

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Disertační práce

Srpen, 2016

Petr Mareček

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

Nové trendy v konceptu Smart grid

Disertační práce

Ing. Petr Mareček

Praha, Srpen, 2016

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: *Elektroenergetika*

Školitel: *prof. Ing. Josef Tlustý, CSc.*

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval prof. Ing. Josefu Tlustému, CSc. za vedení v průběhu studia, za odborné rady a pomoc, které přispěly k vytvoření této práce.

Dále bych chtěl poděkovat celému kolektivu Katedry elektroenergetiky FEL ČVUT v Praze za spolupráci, bez které by tato práce nemohla vzniknout.

V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu během studia.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

V Praze dne 30. 8. 2016

Petr Mareček

Abstrakt

Práce se zaměřuje na nové trendy v konceptu smart grids. Jelikož je elektřina v současné době nepostradatelná a strategická komodita, má jakýkoli výpadek její dodávky většího rozsahu velký dopad na její odběratele. Spolehlivá a bezpečná dodávka je v popředí obecného zájmu a v dlouhodobém hledisku se snažíme vyvarovat všech poruch a výpadků. Základy současných distribučních sítí jsou již mnoho desetiletí založeny na neměnných principech, kde je znakem tradiční řetězec - výroba, přenos, distribuce a spotřeba elektrické energie. Tento základ se začíná v současné době měnit a to z důvodu růstu nových trendů (rozvoj decentralizovaných zdrojů elektrické energie, elektromobilita, aj.).

Práce popisuje základní principy konceptu včetně analýzy aktuálních legislativních opatření platných v ČR a podporujících právě nové trendy ve smart grids.

Dále jsou popsány eventuální problémy s připojováním decentralizovaných zdrojů elektrické energie do distribučních sítí a jejich dopad na zkratové proudy a chránění v těchto sítích.

Další část práce se věnuje možným přístupům k výpočtu chodu sítě při uvažování nových trendů - využitím pravděpodobnostního přístupu a následného výstupu ve formě statistických parametrů. Takto navržený přístup byl demonstrován ve formě případové studie, která hodnotí vliv nových trendů na distribuční soustavu a jejich dopad na hlavní ukazatele – jako je průběh napětí, proudů a ztrát. Závěry, které lze učinit na základě provedené studie jsou takové, že pro dimenzování distribučních soustav, je pravděpodobnostní přístup možností, jak se co nejefektivněji vyrovnat se vzrůstajícím trendem v oblasti decentralizovaných zdrojů a elektromobility.

Přínos práce lze spatřovat v komplexním pohledu na danou problematiku a zejména v zaměření na chránění v distribuční soustavě a na plánování obnovy a rekonstrukce současných distribučních sítí s ohledem na nové trendy v konceptu smart grids (tedy na budoucí vzrůstající počet decentralizovaných zdrojů elektrické energie spolu se vzrůstajícím počtem elektromobilů).

Klíčová slova

Smart network, smart grid, chránění, Monte Carlo, chod sítě, elektromobilita

Abstract

This thesis is focused on the new trends in a smart grids concept. The electricity is currently essential and strategic commodity where whatever bigger outage of supply has an impact on the customers. The reliable and secure electricity supply is at the forefront of public interest. We try to avoid any failure or outage in a long-term perspective. The basis of current distribution grids are based on unchanging principles for many decades. The main sign is traditional chain of generation, transmission, distribution and usage of electricity. This basis is changing in these days due to the influence of the new trends (development in the field of decentralised supply of electrical energy, electromobility, etc.).

The thesis give a description of basic principles of a concept including analysis of current legislation measures in the Czech republic with focus on these new trends.

Further are described the possible issues with connecting decentralized power sources to the power system. As well as their impact on the short currents and protection in distribution system.

Next part of the work is focused on the new method with regard to the load flow calculation assuming new trends in power system. Using the probabilistic approach and the output of calculation in the form of statistic parameters. This applied approach is demonstrated in case study. This study is evaluating the impact of all new trends on distribution system with regards to the main indicators, such as voltage, current and losses. The conclusions made on top of this case study are that for dimensioning of distribution system is the probabilistic approach in load flow calculation good approach. It gives the opportunity how to deal with the increasing trend on the field with decentralised power sources and electromobility.

The benefit of this work is complex view on the problematic with regards to protection in distribution system and on the development of modernization and reconstruction of current distribution system focusing on the new trends in a smart grids concept.

Key words

Smart network, smart grid, protection, Monte Carlo, load flow, elektromobility

Seznam použitých pojmů a zkratek

AC	Alternating current (střídavý proud)
ASEK	Aktualizovaná státní energetická koncepce
AMI	Automatic Metering Infrastructure
AMR	Automatic Meter Reading
CNG	Compressed Natural Gas (stlačený zemní plyn)
ČR	Česká republika
DC	Direct current (stejnoseměrný proud)
DS	Distribuční soustava
EV	Elektrické vozidlo
EP	Evropský parlament
ES	Elektrizační soustava
EU	Evropská unie
FVE	Fotovoltaika
LPG	Liquefied Petroleum Gas (zkapalněný ropný plyn)
MC	Monte Carlo
NAP CM	Národní akční plán čisté mobility
NAP SG	Národní akční plán pro chytré sítě
NN	Nízké napětí
PS	Přenosová soustava
SG	Smart grids
TUV	Teplá užitková voda
V2G	Vehicle-to-grid
V2H	Vehicle-to-home

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	15
2.1	Smart grid	15
2.2	Nové trendy v konceptu	17
2.3	Topologie elektrizační soustavy	20
2.4	Legislativní rámec v ČR	25
2.4.1	Státní energetická koncepce	26
2.4.2	Národní akční plán – Smart grids	27
2.4.3	Národní akční plán čisté mobility	28
2.5	Řešené projekty v ČR a zahraničí	28
3	CHRÁNĚNÍ V DISTRIBUČNÍCH SÍTÍCH	39
3.1	Decentralizovaná výroba	39
3.2	Chránění distribučních sítí	40
3.3	Příspěvek decentralizované výroby ke zkratovým proudům	41
3.4	Vliv velikosti a polohy rozptýleného zdroje na zkratový příspěvek sítě	43
3.5	Kabelové vedení	45
3.6	Vliv impedancí soustavy a vedení	45
3.7	Rozptýlené zdroje s výkonovými měniči	49
3.8	Vliv polohy zkratu	50
3.9	Možné problémy a řešení nastavení ochran	53
3.10	Dílčí závěry	53
4	PROVOZ DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY S UVAŽOVÁNÍM NOVÝCH TRENDŮ	55
4.1	Metoda Monte Carlo	55
4.2	Využití pravděpodobnostního přístupu při výpočtech	60
4.3	Případová studie na připojení decentrálních zdrojů a elektromobilů do DS	70
4.3.1	Vstupní data	70

4.3.2	Přehled simulovaných scénářů	74
4.3.3	Výstupy simulace	78
4.4	Dílčí závěry.....	94
5	ZÁVĚR.....	95
6	LITERATURA	97
7	SEZNAM PUBLIKACÍ.....	101
7.1	Publikace vztahující se k tématu disertační práce	101
7.2	Publikace ostatní.....	102
7.3	Ohlasy.....	103
8	PŘÍLOHY	104
8.1	Průběhy simulovaných scénářů	104
8.2	Další výstupy ze simulace	111

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Stávající elektrizační soustava.....	16
Obrázek 2 - Elektrizační soustava na bázi smart grids.....	16
Obrázek 3 - Princip self-healingu a jeho aplikace do distribuční soustavy	18
Obrázek 4 - Vývojové stupně vedoucí ke smart grids	19
Obrázek 5 – Paprsková síť	21
Obrázek 6 – Okružní síť	22
Obrázek 7 – Dvoupaprsková síť.....	23
Obrázek 8 – Zjednodušená mřížová síť	23
Obrázek 9 – Mřížová síť	24
Obrázek 10 - Koncept V2G (Vehicle to grid)	31
Obrázek 11 - Koncept V2H (Vehicle to home).....	32
Obrázek 12 – Vztahy mezi ochranou a chráněným systémem.....	40
Obrázek 13 – Síť a decentralizovaný zdroj a jejich příspěvky ke zkratovému proudu.....	41
Obrázek 14 – Obvodářský ekvivalent sítě z předchozího obrázku	41
Obrázek 15 - – Theveninův ekvivalent obvodu z předchozího obrázku.....	42
Obrázek 16 – Celkový zkratový proud	43
Obrázek 17 – Zkratový příspěvek rozptýleného generátoru	44
Obrázek 18 – Zkratový příspěvek sítě.....	44
Obrázek 19 – Zkratový příspěvek sítě – kabelové vedení	45
Obrázek 20 – Zkratový příspěvek sítě – S _{ks} = 100 MVA	46
Obrázek 21 – Zkratový příspěvek sítě – S _{ks} = 500 MVA	46
Obrázek 22 – Zkratový příspěvek sítě – S _{ks} = 1200 MVA	47
Obrázek 23 – Zkratový příspěvek sítě – vedení 30 km.....	48
Obrázek 24 – Závislost maximální poklesu příspěvku sítě na jejím zkratovém výkonu.....	48
Obrázek 25 – Zkratový příspěvek rozptýleného generátoru 10 MW – vliv S _{ks}	49
Obrázek 26 – Zkratový příspěvek sítě – vliv S _{ks}	49
Obrázek 27 – Zkratový příspěvek sítě – zdroj s výkonovým měničem	50
Obrázek 28 – Změny polohy zkratu	51
Obrázek 29 – Zkratový příspěvek rozptýleného generátoru – vliv polohy zkratu.....	51
Obrázek 30 – Celkový zkratový proud – vliv polohy zkratu	52
Obrázek 31 – Zkratový příspěvek sítě – vliv polohy zkratu	52
Obrázek 32 - Dodávka z fotovoltaiky	61

Obrázek 33 - Nabíjení elektromobilu.....	61
Obrázek 34 - Standardní odběr.....	61
Obrázek 35 - Výsledná hustota pravděpodobnosti za odběrné místo	62
Obrázek 36 - Příklad kombinace jednotlivých vlivů v jednom uzlu.....	63
Obrázek 37 - Příklad okružní nn sítě s pěti uzly	64
Obrázek 38 - Úbytky napětí v síti nn v závislosti na stavu vypínače.....	65
Obrázek 39 - Algoritmus výpočtu	65
Obrázek 40 - Příklad okružní nn sítě s pěti uzly	67
Obrázek 41 - Hustota pravděpodobnosti odchylky napětí v uzlu 1	68
Obrázek 42 - Hustota pravděpodobnosti odchylky napětí v uzlu 2	68
Obrázek 43 - Hustota pravděpodobnosti odchylky napětí v uzlu 3	68
Obrázek 44 - Hustota pravděpodobnosti odchylky napětí v uzlu 4	68
Obrázek 45 - Průběh penalizační funkce.....	69
Obrázek 46 - Simulovaná síť nízkého napětí	71
Obrázek 47 - Příklad simulovaného scénáře elektromobility - léto	74
Obrázek 48 - Příklad simulovaného scénáře elektromobility - zima	75
Obrázek 49 - Příklad simulovaného scénáře fotovoltaický systém - léto	75
Obrázek 50 - Příklad simulovaného scénáře fotovoltaický systém - zima.....	76
Obrázek 51 - Příklad simulovaného scénáře klimatizace – léto.....	77
Obrázek 52 - Příklad simulovaného scénáře tepelné čerpadlo – léto.....	77
Obrázek 53 - Příklad simulovaného scénáře tepelné čerpadlo – zima.....	77
Obrázek 54 - Příklad simulovaného scénáře kogenerační jednotka – zima.....	78
Obrázek 55 - Průběh napětí při zapojení FVE při penetraci 25 % a rovnoměrném rozdělení K_{Max} 0,2.....	80
Obrázek 56 - Průběh proudů při zapojení FVE při penetraci 25 % a rovnoměrném rozdělení K_{Max} 0,2.....	80
Obrázek 57 - Průběh napětí při zapojení FVE při penetraci 25 % a rovnoměrném rozdělení K_{Max} 1	81
Obrázek 58 - Průběh proudů při zapojení FVE při penetraci 25 % a rovnoměrném rozdělení K_{Max} 1	81
Obrázek 59 - Průběh napětí při zapojení FVE při penetraci 50 % a rovnoměrném rozdělení K_{Max} 0,2.....	82
Obrázek 60 - Průběh proudů při zapojení FVE při penetraci 50 % a rovnoměrném rozdělení K_{Max} 0,2.....	82

Obrázek 61 - Průběh napětí při zapojení FVE při penetraci 50 % a rovnoměrném rozdělení K_{Max} 1	83
Obrázek 62 - Průběh proudů při zapojení FVE při penetraci 50 % a rovnoměrném rozdělení K_{Max} 1	83
Obrázek 63 - Průběh napětí při zapojení elektromobilů při penetraci 25 %	84
Obrázek 64 - Průběh proudů při zapojení elektromobilů při penetraci 25 %	85
Obrázek 65 - Průběh napětí při zapojení elektromobilů při penetraci 50 %	85
Obrázek 66 - Průběh proudů při zapojení elektromobilů při penetraci 50 %	86
Obrázek 67 - Průběh napětí při kombinaci více možných scénářů - varianta 1	87
Obrázek 68 - Průběh proudů při kombinaci více možných scénářů - varianta 1	88
Obrázek 69 - Průběh napětí při kombinaci více možných scénářů - varianta 2	88
Obrázek 70 - Průběh proudů při kombinaci více možných scénářů - varianta 2	89
Obrázek 71 - Průběh napětí při kombinaci více možných scénářů - varianta 3	89
Obrázek 72 - Průběh proudů při kombinaci více možných scénářů - varianta 3	90
Obrázek 73 - Průběh napětí při kombinaci více možných scénářů - varianta 4	90
Obrázek 74 - Průběh proudů při kombinaci více možných scénářů - varianta 4	91
Obrázek 75 - Ztráty v simulované síti za jeden týden provozu – léto	92
Obrázek 76 - Ztráty v simulované síti za jeden týden provozu - zima	93

1 Úvod

Elektrina se stala celospolečenským aspektem, kde jakákoli změna má obrovský dopad na společnost. Nejen tím, že v danou chvíli nemáme energii, ale vytváří se i socio-ekonomický efekt, který má dopad na velkou část obyvatelstva. Spolehlivá a bezpečná dodávka se tak dostává do popředí obecného zájmu a v dlouhodobém hledisku se snažíme vyvarovat všech poruch a výpadků.

Základy současných distribučních sítí jsou již mnoho desetiletí založeny na neměnných principech. Hlavním znakem je tradiční řetězec - výroba, přenos, distribuce a spotřeba elektrické energie, v němž obvykle převažuje jednosměrný tok elektrické energie od výrobců směrem ke spotřebitelům.

V současnosti však dochází ke změnám jak ve výrobě, tak i spotřebě a je tedy nutné na tyto změny reagovat. Lze s určitostí předpokládat rostoucí trend podílu decentralizovaných zdrojů v distribučních soustavách. Integrace těchto zdrojů do soustav s sebou přináší nové požadavky na jejich řízení, chránění a celkové uspořádání distribučního systému. Dalším novým trendem, který se začíná v distribučních soustavách projevovat, je vzrůstající podíl vozidel na elektrický pohon – elektromobilů. Z tohoto důvodu se začíná vyvíjet nová koncepce distribučního systému označována pojmem smart networks nebo smart grids.

O aktuálnosti tématu svědčí i současné aktivity na poli legislativy v ČR – konkrétně národní akční plán pro chytré sítě (NAP SG) a národní akční plán čisté mobility (NAP CM), kde se přímo zmiňuje, že je třeba na nové trendy v decentralizaci výroby i řízení sítí spolu s rozšiřujícím se počtem elektromobilů, adekvátně reagovat, včetně potřeb nově vzniklé situace zkoumat a hodnotit.

Vzhledem k široké oblasti, kterým nepochybně téma smart grids je, se práce zaměřuje především na dvě dílčí oblasti, a to na oblast decentralizované výroby a elektromobility. Dále se práce zabývá připojením těchto zdrojů do distribuční soustavy, především s ohledem na provoz a chránění a dále také metodikou výpočtu chodu sítí s ohledem na možné provozní stavy distribučních soustav s uvažováním nových trendů.

Cíle práce

Práce v první řadě analyzuje současný stav problematiky smart grids. Představí základní principy a pojmy v konceptu včetně analýzy legislativních opatření v České republice, podporující smart grid.

Jeden z cílů je analyzovat, upozornit na rizika a problémy, které mohou nastat při připojování decentralizovaných zdrojů elektrické energie do radiálních větví distribuční soustavy. Takto připojené zdroje mají vliv na celkový zkratový proud v těchto soustavách. V práci navrhuji řešení a doporučení, jak k takovýmto situacím přistupovat.

Dalším cílem je poté zhodnocení dopadů nových trendů (tedy většího podílu decentralizovaných zdrojů spolu s rozvojem elektromobility) na distribuční soustavu. V práci popisuje nový způsob výpočtu chodu sítě s využitím pravděpodobnostního rozložení. Tento způsob přístupu je poté ověřen na případové studii, která zároveň ilustruje vliv nových trendů a jejich dopadů při provozu distribučních soustav.

2 Současný stav řešené problematiky

V této kapitole se věnuji zhodnocení aktuálního stavu problematiky v České republice a ve světě. Jsou popsány nejdůležitější pojmy, technologie a přístupy k problematice smart grids. Také je zhodnocen stav na legislativní úrovni, protože se díky takovéto podpoře docílí růstu a nasazení technologií spjatých s konceptem sítí smart grids.

2.1 Smart grid

Nejprve je důležité formulovat, co to vlastně smart grid, příp. smart network je.

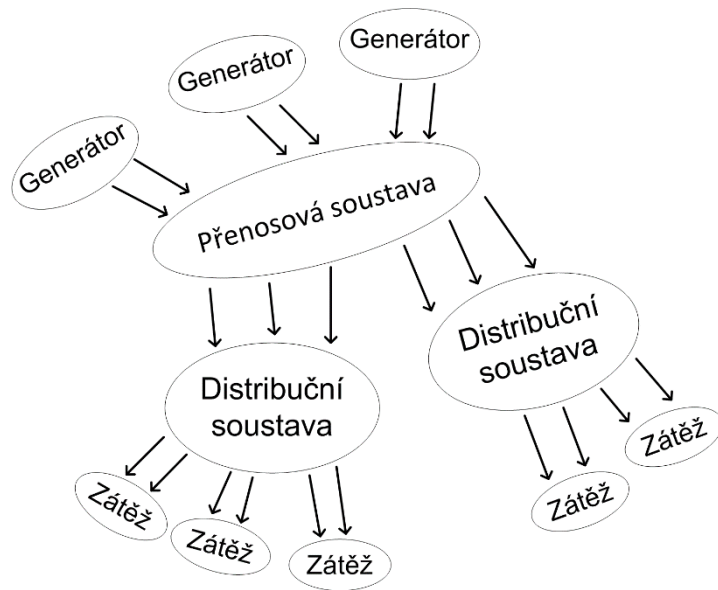
Existuje mnoho definic, které takovéto sítě popisují. Jedna z nich říká, že jsou to elektrické sítě, které jsou schopny efektivně propojit chování a akce všech uživatelů k nim připojených – výrobce, spotřebitele, spotřebitele s vlastní výrobou – k zajištění ekonomicky efektivní, udržitelné energetické soustavy provozované s malými ztrátami a vysokou spolehlivostí dodávky a bezpečnosti.[1]

Řešení, které považuje inteligentní sítě nové generace s vyšší přidanou a užitnou hodnotou, kde vlastní provedení, ať již vzorových, nebo komerčních řešení, tzn. koncepce výstavby zdrojů, architektura a technologie sítí, není rozhodující.[2]

Další definice může být, že jde o inteligentní, samočinně se regulující elektrické sítě, schopné přenášet vyrobenou energii z jakéhokoli zdroje centralizované i decentralizované výroby elektrické energie až ke koncovému zákazníkovi.

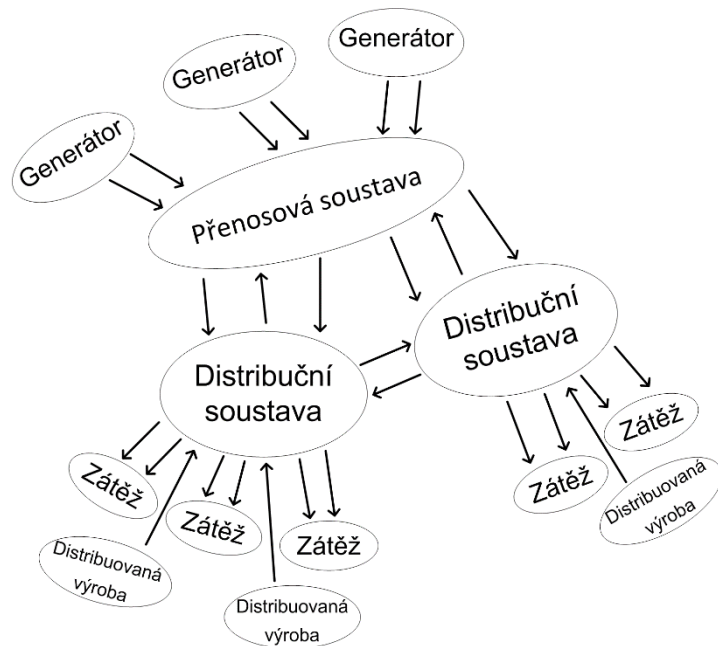
Nejvhodnější formulace definice sítí smart grids vhodná pro potřeby této práce zní: Jedná se o elektrizační soustavu, která je schopná pojmout velké množství decentralizovaných zdrojů elektrické energie (jako je fotovoltaika, kogenerace, větrné elektrárny, aj.) spolu s novými odběry elektrické energie, především elektromobily (ale také např. klimatizacemi). Tato soustava musí být schopna zajistit dodávku elektřiny ve stanovené kvalitě v daném čase, pokud možno bez přerušení dodávky spolu se zajištěním bezpečnosti provozu (tedy správně navržený systém ochrany).

Rozdíl mezi sítí smart grids a klasickým modelem sítě jak ho známe dnes je vidět na následujících obrázcích. Klasické schéma (obr. 1) začíná u výroby elektrické energie, dále pokračuje přes přenosovou soustavu (v ČR 400, 220 a vybraná vedení 110 kV) a distribuční soustavu (110, 35, 22, 6 a 0,4 kV) do míst spotřeby energie, jako jsou průmyslové objekty, administrativní a nákupní centra a rodinné sídla.[3]



Obrázek 1 - Stávající elektrizační soustava

Naopak, stavba budoucích sítí se nebude držet klasického schématu, ale využije se principu počítačové sítě. Tedy, bude jedno, jak a kam se spotřebitel či výrobce zapojí a vše se bude řídit automaticky. Tím se zajistí větší spolehlivost dodávky elektřiny, protože při výpadku jedné části se bude moci dodávka přepojit, čímž se bude dodávat z jiné strany (jako u počítačových sítí, dojde-li k výpadku jednoho routeru, nedojde k přerušení spojení, ale signál se pošle přes jiné routery).



Obrázek 2 - Elektrizační soustava na bázi smart grids

Smart grids umožní maximální využití elektrické energie z jakéhokoli výrobního zdroje, jsou schopny sofistikovaně reagovat na možné nesouměrné parametry, které se při provozu distribuční soustavy mohou vyskytnout. Jedná se zejména o špatné napěťové poměry, přetížení sítě, nesouměrné zatížení třífázové soustavy nebo případný deficit výkonu.[4][5]

2.2 Nové trendy v konceptu

Virtuální elektrárna

Virtuální elektrárnou se obecně myslí skupina decentralizovaných zdrojů energie, které mohou být obnovitelné i neobnovitelné (jedná se např. o kogenerační jednotky, fotovoltaiky, větrné a malé vodní elektrárny, apod.) propojené jednotným řídicím systémem. Instalovaný výkon virtuální elektrárny je součet jednotlivých výkonů zdrojů, které ji tvoří.[6]

Z technického hlediska se jedná o využití dostupných technologií jak výroby, tak jejího řízení, přičemž jejím hlavním parametrem je spotřeba, tj. řízení podle spotřeby.

Virtuální elektrárny mají potenciál konkurence ke klasickým elektrárnám.

Role tohoto konceptu:

- Je klíčovým nástrojem managementu strany poptávky (demand side management)
- Zvyšuje efektivnost systému zásobování energií
- Napomáhá zvyšovat soběstačnost v zásobování energií

Přínosem tohoto konceptu je:

- Celkově nižší investiční náklady než nové klasické elektrárny
- Bezemisní nebo téměř bezemisní zdroje
- Vytvářejí místní pracovní místa
- Multiplikační ekonomický efekt – prostředky vynakládané na energie zůstávají z podstatné části v regionu

Každý přínos má i záporné stránky:

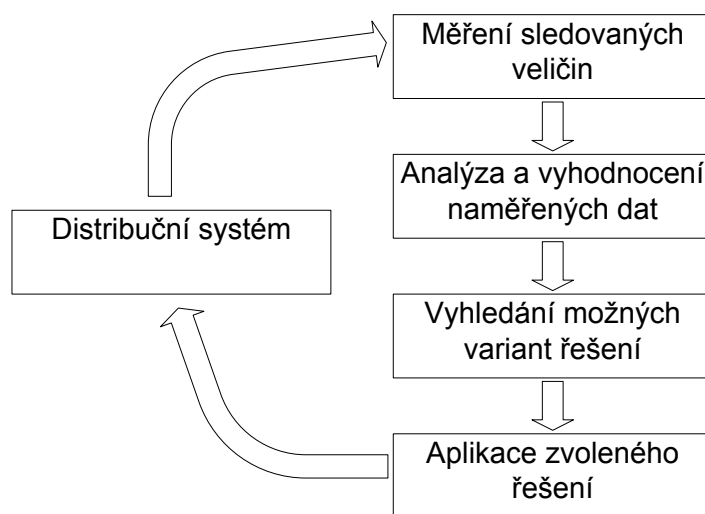
- Sluneční a větrné zdroje jsou zdroje s nespojitou a obtížně regulovatelnou výrobou
- Převaha těchto zdrojů v energetických sítích je rizikem pro spolehlivou dodávku elektrické energie

- Výroba energie na straně spotřebitele vyvolává problémy integrace do sítí, řízení a regulace na straně distributorů energie

Self-healing

Sítě smart grids by v budoucnu měly zajistit inteligentní bezpečné kontrolní mechanismy, které dokáží danou energetickou síť opravit v případě poruchy nebo problému. Úkolem by mělo být rychle postižený úsek izolovat a samo-opravit porušenou část (případně poruchu pomocí náhradní cesty obejít). Šlo by o prevenci proti blackoutům a zlepšení spolehlivosti sítí s minimálním zásahem lidského faktoru.

Pro správné fungování self-healingu je nutnou prerekvizitou brzké varování o možných problémech. Tím je míněno, že musí být zpracována analýza stability sítě, čímž se odhalí slabé prvky, jejichž porucha má největší vliv na tuto síť (sledovanými veličinami jsou především frekvence a napětí). Dnes se běžně dělají analýzy statického stavu sítě, ale je nutné se zaměřit na dynamické vlastnosti. I když v modelech zavádíme náhodné veličiny a nové poznatky (teorie chaosu, náhodné funkce simulující provozní problémy), doposud neumíme vytvořit dynamický model celé sítě, díky složitosti všech těchto jevů.[7]



Obrázek 3 - Princip self-healingu a jeho aplikace do distribuční soustavy

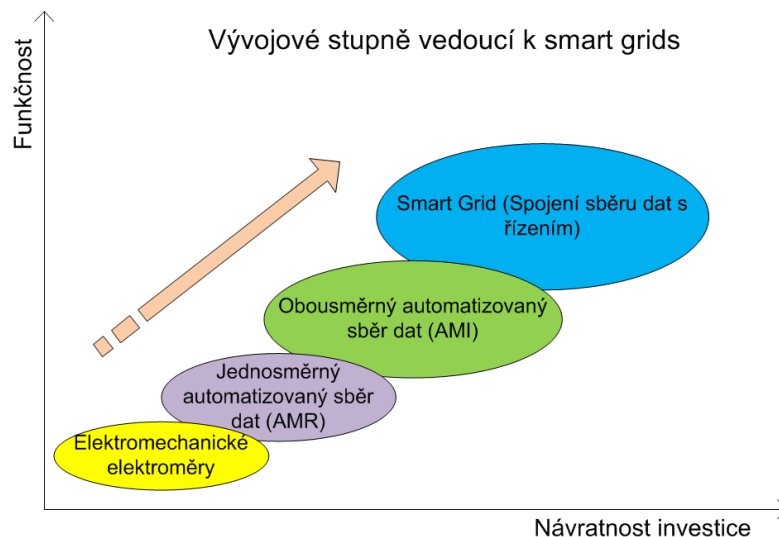
Na obrázku č. 3 je zobrazeno, jak by měl tzv. princip self-healing fungovat. Na prvním stupni je měření vybraných veličin a hned poté následuje analýza těchto dat. Pokud je vše v pořádku, neprovádí se žádný zásah do systému, ale pokud se vyhodnocená data liší od správných, tak přichází na řadu řešení ve formě vyhledání nového scénáře (např. nové přestavení sítě, rozpojení některé části, apod.). Když se najde nové řešení, tak se ihned aplikuje na distribuční síť a začíná se opět od začátku měřením.

Následující tři body popisují, jakým přínosem by měl být self-healing v distribučních sítích, především jde o:

- zmenšení ztrát v distribučních sítích, zlepšit efektivnost a ekonomičnost jejich provozu
- zlepšit výkonovou bilanci jednotlivých vývodů z distribučních stanic, zabránit přetěžování linek
- rychlé obnovení normálního operačního stavu po poruše, zvýšení spolehlivosti normálního provozního stavu (nebude docházet k výpadkům)

Automatické měření

Na obrázku č. 4 je vidět jak docházelo a dochází k vývoji smart grid sítě. Na svislé ose je vynesena funkčnost jednotlivých prvků a na ose horizontální jejich cena. Na začátku se pracovalo s elektromechanickými elektroměry, které jsou z dnešního pohledu levné, ale neperspektivní (vzhledem k jejich nemožné automatizaci). Pracovník distribuční společnosti musí obcházet každý elektroměr a odečítat hodnotu. Na dalším stupni je jednosměrný automatizovaný sběr dat (AMR), který je v současné době předstupněm obousměrného sběru dat (AMI), na kterém se pracuje a již se zavádí do praxe. Náklady jsou zde vyšší, neboť je třeba zaplatit vývoj takového elektroměru, ale budoucím ziskem je úspora lidské činnosti na odečet.[8]



Obrázek 4 - Vývojové stupně vedoucí ke smart grids

Posledním stupněm by poté měla být síť smart grid, která v sobě spojí sběr dat a zároveň řízení sítě a spotřeby). V této části je uvažováno právě o zapojení zákazníků do systému hromadného dálkového ovládání tím, že si nakoupí chytré elektrospotřebiče a jejich řízení bude ponecháno

na chytrém elektroměru, který v případech, kdy to půjde (myčka nádobí, pračka či sušička) dohlédne na jejich spuštění v nízkém tarifu (menším odběru v rámci sítě). Tím dojde k rozložení spotřeby i do míst, kde je přebytek energie čímž se zároveň i sníží špička odběru.

Chytré měření přinese několik nových možností pro obchodníky. Nabídnou se nové tarifní struktury pro potřeby nové technologie odběrů. Tím se myslí větší diverzifikace nabídky tarifů, kde nebude základní dělení na vysoký tarif a nízký tarif, ale odstupňuje se to postupně, tak aby mohlo být výhodné nepotřebnou spotřebu (sušička, pračka apod.) přesunout do jiných časů. Tvorba těchto tarifů je na distributorech. Dalším benefitem je, že vzroste konkurence na trhu produktů mezi obchodníky s elektrickou energií. To se může projevit na slevách v domácnostech a průmyslových podnicích. Přínosem pro spotřebitele bude zobrazení spotřeby a její vývoj na smart home aplikacích, domácích displejích. Přínos je, že se i zákazník může zapojit na regulaci spotřeby různým spínáním spotřebičů při výhodných tarifech.[9][10]

2.3 Topologie elektrizační soustavy

Elektrizační soustava v ČR je složena z generátorů, přenosové, distribuční soustavy a spotřebiči.

Přenosová soustava (PS) je vzájemně propojený soubor vedení a zařízení 400 kV, 220 kV a vybraných vedení a zařízení 110 kV, sloužící pro zajištění přenosu elektřiny pro celé území ČR a propojení s elektrizačními soustavami sousedních států, včetně systémů měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky. Přenosová soustava je zřizována a provozována ve veřejném zájmu [11]. V ČR PS provozuje společnost ČEPS, a.s.

Distribuční soustava (DS) je vzájemně propojený soubor vedení a zařízení 110 kV (s výjimkou vybraných vedení a zařízení 110 kV, které jsou součástí PS) a vedení a zařízení o napěťové hladině 35 kV, 25 kV, 22 kV, 10 kV, 6 kV, 3 kV, 1,5 kV a 0,4/0,23 kV, sloužící k zajištění distribuce elektřiny na vymezeném území ČR, včetně systémů měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky. DS jsou zřizovány a provozovány ve veřejném zájmu. Posláním DS je bezpečně a hospodárně zásobovat odběratele elektrické energie v požadovaném množství a kvalitě v daném čase a poskytovat distribuční služby uvnitř i vně soustavy provozovatele DS. Kromě toho zajišťuje systémové a podpůrné služby na úrovni DS. [11] V ČR jsou tři provozovatelé DS – společnosti ČEZ Distribuce, a.s., E.ON Distribuce, a.s. a PŘEdistribuce, a.s.

Provozovatel DS je fyzická nebo právnická osoba, která je držitelem licence na distribuci elektřiny. Na částech vyjmutých z vymezeného území provozovatele velké regionální DS

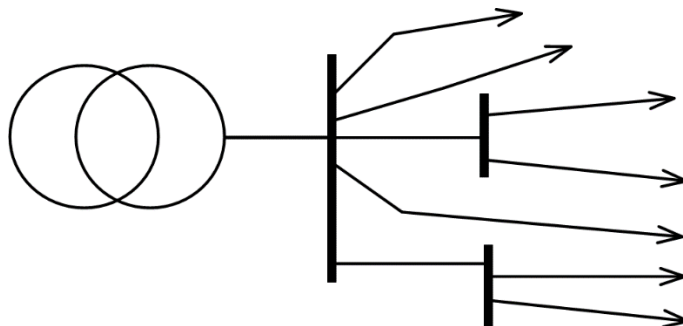
mohou působit provozovatelé lokálních DS s vlastním vymezeným územím. Provozovatel DS odpovídá za její bezpečný a spolehlivý provoz způsobem přiměřeným ochraně životního prostředí a za její rozvoj. Činí tak prostřednictvím svého technického dispečinku provozovatele DS (pokud ho zřídil) a svých provozních a rozvojových útvarů. Provozovatel DS je povinen na vymezeném území na základě uzavřených smluv umožnit distribuci elektřiny, připojit k DS každého a umožnit distribuci elektřiny každému, kdo o to požádá a splňuje podmínky dané energetickým zákonem (458/2000 Sb.), jeho prováděcími vyhláškami a pravidly provozování distribuční soustavy. Místo a způsob připojení k DS se určí tak, aby nedošlo k přetížení nebo překročení parametrů žádného prvku sítě.[11]

Přenosová soustava tvoří nadřazenou hlavní síť, do které jsou vyvedeny velké zdroje elektrické energie (elektrárny). Na PS navazuje distribuční soustava, pracující na různých napěťových úrovních a úkolem je zásobovat velkoodběratele (z DS o vyšší napěťové hladině) i maloodběratele z nízké napěťové hladiny. Do DS jsou také vyvedeny zdroje elektrické energie o nižších výkonech (nejčastěji decentralizovaná výroba).

Distribuční síť

Paprsková síť

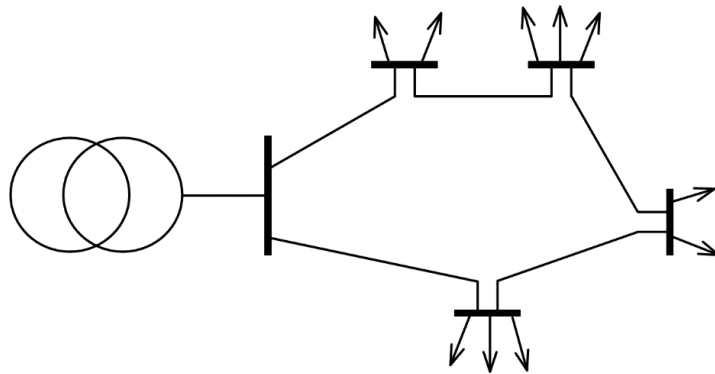
V tomto typu sítě je každý vývod (paprsek) od transformátoru samostatný a nelze je vzájemně spojovat. Tento druh rozvodu je nejjednodušší a zároveň i nejlevnější. Nevýhodou je nižší stupeň zajištění dodávky elektrické energie. Při poruše je celý vývod odepnut a všechny odběry jsou bez napájení. Tento druh sítě se nejčastěji využívá v obcích a malých městech. Schéma takového vývodu je uvedeno na obrázku 5.[12]



Obrázek 5 – Paprsková síť

Okružní síť

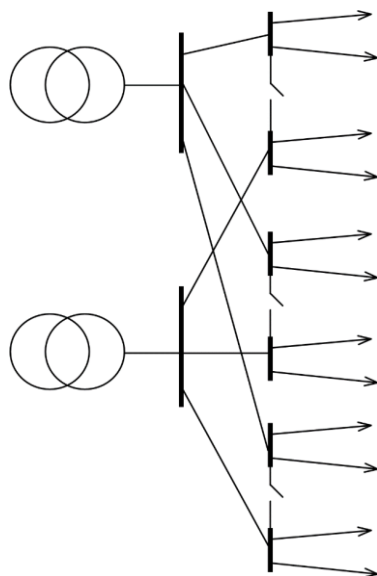
Tento typ sítě se může provozovat jako sepnutou nebo rozepnutou. Jednotlivé paprsky (nebo polosmyčky) jsou vedeny tak, že je lze vždy sepnout do uzavřených smyček – provozují se tedy nejčastěji jako paprskové sítě. Pakliže dojde při provozu k poruše, lze postižený vývod přepnout na vývod sousední (manuálně nebo automaticky), čímž je dodávka elektrické energie zajištěna z druhé strany. Provoz sítí tohoto typu je nenáročný. Nicméně tyto sítě jsou dražší než paprskové z důvodu potřeby vzájemného propojení. Příklad tohoto druhu sítě je uveden na obrázku 6.[13][14]



Obrázek 6 – Okružní síť

Dvoupaprsková síť

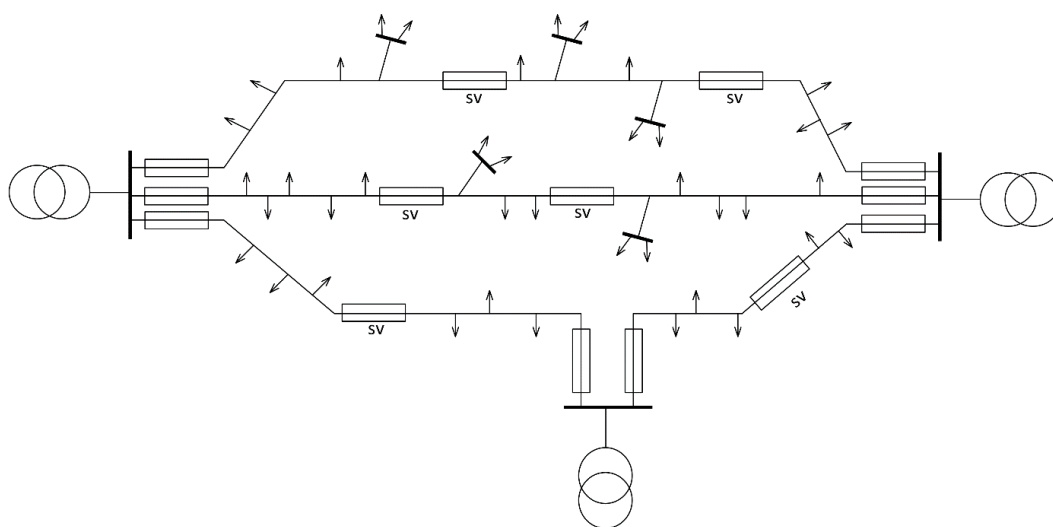
Obdobná síť paprskové, pouze s rozdílem, že každý rozváděč je napájen ze dvou míst. Tento napáječ je podélně rozdělen, aby nedocházelo k paralelnímu chodu transformátorů. V případě výpadku napájení z jednoho místa, dojde k sepnutí podélného rozdělení a zabezpečení dodávky z druhého místa. Příklad takové sítě je zobrazen na obrázku 7.



Obrázek 7 – Dvoupaprsková síť

Zjednodušená mřížová síť

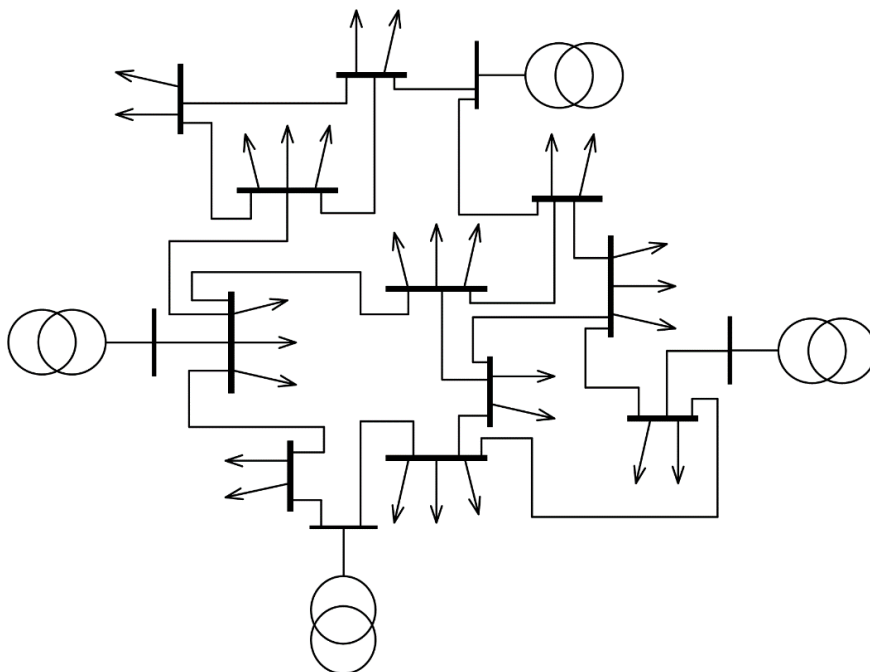
Takovýto typ sítě lze vytvořit pouze za předpokladu, že máme alespoň dva pracující transformátory napájecí tuto síť. Tyto transformátory jsou spojeny navzájem vedeními o větších průřezech a jsou jištěny výkonovými (hlavními) pojistkami, které jsou umístěny na vývodech od transformátorů. V dalších vybraných místech vedení jsou umístěny tzv. pojistky slabé vazby (sv). Pokud se na vedení vyskytne porucha nebo zkrat, zareaguje nejdříve pojistka slabé vazby a vzápětí pojistka příslušného vývodu. Tím dojde pouze k vypnutí vedení, na kterém je porucha a zbytek sítě zůstává i nadále v provozu. Poměr jmenovitých proudů hlavních pojistek k pojistkám slabé vazby bývá 2:1 (vychází ze zkoušek a zkušeností z provozu). Příklad takovéto sítě je uveden na obrázku 8.



Obrázek 8 – Zjednodušená mřížová síť

Klasická mřížová síť

Tento typ sítě, který je uveden na obrázku 9, se nejčastěji využívá ve velkých městech (v literatuře se uvádí, že se využívají tam, kde je měrná hustota 1 MW/km a více [11]), kde je kabelová síť a napájení je zajištěno alespoň třemi až pěti různými transformátory. Kabelové vedení se spojuje do uzlů na křižovatkách ulic v rozvodných skříních s pojistkami. Využívají se pojistky s pomalou charakteristikou a ve všech skříních se shodnou jmenovitou hodnotou. Vyskytne-li se porucha mezi dvěma uzly, dojde k rozdělení proudů a pojistky s pomalou charakteristikou se na úseku, kde je porucha, přetaví za kratší čas a ostatní pojistky zůstanou neporušeny. Tím se vyřadí z provozu pouze ta část vývodu, kde nastala porucha, zbytek sítě zůstává v provozu.[4][15]



Obrázek 9 – Mřížová síť

Při poruše na vysokonapěťové straně (vn) transformátoru, teče do místa zkratu proud nejen z vn strany ale i ze strany nízkého napětí (nn), což je nevhodný stav, proto se na nn stranu umísťují vypínače se směrovým relé, které v případě poruchy zamezí toku proudu z nn na vn stranu tím, že vyšlou signál k vypnutí vadného napáječe, který je zároveň vypnut i ze strany vn. Mřížová síť je však i nadále zásobována z jiných transformátorů a pracuje bez poruchy.

Tento typ sítě má několik výhod. Využívá se lépe transformátorů i vedení, kde zatížení se rozloží rovnoměrněji. Je zde menší úbytek napětí a menší kolísání napětí. Vysoká spolehlivost

zásobování. Nevýhody poté jsou vyšší náklady na výstavbu a nutnost pravidelné kontroly pojistkových skříní a dále vyšší zkratové proudy.

V následující části je rozebrán současný stav problematiky, který je popsán v odborné literatuře.

V článku [16] je rozveden současný stav na poli centrální energetiky a možnosti její decentralizace. Článek pojednává o proveditelnosti změn s ohledem na distribuční síť. Autor článku tvrdí, že současnou síť 110 kV lze v jistém ohledu považovat za základ smart networks. Důvodem je, že do této napěťové hladiny jsou připojeny zdroje elektrické energie, odběratelé, je zde obousměrný tok elektrické energie a zároveň vysoká míra automatizace spojená s měřením zatížení a stavu soustavy spolu s dálkovým ovládním ochranných prvků. Dle článku je ale výzvou toto řešení přenést do nižších napěťových hladin. Autor článku zároveň popisuje, že současná stav, kdy jedno standardní řešení se využívá ve všech částech dané soustavy, přestane dostačovat při implementaci řešení smart grids. Což s sebou přinese nepochybně vyšší náklady včetně rizika implementace nových neozkoušených technologií, která ale budou muset splnit základní podmínku a to bezpečný a nepřerušenu dodávku elektrické energie zákazníkům v požadované kvalitě v daném čase.

V článku [17] se autoři zabývají strukturou distribučních sítí se zaměřením na jejich výhody a nevýhody a vliv na ukazatele kvality dodávky elektrické energie. Autoři navrhuji několik možných provozních schémat DS, ovšem bez praktických výpočtů.

Článek [2] také pojednává o sítích smart network. Autor se zmiňuje o nových výzvách, kterým čelí a budou čelit DS – integrace decentralizovaných zdrojů elektrické energie, jejich vliv na soustavu (z pohledu bezpečnosti i z pohledu efektivity) a dále rozebírá současný stav na poli chytrých měření – od technických požadavků po legislativní stav.

2.4 Legislativní rámec v ČR

Následující kapitoly popisují aktuální legislativní rámec, vymezující smart network v české republice. Jde především o popis legislativy, která má za cíl pomoci implementaci návrhů, budoucích změn a řešení.

Další informace lze nalézt např. v [18], kde je rozebírán vliv legislativy na rozvoj smart grids. Evropská legislativa spolu s návaznou českou legislativou vytváří pozitivní efekt na investice do vědy a výzkumu nových trendů elektroenergetiky, jimiž chytré sítě bezesporu jsou. V článku je dále i přehled aktuálně řešeného projektu společnosti ČEZ nazývaný E/mobilita.

2.4.1 Státní energetická koncepce

Státní energetická koncepce je dokument, který stanovuje strategické cíle a priority státu v energetickém hospodářství s výhledem na 30 let. Tento dokument odráží zodpovědnost státu za stabilní energetickou politiku, efektivní užití energie, které nebude ohrožovat životní prostředí. Koncepce byla schválena vládou 10. 3. 2004 a ukotvena je v §3 zákona 406/2000Sb. o hospodaření energií.

Naplňování cílů se vyhodnocuje jednou za tři roky Ministerstvem průmyslu a obchodu, výsledky se předkládají vládě, která koncepci na základě doporučení ministerstva aktualizuje.

Aktualizace Státní energetické koncepce v roce 2015

V květnu 2015 vláda ČR schválila aktualizovanou Státní energetickou koncepci (ASEK) na následujících 25 let (tedy do roku 2040). V kapitole koncepce energetiky ČR se uvádí, že cílovým stavem by měla být: *„Obnova a posílení distribučních soustav (DS) a implementace řídicích systémů inteligentních sítí, zajišťující připojení a řízení provozu distribuovaných zdrojů, lokální akumulace, rozvoj tepelných čerpadel a efektivní řízení spotřeby. Zapojení do evropských programů podpory rozvoje inteligentních sítí.“* [19]

Z tohoto cíle ASEK byl vytvořen zároveň i strategický cíl: *„Zajistit do r. 2030 v distribučních soustavách obnovu a rozvoj prostředků pro dálkové řízení spotřeby, distribuované výroby a akumulace energie na bázi principů inteligentní sítě a inteligentního měření s cílem optimálního využití a spolehlivosti provozu distribučních soustav, a to v návaznosti na výstupy projektu národního akčního plánu inteligentních sítí (NAP SG).“* [19]

Dále se v ASEK uvádí, že provozovatelé DS by měla zajistit obnovu a rozvoj DS tak, aby bylo umožněno připojení a provoz všech nových distribuovaných zdrojů za stanovených podmínek, dále aby byly uspokojeny požadavky na straně spotřeby (tedy podpora rozvoje např. elektromobility, místní akumulace, aj.) a to při podílu decentralizovaných zdrojů v DS nad 50 % celkového instalovaného výkonu v ČR. A to včetně přípravy na ostrovní provozy pro řešení nouzových stavů, udržení dostatečné výše regulačního výkonu. Podporovat by se měla decentralizovaná výroba a akumulace.

Rozvoj distribučních soustav

Dle ASEK by mělo být zajištěna vysoká spolehlivost provozu distribučních soustav v souladu s evropskými standardy. Rozvoj DS v souladu s růstem konečné spotřeby elektřiny v domácnostech a rozvoj distribučních soustav v oblasti decentralizovaného řízení lokálních

soustav a integrace distribuovaných zdrojů (řízení malých domácích a lokálních zdrojů, selektivní řízení skupin spotřebičů, řízení akumulacních možností elektromobilů, virtuální elektrárny atd.).

2.4.2 Národní akční plán – Smart grids

Ministerstvo průmyslu a obchodu zpracovalo Národní akční plán pro chytré sítě (NAP SG), který vychází z priorit Aktualizace státní energetické koncepce ČR (ASEK). Dokument byl připraven pro období 2015 – 2020 s výhledem do roku 2040. Dokument by měl být každé tři roky aktualizován.

Důvodem, proč byl tento dokument vydán, byla potřeba zajistit, aby Česká republika byla připravena na nové trendy a vývoj, a umožnila občanům a průmyslovým podnikům spolehlivě a bezpečně využívat možností, které jim technologický pokrok v energetice stále ve větší míře nabízí.

Zavedení a využití inteligentních sítí bude v blízké budoucnosti nezbytnou součástí zajištění spolehlivého provozu elektrizační soustavy. NAP SG předpokládá postupné zavádění těchto sítí a dalších opatření v několika etapách. Očekává se nárůst výroby elektrické energie především z malých decentralizovaných zdrojů včetně obnovitelných zdrojů. Tyto zdroje budou v převážné většině připojeny do distribuční soustavy a tak bude nutné připravit nový způsob řízení včetně odpovídající infrastruktury a nových technologií. Využívání prostředí chytrých sítí bude také nezbytné pro rozvoj trhu s elektřinou a pro jeho využívání aktivními spotřebiteli, a také spotřebiteli — výrobci. [1]

Dle NAP SG rozvoj výroby elektřiny z decentralizovaných zdrojů může přispět k optimalizaci využití distribuční sítě díky fyzické blízkosti výroby a spotřeby (v tomtéž odběrném místě, nebo v téže lokalitě), případně zlepšit řízení spotřeby v odběrném místě v závislosti na okamžité schopnosti připojeného zdroje elektřiny. Zapojení inteligentních sítí umožní zapojit spotřebu i distribuovanou výrobu elektřiny do decentralizovaného řízení a regulace soustavy. Stejně tak je nutné zajistit kvalitní integraci výroby z malých zdrojů připojených do distribuční sítě, typicky malých solárních elektráren na střeších rodinných domů, které částečně pokrývají spotřebu domácností a u kterých se díky technologickému pokroku, lepší dostupnosti a snižování administrativních bariér očekává v příštích letech další rozvoj.

Odhadované náklady na realizaci NAP SG se pohybují do roku 2025 mezi 24 – 43 miliardami korun. Do roku 2040 by to mělo být až 155 miliard Kč.

2.4.3 Národní akční plán čisté mobility

Spolu s předchozím NAP SG ministerstvo průmyslu a obchodu zpracovalo národní akční plán čisté mobility (NAP CM), jehož cílem je podpořit rozvoj alternativních paliv v dopravě (především elektromobilů a vozů na CNG a LPG). Cílem je, aby po roce 2030 byla elektromobilita vnímána jako standardní technologie.[20]

NAP CM v souladu s evropskou směrnicí EP 2014/94/ES má za cíl rozvíjet příslušnou infrastrukturu potřebnou pro dosažení vytyčených cílů – tedy zajistit podporu a výstavbu dobíjecích stanic. Tento cíl je popsán ve strategickém cíli – rozvoj elektromobility. Do roku 2030 by v ČR mělo být v provozu 250 tisíc elektromobilů. Napomoci tomu by měla rozvinutá infrastruktura, tedy cílem je investiční podpora na vybudování nabíjecích stanic, příprava jednotných metodik pro výstavbu takovýchto stanic a dále např. povinné kvóty pro developery na dobíjecí stanice. Dále se podpora zaměří na uživatele elektromobilů – nabídne se jim několik benefitů spojených s vlastnictvím elektromobilu. Např. využití vyhrazených pruhů ve městech, parkování zdarma na vyhrazených zónách nebo parkovištích, aj.

NAP CM předpokládá, že s rozvojem elektromobility a zahušťováním sítě dobíjecích stanic mohou narůstat problémy v distribuční soustavě – hlavně na úrovni nízkého napětí. Při současném nabíjení více vozidel se mohou objevit problémy. Proto se má věnovat zvýšená pozornost při plánování a rozvoji distribuční soustavy, zejména tam, kde je předpokládáno s velkým rozvojem (vlastnictvím) elektromobility.

2.5 Řešené projekty v ČR a zahraničí

V České republice existuje několik projektů, mající za cíl ověřit některé z výše uvedených vlastností smart grids. Nejčastěji se jedná o projekty zaměřené na automatické měření nebo na elektromobilitu.

Elektromobilita

Pojem elektromobilita je téma, které v sobě zahrnuje trvale udržitelný rozvoj dopravy, infrastruktury a energetiky. V širším kontextu může být chápána jako jeden z kroků k novému způsobu řízení energetických sítí – smart grids.[21][22]

Zákazník, který bere ohled na životní prostředí i ekonomiku provozu dopravního prostředku a chce využít nabídky některých alternativních vozidel, má na výběr z několika variant. Jednou z variant je použití hybridního vozidla (kombinace spalovacího motoru a elektromotoru). Další možností je pokusit se vyhledat vozidlo na alternativní pohon – např. palivový článek. Poslední možností je vybrat si z nabídky elektromobilů.

Druhá možnost má velká omezení – takovéto výrobky jsou prozatím v různých fázích rozpracovanosti a jejich reálné využití není příliš velké. Pokud by zákazník dal přednost hybridnímu vozidlu, má v současné době možnost výběru ze širokého spektra výrobců a technologií (někde je reálné nejprve využívat elektrického pohonu a poté spalovacího, jinde je elektrický pohon zapojen tak, aby pomáhal při rozjezdech a zpomalování – tedy spíše jako rekuperátor energie). Ovšem stále přetrvává nevýhoda – nákup pohonných hmot a jistá zmenšená produkce skleníkových plynů.[23]

Třetí varianta tedy vyznívá nejvíce ve prospěch požadovaných vlastností. V současné době prakticky každý velký výrobce automobilů má ve svém výrobním portfoliu zahrnut elektromobil.

Infrastruktura

Pro větší rozvoj elektromobility je nutné vybudovat rozsáhlou infrastrukturu pro dobíjení elektromobilů, a to jak městskou, tak meziměstskou. Většina prodávaných elektrických vozidel má konektor pro oba typy nabíjení – standardní (nabíjení na plnou kapacitu trvá více než 5 hodin) a rychlé (nabití na 80% kapacity do 15-20 minut). Standardní nabíjení je vhodné pro uživatele, kteří mají elektromobil doma a tímto způsobem ho připojují přes noc. Případně pro uživatele, kterým jejich zaměstnavatel umožní nabíjení v pracovní době.

Výstavba nových nabíjecích stanic není závislá na vybudování rozsáhlých úprav elektrické sítě. Stanice mohou být postaveny všude tam, kde to je prostorově možné a je k dispozici elektrická přípojka. V budoucím rozvoji meziměstských nabíjecích stanic je možné využít všech míst podél cest, která jsou elektrifikována (současné benzínové pumpy, fastfoody, odpočívadla, aj.).

Bezdrátové nabíjení je jedna z možných alternativ, jak dobít elektromobil bez nutnosti vyhledání elektrické zástrčky a napájecího kabelu. Již dnes se uživatelé setkávají s obdobným dobíjením chytrých telefonů. Princip je jednoduchý – dvě magneticky spojené cívky (jedna primární – vysílací, druhá sekundární – přijímací), kde primární je napájena vysokofrekvenčním signálem v řádech MHz, vytvoří oscilující magnetické pole, které reaguje s druhou cívkou, ve které se začne indukovat napětí. Důležité je, aby systém pracoval při rezonanční frekvenci obou cívek.

Nabíjecí stanice

Nabíjecí stanice jsou většinou umístěné na veřejném místě bez dohledu obsluhy. Základním požadavkem je snadná obsluha při nabíjení elektromobilu a dalším, neméně důležitým, ochrana před vandaly.

Základní dobíjecí stanice jsou většinou osazeny jednofázovou zásuvkou na 230 V a nabíjecím proudem (10 – 16 A) především pro dlouhodobé pomalé nabíjení. Druhá zásuvka je poté vhodná pro rychlodobíjení – zde ale ještě nedošlo k dohodě a větší standardizaci. Proto se uživatel může setkat s různými typy. Nabíjecí stojan dále obsahuje elektroměr, systém pro identifikaci klienta a uživatelské rozhraní. Dnes se základní naměřená data a identifikační údaje dají spravovat na dálku pomocí chytrých telefonů nebo přímého přístupu přes počítač.

Typy nabíjení

Nabíjecí systémy jsou charakterizovány mezinárodní normou IEC 62196. Základem této normy je taková bezpečnost, že nelze připojit výkon, dokud není konektor nabíjecího stojanu zapojen v elektromobilu a zároveň je elektromobil imobilizován, dokud je konektor připojen.

V normě jsou dále popsány čtyři nabíjecí módy.

Mód 1 popisuje pomalé nabíjení při napětí pro jednofázové instalace ne větším než 250 V (pro třífázový systém 480 V) a proud maximálně 16 A. Tento mód nevyžaduje žádné speciální piny v nabíjecí hlavici a v automobilu pro řízení a komunikaci.

Mód 2 popisuje také pomalé nabíjení při napětí max. 250 V (480 V) a proudy do 32 A. Zde je nutný řídicí pin v elektromobilu i v nabíjecí hlavici a dále je vyžadována ochrana osob proti úrazu elektrickým proudem zapojená mezi elektromobil a zásuvku.

Mód 3 vyžaduje řídicí a komunikační piny na obou připojených stranách a deaktivaci nabíjecí zásuvky, není-li připojen elektromobil. Nabíjeno může být proudem 32 – 250 A. Tento způsob připojení může být v pozdějších stádiích rozvoje využit pro komunikaci v sítích typu smart grids.

Zmíněné tři módy vyžadují mít usměrňovací jednotku zabudovanou v elektromobilu.

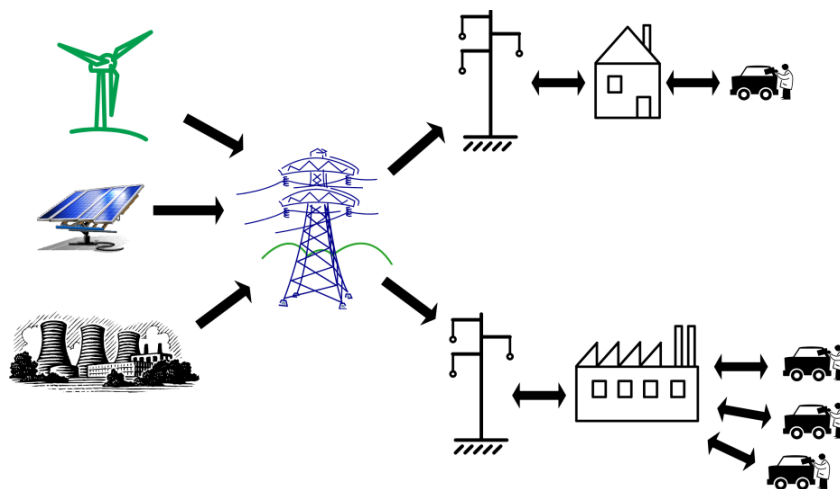
Mód 4 popisuje dobíjecí systém s výkonným usměrňovačem umístěným v dobíjecí stanici připojené ke střídavé síti. Připojením elektromobilu dojde ke komunikaci s nabíjecí jednotkou a elektromobil může být rychle dobíjen proudy až do hladiny 400 A (1 000 V DC). Tento mód vyžaduje řadu řídicích a komunikačních pinů.

Koncepty využívající elektromobily

Koncept vehicle-to-grid (V2G)

Tento koncept je založen na obousměrné komunikaci a spolupráci elektromobilu a elektrické sítě. Tedy baterie je nejen nabíjena, ale je jí zároveň využíváno jako zásobárny energie, kterou je možné vrátit zpět do sítě.

Nosnou myšlenkou je, že elektromobil je parkován po 90 % času vlastnictví takového vozu. Kapacitu baterií zaparkovaných elektromobilů může využít provozovatel distribuční soustavy či jiný účastník trhu. V tomto konceptu není prozatím řešena legislativní stránka, ale jsou zde ukázány ekonomické výhody. Majitel takového elektromobilu nebude šetřit jen na nákladech za palivo a zmenšenou údržbu, ale mohl by dostávat i bonus, že nevyužívanou baterii elektromobilu bude distributor moci v případě potřeby využít.[24][25]



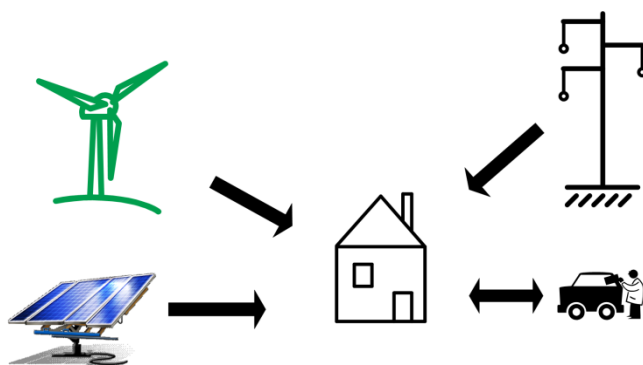
Obrázek 10 - Koncept V2G (Vehicle to grid)

V energetice lze využít tento koncept k pokrytí špičkových výkonů, provozních rezerv a jako podpora při provozu obnovitelných zdrojů. Výkupní ceny (od špičkových zdrojů) jsou ve špičkách vysoké, proto by zde zájem ze strany trhu mohl být. V oblasti rezerv je možné využít tohoto konceptu, dojde-li k částečnému či celkovému selhání sítě. Poslední oblastí využití konceptu V2G je pokrytí okamžité nadprodukce z obnovitelných zdrojů, kdy baterie jsou schopné částečně pokrýt vzniklé fluktuace.[26]

Vozidlo připravené pro koncept V2G je nutné vybavit měřicím systémem, komunikační jednotkou a rozšířeným uživatelským prostředím. Měřicí systém je potřebný pro rozlišení, v jakých intervalech a pro jaké účely bylo energie využito, případně, kdy byl akumulátor dobíjen. Komunikace je nutná pro spojení elektromobilu s operátorem elektrické sítě. Ten tak může vyslat požadavek na volné vozy k využití akumulátorů. Uživatelské rozhraní je nástroj pro vlastníka vozu, který zde plánuje využití vozu (např. minimální stav nabití akumulátoru), zobrazuje si stav nabití baterie, případně výkonové toky mezi vozem a sítí.

Technologická část musí zahrnovat dvoucestný výkonový měnič pro transformaci napájení do baterie a z ní nebo využít možnosti bezdrátového nabíjení a reverzovat tuto funkci (vhodné pro velké parkovací plochy).

Projekt vhodný pro domácnost – V2H (vehicle-to-home) je zjednodušený koncept V2G. Jde o zapojení elektromobilu do domácí sítě spolu s malým obnovitelným zdrojem (fotovoltaický panel, větrná turbína). V takovém zmenšeném projektu odpadají problémy s vracením energie do sítě. V případě technologie nutné k tomuto konceptu je třeba mít řídicí systém, který zajistí směr toku výkonu mezi baterií a domácí sítí, případně synchronizaci k distribuční síti ve chvíli, kdy baterie nemá dostatek výkonu k pokrytí poptávky. Uživatel si může nastavit více parametrů, podle kterých se systém rozhoduje – např. důraz na cenu elektrické energie, plánované využití vozu, aj.



Obrázek 11 - Koncept V2H (Vehicle to home)

Přínosy Elektromobility

Nejprve je vhodné se zmínit, proč je vhodné podporovat elektromobilitu. V první řadě jde o odpovědnost vůči životnímu prostředí a k naplňování myšlenky trvale udržitelného rozvoje. Pilotními projekty a různými osvětovými akcemi pro veřejnost se povědomí o alternativních dopravních prostředcích předává široké laické veřejnosti.

Elektromobil má řadu zjevných výhod – především neprodukuje žádné lokální emise. Další výhodou je bezhlučnost a téměř bezúdržbovost pohonného soustrojí. V horizontu několika let je žádoucí pokusit se rozšířit elektrovozy především do státních a městských firem. Například automobily provádějící úklid, odvoz odpadu, rozvoz pošty apod.

Z energetického hlediska je stále očekávaná výhoda pro vyrovnaní diagramu zatížení. Elektromobily by se měly pokusit vykrýt poklesy odběru elektrické energie během nočních hodin (předpokládá se, že velká většina vozidel by v tuto dobu byla připojena a dobíjela se pro

následné využití přes den. V době výroby elektrické energie se baterie budou nabíjet (udržovat v nabitém stavu) z obnovitelných zdrojů. Když nebudou tyto zdroje produkovat elektřinu, mohou se baterie nabíjet z veřejné elektrické soustavy. Další využití je v době špiček, kdy se tyto nabíjecí stanice mohou podílet na částečném krytí zvýšené lokální spotřeby, a nebude nutné spouštět záskokový špičkový zdroj. V horizontu několika let se tato cesta může ukázat, jako správný krok, který povede k vytvoření silných základů konceptu smart grid (přes lokálně vytvořené mikrogrid sítě).

Ve světě již jednotlivé vlády reagovaly a nabízejí výhody a úlevy při koupi elektrovozu. Koncept sítí smart grids by měl zajistit vzájemnou komunikaci všech zařízení (elektromobil - nabíjecí stanice – elektrická soustava – operátor trhu, apod.). Nevýhodou zůstává vyšší pořizovací cena takového vozidla, omezený dojezd a malý počet dobíjecích stanic (omezená kapacita současně nabíjených vozů).

Elektromobilita v ČR a její rozvoj je teprve na začátku. Mezi několik hlavních důvodů patří:[20]

- Cena elektromobilu, která je vyšší ve srovnání s automobily s konvenčními motory (do budoucna je předpoklad snižování ceny baterií a tedy i elektromobilů).
- Omezená nabídka vozidel (omezená nabídka modelů různých segmentů v masovém prodeji souvisí s tím, že český trh není pro hlavní hráče tak atraktivní, a lze očekávat zpoždění ve srovnání se západní Evropou).
- Absence dobíjecí infrastruktury (malá hustota dobíjecí sítě, zejména v oblasti rychlodobíjení).
- Absence státních pobídek (např. dotací, daňových úlev, aj.)

Každá z distribučních společností působících na území ČR má projekt zaměřen na elektromobilitu. Společnost ČEZ v rámci projektu /E/Mobilita buduje a rozvíjí síť veřejných dobíjecích stanic spolu s možností vybudování takové stanice u zákazníka doma. Spolu s tím dokonce společnost nabízí zvláštní tarif pro zákazníky vlastníci elektromobil.

Společnost E.ON se také zaměřuje na budování infrastruktury a vývoji rychlonabíjecích stanic pro elektromobily včetně poradenství. Společnost Pražská energetika, a.s. se taktéž věnuje propagaci elektromobility. Buduje vlastní síť nabíjecích stanic, kde lze dobíjet elektromobily, jízdní elektrokola a elektrické skútry. Společnost také nabízí možnost vybudovat nabíjecí stanici u zákazníka a nabídnout mu vlastní distribuční tarif.

V [27] je popsán pohled provozovatele distribuční soustavy na elektromobilitu. Autor nejprve shrnuje důvody, jak (legislativně) a proč (ekologie, konstrukce vozu, finanční aspekty) se elektromobilita podporuje. Článek se zaměřuje na ekonomické aspekty nákupu a provozu vozidel na elektrický pohon. Autor správně předvídá, že provozovatel distribuční soustavy bude muset předvídat a přispívat k vývoji a rozvoji celé infrastruktury.

Automatické měření

Jak bylo popsáno dříve, jde o jeden z vývojových kroků k celkové koncepci smart grids sítí. V ČR jde především o projekty zaměřené na ověření různých technologií a přístupů při nasazování automatických měřáků. Zřejmě nejznámějším projektem je smart region Vrchlabí provozovaný společností ČEZ, a.s. (jde o součást celoevropského projektu Grid4EU). Tento projekt se zaměřuje na instalaci inteligentních elektroměrů (jeden z prvků smart networks) umožňujících dálkový odečet dat, možnost využití nových tarifů (tedy interakce zapojených zákazníků), sledování bilance v případě nainstalovaného decentralního zdroje elektrické energie a v neposlední řadě sledování netechnických ztrát (neoprávněných odběrů elektrické energie). Dále se v rámci tohoto projektu ověřuje zapojení lokálních výrobních zdrojů (kogenerační jednotky) – z důvodu otestování možnosti provozu v ostrovním režimu (smart city) a testuje se elektromobilita.

Fotovoltaické systémy

Dělení fotovoltaických článků

Monokrystalické

Za pomoci Czochralského metody růstu monokrystalu, je vytvořen válcový křemíkový monokrystal. Tento monokrystal je dále rozřezán na tenké křemíkové destičky, tloušťky cca 300 mikrometrů. Samotné články vytvořené touto metodou mají oproti článkům polykrystalickým vyšší účinnost, avšak také tomu odpovídající vyšší cenu. U těchto článků se dosahuje účinnosti kolem 25 %.

Solární panely z monokrystalického křemíku mají většinou tmavý odstín. Rohy jednotlivých článků mají, díky použité metodě, typický oblý tvar.

Polykrystalické

Křemíkové destičky, pro tento typ článků jsou získávány rozřezáním polykrystalického kvádrového ingotu. Výroba takového článku je tak jednodušší, levnější a navíc při výrobě nedochází k tak velkým ztrátám, jak je tomu v případě článků monokrystalických. Články mají

v porovnání s monokrystalickými menší účinností, ale díky úsporám ve výrobě mají také lepší poměr cena/výkon.

Solární panely z polykrystalického křemíku mají na rozdíl od monokrystalických modrý odstín a ostré rohy.

Amorfní

Moderní typy článků s menší účinností a menší cenou. Pro získání stejného výkonu jako při použití panelů monokrystalických je potřeba zhruba 2x až 2,5x větší plocha fotovoltaického panelu. Na druhou stranu mají tyto články nižší hmotnost a příznivější teplotní koeficient.

Dle druhu vrstev

Tlustovrstvé - Krystalický křemík (monokrystalický a multikrystalický)

Vznikají nařezáním monokrystalického, či polykrystalického ingotu a nanesením dalších potřebných vrstev. Díky poměru cena/výkon jsou v dnešní době masově vyráběny a používány a tvoří tak asi 88 % všech vyráběných článků.

Tenkovrstvé - Amorfní křemík, Mikrokrystalický křemík, Amorfní germanium, Amorfní SiGe, CdTe/CdS

Polovodičová vrstva je nanesena na nepolovodičový substrát. Tento substrát (papír, sklo, plast, atd.) může být flexibilnější, lehčí a levnější, než sklo používané u tlustovrstvé technologie. Výroba tenkovrstvého článku je pak co se týče nákladů na jeden článek, díky úspoře materiálu levnější než u tlustovrstvé technologie, avšak větší nároky na vybavení výrobního provozu články značně prodražují. U těchto článků lze také očekávat menší účinnost a méně stabilní parametry.

Dle druhu materiálu

Křemíkové

V současné době jde stále o nejrozšířenější technologii a nejlepší variantu v poměru cena/výkon.

Na bázi jiných materiálů

Jedná se například o GaAs, InP, CuInSe a CdTe. Díky snadnému nanášení je pak ve většině případů upřednostňován CdTe.

Dle počtu přechodů

Jeden přechod

Předností těchto článků je jejich snadná výroba, za cenu menší účinnosti. Zachyceny mohou být pouze takové fotony, jejichž energie je stejná, či srovnatelná s šířkou zakázaného pásu. Pokud má foton vyšší energii, dochází k částečné ztrátě energie přeměnou na teplo. Pokud je energie fotonu nižší, nedojde k jeho zachycení.

Více přechodů

Díky kombinaci více vrstev je dosaženo různou kombinací šířek zakázaného pásma lepší účinnosti panelů, za cenu vyšších výrobních nákladů. V dnešní době se účinnost takových článků pohybuje až kolem 40 %.

Fotovoltaický panel

Protože napětí každého článku je malé (pracovní napětí kolem 0,5 V) jsou z jednotlivých článků vytvářeny větší pracovní pole tzv. panely. Obvykle se z článků vytvářejí série po 36 článcích pro 12, 24 nebo 72 V. Protože při sériovém řazení článků protéká články stejný proud, je žádoucí, aby bylo osvětlení všech článků rovnoměrné a byla zvolena vhodná kombinace sérioparalelního řazení článků a tzv. bypass diod (v případě nesplnění pak zastíněním jednoho článku rapidně klesá výkon celého panelu).[28]

Kogenerační jednotky

Kogenerační jednotky se spalovacími mikroturbinami

Spalovací mikroturbíny byly vyvinuty z turbodmychadel pro motory velkých nákladních automobilů, případně pomocných zdrojových jednotek v letadlech. V současné době byly jejich konstrukce a výroba dovedeny do sériové produkce. Mikroturbíny se vyrábí ve dvou základních provedeních, a to s rekuperací tepla před spalovací komorou (do výfukového potrubí mezi kompresor a spalovací komoru je zařazen výměník tepla pro ohřev spalovacího vzduchu spaliny) nebo bez této rekuperace (takový stroj je levnější, ale má nižší účinnost). Ve všech případech se jedná o vysokootáčkové stroje. Hřídel turbíny je přímo spojena s vysokofrekvenčním generátorem. Vyráběný elektrický proud je prostřednictvím usměrňovače a střídače upravován na parametry pro připojení do rozvodné sítě (většinou vzhledem k výkonům na úroveň nízkého napětí).

Celé zařízení je uloženo v kompaktním pouzdru. Bývají většinou provozovány jako autonomní systémy (tzv. ostrovní systémy) a není problém je zabudovat do jakékoliv zástavby.

Mezi hlavní výhody mikroturbín patří:

- nízké nároky na údržbu,
- nezávislost na výkyvech kvality bioplynu, také možnost využití méně kvalitního plynu s obsahem metanu pod 50 %,
- nízké emise škodlivin.

Mikroturbíny se vyrábí v různé výkonové řadě. Výkony jsou od 10 až po 1 000 kW.

Kogenerační jednotky se spalovacími mikroturbínami jsou oproti těm s „klasickými“ spalovacími turbínami relativně novým technologickým řešením, nicméně v posledních letech prodělaly velký vývoj. Tyto jednotky jsou využívány jako klasické kombinované zdroje elektrické energie a tepla, ale také ve funkci záložních zdrojů pro krytí nouzové potřeby elektrické energie v době výpadku distribuční sítě. Jedná se o poměrně spolehlivá zařízení v podstatě obsahující pouze jednu rotující součást, vysokootáčkový rotor, společný pro všechny hlavní části (generátor elektrického proudu, kompresor spalovacího vzduchu a expanzní turbínu) uložený ve vzduchových či magnetických ložiscích. Vzhledem k jejich charakteru a provozním možnostem jsou velice vhodnými prostředky pro zajištění nouzových dodávek elektrické energie pro jednotlivé objekty či areály.

Pístové spalovací motory s rekuperací tepla

Jedná se kogenerační jednotky skládající se z konvenčního pístového spalovacího motoru, většinou upraveného pro spalování zemního plynu či bioplynu, a okruhu pro rekuperaci tepla ze spalin na výfuku motoru a případně i z okruhu chlazení oleje motoru. Základem pro tyto jednotky jsou proto většinou běžné spalovací motory sloužící pro pohon silničních vozidel, lodí či stacionárních generátorů původně spalujících benzín či naftu. Vzhledem parametrům nosičů odpadního tepla se tyto jednotky hodí pro dodávku tepla ve formě teplé vody.

Podle způsobu zapalování paliva je dělení na zážehové a vznětové. U zážehových se směs paliva a vzduchu zapaluje elektrickou jiskrou a zapaluje se v otevřené spalovací komoře nebo v předzápalné komoře (v hlavě válce a zážeh se poté rozšíří do hlavní komory s chudší směsí). U vznětových motorů dojde k zapálení směsi po dosažení zápalných hodnot při stlačení.

Víceválcové motory a jejich uspořádání zrovnoměňuje průběh krouticího momentu přenášeného na hřídel. Podle otáčení hřídele motoru se rozdělují na pomaloběžné (55 – 275 ot/min), se středními otáčkami (276 – 1000 ot/min) a rychloběžné (1001 – 3600 ot/min).

Bezporuchovost je závislá na kvalitě údržby a pravidelných opravách. Při kvalitní údržbě lze dosáhnout hodnoty 95 %.

V současné době je k dispozici široká škála jednotek ve výkonových kategoriích od cca 10 kW do 1 000 kW, případně i větší. Výroba takovýchto jednotek je i v ČR.

Stav řešené problematiky v zahraničí

Pro zajímavost uvedu několik případů projektů smart grids ve světě. Více se lze poté dočíst v [30] - [33].

V Číně se zaměřují na rozvoj přenosové a distribuční soustavy tak, aby byla schopna přenášet špičkové výkony a integrovat decentralizované zdroje dohromady s rostoucí poptávkou po elektřině.

Austrálie se zaměřuje na inteligentní měření a na projekty smart cities.

Zajímavý stav je v Indii, kde jsou nejvyšší ztráty v elektrizační soustavě (přibližně 26% z celkové výroby) – proto se vláda rozhodla podporovat masivní nasazení elektroměrů nové generace. Z podobného důvodu se i Brazílie rozhodla jít cestou instalace chytrých elektroměrů.

Naproti tomu Japonsko se rozhodlo jít cestou podpory investic do decentralizovaných zdrojů elektrické energie (důsledek situace v jaderných elektrárnách ve Fukushima).

V Evropské unii se monitoringu jednotlivých projektů věnuje Evropská komise – generální ředitelství energetiky. Ty zpracovávají postupy ve vývoji a implementaci. Nejvíce projektů se zaměřuje na inteligentní měření a nasazení potřebné infrastruktury. Další oblastí jsou poté decentralizované zdroje elektrické energie a zapojení elektromobilů do elektrizačních sítí.

Ve spojených státech se tématu věnuje přímo ministerstvo energetiky, které má k tématu smart grids zřízenou pracovní skupinu. Hlavní oblasti, která se v současné době řeší ve spojených státech, jsou – obnovitelné zdroje energie a jejich decentralizace (spolu s podporou chytrých domácností – ve formě speciálních tarifů pro domácnosti), inteligentní měření a související infrastruktura, automatizace sítí (selfhealing), elektromobily jejich integrace do distribučních sítí a zkoumání chování uživatelů těchto vozidel.

3 Chránění v distribučních sítích

Jak bylo řečeno výše, smart grid je především o inteligentní regulaci elektrické sítě a o schopnosti přenést vyrobenou energii z jakéhokoli centralizovaného i decentralizovaného zdroje ke koncovému spotřebiteli. S tím ovšem velmi úzce souvisí spolehlivost a bezpečnost dodávky. Ta by se měla neustále zvyšovat, což klade vysoké nároky na dobře navržený ochranný systém.

3.1 Decentralizovaná výroba

Také nazývaný distribuovaná výroba, vyrábí elektřinu z mnoha menších zdrojů připojených do distribuční soustavy.

Přínosem je, že zmenšuje ztráty energie v přenosovém vedení, protože elektřina je produkována v místě spotřeby a nemusí být transportována. Další výhodou je, že se nemusí stavět tolik nových vedení, protože odpadá potřeba transportu na velké vzdálenosti. [34][35]

Velikost jednotlivých generátorů je přibližně od několika stovek wattů po několik set megawattů. Přehled typických zástupců decentralizovaných generátorů je uveden v tabulce 2.

Typ	Typická velikost jednotky
Fotovoltaické panely	100 W – 100 kW
Větrná elektrárna	200 W – 5 MW
Palivový článok	1 kW – 10 MW
Kombinovaná výroba elektřiny a tepla	10 kW – 10 MW
Pole baterií	500 kW – 5 MW
Plynová turbína	5 kW – 5 MW
Malá vodní elektrárna	1 MW – 100 MW
Mikroturbíny	35 kW – 1 MW

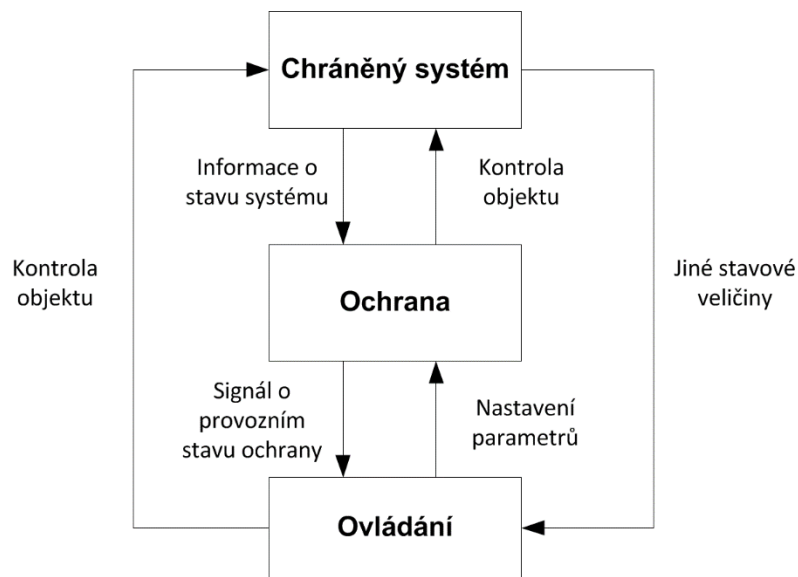
Tabulka č. 2 – Přehled typických zástupců decentralizovaných generátorů [36]

Mnoho decentralizovaných zdrojů v síti může vést ke vzniku virtuálních elektráren a mikrosítí. V dalších kapitolách je uveden přehled vybraných decentralizovaných zdrojů, jejich popis a vlastnosti.

3.2 Chránění distribučních sítí

V elektrizační soustavě nastává mnoho událostí, které způsobují poruchy – disproporci mezi výrobou a spotřebou elektrické energie. Tyto poruchy mohou vést k výpadkům dodávek elektrické energie. Velké výpadky vedou k vytvoření přepětí a velkých proudů, což může způsobit poškození elektrického zařízení připojeného do sítě. Pro minimalizaci negativních dopadů používáme ochranný systém.[37][38][39]

Ochranný systém se rozhoduje na základě vstupní hodnoty, informací o chráněném objektu a na nastavení ochranného systému (vztah je vidět na obrázku 12)



Obrázek 12 – Vztahy mezi ochranou a chráněným systémem

Správně navržený ochranný systém musí splňovat následující body:

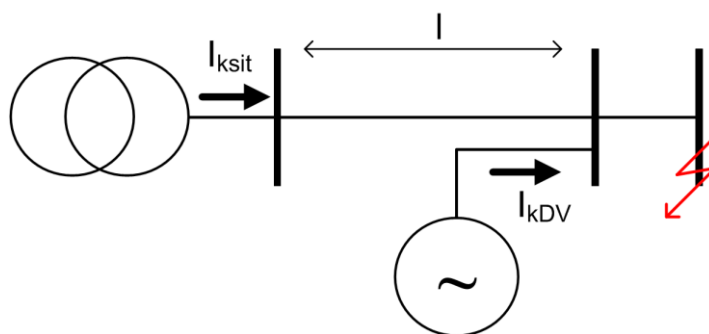
- **Selektivita** – schopnost ochranného systému reagovat na odpojení poškozené (porušené) části elektrické sítě. Nepoškozené úseky zůstávají dále v bezporuchovém stavu a pracují normálně. Vypínat by měl vypínač umístěný nejbližší k postižené části ze směru napájení.
- **Citlivost** – schopnost ochranného systému identifikovat nestandardní provozní podmínky, které překračují nastavené limity.
- **Spolehlivost** – schopnost elektrické ochrany vykonávat operace podle daného algoritmu ve stanoveném čase s požadovanými nastavenými parametry. Ochrana musí spolehlivě působit ve všech případech, pro které byla navrhnutá.

- Bezpečnost – schopnost pracovat v navrženém režimu, i kdyby došlo k nestandardním provozním podmínkám.[40]

3.3 Příspěvek decentralizované výroby ke zkratovým proudům

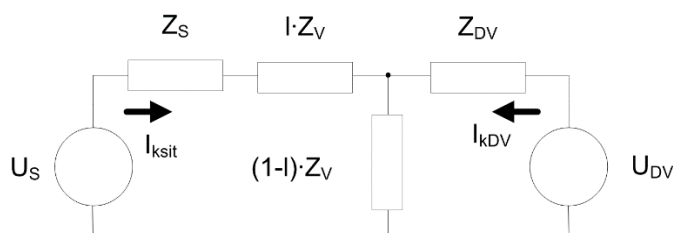
Každý zdroj, který je připojen do sítě, má podíl na celkovém zkratovém proudu v místě postiženém zkratem.[41]

Situace se zkratovým proudem je znázorněna na obrázku č. 13. Zde je zobrazen decentralizovaný zdroj připojený do sítě ve vzdálenosti l od místa, kde je připojena síť (např. distribuční transformátor). Na konci tohoto vedení je třífázový zkrat. I_{ksit} je poruchový proud tekoucí od místa připojení, I_{kDV} je příspěvek ke zkratovému proudu od decentralizovaného zdroje. Následující úvahy platí pro zdroj se synchronním, příp. asynchronním generátorem přímo připojením do sítě.[42][43]



Obrázek 13 – Síť a decentralizovaný zdroj a jejich příspěvky ke zkratovému proudu

Na obrázku č. 14 je zakreslena náhrada modelové části sítě (obrázek č. 13). Síť je zde reprezentována jako zdroj napětí U_S s impedancí Z_S danou zkratovým výkonem a decentralizovaný zdroj jako zdroj napětí U_{DV} s impedancí Z_{DV} danou rázovou reaktancí zdroje. Celková impedance vedení Z_V je pak dle polohy decentralizovaného zdroje rozdělena na dvě části dané relativní vzdáleností l , kde $0 \leq l \leq 1$. Hodnota 0 odpovídá poloze zdroje na začátku vedení v místě připojení k soustavě, hodnota 1 pak poloze zdroje na konci vedení v místě zkratu.



Obrázek 14 – Obvodářský ekvivalent sítě z předchozího obrázku

Řešení obvodu vede ke dvěma rovnicím.

$$U_S = (Z_S + Z_V) \cdot I_{ksit} + (1 - l) \cdot Z_V \cdot I_{kDV} \quad (3.1)$$

a

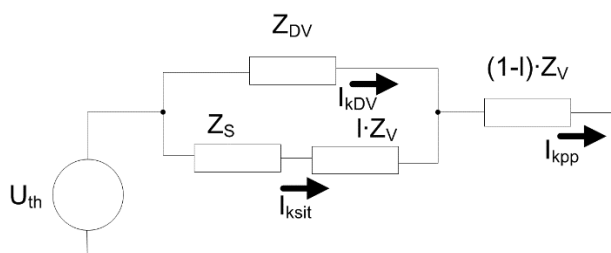
$$U_{DV} = (1 - l) \cdot Z_V \cdot I_{ksit} + (Z_S + (1 - l) \cdot Z_V) \cdot I_{kDV} \quad (3.2)$$

Na obvod z obrázku č. 14 můžeme použít Theveninův teorém (dle normy IEC 60909). Na obrázku č. 15 je znázorněn Theveninův ekvivalent sítě z obrázku č. 14.

Pro obrázek č. 15 dostáváme theveninovu impedanci Z_{th} , která se spočítá:

$$Z_{th} = \frac{(Z_S + l \cdot Z_V) \cdot Z_{DV}}{Z_S + l \cdot Z_V + Z_{DV}} + (1 - l) \cdot Z_V \quad (3.3)$$

Kde impedance sítě je $Z_S = j \cdot X_S$, impedance generátoru Z_{DG} , a celková impedance vedení $Z_V = R_V + j \cdot X_V$, l je relativní vzdálenost decentralizovaného generátoru.



Obrázek 15 -- Theveninův ekvivalent obvodu z předchozího obrázku

Celkový třífázový zkratový proud se spočítá:

$$I_{kpp} = \frac{U_{th}}{\sqrt{3} \cdot Z_{th}} \quad (3.4)$$

Dosazením rovnice (3.3) do rovnice (3.4) se dostane:

$$I_{kpp} = \frac{U_{th} \cdot (Z_S + l \cdot Z_V + Z_{DV})}{\sqrt{3} \cdot (Z_V \cdot Z_{DV} + Z_S \cdot Z_{DV} + Z_S \cdot Z_V + l \cdot Z_V \cdot (Z_V - Z_S) - l^2 \cdot Z_V^2)} \quad (3.5)$$

Příspěvek sítě se spočítá:

$$I_{ksit} = \frac{Z_{DV}}{(Z_{DV} + l \cdot Z_V + Z_S)} \cdot I_{kpp} \quad (3.6)$$

Dosazením rovnice (3.5) do rovnice (3.7) se dostane:

$$I_{ksit} = \frac{U_{th} \cdot Z_{DV}}{\sqrt{3} \cdot (Z_V \cdot Z_{DV} + Z_S \cdot Z_{DV} + Z_S \cdot Z_V + l \cdot Z_V \cdot (Z_V - Z_S) - l^2 \cdot Z_V^2)} \quad (3.7)$$

Celkový zkratový proud je určen rovnicí (3.5). V případě malého výkonu sítě, může být impedance Z_S stejně velká jako impedance Z_{DV} a díky příspěvku decentralizovaného zdroje může být příspěvek k celkovému zkratovému proudu od sítě nižší.

Z rovnice (3.7) je vidět, že celkový zkratový proud je dán velikostí decentralizovaného zdroje a místem jeho připojení.

Maximální vliv decentralizovaného zdroje na síť nastává, když je příspěvek od sítě nejmenší. To se spočítá, položí-li se derivace rovnice (3.7) nule.

$$\frac{d I_{kgrid}}{dl} = 0 \quad (3.8)$$

Výsledkem je:

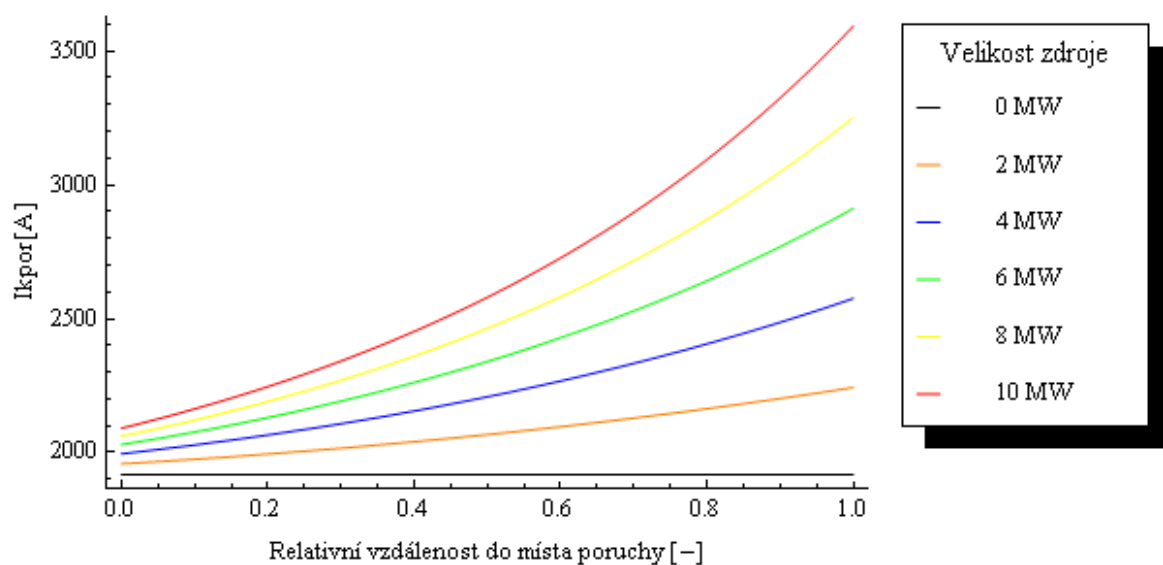
$$l = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_L^2 - X_L \cdot (X_L - X_G) + j \cdot R_L \cdot (2 \cdot X_L - X_G)}{(R_L^2 - X_L^2) - 2 \cdot j \cdot X_L \cdot R_L} \quad (3.9)$$

Rovnicí (3.9) lze vypočítat relativní vzdálenost, kdy je vliv decentralizovaného zdroje nejvyšší.

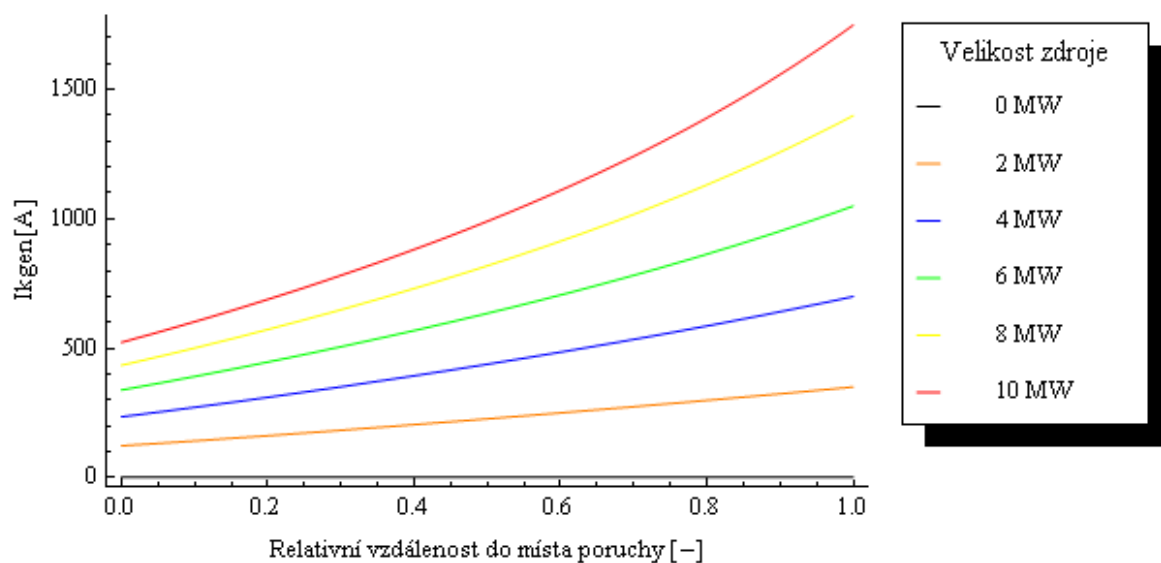
3.4 Vliv velikosti a polohy rozptýleného zdroje na zkratový příspěvek sítě

Byla modelována situace na obrázku 13, kde soustava 22 kV se zkratovým výkonem 200 MVA napájí 10 km vedení AlFe 110/22, na jehož konci dojde k trojfázovému zkratu. Proměnlivou polohu na vedení má rozptýlený zdroj s výkonem do 10 MW, kterým je synchronní generátor.

Čím blíže bude rozptýlený zdroj k místu poruchy, tím větší bude, pochopitelně, celkový zkratový proud i příspěvek tohoto generátoru, což dokládají obrázky 16 a 17.

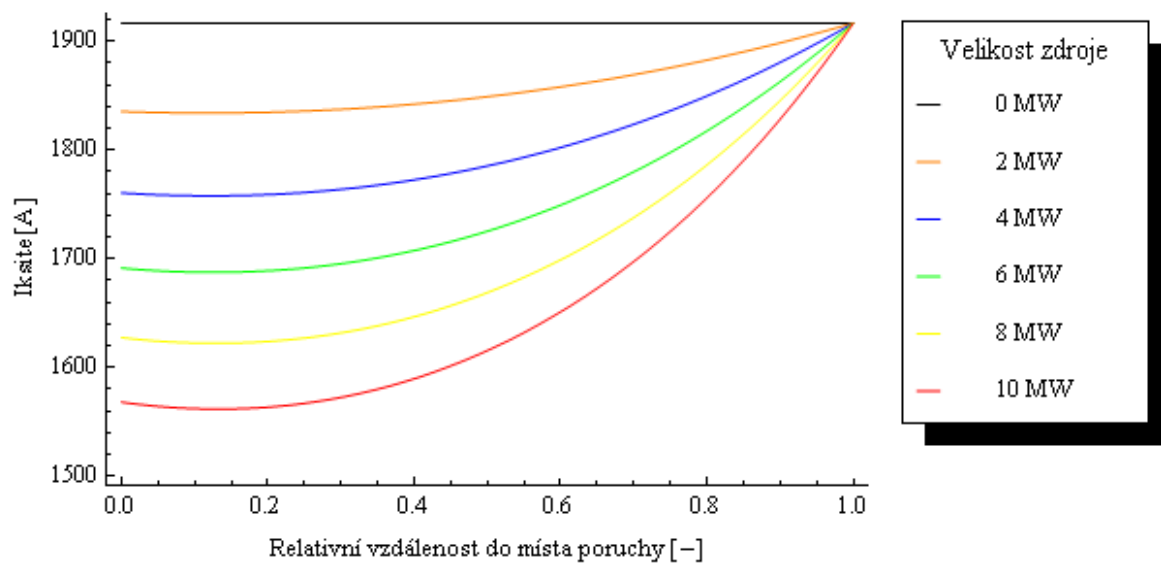


Obrázek 16 – Celkový zkratový proud



Obrázek 17 – Zkratový příspěvek rozptýleného generátoru

Se změnou polohy generátoru však bude docházet ke změně příspěvku sítě ke zkratovému proudu úměrně též velikosti výkonu generátoru, jak dokládá obrázek 18.



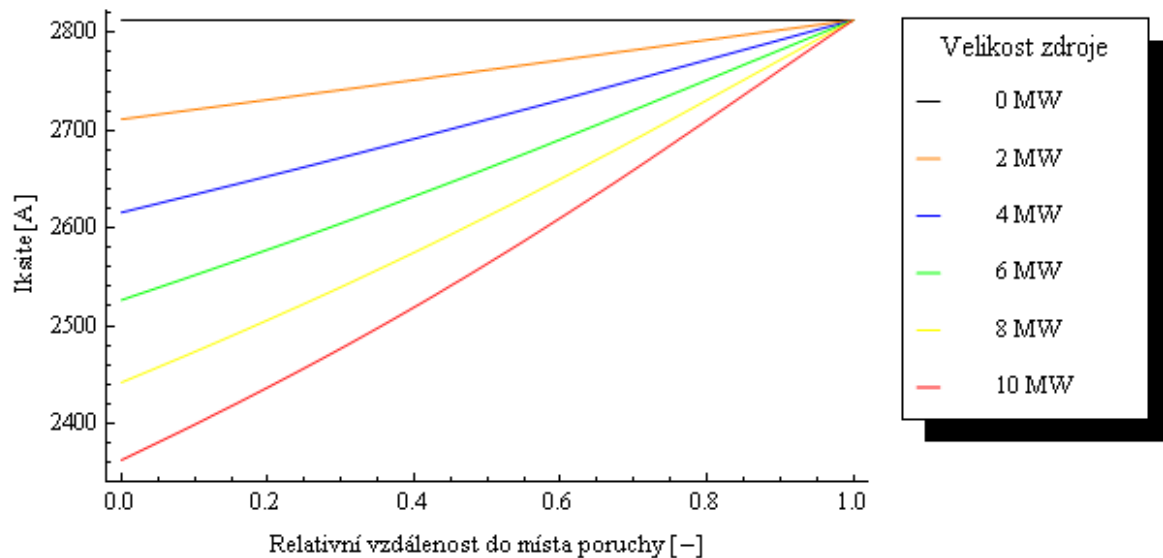
Obrázek 18 – Zkratový příspěvek sítě

Dojde tak k výraznému snížení zkratového příspěvku sítě, což může mít za následek nedostatečný proud pro vybavení zkratové ochrany, je-li tato obvykle instalována na začátku distribučního vedení, tedy v tomto případě ve vzdálenosti $l = 0$. Samotný pokles lze považovat za nepříznivý, pokud s ním ochranné prvky nepočítají, resp. je-li vlivem proměnlivého nasazování rozptýlených zdrojů velmi různorodý v čase. Je zřejmé, že tento pokles úměrný velikosti generátoru rovněž závisí na umístění rozptýleného zdroje na vedení.

Obecně platí, že je-li generátor umístěn blízko konce vedení se zkratem, jeho vliv na příspěvek sítě je minimální, což vychází ze schématu na obrázku 15. Poloha místa s největším vlivem na změnu zkratového příspěvku sítě závisí zejména na vzájemném poměru impedance sítě a vedení, což bude ukázáno dále. Pro uvedené hodnoty je minimální příspěvek sítě při poloze generátoru cca na 12 – 13% délky vedení, jedná se pokles v řádu několika % až po cca 20 % pro 10 MW zdroj.

3.5 Kabelové vedení

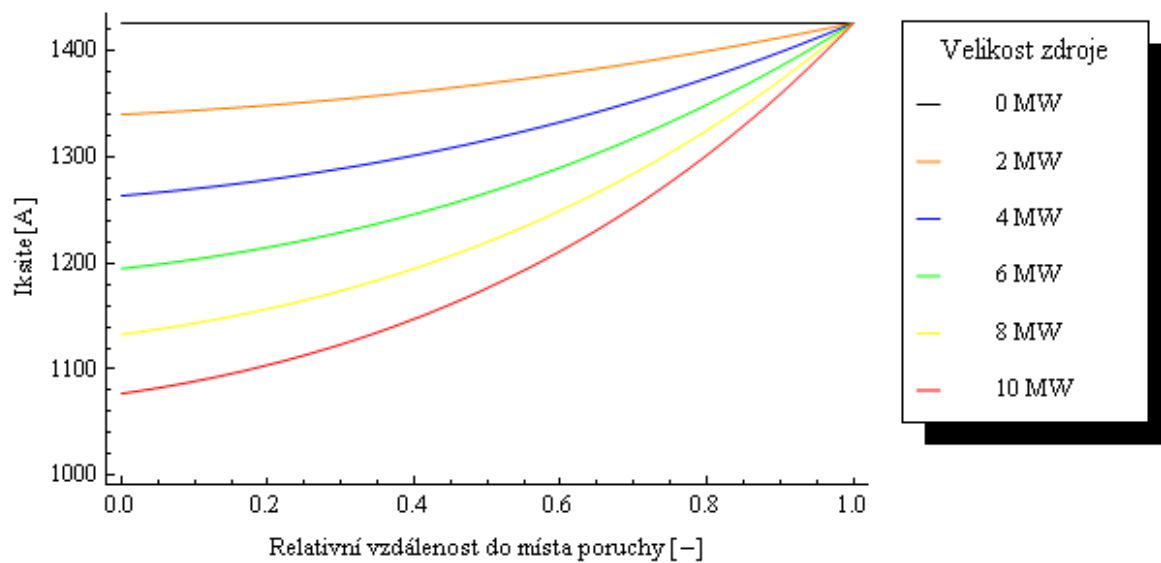
Tentýž výpočet pro kabelové vedení SAX120, které se vyznačuje přibližně třetinovou podélnou reaktancí oproti venkovnímu AlFe vedení má velmi podobné závěry, pouze dochází k posunu maximálního vlivu k počátku vedení – viz obrázek 19.



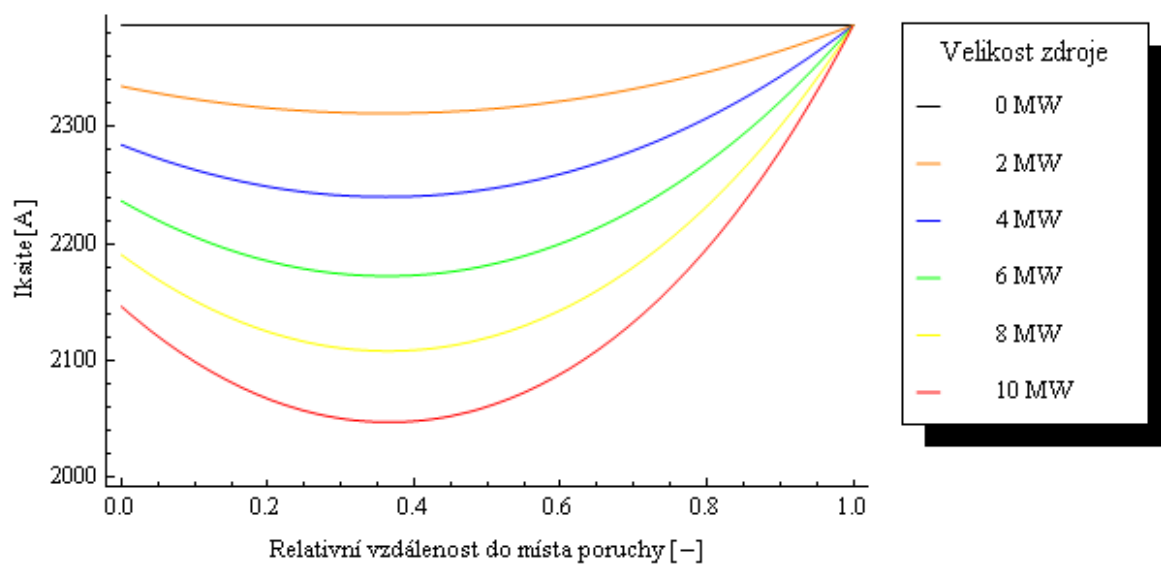
Obrázek 19 – Zkratový příspěvek sítě – kabelové vedení

3.6 Vliv impedancí soustavy a vedení

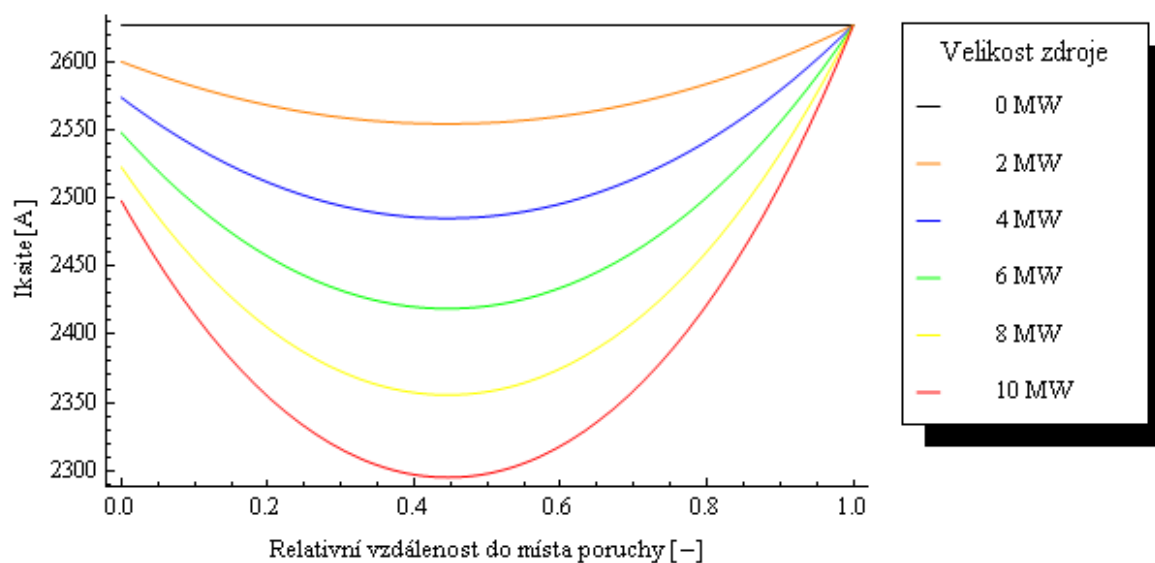
Efekt, který je zmíněn u kabelového vedení, je důsledkem významného vlivu vzájemného poměru impedance sítě (tedy jejího zkratového výkonu) a reaktance vedení. Podívejme se nejprve na závislosti zkratového příspěvku sítě na poloze generátoru pro několik zkratových výkonů soustavy.



Obrázek 20 – Zkratový příspěvek sítě – $S_{ks} = 100 \text{ MVA}$



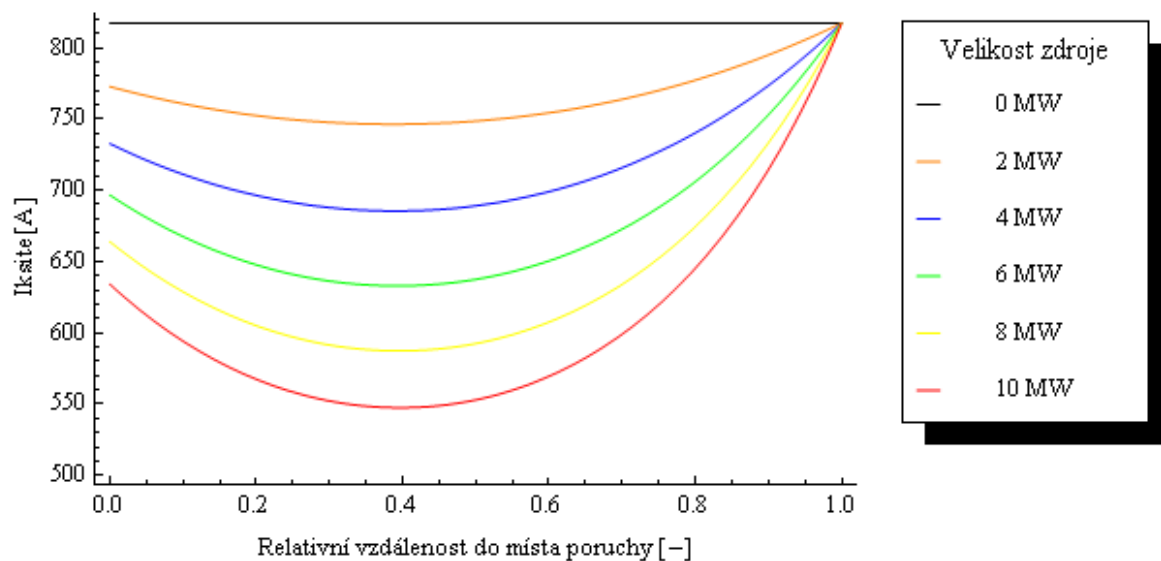
Obrázek 21 – Zkratový příspěvek sítě – $S_{ks} = 500 \text{ MVA}$



Obrázek 22 – Zkratový příspěvek sítě – $S_{ks} = 1200$ MVA

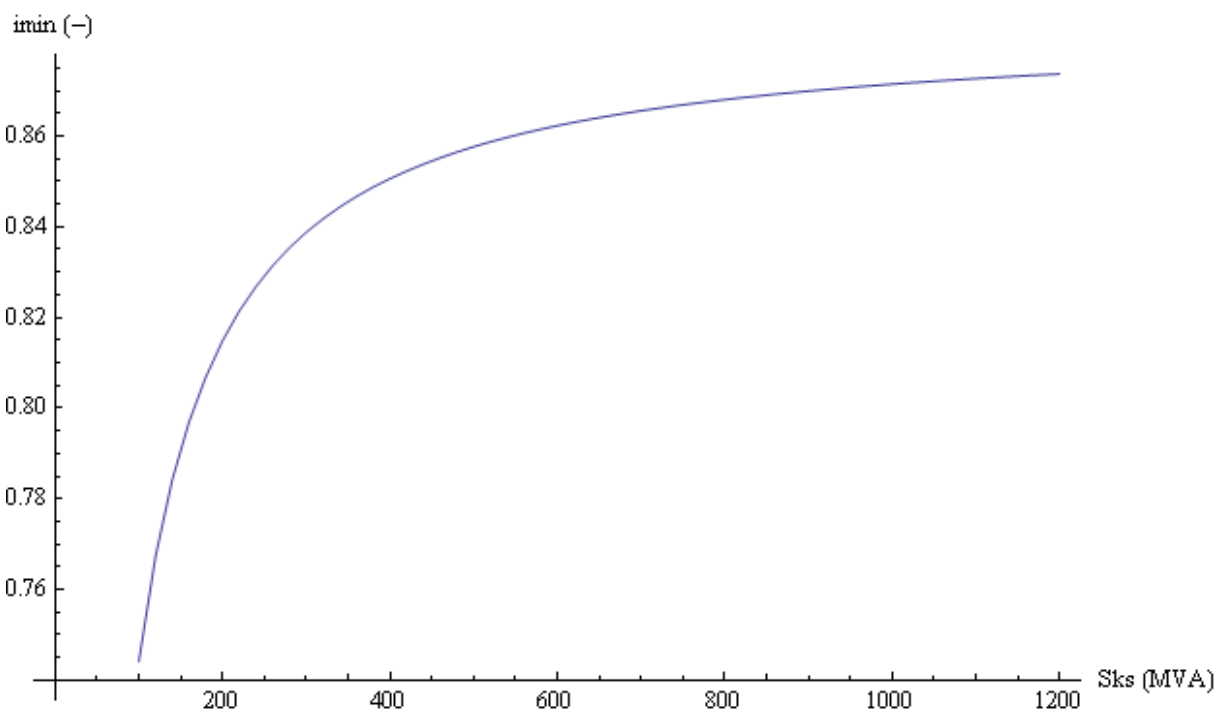
Z obrázků 20-22 vyplývá několik skutečností. S rostoucím zkratovým výkonem sítě dochází při zachování všech ostatních parametrů ke snížení poměrného poklesu zkratového příspěvku sítě, což je samozřejmě dáno jeho převahou nad příspěvkem od rozptýleného generátoru. Pro $S_{ks} = 100$ MVA poklesne příspěvek sítě až na 74 % původní hodnoty, kdežto pro $S_{ks} = 1200$ MVA jen na 87 % (obojí pro přítomnost synchronního generátoru 10 MW). Rovněž je patrný přesun místa s největším poklesem příspěvku sítě směrem ke středu vedení pro vyšší S_{ks} . Pokles $I_{k_{site}}$ pro konec vedení je vždy nulový, což vychází z konfigurace výpočtu, kdy generátor nemůže příspěvek sítě ovlivnit. Pro teoreticky nekonečný S_{ks} by byl pokles $I_{k_{site}}$ nulový i pro začátek vedení, neboť příspěvek sítě a generátoru zde začíná ve stejném bodě a generátor tak nemůže mít žádný vliv na zkratové proudy. Pouze při polohách „uvnitř“ vedení dojde k ovlivnění příspěvku sítě; nejvíce pak uprostřed vedení, což vychází ze schématu na obrázku 15. Naopak pro velmi malé S_{ks} se pokles $I_{k_{site}}$ stává více lineárním s maximem u počátku vedení.

Rozšířený pohled na uvedené úvahy dává rovněž výpočet základního uspořádání, ovšem pro vedení dlouhé 30 km – viz obrázek 23. Zde by měl nastat podobný efekt jako při zvýšení zkratového výkonu sítě, ovšem svůj vliv má i výkon vlastního generátoru. Vlivem zvýšení poměru impedance vedení a sítě dojde k posunu minima příspěvku sítě ke středu vedení. Protože však narostla celková impedance vedení, je pokles více ovlivňován impedancí generátoru a dojde zde k maximálnímu poklesu na cca 67 % původní hodnoty.



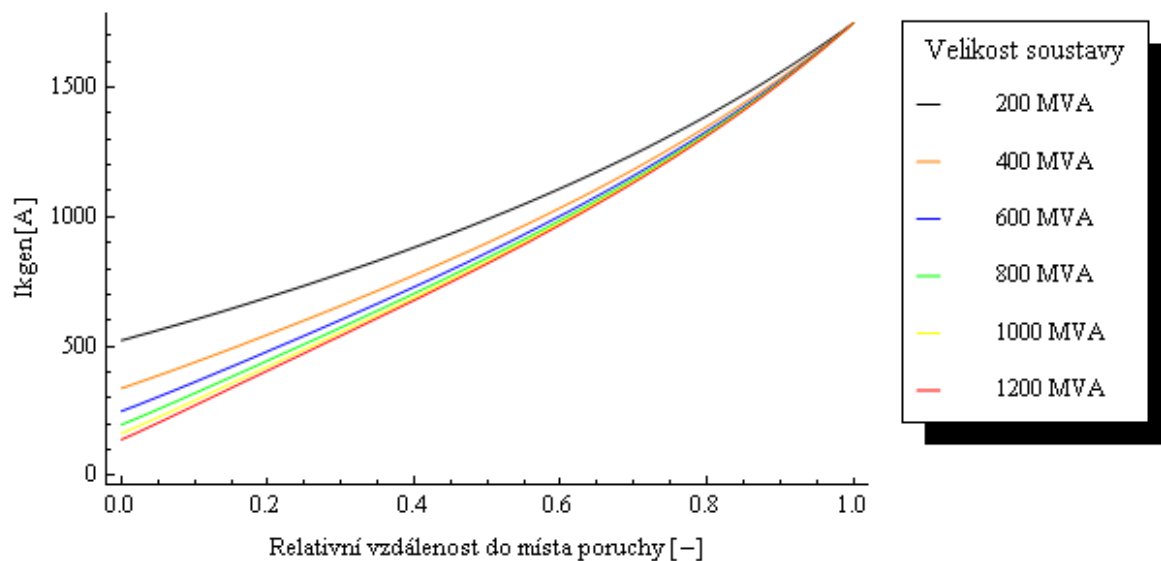
Obrázek 23 – Zkratový příspěvek sítě – vedení 30 km

Zmíněné závěry lze uceleně prezentovat sérií následujících grafů. Pro základní uspořádání, generátor 10 MW a proměnlivý zkratový výkon soustavy je na obrázku 24 vynesena závislost maximálního poklesu $I_{k\text{site}}$ na S_{ks} , která odpovídá uvedeným číslům. Z charakteru závislosti je patrné, že vždy existuje oblast S_{ks} , u které dochází k výraznému poklesu $I_{k\text{site}}$.



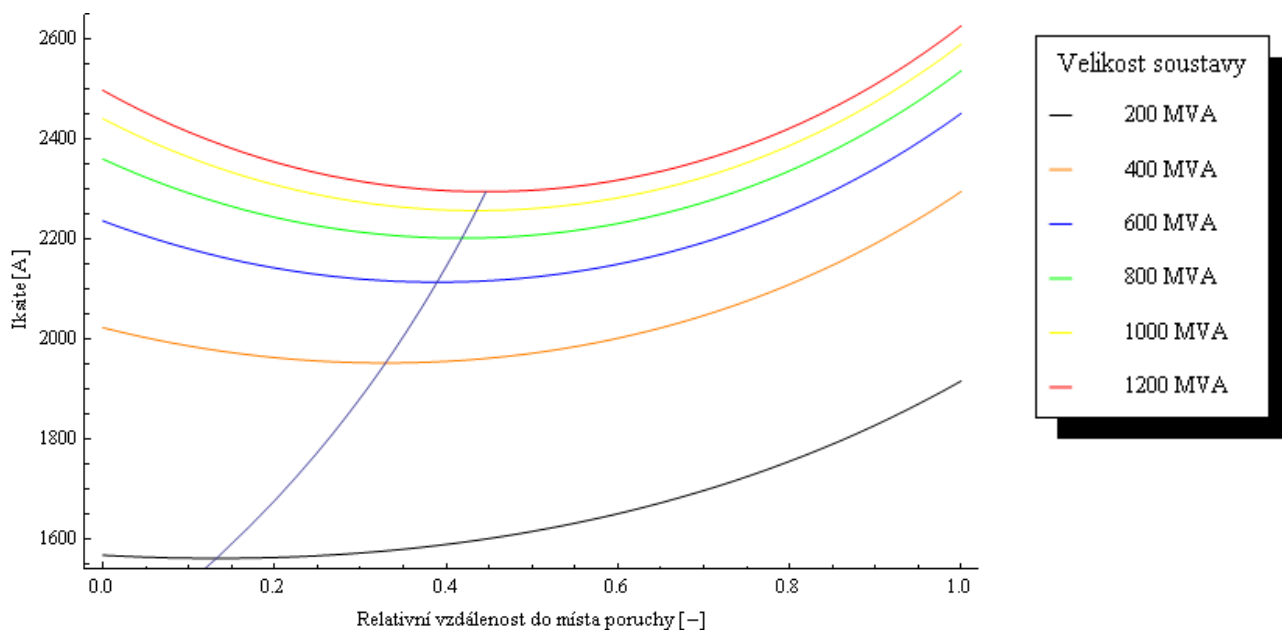
Obrázek 24 – Závislost maximální poklesu příspěvku sítě na jejím zkratovém výkonu

Vliv S_{ks} na příspěvek generátoru, jak byl popsán výše, je uveden na obrázku 25.



Obrázek 25 – Zkratový příspěvek rozptýleného generátoru 10 MW – vliv S_{ks}

Vliv S_{ks} na zkratový příspěvek sítě včetně označení místa největšího poklesu tohoto příspěvku je na obrázku 26.



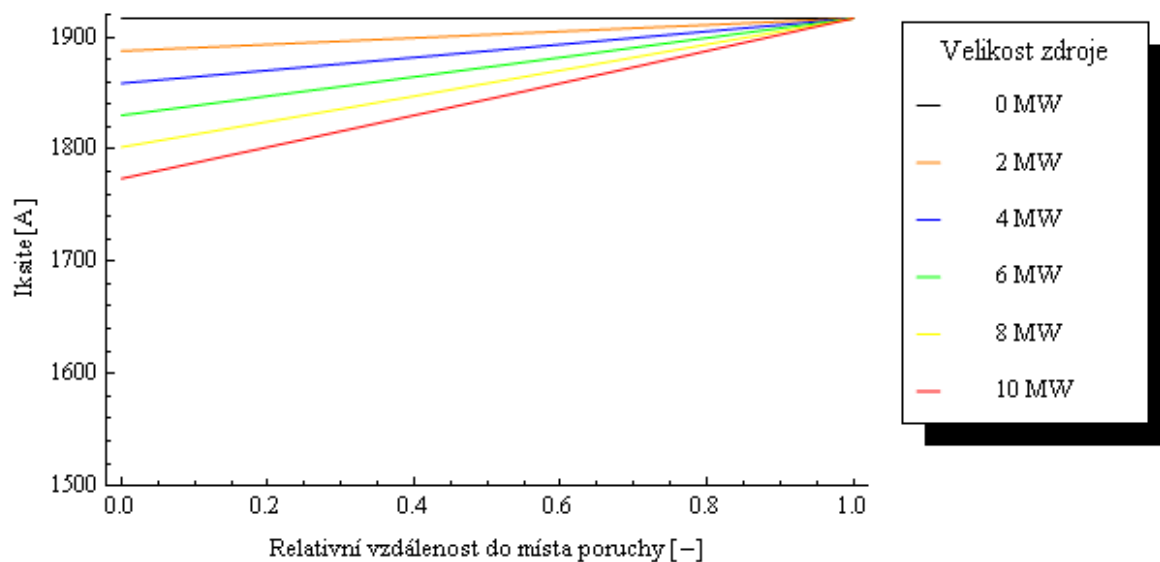
Obrázek 26 – Zkratový příspěvek sítě – vliv S_{ks}

3.7 Rozptýlené zdroje s výkonovými měniči

Doposud jsem uvažoval pouze rozptýlené zdroje s klasickými generátory s významným zkratovým příspěvkem. Důležité je se podívat, jak bude jejich vliv na zkratový příspěvek sítě vypadat, jestliže bude připojen zdroj s výkonovými polovodičovými měniči. U tohoto typu

zdroje se předpokládá příspěvek k poruchovému proudu ve stejné výši jako proud jmenovitý, což je výrazně menší příspěvek než např. u synchronních generátorů.

Jak se změní vliv na příspěvek sítě, ukazuje obrázek 27. Porovnáním s obrázkem 18 pro stejné parametry a konfiguraci je zřejmé, že efektivně vyšší impedance zdroje při poruše způsobí menší změnu zkratového příspěvku sítě, než zdroje se synchronním generátorem stejného výkonu. Rovněž maximální změna se přesune směrem k počátku vedení.

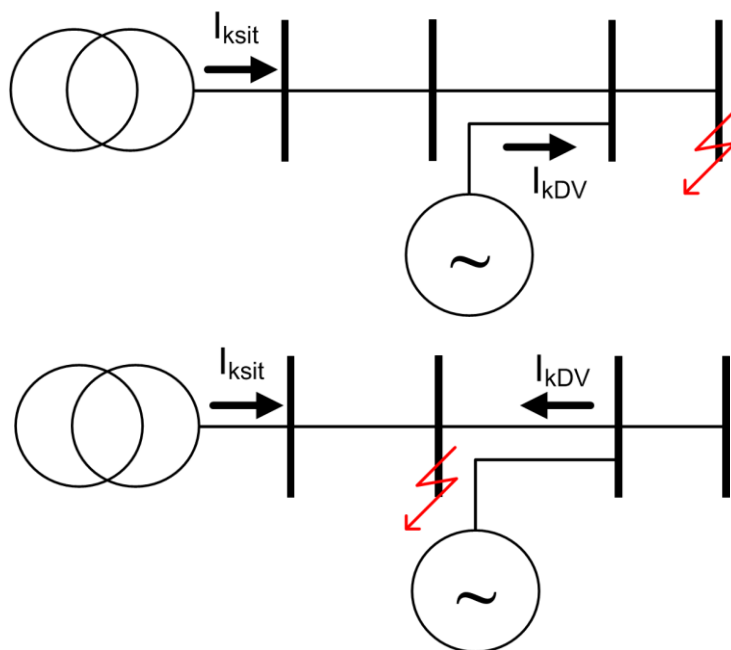


Obrázek 27 – Zkratový příspěvek sítě – zdroj s výkonovým měničem

3.8 Vliv polohy zkratu

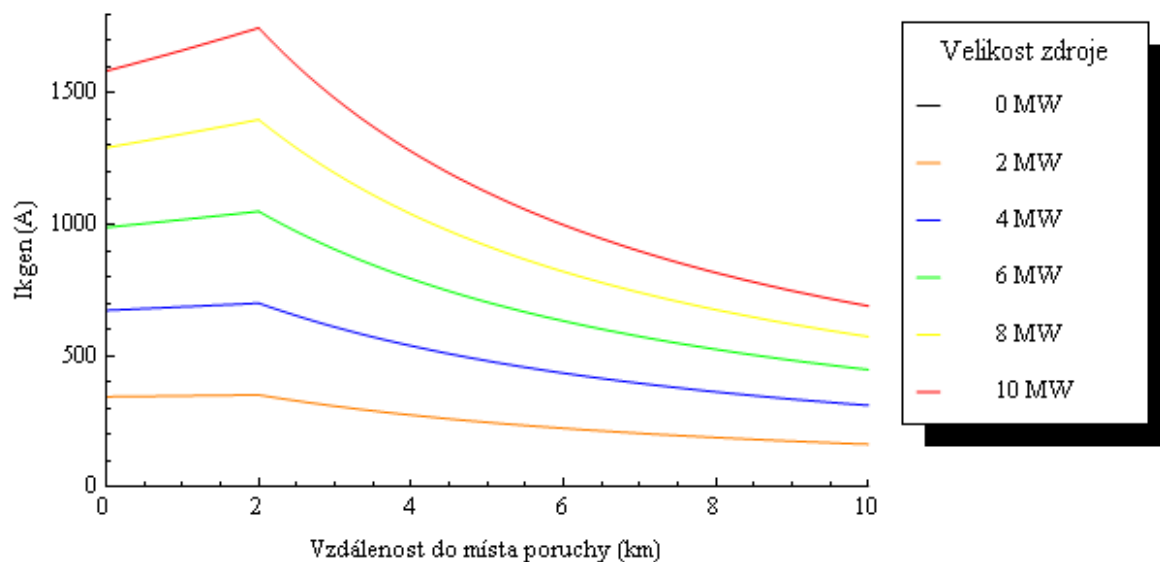
Všechny uvedené výpočty se týkaly situace, kdy místo zkratu je v radiální síti na konci vedení, respektive v místě za rozptýleným zdrojem směrem do napájecí soustavy. Důležité je ukázat, jak dosavadní závěry platí pro případy, kdy je rozptýlený generátor pevně připojen na distribučním vedení a místo zkratu je proměnlivé, což je standardní situace v provozu.

Využijí původního uspořádání s 10 km vedením AlFe110 a zkratovým výkonem 200 MVA. Generátor je umístěn ve vzdálenosti 2 km od napájecího konce vedení, tedy v místě s velmi vysokým vlivem na změnu příspěvku sítě. Výsledky této analýzy budou velmi výrazně ovlivněny faktem, zda bude zkrat před generátorem nebo za ním ve směru od napájecí sítě – viz obrázek 28.

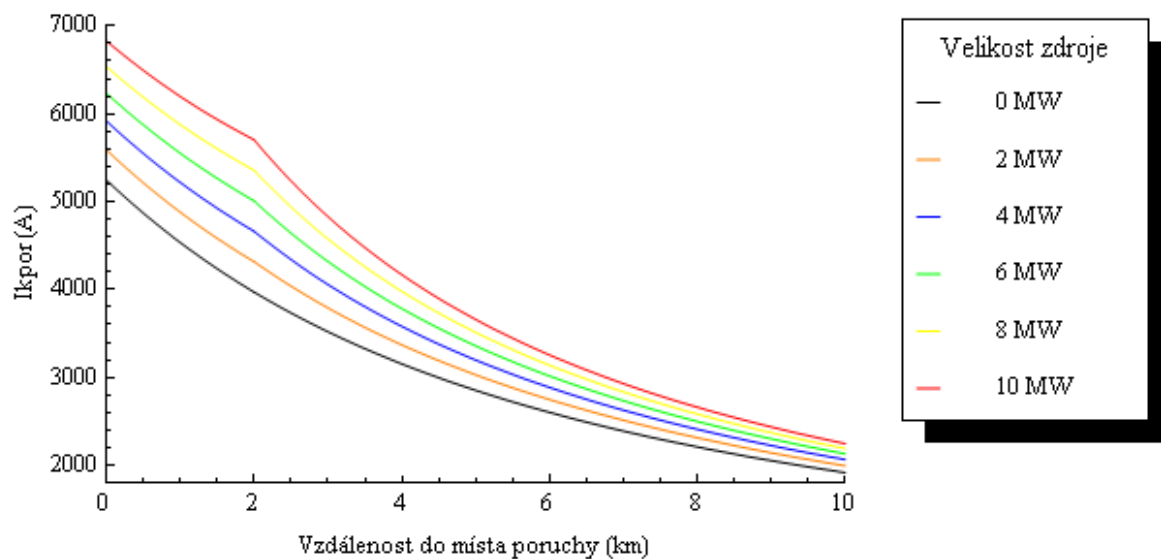


Obrázek 28 – Změny polohy zkratu

Zkratový příspěvek rozptýleného generátoru bude pochopitelně maximální, když dojde ke zkratu v místě jeho připojení. Dále od generátoru tento příspěvek klesá nepřímo úměrně s vzdáleností, což dokládá obrázek 29. Celkový zkratový proud bude pro rostoucí vzdálenost zkratu od místa napájení ze sítě klesat při nepříliš nízkém zkratovém výkonu sítě, pouze v místě připojení zdroje je znatelná odchylka od hladké nepřímé úměrnosti – viz obrázek 30.

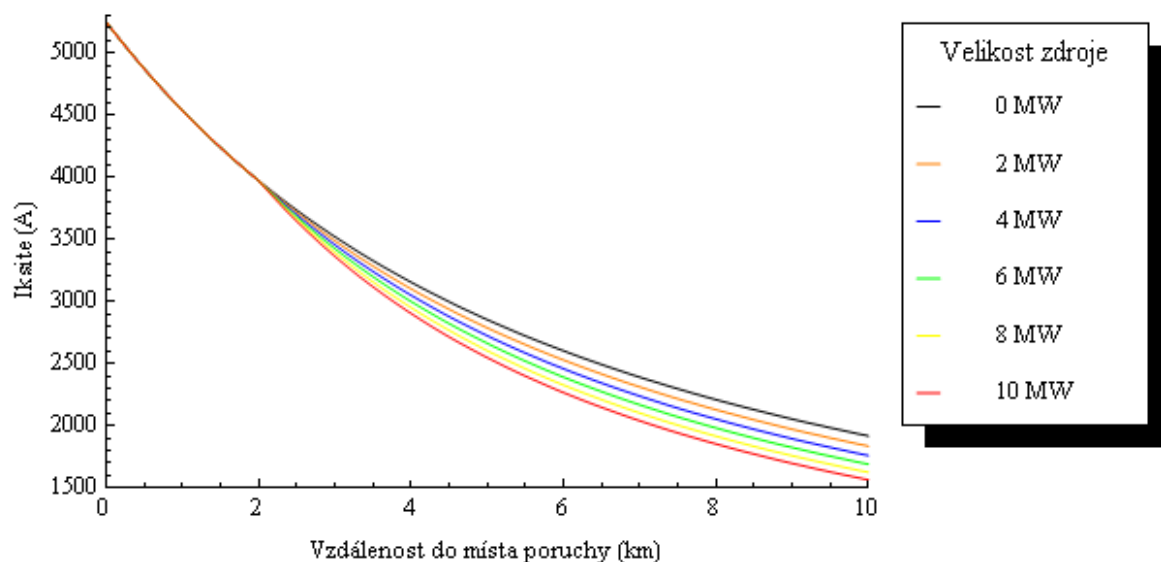


Obrázek 29 – Zkratový příspěvek rozptýleného generátoru – vliv polohy zkratu



Obrázek 30 – Celkový zkratový proud – vliv polohy zkratu

Zkratový příspěvek sítě, který je vyneseno na obrázku 31, se chová různým způsobem podle polohy zkratu. Je-li porucha před rozptýleným generátorem, není tento příspěvek přítomností generátoru ovlivněn, což je zřejmé i z obrázku 28, neboť příspěvky od sítě a od generátoru do poruchy přitékají z opačných směrů. Naopak příspěvek sítě pro poruchu za generátorem je již snížen úměrně velikosti generátoru, jak bylo ukázáno v předchozích kapitolách. Z hlediska chránění je pak nejohroženější oblastí konec vedení, resp. vzdálenější zkraty, kde je odchylka od příspěvku bez vlivu generátoru nejvyšší.



Obrázek 31 – Zkratový příspěvek sítě – vliv polohy zkratu

3.9 Možné problémy a řešení nastavení ochran

S připojováním malých generátorů do sítě roste jejich vliv na tuto síť. To není úplně nový problém, ale se zaváděním myšlenky smart grids do praxe se podíl těchto zdrojů zvyšuje a začíná být důležité se na tento nárůst řádně připravit.

V systému chránění může nastat díky tomuto nárůstu několik problémů.

- „Oslepení“ (nezareagování) ochrany
- Špatné vyhodnocení
- Nesynchronní spínání

Tyto problémy lze rozdělit do dvou kategorií – problémy s detekcí poruchy a problémy se selektivitou.

V předchozích kapitolách bylo ukázáno, že síťový příspěvek k celkovému zkratovému proudu je zmenšován příspěvkem od decentralizovaného zdroje. To může vést ke špatné detekci poruchy, nebo dokonce jejímu nezaznamenání – tomuto případu se říká „oslepení“ (nezareagování) ochrany.

Řešení, jak těmto negativním jevům předejít je několik. Prvním, nejjednodušším, je nové nastavení vypínačů a ochran, dle aktuální konfigurace sítě. Ochrana se nastaví pro konkrétní zapojení tak, aby vždy při poruše bezpečně zareagovala. Je zde ovšem jeden negativní důsledek a to možná přílišná citlivost ochrany. Hrozí, že při krátkodobé rychlé dynamické změně dojde ke špatnému vyhodnocení a nesprávné reakci, která bude mít za následek odpojení zdravé části sítě.

Jiným řešením může být instalace další ochrany, která bude mít nastavený jiný čas pro sepnutí, čímž se poskytne možnost selektovat jednotlivé přístroje a zabránit velkým výpadkům.

Nejlepším řešením je instalace nových adaptivních ochranných systémů, které samy dokáží spočítat aktuální poměry v síti nezbytné pro správnou funkci a dle těchto parametrů se samy nastaví na nejlepší možnou ochranu. Toto řešení je nejdražší variantou a prozatím je ve fázi vývoje.

3.10 Dílčí závěry

V předchozích kapitolách jsem uvedl a popsal jeden z řady vlivů rozptýlených zdrojů na provoz distribučních soustav, a to především vliv na zkratové proudy. Změna uspořádání soustavy a instalace nových generátorů do soustavy ovlivňuje zkratové poměry v soustavě.

S rozvojem rozptýlených zdrojů a nárůstem jejich výkonu zejména v radiálních větvích distribuční soustavy je však nutné věnovat pozornost úrovni změn ve zkratových příspěvcích od napájecí soustavy a od vlastních generátorů. Jejich přítomnost dokáže snížit běžné zkratové příspěvky soustavy nezanedbatelným způsobem, což se může nepříznivě projevit na spolehlivosti reakce nadproudových (zkratových) ochranných systémů zapojených na začátku distribučních vývodů.

Řešením uvedeného problému bude instalace nových adaptivních ochranných systémů, které samy dokáží spočítat aktuální poměry v síti nezbytné pro správnou funkci a dle těchto parametrů se samy nastaví na nejlepší možnou ochranu. Toto řešení je nejdražší variantou a prozatím je ve fázi vývoje. V mezičase je třeba instalovat přídavné ochrany, které budou mít nastavený jiný čas pro sepnutí, čímž se poskytne možnost selektovat jednotlivé přístroje a zabránit velkým výpadkům. U využívaných ochran bude velmi důležitá tzv. směrovost.

Kapitola má za cíl ukázat důležitost sledování těchto zkratových příspěvků a jejich návaznost na nastavení proudových ochran. Pro detailnější závěry a případná konkrétní doporučení je však potřeba vždy detailní analýza šetřeného segmentu distribuční soustavy s rozptýlenými zdroji a také srovnání s uplatněným nastavením ochranných prvků.

4 Provoz distribuční soustavy s uvažováním nových trendů

Vliv nových trendů na distribuční soustavu lze modelovat různými způsoby. V následující části přináším popis těchto způsobů a návrh na možný způsob řešení při výpočtech chodu sítě.

4.1 Metoda Monte Carlo

Metoda Monte Carlo (MC) je založena na experimentálním modelování a matematice. Jde o numerické řešení matematických úloh pomocí modelování náhodných veličin a statistického odhadu jejich charakteristik (pravděpodobnostní charakteristiky různých náhodných procesů a veličin). Použití této metody je velmi univerzální a flexibilní.

Metoda MC je numerická metoda (lze ji tedy využít tam, kde se využívají numerické metody ne u úloh s metodou analytického řešení) a lze s ní řešit libovolné matematické úlohy (nejen úlohy pravděpodobnostního charakteru).[44]

Pro výpočet metodou MC je nutné nejdříve vytvořit model včetně zachycení jeho vnitřních vazeb. Oproti analytickému výpočtu, kdy je chování každého prvku definováno analytickým modelem, při použití metody Monte Carlo se skutečné chování daného systému simuluje s pomocí pravděpodobnostních vztahů, které se zachycují v daném modelu. Pro výpočet příslušných ukazatelů je nezbytná dostatečně dlouhá doba nutná k dosažení definované přesnosti při průchodu stavu systému.

Pro výpočet ukazatelů a určení potřebného opakování kroků simulace se využívá metod matematické statistiky. Hlavní problém při modelování experimentu je určení doby, kdy dochází ke změně stavů. Tato doba se odvozuje z inverzní funkce distribučního rozdělení $F_T(t)$ a s pomocí generátoru náhodných čísel.

Pomocí generátoru náhodných čísel obdržíme údaj z intervalu (0,1) a z funkce $F_T^{-1}(t)$ dostáváme čas změny stavu prvku. Výsledné vztahy pro několik rozložení jsou uvedeny dále (U je náhodně generované číslo z intervalu (0,1)):

Rozložení hustoty pravděpodobnosti výpadků:

Pro exponenciální rozdělení je hustota událostí pravděpodobnosti dána vztahem

$$\frac{1}{\beta} \cdot e^{-\frac{t}{\beta}} \quad (4.1)$$

Vztah pro generování doby nastávání jevu:

$$T = -\beta \cdot \ln(U) \quad (4.2)$$

Pro Weibullovo rozdělení je hustota událostí pravděpodobnosti dána vztahem:

$$\frac{\beta}{\alpha^\beta} \cdot t^{(\beta-1)} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (4.3)$$

Vztah pro generování doby nastávání jevu:

$$T = -\beta \cdot \ln(U)^{\frac{1}{\beta}} \quad (4.4)$$

Takové rozdělení má spojitá náhodná veličina, která představuje dobu života (bezporuchovosti) technických zařízení, kterým nevyhovuje rozdělení exponenciální. Tedy tam, kde se projevuje mechanické opotřebení nebo únava materiálu.

Pro normální rozdělení je hustota událostí pravděpodobnosti dána vztahem:

$$\frac{1}{\delta \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{t-\mu}{2\delta^2}\right)^2} \quad (4.5)$$

Vztah pro generování doby nastávání jevu:

$$z = \frac{(\sum_{i=1}^n U_i) - \frac{\pi}{2}}{\sqrt{\frac{\pi}{12}}} \quad (4.6)$$

$$T = \mu + \delta \cdot z \quad (4.7)$$

Protože k normálnímu rozložení neexistuje primitivní funkce a tedy ani inverzní funkce k distribuční funkci rozložení, využívá se při jeho modelování jiného poznatku. Platí, že lineární kombinace rovnoměrně rozložených náhodných veličin má normální rozložení. Proto ve vztahu pro normální rozložení je nutné generovat několik náhodných hodnot. Druhou možností jak generovat hodnoty normálního rozložení je použít jeho aproximaci racionálně-lomenou nebo transcendentní funkcí. Pro distribuční funkci normálního rozložení je uveden následující vztah[45]:

$$\phi(t) = 0,5 + 0,438 \cdot \left(\arctan \frac{t - \mu}{\delta}\right)^{1,05} \quad (4.8)$$

Jeho inverzí lze dostat výraz, který se dá dále využít pro generování dob změn stavů

$$T = \mu - \delta \cdot \tan \left(-\left(\frac{U - 0,5}{0,438}\right)^{\frac{1}{1,05}} \right) \quad (4.9)$$

Metoda Monte Carlo umožňuje poměrně snadno modelovat různé druhy obnovitelných akcí popř. zachytit i jiné provozní vztahy v soustavě (metoda Monte Carlo se využívá v programech, které mají za cíl optimalizovat náklady na provoz soustavy).

Metodu Monte Carlo lze využít při dvou přístupech – nesequenční (náhodné) a sekvenční.

Nesequenční přístup je založen na přístupu, že každý stav systému je zvolen náhodně podle vybraného rozdělení a nezávisí na předchozím stavu systému. Opakem je pak sekvenční přístup, kdy je zvolena náhodně pouze změna systému (zachovává se stav k minulým stavům). Sekvenční přístup se využívá například při modelování hydrosystémů [45].

Obecně lze říci, že simulační metody jsou výpočetně náročné. Aby bylo dosaženo požadované přesnosti při výpočtu, je nutné danou simulaci mnohokrát opakovat. Náročnost takovýchto výpočtů nezávisí tolik na velikosti modelu, jako na potřebné přesnosti výsledků. Obecně platí, že počet pokusů závisí nepřímo úměrně na kvadrátu požadované přesnosti. Proto je snaha zmenšit počet pokusů simulačních metod pomocí jejich kombinací s analytickými metodami.

Jako příklad může být uvedena metoda korelovaných vzorků. Základem této metody je sestavení analytického modelu, který je úzce korelovaný s částí nebo celým simulačním modelem. Analytický model bývá jednodušší, přesto poskytuje poměrně přesné přiblížení hledaných pravděpodobností. Účelem simulačního modelu je potom zpřesnění prvotního odhadu. Např. velmi jednoduše je možné sestavit spolehlivostní model pro generátorický systém. Tento model slouží jako prvotní odhad pro spolehlivost systému, která je dále zpřesněna uvažáním modelu přenosové sítě modelovaným metodou Monte Carlo. Tato metoda neprovádí analytické výpočty, ale místo toho uvažuje stochastické chování systému.

Při využití této metody se snažíme nalézt souvislost mezi veličinami, které jsou řešením zkoumaného problému a charakteristikami náhodných procesů. Využitím metody Monte Carlo se dostanou hodnoty, které řeší zkoumaný stav pomocí uměle simulace náhodných procesů, které se vytváří tak, aby jejich statistický charakter (např. střední hodnota) byly zkoumanými hodnotami, případně aby se k nim dali přiblížit. Při simulacích se využívá generátoru náhodných čísel, čímž se při stejných vstupech dostává různých výsledků. Tento rozptyl je využit, neboť se dostává statistického rozložení výstupů, ze kterých se následně vypočítávají požadované hodnoty (např. střední hodnota, rozptyl, odchylka). A právě z důvodu rozdílných výsledků při každém výpočtu je potřebné provést velký počet opakování. Tím se zajistí správný výstup.

$$\bar{x} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right) \quad (4.10)$$

Kde

\bar{x} střední hodnota

x_i výsledek i-té simulace

N počet simulací

Střední hodnota všech výstupů může sloužit jako základ pro stanovení počtu potřebných opakování. Pokud střední hodnota konverguje k ustálené hodnotě, znamená to, že počet opakování je dostatečný.

Výstupem při využití metody Monte Carlo, oproti využití analytických metod, je statistické rozložení možných výsledků. Dále lze využít při výpočtech hustoty pravděpodobnosti. Metoda Monte Carlo také snadno modeluje celkové chování systému včetně kaskádových jevů, podmíněných pravděpodobností atp.

Tato metoda samozřejmě zahrnuje i jisté nevýhody, a to náročnost výpočtu, kdy omezení je dáno výkonem prostředků využitých pro simulace a s tím související i doba výpočtu. Další nevýhodou je mírná nepřesnost výpočtu, která je však nahrazena schopností provést citlivostní analýzy a určení dopadu malých změn ve velkých systémech. Přesnost výpočtu roste s větším počtem intervalů, ale spolu s tím roste i náročnost výpočtu. Jelikož se při využití této metody využívá generátoru náhodných čísel, má i tento generátor vliv na výstupy. Nejsou-li tato čísla náhodně generována, nejsou výsledky simulace přesné.

Při využití sekvenční simulace se zkoumaný systém modeluje jako systém skutečný – tedy jednotlivé události na sebe navazují tak, jak se systém vyvíjí v čase. Některé náhodné události jsou modelovány pravděpodobnostním rozdělením a mohou nastat v kterémkoli okamžiku simulace, jiné jsou poté dány výskytem předcházející události anebo aktuálním stavem. Podobné jsou poté i odezvy systému na tyto události, které se modelují také s pomocí pravděpodobnosti.

Při využití této simulace, se celkový časový interval rozdělí do několika časových řezů. Tyto řezy jsou postupně testovány na přítomnost náhodné události a k určení jak systém reaguje na předcházející jevy. Tento přístup je snadno použitelný, dovoluje modelovat složité prvky a chování systémů. Přesnost roste s větším počtem časových intervalů, s tím ovšem roste čas výpočtu. Využije-li se různě dlouhých časových řezů, lze zkrátit dobu potřebnou pro výpočet.

Pravděpodobnost toho, že nastane náhodná událost během časového řezu, je rovna rozdílu pravděpodobnosti výskytu náhodné události na konci řezu a pravděpodobnosti jejího výskytu na začátku řezu. To je přibližně rovno hodnotě hustoty pravděpodobnosti na začátku časového řezu vynásobené dobou řezu. Použití této metody je vhodné, když je systémová odezva vysoce závislá na předcházejících událostech. Příkladem mohou být bouřky, které mohou způsobit vícenásobné vlivy ve stejný čas nebo na stejném místě [45].

Při využití nesequenční simulace se využívá vzájemně nezávislých událostí. Chování systému nezávisí na předcházející události a jednotlivé simulace mohou probíhat v libovolném pořadí. Tento druh simulace je méně náročný na výpočet.

Při simulaci se na začátku ustanoví množina možných náhodných událostí, kdy pro každou z nich je generováno číslo tolikrát, kolikrát se může vyskytnout v simulační periodě. Přesné číslo závisí na použitém pravděpodobnostním rozdělení.

Jestliže má tedy prvek konstantní intenzitu události λ za rok, pravděpodobnost jeho události $Q(t)$ vynásobená počtem těchto událostí n za rok je:

$$Q(t) \cdot n = \frac{\lambda^x \cdot e^{-\lambda}}{x!} \quad (4.11)$$

K určení toho, kolikrát událost nastane v simulovaném čase, je generováno náhodné číslo mezi 0 a 1. Jestliže je:

$x < e^{-\lambda} \Rightarrow$ během zkoumaného období nedojde k žádnému výskytu poruchy

$e^{-\lambda} < x < \lambda \cdot e^{-\lambda} \Rightarrow$ nastane jedna událost

$\lambda \cdot e^{-\lambda} < x \Rightarrow$ nastane vícenásobný počet událostí

4.2 Využití pravděpodobnostního přístupu při výpočtech

Výpočet chodu sítě slouží k ověření provozních stavů distribučních soustav. Těmito výpočty se kontroluje a testuje, zda distribuční soustava vyhovuje požadovaným standardům. Výpočty se provádí vždy pro krajní případy možného provozu soustavy. Tím je okamžik, kdy je daná síť nejvíce zatížená (v období zimního maxima) a kdy je síť nejméně zatížená (období letního minima). Mezi těmito dvěma krajními případy jsou poté všechny zbývající provozní stavy. Na základě výpočtů jsou poté prováděny návrhy na úpravu sítě, případně návrhy na další rozvoj.

S plánovaným rozvojem chytrých sítí a zaváděním nových technologií (hlavně decentralizovaných zdrojů (FVE, kogenerace) a dále s rozvojem elektromobility) začíná potřeba uvažovat o tom, zda je stávající způsob výpočtu sítí dostatečně robustní a vypovídající s ohledem na náhodný a proměnný charakter nových zdrojů a odběrů.

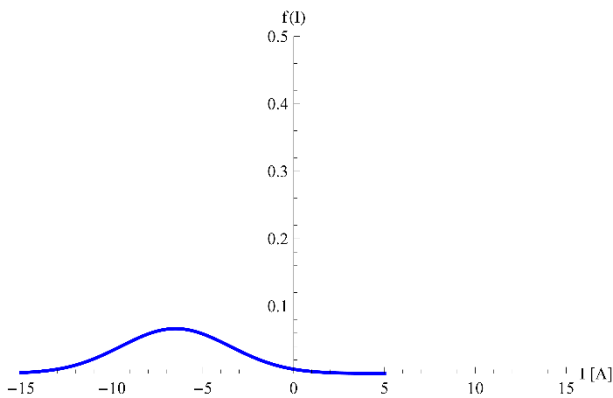
Chování decentralizované výroby a elektromobilů v průběhu dne se obtížně predikuje, neboť závisí na mnoha vlivech, než je tomu u současných klasických výroben a spotřeb elektrické energie. S ohledem na dříve prezentovanou legislativu se lze domnívat, že v následujícím období bude velmi obtížné přesně odhadnout jak a kde se decentralizované zdroje a elektromobily rozšíří. Tato nejistota poté vede k mnoha možným variantám, které by se měly analyzovat, aby se zjistil vliv a dopad na distribuční síť. Může se stát, že zjištěná minima a maxima již nebudou v současných časových obdobích, ale mohou se posunout do libovolného jiného období. V souvislosti s rozvojem zapojení decentralizovaných zdrojů a elektromobilů lze s jistotou předpokládat, že dojde k větší nejistotě vstupních dat a následně nejistotě při interpretaci výsledků. Jednotlivé varianty bude nutno vyhodnocovat a celkový výsledek bude nutné složit z dílčích řešení.[46] - [48]

Návrh řešení

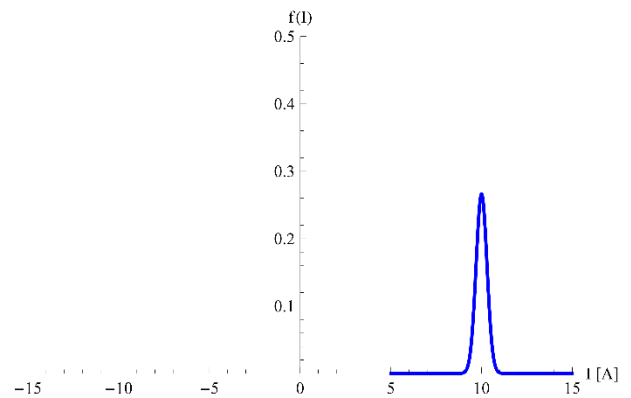
Uvedené problémy s řešením lze řešit dalším možným způsobem výpočtu chodu sítě. Stávající vstupy do výpočtu, které jsou přesně specifikovány, lze nahradit popisem stavu ve formě jejich pravděpodobnostního chování. V daném uzlu soustavy se tedy místo specifické hodnoty velikosti odběru nebo dodávky elektrické energie využije hustoty pravděpodobnosti takového odběru nebo dodávky. Takovýto vstup může nabývat záporných i kladných hodnot, tím se přesně popíše chování daného odběrného místa (buď půjde o spotřebu, nebo o dodávku elektrické energie zpět do sítě). Omezení takovéto funkce pak bude dáno velikostí vstupního jistištění daného odběrného místa. Graf hustoty pravděpodobnosti odběru nebo dodávky musí zohlednit tyto aspekty:

- Náhodné chování daného místa v čase (to bude určeno rozptylem hustoty pravděpodobnosti každého z uvažovaných vstupů)
- Každý uvažovaný vstup bude mít také svou pravděpodobnost uplatnění v daném místě (pomocí váhy vlivu na výslednou hustotu pravděpodobnosti v daném místě)

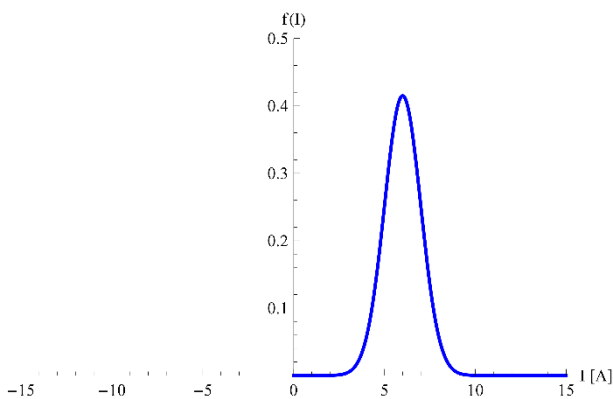
V následující části jsou zobrazeny příklady, jak vypadá graf hustoty pravděpodobnosti pro několik uvažovaných prvků, které budou uvažovány v simulaci tohoto přístupu:



Obrázek 32 - Dodávka z fotovoltaiky

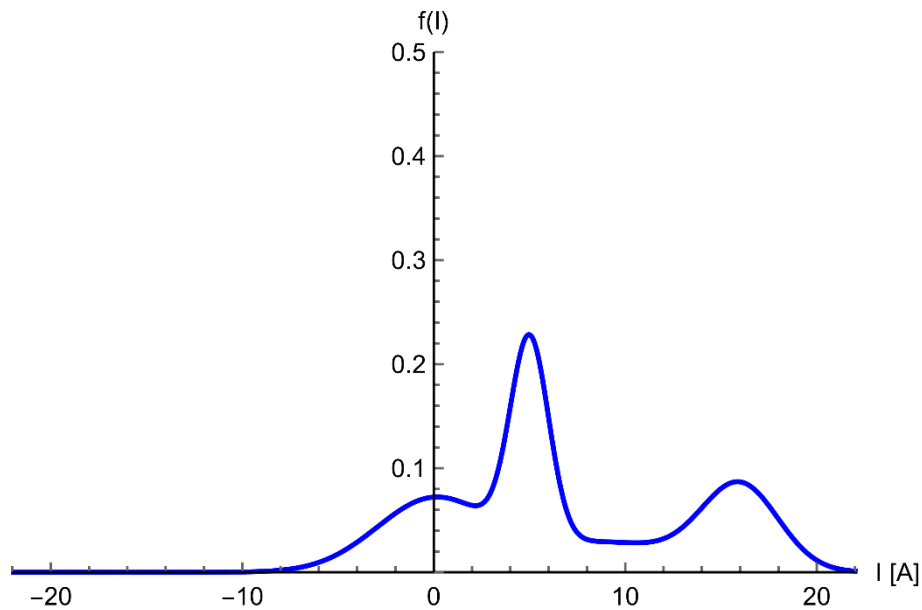


Obrázek 33 - Nabíjení elektromobilu



Obrázek 34 - Standardní odběr

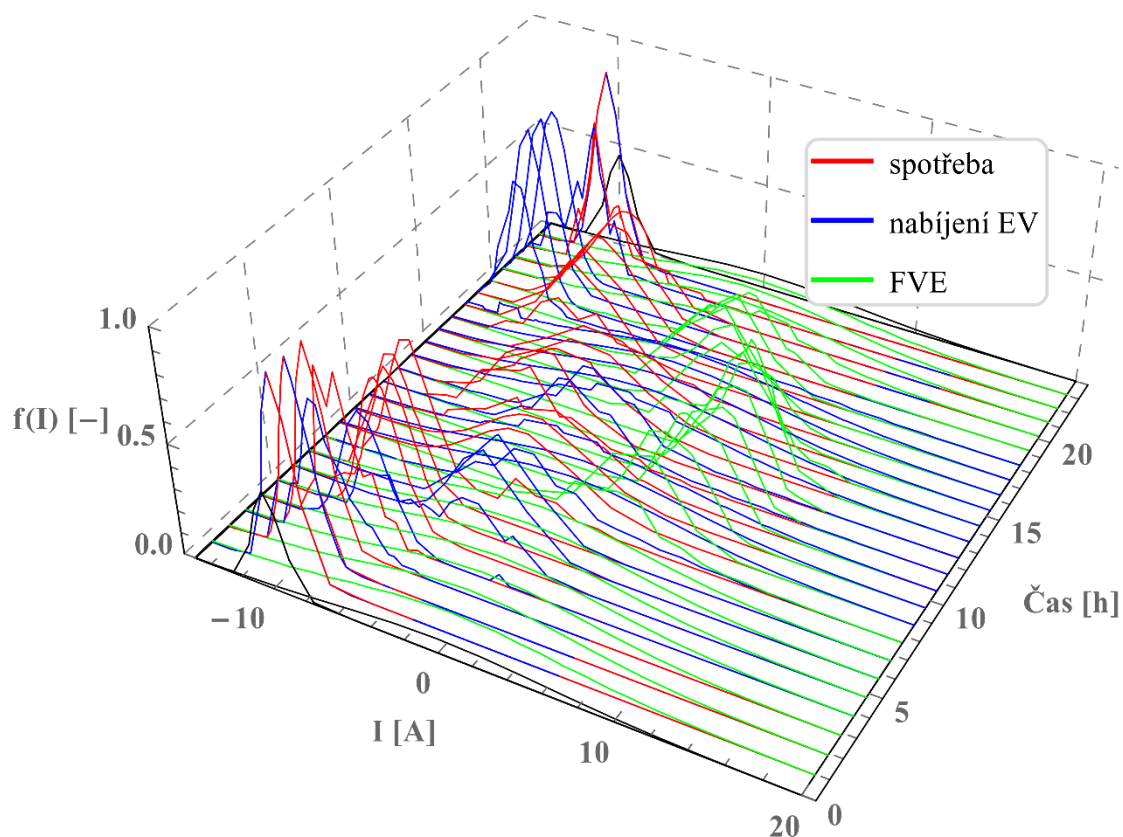
Výsledná hustota pravděpodobnosti za odběrné místo může mít průběh podobný tomu, jak je zobrazen na obrázku 35.



Obrázek 35 - Výsledná hustota pravděpodobnosti za odběrné místo

Každý z takovýchto diagramů popsaných výše lze zkombinovat dohromady a zobrazit. Výsledkem je poté 3D graf (viz obrázek 36), kde na jedné ose je velikost odběru (případně dodávky) elektrické energie (na příkladu reprezentováno proudem I), na druhé ose je hustota pravděpodobnosti takového odběru (dodávky) a třetí osa znázorňuje čas (pro jeden den to je poté 24 hodin). Jeden časový řez z takového diagramu je reprezentován 2D grafem (bez uvažování časového rozměru).

Obecně může být hustota pravděpodobnosti popsána jakoukoli funkcí nebo pravděpodobnostním rozdělením. V uvedených případech využívám normálového rozdělení. Pokud budou vstupní hodnoty velmi přesné, rozptyl vybraného pravděpodobnostního rozdělení bude malý a funkce hustoty pravděpodobnosti bude ostrá (špičatá). V opačném případě, tedy, když vstupní hodnoty budou nepřesné, bude funkce hustoty pravděpodobnosti plochá. Jak je vidět na příkladu uvedeném na obrázku 36, velikost odběru a dodávky je v čase proměnná stejně tak jako je proměnný rozptyl hustoty pravděpodobnosti. Výsledná hustota pravděpodobnosti odběru v uzlu soustavy je poté dána součtem hustot pravděpodobnosti od jednotlivých odběrů či dodávek (jako je FVE, nabíjení elektromobilu, standardní spotřeba, aj.). Takováto výsledná funkce je získána normovanou konvolucí funkcí jednotlivých vlivů.



Obrázek 36 - Příklad kombinace jednotlivých vlivů v jednom uzlu

Algoritmus výpočtu chodu sítě tedy jako se vstupní veličinou pracuje s výslednou hustotou pravděpodobnosti jednotlivých odběrných míst a nikoli s konkrétními hodnotami. Proces výpočtu chodu sítě vychází z výsledných hustot pravděpodobnosti chování daného odběrného místa. Jednotlivé kroky probíhají za využití součtu hustot pravděpodobností jednotlivých odběrných míst. Výstupem z takového výpočtu je poté hustota pravděpodobnosti zatížení napájecího transformátoru a hustota pravděpodobnosti velikosti napětí v jednotlivých uzlech sítě. Z takovýchto výstupů lze pak zjistit, jak velká je pravděpodobnost rozložení napětí a proudů v distribuční síti (a s tím spojené možné porušení mezi bezpečného provozu).

Metodu výpočtu chodu sítě s využitím pravděpodobnosti lze využít na jakoukoli síť.

Výpočet chodu sítě vychází z následujících rovnic.

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = f(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n; U_1, U_2, \dots, U_n) \quad (4.12)$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) = g(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n; U_1, U_2, \dots, U_n) \quad (4.13)$$

Jako zjednodušující předpoklad je pro snadnější řešení chodu sítě s využitím pravděpodobnosti zvolen jednodušší výpočet pomocí stejnosměrného řešení chodu sítě (DC load flow):

$$[I] = [Y] \cdot [U] \rightarrow [U]' = [[Y]']^{-1} \cdot [I]' \quad (4.14)$$

$$[I_{ij}] = \frac{[U_i] - [U_j]}{[Z_{ij}]} \quad (4.15)$$

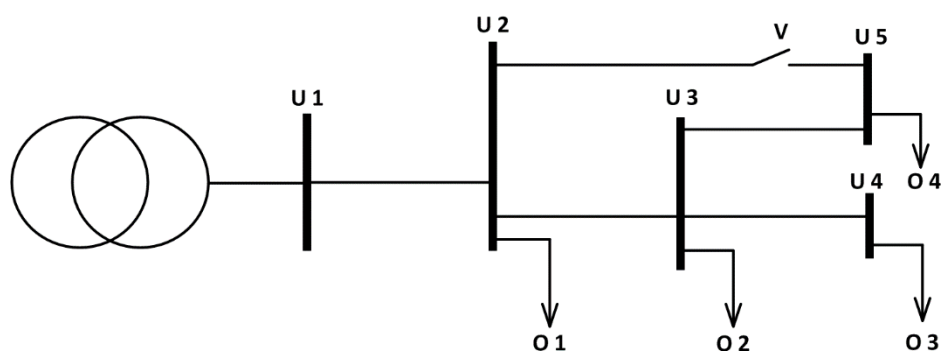
Kde

$[I]$ značí matici uzlových proudů

$[Y]$ značí admitanční uzlovou matici

$[U]$ značí matici uzlových napětí

Na následujícím obrázku je příklad testovacího systému (sítě) Cigre/Cired s pěti uzly, na kterém je prezentován pravděpodobnostní výpočet chodu sítě.

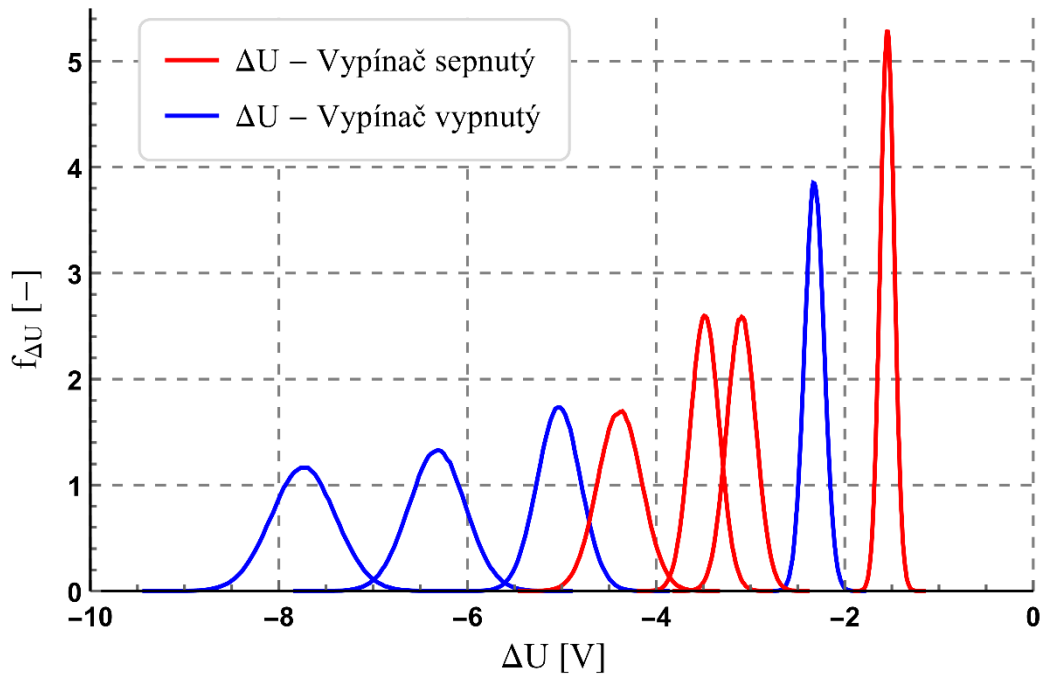


Obrázek 37 - Příklad okružní nn sítě s pěti uzly

Uvedená síť může mít dva režimy provozování. Podle stavu vypínače (V) – pokud je vypnut, provozuje se jako paprsková. Pokud je vypínač sepnut, jde o okružní síť. Na obrázku 38 jsou zobrazeny výsledky výpočtu – úbytky napětí v jednotlivých uzlech pro oba režimy provozu sítě (paprskový a okružní).

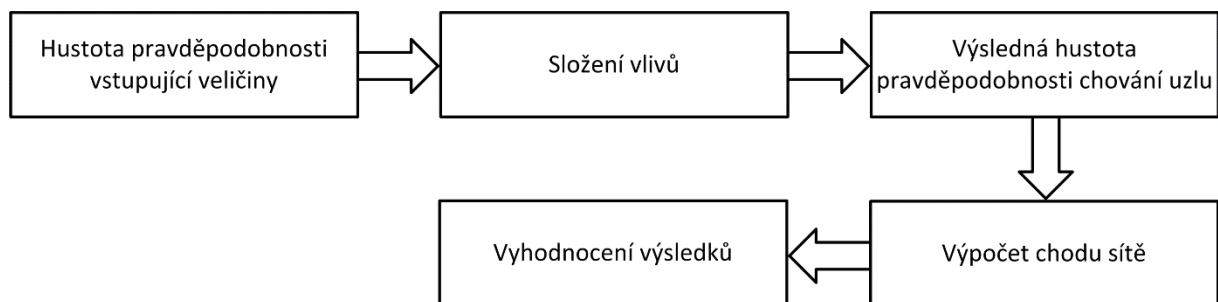
Výstup, který lze získat pravděpodobnostním řešením chodu sítě lze rovněž docílit použitím metody Monte Carlo, která náhodně přiřazuje odběry nebo dodávky do jednotlivých uzlů sítě a počítá chod soustavy pro každé takové přiřazení. Vyhodnocením velkého počtu výpočtů se lze přiblížit k hustotě pravděpodobnosti chování jednotlivých veličin, které se získají díky využití

metody pravděpodobnostního výpočtu chodu sítě. Aby byla metoda Monte Carlo dostatečně vypovídající, je potřebné provést mnoho opakování (desetitisíce) výpočtů chodu sítě.



Obrázek 38 - Úbytky napětí v síti nn v závislosti na stavu vypínače

Funkce hustoty pravděpodobnosti jednotlivých vstupních dat umožní stanovit pravděpodobnost, s jakou se bude výsledek přibližovat k hraničnímu omezení (tedy s jakou pravděpodobností může dojít např. k překročení limitů napětí, případně proudových omezení).



Obrázek 39 - Algoritmus výpočtu

Metodu lze využít při potřebě zjištění překročení zadaných hraničních stavů ve vybraných uzlech.

$$i \in L, \quad L = \{1, 2, \dots, l\}$$

$$k \in N, \quad N = \{1, 2, \dots, n\}$$

Kde

i znamená jedno vedení

l je celkový počet vedení z množiny L všech vedení

k znamená uzel soustavy

n celkový počet uzlů z množiny N všech uzlů soustavy

$$r_{spod_k} = z_k \cdot g_k \cdot \int_{t_1}^{t_2} \int_{-\infty}^{U_{lim_dol_k}} p_{spod_k}(U) \cdot f_{U_k}(U) \cdot dU \cdot dt \quad (4.16)$$

$$r_{hor_k} = z_k \cdot g_k \cdot \int_{t_1}^{t_2} \int_{U_{lim_hor_k}}^{\infty} p_{hor_k}(U) \cdot f_{U_k}(U) \cdot dU \cdot dt \quad (4.17)$$

r_{spod_k} číslo, které vyjadřuje jak moc je velký pokles napětí pod spodní hranici danou v uzlu k

r_{hor_k} číslo, které vyjadřuje jak moc je velký vzrůst napětí nad horní hranici danou v uzlu k

$U_{lim_dol_k}$ dolní hranice možného napětí v uzlu k

$U_{lim_hor_k}$ horní hranice možného napětí v uzlu k

z_k počet odběratelů v uzlu k

g_k koeficient, který může zohlednit důležité odběratele ($g_k \geq 1$)

p_{spod_k} penalizační funkce pro napětí, která jsou menší než spodní hranice daná v uzlu k

p_{hor_k} penalizační funkce pro napětí, která jsou větší než horní hranice daná v uzlu k

f_{U_k} funkce hustoty pravděpodobnosti velikosti napětí v uzlu k

t_1, t_2 začátek a konec analyzovaného napětí, pakliže se časy rovnají, analyzuje se jeden časový řez

Vypočtené hodnoty pro jednotlivé uzly jsou s pomocí síťové distribuční matice převedeny z jednotlivých uzlů na jednotlivá vedení distribuční soustavy.

$$[C_{vedeni_spod}] = [S] \cdot [R_{spod}] \quad (4.18)$$

$$[C_{vedeni_hor}] = [S] \cdot [R_{hor}] \quad (4.19)$$

Kde

$[S]$ je matice, která představuje síťový distribuční faktor

$$[S] = [H] \cdot [Y_{red}]^{-1} \quad (4.20)$$

$[H]$ je matice, která představuje citlivost toků na vedení

$[Y_{red}]$ je uzlová admitanční matice redukováná o uzel slack

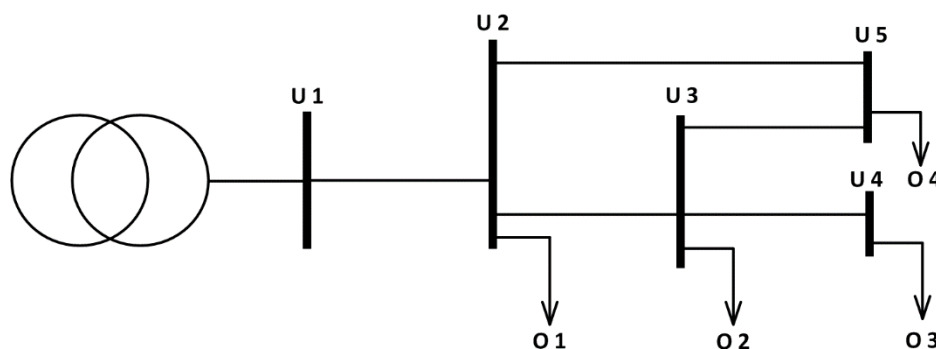
$[S_{ik}]$ je citlivostní koeficient matice $[S]$

$$\begin{bmatrix} C_{vedeni_spod_1} \\ \vdots \\ C_{vedeni_spod_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{i1} & \cdots & S_{ik} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{spod_1} \\ \vdots \\ r_{spod_k} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Výsledné váhové koeficienty $C_{vedeni_spod_i}$ vyjadřují celkový příspěvek vedení i k poklesu napětí pod hraniční hodnotu ve vztahu ke všem uzlům soustavy, spolu s uvažováním počtu a důležitosti dotčených odběratelů. Čím větší je hodnota tohoto koeficientu, tím je dané vedení důležitější a jeho případné posílení bude mít větší přínos.

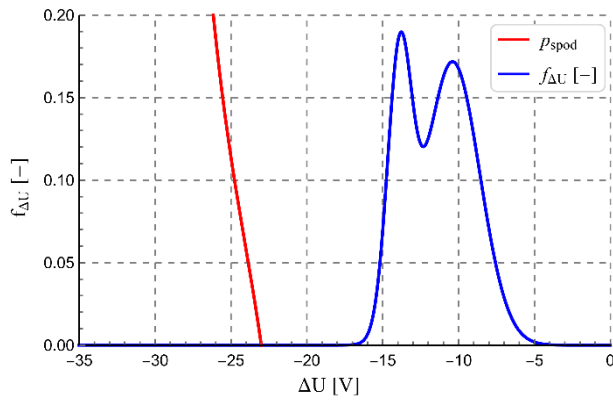
Tato popsaná metoda je univerzální a umožňuje výpočet váhových koeficientů pro vedení. Lze ji využít na všechny typy sítí (paprskové, okružní, mřížové).

Na obrázku 40 je uveden testovací systém sít' s pěti uzly.

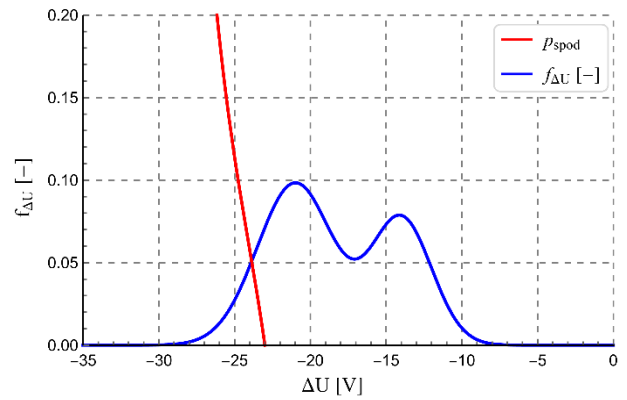


Obrázek 40 - Příklad okružní nn sítě s pěti uzly

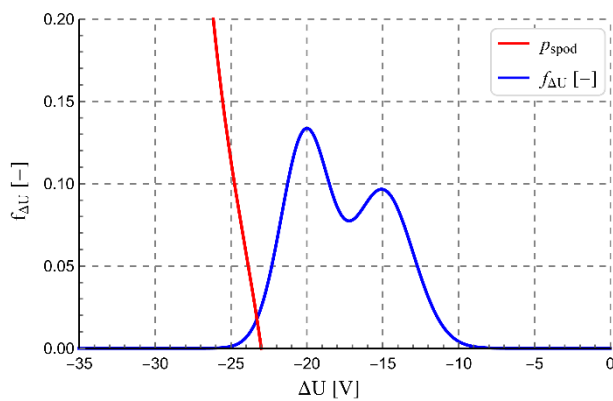
V každém uzlu (U2-U5) je odběr (O1-O4) definován jako spojitá funkce hustoty pravděpodobnosti. Výstupem pravděpodobnostního přístupu k řešení chodu sítě se, jsou poté hustoty pravděpodobnosti možných odchylek napětí v jednotlivých uzlech. Výsledek je vidět na následujících obrázcích 41-44.



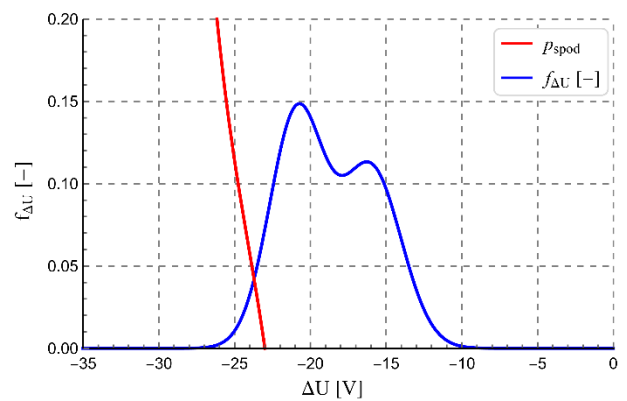
Obrázek 41 - Hustota pravděpodobnosti odchylky napětí v uzlu 1



Obrázek 42 - Hustota pravděpodobnosti odchylky napětí v uzlu 2

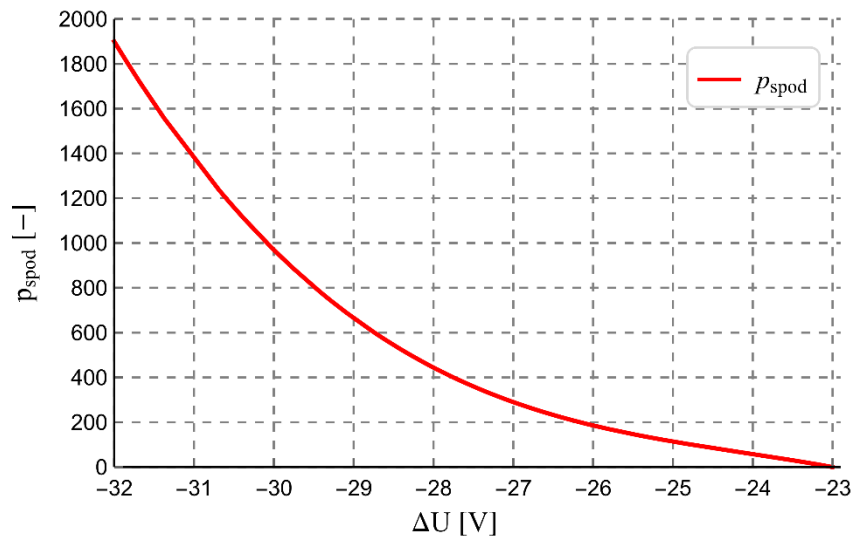


Obrázek 43 - Hustota pravděpodobnosti odchylky napětí v uzlu 3



Obrázek 44 - Hustota pravděpodobnosti odchylky napětí v uzlu 4

Na obrázku 45 je zobrazen průběh penalizační funkce. Ta reprezentuje hraniční oblast v případě podpětí (dle ČSN EN 50160 je hodnota napětí v síti nn stanovena na úroveň 230 V ±10%) – tedy méně než 23 V.



Obrázek 45 - Průběh penalizační funkce

Zavedením penalizační funkce p_{spod_k} a dále stanovením koeficientů z_k a g_k (ty představují významnost uzlu k a počet důležitých odběratelů v tomto uzlu) se dostane hodnota parametru r_{spod_k} . Hodnoty tohoto parametru vyjadřují jak moc je pokles napětí pod stanovanou hraniční hodnotu závažný pro uzel k .

Pro výpočet parametrů jsou zvoleny dva různé příklady pro odlišné hodnoty koeficientů z_k a g_k . V prvním příkladu jsou všechny uzly stejně důležité se stejným počtem zákazníků. Ve druhém případě bude uzel číslo 2 důležitější s větším počtem zákazníků.

Aby bylo možné vypočítat výsledný váhový koeficient $C_{vedeni_spod_i}$, je nutné nejdříve stanovit citlivostní matici $[S]$. Ta má tvar:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0,74 & 0,74 & 0,36 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0,26 & 0,26 & -0,36 \\ 0 & 0,26 & 0,26 & 0,64 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Výsledné váhové koeficienty pro dva uvedené příklady poté jsou následující.

Pro příklad 1:

$$\begin{bmatrix} c_{12} \\ c_{23} \\ c_{24} \\ c_{41} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 32,28 \\ 43,09 \\ 11,12 \\ 11,41 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Pro druhý příklad:

$$\begin{bmatrix} c_{12} \\ c_{23} \\ c_{24} \\ c_{41} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 55,53 \\ 43,09 \\ 19,23 \\ 19,52 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Z výsledků je poté vidět, že pokud by byly všechny uzly stejně důležité, je z pohledu poklesu napětí nejdůležitější vedení mezi uzly 2 a 3 (tedy nejvhodnější například pro posílení vedení). V druhém případě, kdy je uzel 2 důležitější, než zbývající uzly a nejvýznamnějším vedením je vedení mezi uzly 1 a 2.

4.3 Případová studie na připojení decentralních zdrojů a elektromobilů do DS

4.3.1 Vstupní data

Vstupní data pro simulace byla vytvořena za těchto předpokladů:

- byla vytvořena topologie distribuční soustavy,
- simulace byla provedena pro zimní a letní období a sedm dní,
- byly simulovány odběry v uzlech (odhad spotřeby na základě typu tarifu, běžných velikostí jističů).

Odvozené informace:

- Denní diagramy zatížení vytvořené pro odběrná místa:
 - na základě odhadu spotřeby příp. výroby na vývodech,
 - zátěže rozděleny mezi jednotlivé odběry metodou Monte Carlo.

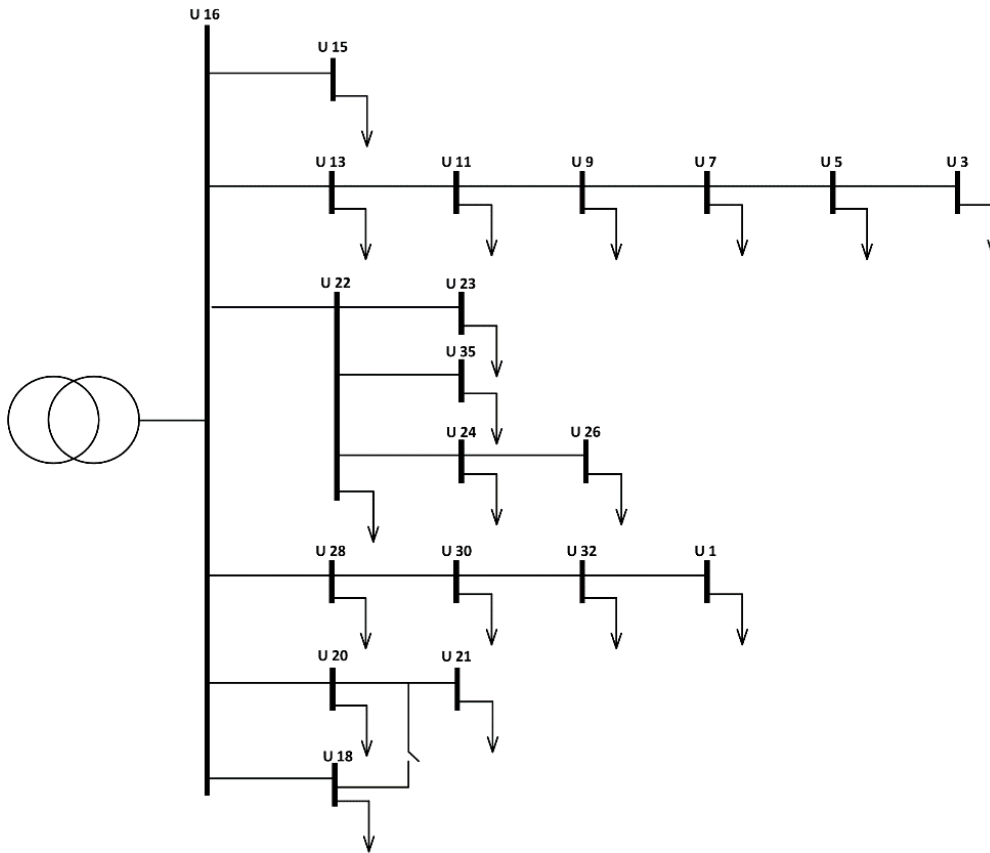
Pro potřeby simulace byly sestaveny balíčky scénářů provozu jednotlivých technologií včetně jejich nasazení v čase.

Vstupní data tvoří několik parametrů:

- navrhnutá topologická data distribuční sítě (délka, druh vedení),
- odběry v místě jednotlivých odběrných míst.

Topologie sítě pro výpočet byla nasimulována dle modelové sítě Cigre/Cired (viz obrázek 46). Síť je rozdělena na jednotlivé úseky, které jsou popsány jejich začátkem a koncem. Součástí

popisu je také název uzlu, který je použit k určení místa odběru. Data obsahují základní schéma sítě v graficky znázorněné podobě.



Obrázek 46 - Simulovaná síť nízkého napětí

Simulovaná síť se skládá z distribučního transformátoru a z něho vycházejících šesti paprskových vývodů. Jeden z vývodů se dále dělí na tři paprsky. Dva z vývodů jsou uvažovány ve smyčce. Na každý paprsek jsou napojeni různí simulovaní odběratelé (domy, panelové domy, příp. menší nákupní dům – uzel 21), kteří představují různou velikost činné zátěže.

Soubory odběrů obsahují odhadnutou roční sumární spotřebu energie (činný výkon).

Simulovaná data jsou zvlášť pro dvě období - zimní a letní. Simulace je provedena pro jeden týden (7 dní).

Příprava sítě modelu

Topologická část

Za uzel grafu je považováno spojení více úseků vedení. Není tedy rozebírána do hloubky vnitřní struktura, která by způsobila značné zesložiténí situace a pro základní popis je zavádějící.

Ze vstupních topologických dat byly vytvořeny grafy popisující spojení jednotlivých uzlů sítí. Každý graf je souvislý (neobsahuje separátní části). Ke každé hraně grafu byly určeny elektrické parametry (impedance dané části po fázích včetně nulového vodiče).

Z grafu modelu byla sestavena admitanční matice celé soustavy potřebná pro další výpočet.

Připojení odběrných míst

Ke každému uzlu grafu byl určen seznam odběratelů, které jsou do něho připojeny. Napět'ová fáze připojení byla určena pomocí pravidel:

- 1) třífázový odběr je rozdělen rovnoměrně mezi fáze
- 2) jednofázový nenulový odběr v uzlu je připojen k náhodně vybrané fázi. Důvodem této náhodné strategie je, zkušenost z praktických zapojení, kdy nejsou k dispozici informace o přesném připojení každého z odběru, a celkový výkon v uzlu je nutné rozdělit.

Výpočet výchozího ustáleného stavu sítě

Dalším krokem při znalosti topologie sítě a velikosti odběrů bylo určení ustáleného stavu sítě pro daný časový okamžik. Proto byl výpočet proveden opakovaně pro přibližně $6 \cdot 24 \cdot 7 = 1008$ hodnot za týden pro každý uvažovaný scénář.

Časové diagramy zatížení (výroby)

Z různých zdrojů byly získány různé druhy charakterů odběrů (výroby) denních diagramů. Tyto diagramy můžeme dle charakteru rozdělit do dvou skupin:

- 1) Diagram chování jednoho zařízení.
- 2) Diagram chování skupiny zařízení daného charakteru.

Bylo vygenerováno velké množství denních diagramů podle bodu 1), které na základě pravděpodobnosti rozložení provozu dosahovaly v součtu přibližně diagram 2). Provedené změny dílčích diagramů 1) byly provedeny s ohledem na charakter a způsob zátěže. Denní diagramy byly dále rozděleny z hlediska hodnot na:

- bezrozměrné (max. jednotková velikost výkonu),
- se zahrnutím velikosti zátěže (kW).

Druhou skupinu tvořily elektromobily o několika výkonových řadách. První skupinu pak tvořily ostatní druhy zátěže (klimatizace, tepelná čerpadla) a výroby (fotovoltaika, mikrokogenerace).

Pro každý denní diagram byly řešeny některé následující parametry v závislosti na jejich možnosti uplatnění:

- náhodnost velikosti zátěže (výroby),
- minimální (maximální) délka chodu zátěže v celku,
- minimální (maximální) délka nečinnosti zátěže v celku.

Celková spotřeba energie za dané období (platí to především pro elektromobily a nabíjení) záleží na charakteru nabíjecí stanice – soukromá (většinou jedno auto), nebo veřejná (více automobilů, u kterých je potlačen vliv velikosti nabíjecí kapacity baterií).

Další modelované aspekty zahrnují:

- cyklování vlivem termostatu (tepelné systémy),
- posun maxima zátěže v čase a rychlý nárůst (pokles) zátěže v čase (fotovoltaika – vliv mraků),
- zohlednění polohy a velikosti maxima u FVE (různé diagramy pro léto a zimu),
- vliv ročního období na charakter zátěže (spotřeba TUV),
- vliv dne v týdnu – o víkendu nepracuje tolik průmyslové výroby. Někteří lidé jsou více doma a nedochází k výrazným ranním a odpoledním (večerním) špičkám v domácnostech tak jako v pracovní dny.

Umístění denních diagramů do sítě

Připravené týdenní diagramy byly umístěny do modelu sítě podle dvou předpokladů:

- 1) Umístěny do daného uzlu i vícenásobně (jde především o klimatizační jednotky, tepelné čerpadlo, mikrokogeneraci a elektromobil)
- 2) Umístěny přímo do uzlu odběrného místa (celý dům) (jde především o FVE)

Při umísťování diagramů do odběrného místa je uvažováno s vlivem nepravděpodobnosti provozu více podobných zařízení (např. mikrokogenerace nebo tepelné čerpadlo).

Velikost odběru (násobící koeficient), pokud je potřeba, je odvozen od výkonových řad různých druhů zařízení a jejich velikosti.

Parametr penetrace je mimo FVE počítán z celkového počtu simulovaných odběrných míst. Penetrace je určena jako počet odběrných míst, kam se umístí diagramy ku počtu všech odběrných míst.

Nejprve je načten počáteční stav bez přidávaných diagramů. Po vložení dalších odběrů (výrob) do sítě formou diagramů je vypočítán nový ustálený stav v daném časovém období. Celý výpočet je opakován ve velkých sériích pro mnoho scénářů přidávání nových diagramů a časových řezů.

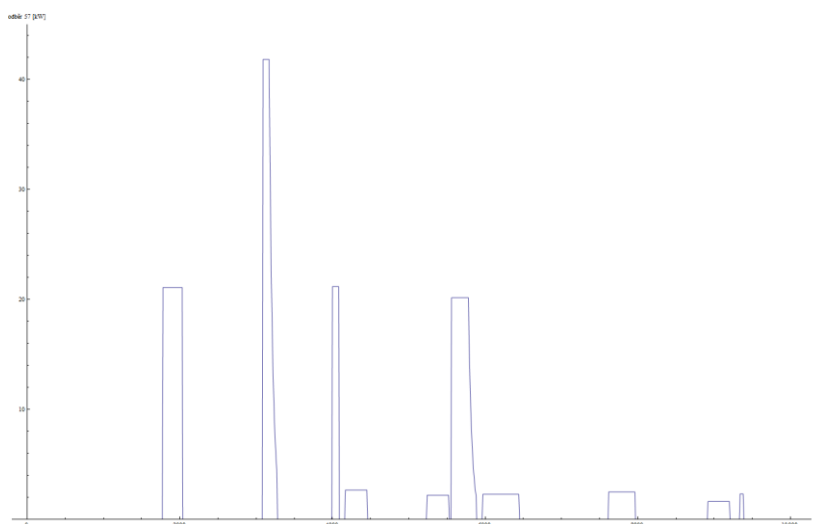
4.3.2 Přehled simulovaných scénářů

Elektromobilita

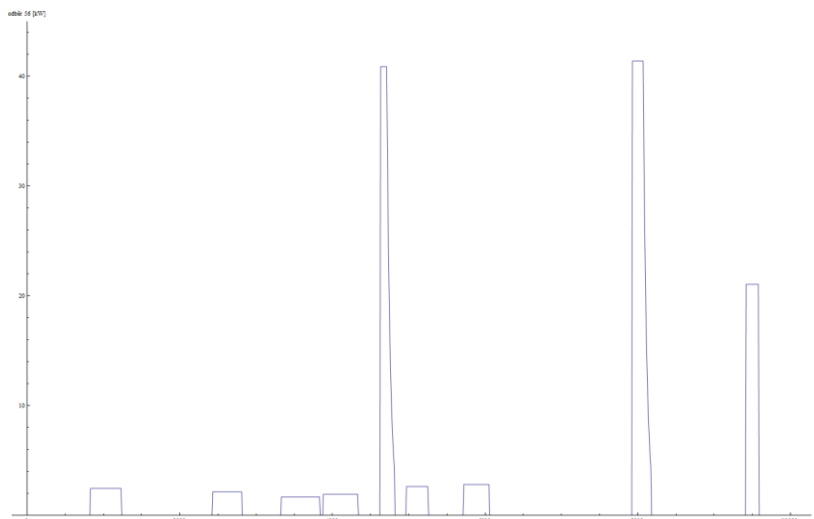
Scénáře zahrnují následující technologie:

- Plug-in hybridní elektromobily,
- Standardní nabíjení,
- Rychlodobíjení.

Příklad jednoho scénáře pro letní období a jednoho pro zimní období využitého při simulaci je uveden na obrázku 47 a 48. Jde o scénáře provozu nabíjecích stanic nebo individuálních nabíječek pro elektromobily v průběhu jednoho týdne.



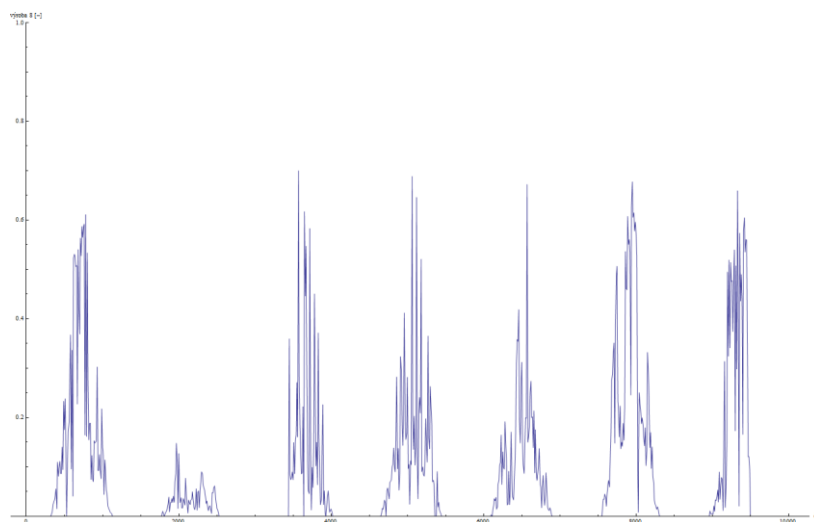
Obrázek 47 - Příklad simulovaného scénáře elektromobility - léto



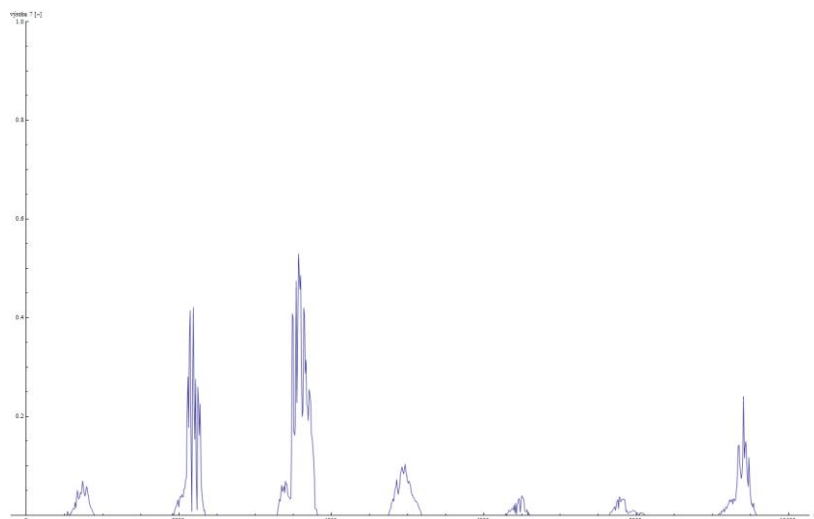
Obrázek 48 - Příklad simulovaného scénáře elektromobility - zima

Fotovoltaické systémy

Příklad jednoho scénáře pro letní období a jednoho pro zimní období využitého při simulaci je uveden na obrázku 49 a 50. Jde o scénáře možného provozu fotovoltaických systémů v průběhu jednoho týdne. Hodnoty jsou uvedeny jako bezrozměrné, v průběhu simulace je hodnota vynásobena simulovaným instalovaným výkonem v dané lokalitě.



Obrázek 49 - Příklad simulovaného scénáře fotovoltaický systém - léto

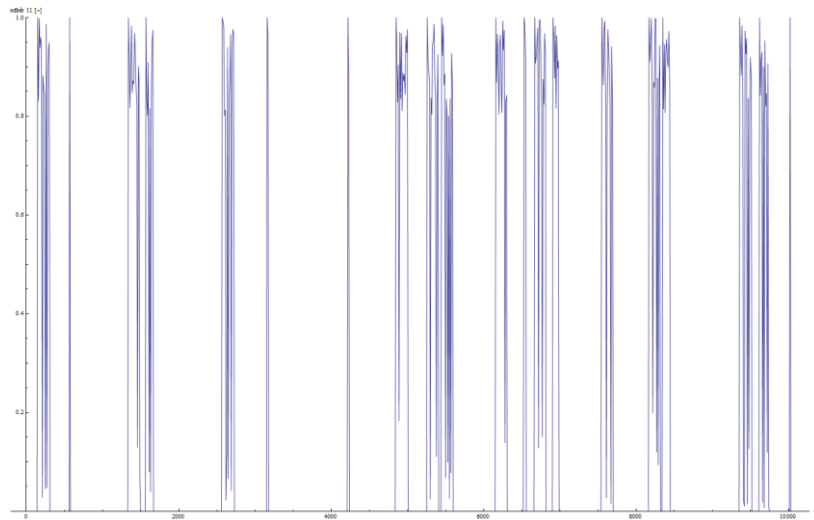


Obrázek 50 - Příklad simulovaného scénáře fotovoltaický systém - zima

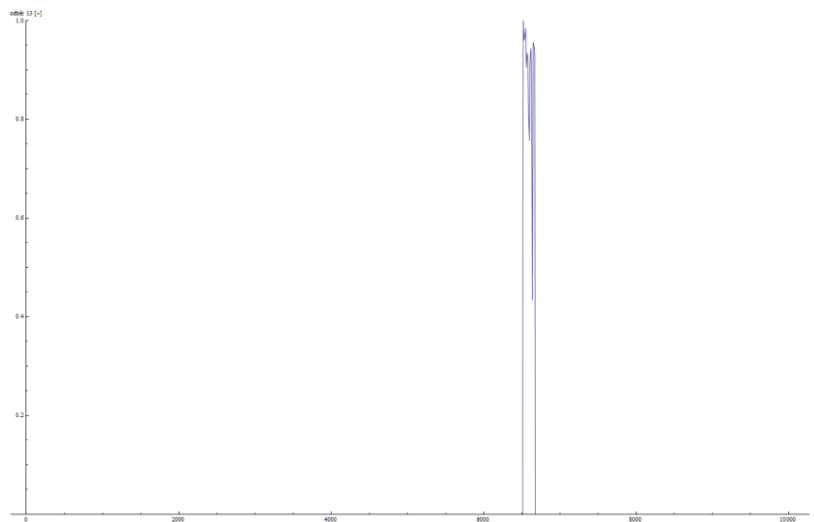
Klimatizace a tepelná čerpadla

Klimatizace se skládá ze dvou jednotek, jednotky vnitřní a jednotky venkovní. Obě jednotky jsou mezi sebou propojeny párem potrubí, jimiž proudí chladivo. Kompressor žene stlačené plynné chladivo o vysoké teplotě přes kondenzátor, kde ventilátor umožní lepší rozptýlení vznikajícího tepla. Kondenzátor se okolním vzduchem ochlazuje a dochází ke zkapalnění chladiva. Nyní již kapalné chladivo o nízké teplotě je přes expanzní ventil distribuováno do vnitřní jednotky a dále do výparníku. Výparník odebírá teplo z místnosti a ohřívání a expanze má za následek opětovnou změnu skupenství chladiva z kapalného na plynné. Při kondenzování dochází ke vzniku rosy, která je zachytávána.

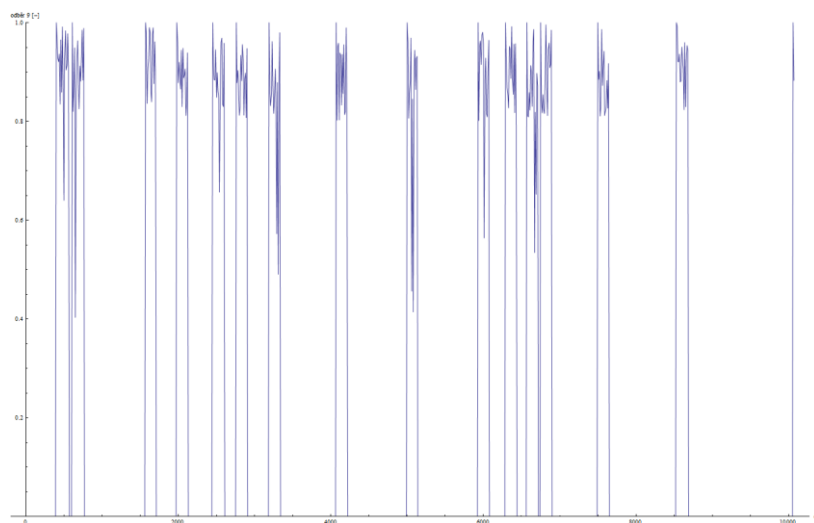
Příklad jednoho scénáře pro letní období a jednoho pro zimní období využitého při simulaci je uveden na obrázcích 51-53. Jde o scénáře možného provozu klimatizačních jednotek a tepelných čerpadel v průběhu jednoho týdne. Hodnoty jsou uvedeny jako bezrozměrné, v průběhu simulace je hodnota vynásobena simulovaným instalovaným výkonem v dané lokalitě, výkon je vybírán z výkonové řady běžně dostupných jednotek.



Obrázek 51 - Příklad simulovaného scénáře klimatizace – léto



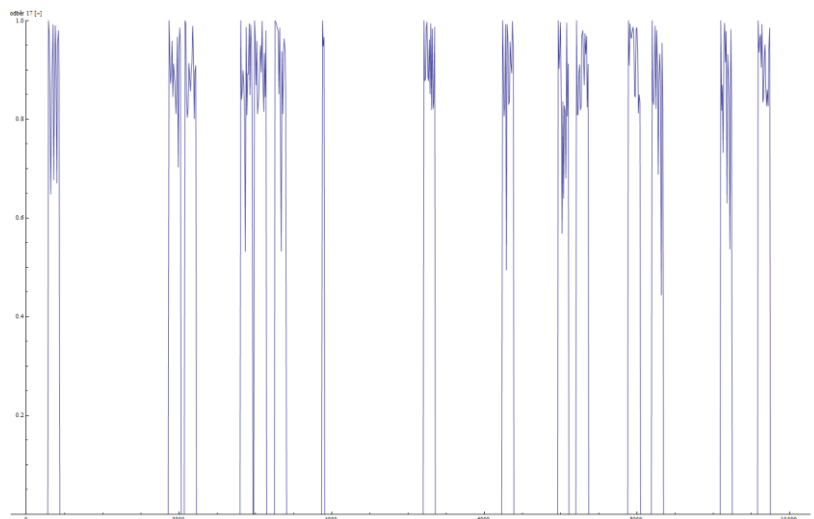
Obrázek 52 - Příklad simulovaného scénáře tepelné čerpadlo – léto



Obrázek 53 - Příklad simulovaného scénáře tepelné čerpadlo – zima

Kogenerační jednotky

Každý obrázek ukazuje deset variant scénářů charakteru provozu kogeneračních, resp. mikrokogeneračních jednotek v průběhu jednoho týdne. Hodnoty jsou uvedeny jako bezrozměrné, v průběhu simulace je hodnota vynásobena stanoveným instalovaným výkonem v dané lokalitě, výkon je vybírán z výkonové řady běžně dostupných jednotek.



Obrázek 54 - Příklad simulovaného scénáře kogenerační jednotka – zima

4.3.3 Výstupy simulace

Níže jsou zobrazeny výstupy, které zobrazují průběh napětí a proudů na uvedeném modelu sítě vždy pro konkrétní nasazení uvažovaných scénářů (viz popis u jednotlivých průběhů).

Pro porovnání jsou vždy v jednom obrázku uvedeny dva scénáře – zima a léto. Dále jsou zde uvedeny statistická vyhodnocení – tedy minimum, maximum, dolní a horní kvantily (vždy 95% a 99%).

V každém grafu je vždy ve spodní části uvedeno liniové schéma topologie modelové sítě pro snazší orientaci.

Napěťový graf ukazuje rozložení napětí v jednotlivých uzlech simulované soustavy. Proudový graf pak ukazuje velikosti proudů tekoucích v jednotlivých větvích uvažovaného modelu.

Jednotlivé grafy výstupů ze simulace jsou pak udělány tak, že se jednotlivé paprsky (viz schéma na obr. 46) simulované sítě složili v grafu za sebe.

Vysvětlení značek vyskytujících se v označení výsledků

K_{Min} , K_{Max} – rovnoměrné rozdělení mezi těmito hodnotami.

FVE – fotovoltaické systémy

Emob – elektromobilita (výkon umístěný na odběrné místo)

Odebíraný výkon = $\langle K_{Min}, K_{Max} \rangle * \{43; 2,4; 3,6; 20 \text{ kW} \}$

Klima – klimatizace - výkon umístěn na uzel: k z hodnot $\{1,2,3,4 \text{ kW} \}$

TC – tepelná čerpadla - výkon umístěn na odběrné místo: k z hodnot $\{1,2,3,4 \text{ kW} \}$

uKogen – mikrokogenerace - výkon umístěn na odběrné místo: k z hodnot $\{1,2,3,4 \text{ kW} \}$

Vysvětlivky legendy jednotlivých výstupů:

Max-scénář znamená maximální spočtenou hodnotu příslušného scénáře

Q0.99H-scénář znamená spočtený 99% horní kvantil příslušného scénáře

Q0.95Hscénář znamená spočtený 95% horní kvantil příslušného scénáře

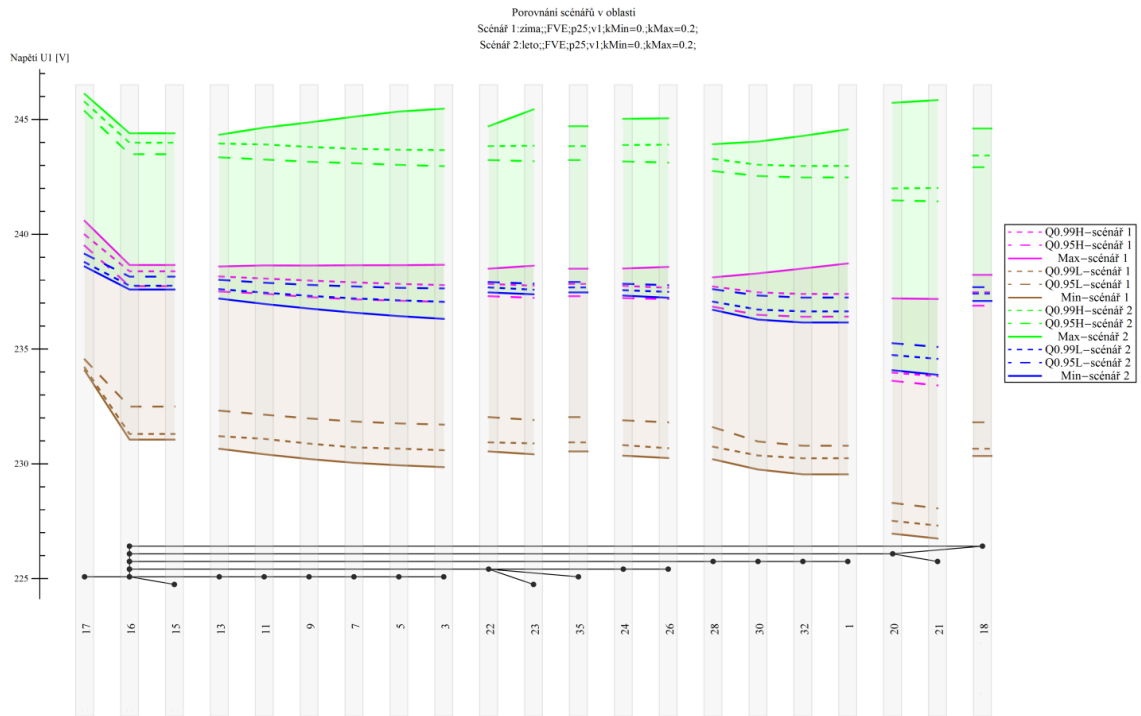
Min-scénář znamená minimální spočtenou hodnotu příslušného scénáře

Q0.99L-scénář znamená spočtený 99% dolní kvantil příslušného scénáře

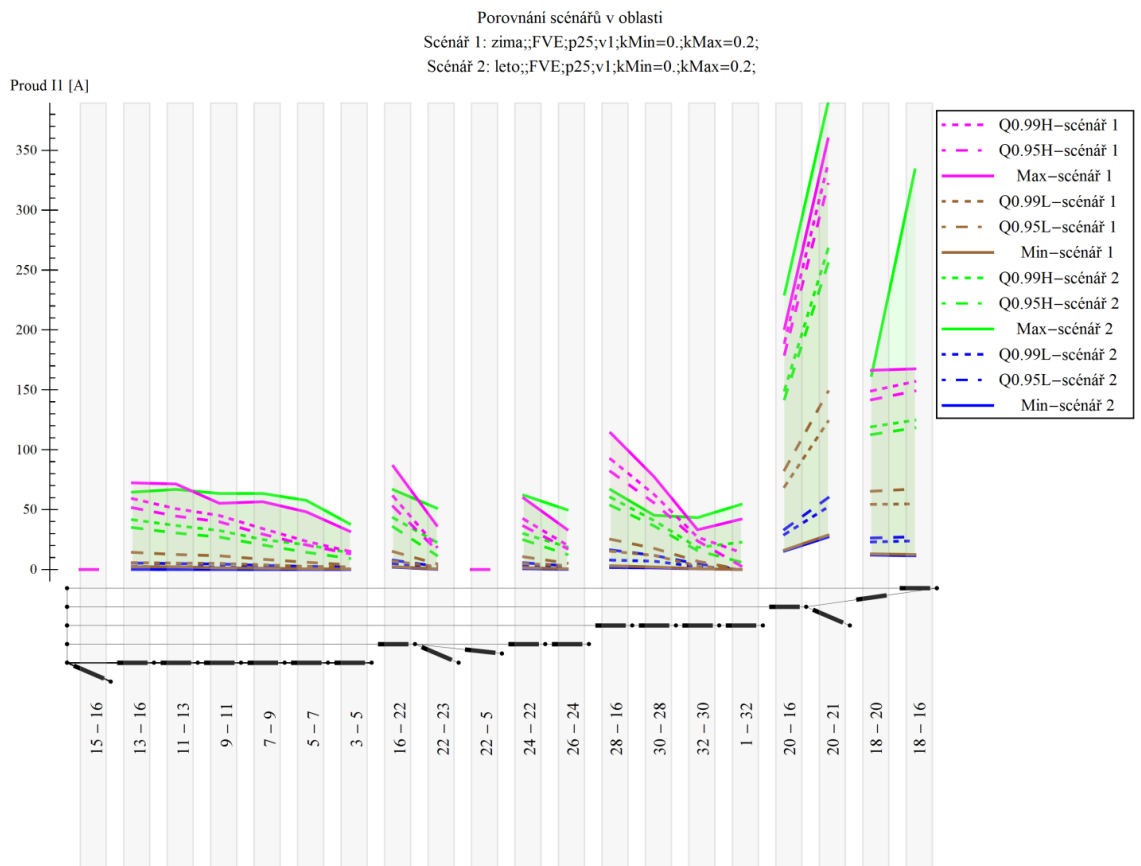
Q0.95Lscénář znamená spočtený 95% dolní kvantil příslušného scénáře

Zapojení FVE

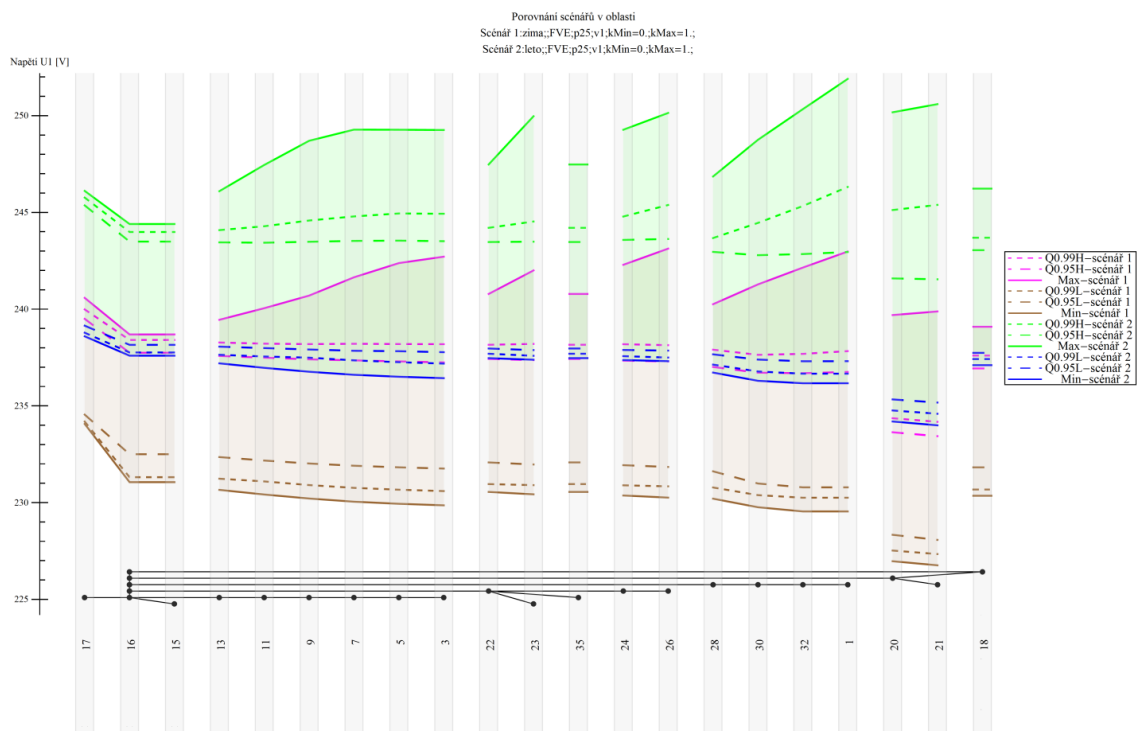
Na následujících průbězích je zobrazen průběh napětí a proudů v jednotlivých vývodech modelované sítě při uvažování vlivu fotovoltaiky do sítě při rozložení K_{Max} 0,2 a 1 a penetraci 25 % (obrázky 55-58) a 50 % (obrázky 59-62).



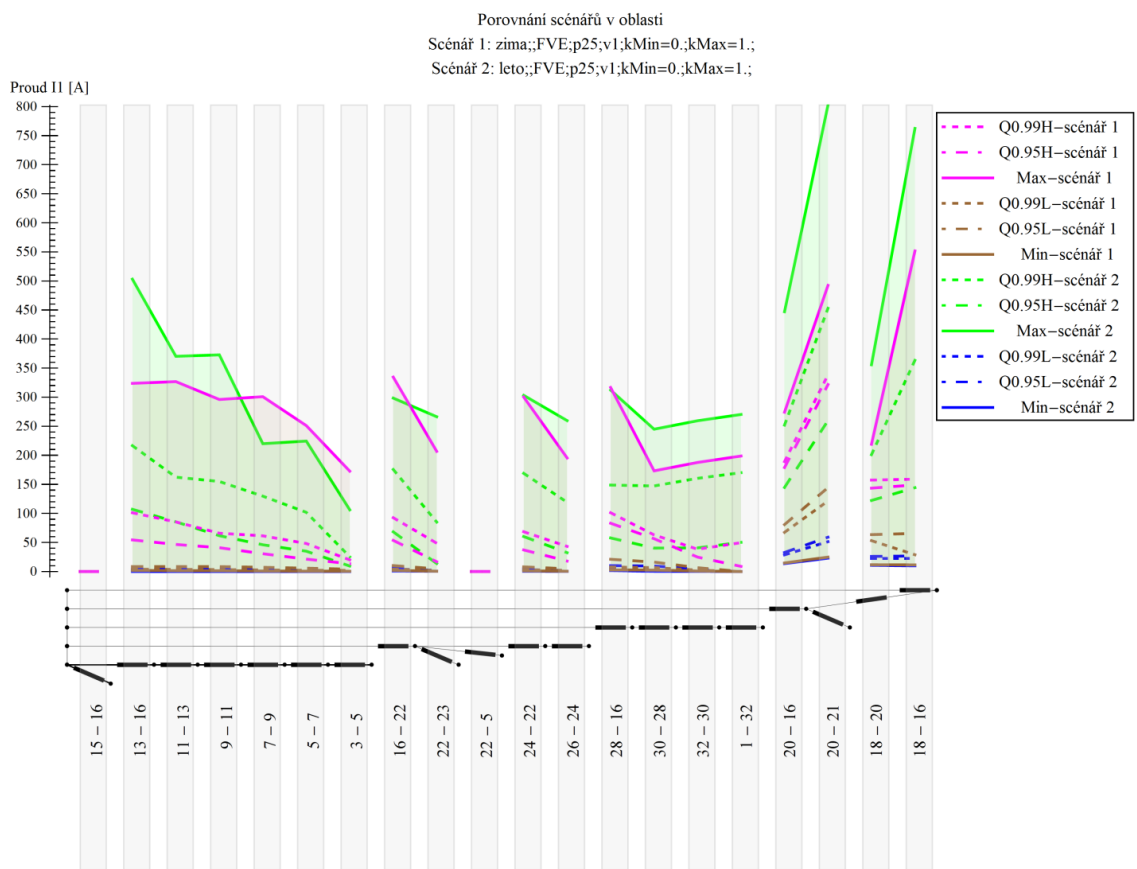
Obrázek 55 - Průběh napětí při zapojení FVE při penetraci 25 % a rovnoměrném rozdělení K_{Max} 0,2



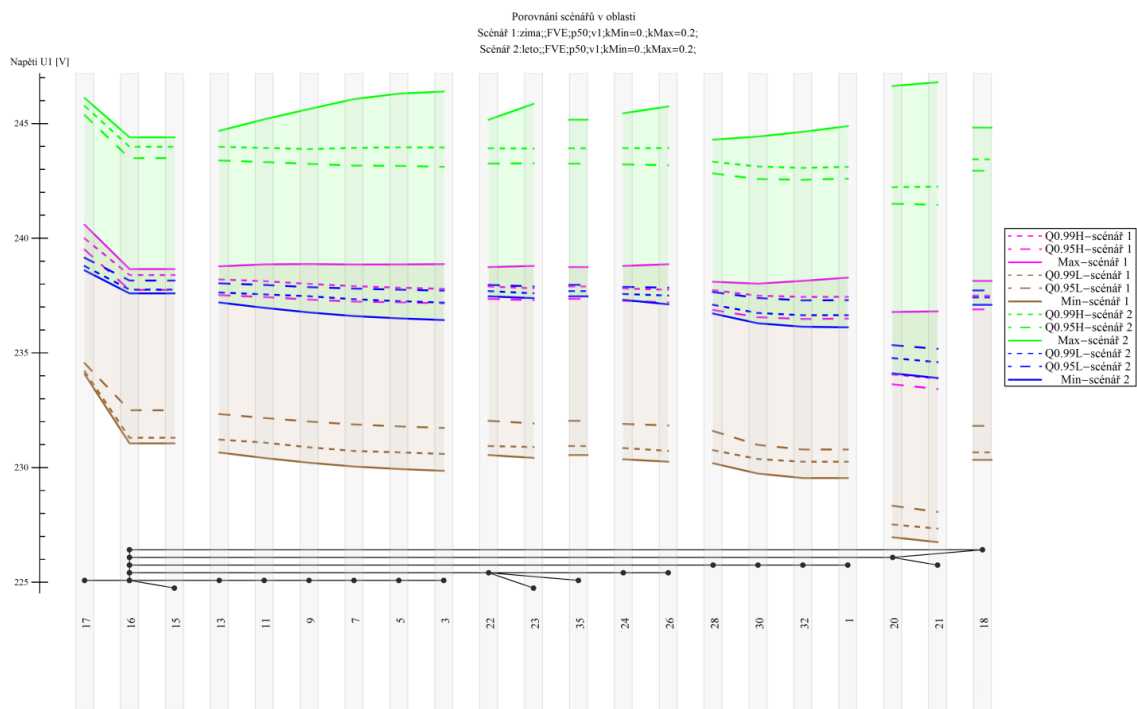
Obrázek 56 - Průběh proudů při zapojení FVE při penetraci 25 % a rovnoměrném rozdělení K_{Max} 0,2



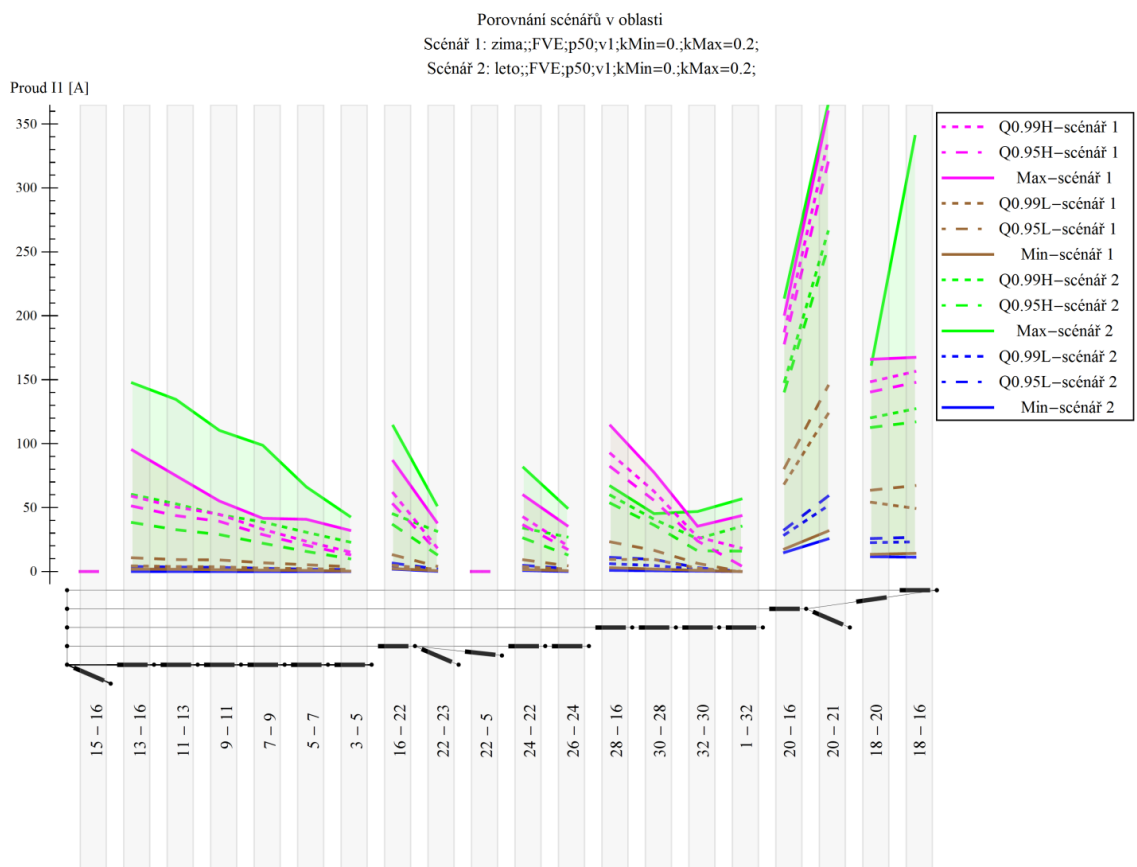
Obrázek 57 - Průběh napětí při zapojení FVE při penetraci 25 % a rovnoměrném rozdělení K_{Max} 1



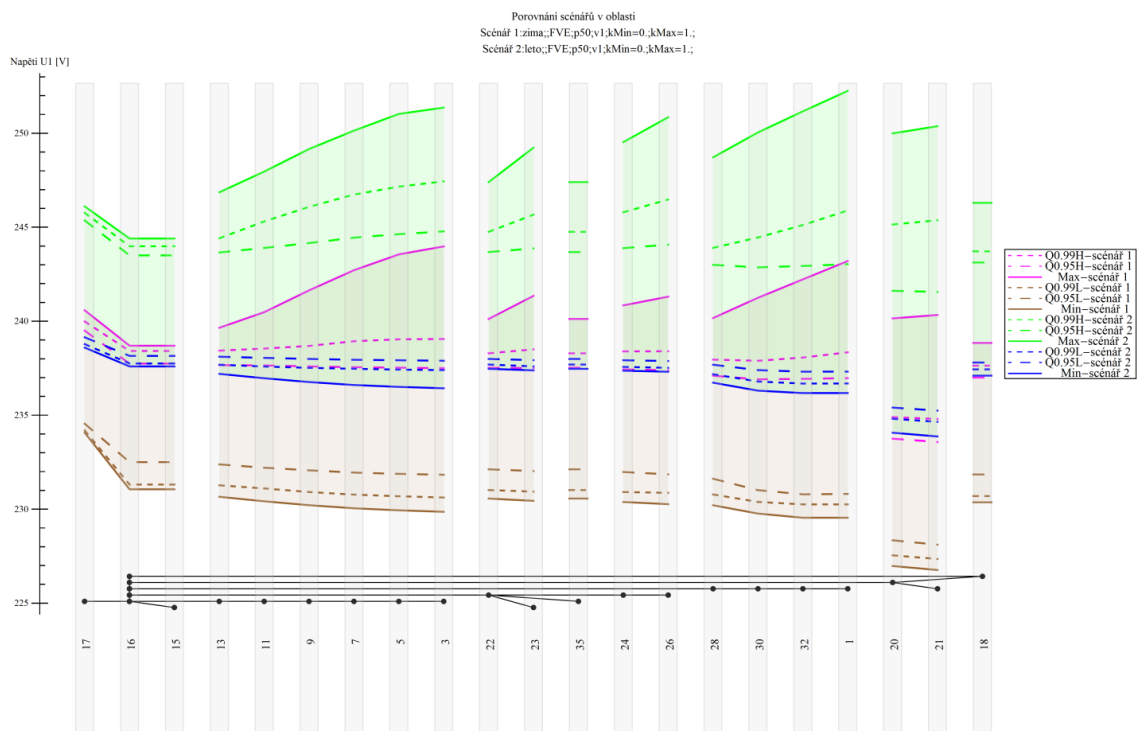
Obrázek 58 - Průběh proudů při zapojení FVE při penetraci 25 % a rovnoměrném rozdělení K_{Max} 1



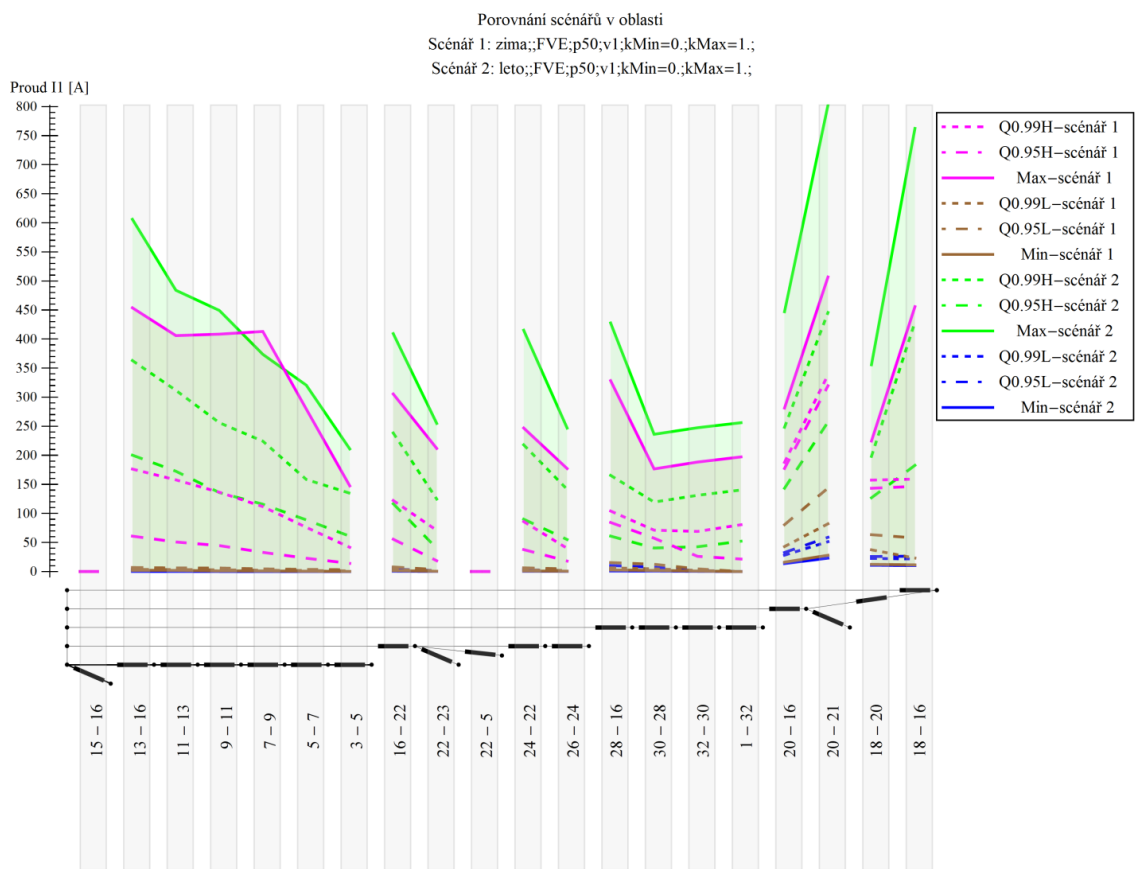
Obrázek 59 - Průběh napětí při zapojení FVE při penetraci 50 % a rovnoměrném rozdělení K_{Max} 0,2



Obrázek 60 - Průběh proudů při zapojení FVE při penetraci 50 % a rovnoměrném rozdělení K_{Max} 0,2



Obrázek 61 - Průběh napětí při zapojení FVE při penetraci 50 % a rovnoměrném rozdělení K_{Max} 1



Obrázek 62 - Průběh proudů při zapojení FVE při penetraci 50 % a rovnoměrném rozdělení K_{Max} 1

Analýza provedené simulace se zapojením pouze fotovoltaiky ukazuje, že při vyšších penetracích se síť může dostat k oblasti, která bude hraniční s ohledem na napěťové poměry.

Norma ČSN EN 50160 (charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě) udává jmenovité provozní napětí U_n na hladině 230 V. Za normálních provozních podmínek by odchylka napájecího napětí neměla přesáhnout $\pm 10\%$ jmenovitého napětí U_n .

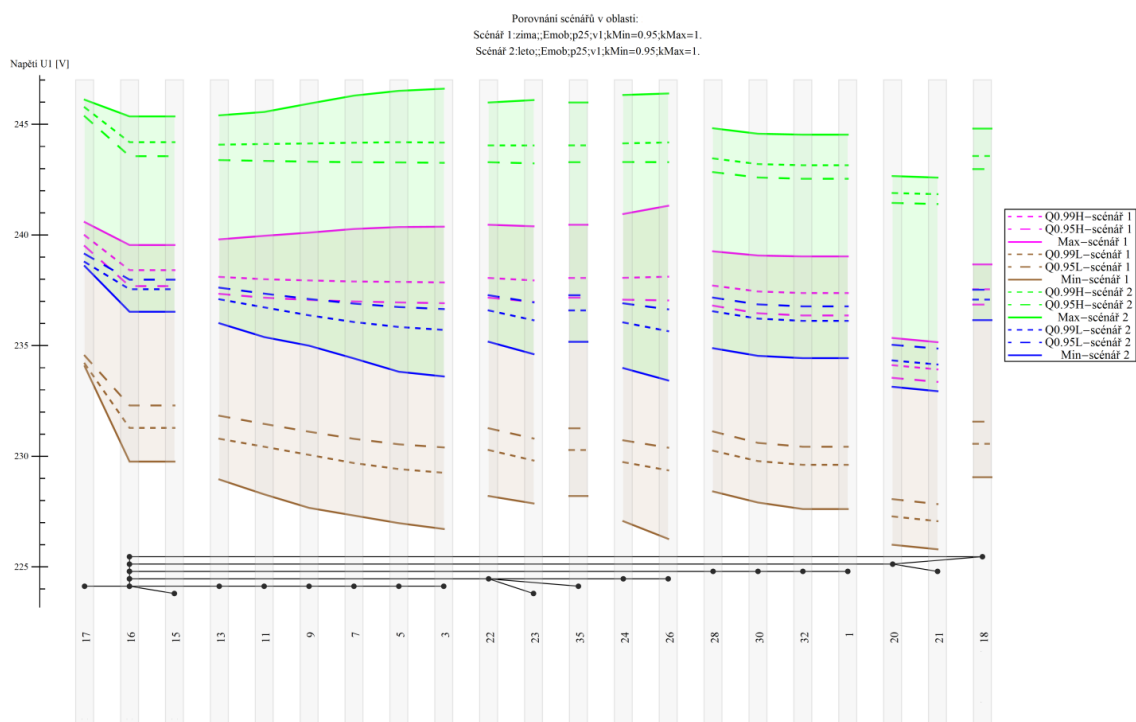
Z provedené simulace je vidět, že při 50 % zapojení FVE je dosažení hraniční hodnoty 253 V možné. Obecně je patrné, že napětí v celé síti je vyšší než jmenovité provozní napětí.

Dále je patrné, že při nižší penetraci a rozdělení FVE v síti je příspěvek výroby ve scénáři zima a léto stejný (viz obr. 56).

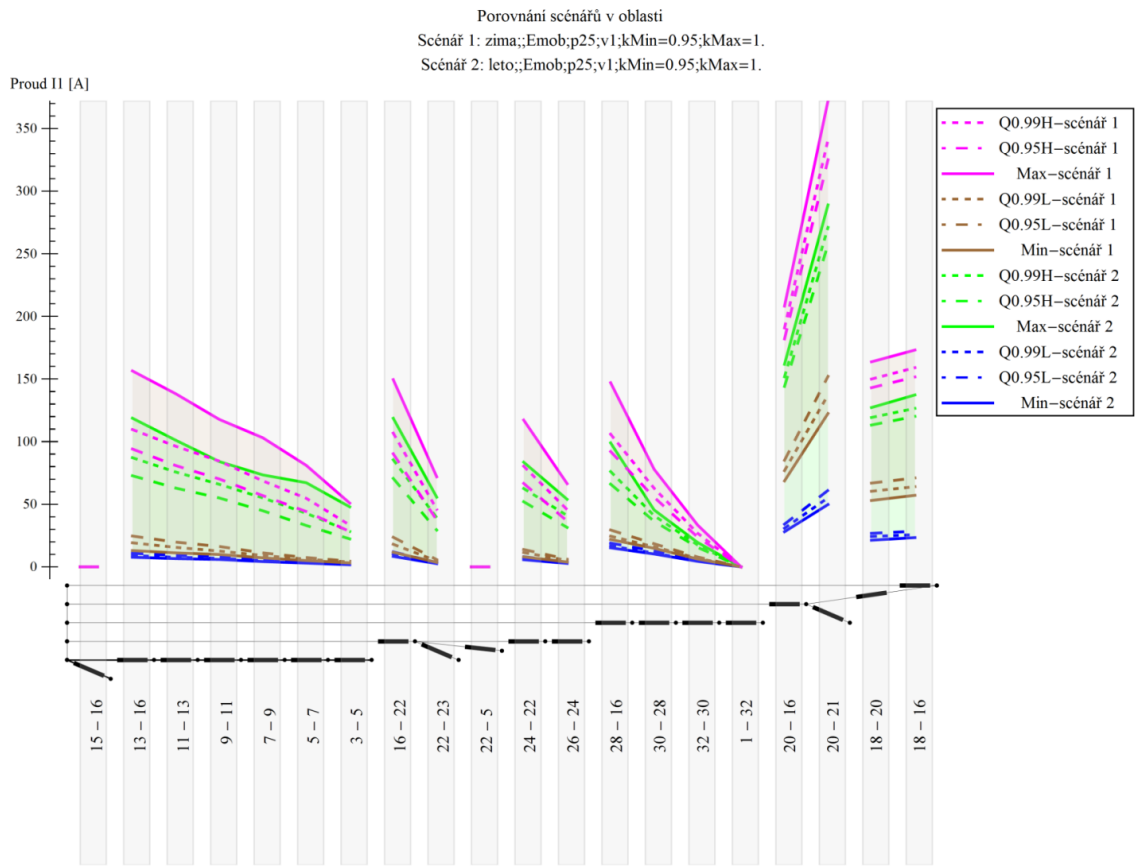
Vysoké hodnoty proudu mezi uzly 20 a 21 jsou dány zvolenou topologií soustavy. V uzlu 21 je simulován menší nákupní dům, na jeho střechu je tedy počítáno s větším osazením fotovoltaických panelů.

Zapojení Elektromobility

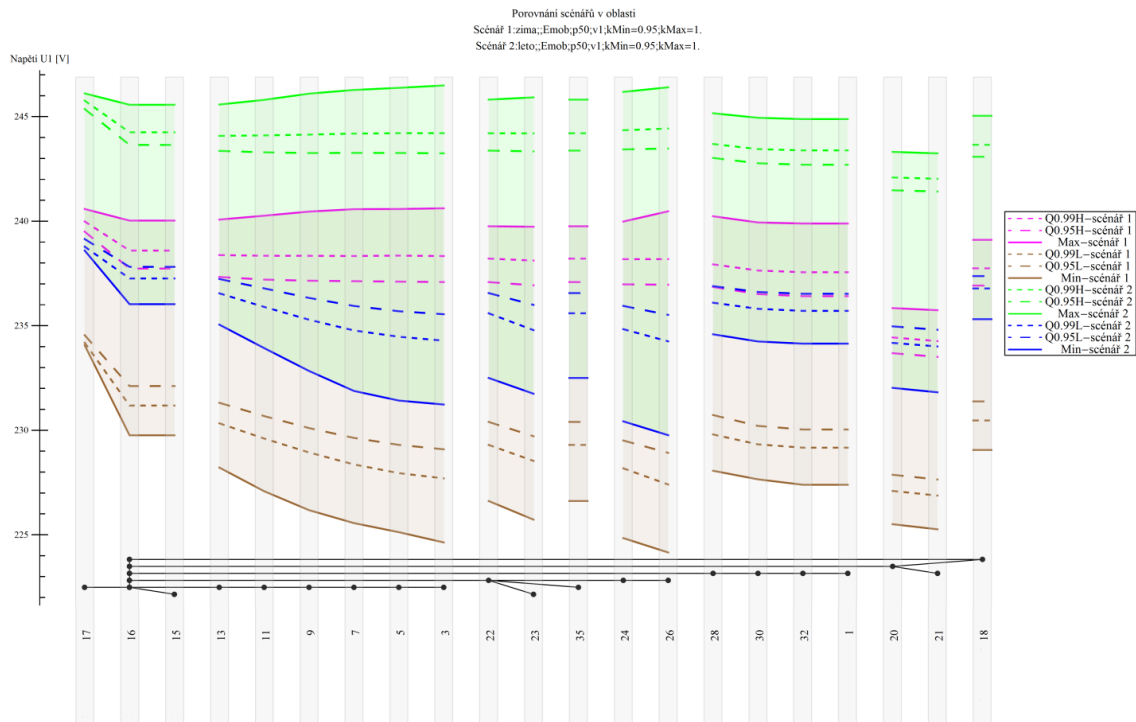
Pro simulaci vlivu elektromobility, byly zvoleny dva scénáře – pro penetraci elektromobily v rozsahu 25 % a 50 %. Výsledky průběhu napětí a proudů jsou uvedeny na obrázcích 63-66.



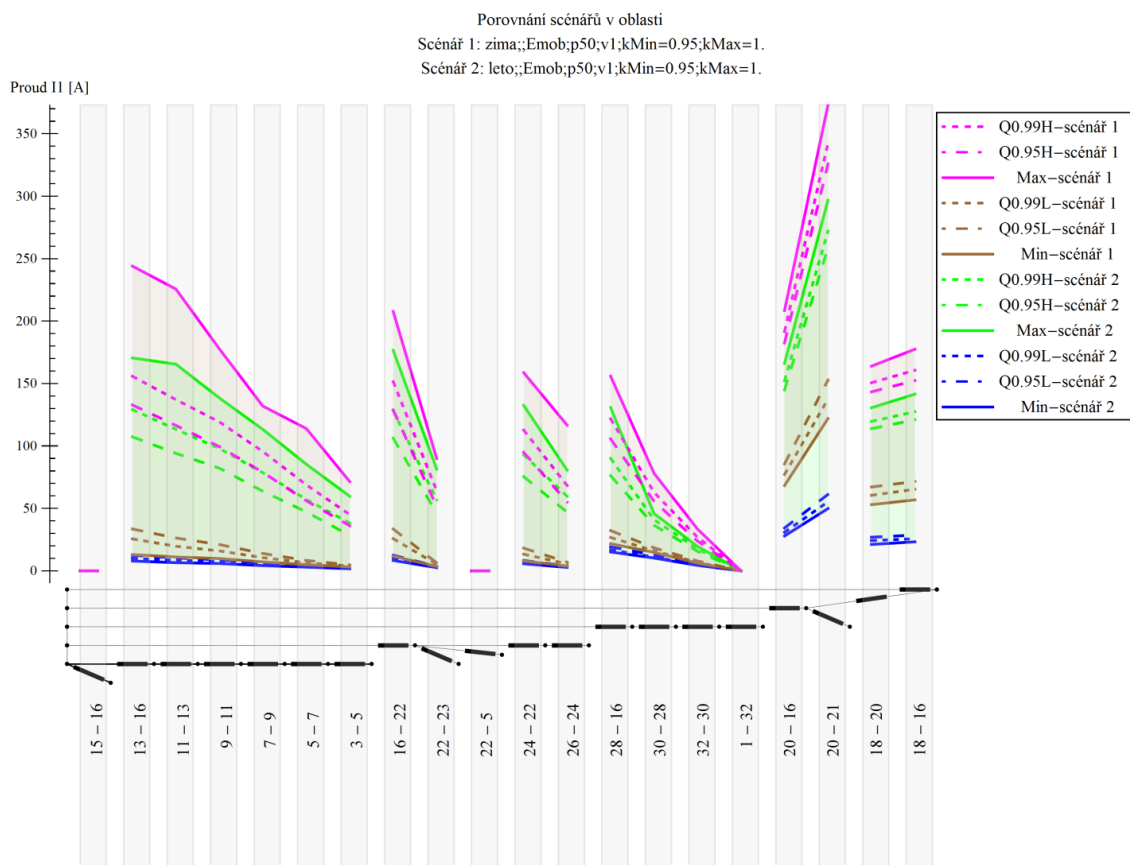
Obrázek 63 - Průběh napětí při zapojení elektromobilů při penetraci 25 %



Obrázek 64 - Průběh proudů při zapojení elektromobilů při penetraci 25 %



Obrázek 65 - Průběh napětí při zapojení elektromobilů při penetraci 50 %



Obrázek 66 - Průběh proudů při zapojení elektromobilů při penetraci 50 %

Z provedených simulací je patrné, že proudy v zimním scénáři jsou vyšší, než v letním. To je dáno tím, že elektromobily v zimě spotřebovávají více energie (z důvodu topení), a tím je zvýšena potřeba častějšího a delšího dobíjení těchto vozů.

Při větší penetraci elektromobilů se nárůst hodnoty proudu projevuje na vývodech, kde je uvažováno s koncovými odběrateli (tedy tam, kde jsou uvažovány domy), naopak vypočtené maximum velikosti proudu se neprojevívá v oblasti, kde je připojen menší nákupní dům (uzel 21) z důvodu neměnného charakteru spotřeby (nenabíjení elektromobilů).

Kombinace více vlivů

Následující série výsledků je prezentace vlivů různých kombinací možných scénářů při provozu modelované sítě.

Varianta 1

Ve variantě 1 se uvažuje s kombinací těchto technologií – mikrokogenerace (penetrace 25 %), klimatizace (penetrace 25 %), tepelné čerpadlo (penetrace 25 %), fotovoltaika (penetrace 25 %, K_{Max} je 0,2). Výsledky průběhu napětí a proudů jsou uvedeny na obrázcích 67 a 68.

Varianta 2

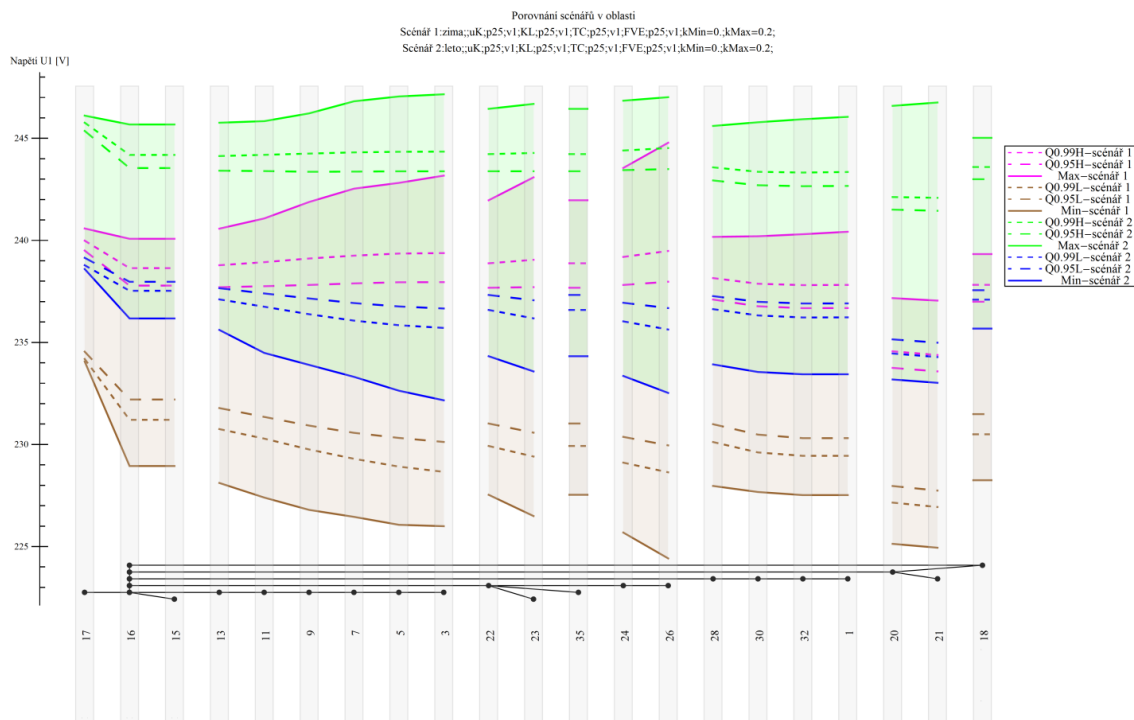
Oproti variantě 1 je v této navíc přidán vliv elektromobility. Tedy, uvažuje se s kombinací těchto technologií – mikrokogenerace (penetrace 25 %), klimatizace (penetrace 25 %), tepelné čerpadlo (penetrace 25 %), fotovoltaika (penetrace 25 %, K_{Max} je 0,2), elektromobilita (penetrace 25 %, K_{Min} je 0,95). Výsledky průběhu napětí a proudů jsou uvedeny na obrázcích 69 a 70.

Varianta 3

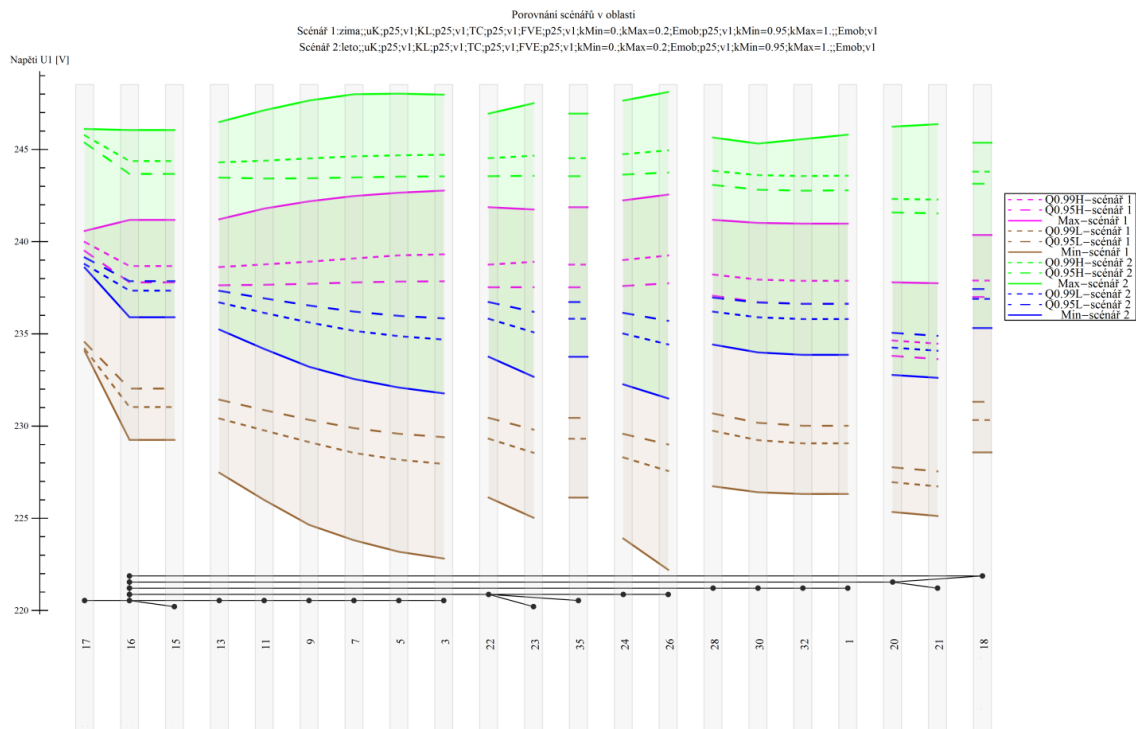
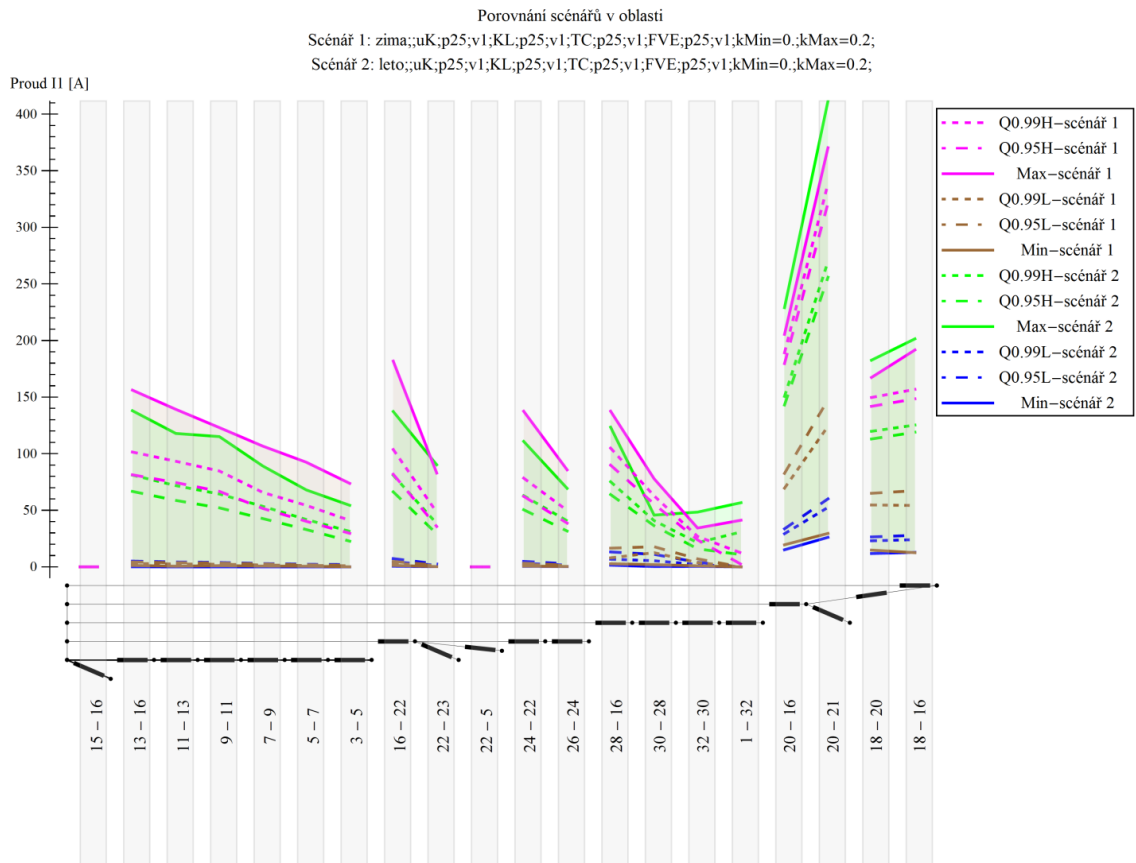
Ve variantě 3 se uvažuje s kombinací těchto technologií – mikrokogenerace (penetrace 50 %), klimatizace (penetrace 50 %), tepelné čerpadlo (penetrace 50 %), fotovoltaika (penetrace 50 %, K_{Max} je 0,2). Výsledky průběhu napětí a proudů jsou uvedeny na obrázcích 71 a 72.

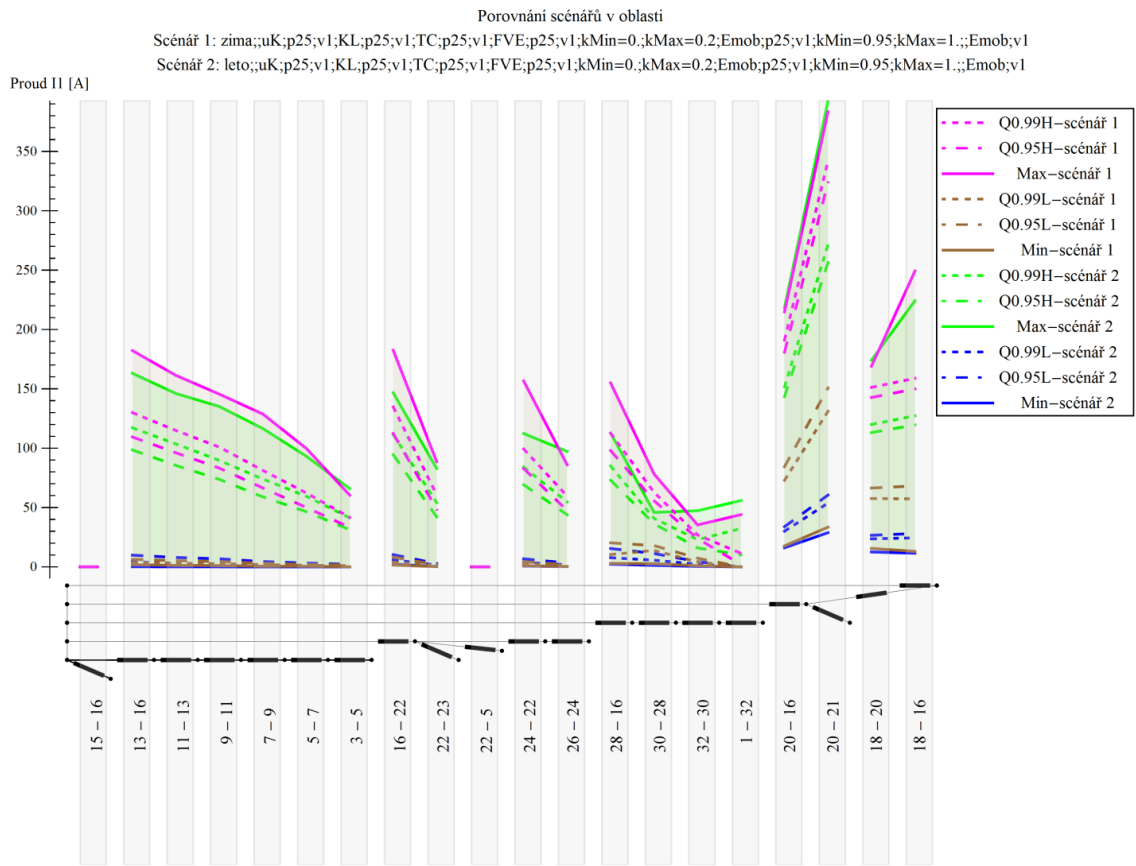
Varianta 4

Oproti třetí variantě je v této navíc přidán vliv elektromobility. Tedy, uvažuje se s kombinací těchto technologií – mikrokogenerace (penetrace 50 %), klimatizace (penetrace 50 %), tepelné čerpadlo (penetrace 50 %), fotovoltaika (penetrace 50 %, K_{Max} je 0,2), elektromobilita (penetrace 50 %, K_{Min} je 0,95). Výsledky průběhu napětí a proudů jsou uvedeny na obrázcích 73 a 74.

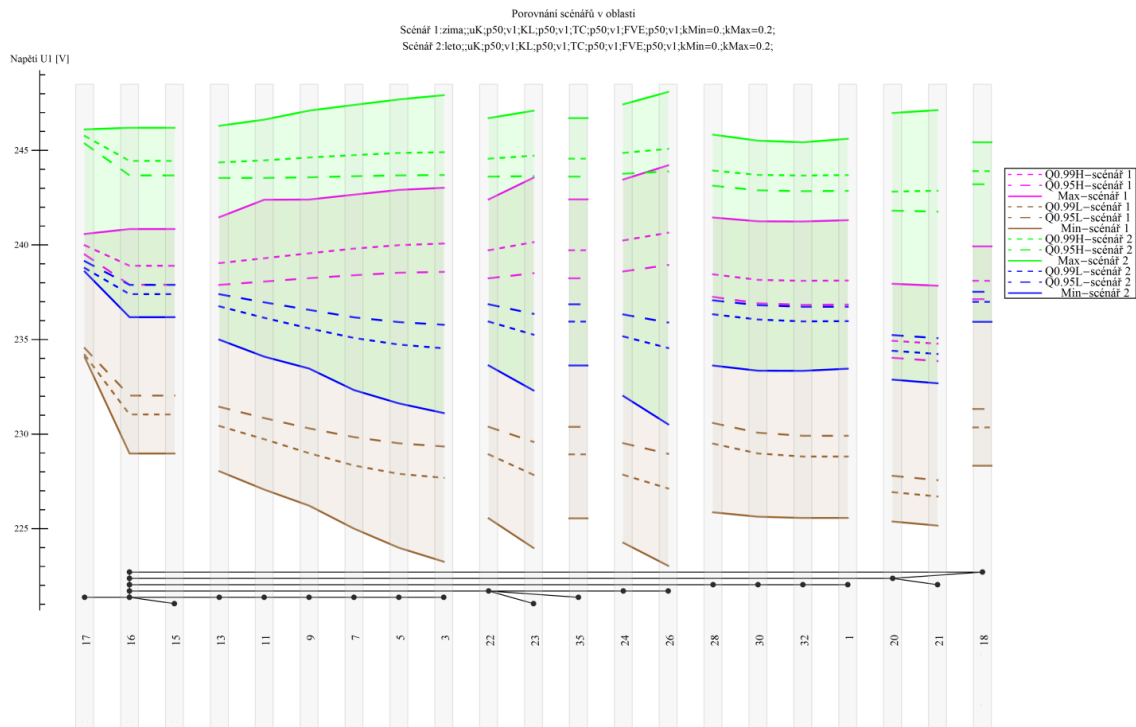


Obrázek 67 - Průběh napětí při kombinaci více možných scénářů - varianta 1

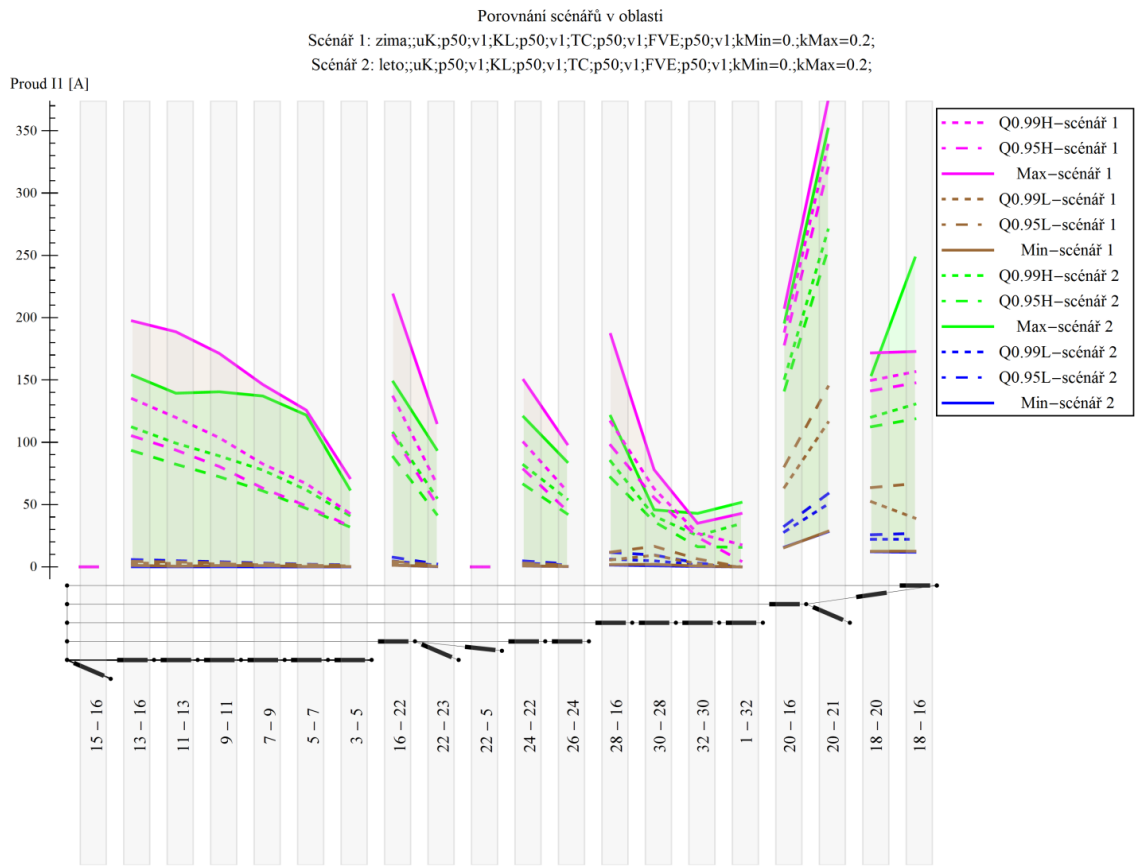




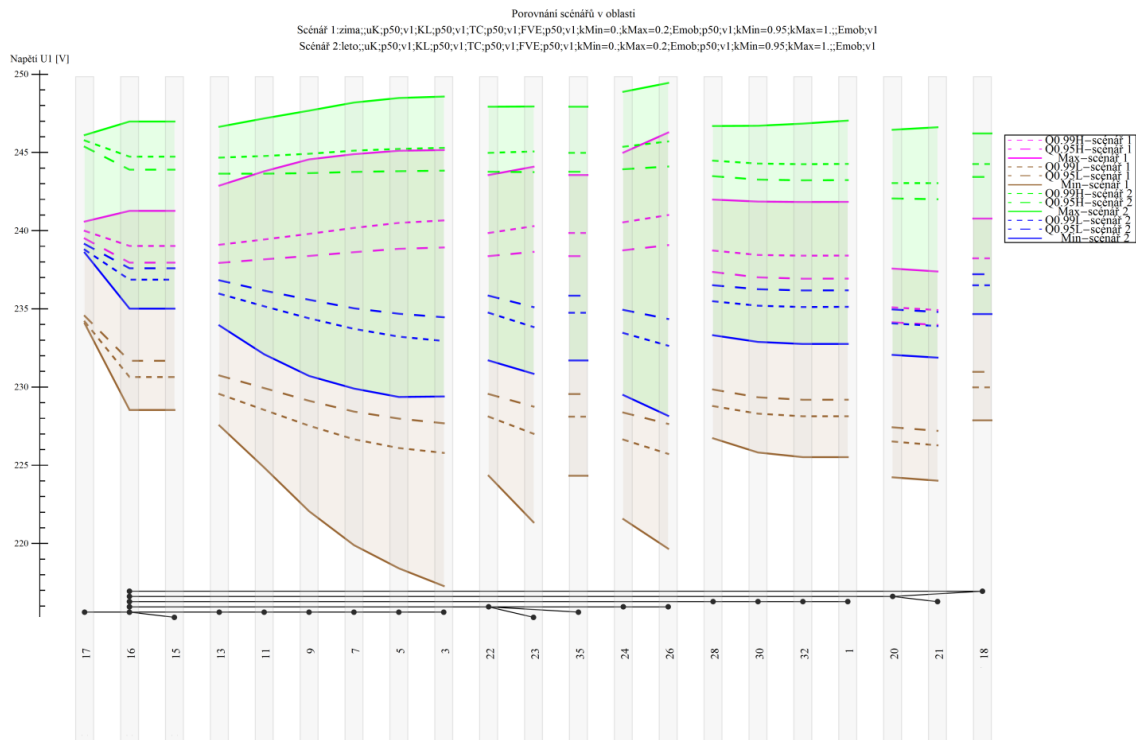
Obrázek 70 - Průběh proudů při kombinaci více možných scénářů - varianta 2



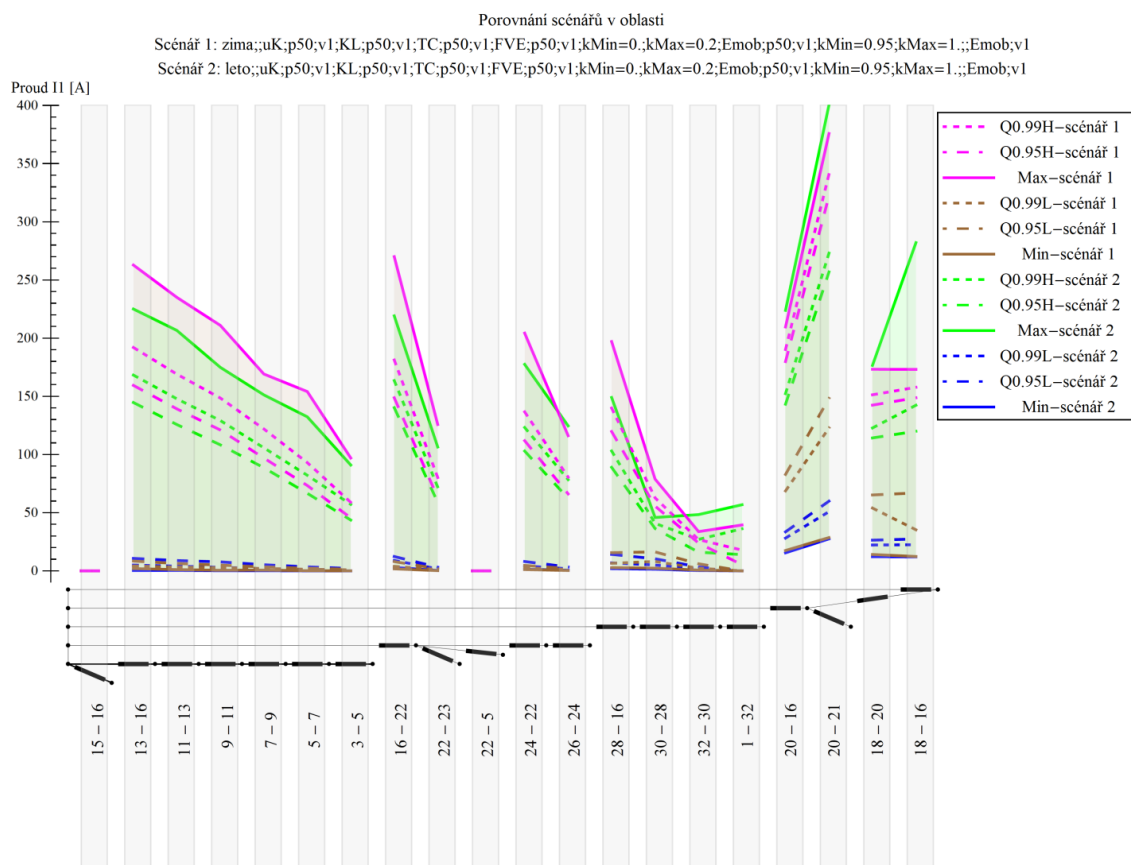
Obrázek 71 - Průběh napětí při kombinaci více možných scénářů - varianta 3



Obrázek 72 - Průběh proudů při kombinaci více možných scénářů - varianta 3



Obrázek 73 - Průběh napětí při kombinaci více možných scénářů - varianta 4



Obrázek 74 - Průběh proudů při kombinaci více možných scénářů - varianta 4

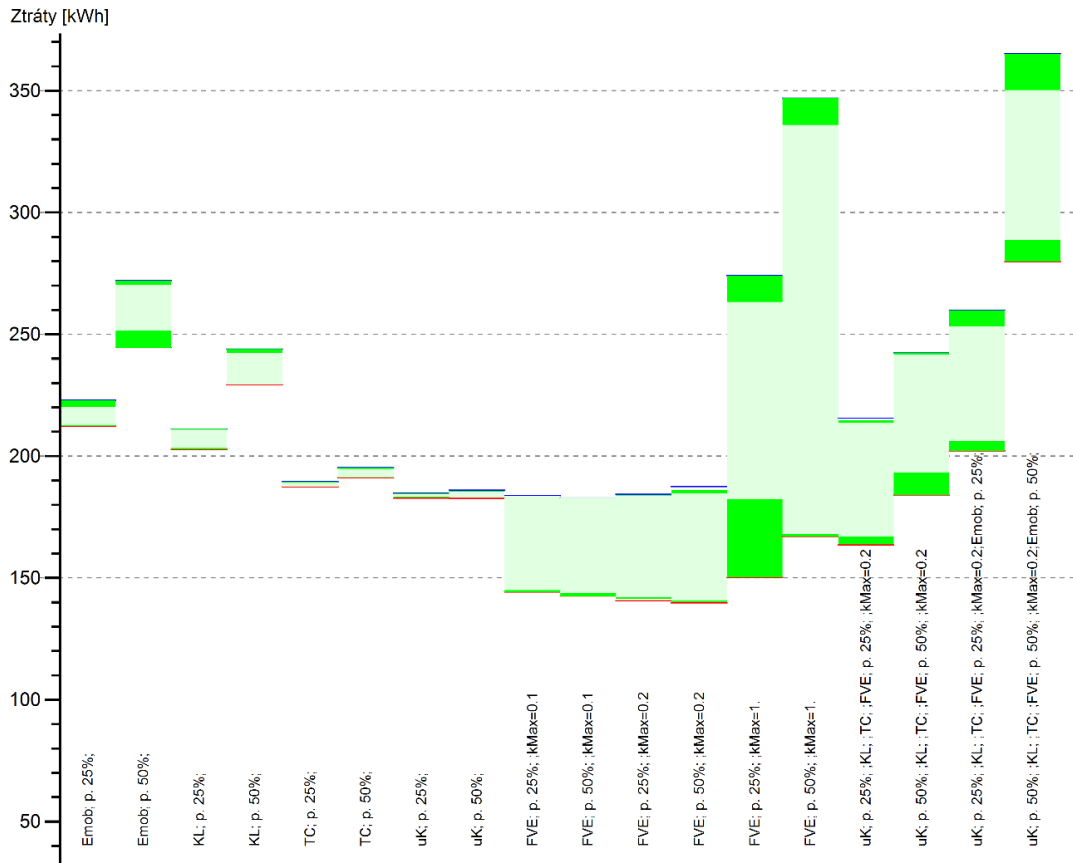
Výstupy simulací pro variantu 1 a 2 ukazují zajímavý výsledek, a to že rozdíly pro letní a zimní scénář jsou v podstatě minimální. Zvolená kombinace ukazuje, že v případě více vlivů se tyto vzájemně vykompenzují a přestává platit dosavadní praxe, kdy byly rozdíly v letním a zimním provozu.

Zajímavým srovnáním jsou varianty s kombinacemi vlivů proti scénářům zahrnujícím pouze jeden vliv (např. FVE, elektromobilitu, tepelná čerpadla, aj.). Úroveň proudů v kombinovaných scénářích je nižší. Lze říci, že jde o důsledek kladného vlivu kombinací všech prvků (např. tím, že se vyrobená energie z FVE využije v místě výroby na provoz spotřebičů).

Další výstupy simulací (pro jiné scénáře – FVE, klimatizace, tepelná čerpadla a mikrokogenerace) jsou uvedeny v příloze.

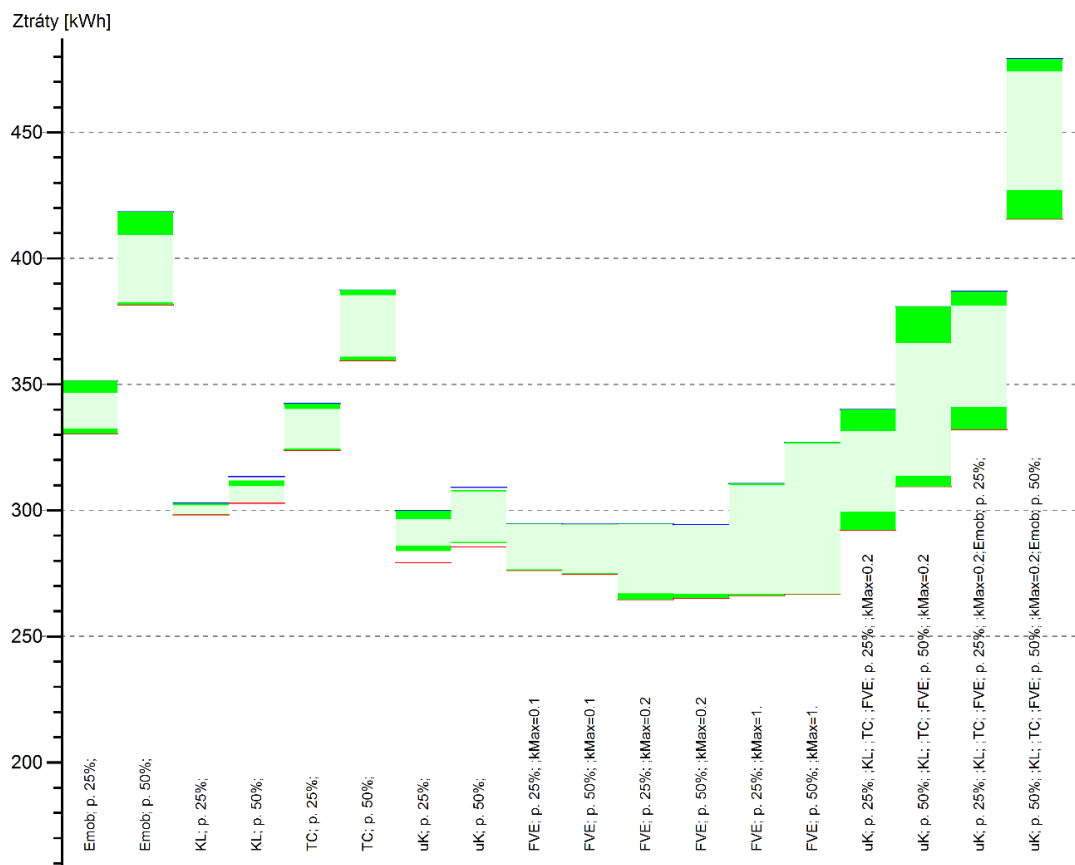
Spočtené ztráty v simulované síti pro všechny vypočítané varianty scénářů

Na následujících dvou grafech jsou zobrazeny vypočtené ztráty pro každý simulovaný scénář. Obrázek 75 zobrazuje ztráty pro letní scénář a hodnoty jsou napočtené za jeden týden provozu.



Obrázek 75 - Ztráty v simulované síti za jeden týden provozu – léto

Obrázek 76 poté zobrazuje ztráty pro zimní scénář (hodnoty jsou napočtené za jeden týden provozu).



Obrázek 76 - Ztráty v simulované síti za jeden týden provozu - zima

Z uvedených výsledků je patrné, že celkové ztráty jsou v zimním scénáři vyšší než ve scénáři letním. To odpovídá modelované situaci, kdy v zimě byla uvažována vyšší spotřeba elektrické energie než v létě.

Scénář s uvažováním pouze elektromobility ukazuje ztráty v zimním období skoro jednou tak vyšší než v letním. Odpovídá to situaci, kdy elektromobily v zimě spotřebovávají více energie z důvodu topení, a tím je zvýšená potřeba častějšího a delšího dobíjení těchto vozů.

Ze scénářů s nasazením FVE (penetrace 25 % a 50 %) a s uvažovaným rovnoměrným rozdělením 0,1 a 0,2 je vidět, že ztráty v zimním období jsou zhruba o 10 kWh za týden simulovaného provozu nižší než v letním scénáři. Výsledek tedy potvrzuje fakt, že v zimě je výroba z FVE nižší než v létě. Mnohem zajímavější stav je v simulovaném nasazení FVE při rovnoměrném rozdělení $K_{Max} = 1$. Ztráty při tomto uvažovaném scénáři jsou v letním období téměř třikrát vyšší. Takováto kombinace v síti by již celkem značně ovlivnila provozní stav.

Z porovnání různých variant kombinací scénářů je vidět, že největších hodnot ztrát v síti dosahuje varianta 4. Výše ztrát je téměř stejná a nezáleží, zda jde o letní či zimní scénář.

V letním scénáři dosahuje obdobné výše ztrát uvažovaný scénář s 50 % penetrací FVE stejně jako scénář kombinace různých vlivů – varianta 4.

Vliv mikrokogenerace, stejně jako tepelných čerpadel se na ztrátách v síti výrazněji projeví v zimním období, což je dáno jejich charakteristikou provozu.

4.4 Dílčí závěry

V této kapitole jsem uvedl, jak lze přistupovat k výpočtu chodu sítě s využitím statistických parametrů. V úvodní části je popsána metoda Monte Carlo a následně princip pravděpodobnostního přístupu při výpočtech chodu sítě.

V druhé části jsem pro ověření navrženého přístupu provedl případovou studii, která hodnotí vliv nových trendů na distribuční soustavu a jejich dopad na hlavní ukazatele – jako je průběh napětí, proudů a ztráty. V této části jsem zhodnotil pravděpodobnostní přístup a jeho využití při výpočtu chodu sítě. Analýzou různých variant vlivů nových trendů na simulovanou soustavu jsem dospěl k závěru, že i při relativně vysoké penetraci (50 %) různých vlivů, případně jejich kombinací, budou provozní parametry soustavy stále v normě. Zajímavý stav nastává při výpočtu ztrát v síti, kdy nejvyšších hodnot ztrát dosahuje zapojení fotovoltaiky (nejhorší stav je v uvažovaném letním scénáři).

Závěry, které lze učinit na základě provedené případové studie jsou - pro dimenzování distribučních soustav je pravděpodobnostní přístup možností, jak se co nejefektivněji vyrovnat se vzrůstajícím trendem v oblasti decentralizovaných zdrojů a elektromobility. Provedená studie ukazuje, že je možné využitím pravděpodobnostního přístupu počítat jednotlivé parametry tak, že výsledkem jsou statistické ukazatele. Tyto ukazatele lze poté využít při dimenzování nových sítí, případně při rekonstrukcích sítí stávajících (např. pro dimenzování bude dostatečným limitujícím prvkem jisté procento, které stanoví danou mez – např. 95% kvantil), čímž dojde k větší efektivitě vynaložených prostředků pro takovou akci.

V současné době využívaný deterministický přístup (tedy přístup, kdy je zvolen/odhadnut nejhorší stav sítě a ten je spočten) může být v budoucnu nahrazen právě pravděpodobnostním přístupem. Tím dojde k úspoře prostředků vynaložených při výstavbě příp. rekonstrukcích sítí (oddálí se nutnost rekonstrukce, nebude se zbytečně soustava předimenzovávat), při stejné výši bezpečnosti provozu.

5 Závěr

Disertační práce se zabývá novými trendy v konceptu smart grid. V úvodních částech práce jsem popsal základy tohoto konceptu ve vztahu k distribučním sítím. Také byl popsán současný stav problematiky smart grids včetně základních principů konceptu a analýzy aktuálních legislativních opatření platných v ČR a podporujících smart grids.

Jak je z analyzovaných materiálů patrné, v současnosti je toto téma vysoce diskutováno. Díky podpoře státních institucí se očekává masivní příliv finančních prostředků a propagace spolu s rozšířením tohoto technického řešení.

Dalším cílem disertační práce bylo poskytnout souhrnný pohled na problematiku nových trendů v koncepci smart grids. V práci je upozorněno na možné problémy s připojováním decentralizovaných zdrojů elektrické energie a jejich dopad na chránění v distribučních sítích. A dále je řešen komplexně dopad všech nových trendů (tedy nejen decentralizovaných zdrojů), ale i elektromobility na distribuční soustavu při jejím provozu, plánování její obnovy a případně výstavby.

V předchozích kapitolách jsem uvedl a popsal jeden z řady vlivů rozptýlených zdrojů na provoz distribučních soustav, a to především vliv na zkratové proudy. Změna uspořádání soustavy a instalace nových generátorů ovlivňuje zkratové poměry v soustavě. S rozvojem rozptýlených zdrojů a nárůstem jejich výkonu, zejména v radiálních větvích distribuční soustavy, je však nutné věnovat pozornost úrovni změn ve zkratových příspěvcích od napájecí soustavy a od vlastních generátorů, kdy jejich přítomnost dokáže snížit běžné zkratové příspěvky soustavy nezanedbatelným způsobem. Toto se může nepříznivě projevit na spolehlivosti reakce nadproudových (zkratových) ochranných systémů zapojených na začátku distribučních vývodů.

Řešením uvedeného problému je instalace nových adaptivních ochranných systémů, které samy dokáží spočítat aktuální poměry v síti, které jsou nezbytné pro správnou funkci. U využívaných ochran bude velmi důležitá tzv. směrovost. Dalším závěrem je, že pro detailnější hodnocení a případná konkrétní doporučení je vždy potřeba detailní analýzy šetřeného segmentu distribuční soustavy s rozptýlenými zdroji a také srovnání s uplatněným nastavením ochranných prvků.

V další části práce jsem uvedl, jak lze přistupovat k výpočtu chodu sítě s využitím pravděpodobnostního přístupu a následného výstupu ve formě statistických parametrů. Pro tento přístup jsem provedl ověření daného konceptu ve formě případové studie, která hodnotí vliv nových trendů na distribuční soustavu a zároveň dopad na hlavní ukazatele – jako je průběh napětí a proudů. Závěry, které lze učinit na základě provedené studie jsou následující - pro

dimenzování distribučních soustav, je pravděpodobnostní přístup možností, jak se co nejefektivněji vyrovnat se vzrůstajícím trendem v oblasti decentralizovaných zdrojů a elektromobility. Výsledné statistické ukazatele lze poté využít při dimenzování nových sítí, případně při rekonstrukcích stávajících sítí.

V současné době využívaný deterministický přístup (tedy přístup, kdy je zvolen/odhadnut nejhorší stav sítě a ten je spočten), může být v budoucnu nahrazen právě pravděpodobnostním přístupem.

Přínosy práce k řešení provozu distribučních sítí

Přínos práce lze spatřovat v komplexním pohledu na danou problematiku a zejména v zaměření na chránění v distribuční soustavě a na plánování obnovy a rekonstrukce současných distribučních sítí s ohledem na nové trendy v konceptu smart grids (tedy na budoucí vzrůstající počet decentralizovaných zdrojů elektrické energie spolu se vzrůstajícím počtem elektromobilů). Jedná se především o doporučení, jak pracovat s chráněním v případě připojování nových zdrojů a ověřováním původních výpočtů.

Dále byl navržen nový způsob vyhodnocení výpočtů chodu sítě s využitím pravděpodobnostního přístupu. Díky tomu lze navrhopvat výstavbu, příp. obnovu stávajících sítí s ohledem na efektivitu vynaložených finančních prostředků se zachováním bezpečného provozu distribučních sítí.

Závěry pro další rozvoj vědy a realizace v praxi

Další možné pokračování této práce se dá očekávat ve využití navržených postupů pro konkrétní typ distribuční soustavy. A to jak v části věnující se připojení decentralizovaných zdrojů a chránění takové části distribuční sítě, tak v části věnující se komplexnímu pohledu na nové trendy v těchto sítích. Příkladem pokračování této práce může být hlubší analýza distribučních sítí se zaměřením na síť mřížové. Navržená metodika je univerzální a její použití v uvedeném případě by mělo být využitelné. Pro praxi je přínosná část obsahující studii vlivů nových trendů na distribuční síť (i s ohledem na koncept smart grids, tak jak jsem v úvodní části definoval – bude se jednat o elektrizační soustavu, která je schopná pojmout velké množství decentralizovaných zdrojů elektrické energie spolu s novými odběry elektrické energie, především elektromobily. Tato soustava musí být schopna zajistit dodávku elektřiny ve stanovené kvalitě v daném čase, pokud možno bez přerušení dodávky spolu se zajištěním bezpečnosti provozu (tedy správně navržený systém ochrany)).

6 Literatura

- [1] Národní akční plán pro chytré sítě (NAP SG), Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2015.
- [2] Hladík, M. Inteligentní sítě: Požadavky na inteligentní sítě a měření nové generace. *Elektroenergetika*. 2014, 64(7), 395-402, Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice. ISSN 0375-8842.
- [3] Tlustý, J., Švec, J., Bannert P., Brettschneider, Z., Kocur, Z., Mareček, P., Müller, Z., Sýkora, T. Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 254 s. ISBN 978-80-01-04939-6.
- [4] European Smart Grids Technology Platform, Luxembourg, Publications of the EU. Office for Official Publications of the European Communities; European Commission, 2006.
- [5] Smart grids & metering - celosvětový trend v energetice – realita, koncepty a výhledy v ČR; EGÚ Praha Engineering, a.s.; Odborný seminář; Praha; duben 2010
- [6] Schulz, Ch., Röder, G., Kurrat, M. Virtual Power Plants with Combined Heat and Power Micro-units, [online]. [cit. 2015-10-10]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.130.8020&rep=rep1&type=pdf>.
- [7] Xiang, G., Xin, A. The Application of Self-Healing Technology in Smart Grid. In *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific*. Wuhan, China : APPEEC, 25-28 March 2011. s. 1-4. ISBN 978-1-4244-6253-7 , ISSN 2157-4839.
- [8] Faranghi, H. The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2010, 8(1), 18-28, ISSN 1540-7977.
- [9] Malík, O., Havel, P. Analysing demand-side management potential: Situation in Europe and the Czech Republic. *Environment and Electrical Engineering (EEEIC) 2011, 10th International Conference on, Rome, 2011*, pp. 1-4, ISBN: 978-1-4244-8779-0.
- [10] Abart, A., Lugmair, A., Schenk, A. Smart metering features for managing low voltage distribution grids. *Electricity Distribution - Part 2, 2009. CIRED 2009. The 20th International Conference and Exhibition on, Prague, 2009*, pp. 1-1, ISBN: 978-1-84919-160-9.
- [11] Toman, P., Drápela, J., Mišák, S., Orságová, J., Paar, M., Topolánek, D., a kol. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [12] Huang, W. T., Chen, S. T. Line Loss Reduction by Distribution System Upgrading from Radial to Normally Closed-Loop Arrangement. *Hybrid Intelligent Systems, 2009. HIS '09. Ninth International Conference on, Shenyang, 2009*, pp. 334-339, ISBN: 978-0-7695-3745-0.
- [13] Tapia-Juárez, R., Espinosa-Juárez, E., Graff, M. Optimal reconfiguration of radial distribution networks for reducing voltage sags. *Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), 2013 10th International Conference on, Mexico City, 2013*, pp. 280-285, ISBN: 978-1-4799-1461-6.

- [14] Tonkoski, R., Lopes, L. A. C. Voltage Regulation in Radial Distribution Feeders with High Penetration of Photovoltaic. Energy 2030 Conference, 2008. ENERGY 2008. IEEE, Atlanta, GA, 2008, pp. 1-7, ISBN: 978-1-4244-2850-2.
- [15] Ramos, E. R., Martinez-Ramos, J. L., Exposito, A. G., Salado, A. J. U. Optimal reconfiguration of distribution networks for power loss reduction. Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto, Porto, 2001, pp. 5 pp. vol.3, ISBN: 0-7803-7139-9.
- [16] Votruba, S. Možnosti smart grids. Elektroenergetika. 2014, 64(12), 636-638, Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice. ISSN 0375-8842.
- [17] Brož, F., Křivanec, L., Procházka, K., Votruba, S. Možnosti zvýšení spolehlivosti distribuce za použití inovativních prvků v propojených soustavách nn. Elektroenergetika. 2015, 65(6), 322-325, Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice. ISSN 0375-8842.
- [18] Pokorná, Z. Právní rámec a nástroje podpory výzkumu a vývoje pro smart grids. Elektroenergetika. 2014, 64(10), 538-540, Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice. ISSN 0375-8842.
- [19] Státní energetická koncepce České republiky, Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2014.
- [20] Národní akční plán čisté mobility (NAP CM), Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2015.
- [21] Kabisch, S.; Schmitt, A.; Winter, M.; Heuer, J. Inter-connections and Communications of Electric Vehicles and Smart Grids. Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on, pp.161-166, 4-6 Oct. 2010, ISBN: 978-1-4244-6510-1.
- [22] Cao, Y. Tang, S., Li, C., Zhang, P., Tan, Y., Zhang, Z., Li, J. An Optimized EV Charging Model Considering TOU Price and SOC Curve. Smart Grid, IEEE Transactions on, vol.3, no.1, pp.388-393, March 2012, ISSN: 1949-3053.
- [23] Shireen, W., Patel, S. Plug-in Hybrid Electric vehicles in the smart grid environment. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES, pp.1-4, 19-22 April 2010, ISBN: 978-1-4244-6546-0.
- [24] Fan, Y., Guo, C., Hou, P., Tang, Z. Impact of Electric Vehicle Charging on Power Load Based on TOU Price. Energy and Power Engineering, Vol. 5 No. 4B, 2013, pp. 1347-1351. doi: 10.4236/epe.2013.54B255.
- [25] Clarke, A., Makram, E. A Novel Idea for Self-Balancing Car Parks for Plug in Electric Vehicle Charging. Journal of Power and Energy Engineering, 2, 34-40. doi: 10.4236/jpee.2014.210005.
- [26] Kashem, M. A., Ledwich, G. Multiple Distributed Generators for Distribution Feeder Voltage Support. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 3, pp. 676-684, Sept. 2005, ISSN: 1558-0059.
- [27] Karajica, M. Elektromobilita z pohledu ČEZ distribuce. Elektroenergetika. 2014, 64(11), 599-602, Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice. ISSN 0375-8842.

- [28] Pourmousavi, S. A., Cifala, A. S., Nehrir, M. H. Impact of high penetration of PV generation on frequency and voltage in a distribution feeder. North American Power Symposium (NAPS), 2012, Champaign, IL, 2012, pp. 1-8, ISBN: 978-1-4673-2306-2.
- [29] Giordano, V., Gangale, F., Fulli, G., Jiménez, M. S., Onyeji, I., Colta, A., Papaioannou, I., Mengolini, A., Alecu, C., Ojala, T., Maschio, I. Smart Grid projects in Europe: lessons learned and current developments. Publications Office of the European Union, 2011, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy, ISBN 978-92-79-20487-6.
- [30] Covrig, C. F., Ardelean, M., Vasiljevska, J., Mengolini, A., Fulli, G., Amoiralis, E. Smart Grid Projects Outlook 2014. Publications Office of the European Union, 2014, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy, ISBN 978-92-79-38374-8.
- [31] U.S. Department of Energy. Evaluating Electric Vehicle Charging Impacts and Customer Charging Behaviors – Experiences from Six Smart Grid Investments Grant Projects. United States Department of Energy Washington, DC 20585, 2014.
- [32] U.S. Department of Energy. 2014 Smart Grid System Report. United States Department of Energy Washington, DC 20585, 2014.
- [33] Miceli, R., Favuzza, S., Genduso, F. Perspective on the Future of Distribution: Smart Grids, State of the Art, Benefits and Research Plans. Energy and Power Engineering, vol. 2013, no. 5, pp.36-42, January 2013, DOI:10.4236/epe.2013.51005.
- [34] Hammons, T.J. Dispersed generation and its impact in Europe on power system structure and secure power system operation. Universities Power Engineering Conference, 2007. UPEC 2007. 42nd International, pp.930-937, 4-6 Sept. 2007, ISBN: 978-1-905593-36-1.
- [35] Shafiullah, G., Oo, A., Ali, A., Wolfs, P. Smart Grid for a Sustainable Future. Smart Grid and Renewable Energy, Vol. 4 No. 1, 2013, pp. 23-34. doi: 10.4236/sgre.2013.41004.
- [36] Ackermann, T., Knyazkin, V. Interaction between Distributed, Generation and the Distribution Network: Operation Aspects, Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES, Vol.2, pp. 1357- 1362, 2002.
- [37] Chladný, V. Digitálne ochrany v ES. Košice : Technická univerzita Košice, 2007. 273 s. ISBN 978-80-8073-798-6.
- [38] Schlabbach, J. Short-circuits Currents. London, United Kingdom : The institution of engineering and technology, 2005. 336 s. ISBN 978-0-86341-514-2.
- [39] Anderson, P. M. Power system protection. IEEE Power energy society, IEEE Press – A John Wiley & Sons, Inc., 1999, 1st ed., ISBN: 0-7803-3427-2.
- [40] Girgis, A., Brahma, S. Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system. Power Engineering, 2001. LESCOPE '01. 2001 Large Engineering Systems Conference on, Halifax, NS, 2001, pp. 115-119, ISBN: 0-7803-7107-0.
- [41] Coster, E. J., Myrzik, J. M. A., Kruimer B., Kling, W. L. Integration Issues of Distributed Generation in Distribution Grids. in Proceedings of the IEEE, vol. 99, no. 1, pp. 28-39, 2011, ISSN: 1558-2256.

- [42] Coster, E., Kerstens, W., Berry, T. Self healing distribution networks using smart controllers. Electricity Distribution (CIRED 2013), 22nd International Conference and Exhibition on, Stockholm, 2013, pp. 1-4, ISBN: 978-1-84919-732-8.
- [43] Boutsika, T., Papathanassiou, S., Drossos, N. Calculation of the fault level contribution of distributed generation according to IEC Standard 60909. NTUA. National Technical University of Athens (NTUA), National Technical University of Athens (NTUA), 2005. s. 8.
- [44] Dřimal, J., Trunec, D., Brablec, A. Úvod do metody Monte Carlo. Brno: Přírodovědecká fakulta; Masarykova univerzita, 2006, 102 s.
- [45] Tůma, J., Rusek, S., Martínek, Z., Chemišinec, I., Goňo, R. Spolehlivost v elektroenergetice. Praha: CONTE spol s.r.o., České vysoké učení technické v Praze, 2006, 291 s. ISBN 80-239-6483-6.
- [46] Leite da Silva, A. M., Ribeiro, S. M. P., Arienti, V. L., Allan, R. N., Do Coutto Filho, M. B. Probabilistic load flow techniques applied to power system expansion planning, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, no. 4, pp. 1047-1053, 1990, ISSN: 1558-0679.
- [47] Chen, P., Chen, Z., Bak-Jensen, B. Probabilistic load flow: A review. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on, Nanjuing, 2008, pp. 1586-1591, ISBN: 978-7-900714-13-8
- [48] Khodr, H. M., Vale, Z. A., Ramos, C. A Benders Decomposition and Fuzzy Multicriteria Approach for Distribution Networks Remuneration Considering DG. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no. 2, pp. 1091-1101, May 2009.

7 Seznam publikací

7.1 Publikace vztahující se k tématu disertační práce

Publikace v impaktovaných časopisech:

Nejsou žádné publikace v impaktovaných časopisech

Publikace v recenzovaných časopisech:

- [P1] Mareček, P. - Müller, M. - Müller, Z. - Švec, J. - Tlustý, J.: Elektromobilita a její možnosti využití v ČR. In Energetika. 2013, roč. 63, č. 10, s. 576-581. ISSN 0375-8842.

Patenty:

Nejsou žádné patenty vztažené k práci

Publikace excerpované ISI:

- [P2] Mareček, P. - Müller, M. - Müller, Z. - Švec, J. - Sýkora, T. - et al.: Dynamic Equivalents in Power System Stability Assessment. In Proceedings of the 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2010. Brno: Brno University of Technology, 2010, vol. 1, p. 135-138. ISBN 978-80-214-4094-4.
- [P3] Mareček, P. - Šrom, J. - Švec, J. - Müller, Z.: Dispersed Generation Impact on Faulted Currents in Distribution Systems. In Proceedings of the 13th International Scientific Conference EPE 2012. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012, p. 749-752. ISBN 978-80-214-4514-7.
- [P4] Yanushkevich, A. - Mareček, P. - Tlustý, J.: Electromobility: distribution grid challenge Impact of electrical vehicles on distribution grid. In Proceedings of the 13th International Scientific Conference EPE 2012. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012, p. 741-744. ISBN 978-80-214-4514-7.

Publikace ostatní:

- [P5] Mareček, P.: Smart Grids - Power systems for the future. In POSTER 2010 - Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Engineering [CD-ROM]. Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2010, p. 1-4. ISBN 978-80-01-04544-2.
- [P6] Mareček, P.: Smart grids v podmínkách České Republiky. In Intelligenter und effizienter Einsatz von (er)neu(erbar)en Energien in Sachsen und Tschechien. Chemnitz: Technische Universität Chemnitz, 2010, s. 161-170. ISBN 978-3-86367-003-0.

- [P7] Tlustý, J. - Sýkora, T. - Švec, J. - Müller, Z. - Mareček, P.: Moderní prostředky pro eliminaci kolísání napětí v elektrické síti. In Sborník konference CIRED 2010 Tábor [CD-ROM]. Praha: CIRED, 2010, ISBN 978-80-254-8519-4.
- [P8] Mareček, P.: Smart Grids. In Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, s. 184-203. ISBN 978-80-01-04939-6.
- [P9] Brettschneider, Z. - Krula, A. - Mareček, P. - Vybíralík, F.: Integration of Large Photovoltaic Power Plants to Distribution Networks. In Proceedings of CIRED 2011 [CD-ROM]. Barcelona: CIRED, 2011, p. 1-4. ISSN 2032-9644.
- [P10] Mareček, P.: Possible issues with protecting in distributing grids based on principles smart grid. In POSTER 2011 - 15th International Student Conference on Electrical Engineering [CD-ROM]. Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, 2011, p. 1-4. ISBN 978-80-01-04806-1.
- [P11] Mareček, P. - Šrom, J. - Švec, J. - Müller, Z.: Impact of distributed sources on the currents in distribution networks. In Sborník ČK CIRED 2011 [CD-ROM]. Tábor: Český komitét CIRED, 2011, p. 1-13. ISBN 978-80-905014-0-9.
- [P12] Mareček, P.: Possible future problems with connecting electric vehicles into the electricity grid. In ELEN 2012. Praha: vydavatelství ČVUT v Praze, 2012, p. 1-6. ISBN 978-80-01-05096-5.
- [P13] Mareček, P. - Müller, Z. - Švec, J. - Tlustý, J.: Elektromobilita - Technologie a možnosti implementace v městských sítích. In CIRED 2013. Praha: CIRED, 2013, ISBN 978-80-905014-2-3.

Podíly spoluautorů na jednotlivých publikacích jsou rozděleny rovným dílem.

7.2 Publikace ostatní

Publikace excerpované ISI:

- [P14] Procházka, R. - Hlaváček, J. - Mareček, P.: Low Frequency High Voltage Source for Diagnostic of Insulation Diagnosis of Electrical Equipment - Design and Simulations. In Proceedings of the 13th International Scientific Conference EPE 2012. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012, p. 925-928. ISBN 978-80-214-4514-7.

Publikace ostatní:

- [P15] Kyncl, J. - Mareček, P. - Musil, L.: Cooling Options Analysing of Photovoltaic Panels. In Sborník konference ELEN 2010 [CD-ROM]. Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, Department of Electroenergetics, 2010, p. 1-8. ISBN 978-80-254-8089-2.
- [P16] Kyncl, J. - Mareček, P. - Musil, L.: Kombinované chlazení fotovoltaických panelů. In Sborník konference ELEN 2010 [CD-ROM]. Praha: ČVUT FEL, Katedra elektroenergetiky, 2010, s. 1-6. ISBN 978-80-254-8089-2.

- [P17] Mareček, P.: The Aspects of Shunting in MV Compensated Network. In POSTER 2012 - 16th International Student Conference on Electrical Engineering. Praha: Czech Technical University in Prague, 2012, p. 1-4. ISBN 978-80-01-05043-9.
- [P18] Yanushkevich, A. - Mareček, P. - Tlustý, J.: Using Statcom with active power compensation for voltage flicker mitigation. In Proceedings of Colloquium HVDC and Power Electronics to Boost Network Performance. Brasilia: Cigre Brasil, 2013,
- [P19] Yanushkevich, A. - Mareček, P.: HVDC systems development in the world - overview. In POSTER 2014 - 18th International Student Conference on Electrical Engineering. Prague: Czech Technical University, 2014, ISBN 978-80-01-05499-4.
- [P20] Mareček, P. - Vágner, P. - Čejka, J. - Strnad, J. - Machotková Š. – Šmrhová, I.: Importní potenciál balkánského regionu v kontextu situace CEE regionu, Praha, Studie společnosti ČEPS, a.s, 2014
- [P21] Mareček, P. - Vágner, P. - Čejka, J. - Strnad, J. - Machotková Š.: Kritická situace v PS ČR a okolních státech, Praha, Studie společnosti ČEPS, a.s., 2015
- [P22] Mareček, P. - Palkovský M. - Vágner, P. - Machotková Š. - Strnad J.: Implementace nařízení CACM GL v ČEPS, a.s., Praha, Materiál ČEPS, a.s., 2015
- [P23] Mareček, P.: Implementace evropských nařízení v ČEPS, Praha, Materiál společného semináře ČEPS, a.s. – ČEZ, a.s., 2015
- [P24] Vujovič, P. - Sikora, R. - Zimmer, C. - Čejka, J. - Mareček P. - Feleki Z. - Rodo P. et al.: CEE FBA CC Project - Methodology and process for CEE D-2 FB CC, Mnichov, Pracovní metodika TSCNET Services, GmbH., 2015
- [P25] Mareček, P.: CACM GL (Rámcový pokyn pro přidělování kapacity a řízení přetížení č. 2015/1222), Praha, Materiál pracovní skupiny NAP SG: A10 – Síťové kodexy, 2015
- [P26] Anderson, L. - Turčík, M. - Kleinpenning, C. - Weyand, S. - Mareček, P., et al.: Methodology for calculating scheduled exchanges resulting from single day ahead and intraday coupling, Brussel, Metodika ENTSO-E, 2016

Podíly spoluautorů na jednotlivých publikacích jsou rozděleny rovným dílem.

7.3 Ohlasy

Publikace [P2] byla citována:

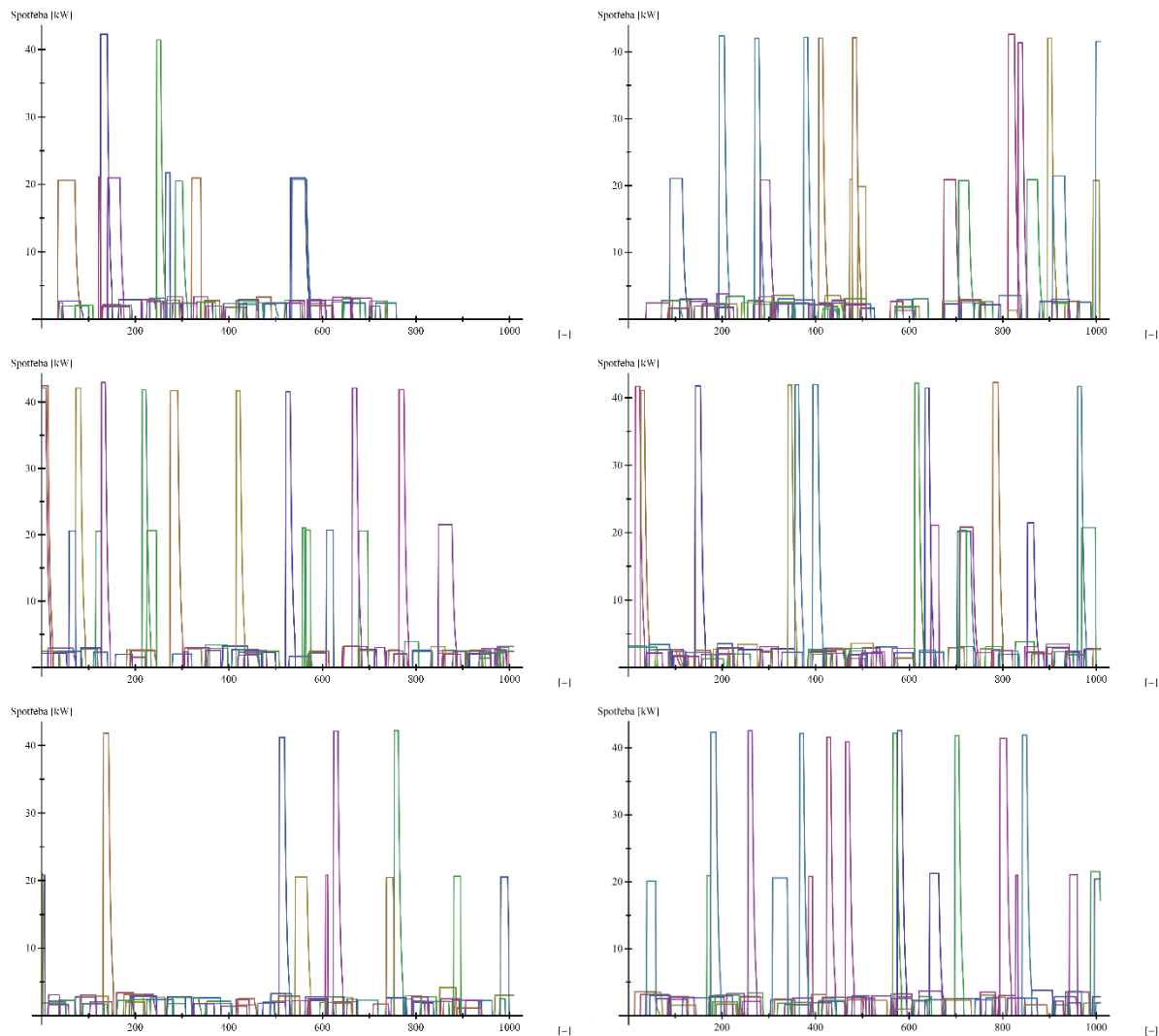
- [C1] Ehrenberger, J.: Use of directional overcurrent protection scheme for distributed generation system. In *Proceedings of the 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE) 2015*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, 2015, p. 325-330. ISBN 978-1-4673-6788-2.
- [C2] Ehrenberger, J.: Adaptive protection scheme used for distributed generation system switched into island mode. In *Proceedings of the 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering (Elektroenergetika 2015)*. Košice: Technical University, 2015, p. 560-563. ISBN 978-80-553-2187-5.

8 Přílohy

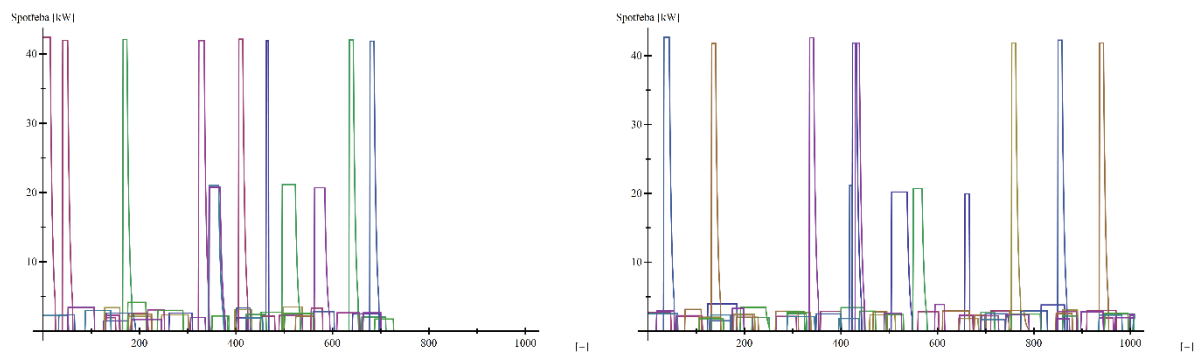
8.1 Průběhy simulovaných scénářů

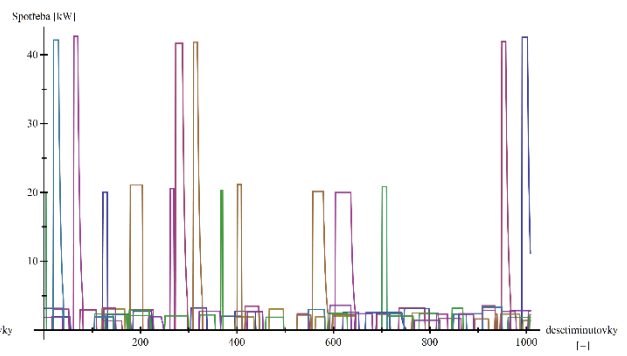
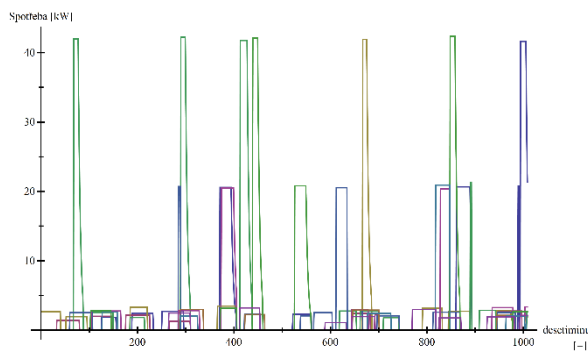
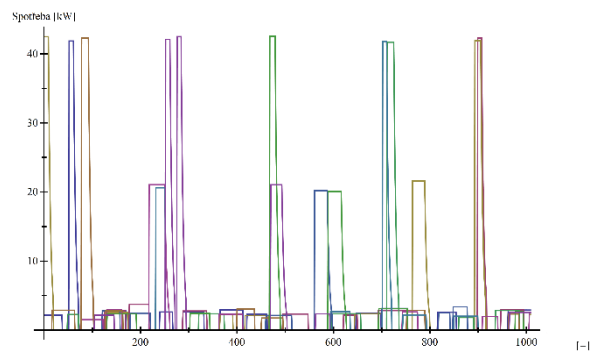
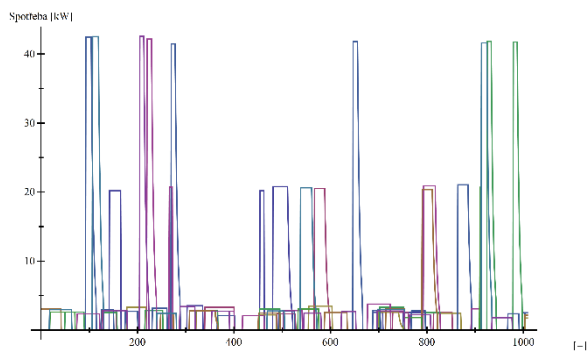
Na následujících stránkách jsou uvedeny příklady simulovaných scénářů. Jde vždy o kombinaci deseti variant scénářů charakteru provozu příslušného spotřebiče nebo zdroje.

Elektromobilita – zima

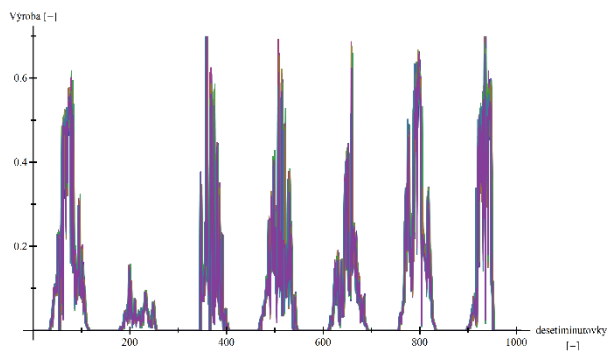
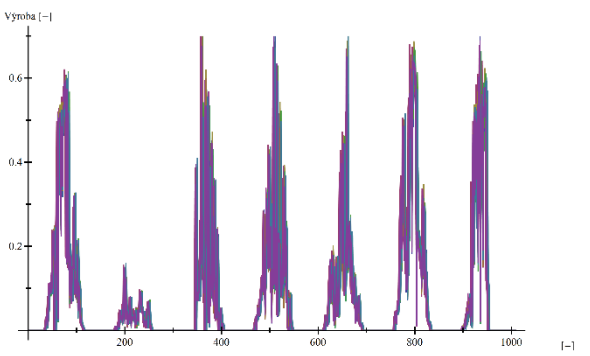
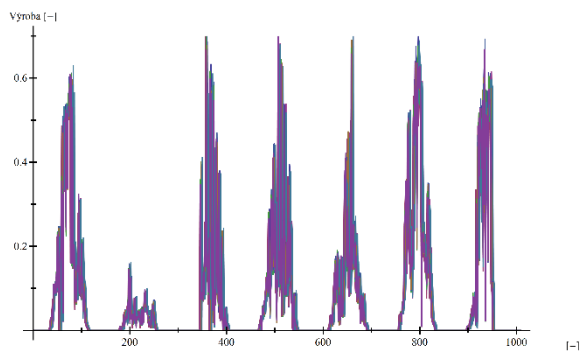


Elektromobilita – léto:

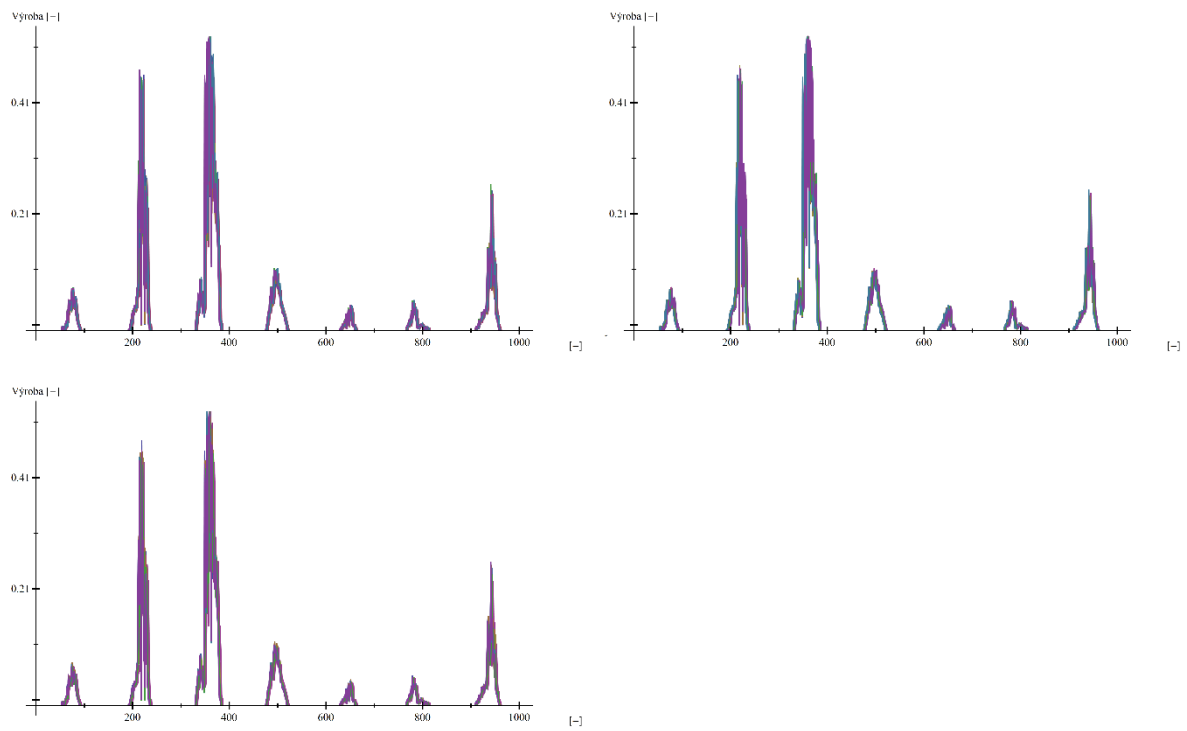




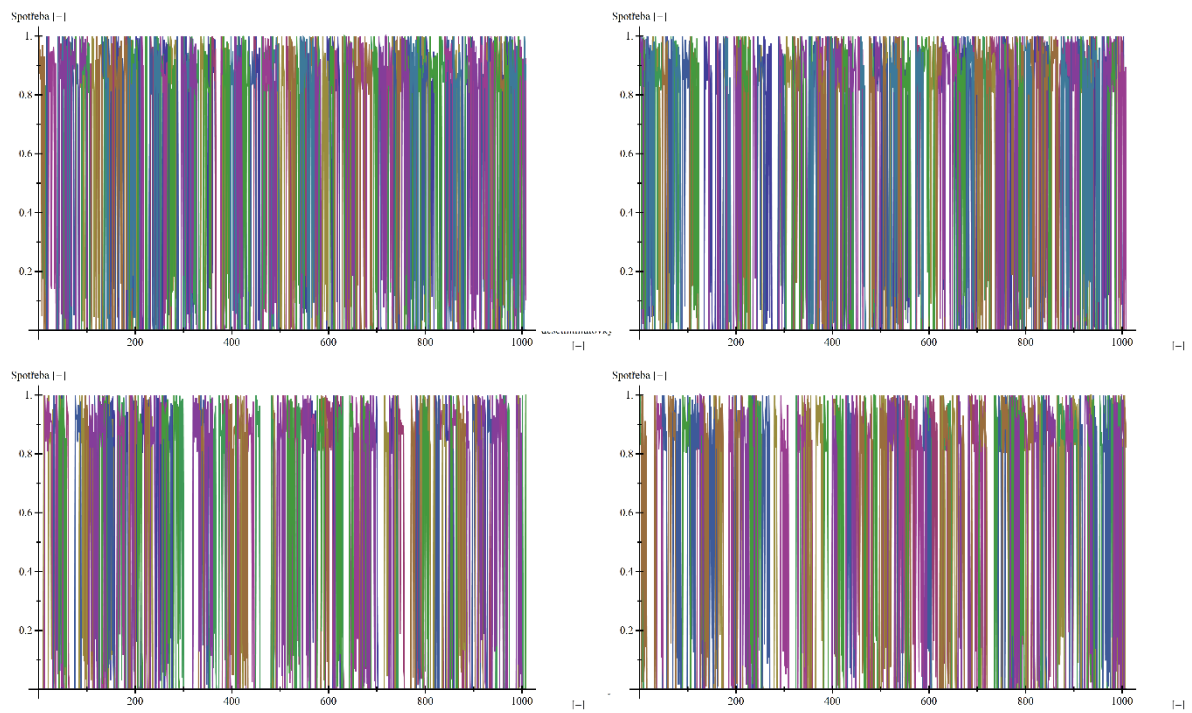
Fotovoltaické systémy – léto:

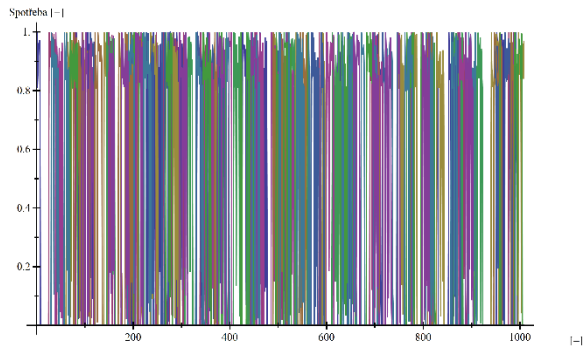


Fotovoltaické systémy – zima:

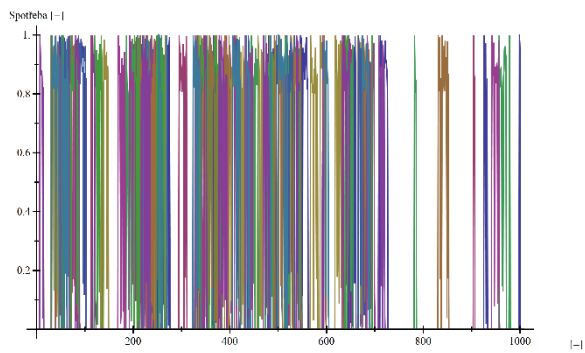
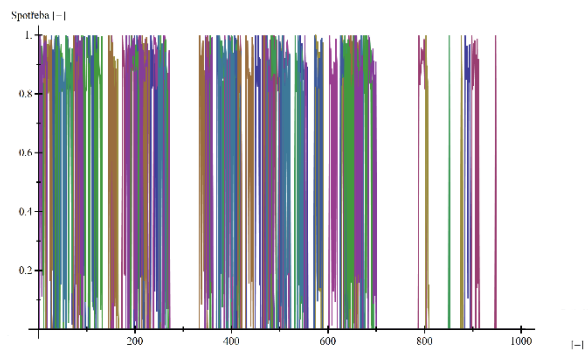
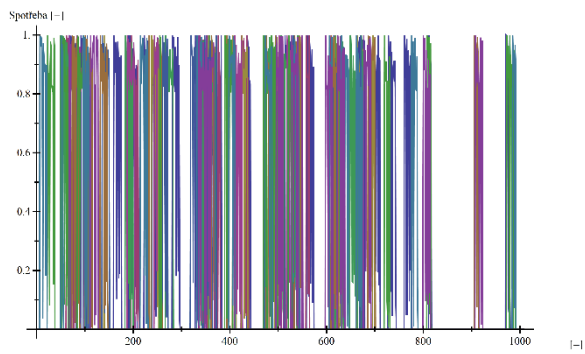
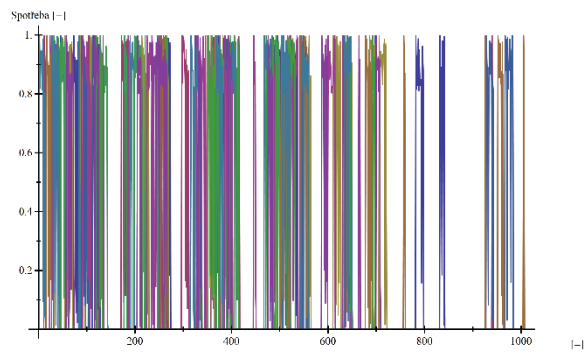
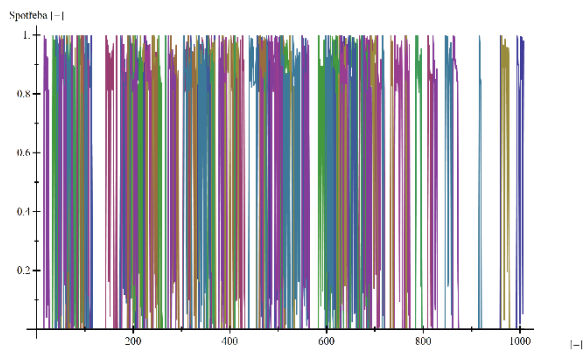


Klimatizace – léto - byty

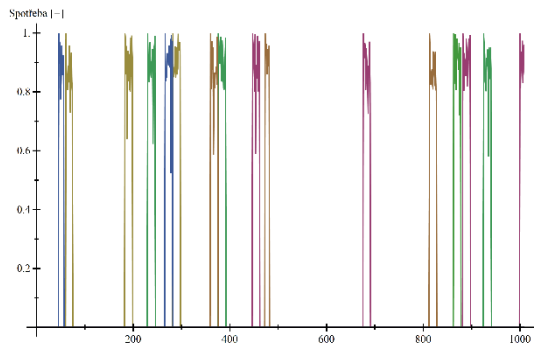
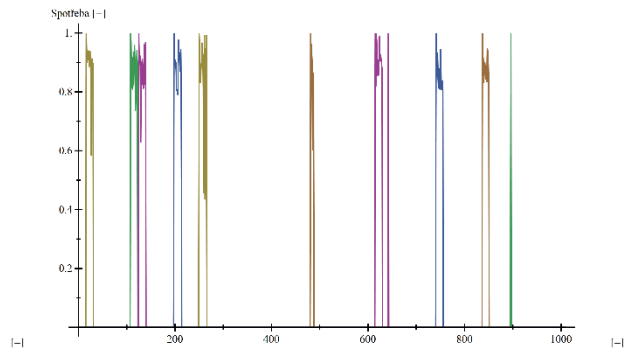
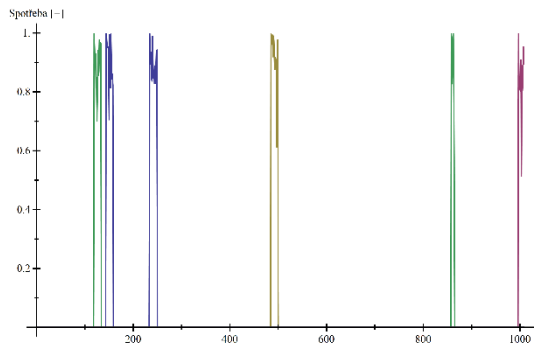
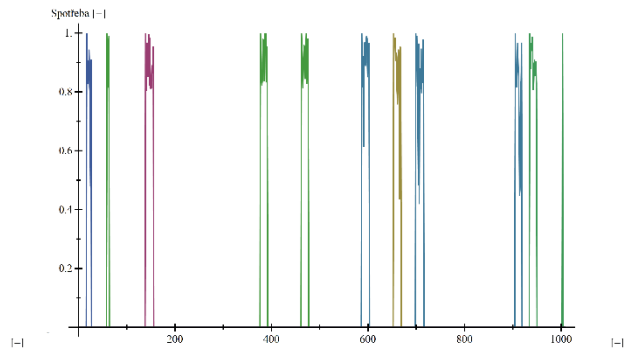
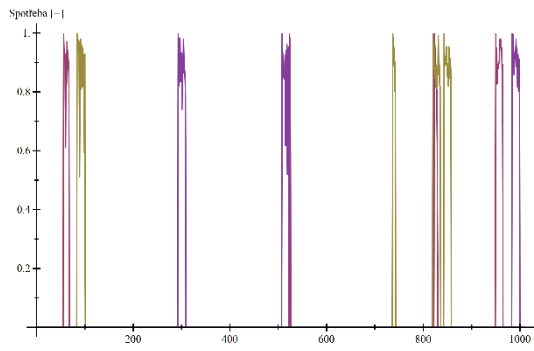




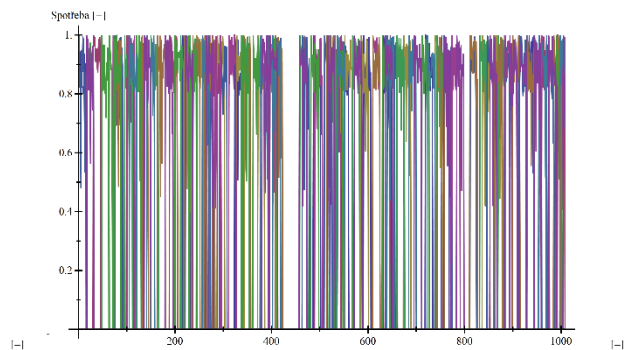
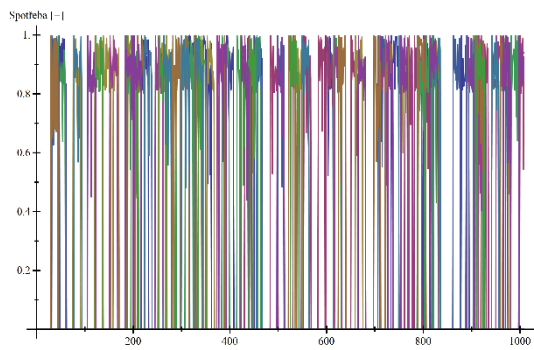
Klimatizace – léto – průmysl

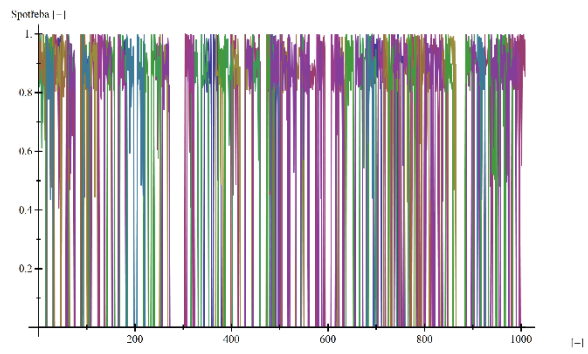
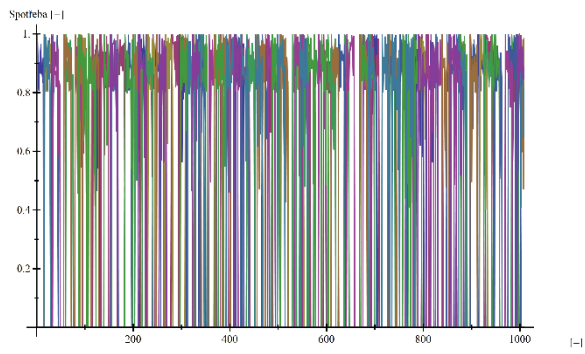


Tepelná čerpadla – léto

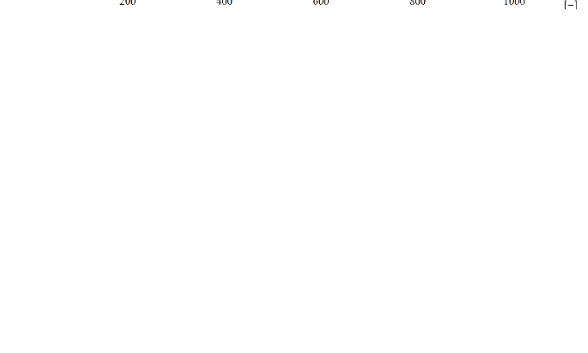
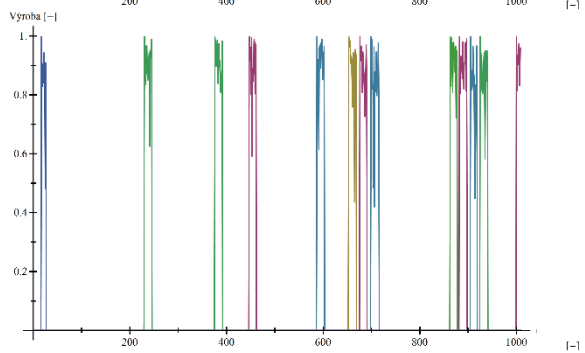
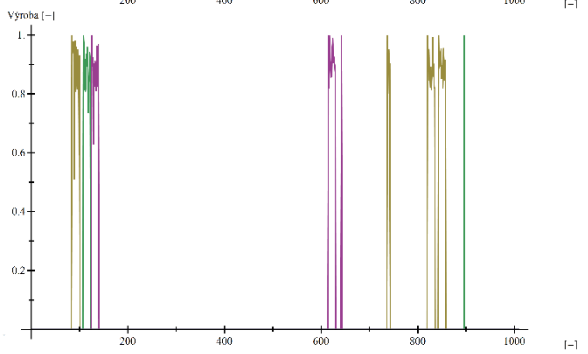
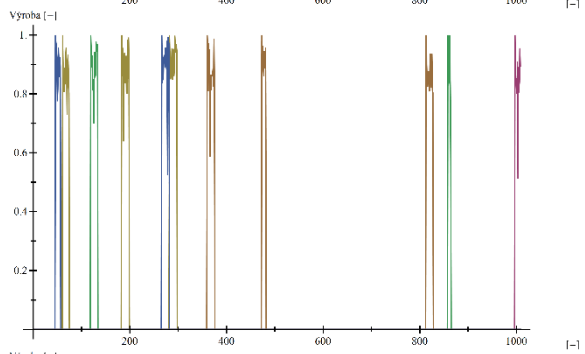
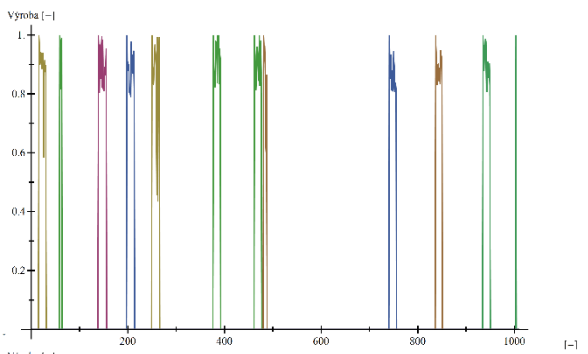
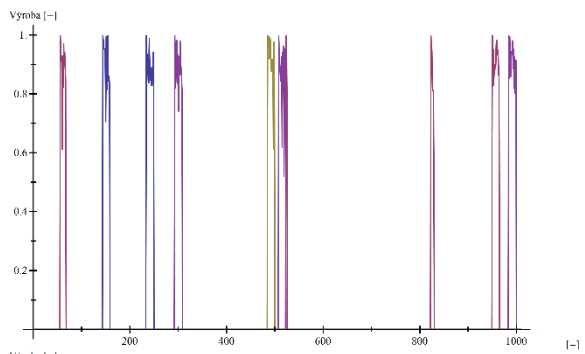


Tepelná čerpadla – zima

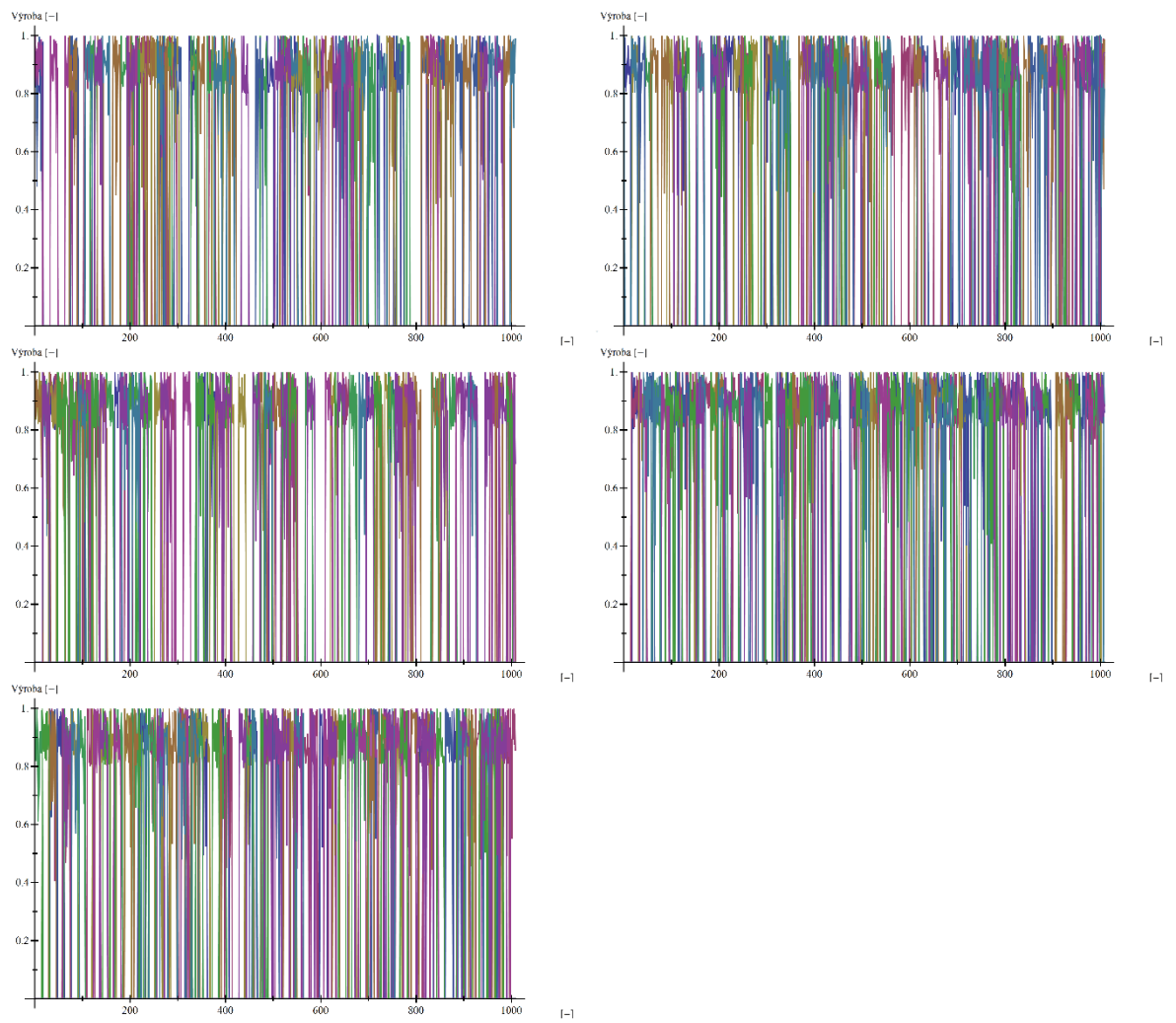




Kogenerace – léto:



Kogenerace – zima:



8.2 Další výstupy ze simulace

