

Technicko - výpočetní studie

Využití umělé inteligence při diagnostice systémových prvků a optimalizaci systémových činností v elektroenergetice

ID projektu: TK04020003
Název projektu: Užití umělé inteligence při modernizaci diagnostiky systémových prvků a optimalizaci systémových činností energetického sektoru s cílem zvýšení kvality jeho řízení

Relevantní výsledek: TK04020003-V8 (O – Ostatní výsledky), ID Apollo 187279

Řešitelský tým:
Ing. Miloš Křivan (VUT)
Ing. Michal Ptáček, Ph.D. (VUT)
Ing. Jan Koudelka (VUT)
prof. Ing. Petr Toman, Ph.D. (VUT)

Stran: 20

Verze: v1

V Brně, 31. 12. 2023

Tato studie byla vytvořena se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu na podporu aplikovaného výzkumu, experimentálního vývoje a inovací THÉTA (projekt č. TK04020003). Související výzkumné aktivity byly realizovány v Centru výzkumu a využití obnovitelné energie (CVVOZE).

Obsah

1	Úvod.....	3
2	Lokalizace poruchy v rozvodně 110 kV	4
2.1	Úvod, motivace.....	4
2.2	Popis testovacího případu	5
2.3	Popis použitých algoritmů	5
2.4	Tréninková data	6
2.5	Testování, vyhodnocení výsledků.....	7
2.6	Diskuse praktické implementace	8
3	Optimalizace údržbové trasy	9
3.1	Úvod, motivace.....	9
3.2	Popis testovacího případu	9
3.3	Popis použitých algoritmů	10
3.4	Testování, vyhodnocení výsledků.....	10
3.5	Diskuse praktické implementace	12
4	Vyhodnocení stavu energetického zařízení	13
4.1	Úvod, motivace.....	13
4.2	Popis testovacího případu	13
4.3	Popis použitých algoritmů	14
4.4	Testování, vyhodnocení výsledků.....	14
4.5	Diskuse praktické implementace	15
5	Frekvenční odlehčování	16
5.1	Úvod, motivace.....	16
5.2	Používané algoritmy	17
5.3	Diskuse praktické implementace	17
6	SWOT analýza použití představených nástrojů umělé inteligence.....	18
7	Zhodnocení, závěr.....	19
	Reference.....	20

1 Úvod

Poprvé se o umělé inteligenci začíná hovořit ve 40. – 50. letech 20. století, přičemž k jejímu masivnímu rozvoji a nasazení dochází zejména během posledních dvou dekad [1]. V aplikacích má umělá inteligence skutečně široké uplatnění, z nichž nejznámější jsou zejména zpracování řeči, robotika nebo strojové překladatelství, stále častější je však uplatnění i mimo tato tradiční odvětví, např. v ekonomii nebo dopravě.

Ve spojitosti se sektorem energetiky je často používáno přídavné jméno konzervativní, tedy preferování fungujících a osvědčených řešení. I přesto je i v tomto sektoru vyvíjena celá řada inovativních řešení, která lze sledovat na každoročně pořádaných konferencích, příp. článkách publikovaných v odborných časopisech. Velké energetické společnosti, ať už provozovatelé sítí nebo průmyslové firmy, zřizují oddělení pro inovační projekty, které do tradičních konzervativních postupů vnášejí inovace a postupně tak napomáhají transformaci celého sektoru a implementaci nových řešení, postupů a metod.

Umělá inteligence bude postupně pronikat i do sektoru energetiky, kde je možné ji využít pro řadu činností spojených s provozem soustav, zejména z oblasti údržby, plánování, optimalizace procesů a činností, vedoucím zejména ke snížení nákladů.

Tato studie se zabývá možností aplikace umělé inteligence pro vybrané procesy a činnosti v elektroenergetice. Řešenými problémy jsou lokalizace poruchy v rozvodně, optimalizace údržbové trasy, hodnocení stavu energetického zařízení a frekvenční odlehčování.

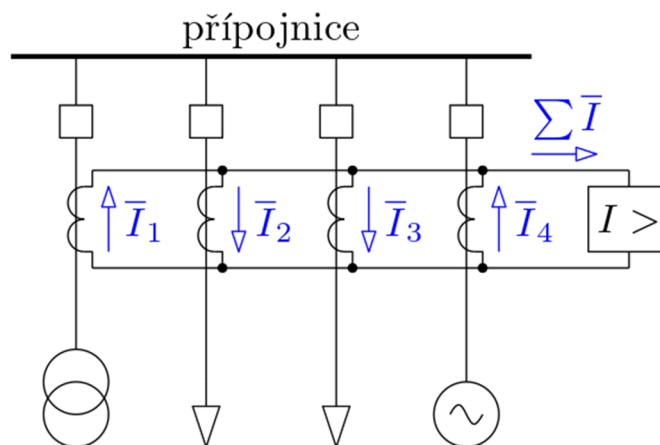
Nástroje použité v této studii byly vyvíjeny za finanční podpory TA ČR v rámci projektu č. TK04020003 „Užití umělé inteligence při modernizaci diagnostiky systémových prvků a optimalizaci systémových činností energetického sektoru s cílem zvýšení kvality jeho řízení“. V rámci uvedeného projektu byly vyvinuty dva hlavní nástroje využívající umělou inteligenci, a to integrovaná rozhraní Deep Neural Network a Travelling Salesman Problem.

2 Lokalizace poruchy v rozvodně 110 kV

2.1 Úvod, motivace

Důležitou součástí distribuční soustavy 110 kV jsou rozvodny, které se mohou provozovat ve více možných zapojeních. Od nejjednodušších rozveden typu „H“, přes standardní systém 2 přípojnic, až po systémy s více přípojnicemi.

Poruchy, které nastanou v rozvodně, jsou detekovány zejména rozdílovou ochranou přípojnic (ROP), která je založena na aplikaci I. Kirchhoffova zákona. Prakticky to znamená, že součet proudů na jednotlivých vývodech musí být nulový – při respektování jejich směru. Schématické znázornění pro jednoduchý příklad je vidět na *Obr. 1*. Principiálně se jedná o nadproudovou ochranu ($I >$).



Obr. 1 – Principiální schéma rozdílové ochrany přípojnic (ROP)

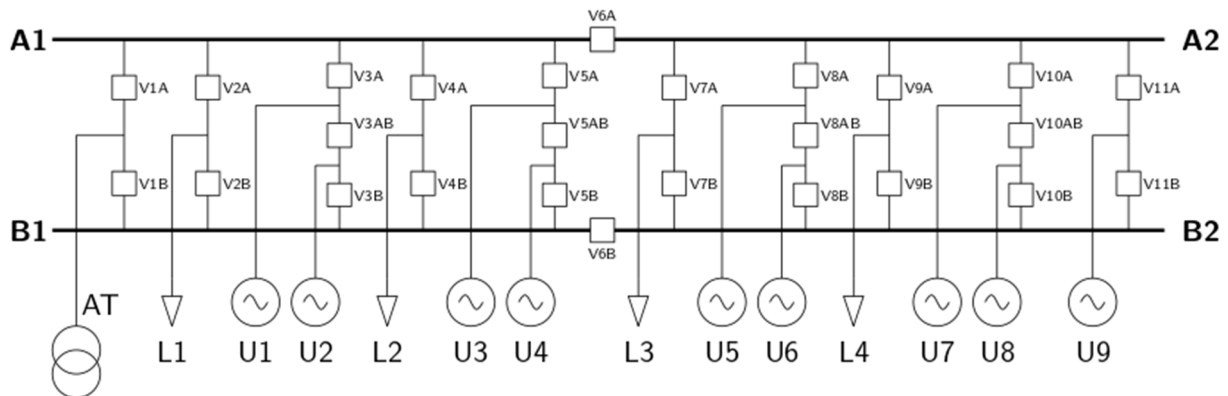
Po zapůsobení ochrany je celá rozvodna odpojena, a odběratelů napájených z této rozvodny dojde k přerušení distribuce, přičemž se může jednat o značně rozsáhlé území s velkým množstvím odběratelů, jak demonstrují následující vybrané případy.

Při poruše v rozvodně 110 kV Dluhonice v srpnu 2023 byla přerušena dodávka 160 tisíc odběrných míst [2], včetně elektrické trakční sítě v Olomouci. Porucha v rozvodně 110 kV Vítkov znamenala přerušení distribuce téměř na celém území Karlovarského kraje [3]. V říjnu 2023 poskytl výpadek rozvodnu 110 kV Sokolnice, kdy na místě došlo ke zranění pracovníka [4]. Dodávka byla přerušena ve velké části Jihomoravského kraje a částečně i v sousedních krajích.

V případě výpadků rozveden je prioritou společností zajišťujících distribuci elektřiny obnovení dodávek odběratelům. Není-li však známé místo poruchy v rozvodně, nelze obvykle rozvodnu znovu sepnout, nýbrž je třeba provést vizuální inspekci pravděpodobného místa výskytu poruchy, tedy až celé rozvodny. K opětovnému sepnutí rozvodny tak může dojít až v řádu hodin. Přesnější lokalizace místa poruchy může čas nutný pro vizuální kontrolu výrazně zkrátit a přispět tak k rychlejšímu obnovení dodávky elektřiny k odběratelům.

2.2 Popis testovacího případu

Pro aplikaci umělé inteligence pro lokalizaci poruchy byl vybrán případ rozvodny 110 kV se dvěma přípojnici, která umožňuje podélné dělení. Jednopolové schéma rozvodny je na Obr. 2.



Obr. 2 – Jednopolové schéma uvažované rozvodny

Hlavní přípojnice jsou označeny A a B, přičemž mohou být ještě podélně děleny na dílčí sekce – A1 a A2, resp. B1 a B2 pomocí vypínačů V6A a V6B. Provozování oddělených přípojníc je voleno z provozních důvodů (oddělení zdrojů/spotřeby) a také z hlediska zkratových poměrů (při sepnutí sekcí by nemusela být splněna zkratová odolnost zařízení).

Uvažovaná rozvodna dále obsahuje celkem 14 vývodů, z čehož 9 vývodů je pro zdroje (U1 – U9), 4 vývody jsou pro vedení (L1 – L4) a jeden vývod je pro transformátor (AT). Rozvodna obsahuje celkem 26 vypínačů, jak je patrné z Obr. 2, a 40 ochran.

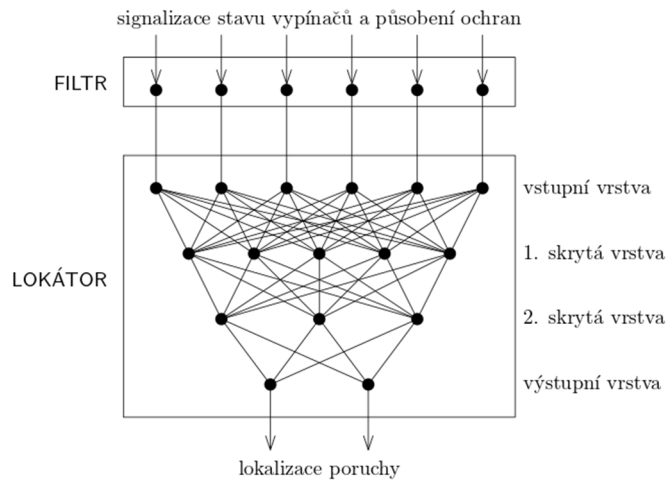
Schéma rozvodny bylo koncepčně zvoleno tak, aby poskytovalo velké množství konfigurací, a bylo tak použitelné pro velké množství rozveden. Nemusí se jednat ani pouze o rozvodnu 110 kV, detekční algoritmy jsou odvozované od poruchové signalizace, a nejsou tudíž závislé na napěťové hladině.

2.3 Popis použitých algoritmů

Pro lokalizaci poruchy byla použita dvouúrovňová struktura schematicky znázorněná na Obr. 3 a je realizována v integrovaném prostředí „Deep Neural Network“.

První úroveň je filtr signalizace stavu vypínačů a poruchových hlášení ochran. Filtr má formu autoasociativní neuronové sítě. Druhou úroveň je potom lokátor, který má formu hluboké neuronové sítě s dvěma skrytými vrstvami, tedy má celkem 4 vrstvy. Vstupní vrstva má 66 neuronů (odpovídajícím stavu jednotlivých vypínačů a signalizacím ochran). Výstupní vrstva má 18 neuronů, které odpovídají jednotlivým přípojnícím (A1 – B2) a vývodům. Mezi vstupní a výstupní vrstvou jsou vloženy dvě skryté vrstvy o 45 a 25 neuronech.

Lokátor se jeví sám o sobě jako robustní vzhledem k výpadku jednotlivých signálů ve snímku signalizací vypínačů a ochran, což znamená, že je schopen správně lokalizovat poruchu i v případě částečného zašumění snímku. Porucha je lokalizována excitací neuronu odpovídajícímu příslušnému prvku rozvodny. Robustnost lokalizace poruch může být podpořena předběžnou



Obr. 3 – Schéma struktury pro lokalizaci poruchy v rozvodně

filtrací šumu uvedeného snímku, tj. nejprve filtr provede ortogonální projekci zašuměného snímku do nadroviny generované 18 lineárně nezávislými vzájemně ortogonálními snímky o 66 složkách, která je poté předložena lokátoru.

2.4 Tréninková data

Jako tréninková data lokátoru poruchy byla použita množina signalizací stavů vypínačů a ochran v závislosti na místě poruchy, uvedená v Tab. 1. Hodnota 1 v Tab. 1 znamená vypnutí vypínače, resp. působení ochrany.

Tab. 1 – Tréninková data lokátoru poruchy: signalizace stavů vypínačů (vlevo) a ochran (vpravo)

	A1	A2	B1	B2	L1	L2	L3	L4	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	AT
V1A	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V2A	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3A	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4A	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V5A	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
V6A	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3AD	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
V5AB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
V1B	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V2B	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3B	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4B	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V5B	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
V6B	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V7A	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V8A	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
V9A	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V10A	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
V11A	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V8AB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
V10AB	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
V7B	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V8B	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
V9B	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V10B	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
V11B	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
RA1/H	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RA1/Z	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RB1/H	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RB1/Z	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RA2/H	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RA2/Z	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RB2/H	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RB2/Z	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ASV/A1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ASV/A2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ASV/B1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ASV/B2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DL1/H	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DL1/Z	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DL2/H	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DL2/Z	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DL3/H	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DL3/Z	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DL4/H	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DL4/Z	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RU1/H	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RU1/Z	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RU2/H	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RU2/Z	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RU3/H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
RU3/Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
RU4/H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
RU4/Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
RU5/H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
RU5/Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
RU6/H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
RU6/Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
RU7/H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
RU7/Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
RU8/H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
RU8/Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
RU9/H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
RU9/Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
RAT/H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
RAT/Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Požadovaná funkce lokátoru o 5% chybovosti byla dosažena po přibližně 6800 předloženích tréninkových dat s parametry učení 0,05 (míra plasticity synapse) a 0,7 (míra setrvačnosti gradientu).

2.5 Testování, vyhodnocení výsledků

Pro testování lokátoru byly vybrány následující scénáře:

1. porucha na sběrnici A1 provázená výpadkem signalizace vypínače V6A a ochrany RA1,
2. porucha na vývodu L1 provázená výpadkem signalizace ochrany DL1,
3. porucha na vývodu U1 provázená výpadkem signalizace vypínačů V3A a V3AB

Dále jsou uvedeny výsledky po filtraci šumu – Tab. 2, a lokalizace poruchy – Tab. 3.

Tab. 2 – Výstup filtrace šumu pro testovací scénáře

filtrace	A1		L1		U1	
	před	po	před	po	před	po
V1A	1	0,7	0	0,0	0	-0,1
V2A	1	0,7	1	0,5	0	-0,1
V3A	1	0,7	0	0,1	0	0,5
V4A	1	0,7	0	0,0	0	-0,1
V5A	1	0,7	0	0,1	0	-0,1
V6A	0	0,5	0	0,1	0	-0,1
V3AB	0	0,1	0	0,0	0	0,4
V2B	0	0,1	1	0,5	0	0,0
RA1/H	0	0,6	0	0,1	0	-0,1
RA1/Z	0	0,6	0	0,1	0	-0,1
ASV/A1	1	0,6	0	0,1	0	-0,1
DL1/H	0	0,1	0	0,5	0	0,0
DL1/Z	0	0,1	0	0,5	0	0,0
RU1/H	0	0,1	0	0,0	1	0,6
RU1/Z	0	0,1	0	0,0	1	0,6

Tab. 3 – Lokalizace poruchy pro testovací scénáře

lokalizace	A1		L1		U1	
	bez filtru	s filtrem	bez filtru	s filtrem	bez filtru	s filtrem
A1	0,5	0,9	0,0	0,2	-0,1	-0,1
A2	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
B1	0,0	-0,1	0,1	0,2	-0,1	0,0
B2	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,2	0,1
L1	0,0	0,1	0,4	0,7	-0,1	0,0
L2	0,0	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0
L3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
L4	0,2	0,0	-0,1	0,1	0,2	0,0
U1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,4	0,9
U2	-0,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,2
U3	0,1	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0
U4	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
U5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1
U6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
U7	0,1	0,1	0,1	0,1	-0,1	0,0
U8	-0,1	-0,1	0,2	0,1	0,2	0,1
U9	0,1	-0,1	0,0	0,0	0,2	0,0
AT	0,2	0,1	0,3	0,0	0,2	0,1

Bez filtrace šumu je porucha na vývodu L1 lokalizována na hranici rozpoznatelnosti, tj. jí odpovídající neuron je excitován na hodnotu 0,4 a neuron odpovídající poruše vývodu AT je excitován na hodnotu 0,3, při filtraci šumu je jí odpovídající neuron excitován na hodnotu 0,7, zatímco falešně excitovaný neuron zůstává inhibován.

2.6 Diskuse praktické implementace

Testovací konfigurace (viz Obr. 2) byla volena jako poměrně velká rozvodna umožňující značnou řadu konfigurací. Pro aplikace v rozvodnách s odlišnou koncepcí je třeba vždy nejprve vytrénovat neuronovou síť, tzn. připravit tréninková data analogicky s Tab. 1. na základě topologie rozvodny a signalizace ochran.

Prozatím nebylo dosaženo praktického nasazení navrženého algoritmu, neboť prozatím přetrvávají konvenční způsoby detekování poruch. Dlužno však dodat, že nezřídka poruchu prakticky vyhodnocují operátoři na základě poruchové signalizace z terminálů ochran na základě dlouhodobých provozních zkušeností.

Praktická implementace navrženého systému by si vyžádala nezbytné úpravy řídicího systému provozovatele distribuční soustavy, ve kterém by byl lokátor softwarově realizován. Řídicí systémy dodávají a obstarávají externí dodavatelé, kteří by do nich museli popsané algoritmy implementovat.

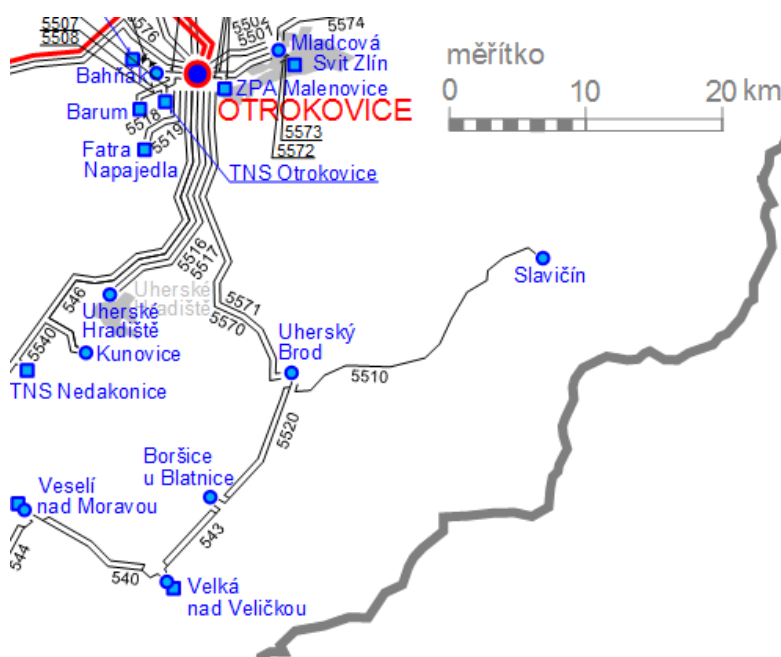
I přes popsaná omezení se budoucí aplikace lokátoru jeví reálnou a nápomocnou v procesu dispečerského řízení, který je nezbytný pro spolehlivý provoz elektrických sítí.

3 Optimalizace údržbové trasy

3.1 Úvod, motivace

Provozovatelé elektrických sítí spravují velká distribuční území. Největší distribuční společnost v České republice, ČEZ Distribuce, má rozsah zásobované oblasti 52 000 km², kde je přes 3 750 000 odběrných míst [5]. Společnost EG.D zásobuje elektřinou oblast 26 500 m² čítající přes 1 500 000 odběrných míst .

Zařízení distribuční soustavy potřebují pravidelnou údržbu, revize a kontroly, přičemž daná zařízení mohou být rozmístěna ve značných vzdálenostech od sebe. Pro představu následující Obr. 4 představuje schéma sítí 110 kV v oblasti Otrokovicka a Uherskohradištska a je doplněn o měřítko. Distribuční soustavu však tvoří také mnohonásobně delší vedení VN a NN, které na obrázku znázorněny nejsou.



Obr. 4 – Schéma sítí 110 kV v oblasti Otrokovicka a Uherskohradištska, podle [7]

Má-li probíhat údržba zařízení na takto rozsáhlém území, je optimalizace trasy prostředkem vedoucím k výraznému snížení nákladů a v neposlední řadě i k časové úspoře.

3.2 Popis testovacího případu

Byť je aplikace pro optimalizace údržbové trasy cílena na energetický sektor, její testování proběhlo na názornějším problému, a to hledání nejkratší spojnice vybraných evropských měst, která jsou uvedena v Tab. 4. Výběr je proveden především z toho důvodu, že provozovatelé distribučních soustav vnímají údaje o poloze zařízení soustavy jako citlivé, kdy jejich potenciální zneužití představuje bezpečnostní riziko, a nechtěli je publikovat v žádných zprávách. Nicméně použitím jiných geografických dat nikterak nesnižuje aplikovatelnost vyvinutých řešení – program

Lze plnohodnotně využít i pro jiné polohopisné body, definující např. podpěrné body (stožáry) venkovního vedení, trafostanice, spínací stanice nebo odběrná místa.

Tab. 4 – Evropská města použitá pro optimalizaci trasy

Amsterdam	Dublin	Kobenhavn	Munchen	Strasbourg
Ankara	Dubrovnik	Lisboa	Narvik	Venezia
Athenai	Edinburgh	Liverpool	Oslo	Warszawa
Barcelona	Frankfurt	London	Palermo	Wien
Beograd	Geneve	Luxembourg	Paris	Zurich
Berlin	Hamburg	Madrid	Praha	
Bratislava	Hammerfest	Malaga	Roma	
Bruxelles	Helsinki	Marseille	Salzburg	
Bucuresti	Istanbul	Milano	Sofia	
Budapest	Kijev	Moskva	Stockholm	

Pro optimalizaci údržby těchto stanic byla hledána jejich nejkratší vzdálenost, a to pomocí metody simulovaného žhání. Podrobnější popis použitého optimalizačního algoritmu je v následující sekci.

3.3 Popis použitých algoritmů

Pro optimalizaci byl použit algoritmus simulovaného žhání. Tento algoritmus vychází z popisu termodynamického systému, resp. pravděpodobnostního popisu makrostavu systému jako funkce teploty. Výpočet probíhá iteračním způsobem. Pravděpodobnost nalezení optima lze řídit právě pomocí teploty, kdy velká teplota zajistí vyloučení lokálních extrémů díky akceptaci téměř všech navržených řešení, naopak nižší teplota znamená vyloučení méně přípustných řešení. Znamená to tedy, že během výpočtu se systém chladí, aby bylo na konci výpočtu nalezeno dostatečně hluboké lokální minimum. Chlazení, tj. pokles teploty, lze modelovat různými způsoby – např. lineární pokles teploty nebo exponenciální pokles teploty. Optimalizačnímu modelu lze tedy parametricky zadávat různou počáteční teplotu, resp. hodnotu parametru SEED a lze použít různé množství iterací.

Experiment byl prováděn pro hodnoty počátečních teplot ($0,1 \div 1000$) resp. hodnoty parametru SEED ($0 \div 1000$) a pro počet iterací ($10^3 \div 10^6$) resp. ($10^3 \div 10^9$). Byly použity dva různé, dříve uvedené rychlosti poklesu teploty – lineární a exponenciální. Všechny experimenty simulovaného žhání byly provedeny pro počáteční teplotu rovnou jedné, s výjimkou poslední řady (10^9 iterací) experimentů pro lineární sestup, kde počáteční teplota byla nastavena na pět.

3.4 Testování, vyhodnocení výsledků

Výsledky optimalizačního algoritmu pro nalezení trasy mezi místy podle Tab. 4 jsou uvedeny v následujících tabulkách v kilometrech: v Tab. 5 v závislosti na počáteční teplotě (vodorovně) a řádu počtu iterací (svisle); v Tab. 6 v závislosti na hodnotě parametru SEED (startovací hodnota sekvence pseudonáhodně generovaných čísel; vodorovně) a řádu počtu iterací (svisle). Tabulky

obsahují i průměrné optimální vzdálenosti (\emptyset) a průměrné absolutní odchylky (σ). Tabulky jsou vždy zvlášť pro exponenciální (Exp) a lineární (Lin) pokles teploty.

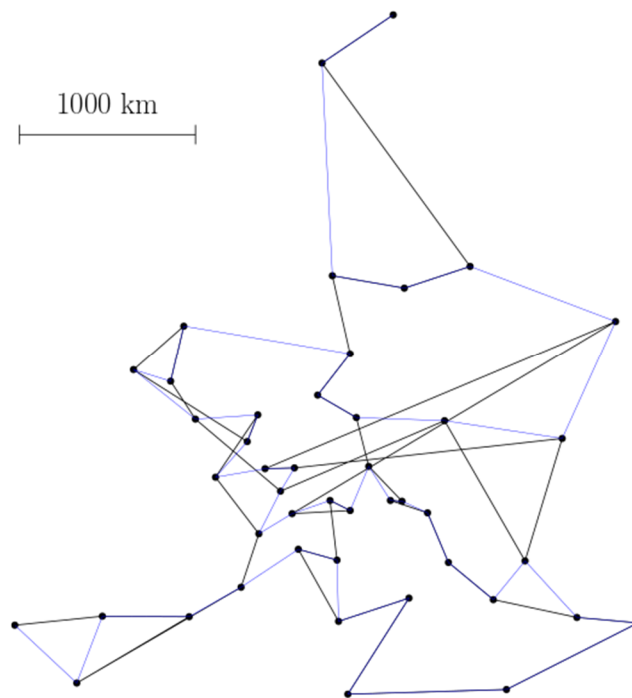
Tab. 5 – Optimální vzdálenosti pro různé počáteční hodnoty teploty a řády počtu iterací

Exp	0.1	1	5	10	50	100	500	1000	\emptyset	σ
3	63599	44225	43778	42580	47373	43111	43770	46660	46887	4300
4	63599	35968	35403	36682	37668	40212	36563	41637	40967	5826
5	34278	38222	38557	34278	33610	37330	35180	39517	36372	2035
6	38912	35892	35559	33668	35559	38912	35892	35559	36244	1334
Lin	0.1	1	5	10	50	100	500	1000	\emptyset	σ
3	63599	49691	56409	63494	ERR	ERR	ERR	ERR	58298	5248
4	63599	35818	39703	49691	56409	63599	ERR	ERR	51470	9733
5	78595	37522	40870	35818	39703	45432	57134	63317	49799	12412
6	78595	35559	35559	35815	36239	35818	40657	40764	42376	9055

Tab. 6 – Optimální vzdálenosti pro různé počáteční hodnoty SEED a řády počtu iterací

Exp	0	1	5	10	50	100	500	1000	\emptyset	σ
3	39544	39009	39315	40824	38577	42079	42890	36130	39796	1601
4	30663	33507	26551	29417	33686	30116	31876	31343	30895	1708
5	27146	26944	27969	30623	29658	27899	27421	28596	28282	1008
6	26534	25932	29001	27070	26157	28419	27805	26466	27173	927
7	26528	25460	26452	25361	24428	26454	29066	27468	26402	989
8	25934	24786	24557	26812	25545	26471	28403	25428	25992	928
9	33664	33617	31528	31320	26114	29320	27255	30521	30417	2141
Lin	0	1	5	10	50	100	500	1000	\emptyset	σ
3	48024	54057	48038	49988	53922	53167	42890	51830	50240	3005
4	40581	38116	36496	37282	35368	40152	37476	36299	37721	1421
5	29916	29618	29475	31216	29126	29384	28417	30391	29693	611
6	27273	27171	25851	28421	26072	26830	27566	27584	27096	634
7	26904	25917	25618	25798	25442	26152	26941	26758	26191	507
8	25191	24922	25343	26162	24741	26373	24504	25713	25369	536
9	24360	24074	24881	25577	25071	24558	24924	25811	24907	439

Řešení získané optimalizačním modelem resp. simulovaným žháním je 33,61 km (Tab. 5) resp. 24,07 km (Tab. 6). Nalezená řešení jsou graficky znázorněna na Obr. 5, černě pro optimalizační model a modře pro metodu simulovaného žhání.



Obr. 5 – Nalezené trajektorie pomocí optimalizačního modelu (černě) a simulovaného žíhání (modře)

Podle dosažených výsledků algoritmus simulovaného žíhání poskytuje lepší výsledky než kvazigradienní sestup optimalizačního modelu. Trajektorie kvazigradienního sestupu optimalizačního modelu, na rozdíl od algoritmu simulovaného žíhání, během experimentu zřejmě většinou nepřekročila oblast hlubšího lokálního minima, v kterém uvázla.

3.5 Diskuse praktické implementace

V praxi provozovatele elektrizační soustavy se vyskytuje celá řada problémů, při kterých je nutné respektovat vzájemnou geografickou polohu. Může se jednat o údržbové práce, např. na podpěrných bodech, spínacích prvcích, trafostanicích. Další oblastí mohou být např. odečty měření nebo jednání s odběrateli. Oblast potenciálního využití je tedy široká.

Navržený algoritmus prozatím neuvažuje podrobnější omezení, předpokládá se tedy jednoduchá přímá vazba mezi jednotlivými objekty. S výhodou proto lze metodu využít pro optimalizaci údržby za pomoci dronů či pilotního monitorování. U venkovních vedení jsou dány geografické souřadnice jednotlivých bodů (provozovatelé soustav je mají zaznamenány v GIS, resp. v rámci interních systémů mají i informace o GPS souřadnicích) a při bezpilotním monitorování není nutné uvažovat vliv dopravní situace na pozemních komunikacích. Taková úloha je proto ekvivalentní k prezentované úloze vybraných měst.

Údržba, inspekce a revize elektrických zařízení, odečet měření a související činnosti jsou plánovány předem, nejeví se tedy vhodné připravovat implementaci algoritmu pro použití v reálném čase (online). Za tímto účelem by bylo vhodné aplikaci doplnit o načítání dat třetích stran, např. o aktuální dopravní situaci nebo dopravních omezeních.

4 Vyhodnocení stavu energetického zařízení

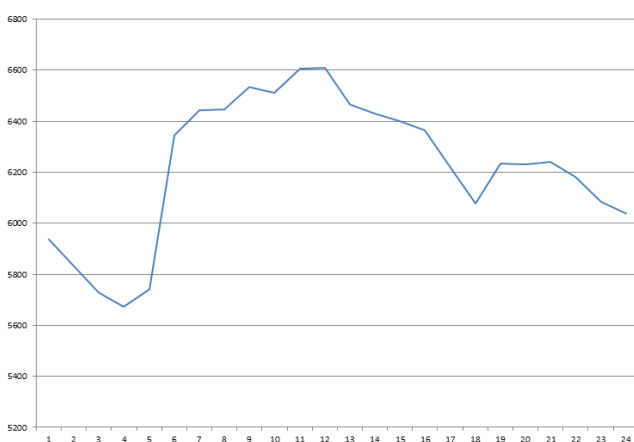
4.1 Úvod, motivace

Klíčovými slovy v oblasti elektroenergetiky jsou bezpečnost a spolehlivost. Vzhledem k již zmíněné narůstající spotřebě elektřiny, a tím pádem k potřebě zajistit dodávku elektřiny k odběratelům, je nezbytné dbát na spolehlivost provozu elektrizační soustavy. Jedním z aspektů je také spolehlivost různých prvků elektrizační soustavy, které by měly vykazovat bezproblémový chod, resp. mělo by vždy dojít ke včasnému zásahu (např. opravě nebo výměně) tak, aby nebyla ohrožena dodávka k odběratelům.

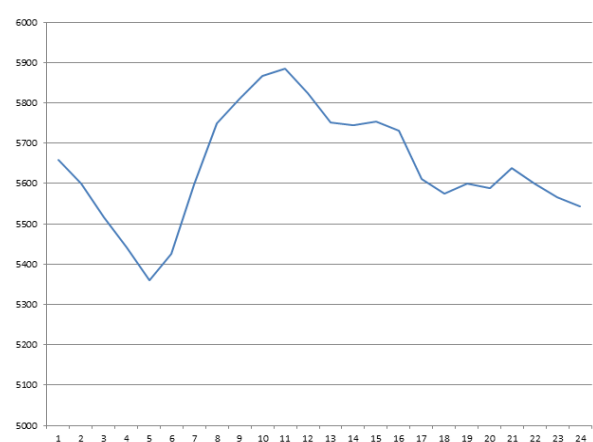
Pro vyhodnocování stavu jednotlivých zařízení lze používat monitoring fyzikálních veličin, ať už elektrických (např. proud, napětí, výkon) nebo neelektrických (např. teplota, tlak). Pro vyhodnocování stavu zařízení je potřebné, aby se jednalo o pravidelné měření – může být kontinuální i diskrétní (v předem daných pevných intervalech). Na základě vývoje daného parametru tak lze včas diagnostikovat stav vybraného zařízení, což poslouží k provedení nezbytných akcí (údržba, výměna apod.), což ve finále povede ke zvýšení spolehlivosti distribuce elektřiny.

4.2 Popis testovacího případu

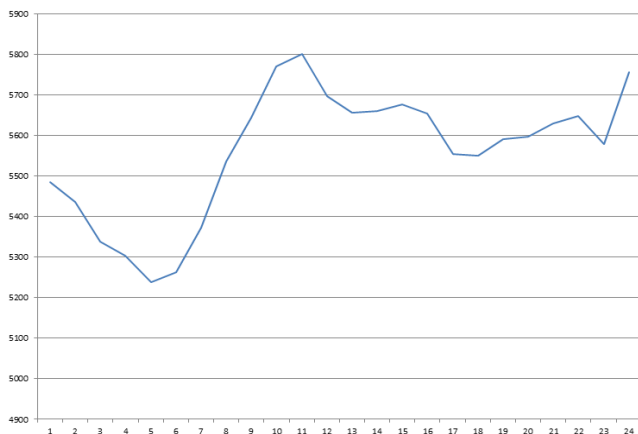
Cílem testovacího případu je správně identifikovat stav vybraného elektrického zařízení, a to na základě monitorování vybraného parametru. Stav zařízení byl dle změn vybraného parametru během každého dne sledovaného období kategorizován do tří kategorií – normální stav, výstražný stav a havarijní stav. Sledované období lze rozdělit do sedmi částí. V prvních pěti částech byl stav zařízení normální, v předposlední části přešel do výstražného stavu a v poslední do havarijního stavu. Střední průběhy parametru sledovaného během dne pro každý stav zařízení jsou uvedeny na *Obr. 6*, *Obr. 7* a *Obr. 8*.



Obr. 6 – Střední průběh parametru normálního stavu



Obr. 7 – Střední průběh parametru výstražného stavu



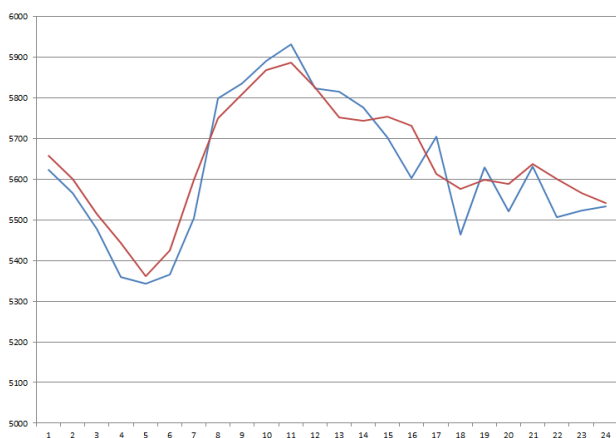
Obr. 8 – Střední průběh parametru havarijního stavu

4.3 Popis použitých algoritmů

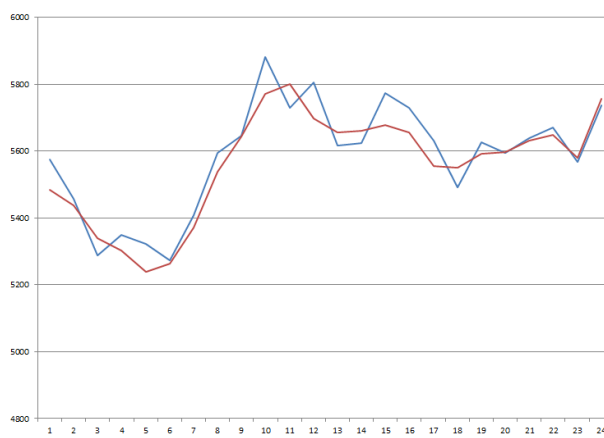
Pro diagnostiku stavu zařízení byla použita neuronová síť o 8 vrstvách 24 neuronů schopná identifikovat stav zařízení na základě měření z předchozího dne. Učící parametry byly nastaveny na hodnoty rychlost učení: 0.010, moment setrvačnosti gradientu: 0.7 a zrychlení učení: 1. Učení proběhlo v limitu iterací 500 s požadovanou absolutní, resp. relativní přesností 0.1. Učení proběhlo nejdříve bez předučení vah a poté s předučením (hluboké učení) prvních šesti vrstev vah. K dosažení požadované přesnosti bylo zapotřebí při běžném učení 479 iterací a při hlubokém učení 116 iterací, tj. hluboké učení trvalo cca pětkrát kratší dobu.

4.4 Testování, vyhodnocení výsledků

Neuronová síť byla schopna identifikovat normální stavy zařízení s pravděpodobností 99-100 %, tj. téměř absolutně spolehlivě. Výstražné a havarijní stavy detekovala síť se sníženou spolehlivostí. V maximální míře atypický výstražný stav (viz Obr. 9) detekovala síť s pravděpodobností 84 %; v maximální míře atypický havarijní stav (viz Obr. 10) detekovala síť s pravděpodobností 87 %.



Obr. 9 – Střední (červená) vs. atypický (modrá) průběh parametru výstražného stavu



Obr. 10 – Střední (červená) vs. atypický (modrá) průběh parametru havarijního stavu

4.5 Diskuse praktické implementace

V praxi provozovatele elektrizační soustavy je spravováno velké množství zařízení, a to jak zařízení elektrická (vodiče venkovního vedení, transformátory aj.), tak např. i různá konstrukční zařízení (stožáry, konzoly, objekty trafostanic aj.).

Pro popsanou diagnostickou metodu stanovení stavu zařízení je nutné správně vybrat vyhodnocovanou veličinu. Může jít např. o hodnotu ztrátového činitele při hodnocení izolace kabelů nebo unikající proud u elektrických zařízení. Problémem může být kontinuální vyhodnocování takovéto veličiny, které by neuronové síť umožnilo správné vyhodnocování stavu zařízení. Bude-li měření vhodné veličiny nasazeno, je třeba řešit i otázku zpracování dat – pokud má algoritmus pracovat v rámci řídicího systému, musí být měření telemetrováno. Aplikace má potenciál využití v reálném čase, pro tento účel však musí být zajištěno správné předávání vyhodnocovaných dat.

5 Frekvenční odlehčování

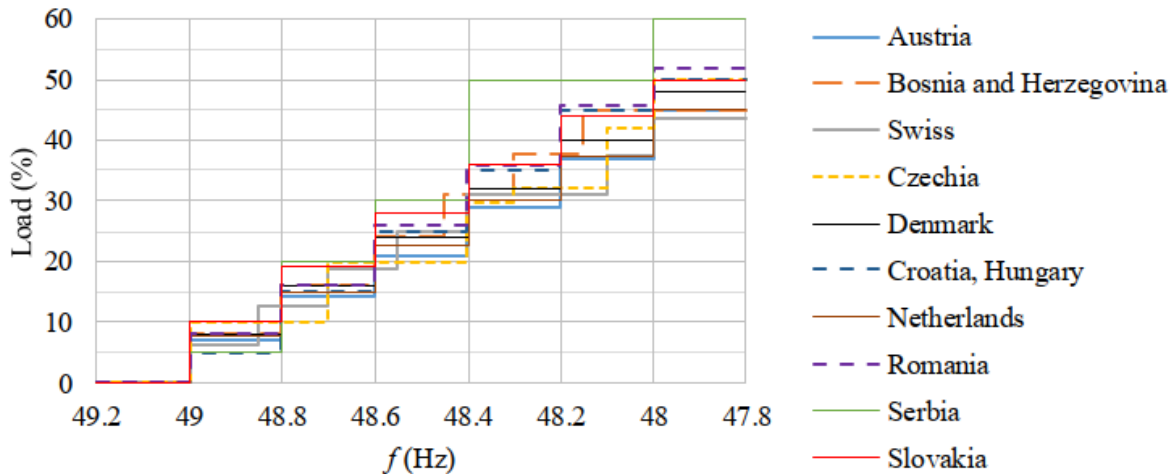
5.1 Úvod, motivace

Frekvenční odlehčování je opatření plánu obrany soustavy před šířením systémových poruch. Jeho princip spočívá v odpínání definovaného množství zatížení při poklesu frekvence pod stanovenou hodnotu. Cílem opatření je tak odvrátit hrozící blackout (rozpad) elektrizační soustavy, spojený s velkými ekonomickými škodami.

Proces automatického frekvenčního odlehčování v Evropě legislativně upravuje Nařízení Evropské komise 2017/2196 [8], konkrétně ustanovení o podmínkách frekvenčního odlehčování nabylo účinnosti na konci roku 2022. Od té doby musí schémata jednotlivých provozovatelů soustav v Kontinentální Evropě respektovat následující pravidla:

- počáteční povinná úroveň pro odpojení zátěže: 49 Hz,
- objem zátěže, který má odpojen v počátečním stupni: 5 %,
- konečná povinná úroveň pro odpojení zátěže: 48 Hz,
- kumulativní zátěž, která má být odpojena (součet všech stupňů): 45 %
- dovolená tolerance: ± 7 %
- minimální počet stupňů: 6
- maximální objem zatížení pro jeden stupeň: 10 %.

Příklad schémat frekvenčního odlehčování u různých provozovatelů přenosových sítí v Evropě udává Obr. 11.



Obr. 11 – Nastavení systému frekvenčního odlehčování – kumulativní odpínané zatížení u vybraných provozovatelů přenosových soustav v Evropě

Byť jsou podmínky pro nastavení systému frekvenčního odlehčování poměrně striktně dány Nařízením [8] (předchozí platná úprava v této oblasti byla volnější), stále je zde mnoho příležitostí, resp. otázek pro správné nastavení systému. Jedná se zejména o výběru zatížení k odpínání v jednotlivých stupních, zohlednění distribuované výroby, ale také např. množství použitých stupňů nebo doplňkových funkcí. Mezi takové funkce lze zařadit odpínání části zatížení na základě vyhodnocování derivace frekvence.

5.2 Používané algoritmy

Základní algoritmy využívané v oblasti frekvenčního odlehčování lze rozdělit do 3 skupin.

1. Konvenční algoritmy frekvenčního odlehčování

Konvenční algoritmy jsou založeny na vypínání definované zátěže na základě hodnoty frekvence. V zásadě tak respektují dříve uvedené legislativní požadavky. Jejich výhodou je poměrně jednoduchá implementace. Naopak zásadní nevýhodou je nepřizpůsobení množství odpínané zátěže – vždy je vypnut definovaný objem zatížení a může v důsledku jeho odepnutí dojít k nadfrekvenci s dalšími negativními důsledky na soustavu.

2. Adaptivní algoritmy frekvenčního odlehčování

Adaptivní algoritmy se snaží odstranit hlavní nevýhodu konvenčních postupů, kdy mají za úkol odpovídat množství zatížení přesněji odpovídající výkonovému deficitu. Algoritmy zpravidla vyhodnocují hodnotu derivace frekvence (RoCoF).

3. Algoritmy založené na umělé inteligenci

Motivace použití algoritmů založených na umělé inteligenci je nejčastěji stejná jako u adaptivních metod, a to přesněji stanovit odpínané množství zátěže. Dosud publikované studie mají společné to, že prezentované metody jsou aplikovány zejména v laboratorních podmínkách. Pro jejich nasazení do provozu skutečných sítí je třeba provést ještě další vývoj.

Dříve prezentované algoritmy hluboké neuronové sítě lze zařadit do třetí uvedené kategorie, resp. lze je použít pro řešení problematiky optimalizace množství odpínané zátěže.

5.3 Diskuse praktické implementace

Jednání vedená s potenciálními aplikačními partnery ukázala, že v současnosti má optimalizace procesu frekvenčního odlehčování mnoho překážek. Hlavním problémem v současnosti představuje nedostatečná datová základna informací o zatížení, což se potvrzuje i v rámci řešení projektu Národního centra kompetence II (projekt TN02000025).

Z diskuze se zahraničními odborníky (např. s prof. Rudezem z University of Ljubljana), kteří se problematice frekvenčního odlehčování profesně dlouhodobě věnují, vyplynulo, že nové přístupy v oblasti frekvenčního odlehčování (např. využití umělé inteligence, strojového učení) jsou zatím spíše teoretického charakteru. Praktická využitelnost přístupů je podmíněna jak samotným dlouhodobým pilotním ověřováním, tak i právě dostatečnou zdrojovou datovou základnou.

Využitelnost navrženého softwarového řešení pro oblast frekvenčního odlehčování se ukazuje být, kvůli výše uvedenému, momentálně technicky nekonceptní, jelikož dosahované výsledky musí být dávány do souvislosti se zaváděnými technickými předpoklady/zjednodušeními (vyplývají právě z nedostatečné datové základny), tudíž i směrodatnost dosahovaných výsledků může disponovat nižší technickou korektností.

Samotný softwarový vývoj každopádně poukázal na možná charakteristická data, která jsou zásadní směrem k tématice frekvenčního odlehčování. Jedná se zejména o přesná data z měření zatížení, která zároveň reflektují výkonové toky od vnořených zdrojů (distribuívané výroby).

6 SWOT analýza použití představených nástrojů umělé inteligence

	POZITIVA	NEGATIVA
VNITŘNÍ	<p>SILNÉ STRÁNKY (strengths)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Robustnost použitých algoritmů • Variabilita řešených problémů • Rychlost řešení • Jednoduché ovládání 	<p>SLABÉ STRÁNKY (weaknesses)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nutnost proškoleného uživatele při volbě parametrů sítě • Omezení vyplývající z volby použitých algoritmů • Nutnost zpracování (vyhodnocení) výstupů • Problém získávání a práce s daty • Problém zadávání omezení
VNĚJŠÍ	<p>PŘÍLEŽITOSTI (opportunities)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rozšíření použitých algoritmů • Rozšíření uživatelského rozhraní • Rozšíření použití pro další oblasti ze sektoru energetiky 	<p>HROZBY (threats)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Konzervativnost sektoru energetiky – neimplementace do praxe • Nevhodnost použití algoritmů pro dané činnosti • Objevení nových, účinnějších algoritmů – zastaralost řešení

Jednoznačnou předností navržených algoritmů je jejich široká využitelnost. Jejich použití však vyžaduje alespoň trochu školeného uživatele, který dokáže nastavit potřebné parametry prostředí a zadat požadovaná omezení tak, aby je algoritmus správně zohlednil při hledání optima. Do budoucna je možné zároveň algoritmy rozšiřovat, neboť sektor umělé inteligence prochází velkým vývojem. Největší hrozbu lze spatřovat v odmítnutí řešení sektorem energetiky, neboť jde o sektor velmi konzervativní. Při správné parametrizaci prostředí jsou však dosažené výsledky pádným argumentem pro aplikační využití, k čemuž přispívá také pronikání umělé inteligence do dalších oblastí lidské činnosti, mj. i v každodenním životě.

7 Zhodnocení, závěr

Genetické algoritmy jsou vhodné k použití pro optimalizaci činností v celé řadě lidských činností, energetický sektor nevyjímaje. Tato studie demonstrovala jejich použití pro 2 vybrané problémy, a to lokalizaci poruchy v rozvodně a optimalizaci údržbové trasy.

V rámci řešení projektu TK04020003 byly vyvinuty dva nástroje: Travelling Salesman Problem a Deep Neural Network.

Nástroj **Travelling Salesman Problem** je vhodný pro **činnosti** spojené s cestováním, **kdy optimální řešení vede ke snížení cestovních nákladů**. Mezi takové činnosti patří:

- údržba pomocí dronů,
- revize elektrických zařízení,
- odečty elektroměrů,
- konzultace u zákazníků.

Demonstrace nástroje byla provedena na případu revize elektrických zařízení (kapitola 3).

Nástroj **Deep Neural Network** je vhodný pro **činnosti spojené s optimalizací na základě měřených dat**, neboť obsahuje filtr pro odstranění šumu. Mezi takové činnosti patří:

- lokátor poruchy,
- určení typu poruchy,
- nastavení procesu frekvenčního odlehčování,
- prediktivní údržba a vyhodnocení stavu zařízení.

Demonstrace nástroje byla provedena na případu lokalizace poruchy (kapitola 2) a identifikace stavu energetického zařízení (kapitola 4).

Celkově nástroje **nabízejí široké množství uplatnění** v sektoru energetiky. Mohou tak mít velký význam, a to jak ekonomický (úspora nákladů, zejm. dopravních či na údržbu), tak společenský (snížení množství nedodané energie, snížení času přerušení distribuce, předcházení rizikům zranění díky plánování údržby).

Limitujícím aspektem je dostupnost potřebných dat. Data mohou být uložena v různých informačních a řídicích systémech provozovatelů soustav, kam jsou předávány systémy měření (SCADA) či různými dalšími způsoby. I v případě, že jsou potřebná data dostupná, je nutné je dále zpracovat pro aplikaci navržených algoritmů umělé inteligence. Algoritmus je nutné vždy přizpůsobit pro konkrétní případ, a to např. počty neuronů v jednotlivých vrstvách sítě. Poté musí být algoritmus trénován na množině tréninkových dat.

Pro použití genetických parametrů v reálném čase by bylo nutné zejména provést úpravy informačních a řídicích systémů. Dříve **uvedené problémy nevyžadují implementaci v reálném čase, neboť se jedná převážně o plánované činnosti.**

Sektor elektroenergetiky je obecně charakterizován jako konzervativní, zavádění inovací je tedy postupné. V současnosti postupně narůstá množství údajů dostupných z měření a monitorování sítě, což může mít pozitivní vliv na implementaci navržených řešení v budoucnosti.

Reference

- [1] RUSSELL, Stuart J.; NORVIG, Peter a DAVIS, Ernest. *Artificial intelligence: a modern approach*. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, c2010. ISBN 978-0-13-604259-4.
- [2] HELOŇA, Stanislav. Zastavené tramvaje, systémy i teplá voda. Olomoucko a Přerovsko postihl výpadek elektřiny. Online. *Hanácká Drbna*. 22. srpna 2023. Dostupné z: <https://hanacka.drbna.cz/zpravy/spolecnost/29386-zastavene-tramvaje-systemy-i-tepla-voda-olomoucko-a-prerovsko-postihl-vypadek-elekriny.html>. [cit. 2023-11-15].
- [3] VRLÁK, Marek. Skoro celý Karlovarský kraj se ocitl bez elektřiny. Příčinou byla porucha na rozvodně Vítkov. Online. *Česká televize*. 6. června 2023. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/regiony/3591459-skoro-cely-karlovarsky-kraj-se-ocitl-bez-elekriny-pricinou-byla-porucha-na-rozvodne>. [cit. 2023-11-15].
- [4] BLAŽKOVÁ, Magdaléna. Výpadky elektřiny okolo Brna: nehoda v sokolnické rozvodně, muž je vážně zraněný. Online. *Brněnský deník.cz* 31. října 2023. Dostupné z: https://brnensky.denik.cz/zpravy_region/vypadky-elekriny-uraz-pracovnik-rozvodny-sokolnice-pochybeni-trestny-cin.html. [cit. 2023-11-15].
- [5] ČEZ Distribuce. *Technická data*. Online. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/distribucni-soustava/technicka-data>. [cit. 2023-11-30].
- [6] EG.D. *Popis distribuční soustavy EG.D, a.s.* Online. Dostupné z: https://www.egd.cz/sites/default/files/2022-11/popis_distribucni_soustavy.pdf. [cit. 2023-11-30].
- [7] OTE. *Elektrizační soustava ČR*. Online. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/elektrizacni-soustava-cr.png>. [cit. 2023-11-30].
- [8] *Nařízení Komise (EU) 2017/2196 ze dne 24. listopadu 2017, kterým se stanoví kodex sítě pro obranu a obnovu elektrizační soustavy*. Online. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:32017R2196> [cit. 2023-11-30]