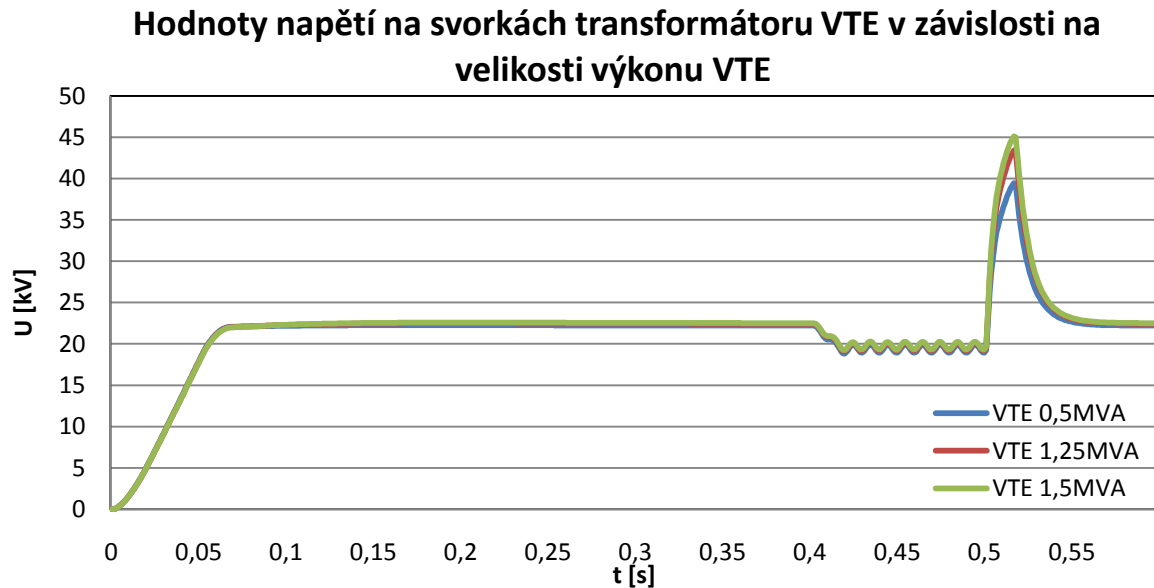
Obr. 8-14 Hodnoty napětí na svorkách transformovny v závislosti na velikosti výkonu VTE

Hodnoty napětí na svorkách transformovny se v závislosti na velikost připojeného zdroje téměř neliší. V počátku působení zkratu klesne napětí, které se ustálí na této hodnotě až do konce působení zkratu, ihned po skončení působení zkratu dochází ke krátkodobému nárůstu napětí nad jmenovitou hodnotu 22 kV. Tento překmit netrvá déle než 0,025 s.



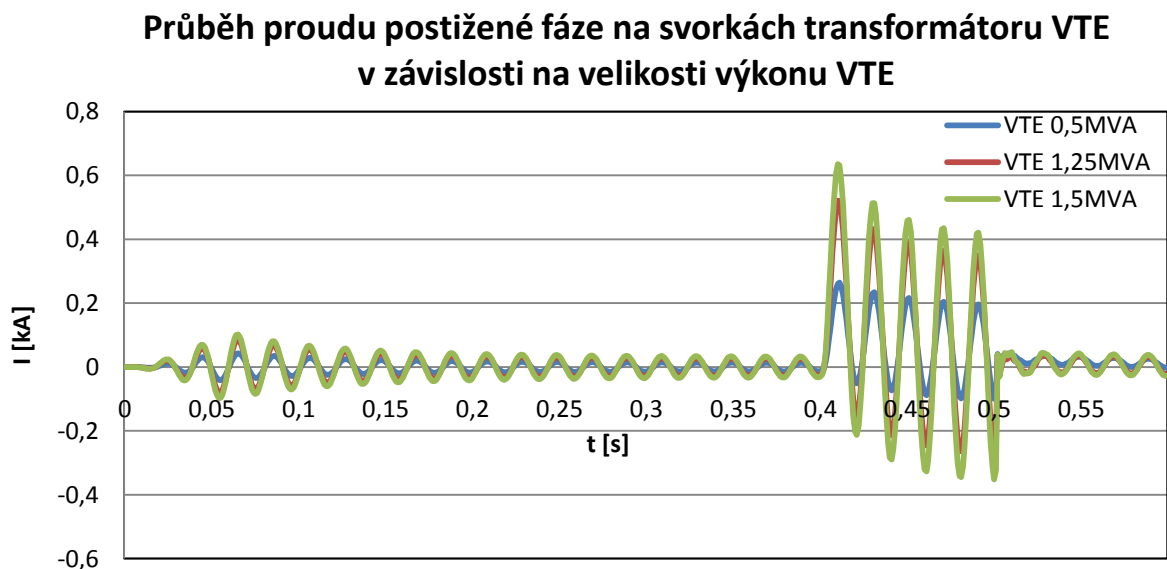
Obr. 8-15 Průběh proudu postižené fáze na svorkách transformovny v závislosti na velikosti výkonu VTE

Z průběhu proudů je zřejmé že největšího zkratového proudu na svorkách transformovny dosahuje síť, ve které je připojen zdroj s nejmenším výkonem, a nejnižšího zkratového proudu síť s největším zdrojem připojeným do sítě.



Obr. 8-16 Hodnoty napětí na svorkách transformátoru VTE v závislosti na velikosti výkonu VTE

Napětí na svorkách transformátoru větrné elektrárny v počátku působení zkratu klesá přibližně na hodnotu 20 kV u všech tří variant výkonů připojených zdrojů, ale překmit napětí nad jmenovitou hodnotu po skončení působení zkratu je různý. Největší překmit napětí je u sítě s připojeným zdrojem o výkonu 1,5 MVA, což je největší připojený výkon do sítě. Tento napěťový překmit dosahuje hodnoty okolo 45 kV. Nejmenší ho překmitu napětí dosahuje síť s připojeným zdrojem o nejmenším výkonu.



Obr. 8-17 Průběh proudu postižené fáze na svorkách transformátoru VTE v závislosti na velikosti výkonu VTE

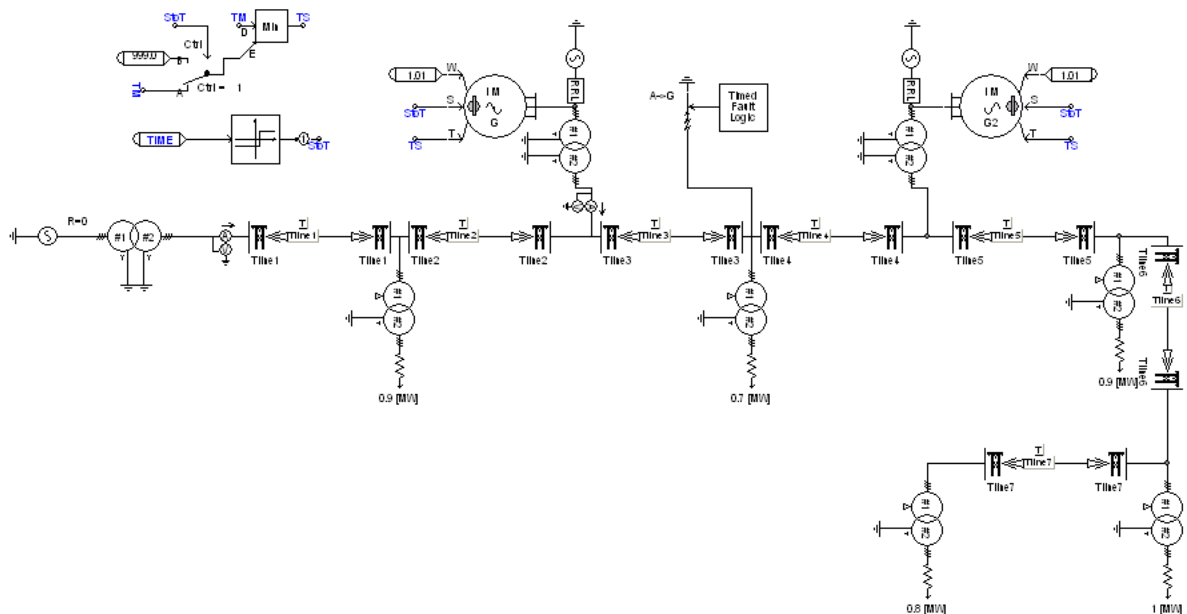
Na svorkách transformátoru větrné elektrárny je to opačné než na výstupních svorkách transformovny, nejvyšší zkratový proud zde dosahuje síť se zdrojem s největším výkonem.

8.2.1.1 Zhodnocení výsledků simulace chování sítě při jednofázovém zemním zkratu v závislosti na velikosti výkonu VTE

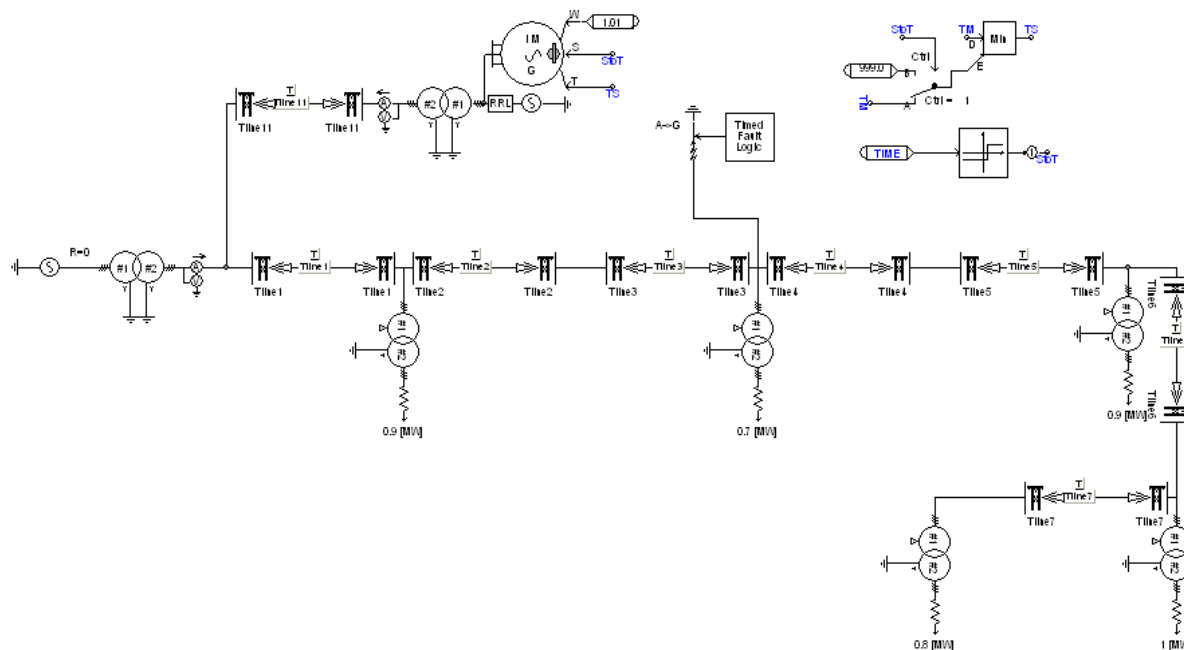
Z těchto průběhů je viditelné, že síť, ve které je připojen zdroj s největším výkonem, dosahuje na výstupních svorkách transformátoru větrné elektrárny nejvyšší hodnoty proudu a napětí při blízkém jednofázovém zemním zkratu. Na výstupních svorkách transformovny dosahuje zkratový proud opačné hodnoty než na výstupních svorkách transformátoru větrné elektrárny. To ukazuje, že zdroj s větším výkonem dokáže dotovat zkrat větším proudem a tím pádem se sníží proud dodávaný z rozvodné soustavy.

8.2.2 Simulace chování sítě při jednofázovém zemním zkratu v závislosti na místě zkratu

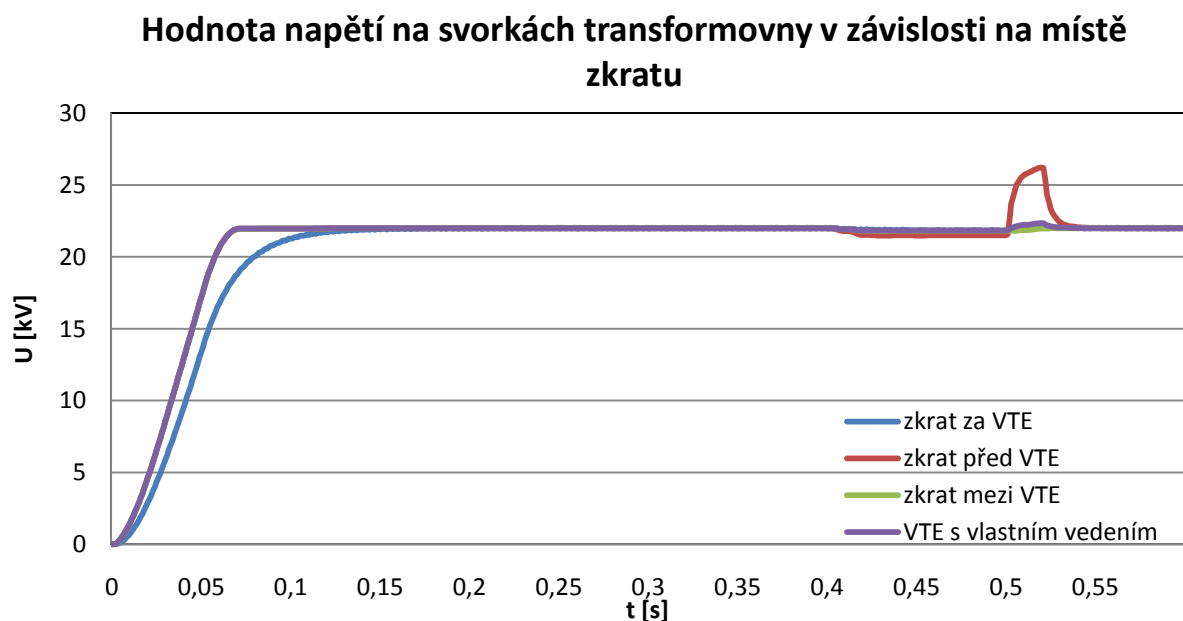
Pro simulaci chování sítě v závislosti na místě zkratu vůči větrné elektrárně byla použita síť, ve které je připojený zdroj s výkonem 0,5 MVA. Pro tuto síť byl simulován zkrat, který se nachází za větrnou elektrárnou a před větrnou elektrárnou, kde byly měřeny hodnoty napětí a proudu na výstupních svorkách transformovny a na výstupních svorkách transformátoru větrné elektrárny. Větrná elektrárna je připojena v jedné třetině délky sítě stejně jako na obr. 8-13. Dále byla do sítě přidána druhá větrná elektrárna o stejném výkonu jako má první větrná elektrárna a zkrat byl umístěn mezi tyto zdroje. Výkon těchto zdrojů je 0,5 MVA. Tato síť je zobrazena na obr. 8-18. Pro toto srovnání byla také simulována síť se zdrojem, který je připojen vlastním vedením ke svorkám transformovny. Výkon připojeného zdroje do této sítě je také 0,5 MVA. Toto vedení bylo simulováno se stejnými parametry jako vedení sítě. Tato síť je znázorněna na obr. 8-19.



Obr. 8-18 Model sítě pro simulaci zkratu simulovaného mezi větrnými zdroji



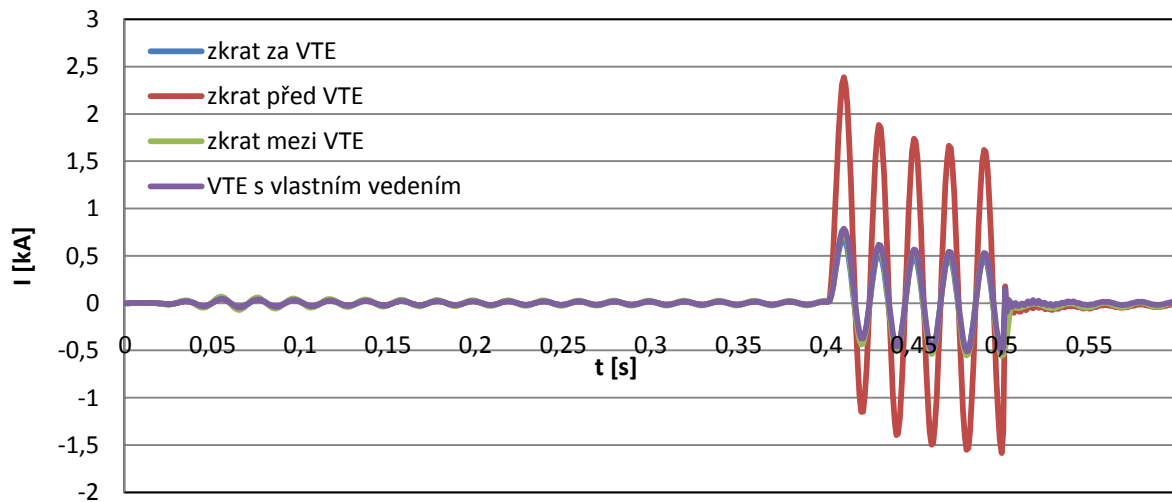
Obr. 8-19 Model sítě pro simulaci větrného zdroje připojeného vlastním vedením



Obr. 8-20 Hodnoty napětí na svorkách transformovny v závislosti na místě zkratu

Napětí na svorkách transformovny při působení zkratu nejvíce poklesne při zkratu, který se nachází před větrnou elektrárnou, v ostatních případech umístění zkratu nedosahuje pokles takovýchto hodnot. Překmit napětí nad jmenovitou hodnotu po skončení zkratu je také největší pro zkrat umístěný před větrnou elektrárnou tento překmit dosahuje hodnot okolo 27 kV, určité hodnoty překmitu dosahuje také síť s větrným zdrojem připojeným vlastním vedením. V sítích se zkratem umístěným za větrným zdrojem a mezi větrnými zdroji je překmit napětí na svorkách transformovny zanedbatelný.

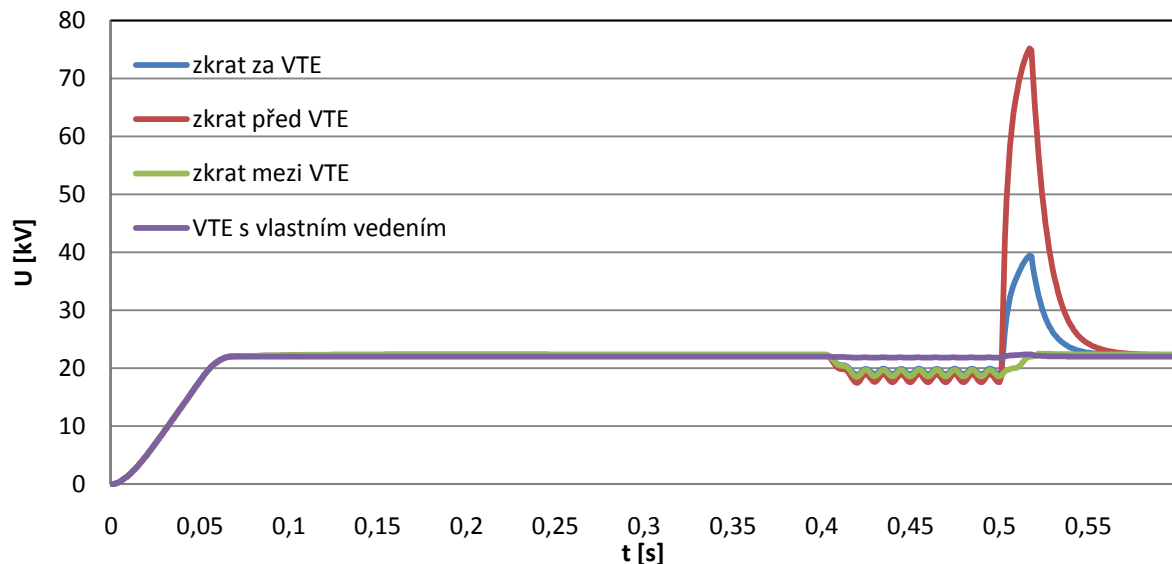
Průběh proudu postižené fáze na svorkách transformovny v závislosti na místě zkratu



Obr. 8-21 Průběh proudu postižené fáze na svorkách transformovny v závislosti na místě zkratu

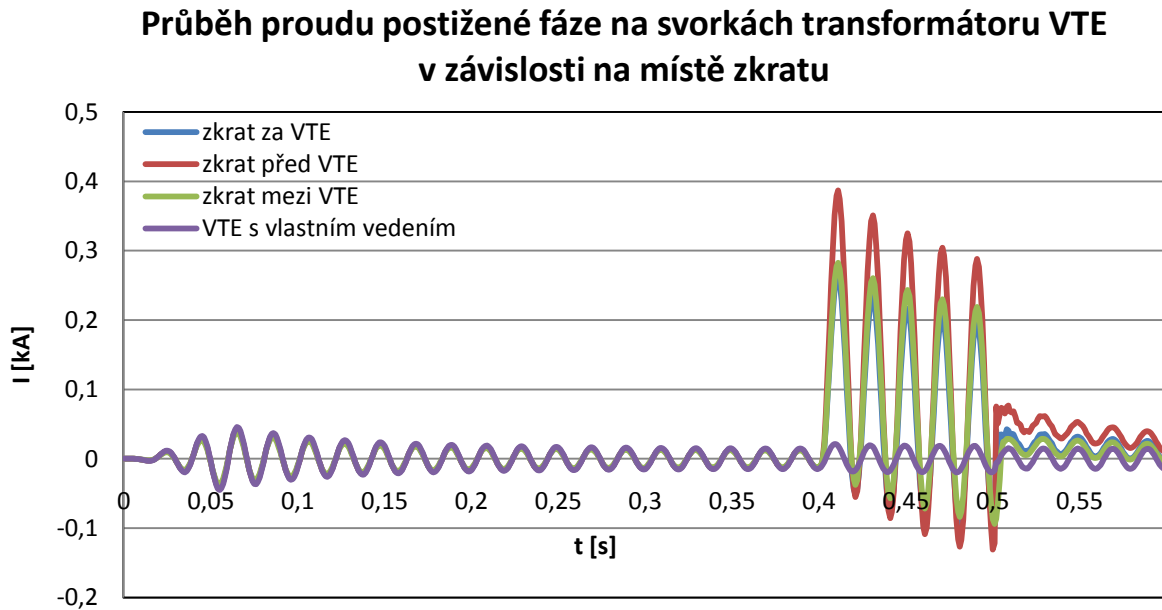
Průběh zkratového proudu postižené fáze zkratem na svorkách transformovny dosahuje nejvyšší hodnoty v síti kde je zkrat umístěn před větrným zdrojem, kde největší hodnota proudu dosahuje hodnoty přes 2 kA. V ostatních sítích je maximální hodnota zkratového proudu mnohem nižší. Tyto sítě dosahují stejných velikostí zkratového proudu.

Hodnota napětí na svorkách transformátoru VTE v závislosti na místě zkratu



Obr. 8-22 Hodnota napětí na svorkách transformátoru VTE v závislosti na místě zkratu

Napětí na svorkách transformátoru větrné elektrárny při působení zkratu poklesne u sítí se zkraty umístěnými za, před větrným zdrojem a mezi větrnými zdroji na hodnotu pod 20 kV. U sítě s větrným zdrojem připojeným vlastním vedením je pokles minimální. Krátkodobý překmit napětí nad jmenovitou hodnotu při skončení působení zkratu je největší při zkratu, který se nachází před větrným zdrojem. Tento překmit dosahuje hodnoty napětí až 75 kV. Překmit je znatelný také v síti se zkratem za větrným zdrojem. V ostatních sítích je překmit minimální.



Obr. 8-23 Průběh proudu postižené fáze na svorkách transformátoru VTE v závislosti na místě zkratu

Zkratový proud na svorkách transformátoru větrné elektrárny je největší pro síť se zkratem umístěným před větrným zdrojem, kde zkratový proud dosahuje maximální hodnoty 0,4 kA. V sítích se zkraty umístěnými za a mezi větrnými zdroji je hodnota zkratového proudu nižší. V síti, kde je větrný zdroj připojený vlastním vedením, se na svorkách transformátoru větrné elektrárny zkratový proud vůbec neobjevuje. Zkratový proud je zajištěn přes transformovnu z rozvodné soustavy 110 kV. Po skončení účinků zkratu je hodnota fázového proudu zvětšena v závislosti na velikosti zkratového proudu.

8.2.2.1 Zhodnocení výsledků simulace chování sítě při jednofázovém zemním zkratu v závislosti na místě zkratu

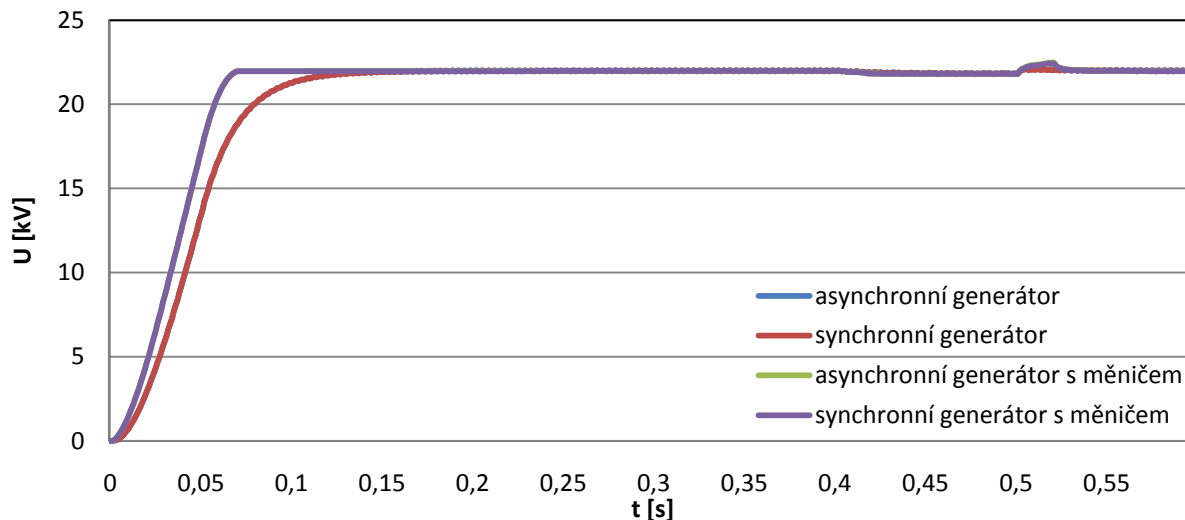
Při srovnání hodnot napětí a proudů v sítích v závislosti na místě zkratu jsou nejvyšší hodnoty dosaženy v síti se zkratem umístěným před větrnou elektrárnou, tedy mezi větrnou elektrárnou a transformovnou. Hodnoty jsou nejspíše největší v obou místech měření, protože se jedná o blízký zkrat obou těchto zdrojů. Naopak nejnižší hodnoty napětí a proudy byly naměřeny v síti, kde je větrná elektrárna připojena vlastním vedením. V této síti se v místech měření mění napětí jen málo a proudový příspěvek do zkratu jsou vykázány jen na výstupních svorkách transformovny. Síť, ve které jsou připojeny dvě větrné elektrárny a zkrat je mezi nimi, se chová stejně jako síť se zkratem za větrnou elektrárnou.

8.2.3 Simulace chování sítě při jednofázovém zemním zkratu v závislosti na typu generátoru VTE

Pro tuto simulaci byla zvolena síť s jednofázovým zemním zkratem umístěným za větrnou elektrárnou, která je znázorněna na obr. 8-13. V této síti byly použity větrné zdroje s asynchronním generátorem, synchronním generátorem, asynchronním generátorem s měničem, synchronním generátorem s měničem. V těchto sítích byly opět odečítány hodnoty napětí a proudu na výstupních svorkách transformovny a na výstupních svorkách transformátoru větrné

elektrárny. Cílem této simulace bylo porovnání vlastností těchto generátorů při blízkém zkratu v síti.

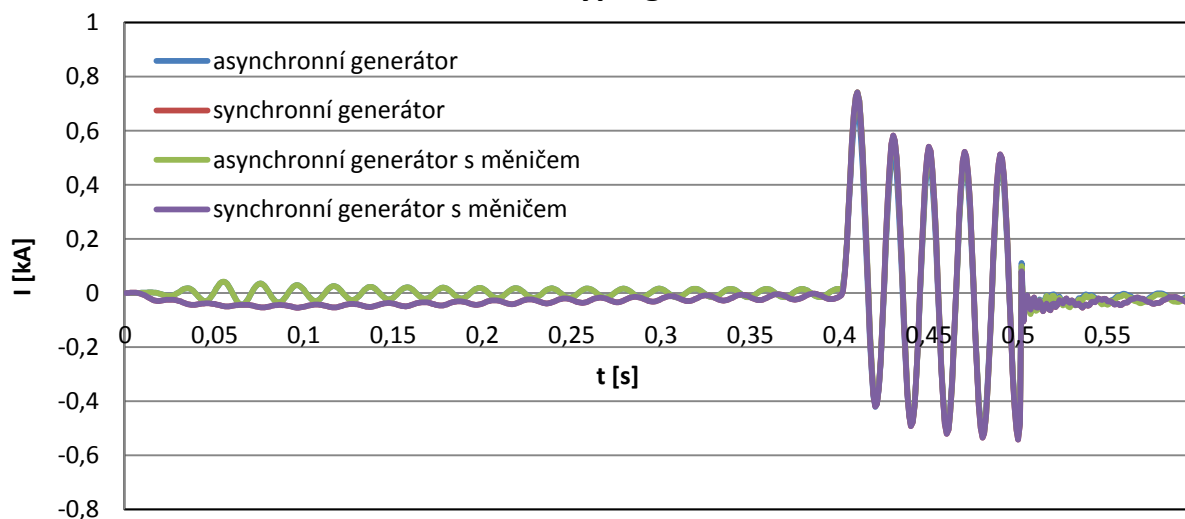
Hodnoty napětí na svorkách transformovny v závislosti na typu generátoru VTE



Obr. 8-24 Hodnota napětí na svorkách transformovny v závislosti na typu generátoru VTE

Napětí na výstupních svorkách transformovny při působení zkratu klesne více v síti, kde je připojena větrná elektrárna se synchronním generátorem i při následném krátkodobém zvýšení napětí, po skončení působení zkratu, se napětí zvýší více u sítě větrným zdrojem se synchronním generátorem. Vliv měniče, přes který jsou generátory připojeny, se v závislosti napětí na výstupních svorkách transformovny neprojeví.

Průběh proudu postižené fáze na svorkách transformovny v závislosti na typu generátoru VTE

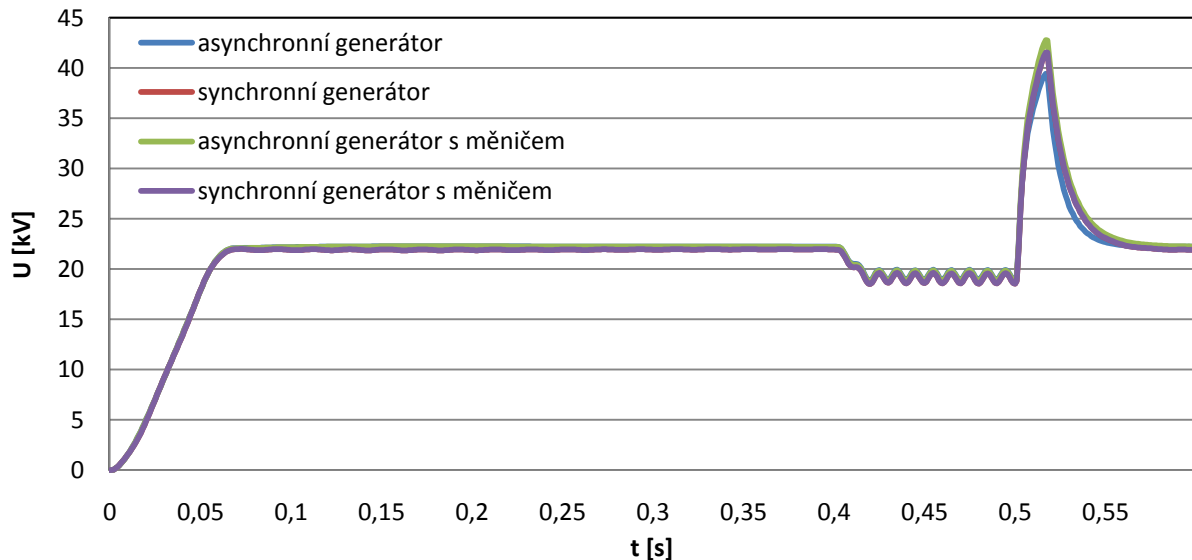


Obr. 8-25 Průběh proudu postižené fáze na svorkách transformovny v závislosti na typu generátoru VTE

Průběh zkratového proudu postižené fáze na výstupních svorkách transformovny je pro všechny simulované sítě stejný, dosahuje maximální hodnoty zkratového proudu okolo 0,75 kA.

Po skončení působení zkratu je rozdílný průběh proudu do ustáleného průběhu pro asynchronní a synchronní generátor. Připojení generátorů přes měnič nemění tento průběh proudu.

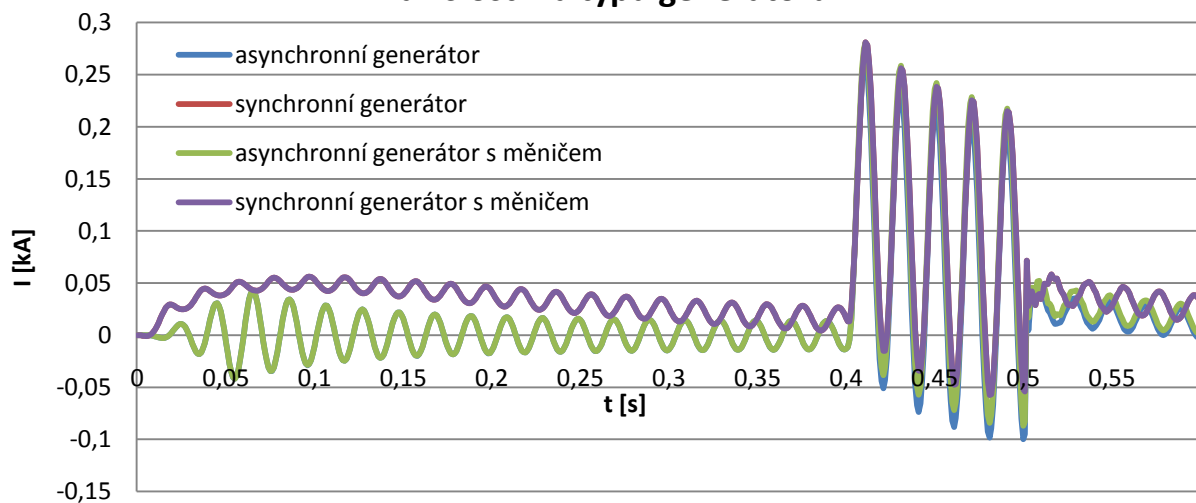
Hodnoty napětí na svorkách transformátoru VTE v závislosti na typu generátoru VTE



Obr. 8-26 Hodnota napětí na svorkách transformátoru VTE v závislosti na typu generátoru VTE

Napětí na výstupních svorkách transformátoru větrné elektrárny při působení zkratu kleslo pro všechny simulované sítě těsně pod hodnotu 20 kV. Po skončení působení zkratu dosáhla nejvyššího krátkodobého překmitu napětí nad jmenovitou hodnotu sítě s větrným zdrojem, který obsahuje asynchronní generátor připojený přes měnič. Tato hodnota je výrazně větší než u sítě s větrným zdrojem, který má asynchronní generátor bez měniče. U sítě s větrnou elektrárnou, která má synchronní generátor, není vliv měniče zřetelný.

Průběh proudu postižené fáze na svorkách transformátoru VTE v závislosti na typu generátoru VTE



Obr. 8-27 Průběh proudu postižené fáze na svorkách transformátoru VTE v závislosti na typu generátoru VTE

Průběh zkratového proudu postižené fáze na svorkách transformátoru větrné elektrárny je pro všechny sítě téměř stejně velký, v grafickém znázornění ji pouze zkresluje neustálený průběh proudu synchronního generátoru po jeho startu. V síti s větrnou elektrárnou obsahující asynchronní generátor jsou vlivem připojení přes měnič amplitudy zkratového proudu menší. V síti se synchronním generátorem nemá měnič na zkratový proud vliv.

8.2.3.1 Zhodnocení výsledků simulace chování sítě při jednofázovém zemním zkratu v závislosti na typu generátoru VTE

V simulacích sítí s různými typy generátorů a jejich připojení k síti přes měnič se v hodnotách zkratových proudů odečtených na svorkách transformovny jednotlivé příliš nelišily. Rozdílné hodnoty však tyto simulované sítě vykazovaly v odečtených hodnotách napětí na výstupních svorkách transformovny. Na výstupních svorkách transformovny se neprojevil vliv měničů. Na výstupních svorkách transformátoru větrné elektrárny při simulaci průběhů zkratového proudu se projevil vliv měniče u asynchronního generátoru zmenšením první amplitudy zkratového proudu a zvětšením překmitu napětí po skončení zkratu. Také se na výstupních svorkách transformátoru větrné elektrárny projeví rozdílné hodnoty překmitu napětí po skončení zkratu u asynchronního a synchronního generátoru. Vliv měniče se u synchronního generátoru na výstupních svorkách transformátoru větrné elektrárny neprojevil.

9 ZÁVĚR

Úkolem této práce bylo popsat problematiku obnovitelných zdrojů připojovaných do distribučních sítí. V práci byly popsány jednotlivé obnovitelné zdroje z hlediska jejich vlastností a jejich výhod či nevýhod pro jejich realizaci a vůči sítím do kterých jsou připojeny. Z hlediska vlastností obnovitelných zdrojů k distribuční síti, do které jsou zdroje připojeny, je práce zaměřena na řešení problematiky nestálé výroby těchto zdrojů, které jsou závislé na aktuální meteorologické situaci. Dále se tato práce zabývá problematikou virtuální elektrárny a inteligentní distribuční sítě, kde by bylo možné efektivněji využívat obnovitelné zdroje a tím podstatně zlepšit nároky na růst spotřeby elektrické energie. Také byly popsány přechodné jevy v distribuční síti. Náplní praktické části práce této práce byla simulace problematiky rozptýlené výroby a její chování v distribuční síti za různých okolností v simulačním prostředí PSCAD. Nejprve byla sestavena distribuční síť 22 kV, která svými parametry simuluje reálnou síť. Do této sítě byly připojené modely větrných elektráren, které byly simulovány s různými typy generátorů. Poté byla do těchto modelovaných sítí vložena porucha v podobě zkratu a byly sledovány hodnoty napětí a proudu ve vybraných místech sítě. Simulace byly provedeny v závislosti na velikosti výkonu připojených zdrojů, v závislosti na umístění zkratu v síti a v závislosti na typu generátoru větrné elektrárny.

Výsledky získané jednotlivými simulacemi byly srovnány v grafických závislostech. Ze kterých je patrné, že v simulacích sítí v závislosti na velikosti instalovaného výkonu větrné elektrárny bylo dosaženo nejvyšších hodnot zkratového proudu v síti s větrnou elektrárnou o největším výkonu. V simulacích v závislosti na umístění zkratu v síti se projevil nejnepříznivěji zkrat, který byl umístěn před větrnou elektrárnou, tedy mezi transformovnou z hladiny 110 kV a větrnou elektrárnou. V simulacích sítí s různými typy generátorů nebyl sledován při zkratu výrazný rozdíl měřených hodnot mezi synchronním a asynchronním generátorem o stejném výkonu. Vliv tyristorového měniče, přes který byly připojeny tyto generátory, byl zřetelný pouze u asynchronního generátoru.

Tyto simulace ukázaly možné hodnoty napětí a proudu v síti při různých možnostech jednofázového zemního zkratu. Na hodnoty nejhorších průběhů zkratu by měli být dimenzovány ochrany připojené v této síti, aby nedocházelo vlivem připojení rozptýlených zdrojů do distribuční sítě k poškozování jednotlivých prvků sítě.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] PTÁČEK, J.; MODLITBA, P.; ŠPAČEK, T.: *Možnosti výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů v podmínkách ČR s ohledem na závazky vůči EU*. Tábor : Konference ČK CIRED 2010, 10.11.2010. s. 9.
- [2] *Národní akční plán České republiky pro energii z obnovitelných zdrojů* [online]. Praha : Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, Červenec 2010 [cit. 2010-12-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.mpo.cz/dokument79564.html>>.
- [3] KRUŽÍK, M. Vliv rozptýlené výroby na kvalitu energie. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2009, stran 55.
- [4] Kolektiv autorů.: *Alternativní-zdroje* [online]. [cit. 2010-12-14]. Alternativní zdroje energie. Dostupné z WWW: <<http://www.alternativni-zdroje.cz/slunecni-solarni-elektrarny.htm>>.
- [5] *Eru.cz* [online]. Energetický regulační úřad, 2010 [cit. 2010-12-16]. Roční zpráva o provozu ES ČR 2009 - ERÚ. Dostupné z WWW: <http://www.eru.cz/user_data/files/statistika_elektro/rocni_zprava/2009/index.htm>.
- [6] *Eru.cz* [online]. Energetický regulační úřad, 12.11.2010 [cit. 2010-12-16]. Měsíční zpráva o provozu - září 2010. Dostupné z WWW: <http://www.eru.cz/user_data/files/statistika_elektro/mesicni_zpravy/2010/zari/page50.htm>.
- [7] Výhody a nevýhody solární energie. *Solární energie info* [online]. 2010, [cit. 2011-04-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.solarni-energie.info/vyhody.php>>.
- [8] POSPÍŠIL, J.; TUREČEK, P. Provozní zkušenosti fotovoltaických výroben v sítích nn a vn. In *Konference ČK CIRED 2009* [online]. Tábor, 10-11.11.2009 [cit. 2011-05-01]. Dostupné z WWW: <http://www.litovany.ic.cz/index_soubory/down/s4_09_09.pdf>.
- [9] Fotovoltaické solární kolektory. *Solární energie info* [online]. 2010, 1, [cit. 2011-04-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.solarni-energie.info/fotovoltaicke-solarni-panely-kolektory.php>>.
- [10] *Eru.cz* [online]. Energetický regulační úřad, 2006 [cit. 2010-12-16]. Roční zpráva o provozu ES ČR 2005 - ERÚ. Dostupné z WWW: <http://www.eru.cz/user_data/files/statistika_elektro/rocni_zprava/2005/index.htm>.
- [11] Větrné elektrárny. [cit. 2011-05-01]. Dostupné z WWW: <<http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:uAsHnjwmJaAJ:www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/489/obnovitelne-zdroje/Vetrne%2520elektrarny.pdf>>.
- [12] KOUDELKA, C. *Kogenerační jednotky* [online]. Ostrava : VŠB Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, únor 2004 [cit. 2010-12-14]. Dostupné z WWW: <http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/TZB/kogeneracni_jednotky.pdf>.
- [13] STUPAVSKÝ, V. Mikrokogenerace a trigenerace. *Biom.cz* [online]. 2010-08-09 [cit. 2010-12-14]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/mikrokogenerace-a-trigenerace>>. ISSN: 1801-2655.
- [14] MÁŠLO, K.; PISTORA, M. *Dlouhodobá dynamika soustavy s rozptýlenou výrobou včetně OZE*. Tábor : Konference ČK CIRED 2010, 9-10.11.2010. s. 22.

- [15] VELEK, V. *Zdroje se stochastickým charakterem výroby a jejich vliv na podpůrné a systémové služby*. Tábor : Konference ČK CIRED 2010, 9-10.11.2010. s. 8.
- [16] KYSNAR, F.; PROCHÁZKA, K. *Negativní dopad připojovaných OZE na DS, nápravná opatření*. Tábor : Konference ČK CIRED 2010, 9-10.11.2010. s. 6.
- [17] VELEK, V. *Zkušenosti z provozu větrného parku 21 X 2 MW Kryštofovy Hamry- III.*. Tábor : Konference ČK CIRED 2010, 9-10.11.2010. s. 11.
- [18] ŠAFAŘÍK, M. Virtuální elektrárny. *APEL* [online]. 2008, [cit. 2010-11-7]. Dostupné z WWW: <<http://www.zelenykruh.cz/dokumenty/virtualni-elektrarny-porsenna.pdf>>.
- [19] Energo. In *Energo, magazín pro zákazníky a partnery sektoru energy* [online]. Praha : AC&C Public Relations, s.r.o., 1.2010 [cit. 2010-11-7]. Dostupné z WWW: <http://www.siemens.cz/siemjetstorage/files/58344_Energo110.pdf>.
- [20] NEJEDLÝ, P. *Nazeleno* [online]. 16.3.2009 [cit. 2009-11-7]. Energie budoucnosti - virtuální elektrárny a inteligentní sítě?. Dostupné z WWW: <<http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/energie-budoucnosti-virtualni-elektrarny-a-inteligentni-site.aspx>>.
- [21] BŘEZINA, J., et al: *Tzbinfo* [online]. 3.8.2009 [cit. 2010-11-7]. V Česku vzniká první rozptýlená elektrárna. Dostupné z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/5817-v-cesku-vznika-prvni-rozptylena-elektrarna>>.
- [22] SKUPINA ČEZ. SMART GRIDS- Inteligentní distribuční síť elektřiny pro 21.století : Rozvoj a možnost uplatnění Smart Grids v České republice. In *Seminář, 25.srpna, 2009*. [s.l.] : [s.n.], 2009. s. 7.
- [23] Blažek, V.; Skala, P. Distribuce elektrické energetice, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Brno 2004, 140 stran.
- [24] MÁŠLO, K.; ŠVEJNAR, P. Stabilita elektrizační soustavy. *Vesmír* [online]. 2007, 1, [cit. 2011-05-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.vesmir.cz/clanek/stabilita-elektrizacni-soustavy>>. ISSN 1214-4029.
- [25] KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY : ČÁST V.: Bezpečnost provozu a kvalita na úrovni PS. In *PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY* [online]. 1.1.2011 [cit. 2011-05-01]. Dostupné z WWW: <http://www.ceps.cz/doc/kodex/%C4%8C%C3%A1stV_11_fin01.pdf>.
- [26] HALUZÍK, E.; WEIDINGER, L.; KRÁTKÝ, M. *Ochrany a jištění energetických zařízení*. Brno : FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 63 s.
- [27] MÁŠLO, K.; KASEMBE, A. Požadavky na větrné elektrárny z hlediska dynamické stability. In *Konference ČK CIRED 2008* [online]. Tábor : CIRED, 4-5.11.2008 [cit. 2011-05-09]. Dostupné z WWW: <http://litovany.ic.cz/index_soubory/down/s4_04_08.pdf>.
- [28] PRAVIDLA PRO PARALELNÍ PROVOZ ZDROJŮ SE SÍTÍ PROVOZOVATELE DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY : PŘÍLOHA 4. In *PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV* [online]. prosinec 2008 [cit. 2011-05-09]. Dostupné z WWW: <http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2009/ppds_priloha_4_2009.pdf>.
- [29] PSCAD [online]. [cit. 2010-12-15]. PSCAD CIRCUIT DEVELOPMENT. Dostupné z WWW: <https://pscad.com/resource/File/Library/Circuit_Development.pdf>.