

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

Czech Technical University in Prague  
Faculty of Electrical Engineering

**Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.**

Prostředky inteligentních sítí v přenosovém systému

Intelligent Grid Approaches and Methods in Transmission Systems

## Summary

The thesis focuses on the issues of advanced methods to achieve security and reliability of electrical power systems, mainly focusing on transmission systems. Advanced principles and techniques in monitoring systems are discussed. The key part of the thesis deals with Smart Grids and WAMPaC systems (Wide Area Monitoring, Protection and Control) application possibilities.

Based on simulation outputs appropriate algorithms and their parameters were found to create the local automatics. The issue of local automatics functions is described using the general abstract layer model. One of the local automation principles is described in details - the Automatic Power System Stabilizer (PSS). Results indicate that simulated PSS in this case significantly increase the stability of the connected power plant. Due to the impedance characteristics and time constants in this case PSS does not influence the behavior of the sources under nearby fault conditions. In the final part of the thesis there are requirements on information and communication technologies which are analyzed and evaluated in the terms of transmission and distribution networks operation.

## Souhrn

Přednáška se zaměřuje na problematiku pokročilých metod pro dosažení bezpečnosti a spolehlivosti elektrizačních soustav s důrazem na přenosové sítě a prvky inteligentních sítí. Popsány a vysvětleny jsou principy moderních postupů při monitorování soustav, důraz je kladen na aplikační možnosti zařízení PMU (Phasor Measurement Unit) a jejich integraci do systémů WAMPaC (Wide Area Monitoring, Protection and Control). Klíčová část práce je zaměřena na inteligentní sítě a prvky a funkce Smart Grids.

Problematika lokálních automatických funkcí je popsána na obecném abstraktním modelu. Jedním z principů lokální automatizace je Power System Stabilizer (PSS). Simulovaná automatika v tomto případě významně zvyšuje stabilitu připojené elektrárny. Vzhledem k impedančním charakteristikám a časovým konstantám v tomto případě pochopitelně není příliš ovlivněno chování zdroje při blízkých zkratech. V závěrečné části práce jsou popsány a zhodnoceny informační a komunikační technologie využitelné pro dosažení jednotlivých funkcí přenosových a distribučních sítí.

## Klíčová slova

Bezpečnost a spolehlivost provozu, Elektrizační soustava, Synchrofázory, Lokální automatiky, Systémový stabilizátor, Smart Grids.

## Keywords

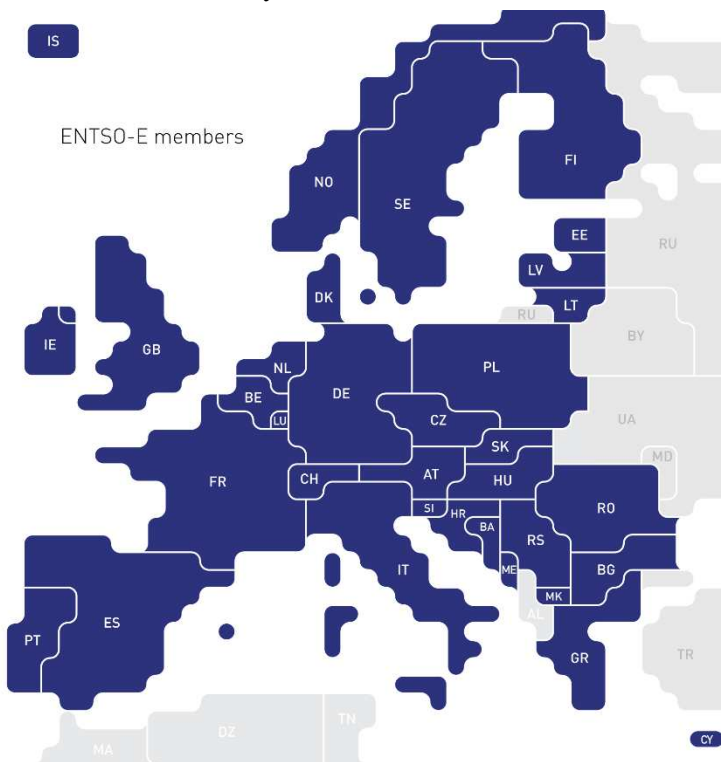
Power System Safety and Reliability, Synchrophasor measurement, Local Automation, Power System Stabilizer, Smart Grids.

# Obsah

1. Přenosové sítě .....	6
2. Systémy Wide Area Monitoring, Protection and Control (WAMPaC) .....	7
3. Inteligentní sítě – Trendy a technologie .....	10
4. Vliv na funkce distribučních sítí .....	15
5. Inteligentní sítě – Informační a komunikační technologie .....	18
6. Navazující výzkum .....	21
7. Reference .....	23
8. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D. ....	26

## 1. Přenosové sítě

Moderní elektrizační soustavy vybavené všemi běžnými ochrannými funkcemi byly v posledních letech zasaženy významnými poruchami [1]. Tyto události měly řadu průvodních jevů od oscilací frekvence až po rozpady soustav. Rozvoj a dynamika nasazování nových (zejména obnovitelných) zdrojů s sebou nese netradiční stavy soustavy ve srovnání s dřívějšími podmínkami. Komplexnost a rozsáhlost propojených systémů (viz Obr. 1) s sebou nese potřebu nasazení dalších prostředků pro monitorování stavu soustavy.



Obr. 1: Propojené soustavy v rámci sdružení ENTSO-E  
(Zdroj:ENTSO-E)

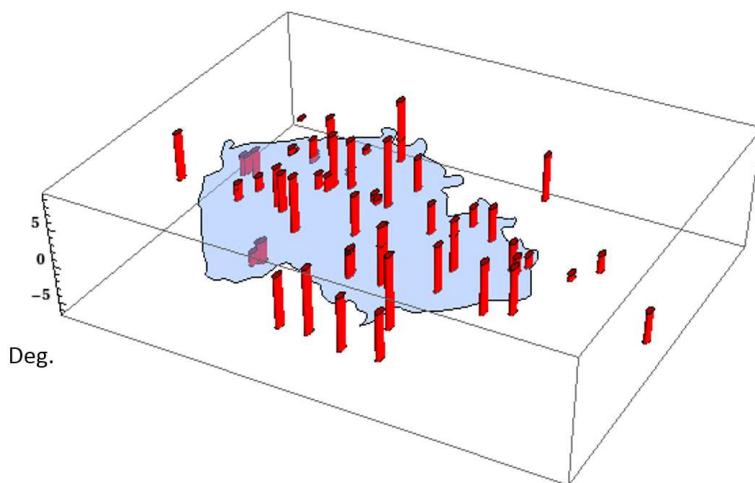
Aktuální trendy v oblasti přenosu a distribuce elektrické energie v konvergenci s rozvojem informačních a telekomunikačních technologií směřují k integraci technologií běžně používaných v oblasti IT do

energetiky [2]. Dochází tak k obohacování tradiční koncepce provozu sítí o nové, dosud nerealizovatelné, přístupy a možnosti. Přechod od tradiční koncepce sítí ke koncepcím WAMPaC a Smart Grids samozřejmě přináší i celou řadu negativních aspektů – spojení více technologií má významný vliv na spolehlivost a bezpečnost [3] – sítě jsou zpravidla provozovány blíže hranici stability, vyznačují se větší penetrací zdrojů energie atd.

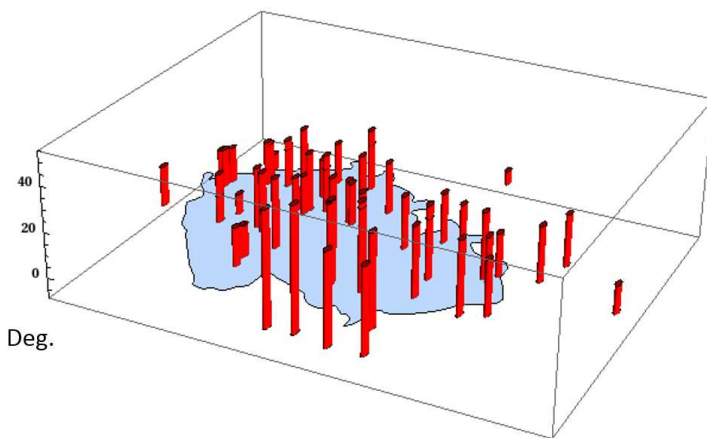
Nasazení nových technologií a koncepcí je v energetice tradičně více svázáno stávajícím stavem než v jiných rychle se vyvíjejících oborech (IT – Information Technology, CT – Communication Technology). Vzhledem k náročnosti výstavby sítí a zdrojů není možné v podmínkách vyspělých zemí postavit novou soustavu na „zelené louce“. Toto je způsobeno ekonomickou i právní náročností realizace těchto staveb. Nelze tedy předpokládat obdobně překotný rozvoj jako v oblasti komunikací. Při rozvoji nových konceptů a technologií v oblasti přenosu a distribuce se tedy zpravidla vychází ze stávajících topologií silových sítí; nové prvky se zpravidla nasazují do komunikačních a řídicích vrstev jako nadstavba stávající silové technologie.

## **2. Systémy Wide Area Monitoring, Protection and Control (WAMPaC)**

V oblasti přenosových soustav jsou nejvíce rozvíjeny technologie patřící do skupiny WAMPaC (Wide Area Monitoring, Protection and Control System). Nejvíce diskutovanou problematikou v této oblasti jsou tzv. synchrofázorová měření (PMU – Phasor Measurement Unit) [4]. Synchrofázorová měření jsou založena na měření fázorů veličin ve významných uzlech sítí, klíčové je doplnění těchto měření přesnými časovými značkami (v praxi se používá satelitní synchronizace či protokoly podobné NTP). V rámci Evropy jsou v realizaci jednotlivé pilotní projekty zaměřené zpravidla na jednu konkrétní problematiku. Jako klíčové pro provoz soustav v budoucnosti se jeví prohloubení vzájemné spolupráce provozovatelů soustav – úzké propojení soustav bude nutné realizovat nejen po silových vedeních, ale i po datových linkách s garantovanými parametry [5]. Příklady výstupu síťového modelu jsou uvedeny na obrázcích 2 a 3, Obr. 2 ukazuje simulaci sítě v běžném stavu bez přetoků energie, Obr. 3 ukazuje výstupy pro stav se zvýšeným severo-jížním přetokem.



*Obr. 2: Výsledky simulací fáze napětí v ES ČR*



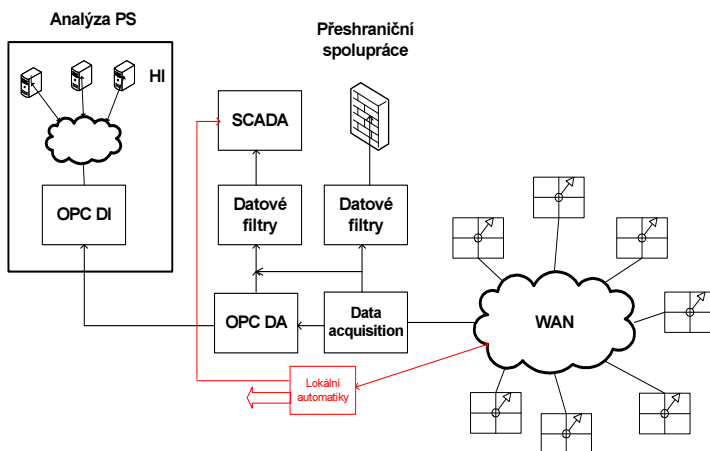
*Obr. 3: Výsledky simulací fáze napětí v ES ČR – stav se zvýšeným severo-jžním přetokem*

V oblasti distribučních soustav je současným trendem koncepce SmartGrids. SmartGrids je technologicky obdobou systémů WA



přenosových soustav [6]. Vývoj a implementace těchto technologií naráží nejvíce na ekonomické aspekty, investiční náročnost „upgrade“ stávající soustavy v současné době nejsou vyváženy přínosy. Vzhledem k počáteční fázi tohoto konceptu nejsou dosud k dispozici ani standardy pro jednotlivé prvky (ani silové, ani telekomunikační). Zejména z tohoto důvodu vzniká nepřehledné množství prvků s proprietárními vlastnostmi a protokoly [7]. Jednotlivé distribuční sítě tedy velmi často používají různé – vzájemně nekompatibilní – systémy a jejich propojení je přinejmenším obtížné.

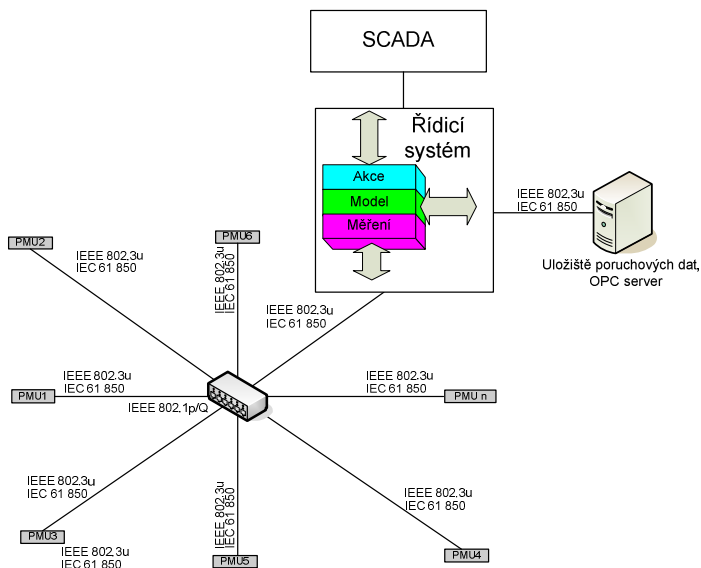
Výše zmiňované aspekty mohou v celé řadě případů zlepšit efektivitu, bezpečnost a stabilitu dodávek elektrické energie, mohou ovšem svou disfunkcí způsobit i kolaps [8]. Jedná se zejména o stavy související s výpadky měření a akčních členů, systémová selhání a v neposlední řadě i selhání lidská.



Obr. 4: Spolupráce lokální automatiky se systémem WAXS

Algoritmus lokálních automatik založených na PMU je vystavěn na matematickém modelu využívajícím ekvivalenty a skalární měření amplitud a úhlů napětí a proudů složených do vektorů časově posunutých o  $\square T_1$ , čímž získáme řadu vektorů. Matici vektorů vynásobíme její vlastní transponovanou maticí a určíme její vlastní čísla. Nedominantní vlastní čísla signalizují přítomnost mimořádných stavů. Automatika má k dispozici dvě sady vlastních čísel – výpočet z modelu a výpočet z měřených hodnot. Tím je dosaženo zvýšení spolehlivosti signalizace

mimořádných stavů. Topologii lokální automatiky postavené na infrastruktuře WAMPaC ukazují Obr. 4 a Obr. 5.



*Obr. 5: Logická topologie sítě pro lokální automatiku (využívá infrastrukturu WAMPaC)*

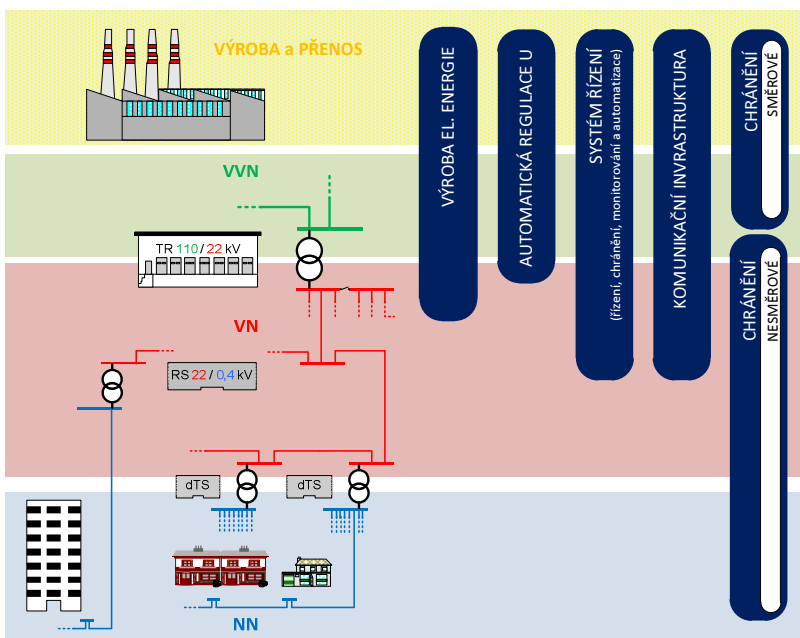
Bezpečnost a spolehlivost provozu elektrizační soustavy je třeba sledovat pomocí kritérií napěťové a přenosové stability (tj. kritérií modulů napětí, zátěžných úhlů a modulů frekvence) [8].

### 3. Inteligentní sítě – Trendy a technologie

V současné době je výkon z většiny výroben elektrické energie vyveden do sítě ZVN a VVN. Elektrizační síť na těchto napěťových hladinách je provozována jako smyčková, případně můstková, která je plně připravena na obousměrné toky elektrické energie. Základním typem chránění na napěťové úrovni 400 kV, 220 kV a 110 kV je směrové distanční chránění, které pro získání selektivity nevyžaduje v základní zóně časové zpoždění. Tyto sítě jsou plně telemechanizovány a vybaveny nezbytnými automatikami, jako jsou např. automatiky regulace napětí. Všechny rozvodny těchto napěťových úrovní jsou vybaveny nezbytnou technologickou komunikační infrastrukturou.

Distribuce na napěťové hladině VN a NN je v současné době víceméně pasivní. U této sítě se upřednostňuje provoz v tzv. normálovém zapojení. Většina změn zapojení se provádí ručně. Automatizační funkce se využívají jen velmi výjimečně. Síť VN a NN je navržena pro paprskový provoz, ve kterém se předpokládají jednosměrné toky elektrické energie. Základní typ chránění je realizován nadproudovou funkcí, která je nesměrová.

Informace z nižších úrovní distribuční sítě nejsou běžně přenášeny na energetický dispečink. Parametry elektrické energie na nižších úrovních se odvozují od měření v nadřazených rozvodnách, což je vzhledem k paprskovému provozu distribuční soustavy (DS) částečně možné a vyvídající.

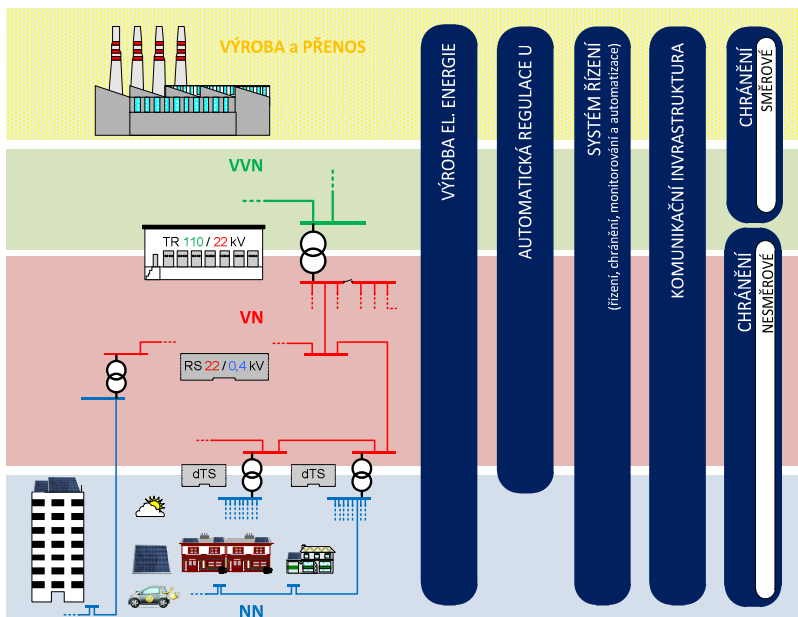


Obr. 6: Model stávajícího distribučního systému

Rozvoj decentralizované výroby povede ke strukturálním změnám distribuce elektrické energie zejména na napěťové hladině VN a NN. Základní a zásadní změnou oproti stávajícímu stavu bude to, že toky

výkonu v síti VN a NN se stanou obousměrné, což zcela změní provozní charakteristiky DS.

Pro udržení životaschopnosti distribuční sítě v nových podmínkách mluvíme o nezbytnosti implementace tzv. konceptu Smart Grid. Síť VN a NN splňující základní principy Smart Grid by se měly co nejvíce blížit svým zapojením uzlové síti.



Obr. 7: Model budoucího distribučního systému

Koncept Smart Grid je dále spojen zejména s rozvojem systémů monitorování, řízení, chránění a automatizace i pro nižší úroveň distribuční sítě. S rozvojem těchto systémů souvisí i zajištění nezbytné technologické komunikační infrastruktury. Nasazení této techniky je nezbytným předpokladem pro zajištění funkcionalit „inteligentní sítě“. Srovnání stávající a budoucí koncepce ilustrují Obr. 6 a Obr. 7.

Koncept Smart Grid je také charakteristickým rozdělením procesu řízení sítě na vrstvy. Významnou úlohu nadále bude mít proces centrálního řízení, který je v dnešní době plně uplatňován na napěťové úrovni VVN a části úrovně VN. Tento proces se dále rozšíří na nižší úrovně distribuční

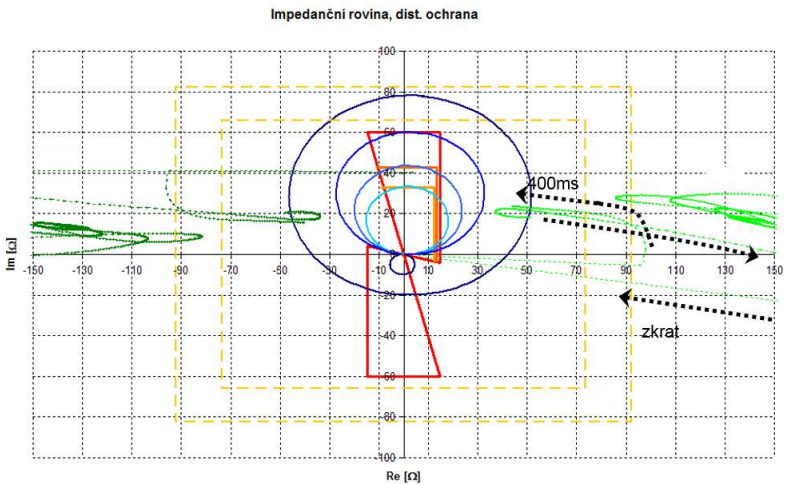
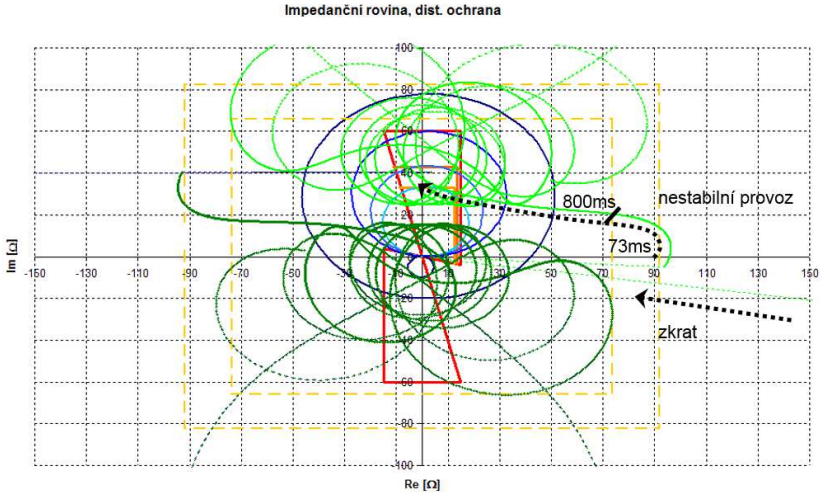
sítě. Do budoucna se dále stane nezbytným proces řízení na lokální úrovni, který bude zajišťovat následující funkcionalitu:

- regulace a stabilizace napětí
- bilanční automatika
- automatika self-healing
- automatika ostrovního provozu
- adaptabilní chránění oblasti
- monitoring elektrických i neelektrických veličin stanic a vývodů VN a NN
- předzpracování informací pro nadřazený systém

Jednou z uvedených automatik je i systémový stabilizátor (Power System Stabilizer – PSS) je fázově kompenzační zařízení regulátoru napětí, které má za úkol tlumení oscilací činného výkonu v rámci elektrizační soustavy. Tyto oscilace mohou způsobovat omezení přenosových schopností sítě nebo mohou mít negativní vliv na udržení bezpečného a stabilního provozu sítě. Oscilace lze rozdělit do tří základních skupin:

- Systémové oscilace (Inter-Area Oscillation) představují kývání velkých generátorických oblastí v elektrizační síti vůči sobě. Typicky se vyskytují v rozsahu frekvencí cca 0,1 – 0,7 Hz.
- Lokální oscilace (Local Mode Oscillation) představují kývání jednoho nebo více generátorů současně vůči síti. Frekvence oscilací jsou obvykle v pásmu 0,7 – 2 Hz. Tyto oscilace jsou nejvýraznější u generátorů vybavenými velmi rychlými budícími soupravami (High Initial Response Excitation System), která vytváří v rotoru generátoru značnou složku negativního tlumícího momentu.
- Oscilace v rámci jedné lokální generátorické oblasti (Inter-Unit Oscillation) vznikají při paralelní práci dvou nebo více strojů jedné elektrárny nebo v rámci blízkých elektráren. Frekvenční pásmo oscilací zde je 1,5–3 Hz.

Na obrázcích Obr. 8a) a Obr. 8b) jsou ukázány výstupy v impedanční rovině pro zkrat za stejných výchozích podmínek, varianta a) bez stabilizace, b) se stabilizací.



Obr. 8 a,b: Příklad výpočtu časových průběhů impedancí při zkratu (a) nestabilní, b) stabilní stav)

Charakteristickými novými trendy jsou VTE (větrné elektrárny) a FVE (fotovoltaické elektrárny) s významně rostoucí penetrací v síti. Tyto zdroje jsou charakteristické značnou proměnlivostí dodávaného výkonu do sítě v čase. Smart Grid umožňuje operativní řízení výkonové bilance na úrovni distribuční sítě. Smart Grid tímto umožňuje minimalizaci potřeby systémových služeb přenosové soustavy. To v důsledku vede i k minimalizaci ztrát v elektrizační soustavě.

Specifickou oblastí v prezentovaném schématu ES je odběratel. Řízení spotřeby u odběratele je zajištěno řešením tzv. konceptu Smart Metering. Konkrétně se jedná o vazbu mezi procesy řízení Smart Grid a Smart Metering.

#### **4. Vliv na funkce distribučních sítí**

Úkolem takto pojaté sítě je vytvořit podmínky pro činnost přenosu a distribuce elektrické energie v nových podmínkách, které jsou charakteristické řadou dále uvedených aspektů:

- vyšší míra uplatnění lokálních zdrojů elektrické energie
- jistá část lokálních zdrojů má charakter obnovitelných zdrojů (OZE)
- sítě se vyznačují velkou penetrací zdrojů i zátěží ovlivňujících kvalitu elektrické energie, tento aspekt vyvolává nutnost použít například:
  - v jednodušších aplikacích pasivní filtry
  - aktivní filtry s moderními řídicími strategiemi [9], [10]
  - hybridní filtry, případně kombinaci více technologií [11]
- vybrané části distribuční sítě je možné provozovat a řídit jako více méně autonomní oblasti [12]
- autonomie oblastí je chápána jako schopnost provozu a realizace úloh řízení s využitím komplexu všech instalovaných zařízení [13], která např. umožní:
  - automatickou rekonfiguraci sítě po poruše (self-healing aspekt)
  - v maximální míře vyrovnanou výkonovou a energetickou bilanci, zejména s ohledem na minimalizaci negativního působení na nadřazené úrovně sítě [14]
  - vyrovnané profily napětí při všech režimech provozu sítě [15]

- optimalizaci (minimalizaci) potřeby systémových služeb souvisejících s provozem lokálních zdrojů (vyrovnání potřeby systémových služeb na lokální úrovni)
- definování provozu oblasti v krizovém režimu, s omezením spotřeby/dodávky odběratelům na tzv. bezpečnostní minimum [16]
- umožnění ostrovního provozu oblasti s využitím pouze lokálních zdrojů elektrické energie [17]

Uvedené aspekty jsou pouze příkladem základních charakteristik konceptu Smart Grid. Níže rozpracovaná architektura je koncipována tak, aby vytvořila podmínky pro budoucí pokrytí celé škály aspektů rozvíjejícího se konceptu Smart Grid.

Struktura sítě je rozdělena do následujících vrstev:

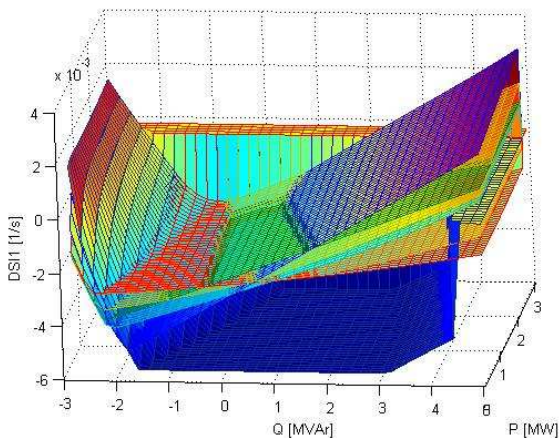
- **Model distribučního systému** – návrh topologie architektury dle vrstev (vč. změn v ICT, řízení DS, vazby na AMM – Automated Meter Management a stávající systémy)
- **Popis obecné struktury distribuční sítě**, včetně všech souvisejících částí, reprezentovaných výše zmíněnými vrstvami.
- **Funkce distribučního systému** – seznam funkcionalit – nutných změn v distribučním systému

Specifikace obvyklých funkcí [1] na všech úrovních distribučního systému se speciálním zaměřením:

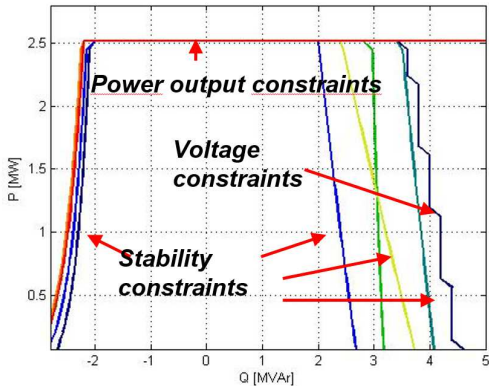
- Požadavky a parametry nových technologických prvků (komponent) dle vrstev distribučního systému pro zajištění požadované funkcionality Smart Grid
- Požadavky na chránění sítí
- Požadavky na řízení sítí a technologické vybavení v rámci ostrovního provozu [19]
- Požadavky na regulaci zdrojů

Příklady hodnocení požadavků na připojení zdrojů ukazují Obr. 9 a Obr. 10.





Obr. 9: Připojování obnovitelných zdrojů do distribuční soustavy – hodnocení připojitelnosti pomocí DSI (Indexy Dynamické Stability)



Obr. 10: Připojování obnovitelných zdrojů do distribuční soustavy – hodnocení připojitelnosti - řez

**Pro vyčlenění a řízení ostrovního provozu** jsou k dispozici následující prvky a technologie [20]:

- Vypínače v rozpadových místech s příslušnou telekomunikační

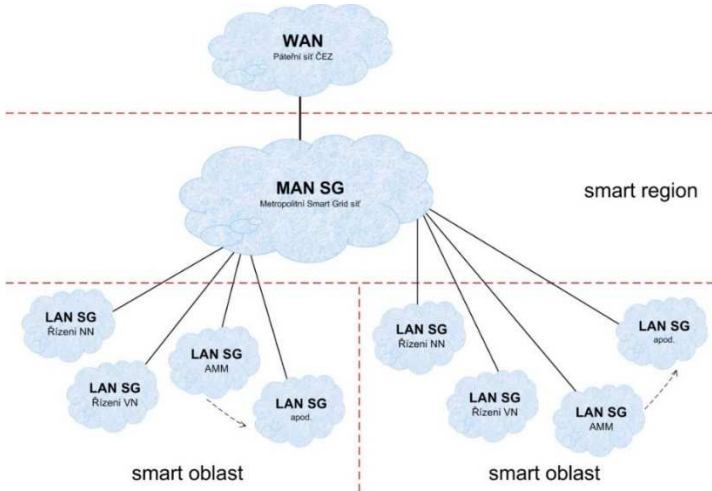
- infrastrukturou
- Synchronizace pro následné připojení ostrova k síti
- Automatizace NN vývodů pro řízení bilance
- Možnost přístupu do centrály AMM pro „pomalé řízení“

Další možností je rozšíření ostrova o další vybrané DTS, resp. vývody DTS. Pro realizaci této koncepce je nutné vybavit jednotlivé začleněné DTS:

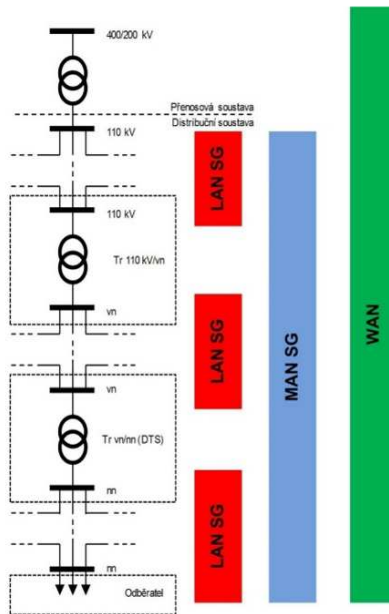
- Dálkově ovládaným vypínačem či odpojovačem na straně VN – možnost připnout nebo odepnout celou DTS
- Dálkově ovládaným vypínačem nebo odpojovačem na vývodech NN – možnost ovládání na úrovni vývodů DTS (např. vývod pro veřejné osvětlení, nemocnici nebo jinou obecně prospěšnou budovu)
- Oblast musí být ve všech situacích vybalancována, tj. některé jednotky pro měření fázorů (PMU) jsou považovány za jedny z nejvýznamnějších měřicích zařízení v elektroenergetických soustavách budoucnosti. Jejich výjimečnost spočívá ve schopnosti měřit, předávat a shromažďovat data o měřených fázorech napětí a proudu v různých místech elektrické sítě. Časová synchronizace je realizována s využitím systému GPS. Do budoucnosti se předpokládá využití časových průběhů, které lépe popisují dynamické chování systému, a moderními metodami lze identifikovat základní a přechodné složky. Využitím jenom fázorů se ztrácí podstatná část informací [21].

## **5. Inteligentní sítě – Informační a komunikační technologie**

Typické rozdělení komunikační infrastruktury do jednotlivých síťových segmentů je uvedeno na Obr. 11. WAN (Wide Area Network) síť zde zprostředkovává, mimo jiné, připojení k systému SCADA. K této páteřní síti je připojena MAN SG (Metropolitan Area Network Smart Grid) síť, která zajišťuje propojení jednotlivým LAN SG (Local Area Network Smart Grid), jež reprezentují jednotlivé lokální sítě Smart Grid architektury. MAN SG se typicky rozkládá na úrovni jednoho smart regionu (např. Vrchlabí), ke kterému jsou připojeny jednotlivé lokální sítě LAN SG rozkládající se na úrovni smart oblastí. Smart oblastí může být v rámci smart regionu několik.



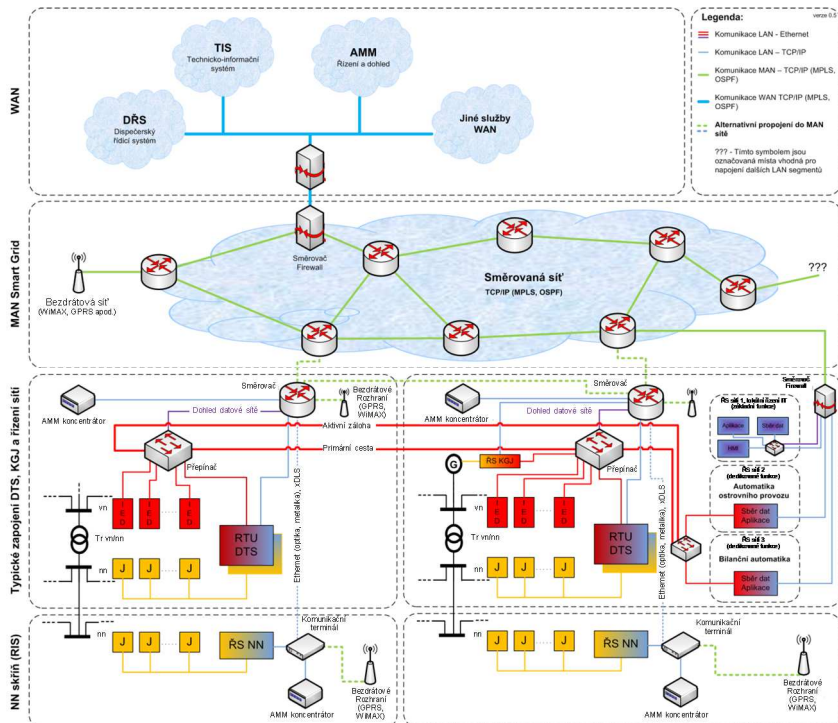
Obr. 11: Přehled jednotlivých segmentů komunikační infrastruktury



Obr. 12: Vazby mezi IT sítí a distribuční soustavou

Takto navržená hierarchická struktura datové sítě je velmi flexibilní a umožní snadné začlenění nových technologií a služeb. Díky jednoznačně definovaným rozhraním mezi jednotlivými segmenty (WAN, MAN, LAN) lze velmi efektivně navrhnout koncepci dané sítě a optimalizovat tak výběr vhodné přenosové technologie, a to s ohledem na technicko-provozní požadavky dané služby řízení, chránění, sběru dat apod. Tímto způsobem lze vybudovat datovou síť, v níž budou použity různorodé přenosové technologie, ale i tak bude možné garantovat požadované parametry jednotlivých služeb (odezva, pohotovost, přenosová rychlost apod.)

Z pohledu požadavků na komunikační infrastrukturu můžeme definovat úrovně a oblasti, které jsou znázorněny na Obr. 12 a Obr. 13.



Obrázek 13: Obecná topologie Smart Grid komunikační sítě

## 6. Navazující výzkum

V návaznosti na témata řešené v habilitační práci byly pod vedením Ing. Zdeňka Müllera, Ph.D. zahájeny dva navazující grantové projekty:

### **Projekt bezpečného zásobování oblasti „safety operation area“.**

Hlavním cílem projektu je vytvořit návrh architektury a technického řešení provozu vymezené části distribuční soustavy a navrhnout algoritmy pro detekci definovaných nebezpečných stavů soustavy a výběr optimálních akčních zásahů pro zachování bezpečného chodu distribuční soustavy ve spolupráci s vybranými zdroji energie. Prioritou technického řešení je vyčlenění vhodné části distribuční soustavy, která bude zahrnovat vhodný zdroj elektrické energie, vhodné transportní cesty pro zásobování oblasti/vybraných lokalit a vytipované objekty s požadavkem na prioritní zásobování. Navržené algoritmy budou pracovat se simulovanými či naměřenými hodnotami klíčových systémových elektrických veličin. Jejich cílem bude na základě vyhodnocení systémových veličin rozhodovat o stavu monitorované části distribuční soustavy a dle klasifikace těchto stavů rozhodnout, zda se soustava nachází v bezpečném stavu, či je třeba nějaký akční zásah, který povede k návratu soustavy ze stavu nebezpečného až kritického zpět do stavu bezpečného. Algoritmy budou pracovat s množinou potenciálních akčních zásahů, kterými mohou být dynamické a plynulé řízení výkonu dodávaného zdroji do DS, ovládání vypínacích prvků na vedeních DS (rekonfigurace pomocí vypínačů), komunikace s inteligentními komponenty soustavy (např. inteligentní budovy), či přímé řízení významných zátěží. V rámci řešení projektu rovněž vznikne studie analyzující požadavky na měřené veličiny (četnost, vzorkovací frekvence, přesnost, výběr veličin), přenosové technologie (odolnost vůči rušení, latence, ztrátovost dat, přenosová kapacita, charakter přístupu k médiu), požadavky na ovládání akčních členů (použitá rozhraní a protokoly) a na centrální řídicí jednotku pro dosažení „safety operation area“ při provozu distribučních sítí.

**V oblasti systémů WAMPaC jde o projekt SGS, který předpokládá vývoj algoritmů pro vytvoření lokálních automatik nad systémy synchrofázorových měření a systémy WAM (WAMPaC). Vstupem algoritmů budou mimo jiné i měřená data z vybraných uzlů. Na**

matematickém modelu budou ověřeny a optimalizovány uvedené algoritmy pro různé topologie sítí a charaktery jejich provozu. Při řešení projektu bude věnována pozornost i velmi perspektivní možnosti implementace algoritmů do tzv. vektorprocesorů. Na základě uvedených analýz budou stanoveny potřebné parametry datových linek (latence, přenosové rychlosti, EMC, množství přenášených dat, přípustná ztrátovost paketů, zálohování linek atd.).

Vývoj je předpokládán v několika etapách:

- 1) Studium struktur a ověření možností dílčích prvků zařízení PMU a systémů WAMS, analýza chování PMU v nestandardních a poruchových stavech.
- 2) Vývoj algoritmů pro spolehlivou činnost lokální automatiky a jejich otestování na modelech blízkých reálným sítím.
- 3) Návrh HW koncepce lokální automatiky a její implementace do reálného HW prostředí.

## 7. Reference

1. Tlustý, J., Kasembe, A., Müller, Z., Švec, J., Sýkora, T. et al.: The Monitoring of Power System Events on Transmission and Distribution Level by the use of Phasor Measurement Units (PMU). In 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Stevenage: IET Publishing Group, 2009, p. 1-4. ISBN 978-1-84919-125-8.
2. Jensen, M., Sel C., Franke, U., Holm, H., Nordström L.: Availability of a SCADA/OMS/DMS System – a Case Study. IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies Europe, October, 2010. – P. 1–8.
3. I.C. Decker, May 2004, "Synchronized Phasor Measurement System: Development and Applications", IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning SEPORE, Rio de Janeiro, Brazil
4. Tlustý, J., Müller, Z., Valouch, V.: Stability Control of Renewable Energy Sources in Distribution Systems. In 2010 IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel. Piscataway: IEEE, 2010, p. 1-5. ISBN 978-1-4244-8680-9.
5. Zhenyu Huang; Dagle, J.; SynchroPhasor measurements: System architecture and performance evaluation in supporting wide-area applications. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, 20-24 July 2008 Page(s):1 – 3. ISBN 978-1-4244-1906-7
6. Schweitzer, E.O.; Whitehead, D.E.; Real-world synchrophasor solutions. Protective Relay Engineers, 2009 62nd Annual Conference for, March 30 2009-April 2 2009 Page(s):536 – 547.
7. Kasembe, A., Müller, Z., Švec, J., Tlustý, J., Valouch, V.: Synchronous Phasors Monitoring System Application Possibilities. In 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel. Piscataway: IEEE, 2012, p. 1-3. ISBN 978-1-4673-4680-1.
8. Phadke, A.G.; Thorp, J.S.; Nuqui, R.F.; Zhou, M.; Recent developments in state estimation with phasor measurements. Power Systems Conference and Exposition, 2009. PES '09.

- IEEE/PES, 15-18 March 2009 Page(s):1 – 7.  
ISBN 978-1-4244-3811-2
9. Rafiei, S.M., Toliyat, H.A., Ghazi, R., Gopalarathnam, T.: An optimal and flexible control strategy for active filtering and power factor correction under nonsinusoidal line voltages, *IEEE Trans. Power Del.* 16 (2) (2001, April) 297–304. ISSN 0885-8977
  10. Singh, B., Verma, V.: Selective compensation of power-quality problems through active power filter by current decomposition, *IEEE Trans. Power Del.* 23 (2) (2008, April) 792–799. ISSN 0885-8977
  11. Jou, H.-L., Wu, J.Ch., Wu, K.-D., Huang, M.-S.: Control method for parallelconnected hybrid filters, *Electr. Power Syst. Res.* 76 (1-3) (2005, September) 121–126, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2005.05.003>. ISSN 0378-7796
  12. Bharat, B., Rodriguez G.: "Monitoring the Power Grid", *Transmission and Distribution World Magazine*, pp. 28 – 34, December 2004,
  13. Kůla, J., Linhart, T., Müller, Z., Švec, J., Tlustý, J. - et al.: Power Plant Operation in the Islanded Mode for Critical Infrastructure Supplying. In *CIREN 2013*. ISBN 978-80-905014-2-3.
  14. Venter, F.P., van Wyk, J.D., Schoemann, J.J.: A study of the effectivity of reducing the energy storage element in dynamic filters for compensation of non-active power, *Trans. SA IEE* (1994) 43–50.
  15. Shuai, Z., Luo, A., Zhu, W., Fan, R., Zhou, K.: Study on a novel hybrid active power filter applied to a high-voltage grid, *IEEE Trans. PD* 24 (4) (2009, October) 2344–2352. ISSN 0885-8977
  16. Müller, M., Müller, Z., Švec, J., Tlustý, J., Denemark, P.: New Trends Impacts on Distribution Grids. In *CIREN 2013*. Praha: CIREN, 2013. ISBN 978-80-905014-2-3.
  17. Müller, Z., Špetlík, J., Švec, J., Tlustý, J.: Stability of Operation with Small Hydropower Plants in Islanded Network. In 16. conference *CIREN*. Praha: CIREN, 2012, p. 1-8. ISBN 978-80-905014-1-6.



18. Mareček, P., Šrom, J., Švec, J., Müller, Z.: Impact of distributed sources on the currents in distribution networks. In Sborník ČK CIRED 2011., p. 1-13. ISBN 978-80-905014-0-9.
19. Švec, J., Tlustý, J., Müller, Z., Müller, M., Kasembe, A., et al.: Synchronous Phasors Monitoring System - Testing Project in the Czech Republic. In Proceedings of the 7th Annual CIGRÉ Canada Conference on Power Systems. Montreal: Cigre Canada, 2012, p. 1-8.
20. Phadke, A.G.; Kasztenny, B.; Synchronized Phasor and Frequency Measurement Under Transient Conditions. Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume 24, Issue 1, Jan. 2009 Page(s):89 – 95. ISSN 0885-8977

## **8. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.**

Nar. 12. června 1981

### **Vzdělání**

2012 - Ph.D. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, obor Elektroenergetika

2006 – Bc. ČVUT v Praze, Masarykův ústav vyšších studií, obor Inženýrská pedagogika

2006 Ing. - ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, obor Elektroenergetika

### **Zaměstnání**

2014 – dosud: zástupce vedoucího katedry elektroenergetiky

2008 – dosud: odborný asistent, ČVUT v Praze, FEL, Katedra elektroenergetiky

2007 – 2008: Technik ve výzkumu a vývoji, ČVUT v Praze, FEL, Katedra elektroenergetiky

### **Granty – aktivní účast na řešení**

- Local Automation in WAMPaC Systems
- Partnership in Nuclear Power Engineering of New Generation
- Research and Development of Effective CHP Generation
- CANUT
- Nonlinear Dynamic Loads Negative Effects Mitigation
- Distribution Systems with Dispersed Filters for Safety and Quality Increase

### **Granty – hlavní řešitel**

- Intelligent System for Safe and Reliable Electrical Energy Supply in a Region (2014-2017), 30,5 mil. CZK
- WAMPaC Systems with synchrophasor support (2014 - 2016), cca 2,5 mil. Kč

## **Vědecká činnost – Komerční projekty**

- Local automation in transmission systems (as a support technology for nuclear power plants)
- Smart Region Architecture
- Asset Management in transmission systems (5 projects in five different countries)
- AMM infrastructure application possibilities and AMM data processing (2 projects)
- WAMS applications in transmission systems
- Protection system optimization (2 projects)

## **Pedagogická činnost**

Výuka:

Aktivně od roku 2007. Přednášky a cvičení z předmětů:

- Aplikované počítačové prostředky (jen cvičení)
- Rozvod elektrické energie
- Matematické aplikace
- Řízení elektroenergetických soustav
- Elektrárny
- Elektrické zdroje a soustavy

Vedení bakalářských a diplomových prací (vybrané práce):

- Kalus Jaroslav: Aplikace ostrovního provozu na stávající objekt
- Patera Michal: Demand Side Management v prostředí distribučních sítí
- Prchlý Josef: Analýza možností technologie Smart Metering
- Sekera Tomáš: Studie realizace přenosu dat pomocí GSM, GPRS pro obchodní měření
- Synek Martin: Analýza účinníku v distribučních sítích
- Zídka Jan: Stabilita v elektrizačních soustavách

Vedení doktorandů:

- Školitel doktoranda Mgr. Ilya Vaitsekhovich
- Školitel doktorandky Ing. Lucie Vanišové
- Školitel – specialista Ing. Zuzana Pelánová
- Školitel – specialista Ing. Martin Kaňok

V letním semestru 2013/2014 výuka doktorandů na VUT v Brně, FEI, Ústav energetiky.

Výuka v rámci programu EUREM (European Energy Manager) pořádaném Česko-německo obchodní a průmyslovou komorou (akreditováno MŠMT a IHK Německo).

Člen komise pro státní závěrečné zkoušky v bakalářském a magisterském studiu, autor oponentních posudků.

### **Ocenění**

- Cena ČEZ za nejlepší dizertační práci (2012)
- IEEE Senior Member (od 2013)
- Future Energy Leader (World Energy Council, 2013)
- Outstanding Engineer Award 2015 (IEEE Power and Energy Society)

### **Publikační činnost**

21 citací ve WoS, h-index dle WoS: 3

Výběr publikací:

Tlustý, J. - Kasembe, A. - Müller, Z. - Švec, J. - Sýkora, T. - et al.: The Monitoring of Power System Events on Transmission and Distribution Level by the use of Phasor Measurement Units (PMU). In 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Stevenage: IET Publishing Group, 2009, p. 1-4. ISBN 978-1-84919-125-8. [6x citováno ve WoS]

Čepa, L. - Kocur, Z. - Müller, Z.: Migration of the IT Technologies to the Smart Grids. *Elektronika ir Elektrotechnika*. 2012, vol. 7, no. 123, p. 123-128. ISSN 1392-1215. [4x citováno ve WoS]

Švec, J. - Müller, Z. - Kasembe, A. - Tlustý, J. - Valouch, V.: Hybrid power filter for advanced power quality in industrial systems. *Electric Power Systems Research*. 2013, vol. 103, p. 157-167. ISSN 0378-7796. [3x citováno ve WoS]

Müller, Z. - Sýkora, T. - Švec, J. - Tlustý, J.: Transmission Lines Loading Control Using FACTS Systems. In *Proceedings of the 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2010*. Brno: Brno University of Technology, 2010, vol. 1, p. 75-82. ISBN 978-80-214-4094-4. [2x citováno ve WoS]

Müller, Z. - Švec, J. - Čerňan, M. - Kyncl, J.: The Use of Regression Methods for Measurement and Diagnostics in Electrical Power Engineering. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference EPE 2012*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012, p. 413-417. ISBN 978-80-214-4514-7. [2x citováno ve WoS]

Valouch, V. - Müller, Z. - Švec, J. - Tlustý, J.: Evaluation of IRP, FBD, SD, and Generalized Non-Active Power Theories. In *27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*. Piscataway: IEEE, 2012, p. 1-5. ISBN 978-1-4673-4680-1. [2x citováno ve WoS]

Mgaya, E. - Müller, Z. - Švec, J. - Tlustý, J.: Dynamic Behavior of the Distributed Generation Sources in Island Mode. In *Proceedings of the 8th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2007*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007, p. 179-185. ISBN 978-80-248-1391-2. [1x citováno ve WoS]

Müller, Z. - Sýkora, T. - Švec, J. - Tlustý, J.: Power Flow Control in ES using FACTS Systems. In *Fifth international scientific symposium ELEKTROENERGETIKA 2009*. Košice: TU Košice, FEI, 2009, p. 427-433. ISBN 978-80-553-0237-9. [1x citováno ve WoS]