

Využitie IKT pri riadení distribučných sietí

e-publikácia



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Elektrotechnická fakulta

2016

KEGA 030/ŽU – 4/2014

Táto e-publikácia bola vytvorená v rámci projektu

KEGA 030/ŽU – 4/2014

**Inovácia technológií a metód vzdelávania
so zameraním na oblasť inteligentného riadenia
elektroenergetických distribučných sietí (Smart
Grids)**

OBSAH

1. Úvod	6
2. Elektrizovaná sústava	7
2.1. Elektrická sieť.....	8
2.2. Návrh a prevádzka ES	8
3. Distribučná sústava	10
3.1. Prvky distribučných sústav	11
3.1.1. Elektrické vedenia.....	11
3.1.2. Transformátory.....	12
3.1.3. Spínacie prístroje	14
3.1.4. Zhášacie tlmivky	15
3.1.5. Elektrické ochrany	16
3.1.6. Recloser	19
3.2. Inteligentné distribučné siete.....	20
4. Využitie IKT pri riadení distribučných sietí	21
4.1. Systémy automatizácie DS.....	21
4.1.1. Vplyv na krátkodobé výpadky	21
4.2. Spoľahlivosť komunikačného systému	23
4.3. Samoliečiace sa siete	25
5. Výpočty chodu distribučných sietí.....	27
5.1. Štruktúra distribučných sietí a jej vplyv na prevádzku	27
5.2. Lineárne metódy.....	28

5.2.1.	Základné výkonové rovnice	29
5.2.2.	Metóda uzlových napätí (MUN)	29
5.3.	Nelineárne metódy.....	30
5.3.1.	Výkonové rovnice prípojnic	30
5.3.2.	Rovnice prúdu vo vedeniach	31
5.3.3.	Newton-Raphsonova metóda.....	31
5.3.4.	Gauss-Seidlova iteračná metóda	34
5.3.5.	Metóda Backward Forward Sweep Load Flow (BFS)	35
6.	Estimácia stavu distribučných sietí vn	38
6.1.	Model pozorovania.....	40
6.2.	Metódy a algoritmy používané pre distribučné siete.....	40
6.2.1.	Princíp estimačnej metódy vážených najmenších štvorcov (WLS). 41	
6.2.2.	Algoritmus DSE	42
6.2.3.	Algoritmus ISE.....	44
6.2.4.	Algoritmus PSE.....	45
6.2.5.	Algoritmus FSE.....	47
7.	Využitie GPU procesorov pre podporu riadenie distribučných sietí	50
7.1.	História GPU	50
7.2.	Možnosti programovania	50
7.2.1.	Programovací jazyk CTM	51
7.2.2.	AMD FireStream	51
7.2.3.	CUDA.....	51

7.2.4.	OpenCL	52
7.3.	Posúdenie využiteľnosti GPU pre výpočty podporujúce prevádzku distribučných sietí.....	52
7.3.1.	Výpočty tokov výkonov	53
7.3.2.	Výpočty skratových prúdov	53
7.3.3.	Optimalizácia prevádzky elektrických sietí.....	54
7.4.	Estimácia stavu distribučnej siete	54
7.4.1.	Evolučné algoritmy	54
8.	Záver	56
	Použitá literatúra.....	57

1. ÚVOD

Distribučné sústavy plnia v rámci elektrizačných sústav dôležité úlohy týkajúce sa doštrubúcie a rozvodu elektrickej energie. Za týmto účelom využívajú rôzne zariadenia, ktorých stav a parametre musia byť kontinuálne monitorované, aby sa zabezpečila bezpečná a spoľahlivá prevádzka príslušnej distribučnej sústavy. Ku „tradičným“ prvkom distribučných sústav, ako sú napr. transformátory, elektrické vedenia a vypínače, sa v poslednom období pridávajú zariadenia, ktoré sú schopné poskytovať lepšie informácie o stave distribučnej sústavy, čím prispievajú jednak k automatizácii jej riadenia, ale aj ku zvýšeniu bezpečnosti, spoľahlivosti a ekomiky jej prevádzky.

Využívanie informačno-komunikačných technológií (IKT) pre riadenie technologických celkov sa využíva vo viacerých priemyselných odvetviach. Môže sa pri tom jednať o lokálne aplikácie, ktoré monitorujú a riadia zariadenia sústredené do niekoľkých metrov štvorcových, no taktiež existujú aplikácie, ktoré riadia siete s rozlohou pokrývajúcou časti štátov. V oboch prípadoch je potrebné potrebné údaje získať, prekonvertovať ich do podoby umožňujúcej ich prenos na menšiu či väčšiu vzdialenosť, uložiť, spracovať a prezentovať obsluhu.

Miera inteligencie a automatizácie týchto systémov, označovaných pojmom SCADA, prešla v poslednom období výraznými zmenami. Predovšetkým v elektroenergetike sa tieto systémy stávajú nástrojom pre realizáciu funkcionality inteligentných sietí (Smart Grids). Dá sa povedať, že IKT tvoria jednu z dôležitých zložiek inteligentných sietí, pretože poskytujú ostatným zložkám tohto konceptu potrebné informácie pre zabezpečenie ich funkcionality.

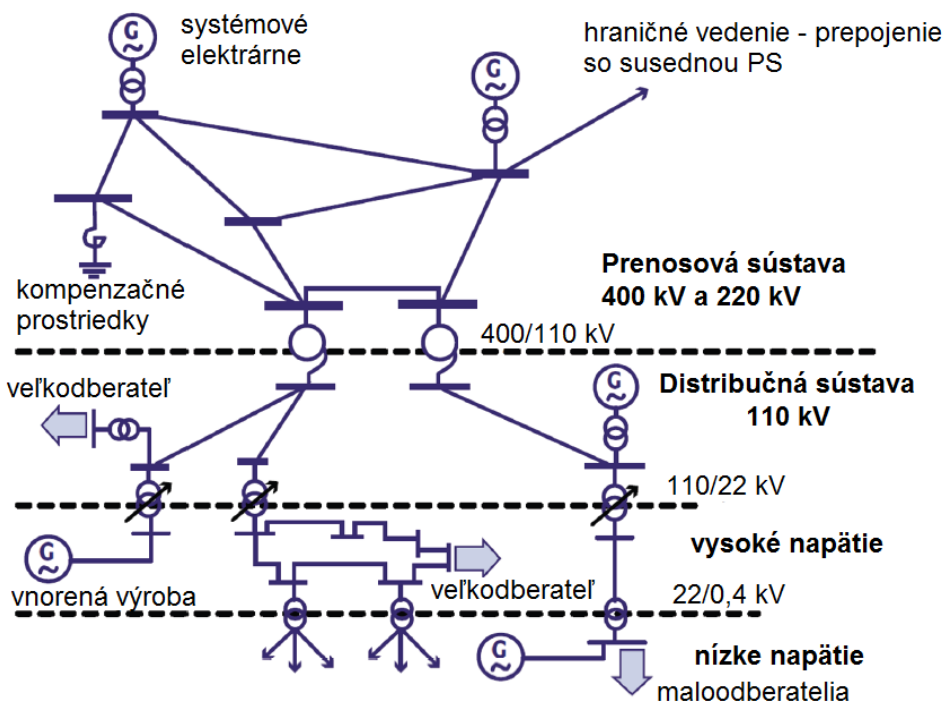
Získanie údajov o prevádzke distribučnej sústavy a ich prezentácia obsluhu je len jednou, aj keď z hľadiska operatívneho riadenia veľmi dôležitou, možnosťou ich využitia. Druhou je použitie týchto dát pre dlhodobé či krátkodobé plánovanie prevádzky distribučných sietí. Pre tieto účely sa používajú metódy a algoritmy pre výpočty statických chodov sietí. Avšak s postupným nárastom požiadaviek na funkcionality distribučných sietí sa do popredia dostávajú estimačné metódy, ktoré umožňujú odhadnúť ich prevádzkový stav len na základe už vybudovaného merania, ktoré primárne nebolo určené na podporu týchto novopožadovaných funkcií.

Predložený text sa snaží stručne priblížiť vyššie uvedené témy. Autori si však uvedomujú, že problematika využitia IKT v riadení distribučných sietí je veľmi rozsiahla a nie je ju možné pokryť v predloženom rozsahu. Veria však, že predložený text bude čitateľom motiváciou pre ďalšie štúdium tejto problematiky.

2. ELEKTRIZAČNÁ SÚSTAVA

Elektrizačná sústava (ES) je vzájomne prepojený súbor zariadení zahŕňajúci [1]:

- výrobu – elektrárne jadrové, tepelné, vodné, teplárne a pod.,
- prenos, transformáciu a distribúciu elektrickej energie vrátane elektrických prípojk,
- systémy meracie, ochranné, riadiace, zabezpečovacie, informačné a telekomunikačné,
- spotrebiče – zariadenia na premenu elektrickej energie na teplo, svetlo, mechanickú prácu a pod.



Obr. 2.1. Usporiadanie elektrizačnej sústavy [2]

Štruktúra elektrizačnej sústavy sa postupom času ustálila na podobe, ktorá je schematicky znázornená na [obr. 2.1](#). Elektrárne dodávajú cez svoje blokové transformátory energiu do prenosovej sústavy. Z prenosovej sústavy sú napájané distribučné sústavy. Prenosové a distribučné sústavy sa nelíšia len svojimi napäťovými úrovňami, ale aj

spôsobom, akým je elektrický stred (uzol) týchto sústav spojený so zemou. Prenosová sústava 400 kV a 220 kV je prevádzkovaná s uzemneným uzlom, rovnako ako distribučná sústava 110 kV. Distribučné sústavy 22 kV (pre ČR aj 35 kV) majú uzol od zeme buď izolovaný, alebo pripojený cez zhášaciu tlmivku alebo odporník. V sústavách 230/400 V prevažujú siete, v ktorých sú uzly vinutí transformátorov pripojené na potenciál zeme [1].

2.1. Elektrická sieť

Elektrická sieť je súbor jednotlivých, vzájomne prepojených elektrických staníc a elektrických vedení na prenos a rozvod elektrickej energie. Slúži ako spojovací článok medzi výrobou a spotrebou elektrickej energie [1].

Podľa druhu elektrické zdroja siete rozoznávame [1]:

- jednosmerné elektrické siete,
- striedavé elektrické siete.

Podľa účelu sa elektrické siete delia na [1]:

- **prenosové siete** na prenos veľkých výkonov na veľké vzdialenosti. Prenosové siete majú napätia 400 kV a 220 kV.
- **distribučné siete**, ktoré sú tvorené súborom zariadení na rozvod elektrickej energie z prenosovej sústavy alebo zo zdrojov zapojených do nich ku koncovým užívateľom. V podmienkach elektrizačnej sústavy sa jedná o zariadenia s napätím 110 kV a nižším.
- **priemyselné siete**, ktoré slúžia k rozvodu elektrickej energie v priemyselnom objekte od hlavnej stanice objektu k jednotlivých spotrebičom. Napätie obvykle zodpovedá napätiu spotrebičov (napr. 6 kV, 10 kV).

2.2. Návrh a prevádzka ES

Základné otázky, ktoré treba riešiť pri návrhu a prevádzke elektrizačnej sústavy súvisí s hospodárnosťou, spoľahlivosťou a kvalitou dodávanej elektrickej energie [1].

Hospodárnosťou rozumieme minimalizáciu obstarávacích a prevádzkových nákladov elektrizačnej sústavy pre dané plošné rozloženie požiadaviek na elektrickú energiu pri dodržaní zmluvných ukazovateľov kvality a spoľahlivosti.

Kvalita dodávanej elektrickej energie je splnená, ak sú splnené jej dohodnuté kritériá:

- napätie v povolenej tolerancii,
- skreslenie krivky napätia u striedavého prúdu oproti harmonickému priebehu,
- symetria napätí v trojfázových striedavých sústavách,

- kolísanie frekvencie.

Spôľahlivosťou sa rozumie splnenie požiadaviek na odoberaný výkon v priebehu doby prevádzky jednotlivých spotrebičov.

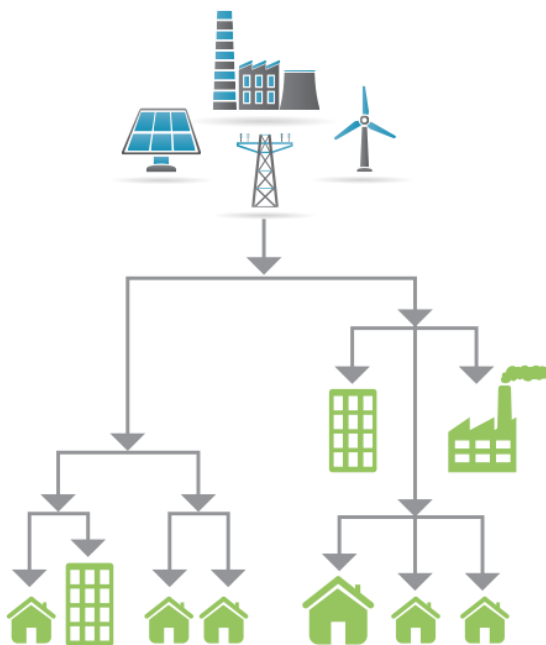
Hospodárny chod elektrizačnej sústavy je ovplyvňovaný na strane elektrární zabezpečením primárnej energie (dopravou paliva, predzásobením, vodným stavom a režimom tokov u vodných elektrární a pod.) a zabezpečením pohotového výkonu zdrojov (organizácia prevádzky a opráv elektrárenských zariadení). Na strane odberateľov je chod elektrizačnej sústavy pod vplyvom skladby spotrebičov a časového rozloženia ich požiadaviek na výkon, spoľahlivosť a kvalitu dodávanej elektrickej energie. Obe ovplyvňovania sú zásadného charakteru a môžu hospodárny chod znemožniť, alebo v kritických prípadoch viesť až k rozpadu chodu elektrizačnej sústavy [1].

Prispôsobenie chodu elektrizačnej sústavy vonkajším vplyvom má za úlohu riadenie sústavy. Nároky na riadenie sú značné, pretože niektoré podmienky chodu sa menia veľmi rýchlo (poruchové stavy), viac či menej náhodne (poruchy zariadení, výkon spotrebiteľov) a je potrebné v každom časovom okamžiku udržať rovnováhu medzi spotrebou, stratami a dodávkou elektrickej energie v sústave pri splnení požiadaviek na kvalitu, spoľahlivosť a hospodárny chod [1].

Dispečerské riadenie sa uskutočňuje na niekoľkých hierarchických úrovniach, od úrovne celoštátnej až po dispečerské riadenie jednotlivých distribučných sústav [1].

3. DISTRIBUČNÁ SÚSTAVA

Distribučná sústava (DS) ([obr. 2.1](#)) je súbor vzájomne prepojených elektrických vedení a elektroenergetických zariadení potrebných na distribúciu elektrickej energie na časti vymedzeného územia. Súčasťou distribučnej sústavy sú aj meracie, ochranné, riadiace, zabezpečovacie, informačné a telekomunikačné zariadenia potrebné na prevádzkovanie distribučnej sústavy. Je systémom, ktorý prepojuje prenosovú sústavu, niektorých výrobcov, dodávateľov a odberateľov a súčasne môže zabezpečiť medzinárodnú spoluprácu vo výmene elektrickej energie. Tieto skutočnosti kladú zvýšené nároky na bezpečnosť a spoľahlivosť prevádzky DS ako celku, bez ohľadu na jej organizačnú štruktúru a vlastníctvo [\[3\]](#).



Obr. 2.1. Topológia tradičnej distribučnej siete [\[4\]](#)

Pre distribúciu elektrickej energie na Slovensku sa využívajú elektrické siete s napätím 110 a 22 kV a už dosluhujúcim napätím 6 kV. Zo sietí 110 kV sú napájané cez transformátory (väčšinou jednostranne – [obr. 3.1](#)) elektrické siete 22 kV. Ak sa v sieti 22 kV nachádzajú zdroje, ktorých výkon nie je vyvedený priamo na prípojnicu elektrickej stanice s transformátorom 110/22 kV, ale sú pripojené na kmeňové vedenie alebo jeho odbočku,

zmení sa napájanie príslušnej časti siete na dvojstranné alebo viacstranné. Striedavá trojfázová sieť 22 kV je realizovaná ako sústava IT trojvodičovými vzdušnými a káblovými vedeniami. Zo siete 22 kV sa spotrebiče elektrickej energie nenapájajú priamo, ale cez transformátory vn/vn a vn/nn. Základnými prvkami sietí 22 kV sú vzdušné a káblové elektrické vedenia a elektrické stanice (rozvodne a transformačné stanice) [3].

3.1. Prvky distribučných sústav

3.1.1. Elektrické vedenia

Elektrické vedenie je vodivé spojenie dvoch prevádzkových miest. Vedenia 22 kV sú realizované buď ako vzdušné (vonkajšie) alebo káblové [3].

Vzdušné vedenia sú postavené nad zemou mimo budov a bez ochranného obloženia. Pozostávajú zo stožiarov, ku ktorým sú pomocou armatúr a izolátorov pripevnené vodiče vedenia. Stožiare vzdušných vedení sú v teréne upevnené pomocou základov a môžu byť uzemnené.

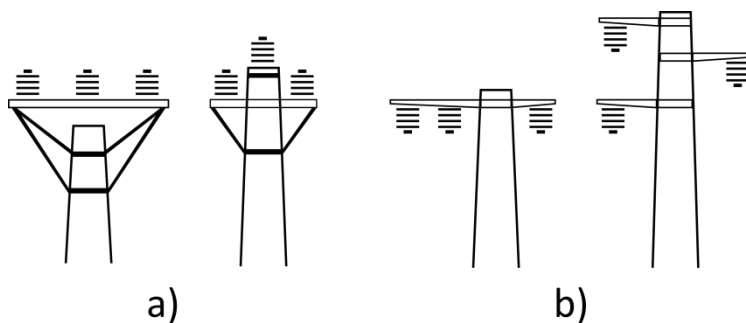
Káblové vedenia majú úplne izolované vodiče, ktoré sú obvykle uložené v zemi v káblových kanáloch alebo na káblových lávkach, kde sú príslušne chránené. Zvláštnym typom káblového vedenia je závesný kábel, ktorý je umiestnený na podperných bodoch. Môže byť realizovaný ako kábel zavesený na nosné lano pomocou páskových príchytiek alebo ako samostatný kábel, kedy nosné lano tvorí s káblom jeden konštrukčný celok.

Vedenia 22 kV, označované aj ako vedenia vn, sú súčasťou distribučnej sústavy. Podľa významu je možné vedenia vn rozdeliť na vedenia:

- **distribučné** – slúžia pre distribúciu elektrickej energie odberateľom. Tieto vedenia spájajú elektrické stanice 110/22 kV s distribučnými transformačnými stanicami 22/0,4 kV, z ktorých sú napájaní odberatelia,
- **miestne** – zabezpečujú rozvod elektrickej energie na území mesta alebo obce.

Na mechanické upevnenie vodičov vonkajších silových vedení sa používajú podperné body, stožiare (obr. 3.2), ako konštrukčné časti na „nesenie“ vodičov pomocou izolátorov, ktoré slúžia aj na oddelenie častí s rôznym potenciálom. Stožiare musia zabezpečovať prevádzkovú spoľahlivosť vedenia a zároveň znášať klimatické podmienky oblasti, v ktorej sa nachádzajú, najmä účinky nárazov vetra a extrémnej námrazy [3].

Časti stožiara sú základ, driek, hlava, most (portál), priečky, konzoly, vzpery a zakotvenia. Rozoznávame **stožiare jednoduché (valec, hranol)** a **zložené** konštrukcie **najrôznejších tvarov (kozlík, portál a pod.)** [3].



Obr. 3.2. Usporiadanie vodičov vn vedení a) klasické, b) súčasný trend

3.1.2. Transformátory

Transformátory zohrávajú dôležitú úlohu pri prenose, rozvode a distribúcii elektrickej energie. Každá elektrizačná sústava prevádzkuje transformátory rôznych napäťových hladín a výkonov. Pri diaľkovom prenose elektrickej energie sa blokovými transformátormi (transformátory v elektrárňach) zvyšuje napätie, tzv. zvyšovacie transformátory, aby sa minimalizovali straty a zvýšil prenášaný výkon. Elektrická energia je vysokonapäťovými vedeniami distribuovaná do miesta spotreby, kde sa znižovacími transformátormi transformuje napätie z vyššieho na nižšie [3].

Z technického hľadiska môžeme transformátory definovať ako netočivé elektrické stroje, ktoré pracujú na princípe elektromagnetickej indukcie, kedy sa časovou zmenou magnetického toku indukuje napätie vo vodičoch pri konštantnej frekvencii.

Z **distribučnej sústavy 110 kV** je cez transformátory 110/22 kV napájaná **distribučná sústava 22 kV** (obr. 2.1). Transformátory 110/22 kV sú **riaditeľné** a môžu pri zaťažení (t. j. pod napätím a s prúdom) meniť po malých stupňoch odbočky vinutia. Uzol 22 kV strany transformátora 110/22 kV sa v súčasnosti prevádzkuje ako nepriamo uzemnený cez zhášaciu tlmivku alebo cez odporník [3].

Transformátory 110/22 kV sa umiestňujú vo vnútorných alebo vonkajších transformátorových stanovištiach. **Distribučné transformačné stanice** sú vystavané ako stožiarové, murované, kioskové, kompaktné a už dosluhujúce vežové [3].

Na transformáciu z úrovne vvn/vn sa používajú **olejové transformátory vo výkonových radách od 2,5 do 16 MV·A**. Tieto transformátory sa vyrábajú hermeticky uzavreté – distribučné transformátory vo vlnových nádobách a výkonové transformátory v radiátorových nádobách. Vinutie a magnetický obvod sú teda ponorené v chladiacom médiu, ktorým je buď minerálny alebo silikónový olej, resp. ekologické dielektrikum na báze esterov [3].



Obr. 3.3. Trojfázový olejový transformátor 22/0,4 kV

Transformátory 22/0,4 kV ([obr. 3.3](#)) sa používajú pre napájanie **rozvodnej sústavy 0,4 kV**, ktorá je väčšinou sústredená na menšie ohraničené územie. Transformátory 22/0,4 kV majú možnosť ovládania odbočkového prepínača len vo vypnutom stave t. j. bez prúdu a napätia. Transformátory 22/0,4 kV sa umiestňujú vo vnútorných alebo vonkajších transformátorových stanovištiach [[3](#)].

Na transformáciu napätia z úrovne vn na nn sa používajú **suché transformátory vo výkonových radách od 100 do 4000 kV·A** s krytím IP 23 ([obr. 3.4](#)). Tieto transformátory majú väčšinou vinutia zaliate epoxidovou živicom. Tieto transformátory nevyžadujú ochranné opatrenia proti roztekaniu oleja alebo inej chladiacej kvapaliny. Vyžadujú len minimálnu pozornosť pri prevádzke a údržbe [[3](#)].



Obr. 3.4. Trojfázový suchý transformátor 22/0,4 kV s liatou izoláciou

3.1.3. Spínacie prístroje

Spínacie prístroje sú určené na vypínanie a zapínanie silnoprúdového obvodu. Prostredníctvom nich je možné meniť konfiguráciu prenosových a distribučných sústav a spínať napájané elektrické spotrebiče a elektrické zariadenia [3].

Medzi spínacie prístroje patria:

- vypínač,
- odpájač,
- odpínač,
- poistka,
- uzemňovač,
- skratovač.

Vypínače

Vypínače slúžia na zapínanie a vypínanie prúdových obvodov v zaťaženom stave. V prípade poruchy vypínajú aj preťaženia a skraty. Vypínač musí byť schopný (pokiaľ sú dodržané podmienky stanovené výrobcom) vypnúť až do svojho menovitého vypínacieho prúdu všetky skratové prúdy [3].



Obr. 3.5. Vákuový vypínač typu VD4 od firmy ABB

Odpájače

Odpájače sa používajú v rozvodných zariadeniach na bezpečné a viditeľné odpojenie odbočky, čo je potrebné najmä pri opravách, údržbárskych prácach na vypínačoch alebo pri výmene zariadenia. Viditeľnosť odpojovanej dráhy nie je potrebná, ak je nahradená spoľahlivou signalizáciou stavu, napr. pri zapuzdrených rozvodniach. Odpájače môžu spínať obvody pod napätím, nesmie sa však nimi zapínať ani vypínať záťaž okrem malých indukčných a kapacitných prúdov a transformátorov naprázdno. Pohon odpájačov môže byť tlakovzdušný, elektrický alebo ručný.



Obr. 3.6. Odpájač FTr 6400 od firmy Dribo

3.1.4. Zhášacie tlmivky

Zhášacia tlmivka ([obr. 3.7](#)) je zapojená medzi uzol transformátora a zem. Za normálneho stavu siete má uzol proti zemi nulové napätie, takže tlmivkou neprechádza prúd (v skutočnosti prechádza len tzv. vyrovnávací prúd). Ak dôjde k zemnému spojeniu, vznikne medzi uzlom transformátora a zemou rozdiel potenciálov rovný fázovému napätiu v sieti, takže tlmivkou začne pretekať prúd, ktorý sa vracia miestom zemného spojenia vodiča. Týmto prúdom je potom kompenzovaný zemný kapacitný prúd ostatných dvoch vodičov, na ktorých je pri poruche združené napätie siete [\[3\]](#).

Vzhľadom na to, že sa kapacita siete v priebehu prevádzky mení, musí byť tlmivka regulovateľná a to buď stupňovite prepínaním počtu závitov, alebo plynule zmenou magnetického odporu vzduchovej medzery, t. j. posúvaním kotvy ručne alebo automaticky. Tlmivka je umiestnená v ocelevej nádobe a chladená olejom. Medzi tlmivku a transformátor je zaradený odpínač, ktorý bezpečne vypne menovitý prúd tlmivky [\[3\]](#).

Úplná kompenzácia zemného prúdu nie je v praxi možná, pretože vplyvom vodivosti vedení, odporu tlmivky a vplyvom nesúmernosti siete zostáva zvyškový prúd, ktorý je priamo závislý na rozsahu pripojenej sústavy 22 kV [3].



Obr. 3.7. Zhášacia tlmivka firmy EGE, s.r.o. České Budějovice

Zhášacia tlmivka sa k uzlu transformátora pripojuje cez odpínač a odporúča sa zaradiť aj poistku. Na ochranu tlmivky proti prepätiu sa k uzlu pripojí aj bleskoistka [3].

3.1.5. Elektrické ochrany

Úlohou elektrických ochrán je chrániť distribučnú sústavu pred nežiaducimi prevádzkovými stavmi, ako sú napr. preťaženie skratom, prepätie, podpätie a iné. Svojou funkcionalitou patria k základným prvkom riadenia distribučných sietí.

Elektrická ochrana je zariadenie, ktoré zaisťuje prevádzkovú bezpečnosť a spoľahlivosť chráneného objektu – chráneného zariadenia. Získava informácie o vybraných veličinách chráneného objektu a v prípade prekročenia dovolených hodnôt zabráňuje šíreniu poruchy odpojením zariadenia, jeho odbudením a podobne. Zároveň signalizuje svoje pôsobenie obsluhu. Tá môže nastavovať parametre ochrany [5].

Druhy ochrán

Na chránených zariadeniach môže dôjsť k rôznym druhom porúch, ktoré musia ochrany spoľahlivo detekovať a v prípade ohrozenia zariadenia dať pokyn na odopnutie

zariadenia. Ak nie je možné zabezpečiť všetky potrebné ochranné funkcie jedným druhom ochrany, je nutné ochrany kombinovať a vytvárať súbory ochrán.

Podľa druhu poruchy, ktorú ochrana detekuje, rozoznávame ochrany [6]:

- skratové
- pri preťažení
- podpäťové
- nadpäťové
- podfrekvenčné
- nadfrekvenčné
- pri zemnom spojení
- pri nesúmernosti
- pri spätnom toku výkonu
- pri strate budenia

Podľa funkčného princípu (podľa stavovej veličiny, na ktorú ochrana reaguje) delíme ochrany na:

- prúdové (prúd)
- napäťové (napätie)
- dištančné (impedancia)
- rozdielové (rozdiel prúdov)
- porovnávacie (rozdiel fáz)
- wattové (činný výkon)
- jalové (jalový výkon)
- frekvenčné (frekvencia)
- pri nesymetrii (spätná zložka)

Podľa času pôsobenia delíme ochrany na okamihové, časovo nezávislé a časovo závislé.

Okamihové ochrany pôsobia okamžite pri vzniku poruchy, ich rýchlosť je obmedzená len dobou spracovania meranej veličiny.

Časovo nezávislé ochrany majú konštantnú, obsluhou nastavenú dobu pôsobenia, ktorá je nezávislá na hodnote stavovej veličiny.

Časovo závislé ochrany majú dobu pôsobenia závislú na veľkosti niektorej stavovej veličiny.

Podľa konštrukčného vyhotovenia rozoznávame ochrany elektromechanické, elektronické a číslicové (digitálne).

Elektromechanické ochrany využívajú elektrické relé. Je to najstaršie konštrukčné riešenie, avšak stále sa v prevádzke bežne vyskytujú. Jedna ochrana zabezpečuje len jednu ochrannú funkciu a preto je nutné ochrany kombinovať.

Elektronické ochrany nahrádzajú klasické relé elektronickými obvodmi zloženými z diód, tranzistorov a integrovaných obvodov. Stavová veličina je reprezentovaná analógovo – úrovňou nejakej elektrickej veličiny napr. veľkosťou napätia. Jednotlivé obvody sú

priestorovo nenáročné, a preto je ich možné kombinovať do jednej skrine a vytvoriť tak súbornú ochranu, ktorá zabezpečuje viacero ochranných funkcií.

Digitálne ochrany využívajú číslicové spracovanie signálu. Všetky veličiny sú spracované číslicovo (diskrétne) pomocou mikroprocesorov. Informácie sú reprezentované kombináciami logickej jednotky a logickej nuly (čísla sú v binárnom tvare). Digitálne ochrany sú schopné sledovať všetky rozmery stavového priestoru chráneného objektu [5].

Ochrany vedení

Nové rozvodne 22 kV sú vybavené digitálnymi ochrami, ako príklad uvádzame ochranu REF 543 (obr. 3.8), ktorá má implementovaný softvér pre:

- nadprúdovú medzifázovú ochranu,
- skratovú ochranu,
- nadprúdovú zemnú nesmerovú ochranu - dva stupne,
- nadprúdovú zemnú smerovú ochranu - dva stupne,
- automatiku opätovného zapínania (OZ).



Obr. 3.8. Digitálna ochrana REF 543 od firmy ABB

3.1.6. Recloser

Pod pojmom recloser sa rozumie diaľkovo ovládaný vypínač s funkciou opätovného zapínania, určený pre spínanie menovitých a skratových prúdov, ktorého súčasťou je aj meranie a riadiaca jednotka. Tá ovláda pohon reclosera a vykonáva ochranné, monitorovacie a automatizačné funkcie. V tom je zásadný rozdiel oproti klasickému výkonovému vypínaču, ktorý je podľa normy definovaný iba ako mechanické spínacie zariadenie určené pre spínanie menovitých a skratových prúdov. Recloser sa montuje priamo na stožiar vzdušného vedenia vn (obr. 3.9) spolu so skriňou diaľkového ovládania, anténou, napájacím izolovaným vn transformátorom napätia, meraním prúdov a vodičmi prepätia [3] Ovládanie je diaľkové (z riadiaceho systému dispečingu), alebo miestne, z riadiacej skrine pomocou tlačidiel pre zapnutie a vypnutie.

Inštaláciou recloserov sa zvyšujú možnosti diaľkového a aj inteligentného riadenia distribučných vn sietí.

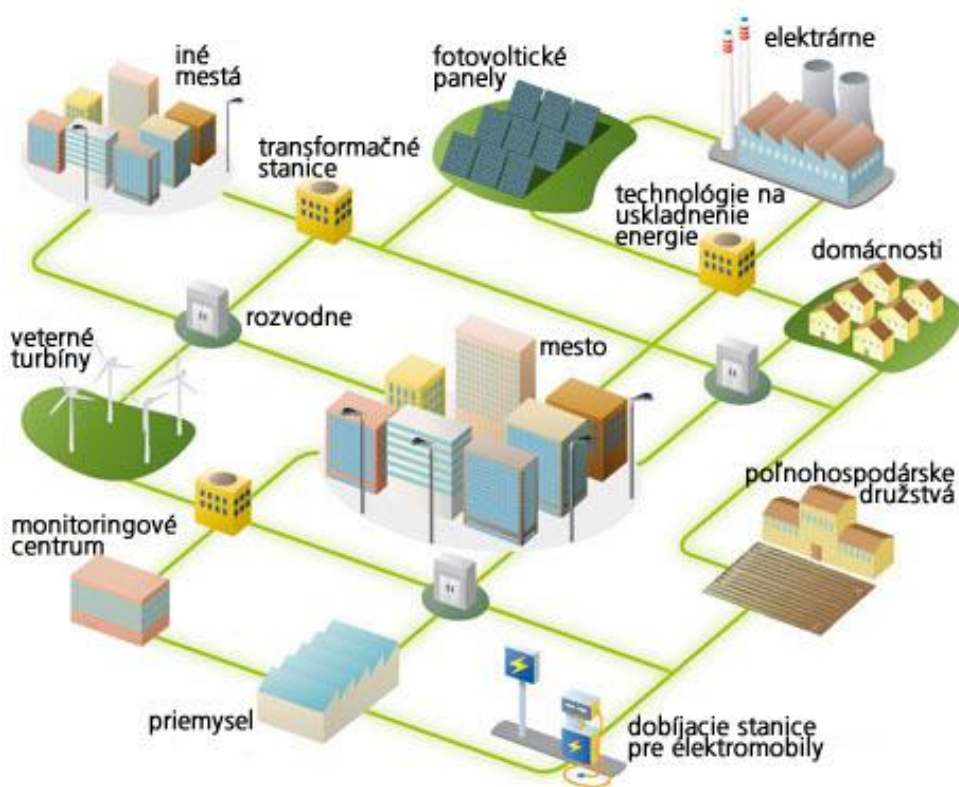


Obr. 3.9. Recloser firmy Dribo

3.2. Inteligentné distribučné siete

Inteligentné siete ([obr. 3.10](#)), nie len tie distribučné, sa v súčasnosti považujú za budúcnosť elektroenergetiky a majú priniesť množstvo výhod pre odberateľov elektrickej energie.

Inteligentné siete v sebe kombinujú tradičné technológie s inovatívnymi digitálnymi riešeniami. Týmto zvyšujú pružnosť riadenia elektrizačnej sústavy vďaka efektívnejšej výmene informácií. Jednou z výhod inteligentných sietí je aj sieťová integrácia jednotlivých prevádzok výroby elektriny z obnoviteľných zdrojov, ktorých rozmach sleduje naplnenie environmentálnych cieľov stanovených Európskou komisiou. Použitie inovatívnych digitálnych technológií umožní monitorovať celú sieť a regulovať energetické toky ako prevenciu pred výpadkami, čím dosiahneme bezchybné zásobovanie elektrinou.



Obr. 3.10. Príklad inteligentnej siete [7]

4. VYUŽITIE IKT PRI RIADENÍ DISTRIBUČNÝCH SIETÍ

4.1. Systémy automatizácie DS

Najdôležitejšou úlohou distribučnej sústavy je zabezpečiť dodávku elektrickej energie pripojeným odberateľom. Z tohto dôvodu je potrebné rýchlo nájsť každú poruchu, ktorá sa v DS vyskytne a urobiť také opatrenia, vďaka ktorým sa minimalizuje počet odberateľov bez elektrickej energie. V minulosti bolo vyhľadávanie porúch zdĺhavou a náročnou úlohou, nakoľko elektrické ochrany určili len postihnutý vývod z rozvodne 22 kV. Presnejšie určenie miesta poruchy sa následne vykonávalo manipuláciami v teréne a skúšobným zapínaním vedenia do poruchy. Tento spôsob vyhľadávania poruchy bol časovo náročný, čo spôsobovalo neúmerne predlžovanie času nedodávky elektrickej energie. Časté zapínanie vedení do poruchy bolo spojené so zbytočným namáhaním zariadení distribučného rozvodu skratovými prúdmi a prevádzkovými prepätiami [6].

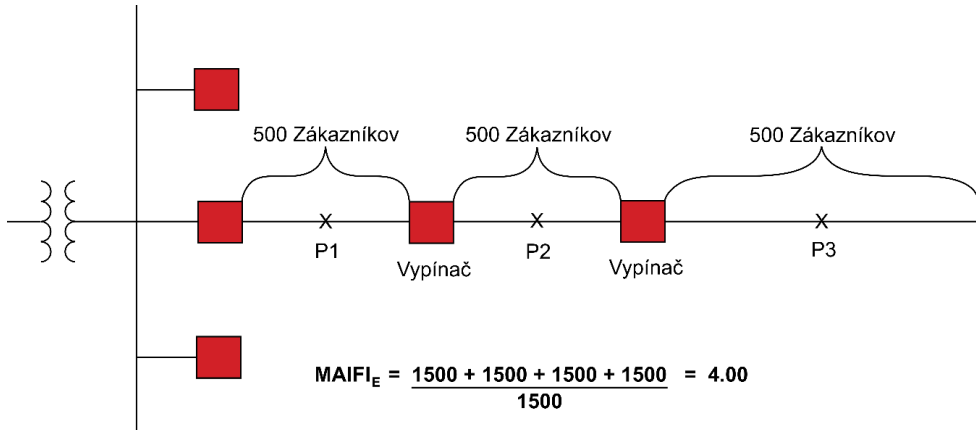
Súčasný rozvoj elektronických zariadení a výrazný pokles ich cien umožňuje širokoplošné nasadenie jednoduchých digitálnych meracích prístrojov vybavených funkciou elektrických ochrán. Systém automatizácie distribučných sietí vn, pozostáva z nasledovných prvkov [6]:

- systém diaľkovej lokalizácie porúch,
- inteligentné diaľkovo ovládané distribučné trafostanice,
- inteligentné úsekové odpínače,
- autoreclosery.

Nasadenie týchto prvkov umožňuje bližšie lokalizovať miesto poruchy, znížiť čas obnovy dodávky elektrickej energie po poruchách a znížiť namáhanie zariadení distribučného rozvodu poruchovými nadprúdmi a prepätiami [6].

4.1.1. Vplyv na krátkodobé výpadky

Viac ako 75 % všetkých porúch v distribučnej sústave je prechodných. Budovaním automatizovanej distribúcie sa minimalizujú vplyvy krátkodobých výpadkov v oblastiach, ktoré sú často postihované prechodnými poruchami. Vplyv recloserov a vypínačov nachádzajúcich sa v sústave na koeficient MAIFIE je uvedený na [obr. 4.1](#) a [obr. 4.2](#) [12].

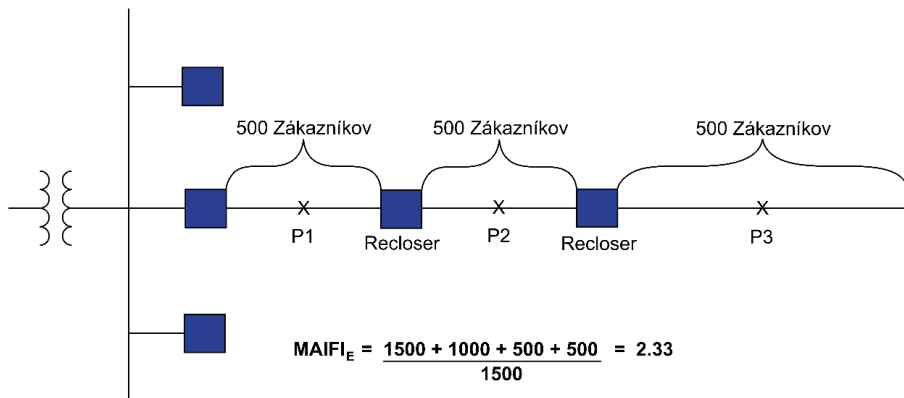


Obr. 4.1. Použitie vypínačov [12]

Ukazovateľ spoľahlivosti MAIFI_E (ukazovateľ priemernej početnosti krátkodobých udalostí) vypočítame nasledovne [12]:

$$\text{MAIFI}_E = \frac{\text{celkový počet postihnutých odberateľov krátkodobými udalosťami}}{\text{celkový počet odberateľov}} \quad (4.1)$$

Koeficient MAIFI_E berie do úvahy jednu alebo viacero sekvencií OZ ako jednu udalosť [12].



Obr. 4.2. Použitie recloserov [12]

V [tab. 4.1](#) sú uvedené 4 oblasti vzniku poruchy, čo má za následok zmenu počtu ovplyvnených zákazníkov. Udalosť 4 zahrnuje druhú poruchu, ktorá sa vyskytuje v oblasti P3 [\[12\]](#).

Tab. 4.1. Vplyv recloserov a vypínačov na sústavu

Udalosť	Prechodná porucha	Počet ovplyvnených zákazníkov pri použití vypínačov	Počet ovplyvnených zákazníkov pri použití recloserov	Trvanie poruchy
1	P1	1500	1500	30 s
2	P2	1500	1000	30 s
3	P3	1500	500	30 s
4	P3	1500	500	30 s

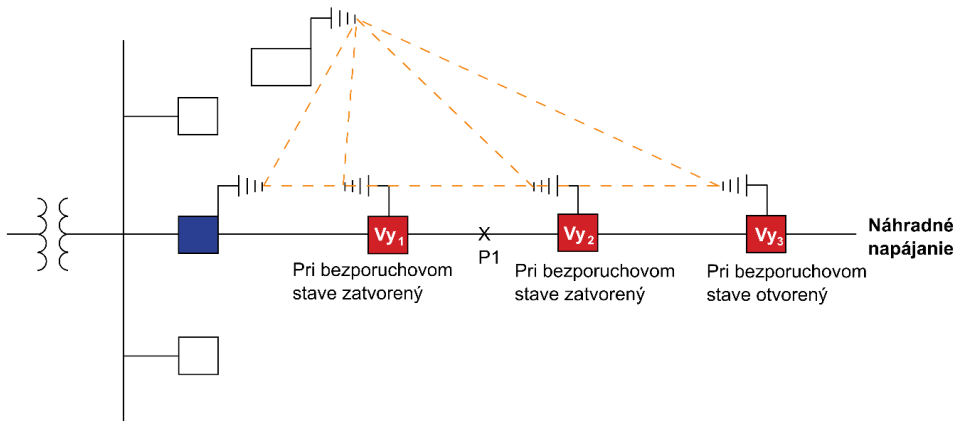
Zlepšenie koeficientu $MAIFI_E$ z hodnoty 4,00 na hodnotu 2,33 (42 % zlepšenie), je v priamom vzťahu k zníženiu krátkodobých prerušení dodávky elektriny [\[12\]](#), čím sa zlepšuje kvalita napájania odberateľov.

4.2. Spôľahlivosť komunikačného systému

Po zistení a lokalizovaní poruchy je potrebná rekonfigurácia systému. Rekonfigurácia systému sa zavádza prostredníctvom komunikačnej siete, alebo automatického decentralizovaného riadenia zariadení, prípadne ich kombináciou [\[12\]](#).

Spôľahlivosť systému je lepšia v prípade, že sa automatická rekonfigurácia systému uskutočňuje bez potreby komunikačného systému. Decentralizovaný komunikačný systém môže byť jednoducho nadobudnutý pomocou recloserov. Komunikácia má významnú úlohu pri celkovej obnove systému, avšak ihneď po vyskytnutí sa poruchy nie je komunikácia potrebná [\[12\]](#).

Najvyššou prioritou pri poruche na vedení je rýchlo vypnúť vedenie, aby sa minimalizovalo jeho poškodenie. Tiež je dôležité zamedziť rozširovaniu poruchy a rýchlo obnoviť dodávku elektriny. Potom, ako je porucha izolovaná najbližším ochranným zariadením, je nutné systém rýchlo prekonfigurovať, aby sa zabezpečila dodávka elektriny pre čo najväčší počet zákazníkov. Na [obr. 4.3](#) sa nachádza príklad rekonfigurácie sústavy pomocou vypínačov [\[12\]](#).



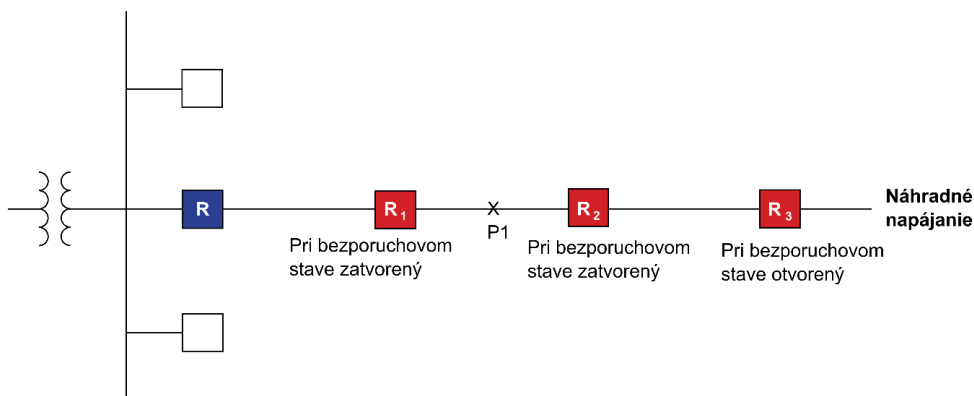
Obr. 4.3.. Rekonfigurácia sústavy pomocou vypínačov [12]

Sústava v uvedenom príklade využíva vypínače. Rekonfigurácia sústavy sa uskutoční v nasledujúcich krokoch v prípade, že trvalá porucha nastane v oblasti P1 [12]:

1. Recloser alebo vypínač nachádzajúci sa v rozvodni deteguje nadprúd a vypne vedenie.
2. Nastanú OZ reclosera alebo vypínača podľa ich naprogramovaných sekvencií. Tým, že je porucha trvalá, OZ budú neúspešné a následne nastane deaktivácia vypínacieho zariadenia.
3. Celé vedenie je bez napätia až po vypínač Vy_3 .
4. Je nutná komunikácia medzi zariadeniami.
5. Vypínač Vy_1 zistí poruchový stav a prostredníctvom komunikácie odošle riadiacemu systému informáciu o vyskitnutí poruchy.
6. Je vydaný príkaz na otvorenie spínača Vy_1 .
7. Pomocou komunikácie je zistené, že spínač Vy_2 nezaznamenal poruchový stav.
8. Je vydaný príkaz na otvorenie spínača Vy_2 .
9. Je vydaný príkaz na zatvorenie reclosera alebo ističa, ktorý sa nachádza v rozvodni.
10. Je vydaný príkaz na uzavretie spínača Vy_3 .

Poruchová oblasť medzi vypínačom Vy_1 a Vy_2 je izolovaná. V krokoch štyri až desať sa požaduje stopercentná spoľahlivosť komunikácie kvôli zabezpečeniu rýchleho obnovenia systému [12].

Decentralizovaná automatizácia pomocou recloserov nevyžaduje až takú komunikáciu pre obnovenie systému. Na [obr. 4.4](#) sa nachádza príklad rekonfigurácie sústavy pomocou recloserov [12].



Obr. 4.4. Rekonfigurácia sústavy pomocou recloserov [Mizerák]

Ak nastane porucha v oblasti P1, tak rekonfigurácia bude prebiehať v nasledujúcich krokoch [12]:

1. Recloser alebo vypínač nachádzajúci sa v rozvodni ostáva zopnutý. Poruchu vypne až recloser R₁.
2. Recloser R₂ mení svoju sekvenciu OZ, veľkosť vypínacieho prúdu a napätia v závislosti od veľkosti úbytku napätia.
3. Recloser R₃ sa zopne na základe veľkosti úbytku napätia.
4. Deaktivácia reclosera R₂ nastane hneď po prvom neúspešnom OZ.

Úsek s poruchou je izolovaný medzi reclosermi R₁ a R₂. V krokoch jedna až štyri nie je vyžadovaná žiadna komunikácia pre zabezpečenie rýchleho obnovenia napájania obvodu. Komunikácia môže byť použitá pre obnovu systému a odstránenie poruchy. Komunikácia je používaná na podporu riadenia distribučnej siete a nie na jeho nahradenie [12].

4.3. Samoliečiace sa siete

Vďaka inštalácií recloserov, resp. iných diaľkovo monitorovaných a ovládaných prvkov (diaľkovo ovládané úsekové odpínače – tzv. DOU-čka), je možné automaticky získavať údaje o prevádzke vn a nn sietí a zmenou ich stavu odpínať či pripínať časti siete a tým pádom meniť počet napájaných odberateľov.

Keďže sa tieto procesy realizujú prostredníctvom informačno-komunikačných technológií a počítačových riadiacich systémov, je možné proces vyhľadávania miesta poruchy a následnej zmeny zapojenie siete 22 kV automatizovať. Pre tento účel sa využívajú algoritmy založené na rôznych metódach umelej inteligencie, ako napr. neurónové siete, expertné systémy či multiagentné systémy.

Táto vlastnosť sa očakáva od tzv. inteligentných sietí a označujú sa pojmom samoliečenie - selfhealing.

5. VÝPOČTY CHODU DISTRIBUČNÝCH SIETÍ

Keď už sú dáta popisujúce stav distribučnej sústavy či časti jej siete prenesené na dispečing a uložené v databáze, je možné tieto dáta, ako už bolo spomenuté v predchádzajúcej kapitole, využiť pre rôzne činnosti podporujúce buď operatívne riadenie alebo plánovanie rozvoja. Častokrát je pre tieto účely potrebné vykonať výpočty statických chodov siete, aby bolo možné určiť napr. rozloženie napätí, prúdy v jednotlivých vetvách vedenia, veľkosť činných a jalových výkonov a taktiež veľkosť strát. Tieto hodnoty, vypočítané v ustálenom stave, sa ďalej využívajú pri riešení prechodových a dynamických stavov ako sú napr. skraty, statická, dynamická stabilita siete a niekoľko ďalších optimalizačných úloh ako je hospodárne rozdeľovanie výroby činných a jalových výkonov, regulácia napätia a pod.

Elektrizačná sústava je vo všeobecnosti nelineárny systém a riešenie týchto úloh vedie na riešenie rozsiahlych systémov nelineárnych rovníc. Takýto systém nelineárnych rovníc je výhodné riešiť pomocou iteračných metód. Principiálne sa jedná o pomerne jednoduché algoritmy, ktoré je možné ľahko implementovať v rôznych programovacích jazykoch. Tieto metódy však majú pomerne vysokú výpočtovú zložitosť, ktorá pri tomto type úloh vo všeobecnosti rastie s treťou mocninou počtu uzlov sústavy. Špecifický charakter distribučných sietí si navyše vyžaduje miernu úpravu používaných algoritmov, resp. využitie algoritmov navrhnutých špeciálne pre distribučné siete.

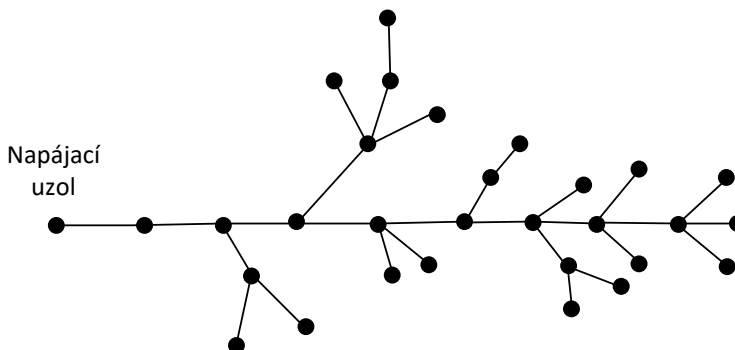
5.1. Štruktúra distribučných sietí a jej vplyv na prevádzku

Medzi základné typy distribučných systémov patria:

- radiálny distribučný systém,
- zokruhovaný distribučný systém.

Radiálna štruktúra ([obr. 5.1](#)) znamená, že neexistuje žiadna slučka v sieti a každá zbernica (uzol) je napojený k zdroju cez jedinečnú cestu. Je to najlacnejšia ale najmenej spoľahlivá konfigurácia siete. Radiálny distribučný systém je systém, kde sú samostatné napájače vyvedené z jednej stanice (uzla) a distribútor napája takýto systém iba z jednej strany. Radiálna distribúcia je typ distribúcie energie, kde sa energia dodáva z hlavnej vetvy do sekundárnych vetiev tzv. subvetiev, ktoré sa môžu potom ďalej rozvetvovať a deliť na ďalšie subvetvy [\[13\]](#).

Zokruhovaný distribučný systém môže obsahovať množstvo slučiek. Môže byť napájaný z viacerých zbernic (uzlov), teda nemožno definovať tzv. koreňový uzol. Takýto systém je teda zložitejší a drahší, ale na druhú stranu spoľahlivejší.



Obr. 5.1. Príklad topológie radiálneho distribučného vedenia

Z hľadiska výpočtov distribučných sietí nemožno zanedbať činnú zložku impedancie vedení, pretože pomer $X:R$ je pomerne vysoký oproti prenosovým sieťam a pri sieťach s napäťovou hladinou 22 kV môže byť rovný 1. Z tohto dôvodu by mohli niektoré štandardné metódy začať divergovať (nevedeli by nájsť riešenie výpočtu), alebo by doba riešenia mohla trvať neprípustne dlho.

Distribučná sústava je z pohľadu elektrizačnej sústavy najrozsiahljšia. Nedisponuje dlhými úsekmi o menšej rozsiahlosti ako prenosová sústava, ale naopak, obsahuje menšie úseky o prevažne veľkej rozsiahlosti. Z tohto dôvodu je celková prevádzková kapacita distribučných sietí oveľa väčšia ako pri prenosových sieťach, čo predstavuje problém z hľadiska regulácie napätia. Taktiež so zvyšujúcou sa rozsiahlosťou klesá celková impedancia siete a tým pádom narastá skratový prúd.

Medzi ďalšie špecifiká prevádzky distribučných sietí patrí ich prirodzená nevyváženosť z hľadiska zaťaženia a v relatívne častejších výpadkoch úsekov distribučných sietí z dôvodu skratov, prepätí a pod.

5.2. Lineárne metódy

Zlinearizovanie úlohy pri riešení elektrických sietí môžeme získať tak, že všetky výroby a odbery elektrickej energie sú zadané v podobe elektrického prúdu namiesto činného a jalového výkonu.

Najzákladnejšie lineárne metódy riešenia statických chodov sietí sú metóda uzlových napätí (MUN) a metóda slučkových prúdov (MSP), no v praxi sa výlučne používa len prvá z nich.

5.2.1. Základné výkonové rovnice

Sú to rovnice popisujúce chovanie elektrizačnej sústavy, ktorá je popísaná impedančnou prípojnicovou (uzlovou) maticou

$$\dot{U}_p = \dot{Z}_p \cdot \dot{I}_p, \quad (5.1)$$

kde \dot{U}_p je napätie na prípojnici (V),

\dot{Z}_p je admitancia prípojnice (Ω),

\dot{I}_p je súčet prúdov tečúcich z alebo do prípojnice (A),

alebo admitančnou maticou

$$\dot{I}_p = \dot{Y}_p \cdot \dot{U}_p, \quad (5.2)$$

kde \dot{Y}_p je admitancia prípojnice (S).

Prípojnicové impedančné alebo admitančné matice možno zhotoviť pre danú sieť pomocou referenčnej prípojnice [13].

5.2.2. Metóda uzlových napätí (MUN)

Metóda uzlových napätí patrí k lineárnym metódam pre riešenie chodov sietí. Jej princíp vychádza z Kirchoffových zákonov. Používa dva základné termíny, uzlové napätie a referenčný uzol. Referenčný uzol je jeden vhodne zvolený uzol, v ktorom je spojených najviac prvkov. Uzlové napätie, je napätie každého z ostatných uzlov vztiahnutého k uzlu referenčnému.

Pred samotným riešením elektrickej siete o veľkosti k uzlov je potrebné urobiť topologickú prípravu:

- zostrojiť kostru zapojenia siete,
- očíslovať napájacie a odberové uzly,
- zvoliť referenčný uzol,
- označiť vetvy a zvoliť ich orientáciu.

Postup riešenia vychádza sa zo základnej napäťovej rovnice:

$$[\dot{U}] = [\dot{Y}]^{-1} \cdot [\dot{I}], \quad (5.3)$$

pričom $[\dot{U}]$ je matica uzlových napätí, $[\dot{Y}]^{-1}$ je uzlová admitančná matica a $[\dot{I}]$ je matica uzlových prúdov.

V prvom rade je potrebné zostrojiť admitančnú maticu elektrickej siete. Túta matica sa zostavuje priamo z topológie danej sústavy podľa nasledujúcich pravidiel:

- prvky hlavnej diagonály (\dot{Y}_{pp}) sú tvorené súčtom admitancií všetkých vetiev, ktoré sú incidentné s i -tým uzlom,
- prvky mimo hlavnej diagonály (\dot{Y}_{pq}) tvoria záporne vzaté admitancie vetiev, ktoré sú incidentné s p -tým a q -tým uzlom.

Následne je potrebné zostrojiť maticu uzlových prúdov, ktorá sa skladá so všetkých odberových a napájacích prúdov danej elektrickej siete.

Zvolený referenčný uzol sa v riešení vynecháva, čím sa zjednoduší sústava rovníc o jeden riadok a stĺpec.

Po zostrojení všetkých potrebných matíc sa dopočítajú hľadané uzlové napätia podľa rovnice $[\dot{U}] = [\dot{Y}]^{-1} \cdot [\dot{I}]$, napríklad Gaussovou eliminačnou metódou [13].

5.3. Nelineárne metódy

Výpočet elektrických sietí sa ako nelineárna úloha rieši vtedy, keď sú v napájacích a odberových uzloch zadané činné a jalové výkony. V tomto prípade sa vychádza z výkonových rovníc prípojnic (uzlov) a rovníc prúdu vo vedeniach [13].

5.3.1. Výkonové rovnice prípojnic

Pre činný a jalový výkon na ľubovoľnej prípojnici p platí:

$$P_p - jQ_p = \dot{U}_p^* \cdot \dot{I}_p, \quad (5.4)$$

kde P_p je činný výkon na prípojnici p (W),

Q_p je jalový výkon na prípojnici p (var),

\dot{U}_p^* je komplexne združené napätie na prípojnici p (V) a prúd je:

$$\dot{I}_p = \frac{P_p - jQ_p}{\dot{U}_p^*}. \quad (5.5)$$

Tento prúd \dot{I}_p je vtedy kladný, keď tečie do prípojnice. Ak predpokladáme, že v parametroch matice sú zahrnuté i priečne prvky voči zemi, tak rovnica (2.5) vyjadruje celkový prúd prípojnice. Pokiaľ sa s týmito prvkami neuvažuje, tak celkový prúd na prípojnici p je vyjadrený

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{U_p^*} - Y_p \cdot U_p, \quad (5.6)$$

kde Y_p je celková paralelná admitancia na prípojnici (S),

$Y_p \cdot U_p$ je paralelný prúd tečúci z prípojnice p do zeme.

5.3.2. Rovnice prúdu vo vedeniach

Po vyriešení napätí na prípojniciach (uzloch), sa môžu vypočítať prúdy vo vedeniach. Prúd na prípojnici p vo vedení spájajúcom dve prípojnice p a q je

$$I_{pq} = Y_{pq} \cdot (U_p - U_q) + U_p \cdot \frac{Y'_{pq}}{2}, \quad (5.7)$$

kde Y_{pq} je admitancia vedenia (s),

Y'_{pq} je celková nabíjacia admitancia vedenia (S),

$U_p \cdot \frac{Y'_{pq}}{2}$ je prúd spôsobený nabíjaním vedenia.

Činný výkon P_{pq} a jalový výkon Q_{pq} tečúci z prípojnice p do prípojnice q vedením, možno napísať ako:

$$P_{pq} - jQ_{pq} = U_p^* \cdot I_{pq}. \quad (5.8)$$

Po dosadení vzťahu 5.7 do vzťahu 5.8:

$$P_{pq} - jQ_{pq} = U_p^* \cdot Y_{pq} \cdot (U_p - U_q) + U_p^* \cdot U_p \cdot \frac{Y'_{pq}}{2}. \quad (5.9)$$

Pokiaľ tok výkonov bude opačný, teda z prípojnice q do prípojnice p , tak platí:

$$P_{qp} - jQ_{qp} = U_q^* \cdot Y_{pq} \cdot (U_q - U_p) + U_q^* \cdot U_q \cdot \frac{Y'_{pq}}{2}. \quad (5.10)$$

Algebraickým súčtom výkonov z rovníc 5.9 a 5.10 sa vypočítajú straty výkonov na vedení medzi prípojniciami p a q .

5.3.3. Newton-Raphsonova metóda

Newton-Raphsonova metóda je všeobecná metóda pre riešenie nelineárnych rovníc, ktorú je možné výhodne aplikovať aj pre riešenie chodov nelineárnych sietí využívajúca sústavu nelineárnych rovníc. Nelineárne rovnice tejto metódy vyjadrujú činné a jalové zložky výkonu k napätiu prípojníc. Ak výkon na prípojnici p je daný ako

$$P_p - jQ_p = U_p^* \cdot I_q \quad (5.11)$$

teda

$$P_p - jQ_p = U_p^* \cdot \sum_{q=1}^n Y_{pq} \cdot U_q. \quad (5.12)$$

$$\text{Ak } \dot{U}_p = e_p + j \cdot f_p \text{ a } \dot{Y}_{pq} = G_{pq} - j \cdot B_{pq},$$

kde e_p je reálna časť napätia,

f_p je imaginárna časť napätia,

G_{pq} je reálna časť admitancie,

B_{pq} je imaginárna časť admitancie,

potom rovnica (5.12) má tvar

$$P_p - jQ_p = (e_p + j \cdot f_p) \cdot \sum_{q=1}^n (G_{pq} - j \cdot B_{pq}) \cdot (e_q + j \cdot f_q). \quad (5.13)$$

Rozdelením (5.13) na reálnu a imaginárnu časť je možné získať činnú a jalovú zložku výkonu v podobe rovníc

$$P_p = \sum_{q=1}^n \{e_p(e_p \cdot G_{pq} + f_q \cdot B_{pq}) + f_p(f_q \cdot G_{pq} - e_q \cdot B_{pq})\}, \quad (5.14)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^n \{f_p(e_q \cdot G_{pq} + f_q \cdot B_{pq}) - e_p(f_q \cdot G_{pq} - e_q \cdot B_{pq})\}. \quad (5.15)$$

Vnikne tak sústava dvoch nelineárnych rovníc pre každú prípojnicu systému. Činné a jalové zložky výkonov sú známe. Činné a jalové zložky napätí sú neznáme pre všetky prípojnice s výnimkou vzťažnej prípojnice, na ktorej je napätie špecifikované a zostáva nemenné [14].

Newton-Raphsonova metóda požaduje sústavu nelineárnych rovníc vytvorených vyjadrením vzťahov medzi zmenami činných a jalových výkonov a zložkami prípojnicového napätia.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1} \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial P_1}{\partial f} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial f_{n-1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial Q_1}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial f_{n-1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \vdots \\ \Delta e_{n-1} \\ \Delta f_1 \\ \vdots \\ \Delta f_{n-1} \end{bmatrix}. \quad (5.16)$$

Koeficient matice je Jakobián a n -tá prípojnicu je vzťažná. Rovnica v maticovej forme vyzerá nasledovne:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix}. \quad (5.17)$$

Z výkonových rovníc prípojnic možno odvodiť rovnice pre odvedenie jednotlivých prvkov Jakobiánu. Nasledovne činný výkon zodpovedá rovnici

$$P_p = e_p(e_p \cdot G_{pp} + f_p \cdot B_{pp}) + f_p(f_p \cdot G_{pp} - e_p \cdot B_{pp}) + \\ + \sum_{q=1, q \neq p}^n \{e_p(e_q \cdot G_{pq} + f_q \cdot B_{pq}) + f_p(f_q \cdot G_{pq} - e_q \cdot B_{pq})\}, \quad (5.18)$$

a jalový výkon zodpovedá rovnici

$$Q_p = f_p(e_p \cdot G_{pp} + f_p \cdot B_{pp}) - e_p(f_p \cdot G_{pp} - e_p \cdot B_{pp}) + \\ + \sum_{q=1, q \neq p}^n \{f_p(e_q \cdot G_{pq} + f_q \cdot B_{pq}) - e_p(f_q \cdot G_{pq} - e_q \cdot B_{pq})\}. \quad (5.19)$$

Diagonálne a nediagonálne prvky Jakobiánu možno následne odvodiť z vyššie popísaných rovníc 5.18 a 5.19.

Nediagonálne prvky J_1 :

$$\frac{\partial P_p}{\partial e_q} = e_p \cdot G_{pq} - f_p \cdot B_{pq}, \quad p \neq q. \quad (5.20)$$

Diagonálne prvky J_1 :

$$\frac{\partial P_p}{\partial e_p} = e_p \cdot G_{pp} - f_p \cdot B_{pp} + c_p, \quad (5.21)$$

kde c_p je reálna časť prúdu I_p z rovnice 5.5.

Nediagonálne prvky J_2 :

$$\frac{\partial P_p}{\partial f_q} = e_p \cdot B_{pq} + f_p \cdot G_{pq}, \quad p \neq q. \quad (5.22)$$

Diagonálne prvky J_2 :

$$\frac{\partial P_p}{\partial f_p} = e_p \cdot B_{pp} - f_p \cdot G_{pp} + d_p, \quad (5.23)$$

kde d_p je imaginárna časť prúdu I_p z rovnice 5.5.

Diagonálne prvky J_3 :

$$\frac{\partial Q_p}{\partial e_p} = e_p \cdot B_{pp} + f_p \cdot G_{pp} - d_p. \quad (5.24)$$

Nediagonálne prvky J_3 :

$$\frac{\partial Q_p}{\partial e_q} = e_p \cdot B_{pq} + f_p \cdot G_{pq}, \quad p \neq q. \quad (5.25)$$

Nediagonálne prvky J_4 :

$$\frac{\partial Q_p}{\partial f_q} = -e_p \cdot G_{pq} + f_p \cdot B_{pq}, \quad p \neq q. \quad (5.26)$$

Diagonálne prvky J_4 :

$$\frac{\partial Q_p}{\partial f_p} = -e_p \cdot G_{pp} + f_p \cdot B_{pp} + c_p \cdot \quad (5.27)$$

5.3.4. Gauss-Seidlova iteračná metóda

Táto metóda je použiteľná pre riešenie lineárnych aj nelineárnych rovníc. Takže je jedno, či sú v uzloch zadané prúdy alebo výkony. Táto metóda je charakteristická jednoduchým algoritmom výpočtu. Oproti iným iteračným metódam potrebuje pomerne menší čas na výpočet jedného iteračného kroku. Nevýhodou je ale jej pomalá konvergencia. Pre sieť o veľkosti 100 až 200 uzlov sa počet iterácií pohybuje od 300 až 500. Samozrejme, že to taktiež závisí od zvolenej presnosti. Na konvergenciu tejto metódy vplýva niekoľko nasledovných faktorov:

- čo najbližšie počiatkové priblíženie,
- odľahčenie veľmi zaťažených vedení,
- zvýšenie počtu generujúcich uzlov so zadanými absolútnymi hodnotami napätí a s dostatočnou rezervou jalového výkonu,
- zvýšenie počtu slučiek v sieti,
- zvýšenie počtu spojení referenčného uzla s ostatnými a iné.

Samotný výpočet prebieha tak, že na začiatku je potrebné odhadnúť hodnoty napätí U_2, U_3, \dots, U_n . Tieto odhadnuté napätia sa vypočítajú podľa vzťahu (5.32) a následne sa pomocou vzťahu (5.33) určí rozdiel medzi odhadnutými a vypočítanými hodnotami. Tento postup sa vykonáva dovtedy, bude rásť počet iterácií, pokiaľ sa nedosiahne požadovaná presnosť.

Ak existuje sieť o rozmere n uzlov a každý uzol, okrem bilančného, má zadaný výkon, tak tento výkon sa dá popísať rovnicou:

$$P_p + jQ_p = \dot{U}_p \cdot \dot{I}_p^* \quad (5.28)$$

z ktorej je možné vyjadriť vzťah pre prúd:

$$\dot{I}_p = \frac{P_p - jQ_p}{\dot{U}_p^*} = \sum_{q=1}^n \dot{Y}_{pq} \cdot \dot{U}_q, \text{ kde } p = 2, 3, \dots, n. \quad (5.29)$$

Pravú stranu rovnice 5.29 je možné rozpísať na:

$$\dot{I}_p = \frac{P_p - jQ_p}{\dot{U}_p^*} = \sum_{q=1}^{p-1} \dot{Y}_{pq} \cdot \dot{U}_q + \dot{Y}_{pp} \cdot \dot{U}_p + \sum_{q=p+1}^n \dot{Y}_{pq} \cdot \dot{U}_q, \text{ kde } p = 2, 3, \dots, n. \quad (5.30)$$

Vyjadrení U_p z rovnice 5.30 je možné získať tvar rovnice pre iteračný výpočet:

$$\dot{U}_p = \frac{1}{\dot{Y}_{pp}} \cdot \left(\frac{P_p - jQ_p}{\dot{U}_p^*} - \sum_{q=1}^{p-1} \dot{Y}_{pq} \cdot \dot{U}_q - \sum_{q=p+1}^n \dot{Y}_{pq} \cdot \dot{U}_q \right), \text{ kde } p = 2, 3, \dots, n. \quad (5.31)$$

Po úprave (5.31) je konečný tvar rovnice pre iteračný výpočet:

$$\dot{U}_p^{(k+1)} = \frac{1}{\dot{Y}_{pp}} \cdot \left(\frac{P_p - jQ_p}{\dot{U}_p^{(k)*}} - \sum_{q=1}^{p-1} \dot{Y}_{pq} \cdot \dot{U}_q^{(k+1)} - \sum_{q=p+1}^n \dot{Y}_{pq} \cdot \dot{U}_q^{(k)} \right), \quad (5.32)$$

kde $p = 2, 3, \dots, n$.

Výpočet sa ukončí pokiaľ pre všetky uzly je splnená podmienka

$$|\dot{U}_p^{(k+1)} - \dot{U}_p^{(k)}| \leq \varepsilon. \quad (5.33)$$

pričom ε je zadaná presnosť [13].

5.3.5. Metóda Backward Forward Sweep Load Flow (BFS)

Jeden z charakteristických rysov radiálnej distribučnej siete je to, že existuje jedinečná cesta z akejkol'vek zbernice (uzla) späť k zdroju. To je kľúčovým prvkom pre BFS metódu. Tá totiž dokáže riešiť len radiálne distribučné systémy, čo je z pohľadu výpočtov sietí nevýhodné. Avšak mnohé distribučné siete majú takéto usporiadanie a pre efektívne riadenie týchto sietí je potrebné opakované a rýchle riešenie tokov výkonov. Z tohto hľadiska je výhodné použiť BFS metódu a pri tom neovplyvniť presnosť samotných výpočtov [15, 16].

BFS metóda je jednoduchá, rýchla, ľahko programovateľná a je založená na aktualizácii napätí a prúdov (výkonov) pozdĺž jedinečných ciest od záťaže ku zdroju.

Riešenie je iteratívne, skladajúce sa z dvoch výpočtových fáz, ktoré sa opakujú až do dosiahnutia konvergencie výpočtov:

- spätnej fázy (backward sweep),
- doprednej fázy (foreward sweep).

Spätná fáza výpočtu

Prvá, spätná fáza výpočtu, rieši a počíta prúdy alebo toky výkonov v jednotlivých vetvách s možnými aktualizáciami napätia, počnúc z poslednej vrstvy vetiev smerom k prvej vetve pripojenej k napájaciemu uzlu. Aktualizovanie vypočítaných tokov výkonov v každej vetve je získané zo spätne šíreného výpočtu k zdroju, zvážením uzlových napätí z predchádzajúcej iterácie. To znamená, že napätia získané z predchádzajúcej iterácie sú v tejto fáze výpočtu konštantné a aktualizujú sa toky výkonov vo vetvách.

Dopredná fáza výpočtu

Druhá, dopredná fáza výpočtu, fáza forward sweep rieši a počíta uzlové napätia v jednotlivých uzloch siete s možnými aktualizáciami prúdov alebo toku výkonov v jednotlivých vetvách. Uzlové napätia sú aktualizované v doprednom smere, počnúc z uzla prvej vrstvy, k uzlom v poslednej vrstve. Aktualizovanie vypočítaných uzlových napätí v každom uzle je získané z dopredného riešenia výpočtu, zvážením jednotlivých vetvových prúdov alebo tokov výkonov z predchádzajúcej iterácie. To znamená že úbytky na jednotlivých vetvách získané z vetvových prúdov alebo tokov výkonov predchádzajúcej iterácie, sú v tejto fáze výpočtu konštantné a aktualizujú sa uzlové napätia v jednotlivých uzloch.

Porovnaním vypočítaných uzlových napätí z predchádzajúcej iterácie a súčasnej iterácie za sebou idúcich iterácií je možné výpočet ukončiť za predpokladu splnenia zadanej tolerancie a následnej konvergencie výpočtu. Pokiaľ rozdiel všetkých uzlových napätí predchádzajúcej iterácie a súčasnej iterácie nespĺňa požadovanú toleranciu, tak výpočet bude pokračovať spätnou fázou (backward sweep) a následne doprednou fázou (forward sweep), pokiaľ sa nespĺní požadovaná tolerancia a výpočet neskonverguje.

Riešenie

Výpočty vychádzajú zo základných výkonových rovníc. Skôr než začne samotné riešenie, je potrebné vyriešiť topologickú prípravu radiálnej distribučnej siete a splniť všetky kritéria pre riešenie takejto siete. Ide o správne označenie jednotlivých vetiev a uzlov siete:

- Uzly musia byť číslované postupne vo vzostupnom poradí od vrstvy k vrstve a to takým spôsobom, že akákoľvek dráha uzlov od napájacieho uzla ku koncovému sa stretne s uzlami očíslovanými vo vzostupnom poradí.
- Každá vetva sa nachádza medzi dvoma označenými uzlami a je identifikovaná jedinečným dvojčíslom, ktorého prvá číslica predstavuje číslo uzla smerom od zdroja a druhá číslica predstavuje číselnú hodnotu druhého uzla smerom od spotreby, avšak poradová hodnota vetvy je identifikovaná ako číslo uzla v smere od zdroja.

Po vyriešení topologickej prípravy siete je postup riešenia nasledovný:

- Prvotný odhad parametrov napätí.
- Výpočet úbytkov napätí spätnou fázou (backward sweep). To znamená, že najskôr sa počítajú jednotlivé prúdy vo vetvách podľa vzťahu (5.5) a následne sa z týchto prúdov vypočítajú jednotlivé úbytky vo vetvách podľa vzťahu:

$$\Delta \dot{U}_{pq} = \dot{I}_{pq} \cdot \dot{Z}_{pq}. \quad (5.34)$$

- Výpočet uzlových napětí dopřednou fázou (foreward sweep). A to odčítáním jednotlivých úbytků napětí vypočítaných předchozí fázou od napětí v uzlech z předchozí iterace pomocí vztahu:

$$\dot{U}_p^{k+1} = \dot{U}_p^k - \Delta \dot{U}_{pq}. \quad (5.35)$$

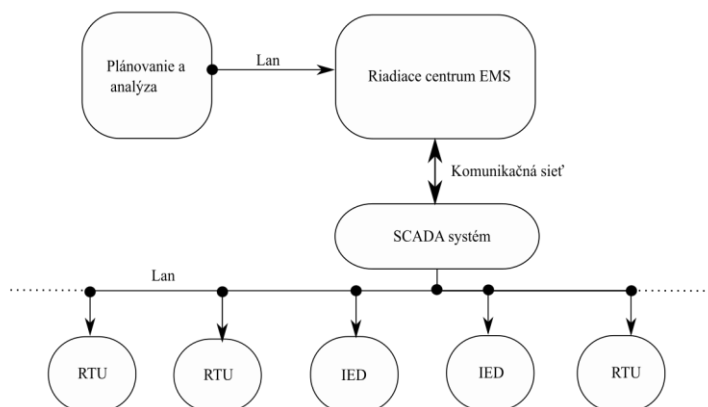
- Opakování zpětné a dopředné fáze, až po dosažení požadované přesnosti podle rovnice 3.33.

6. ESTIMÁCIA STAVU DISTRIBUČNÝCH SIETÍ VN

Výraz estimácia siete v energetike znamená určitý odhad, ako sa vyhradená časť siete bude správať v danom čase. Dôvod prečo potrebujeme vedieť odhadnúť, ako sa sieť bude správať je ten, že prevádzkovateľ sústavy sa snaží zabezpečiť bezpečný a plynulý chod siete. Keďže ale v súčasnosti nie je možné zabezpečiť merania z každej časti prenosovej sústavy, napríklad jednotlivé napätia na prípojniciach, respektíve prúdy jednotlivými odbočkami alebo vývodmi, je potrebné, aby sme boli schopní odhadnúť stav siete pomocou algoritmov. Dôvod prečo nie je možné zabezpečiť merania v každom úseku siete je, že meranie by bolo hlavne z finančnej ale aj z technickej stránky veľmi problematické [17].

Väčšina meraní je zaťažená určitou chybou, keďže každý merací prístroj má určitú triedu presnosti merania. V súčasnosti sú merania len na určitých úsekoch, či už výroby, alebo spotreby, a preto potrebujeme analyzovať, ako sa bude správať zvyšok nameraných častí siete. Estimácia pokrýva široké spektrum tém, ktoré sa v súčasnosti riešia. Medzi tie hlavné témy patria spracovanie topológie siete, analýza pozorovateľnosti siete, riešenie odhadu stavu siete, spracovanie chybných dát, spracovanie parametrov a chýb štruktúry. Najrozsiahlejšími témami sú hlavne analýza pozorovateľnosti a estimačné metódy a algoritmy [17].

Prvým krokom ako zabezpečiť plynulý chod elektrizačnej sústavy je neustále meranie. Pre výpočty estimácie stavov siete je možné priamo použiť aj merané hodnoty ale, keďže aj tieto hodnoty sú zaťažené chybou merania, je potrebné tieto chyby odhaliť a eliminovať. Na základe meraní musíme použiť vybranú metódu estimácie a určiť v akom stave sa sieť nachádza. Výsledkom estimácie je teda taký stav, ktorý sa veľmi reálne približuje skutočnému stavu.



Obr. 6.1. Princíp získavania údajov z elektrizačnej sústavy

Na [obr. 6.1](#) je znázornený princíp činnosti zberu dát pomocou RTU (Remote Terminal Unit) a pomocných zariadení IED (Intelligent Electronic Device). RTU má za úlohu merať a odosielať na server údaje o zariadení. IED slúži na riadenie elektrických zariadení. Tieto zariadenia komunikujú navzájom pomocou LAN (Local Area Network) siete. Prenos dát na väčšie vzdialenosti sa realizuje pomocou optických vedení. Na základe meraných údajov sa analyzuje a odhaduje stav siete [\[17\]](#).

Spracovanie topológie siete

Prvotné merania, ktoré zahŕňajú napríklad pozície odpojovačov, výkonových vypínačov, vlastnosti generátorov, vedení, transformátorov a iné, sú spracovávané procesom na vytvorenie topológie siete. Následne tento proces generuje statický model všetkých odbočiek a prípojnic v sústave. Tento model nezahŕňa iba prípojnice v okolí riadiaceho centra, ale aj prípojnice v susedných systémoch. Informácie o meraní získané zo susedných systémov sa využívajú na vytvorenie a aktualizáciu externého systémového modelu. Okrem toho môžu nastať neočakávane situácie v rámci systému. Napríklad keď dôjde k výpadku alebo k skresleniu merania, pričom systém následne vyhodnotí tieto dáta ako chybné. Tieto situácie sa riešia použitím takzvaného pseudo-merania. Toto meranie využíva dáta z čias pred výpadkom, alebo na základe dlhodobých meraní a iných štatistických údajov [\[17\]](#).

Analýza pozorovateľnosti siete

Schopnosť analyzovať stav siete určuje počet a umiestnenie meraní v systéme. Ak máme dost' meraní, môžeme bezpečne povedať, že ide o pozorovateľnú sieť. Takúto sieť môžeme ďalej estimovať. V prípade, keď nemáme dostatočný počet meraní na celú sieť, hovoríme o nepozorovateľnej sieti. Takúto sieť môžeme rozdeliť na menšie pozorovateľné ostrovy a potom ich prípadne spájať [\[17\]](#).

Výsledok estimácie siete

Výsledkom estimácie je optimálny odhad stavu sústavy. Tento odhad je zložený z komplexných hodnôt napätí na každej jednej prípojnici siete. Tieto hodnoty sú závislé od získaných meraní v určitých úsekoch siete a od konfigurácie siete [\[17\]](#).

Spracovanie chybných dát

Pri meraní vznikajú malé aj veľké chyby. Úlohou procesu je odhaliť tie veľké chyby a odstrániť ich z merania tak, aby bol zabezpečený dostatok meraní.

Spracovanie parametrov a chýb štruktúry

Odhaduje parametre siete, ako sú napríklad parametre vedení, zmena odbočiek na transformátoroch, paralelné kapacity a hodnoty reaktorov. Odhaľuje tiež chyby v štruktúre siete, ako napríklad nesprávna alebo chybná poloha vypínača a podobne [\[17\]](#).

6.1. Model pozorovania

Model pozorovania (merania) popisuje závislosť vektora merania \mathbf{z} na stavovom vektore \mathbf{x} . Ak predpokladáme prídavný šum \mathbf{v} , potom model pozorovania (merania) má tvar:

$$\mathbf{y} \equiv \mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{v}. \quad (6.1)$$

Funkcia $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ je nelineárna funkcia odvodená z modelu siete a je definovaná rovnicami popisujúcimi estimovanú sieť. Ďalšími meranými veličinami sú moduly uzlových napätí, pre nich majú rovnice (6.1) tvar:

$$z_{U_i} = U_i + v_{U_i}. \quad (6.2)$$

Model merania je zložený z modelu siete a modelu šumov meraní. Je to spôsobené tým, že v súčasnosti sa využívajú dáta z pseudo-meraní, ktoré vnášajú tento šum do riešenia modelu pozorovania. Veľký vplyv na kvalitu výsledkov estimácie má vhodný výber typu meraní, meraných veličín, počet meraní a nakoniec aj rozmiestnenie meraní [17].

6.2. Metódy a algoritmy používané pre distribučné siete

V súčasnosti existuje mnoho pohľadov ako estimovať stavy ES. S rozvojom výpočtovej techniky sme v súčasnosti, vďaka vysokej výpočtovej sile dnešných procesorov, schopní relatívne veľmi rýchlo a efektívne určovať stavy na základe výkonných algoritmov. Medzi tie základné a najpoužívanejšie metódy patrí metóda vážených najmenších štvorcov (WLS). Na tejto metóde sú postavené niektoré s najznámejších estimačných algoritmov, ktoré sa vyvíjali počas posledných dvadsať rokov.

Existuje veľa aplikácií WLS. Medzi tie najznámejšie patrí distribuovaný algoritmus (DSE), integračný algoritmus (ISE) a paralelný algoritmus (PSE). Ich spojením dohromady vznikol fúzny algoritmus (FSE), ktorý implementuje do jadra výpočtu všetky predošle spomínané algoritmy. Avšak vďaka dosiahnutej presnosti stúpla výpočtová doba. Ďalšími metódami výpočtu sú napríklad metóda vážených najmenších rozdielov absolútnych hodnôt (WLAV) a metóda najmenších rozdielov absolútnych hodnôt (LAV).

Trendom súčasnosti je snaha nájsť algoritmus, ktorý je zároveň veľmi presný, stabilný (to znamená, že konverguje skoro vždy), ale je aj veľmi rýchly.

6.2.1. Princíp estimačnej metódy vážených najmenších štvorcov (WLS)

Nech m je veľkosť vektora merania \mathbf{z} a n je veľkosť vektora stavu \mathbf{x} . Ak platí, že $m > n$, potom systém rovníc $\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x})$ nemá presné riešenie. Úlohou je nájsť takú hodnotu \mathbf{x}^* stavového vektora, pri ktorej vypočítané hodnoty [17]:

$$\mathbf{z}^* = \mathbf{h}(\mathbf{x}^*), \quad (6.3)$$

budú čo najbližšie k nameraným hodnotám \mathbf{z} . Pre označenie, že sa jedná o skutočne namerané hodnoty, budeme používať označenie \mathbf{z}^M . Našou snahou je minimalizovať kritérium v tvare normy rozdielu pozorovaného a estimovaného vektora \mathbf{z} , t.j.

$$\|\mathbf{z}^M - \mathbf{z}^*\| = \|\mathbf{z}^M - \mathbf{h}(\mathbf{x}^*)\|. \quad (6.4)$$

Najpoužívanejšou normou je súčet kvadrátov jednotlivých zložiek vektora, pričom ešte možno vyjadriť rôznu významnosť (presnosť) jednotlivých meraní pomocou váhových koeficientov. Za váhové koeficienty použijeme prevrátené hodnoty rozptylov jednotlivých meraní a dostaneme kritérium metódy vážených najmenších štvorcov (WLS).

$$J(\mathbf{x}) = \|\mathbf{z}^M - \mathbf{h}(\mathbf{x})\| = \sum_{i=1}^m \frac{1}{\sigma_i^2} \cdot [z_i^M - h_i(\mathbf{x})]^2. \quad (6.5)$$

Indexom i je označená i -ta zložka vektora. V maticovom tvare má (6.5) tvar:

$$J(\mathbf{x}) = [\mathbf{z}^M - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot [\mathbf{z}^M - \mathbf{h}(\mathbf{x})]. \quad (6.6)$$

Metóda WLS teda spočíva v hľadaní vektora \mathbf{x}^* , ktorý minimalizuje funkciu n premenných $J(\mathbf{x})$.

Minimalizácia kritéria WLS pri estimácii ES

Cieľom je určiť minimum funkcie $J(\mathbf{x})$ (6.6), pričom parciálne derivácie sa musia rovnať nule

$$\frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial x_j} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (6.7)$$

podľa všetkých zložiek stavového vektora, respektíve gradient sa musí rovnať nule

$$\text{grad } J(\mathbf{x}) = \left(\frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial x_1}, \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial x_n} \right)^T = \mathbf{0}, \quad (6.8)$$

kde $\mathbf{0}$ je nulový stĺpcový vektor s veľkosťou n .

Zo vzťahov (6.6) a (6.8) dostaneme po odvedení sústavu nelineárnych rovníc pre neznámy vektor \mathbf{x}

$$\mathbf{H}^T(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot [\mathbf{z}^M - \mathbf{h}(\mathbf{x})] = \mathbf{0}, \quad (6.9)$$

kde $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ je Jacobiho matica a má rozmer $(m \times n)$. Prvky tejto matice sú parciálne derivácie

$$\mathbf{H}_{ij} = \frac{\partial h_i(\mathbf{x})}{\partial x_j}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n. \quad (6.10)$$

Systém nelineárnych rovníc (6.9) môžeme riešiť napríklad pomocou Newtonovej iteračnej metódy. Algoritmus odvodíme linearizáciou rovnice (6.9) pomocou Taylorovým rozvojom v okolí počiatočného priblíženia \mathbf{x}^0 , pri zanedbaní členov vyššieho rádu. Takto dostávame systém rovníc:

$$\mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(0)}) \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot [\mathbf{z}^M - \mathbf{h}(\mathbf{x}^{(0)})] + \left[-\mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(0)}) \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{H}(\mathbf{x}^{(0)}) + \frac{\partial \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(0)})}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot [\mathbf{z}^M - \mathbf{h}(\mathbf{x}^{(0)})] \right] \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(0)}) = \mathbf{0}. \quad (6.11)$$

Po úpravách a zanedbaní člena s parciálnymi deriváciami v rovnici (6.11) dostávame zjednodušenú rovnicu

$$\mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(0)}) \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \Delta \mathbf{z}^{(0)} - [\mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(0)}) \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{H}(\mathbf{x}^{(0)})] \cdot \Delta \mathbf{x}^{(0)} = \mathbf{0}, \quad (6.12)$$

pričom

$$\Delta \mathbf{z}^{(0)} = \mathbf{z}^M - \mathbf{h}(\mathbf{x}^{(0)}), \quad (6.13)$$

$$\Delta \mathbf{x}^{(0)} = \mathbf{x} - \mathbf{x}^{(0)}. \quad (6.14)$$

Z rovnice (6.12) určíme čomu sa rovná $\Delta \mathbf{x}^{(0)}$

$$\Delta \mathbf{x}^{(0)} = [\mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(0)}) \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{H}(\mathbf{x}^{(0)})]^{-1} \cdot \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(0)}) \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \Delta \mathbf{z}^{(0)}. \quad (6.15)$$

Pre optimálny odhad stavového vektora \mathbf{x}^* potom dostaneme iteračný vzťah:

$$\mathbf{x}^{*(k+1)} = \mathbf{x}^{*(k)} + [\mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{*(k)}) \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{H}(\mathbf{x}^{*(k)})]^{-1} \cdot \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{*(k)}) \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \Delta \mathbf{z}^{(k)}, \quad (6.16)$$

kde indexom k označujeme číslo iteračného kroku. Iteračný krok je ukončený, ak

$$\|\mathbf{x}^{*(k+1)} - \mathbf{x}^{*(k)}\| \leq \varepsilon, \quad (6.17)$$

kde ε predstavuje vopred zadanú presnosť výpočtu [17].

6.2.2. Algoritmus DSE

Distribučný algoritmus (DSE – Distributed State Estimation) rieši problematiku veľkých vzájomne pospájaných častí siete. Ako prvé je potrebné uvažovať, že táto sieť je rozložená na niekoľko oblastí N , pričom každá oblasť n reprezentuje geograficky neprekrývajúcu sa oblasť kontroly (merania). Každá oblasť merania má dovolené, ak je to potrebné, vymieňať si informácie so susednými oblasťami [17]. Vektor merania je definovaný ako:

$$\mathbf{z}_n = \mathbf{h}_n(\mathbf{x}) + \mathbf{v}_n, \quad (6.18)$$

kde z_n je vektor merania, ktorý obsahuje aj hraničné injektované merania a toky výkonov.

Pri tejto metóde budeme uvažovať linearizovaný DC odhad stavu. Okrem toho budeme uvažovať, že amplitúda napätia na všetkých prípojniciach je 1,0 p.u. (per unit) a hodnota impedancii každej vetvy je j p.u. Potom stavový vektor x predstavuje vektor fázových posunov napätia θ pre všetky oblasti kontroly. Na základe tejto úvahy modifikujeme vektor merania ako:

$$z_n = H_n \cdot \theta + v_n. \quad (6.19)$$

Centralizovaný odhad stavu vypočíta optimálny odhad vektora θ pomocou WLS metódy:

$$\min J(\theta) = r^T \cdot R^{-1} \cdot r, \quad (6.20)$$

kde

$$r = z - H \cdot \theta, \quad (6.21)$$

kde R = kovariancia $[v_1, v_2, \dots, v_n]^T = \text{diag}(R_1, R_2, \dots, R_n)$. R_n je pozitívne definitná matica modelu šumu v pre oblasť n . Ďalej je potrebné si zdefinovať $\bar{z}_n = \sqrt{R_n}/z_n$, $\bar{H}_n = \sqrt{R_n}/H_n$. Pre každú oblasť kontroly n centralizovaný WLS odhad pre vektor θ je daný vzťahom:

$$\theta_{lc} = [\bar{H}^T \cdot \bar{H}]^{-1} \cdot \bar{H}^T \cdot \bar{z} = \bar{G}^{-1} \cdot \bar{H}^T \cdot \bar{z}. \quad (6.22)$$

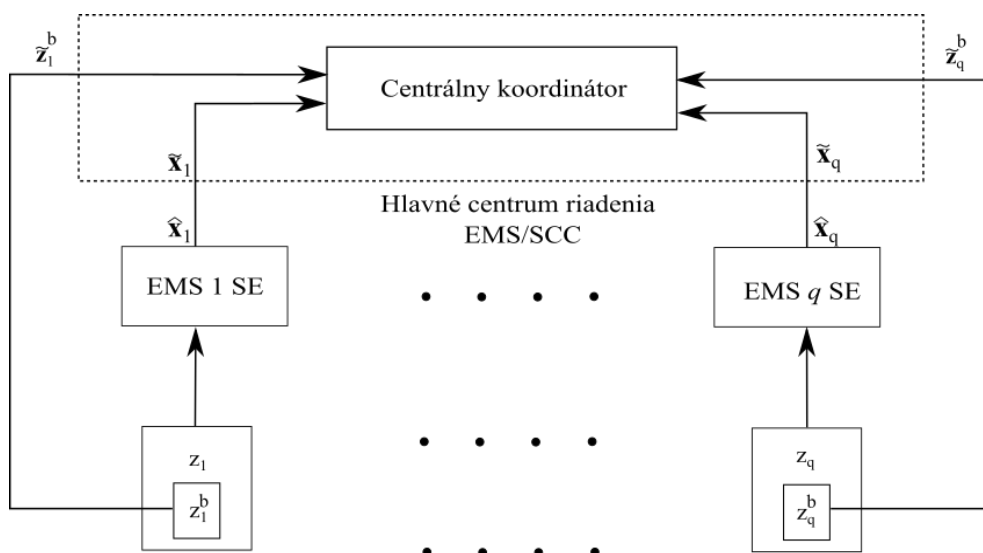
Výsledný vektor θ_{lc} získame, len ak je splnený nasledujúci predpoklad [17]:

$$G = \sum_{n=1}^N H_n^T \cdot H_n, \quad \bar{G} = \sum_{n=1}^N H_n^T \cdot H_n \cdot R^{-1}, \quad (6.23)$$

kde hodnosť matice G je maximálna t.j., že má všetky vektory lineárne nezávislé, a teda nie sú násobkami samých seba. Z toho vyplýva, že hodnosť matice váženého Gramiánu \bar{G} (Gramián určuje či je lineárny systém riaditeľný) je tak isto maximálna. Výsledkom tohto predpokladu je, že je dodržaná podmienka globálnej pozorovateľnosti siete.

Je jasné, že centralizovaný výpočet pre optimálny odhadovaný stav θ vyžaduje nutnosť poznať všetky Jacobiho matice H_n , kovariancie R_n a pozorovania z_n v centrálnej oblasti kontroly.

Na obr. 6.2 je vidno DSE algoritmus, kde ako môžeme vidieť centrálny koordinátor estimácie priamo údaje o estimáciach z jednotlivých oblasti 1 – q (EMS 1 SE až EMS q SE), pričom okrem týchto estimácií posiela každá podoblasť informácie o meraniach z hraničných (Boundary (b)) vetiev. Výstupom je celková estimácia čiastočných estimácií jednotlivých podoblastí [17].



Obr. 6.2. Distribuovaný algoritmus

6.2.3. Algoritmus ISE

Úlohou algoritmu integračnej estimácie (ISE – Integrally State Estimation) je integrácia modelu záťaže spolu s estimáciou (obr. 6.3). Dôvod prečo sa táto integrácia navrhla je lepší všeobecnejší odhad stavu siete. Vo všeobecnosti predošlé hodnoty merania činného výkonu dodávaného zo zdroja môžeme definovať ako:

$$\mathbf{y}_0 \equiv \mathbf{z}_0 = \Gamma(u), \quad (6.24)$$

kde u predstavuje set vplyvov, od ktorých model zataženia môže závisieť (napr. teplota, vietor, predošlá záťaž atď.). Veľmi často sa stretávame pri SCADA systémoch aj s tokmi prúdov z jednotlivých zdrojov [17].

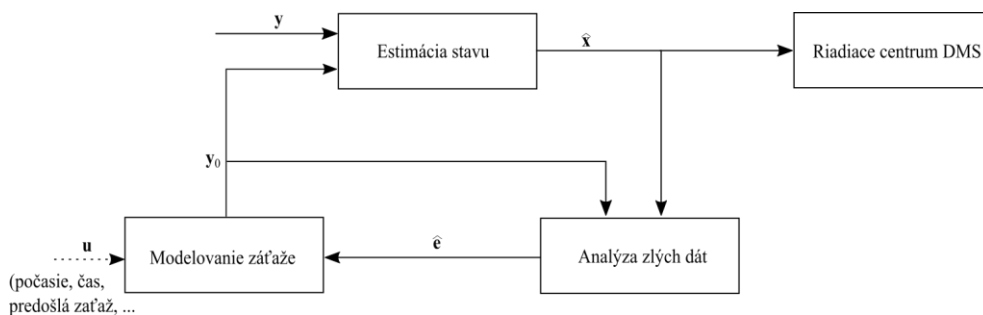
Kombináciou merania popísaného vzťahom (6.1) a predošlého merania y_0 , model merania (6.1) môžeme rozšíriť do tvaru:

$$\mathbf{z} \equiv \begin{bmatrix} y \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(\mathbf{x}) \\ g(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_y \\ \varepsilon_0 \end{bmatrix} \equiv \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (6.25)$$

kde $g(\mathbf{x})$ je nelineárna funkcia, ktorá sa vzťahuje na stavový vektor opisujúci dodávaný výkon, ε_0 je nezávisle premenná reprezentujúca chyby z predchádzajúcich modelov merania. Potom môžeme odhadnúť stav pomocou metódy WLS ako [17]:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \hat{\mathbf{x}}_k + (\mathbf{H}_k^T \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{H}_k)^{-1} \cdot \mathbf{H}_k^T \cdot \mathbf{W} \cdot [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k)], \quad (6.26)$$

kde $\mathbf{W} = \mathbf{R}^{-1}$ a má tvar a skladá sa zo zložiek $\begin{bmatrix} \varepsilon_y \\ \varepsilon_0 \end{bmatrix}$, Jacobián je definovaný ako $\mathbf{H}_k = [\mathbf{F}_k^T \cdot \mathbf{G}_k^T]^T$.



Obr. 6.3. Integrácia modelu zátáže a estimácie stavu siete

6.2.4. Algoritmus PSE

Algoritmus paralelnej estimácie (PSE – Parallel State Estimation) synchronne estimuje vektory amplitúd a fázových uhlov napätia. Najskôr je však potrebné zadefinovať základne podmienky analýzy. Vektor meraní, a teda aj väzbu P , Q , môžeme rozložiť na dva vektory merania. A to:

$$\mathbf{z}_p = \mathbf{h}_p(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{U}) + \mathbf{v}_p, \quad (6.27)$$

$$\mathbf{z}_q = \mathbf{h}_q(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{U}) + \mathbf{v}_q, \quad (6.28)$$

kde

$$n_\theta = N - 1, \quad n_U = N. \quad (6.29)$$

Dôvod prečo sa vlastne rozkladá väzba medzi P , Q meraní je ten, že sa výrazne zníži výpočtová doba potrebná na estimáciu.

Pri metóde PSE môžeme sieť rozložiť na k oblastí, ktoré sú prepojené tzv. hraničnými vetvami a súčasne spadajú pri výpočtoch pod obe oblasti. Potom problém estimácie popísaný rovnicami (6.27) a (6.28) môžeme prepísať v tvare:

$$\mathbf{z}_p^k = \mathbf{h}_p^k(\boldsymbol{\theta}^k, \mathbf{U}^k) + \mathbf{v}_p^k, \quad (6.30)$$

$$\mathbf{z}_q^k = \mathbf{h}_q^k(\boldsymbol{\theta}^k, \mathbf{U}^k) + \mathbf{v}_q^k, \quad (6.31)$$

kde \mathbf{z}_p^k a \mathbf{z}_q^k sú meraniami v k -tej oblasti, $\boldsymbol{\theta}^k$ a \mathbf{U}^k predstavujú moduly merania uhlov a amplitúd napätí v k -tej oblasti spolu s hraničnými meraniami korešpondujúcimi s hraničnými uzlami [17].

Snahou je uchovať minimálny počet hraničných uzlov (prípojnic). Injektované merania v prekrývajúcich sa oblastiach sú nahrádzané tzv. „fiktívnymi prípojnicami“ bez injektovaných meraní. Tieto fiktívne prípojnice sa umiestňujú mimo prekrývajúce sa oblasti a sú nahrádzané vedeniami s nulovou impedanciou. Potom jediným problémom je zabezpečiť pri tejto metóde sieť, po ktorej sa budú posilať informácie o meraných prípojnicach do riadiaceho centra (EMS). Následne sa tieto údaje estimujú podľa známej WLS metódy:

$$\min \sum_{k=1}^K [\mathbf{z}_p^k - \mathbf{h}_p^k]^T \cdot [\mathbf{R}_p^k]^{-1} \cdot [\mathbf{z}_p^k - \mathbf{h}_p^k], \quad (6.32)$$

$$\min \sum_{k=1}^K [\mathbf{z}_q^k - \mathbf{h}_q^k]^T \cdot [\mathbf{R}_q^k]^{-1} \cdot [\mathbf{z}_q^k - \mathbf{h}_q^k]. \quad (6.33)$$

Odvođené iteračné vzťahy z (6.32) a (6.33) sú:

$$\boldsymbol{\theta}^k(i+1) = \boldsymbol{\theta}^k(i) + [\mathbf{G}_p^k]^{-1} \cdot [\mathbf{H}_p^k]^T \cdot [\mathbf{R}_p^k]^{-1} \cdot [\mathbf{z}_p^k - \mathbf{h}_p^k(\boldsymbol{\theta}_k(i), U_k(i))], \quad (6.34)$$

$$\mathbf{U}^k(i+1) = \mathbf{U}^k(i) + [\mathbf{G}_q^k]^{-1} \cdot [\mathbf{H}_q^k]^T \cdot [\mathbf{R}_q^k]^{-1} \cdot [\mathbf{z}_q^k - \mathbf{h}_q^k(\boldsymbol{\theta}_k(i), U_k(i))], \quad (6.35)$$

kde

$$\mathbf{G}_p^k = [\mathbf{H}_p^k]^T \cdot [\mathbf{R}_p^k]^{-1} \cdot [\mathbf{H}_p^k], \quad (6.36)$$

$$\mathbf{G}_q^k = [\mathbf{H}_q^k]^T \cdot [\mathbf{R}_q^k]^{-1} \cdot [\mathbf{H}_q^k]. \quad (6.37)$$

Prírastkové matice (Gain Matrix) \mathbf{H}_p^k a \mathbf{H}_q^k sú parciálne derivácie modulov meraní \mathbf{h}_p^k a \mathbf{h}_q^k podľa stavových vektorov $\boldsymbol{\theta}_k$ a U_k [17].

Prvky $\boldsymbol{\theta}$ a U vypočítané z rovníc (6.34) a (6.35) pre hraničné prípojnice oblastí k a j musíme následne upraviť. Táto úprava pozostáva z určenia takzvanej váženej hodnoty medzi oblasťami k a j .

$$\overbrace{\boldsymbol{\theta}^k(i+1)}^b = \boldsymbol{\theta}^k(i+1) + \Delta \boldsymbol{\theta}^k(i+1), \quad (6.38)$$

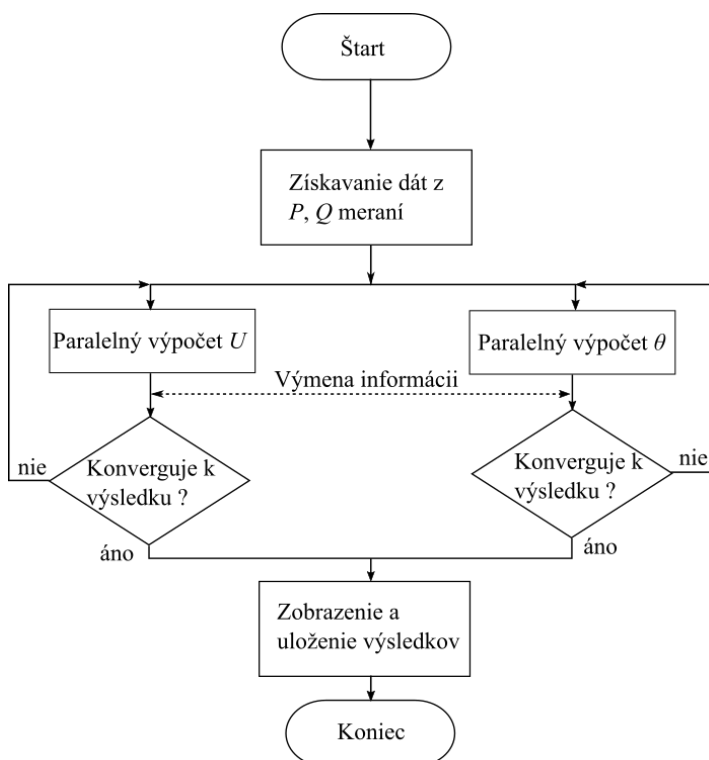
$$\overbrace{\mathbf{U}^k(i+1)}^b = \mathbf{U}^k(i+1) + \Delta \mathbf{U}^k(i+1), \quad (6.39)$$

kde

$$\Delta \boldsymbol{\theta}^k(i+1) = \frac{g_{rr}^k}{g_{rr}^k + g_{rr}^j} \cdot [\boldsymbol{\theta}_r^k(i+1) - \boldsymbol{\theta}_r^j(i+1)], \quad (6.40)$$

$$\Delta \mathbf{U}^k(i+1) = \frac{g_{rr}^k}{g_{rr}^k + g_{rr}^j} \cdot [\mathbf{U}_r^k(i+1) - \mathbf{U}_r^j(i+1)]. \quad (6.41)$$

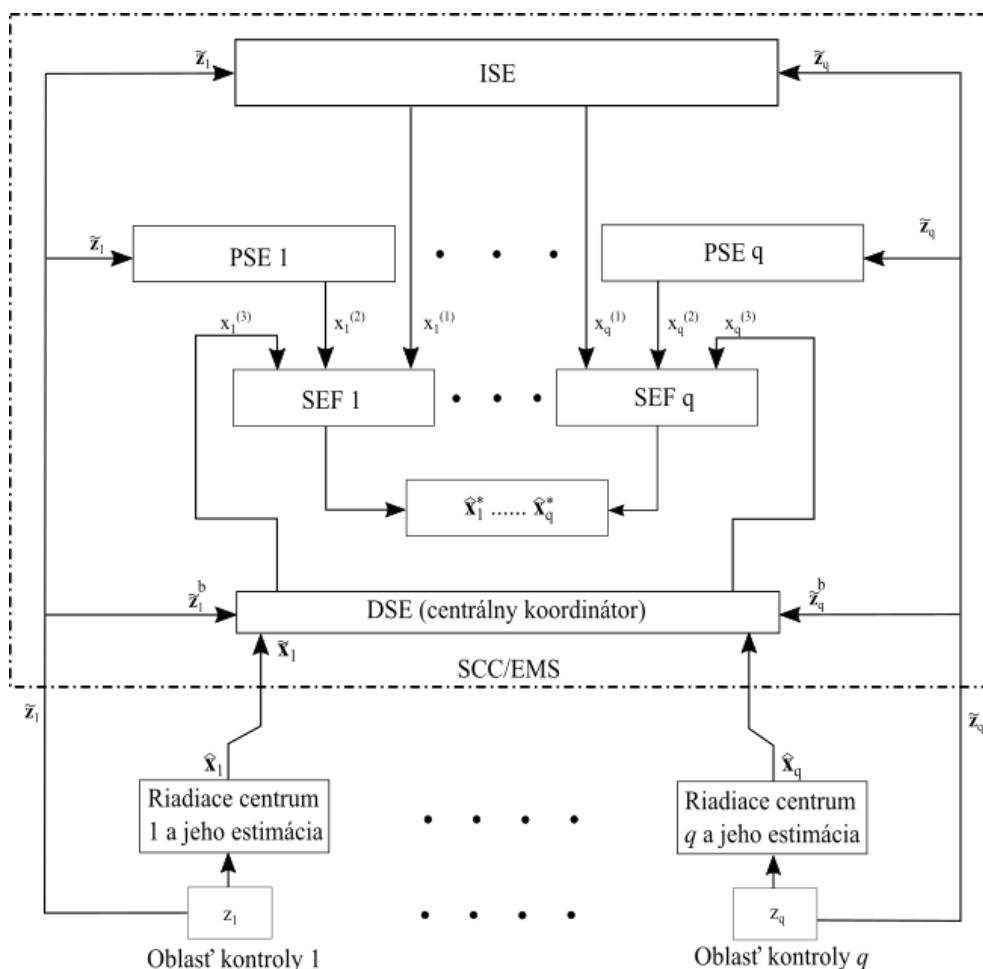
Premenné g_{rr}^k a g_{rr}^j sú diagonálne prvky korešpondujúce s hraničnými prípojnicami b matíc \mathbf{G}_p^k a \mathbf{G}_q^k .

Obr. 6.4. Algoritmus paralelnej estimácie θ a U

Na [obr. 6.4](#) je znázornený vývojový diagram paralelnej estimácie. Povaha rovníc [\(6.30\)](#) a [\(6.31\)](#) je ideálna pre implementáciu paralelnej estimácie z toho dôvodu, že estimácie θ a U prebiehajú oddelene, ale synchronne. Jedným z ďalších dôvodov prečo sa uvažuje nad paralelným výpočtom je ten, že s rozľahlosťou siete stúpajú nároky na výpočtovú dobu. Výpočtová doba môže trvať v rozmedzí od niekoľko ms do niekoľko dní. Preto sa na estimáciu môže využiť viac procesorov, ktoré budú riešiť výpočty oddelene a budú navzájom komunikovať a vymieňať si informácie [\[17\]](#).

6.2.5. Algoritmus FSE

Fúzia estimácií (FSE) je veľmi dobre známa technika pri spracovávaní signálov. V tomto koncepte je potrebné na estimáciu akési fúzne centrum, ktoré spracováva jednotlivé výstupy z podružných estimátorov. Na [obr. 6.5](#) je vidno, že estimácia v sebe zahŕňa algoritmy ako ISE, DSE a PSE. Výsledky estimácií z týchto algoritmov sú kombinované pomocou špeciálneho modulu SEF a následne sú použité algoritmom SEF. V predošlých kapitolách boli tieto algoritmy opísané, a z toho dôvodu môžeme prejsť priamo na opis FSE algoritmu.



Obr. 6.5. Algoritmus FSE

Na [obr. 6.5](#) sú znázornené dve úrovne estimácie. Nižšia úroveň má tú istú funkciu ako je znázornené ([obr. 6.2](#)) t.j., že výpočty pre jednotlivé oblasti kontroly sa vykonávajú nezávisle a ukladajú sa vo vlastnom riadiacom centre v danej oblasti [17].

Pri algoritme DSE sa posielajú údaje susedným oblastiam len z hraničných častí. Rozdiel pri FSE je ten, že tento prenos dát je rozšírený na celú i -tú oblasť kontroly. Táto prídavná záťaž pri prenose dát je kompenzovateľná použitím spoľahlivejších systémov (napr. výkonnejšie počítače) estimácie vo vyššej úrovni estimácie (PSE, ISE, FSE).

Prvým členom je integrovaný estimátor stavu (ISE člen), ktorý používa všetky sety meraní prijaté z podoblastí $\{\tilde{z}_1 \dots \tilde{z}_q\}$ na estimáciu. Hlavnou výhodou použitia ISE člena je globálna optimalizácia. Hlavnou nevýhodou je dodatočné výpočtové zaťaženie, ktoré

vyžaduje omnoho silnejšiu výpočtovú techniku (oblasť SCC/EMS). Výstup z ISE člena je rozložený na q podoblastí s vektorom estimácií $\mathbf{x}_i^{(1)}$ a príslušnou kovariančnou maticou $\mathbf{R}_i^{(1)}$ [17].

Druhým členom je paralelný estimátor stavu (PSE člen), ktorý využíva princíp paralelných výpočtov popísaný v [kap. 6.2.1](#). Každý set prijatých meraní \mathbf{z}_i z podoblasti je spracovaný paralelným procesom. Výstupom je vektor estimácií $\mathbf{x}_i^{(2)}$ spolu s príslušnou kovariančnou maticou $\mathbf{R}_i^{(2)}$. Aj keď odhadovaný stav nie je globálne optimalizovaný ako pri ISE (a teda, je menej presný), tak výpočtová doba je výrazne menšia.

Tretím členom je distribučný estimátor stavu (DSE člen), ktorý ma tú istú štruktúru ako v [kap. 6.2.2](#) ([obr. 6.2](#)). Centrálny koordinátor konsoliduje všetky systémové odhady, rozloží ich do q podoblastí s vektorom estimácií $\mathbf{x}_i^{(3)}$ a príslušných kovariančných matíc $\mathbf{R}_i^{(3)}$ [17].

Takže, počas normálnej situácie, každá podoblasť bude mať tri riešenia estimácií a to z ISE $\mathbf{x}_i^{(1)}$, PSE $\mathbf{x}_i^{(2)}$, DSE $\mathbf{x}_i^{(3)}$. Úlohou modulu SEF je skombinovať tieto riešenia do finálneho vektora estimácie $\hat{\mathbf{x}}_i^*$. Keď nejaký z týchto estimačných členov neskonverguje, tak prínos, ktorý má pri FSE sa eliminuje.

Problém odhadovania konštantného vektora \mathbf{X} je považovaný vzhľadom na vektory pozorovania $\{Y_1, \dots, Y_j, \dots, Y_N\}$ v lineárnej závislosti s \mathbf{F}_j a je daný vzťahom:

$$\mathbf{Y}_j = \mathbf{F}_j \cdot \mathbf{X} + \mathbf{w}_j, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (6.42)$$

kde \mathbf{Y}_j je vektor pozorovania, \mathbf{F}_j je lineárna funkcia vzťahujúca sa na \mathbf{X} , \mathbf{w}_j je vektor chýb pozorovania.

Optimálne riešenie je definované podľa vzťahu [17]:

$$\hat{\mathbf{X}} = \left(\sum_{k=1}^N \mathbf{F}_k^T \cdot \mathbf{R}^{(k)-1} \cdot \mathbf{F}_k \right)^{-1} \cdot \sum_{j=0}^N \mathbf{F}_k^T \cdot \mathbf{R}^{(j)-1} \cdot \mathbf{Y}_j \quad (6.43)$$

Vzťah (6.43) je optimálnou lineárnou fúziou N komponentov $\{Y_j, \dots, Y_N\}$ použitím váženého priemeru. Príspevky jednotlivých členov fúzie sa určujú na základe korešpondujúcich matíc \mathbf{F}_j a $\mathbf{R}^{(j)}$.

Tento algoritmus lineárnej fúzie prebieha v každom module SFE ([obr. 6.5](#)) s nasledujúcou úlohou: $\mathbf{Y}_j = \mathbf{x}_i^{(j)}$, $\mathbf{R}^{(j)} = \mathbf{R}_i^{(j)}$ a nakoniec $\mathbf{F}_j = \mathbf{I}_{(n_i \times n_i)}$ (jednotková matica). Potom konečne dostávame výsledný vektor estimácie $\hat{\mathbf{x}}_i^*$.

Stojí za zmienku spomenúť, že v obecnom prípade $n_{ij} \leq n_i$, kde n_i je počet stavových premenných subsystému i a n_{ij} je počet pozorovateľných stavov pre estimačný modul j . Keď z nejakého dôvodu estimačný modul j nie je k dispozícii, potom $n_{ij} = 0$ a celý člen j sa vylúči zo systému (6.43) [17].

7. VYUŽITIE GPU PROCESOROV PRE PODPORU RIADENIE DISTRIBUČNÝCH SIETÍ

7.1. História GPU

Vývoj grafických akceleratorov sa datuje od 70. rokov 20. storočia. V ich pôvodnej podobe sa jednalo o špecializované obvody, ktoré obsahovali logiku pre základné operácie potrebné pre zobrazovanie textu a jednoduchej grafiky. Boli navrhované ako numerické koprocesory (akcelerátory), pracujúce v spolupráci s CPU (Central Processing Unit), ktorý riadil činnosť GPU (Graphics Processing Unit).

V priebehu rokov sa grafický procesor čím ďalej tým viac osamostatňoval od CPU, a to po stránke hardvérovej aj softvérovej. Začal byť braný ako samostatný komponent s vlastnou výbavou.

Prvý krok k uskutočňovaniu obecných výpočtov na GPU nastal v roku 2001, kedy boli uvedené prvé grafické čipy, ktoré dávali programátorom možnosť programovať predtým pevne dané inštrukcie a ich činnosť. V rozmedzí rokov 2002 a 2003 sa objavili prvé plne programovateľné grafické karty schopné pracovať so vstupnými a s výstupnými dátovými operáciami. To znamenalo, že grafická karta prestala byť striktné špecializovaná a začala byť snaha o využitie grafickej karty aj pre výpočty [18].

V roku 2006 bola čoraz viac uplatňovaná programovateľnosť GPU, čím už nebola obmedzená len na grafické výpočty, ale aj na obecné výpočty s veľkou náročnosťou, vyžadujúce veľkú rýchlosť výpočtov s plávajúcou desatinnou čiarkou. Objavila sa univerzálna výpočtová jednotka (tzv. streaming multiprocessor). V mnohých operáciách je nutnosťou pracovať s plávajúcou desatinnou čiarkou, ale jej presnosť prestávala byť dostačujúca. Preto v roku 2008 nastali vďaka novým technológiám zmeny, ktoré priniesli radu vylepšení. Bol navýšený počet streaming multiprocessorov, dvojnásobná šírka registra a bola zavedená možnosť počítať s dvojitoú presnosťou v plávajúcej desatinnej čiarke [18].

7.2. Možnosti programovania

Od začiatku predaja začalo GPU odvetvie priťahovať čoraz viac pozornosti z akademických aj komerčných záujmových skupín. Hlavným dôvodom bola schopnosť GPU spracovávať údaje aj mimo oblastí originálne zamýšľaného použitia, ktorým bolo renderovanie vizuálnych efektov. Z dôvodu prejavenej záujmu bolo viac zdrojov pridelených na vyvíjanie produktov, ktoré by zodpovedali za výpočet všeobecných matematických modelov a na spracovanie ťažkých výpočtov. Tie sa predtým spúšťali na mainstreamových serveroch, štandardných CPU a špecializovaných matematických koprocesoroch.

Existuje niekoľko vývojových programov, od rôznych výrobcov softvéru, ktoré sú špeciálne určené pre ovládanie a programovanie GPU. Tieto programy sa od seba často odlišujú svojimi aplikačnými oblasťami, syntaxov písania zdrojových kódov alebo svojou prenositeľnosťou na iné zariadenia [18].

7.2.1. Programovací jazyk CTM

CTM umožnilo vývojárom priamy prístup k súborom inštrukcií a pamätí masívnych paralelných výpočtových prvkov v moderných AMD grafických kartách. CTM nahradil graficky zameraný DirectX a OpenGL API pre GPU programátora a zároveň odhalil nízkoúrovňovú funkčnosť, ktorá toho času bola neprístupná. Neskoršie architektúry GPU od firmy AMD podporujú práve CTM rozhranie [18].

7.2.2. AMD FireStream

AMD FireStream je stream procesor vyvinutý firmou ATI Technologies. Bol navrhnutý tak, aby sa zamerával na rôzne priemyselné odvetvia, ako napríklad vedecké a finančné odvetvie, ktoré využívajú streamové spracovanie GPU konceptu pre náročné výpočty s pohyblivou desatinnou čiarkou [18].

7.2.3. CUDA

CUDA (Compute Unified Device Architecture) technológia bola vyvinutá firmou Nvidia v roku 2006. Na trh priniesla nové GPU využívajúce CUDA architektúru. Tieto GPU boli zabudované do bežne predávaných grafických kariet, čím sa programovateľné GPU sprístupnilo oveľa širšej komunite ľudí a zároveň vďaka použitej CUDA architektúre sa tvorba aplikácií stala jednoduchšou. CUDA je paralelná výpočtová platforma a programovací model. V ktorýkoľvek daný cyklus vykoná každý procesor v multiprocesore rovnakú inštrukciu ako ostatné procesory, len na rozdielnych údajoch, čo z každého robí SIMD (Single Instruction Multiple Data) procesor.

CUDA ako prvá sprístupnila myšlienku super počítania širokej verejnosti. CUDA sa podobá jazyku C a nazýva sa C for CUDA. Patrí medzi vysokoúrovňové jazyky, ale jeho nízkoúrovňové časti sú dostupné užívateľovi. Podobne ako v jazyku C je možné alokovať a dealokovať pamäť a programátor určuje, v ktorej pamäti alokácia prebehne. Môže si vybrať medzi zdieľanou pamäťou, konštantnou cache, textúrovou cache a pamäťou zariadenia. Veľkou výhodou CUDA je, že má výborný vizuálny profiler a debugovacie nástroje. Naopak, asi najväčšou nevýhodou je hardvérova obmedzenosť. To znamená, že môže byť spustená len na CUDA kompatibilných grafických kartách, ktoré vyvíja a predáva tá istá spoločnosť - Nvidia [18].

7.2.4. OpenCL

OpenCL (Open Computing Language) je prvý otvorený a voľný štandard pre multiplatformové použitie paralelného programovania na CPU, GPU a ďalších procesoroch. Táto vlastnosť prináša vývojárom softvéru efektívny prístup k výkonu týchto heterogénnych procesorových platforiem. OpenCL na rozdiel od CUDA, môže byť spustený na akejkoľvek modernej GPU. Dokonca, ak v počítači chýba podpora pre GPU, výpočet môže paralelne prebiehať na integrovanej grafickej karte v CPU. Podporuje synchronizáciu nad viacerými zariadeniami, teda výpočet môže byť vykonávaný napríklad na 2 grafických zariadeniach súčasne. Podobne ako CUDA je OpenCL založený na jazyku C respektíve na dialekte C99 špecifikácií.

OpenCL spravuje technologické konzorcium Khronos Group. Khronos Group je nezisková organizácia, ktorá je financovaná od svojich členov. Bola založená v roku 2000 skupinou mediálne orientovaných spoločností 3DLabs, ATI, Discreet, Evans & Sutherland, Intel, nVIDIA, SGI a Sun Microsystems. Tieto spoločnosti sa spojili za účelom vytvárania API otvorených štandardov pre paralelné výpočty, grafiku a dynamické médiá spustiteľné na širokej škále platforiem a zariadení [18].

7.3. Posúdenie využiteľnosti GPU pre výpočty podporujúce prevádzku distribučných sietí

Aplikácia GPU je možná napríklad v nasledovných prípadoch [18]:

- metódy využívajúce rozľahlé matice,
- výpočty využívajúce sumu alebo parciálnu deriváciu,
- systémy, v ktorých je potrebný výpočet viacerých hodnôt zároveň v čo najkratšom čase.

Možnosť aplikácie GPU pre rôzne výpočty v elektroenergetike je rôznorodá, no nedá sa použiť vždy. Niektoré metódy výpočtov používané v elektroenergetike sú založené na postupnosti, kedy je napr. potrebná hodnota z predchádzajúceho výpočtu. V takýchto prípadoch by boli GPU zbytočné, v mnohých prípadoch by výpočet dokonca spomaľovali.

Naopak, v prípadoch, keď je výpočet založený na práci s maticami a operáciami s tým spojenými, využitie paralelizácie pomocou GPU môže výrazným spôsobom skrátiť výpočtovú čas.

7.3.1. Výpočty tokon výkonov

Gaussova iteračná metóda

Gaussova iteračná metóda ([kap. 5.3.4](#)), ako metóda využívajúca matice pre dosiahnutie výsledných napätí, je vhodná pre paralelizáciu. Preto je vhodné použiť GPU hlavne v týchto prípadoch [\[18\]](#):

- pre výpočet a úpravy admitančnej matice \mathbf{Y} ,
- výpočet výsledných napätí pre viacero iterácií zároveň,
- výpočet pre viacero prípojníc zároveň (čím sa dosiahne výsledok v lepšom čase než v sekvenčnom výpočte - urýchlenie výpočtu je možné badať hlavne pri vyššom počte iterácií),
- pri výpočtoch súm, kedy je možné rozdelenie sumy na samostatné členy, počítané na jadrách paralelne, pričom po prebehnutí výpočtov sú výsledné hodnoty sčítané.

Gauss-Seidelova metóda

Táto metóda nie je vhodná pre paralelizáciu. Dôvodom je nutnosť dokončenia predchádzajúcej operácie výpočtu U^k , ktorej hodnota je použitá pri výpočte nasledujúcej operácie $U^{(k+1)}$. Táto metóda je vhodná pre riešenie čiastkových rovníc [\[18\]](#).

Newton-Raphsonová metóda

Základom Newton-Raphsonovej metódy ([kap. 5.3.3](#)) sú výpočty Jakobiánu a jeho násobenie s ďalšími maticami. Keďže sú GPU určené prednostne na výpočty matíc, je výpočet Jakobiánu možné paralelizovať a uskutočniť výpočet cez GPU. Paralelizáciu je taktiež možné využiť pre urýchlenie výpočtov pracujúcich s operáciami sumy, ako sú napríklad výpočty výkonov. Využíva sa rovnaký princíp ako pri Gaussovej iteračnej metóde [\[18\]](#).

7.3.2. Výpočty skratových prúdov

Paralelizácia pre výpočet zložitých trojfázových skratov, je predovšetkým vhodná z hľadiska často rozľahlých matíc, kedy je účinok skratu zisťovaný pre siete o mnohých prípojniciach. Keďže oblasť výpočtov matíc je hlavným zameraním paralelizácie, bude pri využití grafického procesora možné dosiahnuť vyššieho výpočtového výkonu než pri sekvenčnom výpočte. Táto výhoda sa prejavuje hlavne pri rozsiahlejších sieťach, ktorých parametre sú v prevažnej väčšine nemenné. Táto vlastnosť sietí je výhodou v prospech paralelizácie. Samotná náhradná schéma impedancií statických prvkov sústavy je pre všetky prípady rovnaká, takže bude zriedkavo nutná zmena rozmerov počítaných matíc, čím sa ušetrí čas na prenos nových dát a bude miesto toho nutná len ich aktualizácia. Zachová sa

tým výhoda rýchlosti paralelizácie oproti sekvenčnému výpočtu a potlačí sa nevýhoda grafických procesorov v podobe zdĺhavého prenosu dát [18].

7.3.3. Optimalizácia prevádzky elektrických sietí

Optimalizovanie prevádzkových režimov elektrických sietí využíva pre svoje výpočty operácie parciálnej derivácie. Tieto operácie môžu byť paralelizované. Paralelizácia spočíva v rozložení rovníc do viacerých jadier, podobne ako je tomu pri paralelizácii výpočtov sumy, podľa členov, ktoré vykonávajú derivácie.

Použitie paralelizácie pre optimalizovanie stability je tiež možné realizovať pre zistenie parametrov, pri ktorých bude čo najlepšia dosiahnuteľná stabilita. Princíp spočíva v paralelnom výpočte pre viacero rôznych skupín parametrov alebo konfigurácií topológie siete. Výpočet je realizovaný jednou skupinou jadier pre jednu sadu parametrov, pričom ďalšie skupiny jadier počítajú pre iné sady parametrizácií. Podľa výsledkov je možné identifikovať skupinu parametrov alebo topológiu, ktorá dosiahne požadovanú úroveň stability [18].

7.4. Estimácia stavu distribučnej siete

Pre tento prípad výpočtov je paralelizácia vhodná pre rovnice obsahujúce sumu a taktiež parciálne derivácie. Pre tieto typy výpočtov platí, že ich je možné paralelizovať vďaka rozloženiu rovníc do viacerých jadier.

7.4.1. Evolučné algoritmy

Evolučné algoritmy používajú mechanizmy inšpirované evolúciou a genetikou na riešenie náročných problémov z oblasti optimalizácie, počítačového učenia či simulácie zložitých systémov. V tomto prípade sa budeme venovať hlavne ich použitiu v optimalizácii. Asi najväčšia výhoda evolučných algoritmov, v porovnaní so štandardnými metódami optimalizácie, je to, že je pomerne jednoduché tieto metódy pochopiť, implementovať a používať v praxi a napriek tomu sú schopné nájsť riešenia zložitých nelineárnych problémov v prijateľnom čase.

Jeden spôsob definície optimalizačného problému je špecifikovať reprezentáciu prípustných riešení problému a metódu, ktorá umožní porovnávanie kvality dvoch alebo viacerých riešení. Cieľom je nájsť riešenie maximálnej kvality. Metóda na ohodnocovanie kvality riešení je zvyčajne založená na funkcii, ktorá pre každé potenciálne riešenie vráti reálnu hodnotu. Čím je táto hodnota vyššia, tým je riešenie považované za lepšie z hľadiska riešeného problému. Samozrejme, obdobne je možné považovať za lepšie riešenia tie, ktoré majú nižšiu funkčnú hodnotu.

Evolučné algoritmy pracujú na princípe, kedy sú veľké skupiny (generácie) jedincov riešené za účelom získania jedincov s čo najvyššou kvalitou. Veľké množstvo týchto výpočtov, pričom sú prevažne počítané podľa rovnakých rovníc, umožňujú paralelizáciu cez GPU. Výpočty generácií môžu byť počítané na samostatných jadrách alebo celých multiprocesoroch. Tým bude dosiahnuté riešenie možné aplikovať v ďalších generáciách oveľa rýchlejšie. Paralelizácia je veľmi výhodná hlavne z toho dôvodu, že evolučné algoritmy obsahujú množstvo generácií na dosiahnutie požadovaného výsledku [18].

8. ZÁVER

V novodobej koncepcii využitia elektrickej energie, ktorá počíta so zavádzaním úsporných opatrení s cieľom znižovania emisií a využitím „zelených“ a distribuovaných zdrojov energie, bude potrebné adekvátne prispôbiť aj distribučné siete. Inteligentné siete sú bezpochyby spôsobom, ktorý je reálne uskutočniteľný a ponúka všetky potrebné funkcionality. Je však treba podotknúť, že jeho úspešná implementácia nezávisí len na technickej stránke siete, ale je úzko spojená aj s ďalšími oblasťami.

Aj naďalej bude treba vykonávať výskum a vývoj so zameraním na riadenie distribučných sietí prostredníctvom moderných IKT, ktoré je jedným z kľúčových prvkov umožňujúcim rozvoj a zavádzanie inteligentných sietí. Veľkú pozornosť je nutné venovať vývoju obslužných zariadení siete a ich štandardizácií, ale tiež vlastnej logike a systémom riadenia siete. Nemalú pozornosť bude tiež vyžadovať nastavenie architektúry pre komunikáciu medzi jednotlivými elementmi [\[19\]](#).

Pri tom však treba pamätať na to, aby zavádzanie IKT nebolo samoučelné a neohrozilo prirodzenú odolnosť distribučných sietí voči poruchám. Len tak bude možné nájsť prirodzenú hranicu medzi užitočnosťou a nadbytočnosťou týchto systémov. Je však zrejmé, že aplikáciou informačno-komunikačných technológií sa otvárajú nové a vzrušujúce možnosti riadenia a prevádzky distribučných sietí v budúcnosti a vytvára sa tak priestor pre realizáciu budúcich generácií inžinierov a technikov.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] Blažek, V., Skala, P.: *Distribuce elektrické energie*, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně.
- [2] Toman, P. a kol.: *Provoz distribučních soustav*, 1. Vydanie, České vysoké učení technické v Praze, 2011, Praha, ISBN 978-80-01-04935-8.
- [3] Braciník, P. a kol.: *Prvky elektroenergetických distribučních sústav*, Žilinská univerzita v Žiline, 2012, Žilina, ISBN 978-80-554-0464-6.
- [4] *Smart Grid*, Dostupné online na: <http://www.ness-tech.eu/sk/riesenia/grid4life/Smart-grid>, máj 2015.
- [5] Janiček, F., Chladný, V., Beláň, A., Eleshová, Ž.: *Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave*. Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2004
- [6] Horák, M.: *Systémy chránenia a automatizácie distribučních elektrických sietí 22 kV*, 1. Vydanie, PRO, s.r.o., 2011, Banská Bystrica, ISBN 978-80-89057-37-5.
- [7] SEAS, Slovenské elektrárne: *Inteligentné siete*, Dostupné na internete: <http://www.seas.sk/sk/spolocnost/inovacie/inteligentne-siete>, máj 2015.
- [8] Thomas, M.S., McDonald, J.D.: *Power System SCADA and Smart Grids*, CRC Press, 2015, 313 s. ISBN 978-1-4822-2674-4
- [9] Häger, U., Rehtanz, C., Voropai, N.: *Monitoring, Control and Protection of Interconnected Power Systems*, Springer, 2014, 391 s., ISBN 978-3-642-53847-6
- [10] Ribeiro, P.F., Duque, C.A., Silveira, P.M., Corqueira, A.S.: *Power Systems Signal Processing for Smart Grids*, Wiley, 2014, 415 s., ISBN 978-1-118-63926-9
- [11] Momoh, J.: *SMART GRIDS – Fundamentals of Design and Analysis*, Wiley, IEEE Press, 2012, 205 s., ISBN 978-0-470-88939-8
- [12] Mizerák, D.: *Vytvorenie modelu reclosera pomocou metódy konečných automatov*, diplomová práca, Žilinská univerzita v Žiline, 2015.
- [13] Hrdý, M.: *Metódy pre výpočty statických chodov elektrických sietí*, diplomová práca, Žilinská univerzita v Žiline, 2016
- [14] Altus, J.: *Modelovanie a výpočty elektrických sietí 1*, EDIS, Žilina, 2005, 115 s., ISBN 80-8070-380-9
- [15] Zimmerman, R.D.: *Comprehensive Distribution Power Flow: Modeling, Formulation, Solution Algorithms and Analysis*, dizertačná práca, Cornell University, 1995.

- [16] Michline Rupa, J.A., Ganesh, S.: *Power Flow Analysis for Radial Distribution System Using Backward/Forward Sweep Method*, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, Vol:8, No:10, 2014.
- [17] Zvalo, M.: *Estimácia stavu siete v distribučných sieťach vn*, diplomová práca, Žilinská univerzita v Žiline, 2015
- [18] Ľuptáček, M.: *Využitie GPU procesorov pre výpočty v elektroenergetike*, diplomová práca, Žilinská univerzita v Žiline, 2015
- [19] Súpup, T.: *Chytré sítě, chytré spotřebiče a akumulace el. energie*, Bakalárska práca, Vysoké učení technické v Brně, 2010.