

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

Ing. Marek Kopečka

DYNAMICKÉ MODELÝ VÝROBNÍCH MODULŮ

**DYNAMIC MODELS OF POWER-GENERATING
MODULES**

ZKRÁCENÁ VERZE Ph.D. THESIS

Obor: Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Školitel: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

BRNO 2021

KLÍČOVÁ SLOVA: RfG; PPDS; výrobní modul; simulace souladu; MAS; model synchronního výrobního modulu (SVM); model nesynchronního výrobního modulu (NVM); model agenta; PSCAD

KEY WORDS: RfG; DSC; power-generating module; compliance simulations; MAS; synchronous power-generating module model; power park module model; agent model; PSCAD

OBSAH

1 ÚVOD	5
2 ZDROJE V ES	5
2.1 POŽADAVKY NA ZDROJE	6
2.1.1 ZKOUŠKY A SIMULACE SOULADU PODLE RFG	6
2.2 POŽADAVKY NA MODEL Y VÝROBNÍCH MODULŮ	7
2.2.1 ROZDÍLY MEZI IBG A SG	8
2.2.2 ŘÍZENÍ ZDROJŮ	8
3 MULTIAGENTNÍ SYSTÉMY	10
3.1 MOŽNOSTI MAS V ES	11
4 MODELOVÁNÍ A SIMULACE	11
4.1 TYPY MODELŮ VM	12
4.2 STÁVAJÍCÍ MODEL Y PRVKŮ SÍTÍ	13
4.3 PSCAD	14
5 DOSAVADNÍ VÝVOJ A SOUČASNÝ STAV	14
5.1 VLASTNOSTI ZDROJŮ	14
5.2 OSTROVNÍ PROVOZ	15
5.3 MULTI-AGENT SYSTEMS – MULTIAGENTNÍ SYSTÉMY	15
5.4 MODELOVÁNÍ A SIMULACE	15
5.4.1 MODEL Y VM	16
5.5 SHRUTÍ KAPITOLY	17
6 CÍLE PRÁCE	17
6.1 POŽADAVKY NA GENERÁTORY (RFG)	18
6.2 POŽADAVKY NA VLASTNOSTI ZDROJŮ	18
6.3 OSTROVNÍ PROVOZY A RESYNCHRONIZACE	18
6.4 MULTIAGENTNÍ SYSTÉMY	18
6.5 OBECNĚ POŽADOVANÉ VLASTNOSTI A FUNKCE	18
7 POŽADOVANÉ MODEL Y (CHARAKTERISTIKA A VLASTNOSTI)	19
7.1 POŽADAVKY NA MODEL VM A JEHO ARCHITEKTURA	20
7.2 POŽADAVKY NA MODEL AGENTA A JEHO ARCHITEKTURA	21
7.3 POŽADAVKY NA MODEL SÍTĚ	22
7.4 OSTATNÍ MODEL Y	23
8 MODEL Y PRVKŮ SÍTÍ (FUNKCE A NASTAVENÍ)	23
9 SIMULACE PRO VALIDACI MODELŮ	23
9.1 PŘÍKLAD SIMULACE OVĚŘENÍ SOULADU S RFG	24
9.2 PŘÍKLAD SIMULACE KOORDINACE MAS	25

10 ZÁVĚR	27
10.1 SPLNĚNÍ CÍLŮ PRÁCE	27
10.2 SHRUTÍ POZNATKŮ A PŘÍNOSŮ PRÁCE	27
10.3 VÝZNAM A VYUŽITÍ DOSAŽENÉHO STAVU PRÁCE	29
10.4 DALŠÍ POSTUP	29
POUŽITÁ LITERATURA	31
PUBLIKACE AUTORA	34

1 ÚVOD

Současné tempo implementace distribuovaných zdrojů přináší otázky ohledně funkčních schopností těchto výroben, jejich vazby a vlivu na síť a jejich chování a odezvy při různých stavech a dějích v síti. Pohledem z druhé strany (ze strany sítě) pak dochází ke změnám stability a dynamických výkonových charakteristik energetického systému (s dopady na systémy elektrických ochran sítě a různé další aspekty kvality elektrické energie). Tím roste poptávka po prostředcích, které by dokázaly správně interpretovat různé charakteristiky, chování a nastavení různých typů zdrojů atd. S ohledem na dynamiku elektroenergetických systémů má uplatnění počítačových simulací v době, kdy existuje dostatečný fyzikální popis dějů probíhajících v reálném provozu sítě, obrovský potenciál.

V praxi však chybí dostatečně ověřené a robustní modely pro potřeby dynamických simulací, které by dokázaly co nejpřesněji interpretovat chování skutečných zdrojů a se kterými by bylo možné zkoumat různé děje a chování systému jako takového. Toto není jediný důvod potřeby kvalitních modelů zdrojů a dalších prvků ES. Ruku v ruce s implementací jdou také legislativní požadavky na nově instalované zdroje. Na základě mnoha studií a hodnocení reálných provozů jsou stanovovány různé legislativní požadavky na nové i současné zdroje. Zde se opět nabízí možnost využití modelů. Nařízení Komise (EU) 2016/631 (dále jen RfG – Requirements for Generators) [1] dokonce pracuje s úvahou existence modelů zdrojů elektrické energie jako prostředku pro ověřování vlastností nově instalovaných zdrojů. S tím do velké míry souvisí jedna z nejzávažnějších výzev měnící se struktury ES – problémy, které sebou přináší zvyšující se podíl zdrojů dodávajících výkon do sítě skrze výkonové měniče, které jsou právě vazbou mezi zdrojem a sítí u fotovoltaických zdrojů, některých typů větrných elektráren, dalších malých zdrojů, bateriových systémů atd.

Možnosti současného stavu technologií přináší také řadu možností jejich využití v elektroenergetice. Schopnosti komunikace mezi prvky elektrizační soustavy spolu s možností aplikace prvků inteligence, skrze algoritmy procesních jednotek příslušících daným zařízením, přináší široké možnosti uplatnění v rámci tzv. multiagentních systémů (MAS; Multi-Agent System).

2 ZDROJE V ES

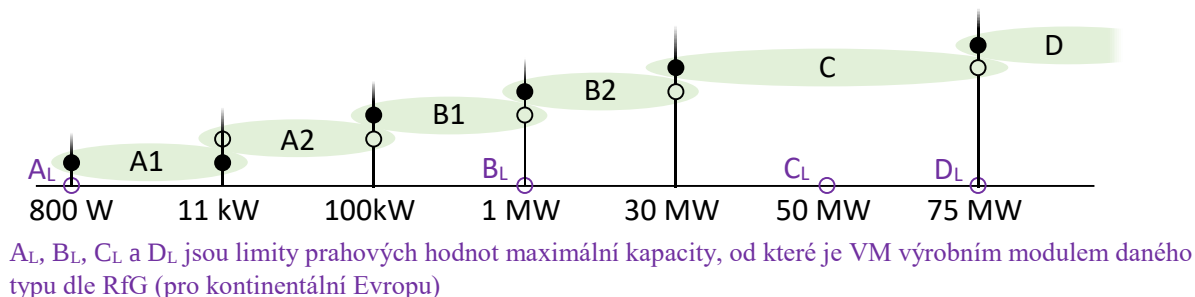
Zdroje v ES lze rozdělovat podle různých kritérií. S odkazem na návaznosti praktické části této práce lze zdroje rozdělit na synchronní generátory (SG – *Synchronous Generators*) a měničové zdroje (IBG – *Inverter-Based Generators*). Paralelně k těmto pojmům jsou v práci používány pojmy *synchronní výrobní modul (SVM)* a *nesynchronní výrobní modul (NVM)*. SVM je dle RfG [1] nedělitelný soubor zařízení, který je schopen vyrábět elektrickou energii tak, že frekvence vyrobeného napětí, rychlost generátoru a frekvence napětí v síti jsou ve stálém poměru, a tedy v synchronismu. Tuto definici splňují právě SG. NVM je dle RfG [1] blok nebo soubor bloků vyrábějící elektrickou energii, který je nesynchronně připojen k soustavě, nebo je připojen prostřednictvím výkonové elektroniky, a který je k přenosové soustavě, k distribuční soustavě včetně uzavřené distribuční soustavy, nebo k vysokonapěťové stejnosměrné soustavě připojen v jediném místě připojení. Tuto definici splňují právě IBG.

Požadavky popisované v dalších podkapitolách mají zaměření převážně na řízení VM. Ostatní aspekty jako např. komunikace, ochrany a měření jsou popsány v plném znění pojednávané dizertační práce.

2.1 Požadavky na zdroje

Informace, se kterými je nutné v rámci návrhu a tvorby modelů VM pracovat jsou RfG [1], PPDS – Příloha 4 [2], ČSN EN 50549-1 [3], ČSN EN 50549-2 [4], Kodex PS – část 1 [5] a Metodika ověření souladu s požadavky RfG [6].

RfG v článku 5 definuje kategorizaci zdrojů do čtyř skupin (A, B, C a D) – tzv. typy výrobních modulů (VM), které jsou svou velikostí již považovány za významné, a pro které dále definuje požadavky. PPDS v příloze 4 tuto kategorizaci upřesňuje v návaznosti na požadavky české legislativy, zejména s vazbou na Energetický zákon [7] a Vyhlášku č. 79/2010 [8]. Na obr. 2-1 je zobrazeno rozdělení typů VM platných podle českých požadavků.



obr. 2-1: Typy výrobních modulů dle PPDS

PPDS dále uvádějí požadavky na jednotlivé typy VM. PPDS se také v tomto odkazují na normy ČSN EN 50438 [9], ČSN EN 50549-1 [3] a ČSN EN 50549-2 [4], které je také nutné vzít v úvahu při definování požadavků na VM. (ČSN EN 50438 uvádí požadavky na paralelní připojení mikrogenerátorů s veřejnými distribučními sítěmi nízkého napětí; ČSN EN 50549 ve svých dvou částech definuje požadavky na paralelně připojené výrobní s distribučními soustavami nn (část 1), resp. vn (část 2) pro VM typů A a B.)

2.1.1 Zkoušky a simulace souladu podle RfG

V následující tab. 2-1 jsou uvedeny typy zkoušek, které musí vlastníci VM dle RfG vykonat. Informace v tab. 2-1 uvádí, které parametry a funkce musí být vyhodnocovány a testovány, ne jejich konkrétní meze či hodnoty. Indexy „S“ a „N“ ve sloupcích odstavce a typu VM značí, pro který typ VM daný požadavek platí – S pro SVM, N pro NVM. V posledním sloupci je uveden článek a odstavec, dle kterého je požadován soulad. U některých typů zkoušek existuje pro vlastníka VM možnost pro prokázání souladu s příslušným požadavkem použít certifikáty zařízení vydané certifikátorem. Tato možnost není u příslušných zkoušek v této práci uvedena z důvodu irelevantnosti k tématu práce.

Kromě zaměření práce na funkce a vlastnosti VM ověřované simulacemi souladu dle Metodiky ověření souladu s požadavky RfG ([6]) jsou samozřejmě v modelech VM zakomponovány i další funkce, jako jsou např. regulace činného výkonu, jalového výkonu, účinníku, velikosti napětí a U/f regulace ad.

tab. 2-1: Přehled zkoušek souladu dle RfG

název požadavku (zkoušky/simulace)	anglický název	článek.odstavec	pro typ VM	soulad s čl.ods. pís.
odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci	LFSM-O response	44.2 _S , 51.2 _S 47.2 _N , 54.2 _N	B _S C _S D _S B _N C _N D _N	13.2 13.2
odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci	LFSM-U response	45.2 _S , 52.2 _S 48.3 _N , 55.2 _N	C _S D _S C _N D _N	15.2 c) 15.2 c)
odezva ve frekvenčně závislém režimu	FSM response	45.3 _S , 52.3 _S 48.4 _N , 55.3 _N	C _S D _S C _N D _N	15.2 d) 15.2 d)
regulace s cílem obnovení frekvence	frequency restoration control	45.4 _S , 48.5 _N	C _S D _S C _N D _N	15.2 e) 15.2 e)
schopnost startu ze tmy	black start capability	45.5 _S	C _S D _S	15.5 a)
vypnutí do provozu na vlastní spotřebu	tripping to houseload	45.6 _S	C _S D _S	15.5 c)
schopnost dodávat jalový výkon	reactive power capability	45.7 _S , 52.5 _S 48.6 _N , 55.6 _N	C _S D _S C _N D _N	18.2 b), c) 21.3 b), c)
regulace P + regulační rozsah	active power controllability	48.2 _N	C _N D _N	15.2 a)
regulace U	voltage control	48.7 _N	C _N D _N	21.3 d)
regulace Q	reactive power control	48.8 _N	C _N D _N	21.3 d)
regulace účinníku	power factor control	48.9 _N	C _N D _N	21.3 d)
překlenutí poruchy	FRT capability	51.3 _S 53.3 _S 54.4 _N 56.3 _N	B _S C _S D _S B _N C _N D _N	14.3 a) 16.3 a) 14.3 a) 16.3 a)
obnovení P po poruše	post fault active power recovery	51.4 _S 54.5 _N	B _S C _S D _S B _N C _N D _N	17.3 20.3
ostrovní provoz	island operation	52.4 _S 55.4 _N	C _S D _S C _N D _N	15.5 b) 15.5 b)
tlumení výkonových oscilací	power oscillations damping control	53.2 _S 55.7 _N	D _S C _N D _N	19.2 21.3 f)
dodávky rychlého poruchového proudu	fast fault current injection	54.3 _N	B _N C _N D _N	20.2 b)
schopnosti zajišťovat umělou setrvačnost	capability of providing synthetic inertia	55.5 _N	C _N D _N	21.2 a)

Pozn.: - dolní index S označuje zkoušku/simulaci pro **synchronní** VM,
- dolní index N označuje zkoušku/simulaci pro **nesynchronní** VM,
- **modrá** barva textu označuje **zkoušku**,
- **červená** barva textu označuje **simulaci**,
- **fialová** barva textu označuje možnost použití **zkoušky i simulace**.

2.2 Požadavky na modely výrobních modulů

Požadavky na modely VM nejsou legislativně stanoveny. Nicméně existují pracovní skupiny, které se touto problematikou zabývají a řeší ji na různých úrovních. V rámci problematiky modelování VM jsou řešeny dvě hlavní linie (oblasti), které spolu pevně souvisí. První oblast je typ modelu. Existuje několik základních přístupů k problematice počítačového, nebo lépe řečeno numerického modelování fyzikálních, v tomto případě elektromagnetických dějů. V podstatě jde o to, jak podrobný model a pro jaký typ simulace je vhodné či nutné použít s odkazem na správnost studie. Tuto oblast řeší kapitola 4. Druhou oblastí jsou vlastnosti a možnosti modelu. Požadavky na model VM v rámci této oblasti je možné rozdělit do tří skupin, které mají v rámci funkce a schopností modelů zásadní vliv v chápání celé filozofie/koncepce provedení modelu. Požadavky na

zdroje a tím i modely zdrojů jde rozčlenit na řízení, ochrany a schopnosti (controls, protections, capabilities). Souhrnným požadavkem na modely VM je, aby adekvátně odrážely chování VM při simulacích v ustáleném provozním stavu, během přechodných jevů, i při simulacích poruch. Z toho v podstatě vyplývá nutnost použití dynamických modelů VM.

2.2.1 Rozdíly mezi IBG a SG

Popis rozdílů mezi IBG a SG hraje důležitou roli při vytváření následných požadavků a návrhu řídicích funkcí především IBG. SG přirozeně, na základě principu své funkce, mají s ohledem na provozování soustav řadu kladných vlastností, například směrem k statické a dynamické stabilitě. Jejich vlastnosti stály přirozeně i v evoluci principů řízení současného provozu sítě (které je popsáno v plném znění pojednávané dizertační práce). Problematika začleňování většího podílu IBG sebou pak nese otázky vlivů a důsledků implementace IBG na provoz sítě z lokálního i globálního hlediska → z toho důvodu je třeba popsat rozdíly mezi těmito typy zdrojů.

Informace pro popis rozdílů mezi IBG a SG lze čerpat z [10] a [11], které je nutné doplnit o návaznosti na problematiku řešenou v rámci této práce. Pro problematiku integrace většího podílu IBG do energetického mixu na úkor SG jsou důležité zejména tyto oblasti: setrvačnost, poskytování/dodávka poruchového proudu, synchronizační moment a pevný vnitřní zdroj napětí. Důvodem je, že tyto vlastnosti a od nich se odvíjející charakteristiky různých parametrů jsou dobře popsány a známy u SG, ale nejsou poskytovány IBG na základě principu jejich funkce. Navíc, na těchto vlastnostech je více či méně závislé i schéma/princip provozu a řízení ES. I proto je nutné tyto rozdíly identifikovat a případné požadované vlastnosti implementovat/včlenit do IBG skrze jejich řízení. Některé z vlastností či funkcí jsou i předmětem požadavků RfG, PPDS a kodexu PS. Navíc je třeba vnímat i vlastnosti zdroje energie dodávající energii samotnému SG nebo IBG – turbína a její typ, FV panel, akumulátor atd.

2.2.2 Řízení zdrojů

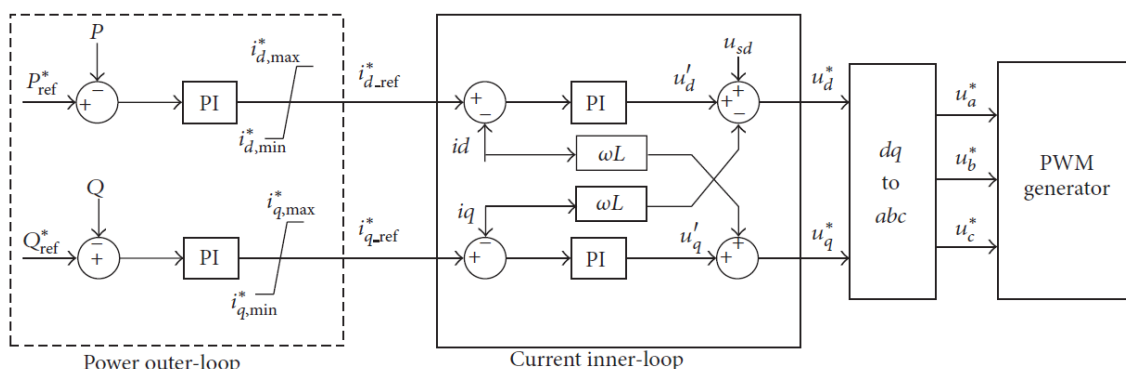
Se zaměřením nejen na mikrosítě a malé ostrovní systémy lze definovat požadavky na řízení a regulaci těchto zdrojů. Podobně jako např. v [12] nebo [13], lze distribuované zdroje rozdělit (v kontextu s typem regulace) podle jejich úlohy v systému na PQ zdroje, které do sítě dodávají požadovaný nebo maximálně dostupný výkon, a zdroje, které mají kromě možnosti P-Q regulace ještě schopnost přepnutí svého schématu řízení na U/f regulaci. U/f regulace je pak u těchto zdrojů využita v případě ostrovního provozu, kdy takto vybavený zdroj má schopnost převzít roli tzv. pilotního uzlu a vyrovnávat bilanci výkonu při udržení stanoveného napětí. P-Q regulaci lze označit jako regulaci používanou pro tzv. slave mód a U/f regulaci jako regulaci pro tzv. master mód. Do role bilančního zdroje (master – regulace U/f) může být v případě vyčlenění sítě uveden zdroj, který má dostatečný regulační rozsah. Z pohledu výpočtu napěťových poměrů a výkonových toků v tzv. ustáleném stavu lze bilanční uzly označit za zdroje s U/f regulací – zdroje, které hradí výkonovou nerovnováhu v síti při zachování daných napěťových a frekvenčních mezí.

Schémat provozu ostrovních sítí je v odborných člancích popsáno nespočet. Moderní síť nabízí stále se rozšiřující možnosti v oblasti managementu a řízení. Do role pomocného prvku master zdroje mohou být pomocí komunikace nebo nastavení schémat řízení zařazeny další zdroje se schopností na požadavek regulovat svůj výkon, může být použita akumulace energie, může se vypomáhat s regulací výkonové bilance na straně odběru atd.

Z pohledu samotného řízení je pak v návaznosti na předchozí odstavce řeč o rozdělení strategií řízení na *PQ inverter control* a *VSI control* (Voltage source inverter). Rozdělení na tyto dvě skupiny vychází z matematického popisu chování systému.

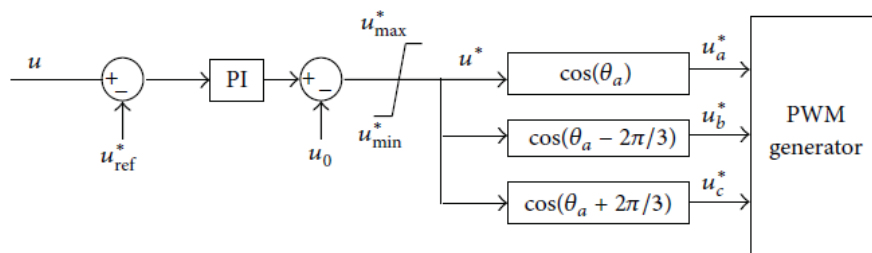
Strategie řízení SG použita v postulovaném modelu SVM v podstatě vychází z popisu v literatuře [14]. Velikost činného výkonu a zároveň frekvence je funkcí velikosti mechanického momentu na hřídeli generátoru, velikost výkonu jalového je dána budícím napětím SG. Za použití této premisy lze snadno vytvořit strukturu řízení, která bude realizovat řízení dodávky požadovaného P a Q – pomocí parametrů mechanického momentu a buzení. V případě provozu SG jako zdroje zaštiťujícího roli pilotního uzlu či master zdroje v dané síti, je regulace frekvence (vyjadřující výkonovou bilanci sítě) funkcí mechanického momentu a velikost napětí funkcí buzení SG.

Pro realizaci řízení IBG v rámci postulovaného modelu NVM bylo adoptováno řešení použité v [15]. Pro P-Q regulaci, která je prakticky preferovaná u všech IBG pracujících do ES, lze použít algoritmus řízení, který je ilustrován na obr. 2-2. Okamžité hodnoty činného a jalového výkonu jsou ve vnější výkonové smyčce porovnány s jejich referenčními hodnotami a je vytvořena referenční hodnota proudu, reprezentována jeho požadovanými velikostmi d a q složek v dq souřadnicovém systému. Ve vnitřní proudové smyčce pak dle zobrazeného schématu vzniká reference komplexoru napětí, která je převedena na tři fáze požadovaných okamžitých hodnot fázových napětí a následně pak pomocí pulzně-šířkové modulace na spínací impulsy polovodičových spínačů střídače. Výhodou použití dq souřadnicového systému je vyjádření okamžitých hodnot napětí a proudů ve složkovém tvaru jejich hodnot. S takovou interpretací harmonického signálu dokážou správně pracovat samotné PI regulátory.



obr. 2-2: Schéma P-Q regulace [15]

U/f regulace IBG se uplatní v případě, kdy VM pracuje v tzv. master (napěťovém) módu, kdy přirozeně plní úlohu bilančního uzlu sítě. Tento režim může být požadován zpravidla při ostrovním provozu VM. Požadavek na frekvenci a velikost napětí je tak dán přímo potřebou udržení těchto parametrů při provozu sítě. Důsledek snahy o udržení požadovaných parametrů je pak dodávka úměrné hodnoty činného a jalového výkonu. Dosažení cíle regulace parametrů frekvence a velikosti napětí je pak závislá na disponibilním výkonu zdroje. Tento regulační režim se u IBG v podstatě uplatní také při fázování zdroje na síť. Použité schéma U/f regulace vychází z blokového schématu na obr. 2-3.



obr. 2-3: Schéma U/f regulace [15]

Podstatou návrhu řídicích smyček IBG je integrace palety možností, které je pak schopen VM poskytovat. Základní členění je na regulační režimy popsané výše v této podkapitole. Do nich jsou zakomponovány další funkce jako například schopnost synchronizace VM a sítě a resynchronizace ostrova a zbytku sítě – aplikované v rámci U/f regulace, a PQ(Uf) závislosti – aplikované v rámci P-Q regulace.

Požadavky na PQ(Uf) řízení mají za cíl zlepšení schopnosti začlenění VM do provozu sítě, a to na úrovni jednak lokální, především s ohledem na velikost napětí v místě připojení, a jednak na globální, kdy je brán ohled na tok výkonů mezi různými částmi soustavy a frekvenci. V konečném hledisku pak existuje určitá skupina možností, jak lze regulovat různé parametry VM a mít tím vliv na konkrétní parametry VM a sítě. Požadavky na schopnosti PQ(Uf) řízení jsou v podstatě popsány v příloze 4 PPDS.

3 MULTIAGENTNÍ SYSTÉMY

Problematika multiagentních systémů (Multi-Agent System – MAS) v souvislosti s elektroenergetickými systémy je relativně nový obor, který je řešen zejména s ohledem na možnosti tzv. chytrých sítí. Úvahy a aplikace pokročilých struktur komunikace a řízení elektroenergetických sítí přináší prostor pro zlepšování spolehlivosti provozu, zlepšování různých provozních ukazatelů a parametrů sítí.

MAS se dá v kontextu oboru elektroenergetiky definovat jako soubor inteligentních prvků, které dokážou navzájem komunikovat mezi sebou, i s nadřazenými prvky z pohledu řídicí hierarchie, dokážou sami měřit, vyhodnocovat a ovládat silovou funkci, která může být i přímo jeho součástí. Příkladem agenta může být recloser s dálkovou komunikací, moderní ochrany atd. Pod pojem agent lze zahrnout dispečerský ŘS a samotné VM.

Důležitou součástí MAS je schopnost úplné nebo částečné vzájemné komunikace mezi prvky v síti (agenti, zdroje, akumulace a případně odběry). Proto je pro ověření správné funkce MAS důležité vytvořit odpovídající modely prvků sítí, které budou dostatečně komplexní a robustní pro testování v rámci simulací. Pouze s adekvátně sestavenými modely lze simulovat, sledovat a vyhodnocovat finální funkci navrženého MAS, včetně situací, které mohou v síti nastat, jako přechod části vyčleněné sítě do OP, samotný OP a resynchronizace ostrova zpět k síti apod.

V kontextu elektrických sítí lze uplatnit různé architektury MAS. Existují dvě mezní architektonické struktury, od nichž se odvozují další: *centralizované MAS*, kde každý agent v síti je podřízen centrálnímu řídicímu centru, které rozhoduje o funkci každého agenta; a *decentralizované (distribuované) MAS*, kde každý agent v síti plní svoji funkci jako autonomní jednotka a rozhoduje o svojí funkci sám na základě vlastního měření a případné (v rámci této práce nutné) komunikace s dalšími agenty. Dalšími strukturami jsou *hybridní MAS*, které při normálním

chodu mohou fungovat na základě pokynu centrálního řídicího systému (obecně pro optimalizaci chodu sítě) a v případě poruch, za podmínky dostupnosti potřebných dat, samostatně, na základě vlastního vyhodnocení situace; a *hierarchický MAS*, kde agenti fungují v různých rozhodovacích úrovních.

Agenty lze v nejširším slova smyslu popsat dle [16] jako autonomní výpočetní entity, které mohou být vnímány jako prvky vnímající jejich prostředí pomocí senzorů, a které dokážou působit na prostředí, ve kterém se nachází, prostřednictvím efektorů. Je-li řečeno, že agenti jsou výpočetní entity, jednoduše to znamená, že fyzicky mohou existovat ve formě programů, které běží na určitých výpočetních zařízeních. Je-li řečeno, že jsou autonomní, znamená to, že do jisté míry mají kontrolu nad svým chováním a mohou jednat bez zásahu lidí a jiných systémů. Agenti sledují cíle nebo plní úkoly tak, aby splnili své určené cíle s tím, že obecně tyto cíle a úkoly mohou být stejně tak doplňkové jako i konfliktní. V kontextu s elektrickou sítí lze agenta chápat jako prvek, který je schopen plnit autonomně určitý úkol nebo úkoly. K plnění úkolů má k dispozici, nebo dokáže získat potřebná data, dokáže situaci vyhodnotit a provést úkon, který koresponduje s nastavením jeho funkce.

3.1 Možnosti MAS v ES

MAS lze využít k celé řadě funkcí. V odborné literatuře existuje mnoho pojetí a je popsáno mnoho způsobů využití pokročilejších řídicích, limitačních a bezpečnostních systémů. Příklad použití MAS je uveden v [17], která pojednává o funkci FLISR (Fault Location, Isolation, and Service Restoration), což je označení pro funkcionalitu chytrých sítí, která spočívá ve schopnosti systému včas a spolehlivě rozpoznat poruchy v síti, poruchy lokalizovat, poškozenou část systému odpojit od zbytku soustavy a po odeznění přechodného děje připojit danou část systému zpět do zbytku soustavy. To v podstatě souvisí s pojmem „samoléčení“ (Self-healing), kterým se zabývá např. [18]. Dalším příkladem využití MAS se zabývá [19], a to z pohledu ekonomiky a optimalizace provozu. MAS lze dále v podstatě využít například i k řízení mikrosítí, kterým se zabývá např. [20].

4 MODELOVÁNÍ A SIMULACE

Jedním ze způsobů, jak porozumět chování komplikovaných systémů, je studovat reakci při poruchách nebo parametrických variacích. Počítačová simulace je jedním ze způsobů, jak tyto reakce vyvolat (simulovat) a studovat pozorováním okamžitých nebo RMS hodnot v časové doméně nebo odezvu ve frekvenční oblasti. Využití modelů a simulačních prostředků má i další, hlubší uplatnění.

K problematice využívání různých typů modelů se vážou informace uvedené v [21] a [22]. Jedná se vesměs o dotazníky, na které reagovali různí oslovení PPS a PDS po celém světě. Obecně se dá říct, že za zvyšující se poptávkou a požadavcích na dynamické modely VM může zvyšující se podíl IBG v rámci provozu sítí a nedostatek ověřených dynamických modelů. Dále je nutné uvést, že neexistuje dostatečný popis toho, co a jaké funkce jsou důležité pro různé typy studií elektroenergetických soustav – tzn., co by mělo být modelováno a co lze v rozumné míře zanedbat nebo reprezentovat zjednodušeně. Tento problém neodmyslitelně zahrnuje i úvahu o tom, kdy použít RMS modely (které většinou používají rovnice ustáleného stavu, při nastavení určitých počátečních a cílových podmínek, s definovanými vlastnostmi systému) a kdy EMT model (který provádí výpočty v časové oblasti, čímž dokážou navíc lépe zkoumat oblasti rychlejších přechodových jevů, jako jsou např. spínací děje, vypínací manipulace, zkratky a poruchy). Navíc, vzhledem k tomu, že

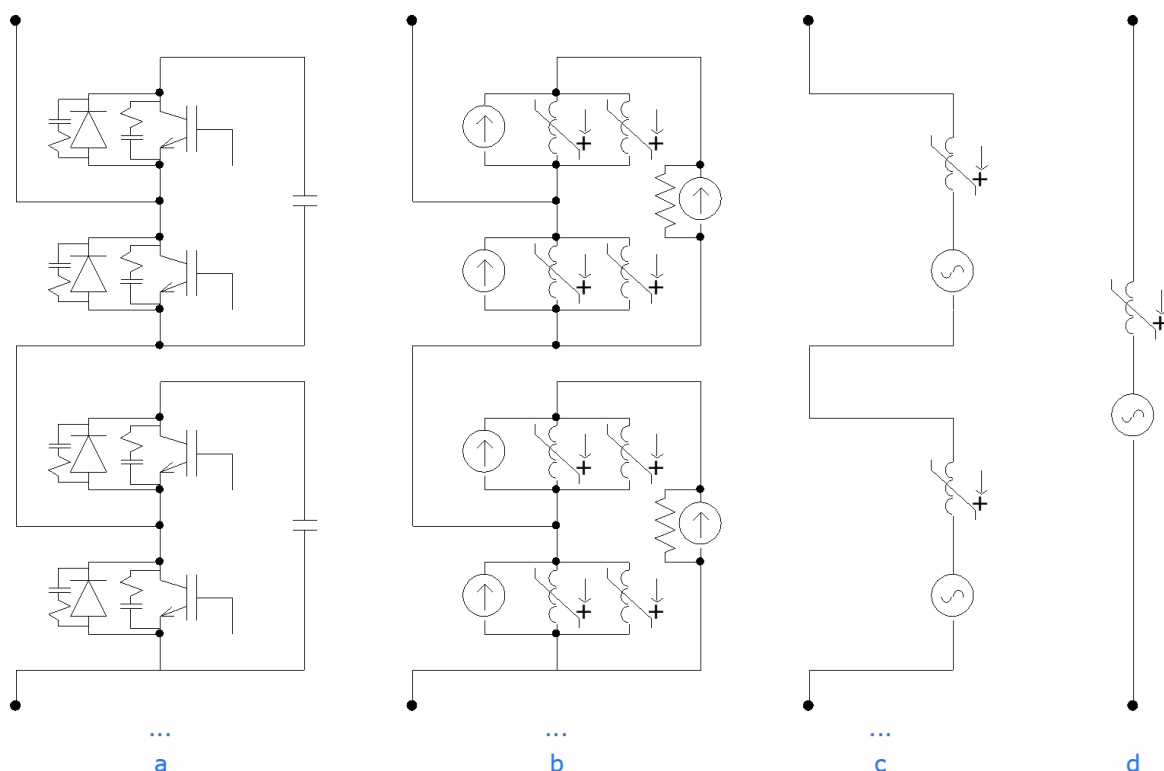
podrobné konstrukční informace nemusí být jednoduše k dispozici pro vývoj explicitních modelů některých typů generátorů (zejména IBG), je o to větší potřeba poskytnout obecnější informace o modelování s příslušnými pokyny k jejich použití.

4.1 Typy modelů VM

Při návrhu, sestavování nebo používání modelu jakéhokoliv systému či jeho části nebo komponenty/prvku je vždy nutné zvážit jeho správnost a použitelnost pro daný typ simulace nebo studie, která bude prováděna. Úroveň detailu modelu VM musí být řešena globálně v rámci provázanosti všech relevantních komponent, které se podílí na procesu simulace. Obecně se uvádí (viz např. [10]) nutnost vnímání detailu provedení řízení VM a detailu provedení elektrického obvodu zdroje. Současně je nutná znalost simulovaného, studovaného jevu a znalost, kde jsou použity aproximace, jak se projeví a jaký důsledek tato zjednodušení mohou mít na výsledky simulací.

Základní, nejjednodušší rozdělení je na tzv. *average modely* a tzv. *full modely*. Od těchto dvou, dá se říct základních pojmů reprezentujících určitý detail provedení skupin modelů, se odvíjí modifikace v různých úrovních, zahrnujících nebo naopak vypouštějících různé části jejich matematických popisů. Existuje nepřeberné množství publikací, které implementují nebo nějakým způsobem modifikují určité funkcionality modelu se snahou docílit vhodnosti použití jejich řešení pro určitý typ zkoumaného fenoménu nebo děje. Zkoumání a popis úrovně detailu provedení se stává tím složitější, čím je složitější popis a návaznosti různých částí modelů. Hloubku/detail matematického popisu modelu VM lze tedy řešit v rámci jednotlivých komponent nebo lépe určitých funkčních bloků, jako je právě měření, řízení, vyjádření silové části samotného zdroje a dále provedení ochran VM.

Pro úvod do problematiky typů modelů VM v rámci této teze lze pomocí obr. 4-1 ilustrovat 4 úrovně detailu jedné větve střídače tak, jak je popisuje např. [10]. Ilustrace má dávat představu o tom, jak jsou v podstatě řešeny modely střídače v různém stádiu detailu provedení. Část *a* reprezentuje full model, části *b*, *c* a *d* pak averaged modely s tím, že řešení *d* je v podstatě nejjednodušší varianta provedení modelu IBG a lze tak reprezentovat celý zdroj. S úvahou nad těmito úrovněmi je pak jednodušší rozhodování o potřebách návazností řízení, kdy u full modelu je kromě správného nastavení všech komponent potřeba získat/zajistit i potřebné spínací pulzy výkonových prvků větve střídače. Ty, mají-li ve svém důsledku vést k řízení činného a jalového výkonu zdroje, musí být získány modulem řízení, který musí být koncipovaný v dostatečné míře detailu. Tato úloha se stává jednodušší na opačném pólu provedení – u jednoduchého modelu, kdy je výstupem modulu řízení jen požadovaná velikost a posun výstupního proudu zdroje. Podobně by se dala ilustrace na obr. 4-1 a její popis v principu přenést i na další prvky sítí. Obecně při návrhu modelu VM musí úrovní detailu samotného zdroje odpovídat i struktura řídicí a měřicí části.



obr. 4-1: Ilustrace úrovní detailu modelu jedné větve měniče

4.2 Stávající modely prvků sítí

Existuje několik publikací, které popisují různé modely prvků sítí. V případě zaměření na ty z nich, které se zabývají tvorbou a popisem modelů VM, lze nalézt některé relevantní podněty a informace, které se vážou k problematice řešené v této práci. Jde zejména o modely IBG, SG a agentů. V oblasti modelování IBG jsou nejsignifikantnější výstupy dvou pracovních skupin. V rámci WECC (Western Electricity Coordinating Council) jde o pracovní skupinu pro modelování obnovitelných zdrojů energie (Renewable Energy Modeling Task Force) a v rámci IEC (International Electrotechnical Commission) jde o pracovní skupinu 27 (WG27 – Working Group 27) v rámci technického komitétu 88 (TC88 – Technical Committee 88) s názvem Wind turbines – electrical simulation models for wind power generation [103]. Některé z jejich obecných modelů (generic models) jsou použity i v některých softwarových nástrojích pro analýzu energetických systémů, např. GE PSLF™, Siemens PTI PSS®E, PowerWorld Simulator a DIgSILENT PowerFactory [24], [25]. K řešení této problematiky také přispívá CIGRE skrze pracovní skupinu CIGRE C4/C6.35/CIREN [11].

Obecně se modely IBG dají rozdělit z hlediska typu technologie výroby elektrické energie na větrné, fotovoltaické, mikro turbíny, palivové články a bateriové systémy. Z hlediska použití, resp. typu studie, při které se dá model využít, se dá setkat s modely konstruovanými pro studie frekvenční stability, krátkodobé stability napětí, zkratů, krátkodobého nárůstu napětí, krátkodobého poklesu napětí, přechodové stability, dlouhodobé stability napětí, úhlové stability, přechodů do ostrovního provozu, spínacích přechodů, interakce řídicího systému, koordinace ochran atd. Mnohé modely se samozřejmě dají použít na více druhů studií. V mnoha případech jde vesměs o podobu a nastavení řídicích obvodů zdroje. I zde se dá používané modely rozdělit na RMS a ETM modely. Podrobněji se problematikou používaných modelů zabývá např. studie [26].

4.3 PSCAD

Program PSCAD je používán inženýry a vědci mnoha institucí po celém světě. Používá se především při plánování a návrhu elektroenergetického systému, uvádění do provozu, provozu, přípravě specifikace výběrového řízení, výuce a pokročilému výzkumu. Jedná se o simulační nástroj, který používá výpočty v časové oblasti. Díky tomu lze lépe zkoumat i takové vazby, jako např. vliv kvality energie na funkci elektromotoru a kvalitu elektrické energie obecně. Výpočty jsou realizovány soustavou diferenciálních rovnic reprezentující model systému. Výsledky výpočtů jsou tak prezentovány jako průběh okamžitých hodnot v čase. Následným výpočtem je pak možné výsledky interpretovat i jako fázory či průběhy efektivních hodnot – podobně jak jsou interpretována reálná měření. Na rozdíl od programů, které provádějí výpočet pomocí rovnic ustáleného stavu, kdy je zpravidla počítáno pouze se základní frekvencí, PSCAD dokáže sledovat odezvu systému na všech frekvencích, s přesností závislou na uživatelem zvoleném časovém kroku výpočtu.

5 DOSAVADNÍ VÝVOJ A SOUČASNÝ STAV

Informace uvedené v předchozích kapitolách se dají uvést do kontextu současného stavu výzkumu, vývoje a implementace v konkrétních úrovních k této práci relevantních problematik.

Je potřeba popsat stav dosavadního vývoje, který koresponduje s řešenou problematikou. Jde o to, vymezit a definovat používané a testované metody a prvky sítí tak, aby na základě těchto podkladů a předpokladů mohlo být v další části této práce vytvořeno schéma a možnosti nastavení chování použitých funkcionalit. Celá popisovaná problematika samozřejmě nemůže postihnout každý aspekt do detailu, a proto některé elementy, které není nutné studovat podrobně, je možné zahrnout do oblasti zjednodušujících předpokladů. Mezi tyto patří například technologie komunikace (typ komunikace, komunikační protokoly atd.) nebo volba konkrétního typu inteligentního přístroje instalovaného v síti. V úvahu jsou vzaty pouze provozní vlastnosti, které lze a je nutné je implementovat do vytvořených modelů v rámci funkce jejich určení.

Popisované oblasti dosavadního vývoje v následujících podkapitolách se do značné míry překrývají, proto rozdělení do následujících podkapitol nesmí být vnímáno jako striktní.

5.1 Vlastnosti zdrojů

Tato návaznost je předmětem kapitoly 2. S ohledem na platnou legislativu, ale i směr vývoje oboru elektroenergetiky, lze současný stav chápat jako přechod, či možná trochu nadneseně, pokus o transformaci energetiky. Více pravděpodobněji jde spíše o postupný vývoj odvětví, které reaguje na stav technického pokroku a společenských potřeb.

Současný zvyšující se podíl DER přináší nové výzvy, které je nutné řešit. Jde například o problematiku zvyšování napětí v síti (z důvodu dodávky činného výkonu rozptýlenými VM). Tento stav nemusí být nežádoucí, nicméně musí existovat nástroje – především požadavky na VM, které budou schopny řešit případné nestandardní stavy provozu sítě. Nástrojem mohou být funkce VM, mající za úkol regulovat parametry výstupní energie VM na požadované hodnoty (napětí, činný výkon, jalový výkon, účinník, frekvence).

Spolu s požadavky na vlastnosti a funkce VM jsou v současné době implementovány i požadavky na ověřování vlastností VM jednak pomocí fyzických testů, ale jednak i pomocí simulací. Tato oblast nabízí široké pole uplatnění modelů VM, skrze které lze ověřovat požadavky na jejich

vlastnosti a funkce. Odrazovým dokumentem pro motivaci řešit problematiku modelování VM a simulace se stal RfG.

5.2 Ostrovní provoz

Vývoj na poli možností udržení chodu vyčleněných částí sítě v OP při poruše v nadřazené síti je v současné době řešeno na mnoha úrovních. Vedle teoretické roviny se v hojné míře vyskytují pilotní projekty (které jsou často elementy projektů zaměřených na chytré sítě a jsou pod záštitou distribučních společností a dalších subjektů působících v elektrotechnickém odvětví), které se snaží implementovat nové funkcionality elektrických sítí, právě včetně možností OP. Problematika OP je samozřejmě řešena i návazností na platné dokumenty jako Kodex PS, PPDS, RfG apod.

Z pohledu řešení problematiky přechodu z a do OP a samotného provozu VM v ostrovním režimu se toto téma prolíná s problematikou mikrosítí, jejichž vymezení z pohledu vlastností a funkcí VM a agentů téměř odpovídá problematice mikrosítí. V procesu řízení chodu sítí není pojem OP ničím novým, nicméně právě možnými vlastnostmi současných a budoucích DER lze renesancí problematiky ostrovních provozů v prvních instancích zkoumání globálních (celoostrovních) návazností řešit nefyzicky, skrze příslušné modely prvků ES. Testování chování všech návazností OP v reálném provozu sítě je zatíženo rizikem ztráty bezpečného chodu ostrovního systému, což může mít zbytečné ekonomické následky. Naopak testování OP, resp. vlastností prvků sítí v rámci daného ostrova, pomocí počítačových simulací přináší větší variabilitu a menší důsledek v případě selhání dané struktury řízení chodu sítě/ostrova.

5.3 Multi-Agent Systems – multiagentní systémy

MAS, ač jsou v různých projektech nazývány a chápány různě, jsou v mnoha ohledech dobrým způsobem, jak řešit spolehlivost chodu sítí s ohledem na poruchy v síti a možnosti začleňování distribuovaných zdrojů.

Jak bylo uvedeno v kapitole 3, MAS lze využít k celé řadě funkcí – od řešení poruchových stavů s cílem rekonfigurace sítě a obnovy provozu, přes problematiku ostrovních provozů, až po provozně optimalizační procesy. Literatura citovaná právě v rámci kapitoly 3 odkazuje zpravidla na odborné publikace a reporty studií, které se snaží tento relativně nový obor aplikovat do rámce provozu současných či budoucích sítí.

V rámci MAS se dostává do popředí pojem FLISR a všechny mutace akronymů podobného významu a jedná se o oblast vývoje funkcí moderních, ve které lze s výhodami použít softwarového prostředí a simulace.

5.4 Modelování a simulace

V současné době existuje spousta programů, které umožňují modelování a simulaci různých prvků a dějů odehrávajících se v rámci elektrické sítě. Společným prvkem těchto programů je, že ve svých knihovnách nabízejí spoustu komponent, díky kterýmž lze sestavit téměř jakýkoliv elektrický obvod, včetně řídicích a regulačních návazností. Tímto dávají uživateli možnost sestavit požadovaný model systému a možnost provést potřebné simulace různých dějů. Variabilitu a široké spektrum použití dále často navyšuje možnost doplnit modely o moduly, jejichž funkce je dána popisem uživatele pomocí programovacího jazyka (nejčastěji C, dále Fortran aj.; některé programy nabízejí např. možnost definovat funkci modulu pomocí souboru vytvořeného v programu MatLab, C++ apod.). Značnou nevýhodou stávajících simulačních programů však je, že ve svých knihovnách

nenabízejí komplexní modely prvků elektrizační soustavy. Toto se ostatně stalo jednou z motivací této práce. Důvodem je logicky zbytečná složitost a tím i výpočetní náročnost komplexního prvku, neboť ten obsahuje i funkcionality, které v rámci určité simulace zaměřené na dílčí problém nejsou využity. Příkladem mohou být fázovací obvody či elektrické (příp. i technologické) ochrany modelu zdroje elektrické energie, které jsou nevyužity při simulacích zaměřujících se např. na toky výkonů v určitém modelovaném systému. Tyto funkcionality, ač nejsou využity, jsou kompilovány a v průběhu simulací zatěžují výpočetní výkon pracovní-výpočetní stanice. Nicméně právě existence komplexního modelu určitého prvku ES je obecně žádaná právě z důvodu sestavy a parametrizace simulovaného systému.

5.4.1 Modely VM

V současné době existuje vícero pracovních skupin zabývajících se problematikou modelování různých typů VM. V následujících odstavcích jsou uvedeny informace k významnějším a pro tuto práci relevantním projektům, studiím či pracím.

Za významný lze považovat mezinárodní standart IEC 61400-27-1:2015 [27], který specifikuje dynamické simulační modely různých typů větrných turbín, různých konceptů a konfigurací. Definiuje obecné pojmy a parametry za účelem stanovení elektrických charakteristik větrných turbín v místě jejich připojení k síti. Dynamické simulační modely jsou popsány modulárním způsobem, který lze použít i pro budoucí koncepty větrných turbín. Modely čtyř základních typů větrných turbín obsahují další návaznosti – ochrany, mechanika turbíny, schopnost regulace jalového výkonu, příslušná měření a řízení. Model naopak neobsahuje např. rozhraní pro řízení v různých režimech provozu, ani návaznosti na simulace souladu dle RfG. S cca dvouletou časovou prodlevou se v databázích vědeckých publikací začaly objevovat příspěvky (např. [28], [29], [30], [31] a [32]) doplňující a validující zmiňované dynamické simulační modely v různých simulačních programech – PSS/E (Siemens PTI), Netomac (Siemens), Eurostag (Tractebel/RTE), PowerFactory (DIgSILENT), SICRE (CESI), Neplan (Neplan AG), Matlab Simulink (SENVION and Gamesa), Modelica (DTU). Spolu s tímto vznikají tzv. prováděcí směrnice (implementation guidelines) pro tyto simulační programy [33]. IEC 61400-27-1:2015 má návaznost na modely WECC popsané v dalším odstavci.

Modely VM větrných a fotovoltaických elektráren vzniklých v rámci pracovní skupiny pro modelování obnovitelných zdrojů energie (REMTF - Renewable Energy Modeling Task Force), která je součástí americké organizace WECC, tvoří modelovou základnu pro relativně široké využití. Mimo definovaných základních čtyř typů topologií generátorů větrných turbín, jejichž vlastnosti jsou popsány např. v [34], je podobně popsána i problematika interpretace fotovoltaických zdrojů [35] – jedná se o pokyny (guidelines) popisující vlastnosti obecných modelů (generic models) a doporučený přístup k dalšímu použití. Srovnání modelů WECC a IEC (dle IEC 61400-27-1:2015) je uvedeno v [36].

PSCAD jako celosvětově rozšířená platforma také nabízí konkrétní modely VM. Jedná se například o aplikace větrných a fotovoltaických elektráren. Skrze odkaz [37] resp. [38] jsou dostupné projekty s modely zmíněných čtyř typů topologií generátorů větrných turbín, resp. fotovoltaického systému a fotovoltaické farmy. Projekty řeší konkrétní aplikaci VM, ale nenabízí např. možnosti přechodů mezi různými režimy provozu zdroje a aktivaci dalších funkcí, jako například frekvenčně závislé režimy, PQ(Uf) řízení atd.

5.5 Shrnutí kapitoly

Počítačové simulace elektroenergetických dějů se stávají velmi rozšířené a dostupné. Lze dohledat mnoho informačních zdrojů popisujících komplexní problematiku modelování a simulací dějů v elektrotechnice. V kontextu zaměření této práce byla v této kapitole uvedena celá řada příkladů aplikací a odkazů na konkrétní informace, které mají souvislost s řešenou problematikou.

Na poli modelování **VM** pro různé typy aplikací existuje celá řada modelů. Základním výstupním údajem pro modely je matematický popis chování mechanických, elektromechanických a dynamických vlastností dějů, které reálně probíhají v síti. Nadstavbou se pak stávají řídicí a regulační obvody, které je nutné určitým způsobem definovat a nastavit. Na toto navazují další funkcionality, jako například měřicí systém (zpracování měření), ochranné funkce, uživatelské rozhraní apod. Modely VM publikované v dostupné literatuře se však většinou vztahují na konkrétní typ VM a konkrétní aplikaci. Chybí obecně přijatelný model, který by svou robustností dokázal pokrýt požadavky uživatele v širším spektru aplikací.

V oboru definice vlastností modelů **agentů** je situace podstatně jednodušší. Funkce agentů jsou přesněji definovány a jejich celkové množství v míře kombinací různých funkcionalit je lépe obecně popsatelné. Navíc agenti vesměs neobsahují regulační obvody, nýbrž povětšinou pouze logické/rozhodovací funkce. To přináší jasnější a snadnější popis struktur a vlastností agentů. Nicméně opět neexistuje popis komplexního modelu agenta, který by dokázal pokrýt požadavky uživatele v širokém spektru aplikací.

6 CÍLE PRÁCE

Shrnutím předchozích kapitol lze pro tuto práci definovat zřejmé vstupy. Jsou jimi zejména možné dostupné technologie a současný stav poznání z hlediska využívání technologií – stav topologií současných i budoucích sítí, jejich principy a techniky řízení, výrobní moduly uplatňované v rámci provozu a jejich možnosti řízení v rámci synchronního i ostrovního provozu, možnosti MAS a možnosti počítačového modelování a simulací.

Shrnutím předchozích kapitol lze také definovat výzvy, které by mohly nebo měly být s výhodou řešeny pomocí počítačových simulací. Především studie důsledků nových požadavků na prvky sítí, specifických stavů a nových funkcionalit elektrických sítí je do značné míry výhodné testovat pomocí počítačových simulací. Při zamyšlení se nad šíří možností modelování elektroenergetických systémů je nutné zvážit, jak by měly modely prvků takového systému vypadat, jaká kritéria by měly splňovat, co by u nich mělo být možné nastavit a celkově, jak by měly fungovat. Účelem je stanovit obecné požadavky na modely prvků elektroenergetického systému tak, aby se na tento podklad dalo v následujících částech této práce navázat, s cílem vytvořit kvalitní modelovou základnu se širokou mírou uplatnění.

Cílem práce je tvorba a popis modelů prvků ES v prostředí programu PSCAD a validace jejich funkce. Výsledkem bude knihovna konkrétních prvků ES, které budou snadno použitelné pro široké spektrum simulací různých stavů, dějů a konfigurací. Praktickou návaznost cílů této práce lze shledat v ohledu na současné trendy při rozvoji nejen elektrických sítí, ale např. i strojírenství a stavebnictví, a to v použití softwarových simulačních prostředků. Tento trend sebou obecně nese možnost úspory nemalého množství nákladů a možnost do určité míry otestovat navrhované řešení. S modely zdrojů je koneckonců počítáno jako s prostředkem pro ověřování splnění podmínek provozovatele soustavy pro připojení samotných zdrojů.

6.1 Požadavky na generátory (RfG)

S ohledem na požadavky pro připojování nových zdrojů do ES, je jedním z prvořadých požadavků na modely zdrojů nutnost zahrnutí požadovaných funkcionalit dle **nařízení Komise (EU) 2016/631** [1]. Nařízení samo o sobě definuje některé požadavky na různé typy výrobních modulů. Postulované modely zdrojů musí mít nastavitelné vlastnosti a funkce tak, aby mohly být použity pro simulace za účelem ověření splnění požadavků nařízení. Na to navazují národní požadavky definované v PPDS a dalších normách.

6.2 Požadavky na vlastnosti zdrojů

Problematika připojování většího množství distribuovaných zdrojů elektrické energie sebou nese řadu problémů a neznámých, které je nutné řešit a studovat. Postulované modely zdrojů musí mít nastavitelné vlastnosti a funkce tak, jak je stanovují **požadavky EN 50549-1** [3], resp. **EN 50549-2** [4]. Je nutné řešit důsledky různého **nastavení výkonových charakteristik** zdroje, vč. jejich provázaností s ostatními zdroji v síti. S ohledem na úbytek podílu zdrojové základny využívající synchronní generátory je vhodné mít možnost studovat chování **umělé setrvačnosti** a **dodávky rychlého poruchového proudu** u zdrojů využívajících měniče. Jedná se o vlastnosti, které NVM nemají přirozeně oproti SVM, ale dají se implementovat uměle v rámci funkcí řízení.

6.3 Ostrovní provozy a resynchronizace

Jednou z požadovaných obecných funkcí tzv. chytrých sítí má být schopnost elektroenergetického systému reagovat na hraniční provozní podmínky sítě přechodem vyčleněné části soustavy do OP, včetně jejich detekce a schopnosti návratu do synchronního provozu se zbytkem soustavy. Postulované modely musí nabízet takové funkcionality, které budou schopny simulovat nejen **přechod do OP**, ale i chování a **spolupráci zdrojů a spotřeby** během OP. Nedílnou součástí pak musí být i schopnost **resynchronizace** ostrova se zbytkem soustavy.

6.4 Multiagentní systémy

Relativně novým pojmem, který se dá chápat jako vlastnost chytrých sítí je problematika MAS. Na teoretické úrovni existuje celá řada schémat funkcí MAS. Pro současná i nově navržená schémata by měl existovat nástroj, který umožní simulaci jejich chování během provozu. Postulované modely musí mít svou architekturu přizpůsobenou požadavkům studia **chování MAS** ve vrstvách komunikace a implementace různých funkcionalit a povelů. V rámci MAS může být uvažováno o zavedení nadstavbových prvků a funkcí majících za úkol zvýšení spolehlivosti a efektivity fungování elektroenergetického systému.

Možnosti MAS s ohledem na ostrovní provozy samy o sobě přináší možnost, jak konfigurovat a určovat chování MAS v případě vymezení a vzniku ostrova. Postulované modely agentů by měly mít rozhraní přizpůsobené možným studiím chování algoritmů pro vymezování a přechody do a z OP.

6.5 Obecně požadované vlastnosti a funkce

Je zřejmé, že mimo zmíněné požadavky na funkcionality prvků ES by bylo vhodné zajistit také robustnost konkrétních modelů s ohledem na události a přechodné jevy, které mohou v sítích nastat. Postulované modely musí mít schopnost reagovat na požadavky nadřazených řídicích systémů v rámci **komunikace** s dispečinkem, ostatními prvky, vloženými řídicími systémy nebo v rámci

MAS. Stejně tak by měly modely obsahovat **elektrické ochrany** pro možnost studia vlivu a chování systému během různých poruch. Samozřejmostí je pak schopnost **synchronizace** zdroje se sítí, do níž je vyveden jeho výkon.

Tématem, kterým je do velké míry provázáno vše, co je uvedeno v této kapitole, je řízení VM. Postulované modely musí mít takovou strukturu, do níž bude snadné implementovat i jiné algoritmy řízení – pro možnost posuzování jejich vlivů při jejich různém nastavení na funkci jimi řízených zdrojů.

7 POŽADOVANÉ MODEL Y (CHARAKTERISTIKA A VLASTNOSTI)

Možností, jak přistoupit k řešení výzev uvedených v předchozí kapitole, je celá řada. Postupným vývojem úvah a pilotních funkčních modelů na základě požadovaných funkcí byla vytvořena finální architektura modelů prvků ES. Cíle, které byly stanoveny v předchozí kapitole bylo nutné dále rozvést a uvážit šíři a hloubku naplnění požadavků. *Šíře* v kontextu této kapitoly, která má za cíl definovat hlavní strukturu a funkcionality modelů, reprezentuje šíři možností jednotlivých funkcí, které výsledné modely obsahují (návaznost na kapitoly 2 a 3). *Hloubka* pak reprezentuje podrobnost a přesnost jednotlivých funkcionalit modelů (návaznost na kapitolu 4). Tyto dva rozměry jsou do vysoké míry provázané.

K naplnění cílů uvedených v předchozí kapitole bylo nutné zvážit, které prvky sítě je nutné obecně vytvořit. Je zřejmé, že stěžejní pro celou práci jsou **modely zdrojů** a **modely agentů**. Mimo tyto bylo nutné uvažovat o dalších prvcích, které standardně nejsou součástí základní knihovny prvků programu PSCAD v takové hloubce, aby se daly jednoduše a bez úprav použít. Pro obecné simulace sítě je výhodné nahrazovat část ES, která není předmětem zkoumání prvkem síťového napaječe, který však musí splňovat určité nastavitelné požadavky – musí existovat **model sítě**, který dokáže simulovat chování vnější sítě. Modely prvků sítě vytvořené v rámci této práce jsou koncipovány pro širší použití v případě dalšího studia problematiky provozu a řízení sítě. S ohledem nejen na složitost, ale i přehlednost a možnost a snadnost implementace různých funkcionalit, bylo rozhodnuto o modulární architektuře modelů.

Filozofie struktury modelů byla zvolena s ohledem na skutečnou strukturu reálných prvků v síti, různé možnosti přístupu k modelování prvků sítě (average model, full model, real switching model apod.) a komplexnost systému v případě, jestliže má mít model kteréhokoliv prvku sítě vysoký stupeň využití (jestliže má být univerzální), a přesto snadno uživatelsky nastavitelný a srozumitelný.

Konkrétní požadavky na VM lze pomyslně rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou požadavky, které jsou pomyslně vázány ke konstrukčním vlastnostem zdroje. V jistém slova smyslu jde o robustnost zdroje z pohledu návrhu a konstrukce jednotlivých komponent. Druhou skupinu tvoří požadavky, jejichž naplnění lze dosáhnout vhodnou realizací řídicích algoritmů v rámci řízení zdroje. Obě skupiny jsou do jisté míry provázány a nebylo by účinné jednotlivé požadavky na VM takto striktně dělit. Je však nutné si uvědomit, že realizace požadovaných vlastností VM je dosaženo jak v oblasti konstrukce – fyzických *vlastností* komponent, tak v oblasti řízení – řídicích *funkcí*. S ohledem na tvorbu modelů zdrojů je nutné s touto myšlenkou pracovat a být si jí vědom při realizaci každé funkce zdroje – do jaké míry se jedná o vlastnost konkrétního typu zdroje a do jaké míry se jedná v podstatě o požadavek na řízení.

7.1 Požadavky na model VM a jeho architektura

Na základě předchozích kapitol lze definovat řadu požadavků na model zdroje. Některé požadované vlastnosti tak, jak jsou uvedeny v této podkapitole, vznikají na základě potřeby zajistit signály či data jiným funkčním celkům (například funkce měření), jiné na základě požadavku robustnosti a možné použitelnosti modelu. Požadované a nutné vlastnosti – funkce, jsou uvedeny v tab. 7-1. Funkce jsou pro přehlednost popisu a struktur modelů označeny symbolem F (jako funkce) a pořadovým dvojčíslicím. Každá funkce má jasně určený modul, ve kterém je implementována a ve kterém se uplatňuje. Existují samozřejmě i funkce, které lze použít u více nebo všech typů zdrojů. Stejně tak existují funkce, které lze použít jak v modelech zdrojů, tak modelech agentů (např. jednotlivé funkce v modulech měření). Popis konkrétních modelů a modulů je uveden v plném znění pojednávané dizertační práce. Speciálně, funkce zajišťující měření nebo určení/výpočtu určitého parametru jsou označeny symbolem M , funkce zajišťující ochrannou funkci jsou označeny symbolem O . Rozdělením modelu na funkční bloky lze také snadněji definovat jednotlivé funkce – definovat vstupy $\rightarrow$ algoritmus $\rightarrow$ výstupy.

tab. 7-1: Rozčlenění vlastností modelu zdroje

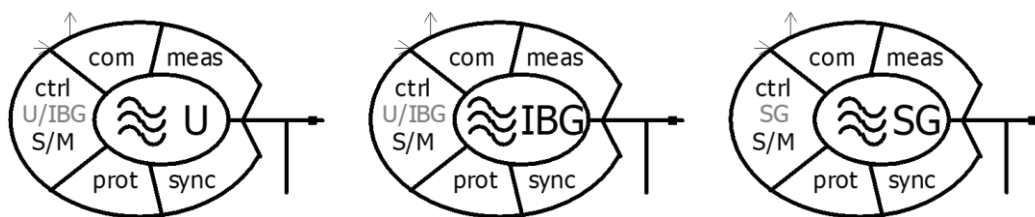
označení funkce	název funkce
M01	Určení frekvence
M02	Určení činného a jalového výkonu a účinníku
M03	Určení efektivní hodnoty sdruženého napětí
M04	Určení fázového posuvu napětí
M05	Určení napětí a proudu v dq souřadnicovém systému
F01	Zpracování nominálního a požadovaného výkonu
F02	Výběr a rampa činného a jalového výkonu pro řízení
F03	Určení regulačního módu
F04	Regulační obvod řízení IBG - slave
F05	Regulační obvod řízení IBG - master – obvod napětí
F06	Regulační obvod řízení IBG - master – obvod frekvence
F07	Regulační obvod řízení SG
F08	Určení parametrů regulačního obvodu v závislosti na regulačním módu pro IBG
F09	Určení parametrů regulačního obvodu v závislosti na regulačním módu pro SG
F10	Generování požadovaného napětí střídače
F11	Frekvenčně závislý režim ($P=f(f)$)
F12	Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci ($P=f(f-)$)
F13	Odezva v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci ($P=f(f+)$)
F14	Snížení činného výkonu závislé na napětí ($P(U)$)
F15	Řízení jalového výkonu v závislosti na činném výkonu
F16	Řízení jalového výkonu v závislosti na napětí
F17	Rychlý poruchový proud
F18	Umělá setrvačnost
F19	Ověření splnění fázovacích podmínek
F20	Synchronizace a resynchronizace
F21	Vnější komunikace modelu zdroje
F22	Výstup modulu ochrany VM
O01	Podpěťové relé

O02	Nadpětové relé
O03	Podfrekvenční relé
O04	Nadfrekvenční relé
O05	RoCoF

S ohledem na výpočetní náročnost a na fakt, že některé funkce nemusí být využity v rámci konkrétní studie, bylo přistoupeno k rozdělení daných funkcí na tzv. *pevné*, *zrušitelné* a *blokovatelné*. Pevné funkce nelze z příslušného modulu v žádném případě odstranit. Došlo by ke ztrátě základní funkce a model by buď nefungoval správně, nebo vůbec. Takovými funkcemi jsou např. měření, samotné řízení v základním výkonovém módu atd. Do kategorie zrušitelných funkcí jsou zařazeny ty, které se v určitých studiích mohou vynechat a jsou to zároveň ty, pro které existuje tzv. výplňový modul (popsaný v kapitole 8). Použití výplňového modulu při vyřazení zrušitelné funkce však není mandatorní. Zrušitelnou funkci lze totiž blokovat/zakázat přímo v rámci nastavení modulu, ve kterém je umístěn. Do kategorie blokovatelných funkcí jsou zařazeny ty, které lze v nastavení modulu, ve kterém jsou umístěny, blokovat/vyřadit z jejich návazností. Pro tyto funkce neexistuje přímo výplňový modul. Modely jsou však topologicky vytvořeny/uzpůsobeny tak, aby uživatel mohl v případě potřeby z příslušného modulu blokovatelnou funkci úplně odstranit a přispět tak k urychlení výpočtu.

Studiem a úvahami nad smysluplným a maximálně funkčním pojetím architektury modelů VM vzniklo rozdělení modelů zdrojů na celkem 6 modulů. Jedná se o moduly samotného zdroje (*U*, *IBG*, *SG*), měření (*meas*), komunikace (*com*), řízení (*ctrl U/IBG M/S*, *ctrl SG M/S*), ochran (*prot*) a synchronizace (*sync*).

Cílem bylo oddělit od sebe jednotlivé části tak, aby mohla být jednoduše konfigurovatelná vždy potřebná část zkoumaného systému. Na jednotlivé moduly lze také aplikovat různé požadavky, které se projeví hloubkou – podrobností modulu. Společnou vlastností všech modulů je možnost uživatele nastavit příslušné parametry. Základní grafické zobrazení je uvedeno na obr. 7-1, kde jsou zobrazeny všechny tři varianty postulovaných zdrojů.



obr. 7-1: Základní architektura modelů zdrojů

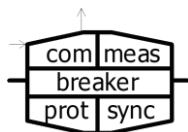
7.2 Požadavky na model agenta a jeho architektura

Obecně neexistuje soustava požadavků na realizaci agenta, což je dáno vesměs širokou škálou toho, co můžeme za agenta označit. S ohledem na možné typy agentů existuje nepřehledné množství informačních zdrojů, které rozdělují agenty do různých kategorií podle různých kritérií a definic. Nicméně lze vyjít právě z popisů jednotlivých typů agentů v různých publikacích a sestavit tak obecný model agenta, který bude konfigurovatelný a nastavitelný tak, aby mohl být použit pro různé typy studií, pro různé úkoly využívající různé funkce. Pro účely práce tak byly vybrány a definovány funkce uvedené v tab. 7-2.

tab. 7-2: Rozčlenění vlastností modelu agenta

označení funkce	název funkce
M01	určení frekvence
M02	určení činného a jalového výkonu a účinníku
M03	určení efektivní hodnoty sdruženého napětí
M04	určení fázového posuvu napětí
M06	určení efektivní hodnoty proudu
F40	logika povelů a blokad vypínače
F41	ověření splnění fázovacích podmínek
F42	vnější komunikace modelu agenta
O01	podpěťové relé
O02	nadpěťové relé
O03	podfrekvenční relé
O04	nadfrekvenční relé
O05	RoCoF
O06	nadproudové relé

Pro model agenta bylo rozhodnuto o rozdělení jeho finální podoby do celkem pěti modulů, z nichž každý, podobně jako u modelu VM, plní požadovanou funkci. Grafická podoba modelu agenta je zobrazena na obr. 7-2. Jedná se o moduly vypínače (*breaker*), měření (*meas*), komunikace (*com*), ochran (*prot*) a synchronizace (*sync*).



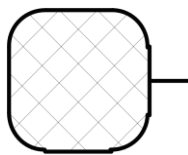
obr. 7-2: Architektura modelu agenta

7.3 Požadavky na model sítě

Model sítě musí obecně nahradit/simulovat vnější síť, do které je zdroj připojen a do které pracuje. S ohledem na zkoumané fenomény v rámci této práce lze definovat potřebu simulovat především frekvenční a napěťové deviace. To vše musí být simulováno v rámci definovatelné velikosti sítě/soustavy. Obecně je potřeba simulovat celou nebo oproti zdroji násobně větší část ES. Zajímavější je však zkoumat chování zdroje v menší, řekněme vyčleněné síti – ostrově, který obecně například nemusí mít regulační vlastnosti elektroenergetické soustavy jako primární regulace činného výkonu a frekvence.

Požadavek na model sítě je v podstatě takový, aby model v plném rozsahu zastupoval chování a vlastnosti jakékoliv sítě, do které může být zdroj připojen. S ohledem na požadavky simulací souladu pro synchronní a nesynchronní VM dle RfG resp. platných metodik, musí být v rámci modelu sítě nastavitelné (a dále realizované) požadavky různých frekvenčních a napěťových ramp a skoků. V rámci modelu sítě jsou brány systémové služby jako celek – jako celková schopnost modelu.

Architektura modelu sítě zobrazena na obr. 7-3 je jednoduchá. Obsahuje jeden modul, který realizuje celou funkci modelu sítě, včetně všech nastavení.



obr. 7-3: Architektura modelu sítě

7.4 Ostatní modely

Pro usnadnění možnosti koncepce simulace s návaznostmi mimomodelové komunikace je užitečné mít modul, který uživateli usnadní práci se signálovými poli, které je nutné řešit v rámci definic předávaných informací mezi modely. Tímto modelem je komunikační ústředna, která svým uspořádáním usnadňuje uživateli definici komunikačních návazností mezi jednotlivými modely a usnadňuje implementaci dalších nastavbových řídicích funkcí.

Dalším usnadněním je modul, jehož výstupem je požadovaná křivka limitu pro překlenutí poruchy/poklesu napětí nastavitelná podle požadovaných charakteristik definovaných přílohou 4 PPDS. Model s označením FRT tak dokáže vykreslovat požadovanou FRT křivku přímo do grafů programu PSCAD.

8 MODELÝ PRVKŮ SÍTÍ (FUNKCE A NASTAVENÍ)

Na základě předchozí kapitoly byl vytvořen soubor modulů, ve kterých jsou implementovány potřebné funkce modelů. Jejich plný popis je uveden v plném znění pojednávané dizertační práce.

V rámci práce byly vytvořeny i speciální moduly, které odlehčují výpočet. Ty vycházejí z úvahy nad nepotřebností využití některých funkcí v rámci vybraných typů simulací. Byly tak vytvořeny tzv. výplňové moduly, které obsahují pouze nutná propojení signálů modelů v takové konfiguraci, aby model pracoval celkově správně. Výplňové moduly jsou realizovány u komunikace, ochrany modelů zdrojů a agenta. Pro model agenta navíc existuje ještě výplňový modul synchronizace.

Dalším speciálním modulem je upravený modul měření VM, skrze který lze řídicím funkcím VM vnutit požadovaný průběh velikosti nebo frekvence napětí. Tento modul nachází využití při simulacích souladu dle metodiky [6].

Rozšířením modulové základny jsou také moduly řízení (jak SG, tak IBG, resp. napěťového zdroje), jež jsou ochuzeny o možnost práce v režimu master (v režimu U/f regulace). Moduly jsou tak schopny pouze provozního režimu fázování a P-Q regulace (se zachováním všech funkcí, které se k rámci P-Q regulací vážou).

Všechny vytvořené modely a moduly jsou zahrnuty v knihovně prvků programu PSCAD *Library_SG*, která je volnou přílohou dizertační práce.

9 SIMULACE PRO VALIDACI MODELŮ

V rámci práce bylo sestaveno několik projektů, v nichž byly provedeny simulace za účelem ověření funkcí a vlastností postulovaných modelů. Projekty jsou také ilustrací možných simulací, které lze s modely realizovat a ukazují práci s topologií modelů. S odkazem na hlavní cíle práce bylo čerpáno z metodiky ověření souladu s požadavky RfG pro VM typu C a D, konkrétně z její druhé fáze: Simulace souladu pro synchronní a nesynchronní výrobní moduly [6], která definuje požadavky na provedení simulací s cílem ověřit některé funkce modelů VM. Podrobněji rozebírá a

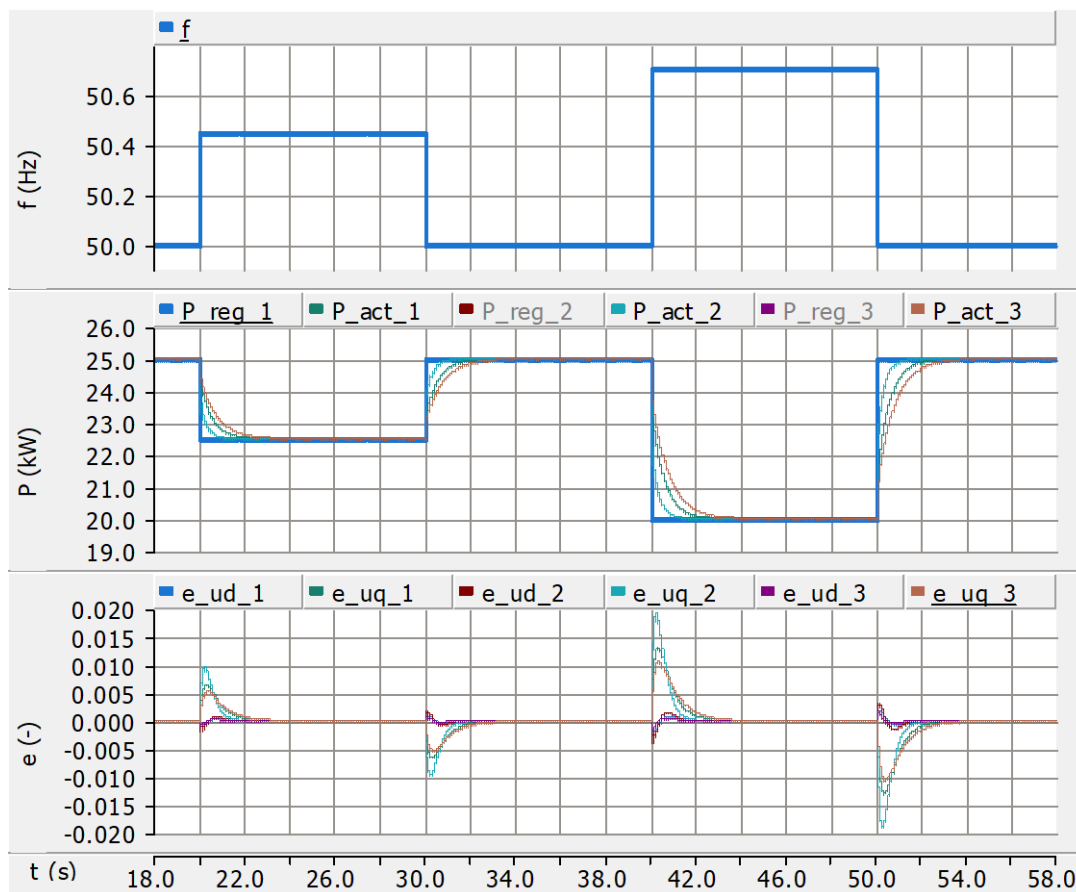
popisuje požadavky na VM a simulace souladu literatura [39], ze které byly čerpány některé doplňující informace. Pro všechny tři typy zdrojů byly provedeny tyto simulace souladu: simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci (LFSM-O), simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při podfrekvenci (LFSM-U), simulace odezvy ve frekvenčně závislém režimu (FSM), simulace schopnosti překlenout poruchu (FRT), simulace obnovení činného výkonu po poruše (Post Fault Active Power Recovery), simulace ostrovního provozu (Island Operation), simulace schopnosti dodávat jalový výkon (Reactive Power Capability), simulace dodávky rychlého poruchového proudu (Fast Fault Current) a simulace schopnosti zajišťovat umělou setrvačnost (Synthetic Inertia). Tyto simulace byly doplněny dalšími, které ověřují další funkce jednak modelů VM a jednak dalších modelů sestavených v rámci této práce. Byly tak validovány i funkce PQ(Uf) řízení, práce MAS, včetně procesů přechodu do OP (zapůsobením ochrany na vzniklý/simulovaný zkrat) a zpětné resynchronizace za pomoci komunikace mezi agentem a VM.

Ilustrací a popisem všech validačních simulací by byl překročen rozsahový rámec tohoto dokumentu – teze. Proto byly pro ilustraci výsledků simulací vybrány dvě dílčí části simulací, které se vážou jednak k simulacím souladu a jednak k ověření dalších funkcí a vlastností prezentovaných modelů.

9.1 Příklad simulace ověření souladu s RfG

V dílčí části simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci (LFSM-O) je sledována odezva na skokové změny frekvence. Frekvence je VM vnucena skrze rozhraní upraveného modulu měření. Průběh frekvence lze sledovat z prvního grafu v obr. 9-1. Simulace byla paralelně provedena pro tři VM, které se od sebe lišily nastavením parametrů proporcionálního zesílení a integračních časových konstant regulačních smyček. Sledovaná odezva činného výkonu je vykreslena ve druhém grafu, ve kterém je vykreslena i hodnota požadovaného činného výkonu funkcí frekvenčně závislého režimu při nadfrekvenci (modrý průběh). Pro doplnění jsou v třetím grafu vykresleny regulační odchylky příslušných regulátorů.

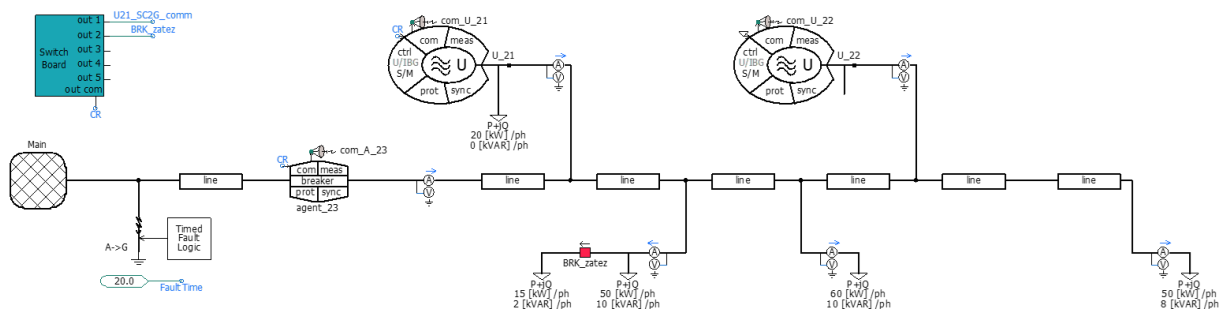
Tímto je prezentována možnost nejen správné chování funkce frekvenčně závislého režimu při nadfrekvenci, ale i otevřená možnost parametrizace modelů s cílem sledování a ověřování vlivů různých nastavení.



obr. 9-1: Simulace odezvy v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci na skokové změny frekvence napěťového zdroje

9.2 Příklad simulace koordinace MAS

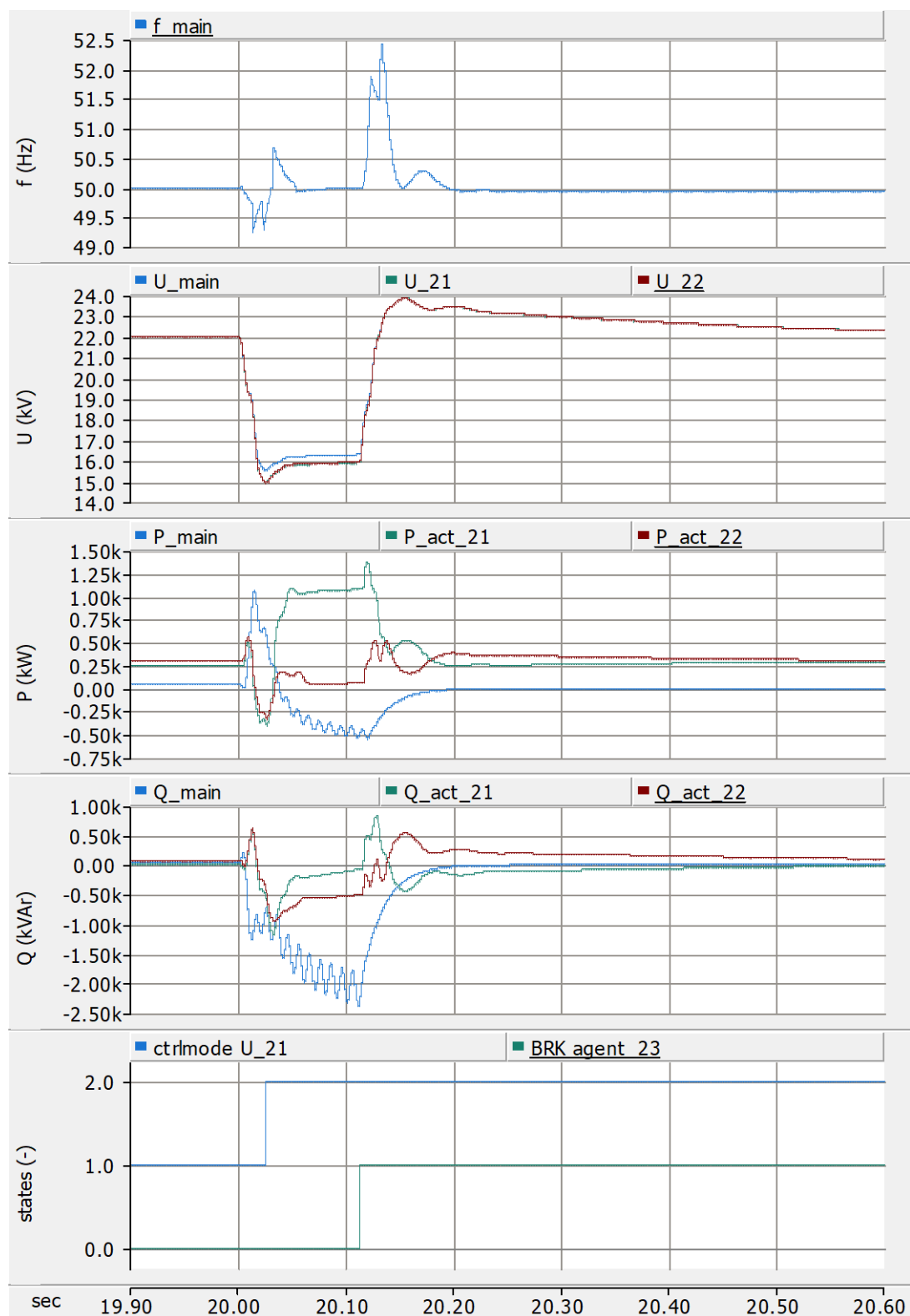
V této podkapitole je prezentován úsek simulace ověřující koordinaci a práci MAS. Schéma na obr. 9-2 zobrazuje topologii testovací sítě daného projektu.



obr. 9-2: Schéma testovací sítě funkcí PQU charakteristik

Časový výsek simulace je zobrazen v grafech na obr. 9-3. Scénář simulace v čase 20 sekund iniciuje zkrat (patrný z průběhu napětí sítě v druhém grafu), na který se zpožděním zareaguje nastavená ochranná funkce agenta (agent_23) povelom na odpojení svého vypínače (pátý graf, zelený průběh). VM s označením U_22 má nastaven pro všechny stavy sítě P-Q regulační režim. U VM s označením U_21 je nastavena schopnost přechodu do U/f regulace v případě vzniku ostrova, kterou VM vyhodnotí sám ochrannou funkcí RoCoF ze vzniklé deviace frekvence. Přechod z režimu P-Q regulace do regulace U/f je patrný z pátého grafu, modrého průběhu. Průběh

přechodového děje je dán jednak nesprávnou koordinací ochran agenta a VM a jednak nepřesnou interpretací činných, resp. jalových výkonů ve třetím, resp. čtvrtém grafu vlivem ovlivnění jejich výpočtu v modulech měření vzniklou změnou frekvence. Celkový průběh však ukazuje schopnost řídicích obvodů obou VM správně reagovat na vzniklou situaci.



obr. 9-3: Průběhy simulace práce MAS – detail přechodu do OP

Právě v těchto a podobných studiích se ukazuje nezbytnost použití nejen správného výpočetního nástroje, ale i potřebnost dynamických modelů spolu s jejich propracovaností a komplexností.

10 ZÁVĚR

Problematika provozu elektroenergetických systémů je dlouhodobě hojně řešeným tématem. Se současnými možnostmi výpočetní techniky a stavem poznání matematické interpretace elektromagnetických dějů se do popředí zájmu dostává možnost alternativně testovat výrobní moduly – jejich vlastnosti a funkce, pomocí počítačových simulací. Správně a kvalitně zpracované modely výrobních modulů jsou však pro toto podmínkou. Robustní a funkčně bohaté modely výrobních modulů pak přináší celou řadu dalších uplatnění, které byly vzaty do úvahy při realizaci v této práci postulovaných modelů.

10.1 Splnění cílů práce

Tato práce si dala za cíl vytvořit a simulacemi validovat dynamické modely 3f nesynchronních výrobních modulů (NVM) a synchronních výrobních modulů (SVM). V úvodních kapitolách je popsán současný stav problematiky, který je potřeba přijmout pro správnou interpretaci výstupů této práce. Praktické kapitoly jsou zaměřeny na popis požadavků a popis realizovaných funkcí dynamických modelů, na něž navazuje jejich validace, ve které jsou zahrnuty všechny relevantní funkce, které jsou definovány RfG, PPDS, ČSN EN 50549 a ČSN EN 50538. Právě požadavky na simulace souladu definované RfG jsou jednou z oblastí, pro které mohou modely plnit účel. Jde o do vysoké míry univerzální modely, které reprezentují dvě základní skupiny zdrojů – NVM (měničové zdroje) a SVM (synchronní generátory). Třetím modelem VM je zdroj reprezentovaný ideálním napětíovým zdrojem, jehož výhodou je nižší výpočetní náročnost při zachování vlastností NVM či SVM v rámci mnoha typů simulací.

Druhým stěžejním bodem této práce byla realizace modelu agenta, který nevychází z konkrétních legislativních definic (z důvodu jejich absence), nýbrž z obecných požadavků a definic vlastností různých typů agentů, které mohou být uvažovány a které se mohou v rámci provozu sítě uplatnit. Tímto je otevřena problematika multiagentních systémů (MAS), které jsou v podstatě funkčními prvky tzv. chytrých sítí nebo lépe řečeno prvky, které se s implementací zejména komunikačních a digitalizovaných technologií uplatňují v čím dál větší míře v rámci řešení provozu sítí. Práce nabízí nejen zmapování potenciálu MAS, ale i jejich návaznost do konkrétních struktur řízení VM v rámci synchronních a ostrovních provozů. Aby vlastnosti a funkce MAS mohly být pomocí prezentovaných modelů plně simulovány, nechybí u všech relevantních modelů komunikační vrstva (spolu s popisem její filozofie), která umožňuje skutečnou implementaci libovolných algoritmů řízení či různých úrovní inteligence do simulačního prostředí programu PSCAD.

Všechny vytyčené cíle této práce byly splněny.

10.2 Shrnutí poznatků a přínosů práce

Pro samotnou realizaci cílů práce bylo nutné pojmut celou řadu dílčích témat, které se vážou ke komplexnímu výstupu této práce. Především pak bylo nutné provázat všechna dotčená dílčí témata do rámce konstrukce, vlastností a funkcí postulovaných modelů. Práce tak přináší jednak popis současného stavu mnoha dílčích elementů problematiky a úvahy nad dalším vývojem, ale jednak definuje skutečné požadavky na modely VM tak, jak je nutné je chápat a definovat. Vychází

se nejen z popisu dílčích elementů v současné odborné literatuře, ale zejména z vlastních úvah nad požadovanou funkcí modelů s ohledem na širokou škálu jejich využití.

Při realizaci modelů zdrojů a agenta byly vždy vzaty do úvahy různé možné stavy provozu. U VM se jedná konkrétně v podstatě o čtyři režimy řízení, které se podařilo realizovat, a to včetně samozřejmých návazností přechodů mezi nimi, spolu s ošetřením tzv. režimu sledování, který se uplatňuje v daném u čase nevyužívaných regulačních režimů. S ohledem na robustnost prezentovaných modelů a s ohledem na provoz MAS v různých stavech sítě jsou v modelech VM implementovány řídicí algoritmy nejen pro režim klasického synchronního provozu – P-Q regulace (režim slave), ale i řídicí algoritmy, schopny realizovat řízení v rámci ostrovního provozu – U/f regulace (režim pilotního uzlu, režim master). Samozřejmostí je realizace logiky řízení (vč. možností uživatelských nastavení regulátorů) a ošetření přechodů mezi různými typy regulací. Nechybí režim fázování, který dokáže inicializovat zdroj s cílem splnit fázovací podmínky zdroje a sítě, a dále režim resynchronizace, který je schopen realizovat plynulý přechod z U/f regulace do P-Q regulace při současném splnění synchronizačních podmínek. Logika přechodů mezi jednotlivými režimy je uživatelsky snadno nastavitelná, což je jeden z předpokladů pro široké možnosti využití postulovaných modelů. Možnosti nastavení modelů VM jsou doplněny i dalšími užitečnými návaznostmi jako je například speciální nastavení regulace pro najetí na požadovaný výkon po přiřazování zvolenou rampou nárůstu výkonu i vlastním nastavením regulátorů právě pro tento proces – to umožňuje rychlejší dosažení potřebného stavu simulace pro možnosti provádění různých testů, které vycházejí právě z ustáleného provozního stavu.

Do struktury řízení VM je implementována řada funkcí, které se vážou nejen k požadavkům na VM dle RfG, (jako jsou např. frekvenčně závislý režim; frekvenčně závislý režim při podfrekvenci a nadfrekvenci; regulace s cílem obnovení frekvence; přechod do provozu na vlastní spotřebu; regulace činného výkonu, jalového výkonu, účinníku a napětí dle požadovaných hodnot; dodávka rychlého poruchového proudu (u NVM); a schopnost zajišťovat umělou setrvačnost (u NVM)), ale které se vážou i k dalším požadavkům na VM dle PPDS, ČSN EN 50549 a ČSN EN 50538 (jako jsou např. různé varianty PQU řízení).

Pro realizaci modelů bylo koncipováno a definováno modulové uspořádání, které tak rozděluje model na dílčí celky. Každý celek – modul, má definovanou svoji úlohu a má jasně definované hranice. Přínosem tohoto řešení je rozčlenění komplexního modelu na jednotlivé části, které lze snadněji popsat, nastavovat a případně modifikovat či dokonce nahrazovat alternativami podle potřeb uživatele. Nespornou výhodou a přínosem je možnost uplatnění některých modulů nebo jejich částí ve více modelech.

Minoritní část činnosti byla věnována i vytvoření dalších pomocných modelů, které nejsou přímo popisovány v rámci této práce (modely vedení, odbočkového transformátoru atd.) Model, který však bylo nutné předložit je model sítě, který dokáže reprezentovat nadřazenou síť nebo zbytek sítě pro různé typy simulací, včetně nastavitelných vlastností jako tvrdost sítě – impedance sítě, výkonové číslo, deaktivace primární regulace frekvence a činného výkonu atd.

Práce jako celek přináší ucelenou strukturu počítačových modelů zakomponovanou do simulačního prostředí programu PSCAD, která pracuje jako komplexní nástroj pro studium celé řady dějů a stavů provozu elektrické sítě.

10.3 Význam a využití dosaženého stavu práce

Postulované modely nalézají uplatnění v rámci široké škály studií, které lze provádět s jejich využitím. Hlavní devizou modelů VM je jejich implementace do simulačního prostředí programu PSCAD, které je primárně určeno pro tzv. dynamické simulace. Možnosti počítačových výpočtů elektromagnetických přechodných jevů v časové oblasti je nutné pro správnou interpretaci různých jevů, dějů a stavů, které mohou v elektroenergetickém systému nastat.

Primární zaměření využití modelů bylo směřováno k uplatnění při simulacích souladu podle RfG. Nicméně byla by škoda zaměřovat se v rámci funkcí a vlastností modelů pouze na tuto oblast. S využitím přesahu práce do oblasti řízení sítí v různých provozních stavech, implementace mezimodelové komunikační vrstvy, realizace dalších modelů prvků elektrizační soustavy atd., předurčuje výstupy této práce k širokým možnostem využití.

Možnosti využití postulovaných modelů daleko přesahuje rámec popisovaný v praktických kapitolách této práce. Díky použité koncepci architektury, rozmanitosti a škále aplikovaných funkcí modelů a díky možnostem simulačního prostředí programu PSCAD (simulace v časové rovině – tzv. dynamické simulace), lze výstupy této práce použít pro studium celé řady dějů a stavů, které mohou během provozu sítě nastat. Z pohledu load-flow analýz lze sledovat chování a práci výroben při různém nastavení PQU charakteristik, při různých režimech provozu soustavy (různých parametrech napětí a frekvence) a optimalizovat tak např. provoz z pohledu konkrétního ukazatele (např. ztrát, kvality elektrické energie apod.). Z pohledu dynamických dějů lze studovat chování a práci zdrojů při jejich různém nastavení nejen obecných parametrů, ale i při různém nastavení měřicích a řídicích obvodů, ochranných funkcí, komunikace atd. To vše během různých dynamických dějů, jako je např. proces fázování, změny žádaných hodnot parametrů, zkratů a různé poruchy a na ně navazující pokusy o přechody do ostrovních provozů apod. V neposlední řadě mohou postulované modely pomoci koordinovat nastavení fungování tzv. chytrých sítí, díky aplikované vrstvě komunikace, pomocí níž lze snadno aplikovat jakýkoliv algoritmus řízení sítě, ať už se jedná o lokální síť nebo velký energetický celek.

S realizací komunikační vrstvy modelů lze zkoumat i různé formáty řízení zdrojové základny sítě, které se mohou odkazovat právě na komunikaci, anebo na uplatnění síťových parametrů jako je zejména velikost napětí a její frekvence se vzájemnými vazbami mezi VM v dané síti. Dalším příkladem využití může být např. zakomponování agentů do struktury řízení zdrojů prostřednictvím komunikace, jejich měření skrze nadřazený řídicí (dispečerský) systém nebo přímo komunikací s příslušným VM.

10.4 Další postup

Dalším postupem pro rozšíření možností simulací by měla být tvorba modelu akumulačního systému. Pro ten je možné využít již vytvořenou architekturu modelů a lze použít i konkrétní moduly (měření, ochrany, komunikace). Další cestou možného postupu je sestavení dalších používaných řídicích algoritmů výrobních modulů. Opět lze použít některé funkce, které jsou již definovány a sestaveny v rámci této práce (funkce tvorby žádaných hodnot výkonů, algoritmy PQU regulací, frekvenčně závislé režimy atd.). Samozřejmě se nabízí možnost implementace jakékoliv změny či inovace řídicích algoritmů. Díky možnostem programu PSCAD by bylo možné aplikovat, resp. simulovat aplikaci různých algoritmů chytrých sítí, jako např. genetické algoritmy apod., s jejichž aplikací je v odborné literatuře počítáno v rámci provozu budoucích sítí. Tato možnost se dá rozšířit pro další generaci modelu agenta, který mohl disponovat určitou vyšší formou inteligence a tím i

schopností rozhodovat o stavu provozu sítě na obou stranách svého vypínače. Navíc, model agenta lze rozšířit i o další možnosti ovlivnění sítě – integrace jím řízeného kompenzátoru v jeho místě připojení, který by uměl regulovat parametry sítě v požadovaném rozsahu v závislosti na nastavených požadavcích.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Nařízení Komise (EU) 2016/631: ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě.*
- [2] *Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 4 Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy.* ročník 2018.
- [3] ČSN EN 50549-1 (330127). *Požadavky na paralelně připojené výrobní sítě s distribučními sítěmi – Část 1: Připojení k distribuční síti nn – Výrobní do typu B včetně.* 2019.
- [4] ČSN EN 50549-2 (330127). *Požadavky na paralelně připojené výrobní sítě s distribučními sítěmi – Část 2: Připojení k distribuční síti středního napětí – Výrobní do typu B a včetně.* 2019.
- [5] *Kodex přenosové soustavy: Část I. Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy.* ročník 2020.
- [6] *Metodika ověření souladu s požadavky RfG pro výrobní moduly typu C a D: 2.fáze: Simulace souladu pro synchronní a nesynchronní výrobní moduly.* 2020.
- [7] *Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon).* ročník 2000, Zákon 458/2000 Sb.
- [8] *Vyhláška o dispečerském řízení elektrizační soustavy a o předávání údajů pro dispečerské řízení.* 2010, Vyhláška 79/2010 Sb.
- [9] ČSN EN 50438 ed. 2 (330127). *Požadavky na paralelní připojení mikrogenerátorů s veřejnými distribučními sítěmi nízkého napětí.* 2014.
- [10] *Modelling of inverter-based generation for power system dynamic studies.* 2018. ISBN 978-2-85873-429-0.
- [11] MARTINS, José. *Activities of the Joint Working Group CIGRE C4/C6.35/CIRED: Modelling and Dynamic Performance of Inverter Based Generation in Power System Transmission and Distribution Studies.* 1st International Conference on Large-Scale Grid Integration of Renewable Energy in India. 2017.
- [12] SU, Liping, Guojie LI a Zhijian JIN. *Modeling, control and testing of a voltage-source-inverter-based microgrid.* 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). IEEE, 2011, 2011, 724-729. ISBN 978-1-4577-0364-5. Dostupné z: doi:10.1109/DRPT.2011.5993987
- [13] LOPES, J.A.P., C.L. MOREIRA a A.G. MADUREIRA. *Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation.* IEEE Transactions on Power Systems. 2006, 21(2), 916-924. ISSN 0885-8950. Dostupné z: doi:10.1109/TPWRS.2006.873018
- [14] MÁŠLO, Karel. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy.* [Praha]: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.
- [15] ZHANG, Zhaoyun, Wei CHEN a Zhe ZHANG. *A New Seamless Transfer Control Strategy of the Microgrid.* The Scientific World Journal. 2014, 2014, 1-9. ISSN 2356-6140. Dostupné z: doi:10.1155/2014/391945
- [16] WEISS, Gerhard. *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Modern Approach to Artificial Intelligence.* Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1999. ISBN 0-262-23203-0.
- [17] JAMBORSALAMATI, Pouya, Abhinav SADU, Ferdinanda PONCI a Antonello MONTI. *Implementation of an agent based distributed FLISR algorithm using IEC 61850 in active*

- distribution grids. *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. IEEE, 2015, 2015, 606-611. ISBN 978-1-4799-9982-8. Dostupné z: doi:10.1109/ICRERA.2015.7418485
- [18] SHERBILLA, Nader. Smart fault management scheme for electrical distribution networks. *24th International Conference on Electricity Distribution*. Glasgow, UK: CIRED 2017, 2017, s. 1-5. ISBN 978-1-78561-483-5. ISSN 2032-9644.
- [19] ANAND, M.P, Weerakorn ONGSAKUL, Jai Govind SINGH a Sajjad GOLSHANNAVAZ. Economic operational Scheduling of a smart distribution network considering demand response, electric vehicles and network reconfiguration. *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*. IEEE, 2015, 1-6. ISBN 978-1-4799-7693-5. Dostupné z: doi:10.1109/PTC.2015.7232645
- [20] GHORBANI, J. A Decentralized Multi-Agent System Design for Power System Automation. *Multi-Agent Systems: Advances in Energy Research*. 22. Nova Science Publishers, 2015, s. 3-38. ISBN 978-1-63483-230-4.
- [21] LAMMERT, Gustav, YAMASHITA, Koji, RENNER, Herwig, MARTINEZ, Sergio, POURBEIK, P., CIAUSIU, Florin, PABON, Luis, BRAUN, Manfred. *International Industry Practice on Modelling and Dynamic Performance of Inverter Based Generation in Power System Studies*. Cigre Science & Engineering. 2017. Vol. 8. pp. 25-37.
- [22] *West Virginia Super Circuit Project: Final Report*. Monongahela Power, 2014, 343 s.
- [23] ANANDA, Stephanus, Jyh-Cherng GU, Ming-Ta YANG, et al. Multi-Agent System Fault Protection with Topology Identification in Microgrids. *Energies*. 2017, 10(1). ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en10010028
- [24] ELLIOTT, R.T., A. ELLIS, P. POURBEIK, J.J. SANCHEZ-GASCA, J. SENTHIL a J. WEBER. *Generic photovoltaic system models for WECC – A status report*. IEEE, 2015, 2015, 1-5. ISBN 978-1-4673-8040-9. Dostupné z: doi:10.1109/PESGM.2015.7285992
- [25] LAMMERT, Gustav, Luis David Pabon OSPINA, Pouyan POURBEIK, Dirk FETZER a Martin BRAUN. Implementation and validation of WECC generic photovoltaic system models in DIgSILENT PowerFactory. *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*. IEEE, 2016, 2016, 1-5. ISBN 978-1-5090-4168-8. Dostupné z: doi:10.1109/PESGM.2016.7741608
- [26] LAMMERT, Gustav, Koji YAMASHITA, Luis OSPINA, Herwig RENNER, Sergio VILLANUEVA, Pouyan POURBEIK, Florin-Emilian CIAUSIU a Martin BRAUN. *Innovation in the Power Systems industry: International industry practice on modelling and dynamic performance of inverter based generation in power system studies*. vol. 8. Paris: CIGRE, 2017. ISSN 1286-1146.
- [27] IEC 61400-27-1:2015. *Wind turbines – Part 27-1: Electrical simulation models – Wind turbines*. 2015.
- [28] HONRUBIA-ESCRIBANO, Andres, Francisco JIMENEZ-BUENDIA, Emilio GOMEZ-LAZARO a Jens FORTMANN. *Field validation of a standard Type 3 wind turbine model for power system stability, according to the requirements imposed by IEC 61400-27-1*. IEEE, 2018, 2018, 1-1. ISBN 978-1-5386-7703-2. Dostupné z: doi:10.1109/PESGM.2018.8586203
- [29] LIU, Y. J., P. A. CHEN a H. J. SU. Power Control Characteristic of Generic Type-3 Wind Turbine Model Based on IEC 61400-27-1 Standard. *2019 International Conference on*

- Engineering, Science, and Industrial Applications (ICESI)*. IEEE, 2019, 2019, 1-5. ISBN 978-1-7281-2174-1. Dostupné z: doi:10.1109/ICESI.2019.8862992
- [30] GOKSU, Omer, Mufit ALTIN, Jens FORTMANN a Poul E. SORENSEN. Field Validation of IEC 61400-27-1 Wind Generation Type 3 Model With Plant Power Factor Controller. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2016, 31(3), 1170-1178. ISSN 0885-8969. Dostupné z: doi:10.1109/TEC.2016.2540006
- [31] FAVUZZA, S., M. G. IPPOLITO, R. MUSCA, M. S. NAVARRO, NAVIA, E. Riva SANSEVERINO, G. ZIZZO a M. BONGIORNO. System Stability of a Small Island's Network with Different Levels of Wind Power Penetration. *2018 IEEE 4th International Forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI)*. IEEE, 2018, 2018, 1-6. ISBN 978-1-5386-6282-3. Dostupné z: doi:10.1109/RTSI.2018.8548355
- [32] VILLENA-RUIZ, Raquel, Alberto LORENZO-BONACHE, Andrés HONRUBIA-ESCRIBANO, Francisco JIMÉNEZ-BUENDÍA a Emilio GÓMEZ-LÁZARO. Implementation of IEC 61400-27-1 Type 3 Model: Performance Analysis under Different Modeling Approaches. *Energies*. 2019, 12(14). ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en12142690
- [33] SORENSEN, Poul, Jens FORTMANN, Francisco BÚENDÍA, John BECH, A. MORALES a Chavdar IVANOV. Final Draft International Standard IEC 61400-27-1: Electrical simulation models of wind turbines November 2014. *13th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants*. Berlin, Germany, 2014, s. 1-6.
- [34] *WECC Wind Power Plant Dynamic Modeling Guide*. WECC Renewable Energy Modeling Task Force, 2014.
- [35] *WECC PV Power Plant Dynamic Modeling Guide*. WECC Renewable Energy Modeling Task Force, 2014.
- [36] FORTMANN, Jens, Pouyan POURBEIK, Nicholas MILLER, Yuriy KAZACHKOV, John BECH, Björn ANDRESEN a Poul SORENSEN. Wind Plant Models in IEC 61400-27-2 and WECC – latest developments in international standards on wind turbine and wind plant modeling. *14th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants*. 2015, s. 1-7.
- [37] *PSCAD Knowledge Base: Wind Power* [online]. Manitoba Hydro International, 2019 [cit. 2020-08-16]. Dostupné z: <https://www.pscad.com/knowledge-base/topic-47/v->
- [38] *PSCAD Knowledge Base: Solar Power* [online]. Manitoba Hydro International, 2019 [cit. 2020-08-16]. Dostupné z: <https://www.pscad.com/knowledge-base/topic-48/v->
- [39] *Power-Generating Modules compliance verification: Power-Generating Modules type B, C and D according to NC RfG and Netcode elektriciteit*. Version 1.2.1. Netbeheer Nederland, 2020.

PUBLIKACE AUTORA

- [A1] KOPIČKA, M.; TOMAN, P. The development of Smart Grids pilot projects in Europe. In *Proceedings of the 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2013*. First. Košice, Slovak Republic: Technical University of Košice, 2013. s. 256-259. ISBN: 978-80-553-1441- 9.
- [A2] TOPOLÁNEK, D.; TOMAN, P.; ORSÁGOVÁ, J.; KOPIČKA, M. The Evaluation of Overvoltage During Short-Time Additional Earthing of Healthy Phase for Fault Location in MV Networks. In *The 12th International Conference on Developments in Power System Protection DPSP2014*. Six Hills Way Stevenage Hertfordshire SG1 2AY UK: The Institution of Engineering and Technology IET, 2014. s. 1-6. ISBN: 978-1-84919-834-9.
- [A3] KOPIČKA, M.; DRÁPELA, J.; TOPOLÁNEK, D. Voltage Regulation Optimization in Low Voltage Network Based on Voltage Quality Index. In *Proceedings of the 2014 15 th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Brno, Czech Republic: Brno Univ Technol, Fac Elect Engn & Commun, 2014. s. 1-6. ISBN: 978-1-4799-3807-0.
- [A4] KOPIČKA, M.; PTÁČEK, M.; TOMAN, P. Analysis of the Power Quality and the Impact of Photovoltaic Power Plant Operation on Low-Voltage Distribution Network. In *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)*. 2014. Rakvere, Estonia: 2014. s. 99-102. ISBN: 978-1-4799-5020-1.
- [A5] KOPIČKA, M.; TOPOLÁNEK, D.; TOMAN, P.; SÍTAŘ, M. *Hodnocení zemnicích soustav a dotykových napětí v okolí odlehklých, příměstských a městských distribučních transformátorů*. 2015. s. 1-53.
- [A6] HROUDA, J.; KYSNAR, F.; KOPIČKA, M.; DRÁPELA, J. Knihovna prvků sítě pro modelování dynamických vlastností OZE v DS v softwaru PSCAD. In *Sborník konference ČK CIRED 2015*. 1. České Budějovice: EGC České Budějovice, 2015. s. 1-18. ISBN: 978-80-905014-4-7.
- [A7] KOPIČKA, M.; SÍTAŘ, M.; TOPOLÁNEK, D.; DVOŘÁK, J. Měření rozložení potenciálu povrchu země u zemnicích soustav transformoven VN/ NN a dotykových napětí v okolí stanic. In *Sborník konference ČK CIRED 2015*. 1. České Budějovice: EGC České Budějovice, 2015. s. 1-13. ISBN: 978-80-905014-4- 7.
- [A8] DRÁPELA, J.; KOPIČKA, M. *Studie poměrů v napájecím systému membránové elektrolyzy SPOLCHEMIE pro návrh kompenzačně- filtrační jednotky*. Brno: VUT v Brně, 2015. s. 1-39.
- [A9] TOMAN, P.; MLÝNEK, P.; BÁTORA, B.; KOPIČKA, M.; TOPOLÁNEK, D. *Analýza možností a přínosů breaker/limiter*. 2016.
- [A10] PTÁČEK, M.; KOPIČKA, M.; PAVELKA, T.; RADIL, L. Modelling of Small Wind Power Plant with Savonius-Darrieus Rotor in the PSCAD. In *Proceedings of the 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. first. Prague, Czech Republic: Czech Technical University in Prague, 2016. s. 204-209. ISBN: 978-1-5090-0907-7.

- [A11] DRÁPELA, J.; KOPIČKA, M. *Analýza síťových poměrů v napájecím systému membránové elektrolyzy FORTISCHEM a.s., Nováky, SK, pro návrh kompenzačně- filtrační jednotky.* Brno: CVVOZE, FEKT, VUT v Brně, 2016. s. 1-35.
- [A12] TOPOLÁNEK, D.; TOMAN, P.; ORSÁGOVÁ, J.; VYČÍTAL, V.; KOPIČKA, M. *Analýza vlivu přizemnění postižené fáze na velikost dotykových a krokových napětí.* 2017. s. 1-79.
- [A13] DRÁPELA, J.; KOPIČKA, M. *Simulace provozu konečného řešení napájecího systému membránové elektrolyzy FORTISCHEM a.s., Nováky, SK, pro ověření návrhu a korekci kompenzačně-filtrační jednotky.* Brno: CVVOZE, FEKT, VUT v Brně, 2017. s. 1-20.
- [A14] DRÁPELA, J.; KOPIČKA, M. *Analýza síťových poměrů v napájecím systému měnárny SLOVALCO a.s., Žiar nad Hronom, SK, pro návrh systému sedmého agregátu s kompenzačně-filtrační jednotkou.* Brno: VUT, 2018. s. 1-54.
- [A15] TOPOLÁNEK, D.; DRÁPELA, J.; VYČÍTAL, V.; KOPIČKA, M., BLAHŮŠEK, R., JURÍK. M. Optimalizace nastavení Q(U) a P(U) charakteristik FVE připojených do soustavy NN. In *Sborník konference ČK CIRED 2019.* 1. České Budějovice: EGC České Budějovice, 2019. s. 1-15. ISBN: 978-80-905014-8-5.
- [A16] KOPIČKA, M.; TOMAN, P.; DRÁPELA, J.; PTÁČEK, M.; NOVÁK, V. Dynamic Modelling Approach to Assess Control Strategies of Distributed Energy Resources. In *CIRED 2019, 25th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution.* Madrid, UK: CIRED, 2019. s. 1-5. ISBN 978-2-9602415-0-1.

Abstract

The dissertation thesis deals with the design of the concept and implementation of models of electrical power system elements with regard to the potential of the use of computer programs – simulations. The solution of the thesis focuses on the compliance simulations of power-generating modules according to RfG (Requirements for Generators), as a document which setting out the requirements for the connection of power-generating facilities and also focuses on the issue of smart grids and MAS (Multi-Agent Systems) respectively. The framework of the thesis is thus defined by the area of requirements for power-generating modules according to legislative requirements (not only RfG, but also related standards incl. DSC (Distribution System Code), CSN EN 50438 and CSN EN 50549), requirements for agent functionalities and power-generating module abilities to operate in synchronous and island operation, including transitions between them, the process of synchronization (phasing) and communication between the individual elements of the power system.