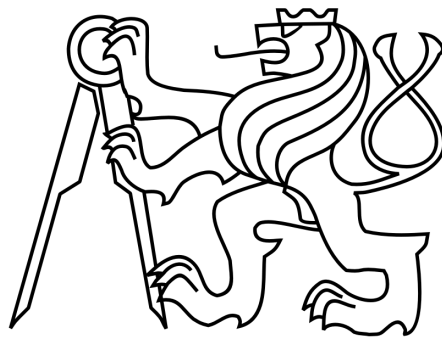


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Distribuovaná výroba energie
a Grid Codes
(modelování)**

2022

Bc. Jan Zmatlík

Název práce: Distribuovaná výroba energie a Grid Codes - modelování

Autor: Bc. Jan Zmatlík

Katedra (ústav): Katedra elektroenergetiky

Vedoucí diplomové práce: Dr. ing. Jiří Gerlich, ComAp, a.s.

e-mail vedoucího: jiri.gerlich@comap-control.com

Abstrakt Tato práce se zabývá modelováním poruchových jevů, které jsou pokryté problematikou Grid Codes, v distribučních sítích z hlediska řízení malých, decentralizovaných zdrojů energie, zejména motorgenerátorů a kogeneračních jednotek. Modelování probíhá v systému REXYGEN na již existujícím matematickém modelu spalovacího motoru a modelu standardního synchronního generátoru v přístupu hardware-in-loop (HIL) v podobě existujících řídicích jednotek firmy ComAp a.s. Samotné modelování probíhá povelováním parametrů modelu pomocí REST API a skriptů v jazyce Python 3.x v reálném čase. Výstupem této práce je ověření, zda je tento přístup možno použít k ověření shody řídicích systému s Grid Codes.

Klíčová slova: Grid Codes, modelování, HIL, REXYGEN, REST API, Python

Title: Distributed power generation and Grid Codes - modelling

Author: Bc. Jan Zmatlík

Department: Department of Electroenergetics

Supervisor: Dr. ing. Jiří Gerlich, ComAp, a.s.

Supervisor's e-mail address: jiri.gerlich@comap-control.com

Abstract This thesis deals with modelling of fault events covered by Grid Codes, in power distribution networks with main focus on controlling small, de-centralized power plants, most notably gensets and CHP units. Modelling will be performed in REXYGEN system on already existing combustion engine model with standard synchronous generator model with hardware-in-loop (HIL) genset control units from ComAp a.s. Modelling itself will be performed by manipulating parameters and values via REST API by means of Python 3.x scripts in real time. Output of this thesis is if this approach might be used to verify conformity of genset control units with Grid Codes.

Keywords: Grid Codes, modelling, HIL, REXYGEN, REST API, Python

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zmatlík** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **373938**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Distribuovaná výroba energie a Grid Codes - modelování

Název diplomové práce anglicky:

Distributed power generation and Grid Codes - modelling

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technickými specifikacemi podmínek připojení zdrojů distribuované energie z pohledu Grid Codes, rozbor požadavků VDE 4110, IEEE 1547 a jejich důsledky pro řízení distribuovaných zdrojů energie se zaměřením na dieselgenerátory a kogenerační jednotky
- 2) Vypracujte přehled typů provozních topologií distribuované výroby energie a navrhnete jejich modelování v režimech spadajících pod Grid Codes
- 3) Praktická realizace simulace hardware-in-loop s využitím produktů firmy ComAp

Seznam doporučené literatury:

ComAp portfolio, manuály a dokumentace:
<https://www.comap-control.com/news/comap-products-compliant-with-the-latest-eu-grid->
<https://www.comap-control.com/products/detail/intelisis-gsc-c#manuals>
Kodex ČEPS:
<https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>
Podmínky připojení generátorů dle ČEZ, E.ON:
[https://www.cezdistribuce.cz/cs/pro-zakazniky/potrebuji-vyresit-ceny-a-podminky/pripojovaci-podminky](https://www.cezdistribuce.cz/cs/pro-zakazniky/potrebuji-vyresit-ceny-a-podminky-pripojovaci-podminky)
- Připojovací podmínky pro výroby
<https://www.egd.cz/predpisy-smlouvy-pro-elektřinu> - Sekce Implementace nařízení EU - Požadavky na připojení nových výroben k DS
Kaskádní poruchy:
<https://www.nationalgrideso.com/information-about-great-britains-energy-system-and-electricity-system-operator-es>
http://ecolo.org/documents/documents_in_english/blackout-nov-06-UCTE-report.pdf
Normy:
VDE 4110
IEEE 1547

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Dr., Ing. Jiří Gerlich, ComAp a.s.

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **16.09.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **04.01.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2023**

Dr., Ing. Jiří Gerlich
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 4. ledna 2022

Jan Zmatlík

Abstrakt	ii
Zadání práce	iii
1 Úvod	1
1.1 Kaskádní rozpad části sítě, Velká Británie 2019	2
2 Distribuovaná výroba energie	6
2.1 Účel a provedení soustavy	6
2.2 Vazba k přenosové soustavě	8
2.3 Specifika vzhledem k OZE	8
2.4 Specifika vzhledem k motorgenerátorům	10
2.5 Grid Codes - úvod	11
3 Grid Codes	12
3.1 Skladba standardů, povinnosti konformity	12
3.2 Detailní požadavky podmínek pro připojení	13
3.2.1 Přesnosti měření a podmínky připojení	13
3.2.2 Požadavky na připojení do distribuční sítě	15
3.2.3 Typy ochran a jejich nastavení	17
3.2.4 Fault Ride-Through	19
3.3 Detailní požadavky na řízení činného a jalového výkonu	21
3.3.1 Aktivní řízení P na základě frekvence sítě	22
3.3.2 Limitace P zásahem operátora distribuční sítě	22
3.3.3 Omezení P ve prospěch Q	23
3.3.4 $Q(U)$	24
3.3.5 $Q(P_{\text{mom}})$	25
3.3.6 $Q(U_{\text{lim}})$	25
3.3.7 Konstantní účinník $\cos\varphi$	26
4 Zdroje a topologie	27
4.1 Motorgenerátor	27
4.2 Ostrovní provoz	28
4.3 Jeden genset, pracující do sítě	28
4.4 Více gensetů, pracujících do sítě	29
4.5 Složitější topologie - H	30

5	Modelování topologií	32
5.1	Prostředí a ekosystém	32
5.1.1	Hardware-in-loop	33
5.1.2	REXYGEN	33
5.1.3	REST API	33
5.1.4	Python	34
5.2	Modelování	34
5.2.1	Hlavní účel modelů ComAp	34
5.2.2	Spalovací motor	35
5.2.3	Synchronní generátor	35
5.2.4	Síť	36
6	Simulace	37
6.1	Chování modelu	37
6.1.1	Vzorový genset	37
6.1.2	Start gensetu	38
6.1.3	Synchronizace gensetu k síti	39
6.1.4	Zatížení a odlehčení gensetu po rampě	40
6.1.5	Zatížení a odlehčení gensetu bez rampy	41
6.1.6	Zhodnocení chování vzorového gensetu	41
6.2	Výsledky simulací	41
6.2.1	LVRT - povinnost neodpojit zdroj od sítě	42
6.2.2	LVRT - povolení odpojit zdroj od sítě	43
6.2.3	Aktivní řízení P na základě frekvence	45
6.2.4	RoCoF Ride-Through	46
6.2.5	$Q(U)$	47
6.2.6	$Q(U_{lim})$	48
7	Diskuse	49
7.1	Zhodnocení modelování	49
7.2	Zhodnocení práce s REST API a testovacích skriptů	49
8	Závěr	51
8.1	Seznámení s technickými specifikacemi	51
8.2	Přehled a modelování provozních topologií	51
8.3	Simulace	51
8.4	Doporučení pro další rozvoj	51
8.5	Vize	52

Výroba elektrické energie se za posledních 20 let výrazně změnila. K menšímu množství velkých, centrálních zdrojů energie připojených do přenosové sítě se přidalo velké množství malých, autonomně řízených zdrojů, většinou připojených naopak do distribučních sítí v různých místech. Výkon, instalovaný v menších, decentralizovaných zdrojích energie přestal být vůči celkovému instalovanému výkonu v přenosové i distribuční síti zanedbatelný a v síťových modelech a předpovědních nástrojích (síťových estimátorech) je nutné ho uvažovat. Toky výkonů se tak výrazně zesložily, už není v lidských možnostech dle zkušeností konkrétního operátora sítě odhadnout jejich vývoj a podle toho nastavit výrobu v menším regionu.

Samotná výroba se také mnohem více přizpůsobuje trhu, který začal být velice rozmanitý a tak i velmi složitý, a situace na něm se snadno může výrazně změnit během pouhých několika minut. Kvůli redundanci, údržbě a obecně schopnosti bezpečně pracovat v blízkosti přenosového i distribučního vedení došlo k jejich značnému rozšíření a tak i okamžité topologie přenosových i distribučních sítí se mohou během několika hodin změnit k nepoznání. Masově se rozšířily spínané zdroje pro výpočetní a jinou techniku, což vytváří značnou kapacitní zátěž, navíc neharmonickou, potenciálně s velkými transienty, která se přidává k parazitním kapacitám vedení a zejména kabelových tras, což může výrazně komplikovat možnosti stabilizace napětí v konkrétních uzlech sítě. A do tohoto stavu se připojovaly malé, decentralizované zdroje energie, které se však od sítě odpojovaly při prvních náznacích jakéhokoliv problému a hlavním argumentem byl právě předpoklad zanedbatelně malého instalovaného výkonu v těchto malých zdrojích elektrické energie oproti celkovému instalovanému výkonu v síti. Předpoklad, jež už není nadále splněn.

Jako reprezentativní příklad uveďme lokální výpadek v centrální Anglii v srpnu 2019, kdy došlo vlivem úderu blesku do vedení a následnému jednofázovému zkratu skrz kanál výboje do země ke krátkodobému podpětí. Vlivem tohoto podpětí došlo k odpojení tří významných zdrojů energie v regionu: paroplynové elektrárny Little Barford, větrné farmy Hornsea One¹ a velkého množství instalovaných výkonů v kongeneračních jednotkách. Konfigurace sítě byla tehdy napočítána tak, aby ztráta libovolného zdroje neohrozila stabilitu sítě. Odpojení těchto zdrojů v součtu znamenaly ztrátu většího výkonu než byla rezerva a muselo tak dojít k odpojení části zákazníků, aby byla zachována stabilita sítě.

¹V době sepisování této práce probíhají finální práce na rozšíření větrné farmy Hornsea v projektu Hornsea Two (zdroj [19]), proto je explicitně v textu označována část relevantní v roce 2019 jako Hornsea One.

Klíčovým faktem bylo, že větrná farma Hornsea One měla zůstat připojena. Detekované podpětí nebylo takového charakteru, aby se následné oscilace napětí nezatlumily a nebylo možné obnovit předporuchový provoz. Kvůli chybě v softwaru se tak nestalo a došlo k nepovolenému odpojení. Paroplynová elektrárna Little Barford zaznamenala technické problémy a měla tak dle platných nařízení právo se odpojit a provést nouzovou odstávku, byť samotné vyhlášení těchto technických problémů bylo vzhledem k okolnostem dle dostupných zdrojů[4, 5] přinejmenším podezřelé.

Stejně tak při aktivaci nouzového odpojení vlivem podfrekvence nedošlo k odpojení takového množství výkonu, jak se předpokládalo. Důvodů mohlo být vícero, jedním z nich může být i fakt, že kogenerace se připojují obvykle v nejbližším možném místě instalace do distribuční soustavy. Tento instalovaný výkon byl pravděpodobně odpojen společně se zátěží[3, 4].

Tento příklad je pouze špičkou ledovce podobných, méně závažných poruch zejména v distribuční síti, které nicméně mohly vyústit ve velice nepříjemné situace pouze tím, že v kritický okamžik nedošlo k zásahu, jež by tuto situaci úspěšně odvrátil.

Což nás přímo dostává k otázce, co jsou vlastně Grid Codes, jaký je jejich smysl a účel? Jedná se ve své podstatě o sadu nařízení a pravidel, jež mají pomoci ke stabilitě distribuční a tím i přenosové sítě, úpravou chování decentralizovaných zdrojů energie v krizových situacích. Tyto úpravy mají tedy za cíl:

- Tlumit nežádoucí jevy v síti
- Přispívat k primární regulaci frekvence i napětí v místě připojení
- Přispívat celkově ke stabilitě distribuční a tím i přenosové sítě

Pro Evropskou Unii vstoupily Grid Codes v platnost v dubnu 2019 dle nařízení komise EU 2016/631, čili v současné době jsou již závazné pro všechny členské země EU s dodatkem, že jednotlivé členské země mohou tyto podmínky dle svého uvážení zpřísnit.

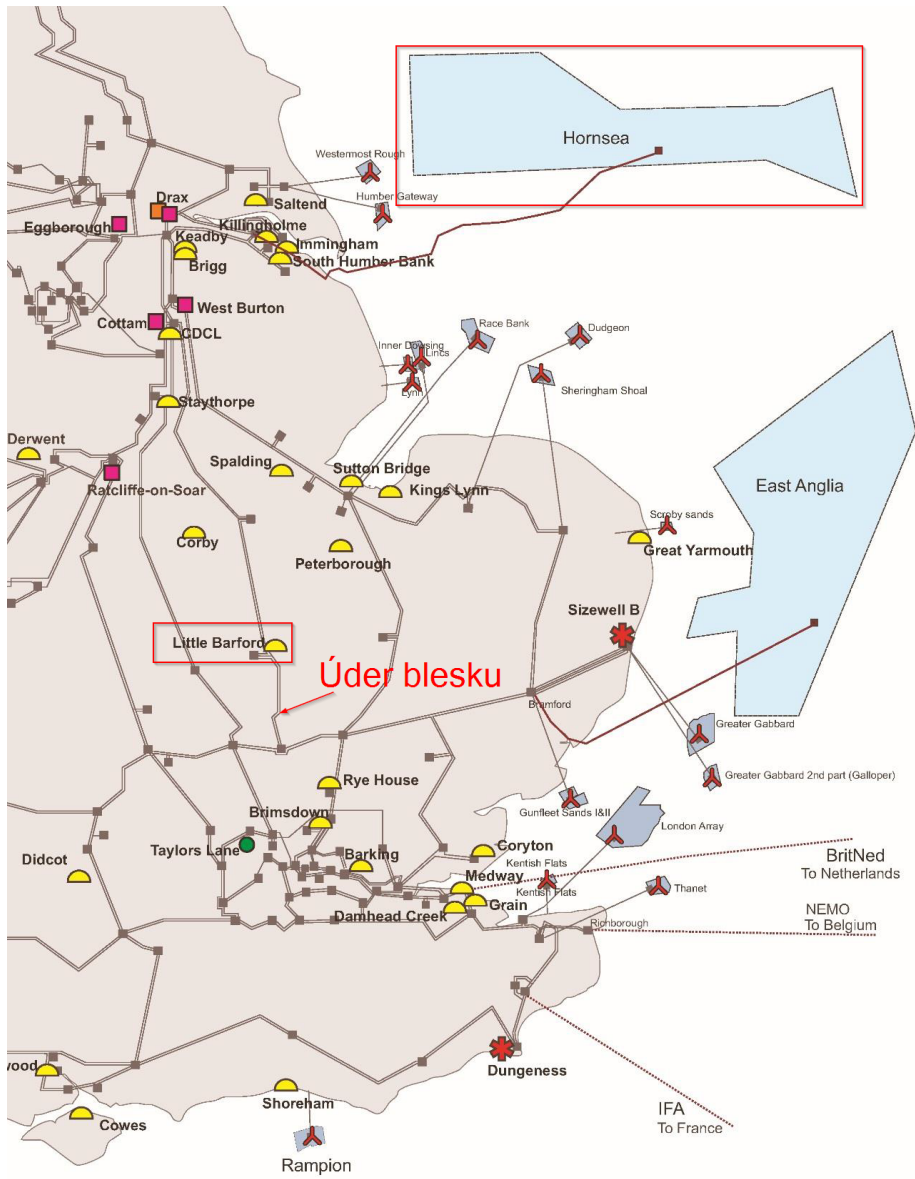
Vzhledem k tomu, že firma ComAp a.s., která vyvíjí řídicí systémy pro motorgenerátory i kogenerační jednotky, je tímto nařízením také dotčena, se tak naskytla příležitost vypracovat tuto diplomovou práci nad konkrétními produkty, jež musí být ve shodě s tímto nařízením.

V následující kapitole se podíváme blíže na výše zmíněnou událost, která byla vybrána jako reprezentativní příklad ze dvou velice dobrých důvodů[3–6]:

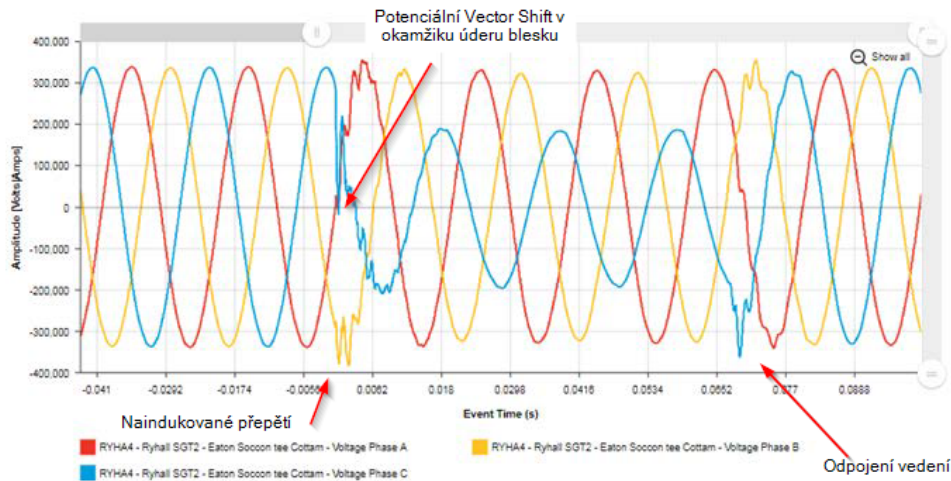
1. Jedná se bez jakýchkoliv pochyb ze strany vyšetřovatelů o porušení Grid Codes u provozovatele (operátora) větrné farmy Hornsea One.
2. Úroveň detailu, popsaná týmem vyšetřovatelů události ve finální zprávě o události, stejně tak srozumitelnost a její kvalita, je velice, až neobvykle vysoká.

1.1 Kaskádní rozpad části sítě, Velká Británie 2019

V pátek 9. srpna 2019 v odpoledních hodinách došlo k úderu blesku do vedení Eaton Socon - Wymondley Main (viz. mapa lokality na obrázku 1.1). Zásahem ochrany došlo k odpojení vedení na obou stranách, během kterých poruchový stav odezněl. Vlivem tohoto jevu došlo - zásahem LoM ochrany Vector Shift, viz. graf 1.2 - k odpojení cca 500 MW instalovaného výkonu v distribuovaných zdrojích energie. Takováto situace je vcelku běžná a za normálních okolností by nedošlo k jakémukoliv ovlivnění konečných zákazníků.



Obrázek 1.1: Mapa lokality, ve které došlo k rozpadu sítě, klíčové lokality vyznačeny (zdroj: [4, 6])



Obrázek 1.2: Časový průběh okamžitých hodnot napětí v rozvodně Ryhall, 9. srpna 2019 (zdroj [4])

Bezprostředně před touto událostí byla síť dle matematických modelů optimalizována tak, aby bylo možné bezpečně přestát ztrátu jedné import/export trasy do Anglie o výkonu 1000 MW. Tato informace je naprosto zásadní pro další rozbor události.

Jak je vidět z grafu 1.3, napětí na PCC větrné farmy Hornsea One pokleslo vlivem této poruchy na cca 0,95 p.u.², poté došlo k návratu na jmenovitou hodnotu a k následným oscilacím v rozsahu cca do 0,05 p.u. Při porovnání s požadavkem na tzv. Fault Ride-Through (details v další části práce) je zřejmé, že větrná farma Hornsea One neměla povolení se odpojit od sítě a naopak měla povoleno snižovat po rampě dočasně svůj výkon tak, aby ani kvůli oscilacím napětí nemohlo dojít k odpojení na nadproudovou či zkratovou ochranu.

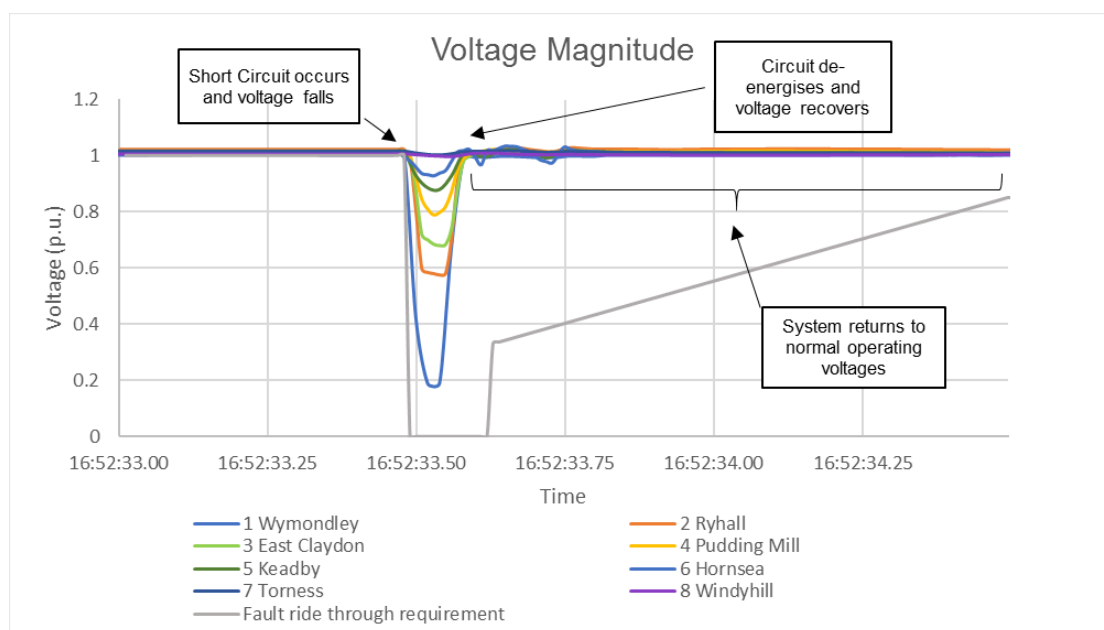
Přesto došlo k téměř okamžitému odpojení dalších cca 740 MW. Už v tuto chvíli ztráta výroby přesáhla plánovanou rezervu. Další problematický stav bylo odpojení cca 244 MW z parní turbíny paroplynové elektrárny Little Barford. Frekvence začíná prudce klesat, načež dojde k odpojení dalších cca 350 MW výkonu na LoM³ ochranu RoCoF⁴. Okamžitě je zahájeno řízení frekvence a je započata dodávka cca 650 MW na stabilizaci frekvence. Zhruba v této chvíli také dojde ke znovusepnutí vedení Eaton Socon - Wymondley a frekvence je stabilizována na 49,1 Hz. Dalšími zásahy operátora distribuční sítě a aktivováním záloh je frekvence zvýšena na 49,2 Hz. Bohužel v této době začne mít problémy i jedna z plynových turbín v Little Barford a je odpojeno dalších 210 MW, načež frekvence opět začne klesat a dosáhne hranice 48,8 Hz. Nouzové odhození zátěže je aktivováno a je odhozeno cca 931 MW. Během dalších cca 10 s dojde k poruše i na druhé plynové turbíně Little Barford, a dojde k odpojení 187 MW. Poté se již situace naštěstí příliš nezhoršuje a operátor distribuční sítě zahajuje kroky ke stabilizaci frekvence a k postupnému opětovnému připojení zákazníků k distribuční síti.

Samotné sociální a ekonomické dopady už nejsou předmětem této práce, jakkoliv jsou vyjí-

²p.u. per-unit = poměrná jednotka, vztažená obvykle k jmenovité hodnotě dané veličiny (zde napětí)

³LoM (Loss of Mains) je ochrana proti výpadku sítě (včetně ochrany proti podpětí, přepětí a frekvenci) slouží k detekci výpadku hlavní dodávky elektřiny a k zabránění vzniku ostrovního provozu. K výpadku napájení může dojít, když dojde ke ztrátě hlavní dodávky elektřiny do části distribuční sítě a distribuované výroby elektřiny.

⁴LoM ochraně RoCoF je v této práci věnována pozornost v dalších kapitolách.



Obrázek 1.3: Časový průběh efektivních hodnot podpětí v Anglii, 9. srpna 2019 (zdroj [4])

mečné a pozoruhodné.

Naprostě klíčový pro celý vývoj situace je nepovolené odpojení větrné farmy Hornsea One. Jedná se o cca 1,2 GW v té době instalovaného výkonu v podobě větrných elektráren, umístěných na moři cca 120 km od východního pobřeží Anglie, připojené do přenosové sítě pomocí podmořského vedení o jm. napětí 400 kV. Po detailním šetření byla identifikována chyba v softwaru, která byla následující den odstraněna.

Takto krátký času odstranění problému silně naznačuje, že problém NEBYL v samotném kódu řídicích systému, ale pouze v jeho nastavení či konfiguraci. Další šetření naznačilo, že důvody odpojení paroplynové elektrárny Little Barford jsou záhadné a podezřelé, což opět může naznačovat problém v řídicích systémech. Pokud by nedošlo k odpojení větrné farmy Hornsea One - za a priori předpokladu že akt odpojení nějakým způsobem inicioval odpojení turbín v Little Barford - mohl být pravděpodobně velmi brzy obnoven normální provoz distribuční i přenosové sítě bez jakéhokoliv dopadu na koncové zákazníky.

Připomeňme historický vývoj elektrizační sítě. Od malých ostrovních sítí, vytvářených převážně na pohon průmyslových strojů, přes postupné pokusy vytvořit rozsáhlou, stabilní síť, myšlenku zásobit elektrickou energií každou domácnost. Vznik centrálního modelu výroby elektrické energie, přenos do míst, odkud bude snadnější distribuovat energii k co nejvíce zákazníkům naráz. Obrázek 2.1 ilustruje dnešní stav a jeho sekce budou vysvětleny níže.

2.1 Účel a provedení soustavy

Primárním účelem elektrizační soustavy je dopravit vyrobenou elektrickou energii ke koncovému zákazníkovi. To je celá základní myšlenka, všechna další specifika jsou daná buď fyzikálními zákony (elektrickou energii nelze na potřebných škálách hospodárně skladovat), technickými limity (např. elektrická pevnost vinutí synchronního generátoru) či ekonomickými aspekty (např. zásoby a cena kovů potřebných pro vybudování vedení).

Energetika minulých desetiletí spočívala ve výrobě elektrické energie v několika málo zdrojích o značném instalovaném výkonu. Tyto zdroje jsou pospojovány spolu přenosovou sítí VVN, jež současně plní účel přenosu takto vyráběné el. energie do lokalit, kde je agregována značná část populace. Rozlehlost přenosové sítě obvykle koresponduje s rozlohou jednotlivých států, jejichž přenosové sítě jsou obvykle taktéž vzájemně pospojovány. Poté následuje transformace do distribuční sítě na VN, odkud je el. energie dále rozváděna do míst spotřeby. V místě poblíž koncových zákazníků je provedena transformace na NN a odtud je el. energie rozváděna k jednotlivým zákazníkům. Tento vzor někdy bývá označován jako centrální model energetiky.

Vzhledem k tomu, že elektřinu je extrémně obtížné skladovat - se světlou výjimkou v podobě přečerpávacích vodních elektráren - musí okamžitá spotřeba odpovídat okamžité výrobě. Je důležité uvědomit si, že v rámci udržení jmenovité frekvence je ve všech synchronních generátorech a jejich prime moverech uložena značná energie v podobě roztočené hmoty rotorů a prime moverů úměrná jejich momentu setrvačnosti. Pokud je spotřeba vyšší než výroba, začne se z této naakumulované mechanické energie odebírat a celá soustava tak začne zpomalovat. Frekvence se sníží. V případě nadbytku výroby je situace přesně opačná.

V tuto chvíli je nutné zmínit důvod pospojování přenosových sítí mezistátně a to je princip solidarity. V rámci udržení jmenovitých parametrů sítí jsou drobné nedostatky či přebytky kom-

penzovány ze zdrojů ostatních států skrze jejich vlastní přenosové sítě a tyto toky energie jsou následně propláceny dle mezinárodních smluv.

První malé, decentralizované zdroje energie se začaly připojovat do vhodného uzlu distribuční soustavy, jež obvykle byl poblíž instalace. Tento trend zůstal zachován. Připojení do distribuční soustavy je realizováno tzv. přípojným bodem, někdy také bodem připojení, v anglické literatuře point of common coupling (PCC), a značí místo, kde je realizováno spojení přípojných vodičů provozovatele distribuční soustavy a provozovatele zdroje elektrické energie. V této práci bude pro zjednodušení užíváno anglické zkratky PCC.

Na následujícím obrázku je principiálně naznačena struktura elektrizační sítě. Jedná se o vzorový příklad, nereflektuje žádnou existující síť, a jeho účelem je pouze demonstrace obvyklé struktury elektrizační sítě. Všimněme si několika jednotek zdrojů o značném výkonu, pospojovaných přenosovou sítí. V České republice je pro přenosovou síť použito napěťových hladin 400 kV a 220 kV a obecně je koncipována jako páteřní síť. Z rozveden, kam je přenosová síť zapojena, probíhá transformace na 110 kV do okružních distribučních sítí, na které jsou napojeny rozvodny 110/22 kV, a toto 22 kV vedení už je koncipováno nejčastěji jako paprskové, probíhá distribuce do rozveden 22/0,4 kV na úrovni obcí či městských čtvrtí ke koncovým zákazníkům. Existují samozřejmě výjimky - k zákazníkům s větším odběrem, jako jsou větší nemocnice či podniky se strojním průmyslem, může být výhodné provést připojení na napěťové hladině 22 kV.

2.2 Vazba k přenosové soustavě

Převážná většina distribuovaných zdrojů energie se připojuje do distribuční soustavy, obvykle do přípojného bodu, který je umístěný nejbližší instalaci. Je to dáno charakterem typických aspektů použití kogeneračních jednotek a obnovitelných zdrojů energie.

Obecně vzato je možné agregovat větší množství OZE do větších celků a ty pak připojit do přenosové soustavy jako takové. Příkladem takové instalace je větrná farma Hornsea. V době sepišování této práce je v provozu instalace Hornsea One s celkovým počtem 174 turbín a s 1,2 GW instalovaného výkonu[18]. Stejně tak je možné vytvořit rozsáhlé fotovoltaické elektrárny a také je připojit do přenosové sítě. V České republice lze jako příklad dát vodní elektrárnu Lipno I (2x60 MW) i Lipno II (1x1,5 MW), jež jsou připojeny pomocí vedení 110 kV do rozvodny Dasný, která je napojena na přenosovou síť[13].

Vodní elektrárny Lipno jsou však stále příkladem konvenční elektrárny, kde připojení do přenosové sítě je z technického hlediska výhodné a náklady na vybudování takového připojení vzhledem k očekávanému exportu do sítě ospravedlnitelné. Odhlédneme od faktu, že elektrárna Lipno I byla vystavěna v 60. letech minulého století dle centrálního modelu energetiky - pokud by se jednalo o výstavbu porovnatelné vodní elektrárny dnes, způsob připojení by velice pravděpodobně zůstal stejný.

V případě menších vodních elektráren (do cca 10 MW, přesná definice není specifikována) je vyvedení výkonu obvykle provedeno do distribučních sítí. Ekonomicky nedává smysl vystavět vedení k rozvodnám přenosového vedení, stejně tak technické řešení připojení do distribuční sítě je pro daný rozsah výkonů vhodnější. Připojení zdrojů ještě menšího výkonu, řádově stovky kW až malé jednotky MW, je prováděno výhradně do distribuční soustavy ještě z dalších důvodů, sepsaných níže.

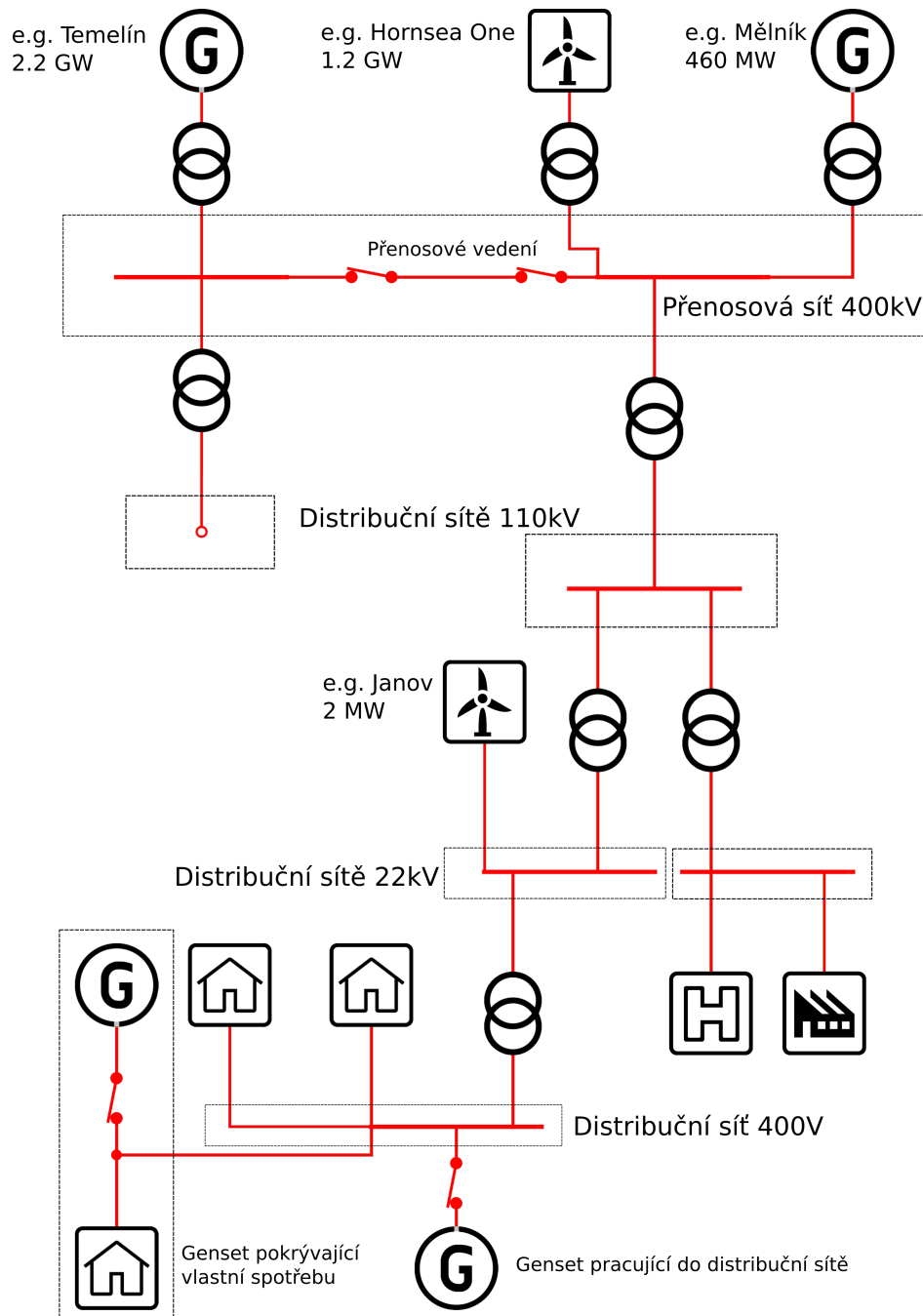
Realizace takovéhoto připojení má z hlediska stability celé elektrizační sítě jedno obrovské úskalí. Instalovaný výkon v decentralizovaných zdrojích de facto snižuje efekt nouzového odhazování zátěže pro stabilizaci frekvence v případě značného neplánovaného nedostatku výroby. Je pak velice důležité, jakým způsobem se kalkuluje množství odhozeného výkonu. Pokud je to prostý součet maximálních výkonů smluvních závazků provozovatele distribuční soustavy se zohledněním koeficientu využití, jež může být odhadnut na základě průměrné měsíční spotřeby, pak tyto decentralizované zdroje nejsou v této sumě zohledněny a výsledný nouzově odhozený výkon je pak nižší než očekávání.

Přesně takovýto efekt nastal při poruše v srpnu 2019 ve východní Anglii po neplánovaném odpojení větrné farmy Hornsea One a paroplynové elektrárny Little Barford[4] a proto je důležité tuto skutečnost brát v úvahu.

2.3 Specifika vzhledem k OZE

Pokud jde o obnovitelné zdroje energie, tato práce se nezabývá experimentálními tepelnými elektrárnami na biomasu a podobnými exotickými instalacemi. Nejčastější OZE připojované do distribuční soustavy jsou větrné elektrárny a fotovoltaické elektrárny. Popis jejich činnosti také není předmětem této práce. Specifická vlastnost obou těchto zdrojů je však velmi špatná schopnost řídit výrobu. Z ekonomické stránky věci jsou tyto zdroje provozovány na maximální možný dosažitelný výkon. Maximálním dosažitelným výkonem se rozumí takový výkon, jež je možné kontinuálně odebírat v závislosti na vnějším zdroji energie.

Z hlediska stability dodávky elektrické energie jsou na tom větrné elektrárny nepoměrně lépe



Obrázek 2.1: Vzorový příklad struktury elektrizační sítě

v porovnání s fotovoltaickými. Pokud FVE není vybavena bateriovým úložištěm, může v závislosti na oblačnosti maximální dosažitelný výkon snadno kolísat během několika minut v řádu souměřitelném s instalovaným výkonem. Větrné elektrárny mají na své straně značnou setrvačnost turbíny a celého soustojí.

Na druhou stranu, pokud je potřeba výrobu z jakéhokoliv důvodu omezit, FVE s bateriovým úložištěm může snadno řádově změnit aktuální hodnotu vyráběného výkonu během jednotek vteřin. U větrné elektrárny lze snížit výrobu natáčením lopatek, v horším případě lze zapojit umělou zátěž, v tom nejhorším aktivovat mechanické brzdy, v každém případě bude vybavení požadavku na omezení výkonu trvat nezanedbatelně dlouhou dobu.

Ovyklé umístění pro FVE - krom zjevných lokalit daných velkým příkonem ze slunce - jsou i střechy budov, soukromých i průmyslových. Snadná montáž, sériová výroba panelů i střídačů to umožňuje. Větrné elektrárny jsou na tom s výběrem lokalit podstatně hůře. Je zapotřebí buďto dostatečně rozlehlých planin bez větších překážek, kde má masa vzduchu šanci vybudovat si značnou rychlost i hybnost, nebo v horských oblastech. Offshore větrné elektrárny jako je Hornsea One vyžadují podvodní vedení, jehož instalace je časově i finančně velice náročná a tak jsou projektovány pouze elektrárny o značných výkonech kde se dá předpokládat smysluplná návratnost takovýchto investic. Je zjevné, že připojení takovýchto instalací přímo do distribuční sítě je tak bezpředmětné.

2.4 Specifika vzhledem k motorgenerátorům

Začněme popisem typických použití kogeneračních jednotek. Jako příklady uveďme typické použití motorgenerátorů od firmy TEDOM[31]:

- Řady MICRO a CENTO mají primární využití ve výrobě energie i tepla pro vlastní spotřebu v penzionech a menších nemocnicích, kde hosté/pacienti potřebují obě komodity.
- Řadu MICRO lze s úspěchem nasadit pro pokrytí části vlastní spotřeby v čističkách odpadních vod, kde navíc dochází při čištění k uvolňování metanu, který lze jímát a použít jako palivo.
- Řada CENTO tuto myšlenku může posunout ještě dál - fermentací zemědělských odpadů v bioplynové stanici je možné zajistit dostatek paliva i pro kogenerace o jm. výkonu kolem 200 kW.
- Řadu QUANTO, kogenerační jednotky až do výkonů 4,5 MW, je možné nasadit v průmyslových závodech pro částečné pokrytí vlastní spotřeby, nebo poblíž uhelných dolů a jako palivo použít filtrovaný důlní plyn s vysokým obsahem metanu.

Společné rysy jsou tedy:

- Je poptávka jak po elektrické energii, tak po teple.
- Je k dispozici zdroj paliva, jež by jinak zůstalo nevyužito (č.o.v.) či jeho transport a skladování je nevhodné (bioplyn ze zemědělského odpadu/důlní plyn).
- Obě předešlá specifika jsou silně lokální a na menších škálách než konvenční elektrárny.

Z těchto rysů je zřejmé proč tyto zdroje nejsou připojovány do přenosové sítě ale dominantně do distribuční sítě.

2.5 Grid Codes - úvod

Pro další práci je nutné vzít v úvahu klíčová specifika malých, decentralizovaných zdrojů, jež byly popsány dříve. Následuje shrnutí:

- Výroba je silně decentralizovaná a umístění zdroje je dáno obvykle buď dobrou dostupností primárního zdroje energie (bioplyn, rozlehlá planina, vodní toky) či naopak je daná místem vlastní spotřeby.
- Výroba nemusí nutně být časově predikovatelná (OZE) a může být jen omezeně říditelná.
- Centrální řízení je obvykle nemožné, hlavním limitem je absence real-time komunikace, značný počet menších zdrojů by činil optimalizační úlohy plánování výroby natolik složité, že by nebyly řešitelné.
- K dispozici je měření klíčových střídavých veličin pouze z nejbližšího okolí zdroje, není znám stav celé sítě.

Z těchto důvodů musí být řízení malých, decentralizovaných zdrojů co nejvíce autonomní. To má za následek mimo jiné i obrovský důraz na správnou interpretaci měření AC veličin v bezprostřední blízkosti zdroje, následné predikci dalšího vývoje situace a tuto predikci v řízení zdroje zohlednit tak, aby nedocházelo k nestabilitám distribuční sítě a naopak, v případě predikce poruchového stavu řízení provedlo taková opatření, která povedou k pokusu poruchový stav odvrátit. Celá tato problematika je popsána zastřešujícím pojmem Grid Codes.

Termín Grid Codes je definován jako sada pravidel a požadavků, které definuje operátor přenosové sítě pro připojení zdrojů do elektrizační sítě. Tato pravidla platí zejména pro všechny zdroje energie, nezávisle na jejich instalovaném výkonu. Pravidla se obecně mohou lišit dle napěťové hladiny, kam se zdroj připojuje, jsou však stále pojmenována zastřešujícím pojmem Grid Codes.

Grid Codes se obecně liší dle státu, případně dalších kritérií. Pro představu uvedme několik málo konkrétních Grid Codes standardů v následující tabulce a v rámci jaké lokality jsou platné.

Název	Země	Poznámka
EU 2016/631[17]	EU	Obecný standard
VDE-AR-N 4105:2018[7]	Německo	Nízké napětí
VDE-AR-N 4110:2018[8]	Německo	Vysoké napětí
UNE-EN 50549-2:2019[15]	Španělsko	
EREC G99[16]	Velká Británie	
IEEE 1547[1]	USA	

Tabulka 3.1: Příklady Grid Codes standardů

3.1 Skladba standardů, povinnosti konformity

Grid Codes v Evropě vstoupily v platnost nařízením komise EU 2016/631[17], jež upravuje podmínky pro připojení zdrojů energie do elektrizační soustavy. Toto nařízení je závazné pro všechny členské země EU, nicméně je specifikován pouze minimální rozsah podmínek s dovětkem, že jednotlivé členské státy mohou tyto požadavky zpřísnit.

Souhrnným cílem Grid Codes je udržení stability a bezpečnosti elektrizační soustavy během transformace od centrálního modelu s několika málo zdroji o značném instalovaném výkonu do soustavy, kde sumární instalovaný výkon v malých, decentralizovaných zdrojích energie je významnou položkou v celkovém instalovaném výkonu v distribuční i přenosové soustavě. Lidsky

řeceno - „nemáme jeden velký Temelín, máme tisíc malých Temelínků“, a od nich se chce přispívat ke stabilitě, k regulaci frekvence i napětí úplně stejně jako od jednoho „velkého Temelínu“.

V době psaní tohoto textu byly autorovi k dispozici oficiální anglické překlady německých norem VDE 4105 a 4110 jež jsou konkrétní implementace těchto nařízení, stejně tak kopie IEEE 1547 jež plní podobnou roli USA. Bylo proto vycházeno z konkrétní implementace Grid Codes v Evropské unii s možností porovnat tuto implementaci se zaoceánským ekvivalentem.

Povinnost splnit podmínky, definované těmito normami obecně mají:

- Nově připojované zdroje elektrické energie od konkrétního data, daného implementací Grid Codes v dané zemi.
- Existující zdroje, pokud je provedena zásadnější změna v řízení či v technologii.

Detailní podmínky se samozřejmě liší dle instalovaného výkonu, dle konkrétních podmínek v místě připojení a dalších okolnostech. Zásadnější změnou se rozumí jakákoliv přenastavení ochran na již certifikované instalaci, modernizace komponent i výměna celého zdroje za novější typ. Zásadní změnou není výměna jakékoliv komponenty po poruše za stejný typ se stejným nastavením, či změna nastavení na vyžádání provozovatele distribuční sítě.

Standardy se liší v detailech, nicméně všechny obsahují podmínky na:

- Přesnost a dynamiku měření střídavých (AC) veličin.
- Připojování zdroje do distribuční soustavy.
- Typy a výchozí (defaultní) nastavení ochran.
- Požadavky na minimální dobu připojení v případě detekce méně závažné poruchy.
- Metody a techniky řízení činného i jalového výkonu.

Je stále potřeba mít na paměti, že Grid Codes mají principiálně předcházet krizovým situacím v elektrizační soustavě, jaké byly např. ve východní Anglii v r. 2019 (Hornsea[3–6]).

3.2 Detailní požadavky podmínek pro připojení

V této kapitole je proveden rozbor základních podmínek pro samotné připojení zdroje do distribuční sítě podle VDE 4105[7], VDE 4110[8] a IEEE 1547[1].

3.2.1 Přesnosti měření a podmínky připojení

Požadavky na přesnosti měření a samotné metody měření jsou v různých normách definovány různě. Následuje porovnání VDE 4110/4105 a IEEE 1547.

VDE 4105 i VDE 4110 se v požadavcích na přesnosti měření odkazují na stávající normy, kvůli nařízení EU 2016/631 nebylo potřeba zásadních změn. Explicitně v nich však je vymezen požadavek na přesnost měření frekvence v závislosti na čase:

RoCoF	Doba trvání	Přesnost měření
Ustálený stav	trvale	
< 2 Hz/s	< 0.5 s	< 10 mHz
< 1.5 Hz/s	< 1 s	
< 1.25 Hz/s	< 2 s	
Všude jinde	< 200 ms	< 50 mHz

Tabulka 3.2: Požadavky na přesnost měření frekvence dle VDE 4105 a VDE 4110

Důvodů pro takto vysoké požadované přesnosti měření je vícero. Jedním z nich je snaha některých subjektů na poli energetiky postupně vyřadit Vector Shift jako standardní LoM ochranu a nahradit ji právě vyhodnocováním z RoCoF[5], druhým, neméně závažným důvodem, je vynucení aktivní regulace frekvence i do distribuovaných zdrojů energie, v souladu s celou filozofií Grid Codes.

IEEE 1547 je v tomto ohledu mnohem více explicitní, viz. následující tabulka pro ustálené děje:

Veličina	Přesnost měření	Rozsah	Doba měření
Napětí, RMS	< 1% V_{jm}	0.5 p.u. - 1.2 p.u.	10 period
Frekvence	< 10 mHz	50 Hz - 66 Hz	60 period
Činný výkon	< 5% S_{jm}	0,2 p.u. - 1,0 p.u.	10 period
Jalový výkon	< 5% S_{jm}	0,2 p.u. - 1,0 p.u.	10 period
Čas	1% měřené doby	5 s - 600 s	

Tabulka 3.3: Požadavky na přesnosti měření v ustáleném stavu dle IEEE 1547

A tabulka pro přechodné děje:

Veličina	Přesnost měření	Rozsah	Doba měření
Napětí, RMS	$< 1\% V_{jm}$	0,5 p.u. - 1,2 p.u.	5 period
Frekvence	$< 100\text{mHz}$	50 Hz - 66 Hz	5 period
Činný výkon	Není požadováno	-	
Jalový výkon	Není požadováno	-	
Čas	2 periody	100 ms - 5 s	

Tabulka 3.4: Požadavky na přesnosti měření během přechodových dějů dle IEEE 1547

Zběžným porovnáním je vidět stejný vzor, tedy velký důraz na statickou i dynamickou přesnost měření frekvence z těchto důvodů:

- Předpokládá se užití v režimu podružné regulace frekvence.
- Předpokládá se vyhodnocování Loss of Mains z RoCoF.

3.2.2 Požadavky na připojení do distribuční sítě

Specifikují, za jakých podmínek je možné připojit distribuovaný zdroj energie k distribuční síti.

Požadavky norem VDE 4105, 4110

Požadavky VDE 4105 lze shrnout následující tabulkou a platí obecně pro synchronní i asynchronní generátory:

Parametr	Min	Max
Napětí sítě [% V_{jm}]	85	110
Frekvence sítě [Hz]	47.5	50.1
Vyhodnocovací doba [s]	60	

Tabulka 3.5: Požadavky na stav sítě před připojením zdroje dle VDE 4105

Pokud po celou vyhodnocovací dobu nevystoupí hodnoty napětí i frekvence mimo okno, dané tabulkou, po dobu alespoň 60 s - distributor má právo požadovat i delší vyhodnocovací dobu - je možné zahájit připojování vyjma případu, kdy došlo k odpojení vlivem překročení sjednaného $P_{av,e}$. V tomto případě platí další požadavky:

- U zdrojů, které mohou řídit výrobu činného výkonu, platí bezprostředně po dokončení připojení řízené omezení nárůstu vyráběného výkonu na max. 10 % instalovaného výkonu

za minutu. K plnému zatížení tedy může dojít až za 10 minut. Užití rampy je v tomto případě velice vhodné.

- U zdrojů, u nichž nelze řídit výrobu, může k opětovnému připojení dojít v náhodnou dobu mezi 1 minutou (včetně vyhodnocovací doby parametrů sítě) a 10 minutami - po dohodě s distributorem i později. Toto platí zejména pro OZE jako fotovoltaické či větrné elektrárny.
- V případě uvádění zařízení do provozu či prací údržby - tedy manuálními operacemi za fyzické přítomnosti provozovatele či jím ustanoveného oprávněného operátora na instalaci - je překročení těchto limitů explicitně povoleno.

Pro připojování synchronních generátorů dále platí následující podmínky:

- Maximální povolený úhel mezi soustavami generátoru a sítě $\Delta\varphi \leq \pm 10^\circ$
- Maximální povolená rozdílová frekvence $\Delta f \leq \pm 500$ mHz
- Maximální povolená odchylka napětí $\Delta V \leq \pm 10\% V_{jm}$

V závislosti na konkrétních okolnostech instalace mohou být požadovány jak vlastníkem, tak distributorem přísnější limity.

Co se týče VDE 4110, většina podmínek připojení je velice podobná VDE 4105. Odlišností je více, přehlednější bude uvést tyto podmínky zvlášť:

Parametr	Normální stav		Po odpojení zásahem ochrany	
	Min	Max	Min	Max
Napětí sítě [% V_{jm}]	90	110	95	110
Frekvence sítě [Hz]	47.5	50.2	49.9	50.1
Prodleva pro znovupřipojení [min]	0	30		

Tabulka 3.6: Požadavky na stav sítě před připojením zdroje dle VDE 4110

Přesné limity pro úhel vůči síti, frekvenční a napěťové okno VDE 4110 definuje jako 'dohodu mezi provozovatelem zdroje a operátorem distribuční sítě s přihlédnutím k prakticky dosažitelným parametrům vzhledem k použité technologii' [8]. Důvod je zjevný - každá instalace je jiná, i.e. používá jiný typ primárního pohonu (prime mover) s jinými typickými vlastnostmi, ať už kvalitativními či parazitními a obecně tak nelze jednoznačně definovat technické parametry. Proto je vhodné posuzovat je případ od případu.

Požadavky normy IEEE 1547

IEEE 1547 požaduje principiálně velice podobné podmínky připojení do distribuční sítě jako VDE4110. Defaultní požadavky je opět vhodné shrnout následující tabulkou:

Parametr	Min	Max
Napětí sítě [% V_{jm}]	91.7	105
Frekvence sítě [Hz]	59.5	60.1
Prodleva před připojením [s]	300	N/A

Tabulka 3.7: Požadavky na stav sítě před připojením zdroje dle IEEE 1547

Co se týče synchronních generátorů, IEEE dospecifikovává požadavky na přifázování dle jmenovitého výkonu stroje takto:

Jmenovitý výkon [kVA]	Δf [Hz]	ΔV [%]	$\Delta\varphi$ [°]
0-500	0.3	10	20
>500 - 1500	0.2	5	15
>1500	0.1	3	10

Tabulka 3.8: Požadavky na fázování zdroje do sítě dle IEEE 1547

kde:

- Δf je maximální rozdílový kmitočet síť-zdroj
- ΔV je maximální procentuální odchylka napětí mezi sítí a zdrojem
- $\Delta\varphi$ je maximální povolený úhel mezi sítí a generátorem

Norma IEEE je tedy více konkrétní na zdroje vyšších výkonů na rozdíl od VDE 4110.

Společné rysy požadavků na připojení do distribuční sítě tedy jsou:

- Je specifikováno za jakých podmínek je povoleno zdroj připojit k síti.
- Jsou specifikovány podmínky, kdy k připojení naopak dojít nesmí.
- Důraz na sledování stavu sítě před pokusem o připojení.
- Požadavky na odpojení - resp. povolení se odpojit - jsou shrnuty v následujících kapitolách.

3.2.3 Typy ochran a jejich nastavení

Ochranou se v dalším textu rozumí mechanismus, zajišťující bezpečné odpojení chráněného celku před negativními vlivy které mohou být způsobeny překročením sledovaného parametru přes nastavitelný limit po dobu delší než nastavitelná prodleva. Zásahem ochrany se rozumí samotný akt rozepnutí příslušného stykače či řízeného jističe po splnění podmínek vyhlášení ochrany specifikovaných výše. Znaménko nerovnosti před symbolem veličiny, na níž je ochrana navázána značí, zda se jedná o překročení přes limit či pod limit, a je poplatná nezávisle všem instancím veličiny, která má pro danou topologii a zapojení smysl.

Příklad definice (přepěťové) ochrany z VDE 4110: >>V, zapojení do trojúhelníka. Jedná se o druhý stupeň přepěťové ochrany, vyhodnocované ze všech sdružených napětí, tedy L1-L2, L2-L3, L3-L1. V případě že kvůli nesymetrii dojde trvale k překročení limitu u síťového napětí L2-L3, dojde po uplynutí prodlevy k odpojení od distribuční sítě.

Všechny tři relevantní normy, VDE 4105, VDE 4110 i IEEE 1547 řeší síťové ochrany z hlediska distribuční sítě vůči PCC. Ochrany zdroje energie však nesmí být v rozporu s těmito požadavky. U každé ochrany je specifikováno její defaultní nastavení i povolený rozsah nastavení.

Pro porovnání ochran, definovaných různými normami je uvedena tabulka s výchozím nastavením ochran pro synchronní generátor o jmenovitém výkonu 100 kW. Dle VDE 4105 je to stroj o $P_n > 50$ kW, dělení strojů dle IEEE 1547 do kategorií je na bázi požadavků distribuční sítě, pro příklad uvedme kategorii I.

Ochrana	VDE 4105		IEEE 1547	
	lim.	del.	lim.	del.
>>V	1.25 p.u	≤ 100 ms	1.2 p.u	160 ms
>V	1.1 p.u		1.1. p.u	2 s
10min Avg >V	1.1 p.u	≤ 100 ms		
<V	0.8 p.u	1s	0.7 p.u	2 s
<<V	0.45 p.u.	≤ 100 ms	0.45 p.u	160 ms
>>f			62.0 Hz	160 ms
>f	51.5 Hz	≤ 100 ms	61.2 Hz	300 s
<f	47.5 Hz	≤ 100 ms	58.5 Hz	300 s
<<f			56.5 Hz	160 ms

Tabulka 3.9: Porovnání defaultního nastavení ochran dle VDE 4105 a IEEE 1547

Z tabulky je vidět, že obě normy jsou velice dobře porovnatelné. Na první pohled však vyčnívají časy zásahu <>f ochran, definovaných IEEE 1547. Takto dlouhé časy jsou zvolené vědomě a úmyslně, a v podstatě tvoří základ konceptu FRT (Fault Ride-Through) - více v následující sekci. Další věc, která vyčnívá, je doba odezvy 10min Avg >V ochrany. Jedná se opravdu o klouzavý průměr s vyhodnocovacím oknem 10 minut. Prodlevu je nutno interpretovat jako maximální povolený čas zásahu ochrany poté, co hodnota klouzavého průměru překročí nastavenou mez. Důvodem je požadavek na maximální dobu odpojení 200 ms, kdy 100 ms je paušálně uvažováno jako doba rozpojení stykače či ovládaného jističe, na reakci řídicího systému tedy zbývá max. 100 ms, tedy opravdu hodnota uvedená v tabulce. IEEE 1547 definuje prodlevu ochrany naprosto stejně, tedy jako čas od překročení nastavené meze do skutečného odpojení chráněné komponenty.

Krom těchto síťových ochran je také požadována detekce ostrovního provozu. K tomuto účelu bylo a stále je hojně využíváno ochrany typu Vector Shift. Metoda spočívá v detekci náhlého skoku úhlu fázoru napětí a změření velikosti tohoto skoku, viz. časový průběh poruchy 9. srpna 2019 v Anglii 1.2. Pokud se fázor změní více než maximální povolený úhel, aktivuje se ochrana. Problém ovšem je tuto ochranu správně naladit, ze zkušeností vyplývá že tato ochrana má velkou

tendenci k false positive vyhlášení. Stejný názor je publikován ve finální zprávě k poruše po úderu blesku v Anglii r. 2019[5, Appendix H], kdy falešně pozitivní detekce ostrova měla za následek odpojení značného výkonu, instalovaného právě v decentralizovaných zdrojích energie. Alternativou je metoda RoCoF, tedy sledování změny frekvence v čase. De facto je to časová derivace frekvence. Dle VDE i IEEE 1547 je toto preferovaný způsob vyhodocování ostrovního provozu.

3.2.4 Fault Ride-Through

Termín Fault Ride-Through, zkráceně FRT, lze volně přeložit jako „překlenutí poruchy bez odpojení“, a vyjadřuje schopnost méně závažné poruchové stavy přečkat bez odpojení od sítě. Základní účel je prostý - nezhoršovat rozsah a dopad kaskádních poruch. Je nutné zmínit, že mezi ochranami a FRT je velice úzký vztah: dokud se zdroj energie nachází v pracovní oblasti, definované FRT, nesmí se od sítě odpojit. Jakmile ji opustí - ať už v měřené veličině či v čase - zdroj má povoleno se odpojit, ať už řízeně či zásahem ochrany.

Fault Ride-Through je možno rozdělit podle veličiny, která je poruchou stížena na:

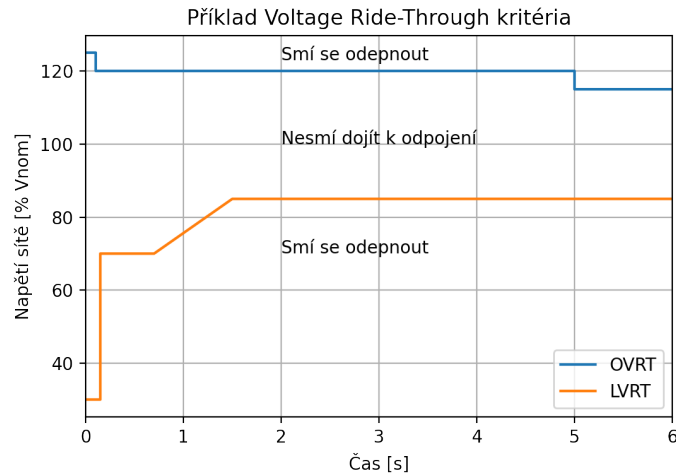
- Voltage Ride-Through - porucha na základě aktuální hodnoty síťového napětí.
- Frequency Ride-Through - porucha na základě aktuální hodnoty frekvence sítě.
- RoCoF Ride-Through - porucha související s prudkými změnami síťové frekvence.

Voltage Ride-Through

Tato situace nejčastěji vzniká po úderu blesku do vedení a záleží, do kterého z vodičů blesk udeří. V případě úderu do zemnicích lan je do fázových lan naindukováno přepětí, jež je poté svedeno bleskojistkou. V případě přímého úderu do fázového lana výboj dále pokračuje až do země. V ionizovaném a velmi horkém vzduchu však zůstává vodivý kanál i po svedení náboje do země a může tudíž protékat do země značný proud. Odpor kanálu je v prvním okamžiku velice malý, což má za následek vznik podpětí. Stížené vedení je následně velice rychle odpojeno na obou koncích, aby tento vodivý kanál mohl zaniknout a v poměrně krátkém čase (jednotky až desítky s) je vedení opět možno sepnout, jelikož za takto krátkou dobu se obvykle úhel mezi jednotlivými konci vedení nestihne příliš změnit díky setrvačnosti, uložené v distribuční síti. Viz. časový průběh poruchy 9. srpna 2019 v Anglii 1.2.

Údery blesků do vedení jsou pro neznalého překvapivě časté, stejně tak rozpojování a opětovné spojení vedení. Je to také jedním z důvodů, proč je kritérium tolerance selhání jedné komponenty (N-1) tak důležité.

Voltage Ride-Through nejlépe popíše principiální graf.



Obrázek 3.1: Vzorový příklad Voltage Ride-Through kritéria

Princip je vcelku jednoduchý. V případě detekce poruchy na síti, začne se počítat čas od poruchy. V každém okamžiku je aktuální hodnota síťového napětí - vyhodnocováno ze všech fázových (pro soustavy s vyvedenou pracovní nulou) i sdružených napětí - porovnává s hodnotou LVRT i OVRT křivek. V případě, že je hodnota napětí uvnitř oblasti definované těmito křivkami, je explicitně zakázáno odpojit zdroj od sítě. Omezení výroby činného výkonu pro splnění tohoto požadavku je plně akceptovatelné. V případě, že je aktuální hodnota napětí mimo meze, definované těmito křivkami, se zdroj smí odpojit.

Důvod k omezení výkonu je zjevný. Při prudkém poklesu (či nárůstu) napětí a při dané úrovni buzení synchronního generátoru prudce dojde k nárůstu okamžitého jalového výkonu a tím i nárůstu proudu. Snadno také může dojít k oscilacím jalového výkonu. V takovém případě je žádoucí omezit činný výkon tak, aby ani zuřivé oscilace jalového výkonu - a tím i proudu generátoru - nemohly způsobit zásah nadproudové či zkratové ochrany generátoru, což by bylo přímé porušení tohoto požadavku Grid Codes.

Pro kontext - přesně k tomuto porušení došlo při odpojení větrné farmy Hornsea[3–6]. V časovém záznamu události je navíc vynesena křivka FRT požadavku. Porovnáním měřených hodnot RMS napětí s FRT požadavkem je zjevné, že větrná farma Hornsea se opravdu neměla odpojit.

Jsou drobné rozdíly mezi VDE 4105, VDE 4110 a IEEE 1547 v tom, jaké měřené hodnoty jsou použity pro vyhodnocování VRT. Na nízkém napětí, kde se uplatňuje VDE 4105, se nerozlišují typy poruch, a každé fázové i sdružené napětí se vyhodnocuje proti stejné křivce. IEEE 1547, stejně jako VDE 4105, vyhodnocuje VRT ze všech možných měřených napětí stejným způsobem.

VDE 4110, kde se na středně vysokém napětí předpokládá připojení do distribuční sítě generátor bez vyvedeného středu, přes transformátor D/Y (kvůli potlačení 3. harmonické složky) do sítě a je tak k dispozici měření pouze sdružených napětí, už rozlišuje mezi poruchou mezi všemi třemi fázemi a poruchou pouze mezi dvěma fázemi a tyto dvě situace jsou řešeny dvěma samostatnými křivkami.

Samotná definice Voltage Ride Through oblastí je pro VDE 4105 i 4110 dána grafem. IEEE 1547 definuje principiálně to samé tabulkou stavů a minimálních časů, kdy zdroj musí zůstat připojen, je to však jen jiné vyjádření téhož.

Celým smyslem tohoto požadavku je nevyvolávat a nezhoršovat kaskádní rozpojování sítě

pokud se tak stane, a naopak přispět ke stabilizaci sítě v případě kdy kaskádní porucha hrozí.

Frequency Ride-Through

Frequency Ride-Through je u VDE norem možno snadno shrnut následující tabulkou:

Rozsah frekvence	Doba připojení k síti
47.5 Hz - 49.0 Hz	≥30 min
49.0 Hz - 51.0 Hz	Trvale
51.0 Hz - 51.5 Hz	≥30 min

Tabulka 3.10: Požadavky na Frequency Ride-Through dle VDE 4105 i 4110

V tuto chvíli je potřeba vrátit se k frekvenčním ochranám, definovanými IEEE 1547. Je potřeba připomenout nezvykle velký čas zásahu základních frekvenčních ochran. Kde IEEE specifikovalo v pásmu frekvencí xy ochrana zasáhne za 300 s, VDE explicitně požaduje 'zdroj musí ve frekvenčním pásmu xy vydržet připojený k síti alespoň po 30 minut'. Znovu se potvrzuje provázanost ochran a FRT.

Smysl tohoto požadavku tkví zejména v přispění ke stabilizaci frekvence neodpojováním výroby v případě podfrekvence a naopak, neodpojováním spotřeby v případě nadbytku výroby a tím i nadfrekvence.

RoCoF Ride-Through

RoCoF Ride-Through zas VDE normy definují stejnými limity, jako v kapitole 3.2.1 v tabulce 3.2 pro požadavky na přesnosti měření frekvence - na jednom místě je sepsán požadavek na přesnosti měření a současně požadavek neodpojovat se, dokud tyto limity nebudou překročeny. IEEE 1547 má požadavky na RoCoF ride-through definován velmi podobně.

Dále je nutné zmínit, že ve FRT požadavcích jak VDE, tak IEEE explicitně považují falešně pozitivní detekci ostrovního provozu a následné odpojení od sítě za nesplnění požadavků. Je tak potřeba detekci ostrovního provozu věnovat obzvlášť důkladnou péči, aby nedošlo k neoprávněnému odpojení značného instalovaného výkonu v malých, decentralizovaných zdrojích jako u tolika vzpomínané kaskádní poruchy v Anglii v srpnu 2019.

3.3 Detailní požadavky na řízení činného a jalového výkonu

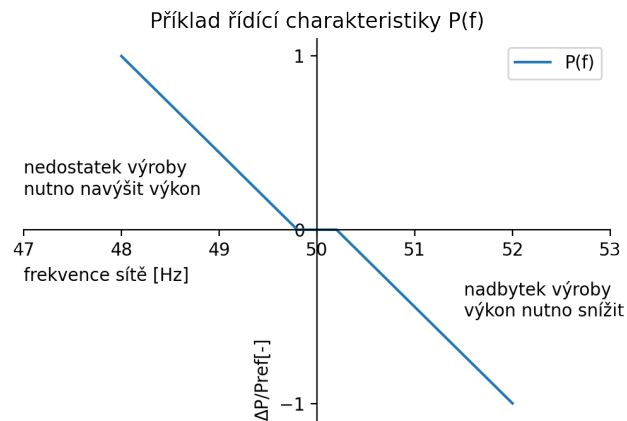
Je nezbytné vyjasnit hned na začátku, že požadavky na regulace jak jalového, tak i činného výkonu je nutné posuzovat v širším kontextu. Je potřeba zohlednit situaci v blízkosti PCC, konfiguraci blízkých zátěží, délky blízkých vedení (a jejich kapacity a indukčnosti) a obecně neexistuje univerzální zlatý standard, podle kterého by šlo prohlásit: 'toto je správně'. Situací, kdy je potřeba upravit stávající chování zdroje, navíc může nastat více najednou a opět je nutné posoudit priority reakcí na tyto události případ od případu. Potenciálně kolizní požadavky budou zmíněny u každého požadavku zvlášť.

Je také nutné zmínit, že dle VDE 4110 má operátor distribuční sítě pravomoc požadovat změnu metody řízení jalového výkonu z technických důvodů.

3.3.1 Aktivní řízení P na základě frekvence sítě

Tento požadavek bezprostředně souvisí s požadavkem na Frequency Ride-Through. Nejenže je požadováno během menších odchylek od jm. frekvence zdroj neodpojit, je požadováno aktivní řízení činného výkonu v závislosti na aktuální měřené hodnotě frekvence tak, aby zdroj regulační zásah směrem ke jmenovité frekvenci. Ve všech zkoumaných případech je kolem jmenovité frekvence sítě definovaný určitý deadband, kdy do řízení činného výkonu není třeba nijak zasahovat. Jakmile aktuálně měřená hodnota frekvence z tohoto pásma necitlivosti vyskočí, požadavek činného výkonu se začne zvyšovat/snižovat oproti stávajícímu stavu úměrně nad/podfrekvenci.

Následující graf (3.2) je uveden pouze pro ilustraci funkce a neobsahuje reálné hodnoty.



Obrázek 3.2: Příklad řídicí charakteristiky činného výkonu v závislosti na aktuální frekvenci sítě

Jednotlivé zkoumané normy se pak liší v detailech, sklon křivek si každá norma definuje vlastními formulkami, VDE principiálně umožňuje s provozovatelem distribuční soustavy dohodnout si deadband regulační charakteristiky. Klíčové je aby s rostoucí frekvencí byla funkce klesající. V anglické literatuře (IEEE 1547) je tento princip pojmenován jako 'frequency droop' a v podstatě vyjadřuje vynucenou frekvenční zatěžovací charakteristiku.

Principiálně může nastat problém v okamžiku, kdy dojde současně k poklesu frekvence i napětí v daném uzlu distribuční soustavy. VDE pak explicitně povoluje saturovat požadavek na činný výkon tak, aby nedošlo k odpojení zdroje zásahem nadproudové ochrany. Naprosto stejná situace platí bezprostředně po LVRT události, kde navíc může docházet k oscilacím jalového výkonu.

Pro kogenerační jednotky pracující na bioplyn navíc snadno může dojít vlivem proměnné kvality plynu ke klepání motoru, kdy je nutné dočasně omezit výrobu aby se předešlo poškození prime moveru, což je také v přímé kolizi s tímto požadavkem a je nutné tento fakt také zohlednit (více v kapitole Motorgenerátory).

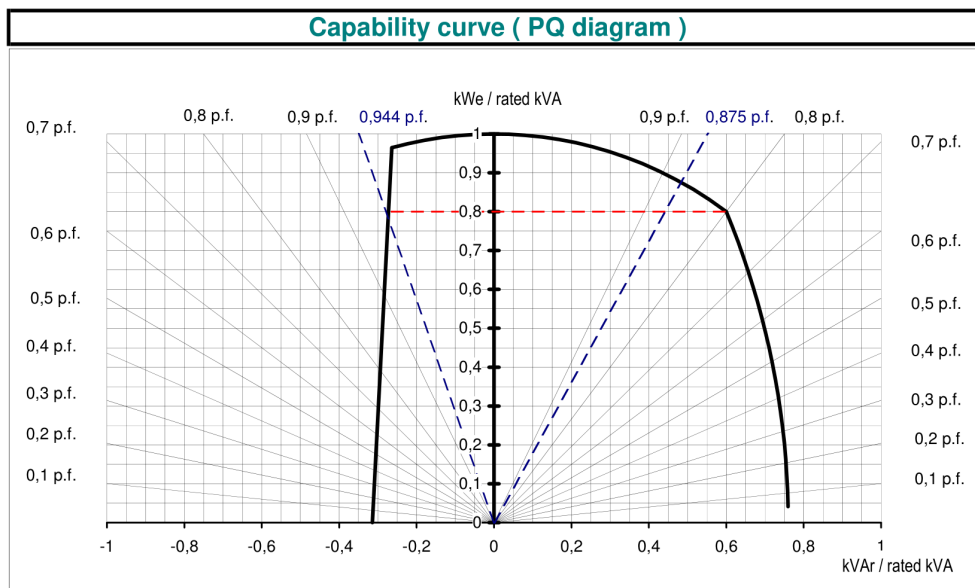
3.3.2 Limitace P zásahem operátora distribuční sítě

VDE 4110 explicitně požaduje možnost a schopnost omezit výrobu činného výkonu zásahem operátora distribuční soustavy, který tak může učinit na pokyn operátora trhu s energií. Jde principiálně o procentuální redukci vzhledem k P_{inst} . Smyslem tohoto požadavku je mít možnost

řídít výrobu za účelem optimalizace toků energie vzhledem ke kapacitám jednotlivých vedení a/nebo vzhledem k časovému vývoji na trhu s energiemi.

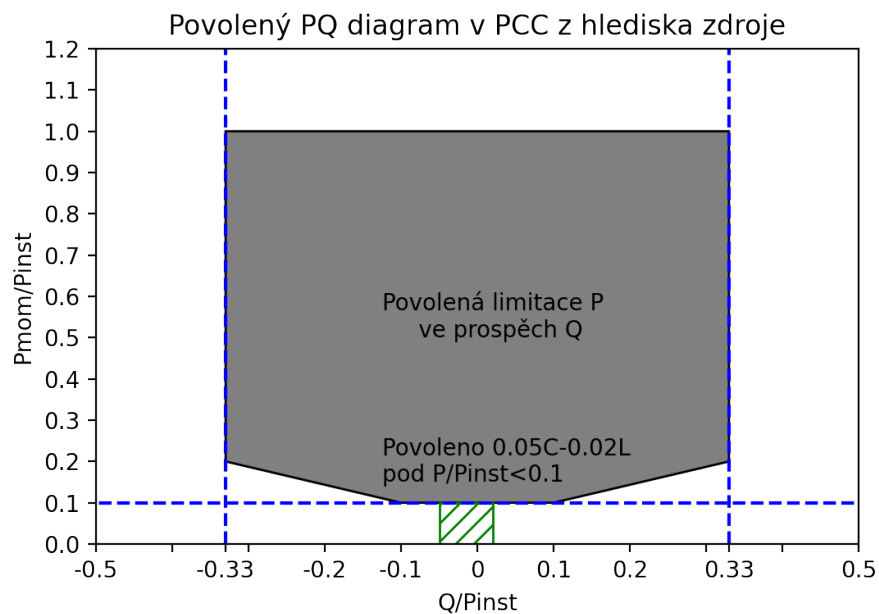
3.3.3 Omezení P ve prospěch Q

Jalový výkon jako takový má v distribuční síti nezastupitelnou roli, kterou je řízení napětí v uzlech distribuční/přenosové sítě, a z hlediska provozovatele distribuční soustavy je tak řízení jalového výkonu jeho primárním zájmem. Problém je, že aktuálně dostupný jalový výkon je silně závislý na aktuálním činném výkonu dle křivky kapability konkrétního synchronního generátoru. Křivka kapability vyjadřuje bezpečnou pracovní oblast synchronního generátoru v ustáleném stavu. Nezhledňuje přechodové děje. Jako příklad uveďme P-Q diagram synchronního generátoru Leroy-Somer LSA 54 M75 / 3250 kVA - 400 V - 50 Hz - 4P:



Obrázek 3.3: P-Q diagram generátoru Leroy-Sommer LSA 54 M75[2]

Vzhledem k předchozímu tak VDE 4110 explicitně povoluje omezit výrobu činného výkonu ve prospěch zvýšení výroby jalového výkonu za cílem stabilizovat napětí v PCC. Důležité je zmínit, že obecně každý synchronní generátor má jinou křivku kapability, VDE 4110 proto ještě dále omezuje rozsah poměru P_{inst}/Q od -33% do +33% pro $P > 20\% P_{inst}$ (viz následující graf):



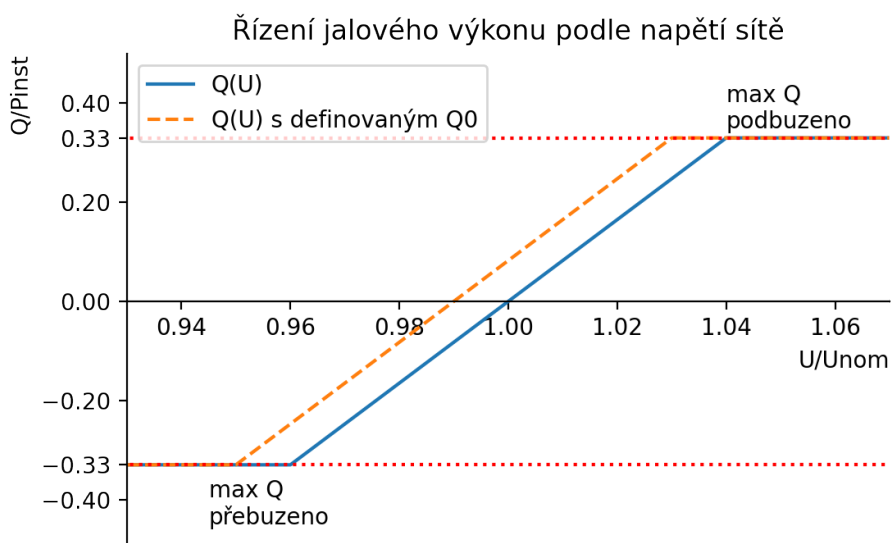
Obrázek 3.4: Oblast povolené redukce činného výkonu ve prospěch jalového výkonu dle VDE 4110

V případě kolize požadavků limitace P ve prospěch Q být požadavkem aktivního řízení P na základě frekvence sítě 3.3.1 je obvykle upřednostněna limitace P ve prospěch Q.

3.3.4 Q(U)

Zdroje je v tomto režimu řízení Q využito pro stabilizaci napětí v síti poblíž PCC. Připomeňme existující vazbu mezi napětím v uzlech sítě a toky jalového výkonu mezi těmito uzly.

Tvar regulační charakteristiky principiálně popisuje následující graf:



Obrázek 3.5: Řídící charakteristika jalového výkonu v závislosti na napětí sítě

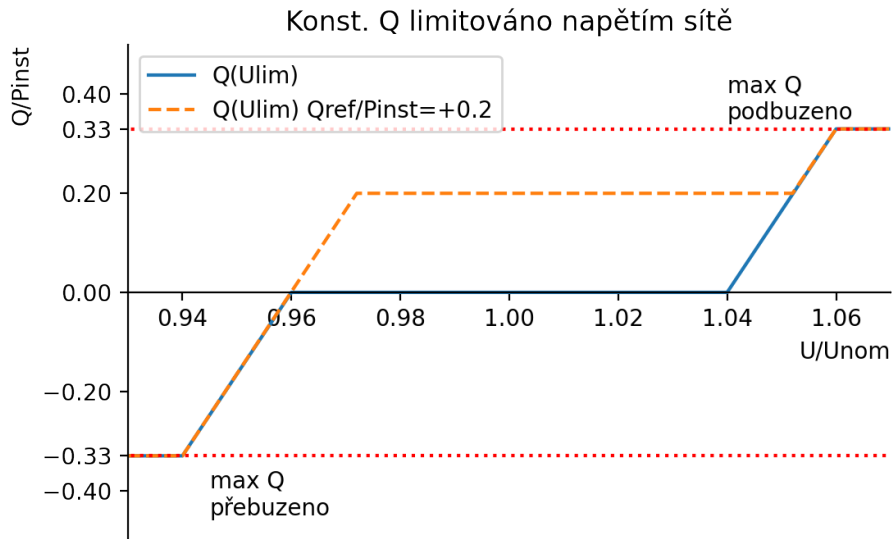
Regulační charakteristiku je možno posouvat podle známého potřebného jalového výkonu pro vykompenzování síťového napětí na jmenovitou hodnotu. Řídící napětí může být v reálném čase měněno operátorem distribuční sítě dle potřeby. Na aktuální hodnotu napětí vůči řídicímu může být aplikován deadband a teprve když dojde k jeho překročení, pak teprve bude přepočítán požadavek Q .

3.3.5 $Q(P_{\text{mom}})$

Požadavek Q je v tomto případě dle VDE 4110 funkce aktuálně vyráběného činného výkonu P_{mom} . Funkce je daná křivkou až o 10 bodech, mezi kterými je použita lineární interpolace, a křivku samotná je předdefinovaná operátorem distribuční sítě ve fázi plánování instalace. Není požadováno měnit body křivky za běhu, je však možné křivku změnit na základě dohody operátora distribuční soustavy a provozovatele zdroje. Smyslem metody je kompenzovat negativní jevy, které může instalace v cíti vyvolat exportem činného výkonu do distribuční sítě.

3.3.6 $Q(U_{\text{lim}})$

Metoda řízení Q je velice podobná $Q(U)$ s tím rozdílem, že hlavním účelem je výroba konstantního jalového výkonu nezávisle na hodnotě výrobě činného výkonu. Funkci opět ilustruje následující graf:



Obrázek 3.6: Řídící charakteristika konstantního jalového výkonu s limitací síťovým napětím

Celá pointa tohoto způsobu řízení Q je dodávat konstantní jalový výkon do sítě v bezpečné pracovní oblasti pro synchronní generátor, viz. křivka kapability 3.3.

3.3.7 Konstantní účinník $\cos\varphi$

Nezákladnější způsob řízení jalového výkonu. Pokud operátor distribuční soustavy nspecifikuje způsob řízení Q při uvádění zdroje do provozu, pak se uvažuje implicitně řízení na $\cos\varphi = 1$.

Účinník musí být možno zadat s minimálním krokem $\Delta\cos\varphi = 0,005$. Požadovaná hodnota účinníku může být operátorem distribuční soustavy zadávána vzdáleně. Tento režim řízení Q je nejjednodušším možným v případě že z nějakého důvodu selže komunikační kanál mezi operátorem distribuční soustavy a řídicím systémem - a vzdálené řízení zdroje bylo požadováno.

Jak již bylo zmíněno v úvodu, tato práce je zaměřena primárně na motorgenerátory se synchronním generátorem. V této kapitole je proveden rozbor obvyklých topologií, ve kterých jsou motorgenerátory dominantně nasazovány, typické okolnosti a specifika které tyto instalace doprovázejí a kdy je potřeba aby instalace splňovaly Grid Codes.

4.1 Motorgenerátor

V textu jsou pojmy motorgenerátor a genset vzájemně zaměnitelné. Jedná se nejčastěji o soustrojí čtyřdobého spalovacího motoru, vznětového či zážehového a v naprosté většině čtyřpólového synchronního generátoru s vyniklými póly rotoru, namontovaného přímo na hřídel spalovacího motoru (obvykle už dopředu sestavené na plošině či do kontejneru). Jmenovité otáčky jsou dané vztahem:

$$RPM = \frac{60 * f}{p_p}, [min^{-1}, Hz, -] \quad (4.1)$$

kde RPM jsou otáčky za minutu, f je frekvence a p_p je počet pólpárů synchronního generátoru.

V motorgenerátorech téměř všech jmenovitých výkonů (vyjma těch opravdu skutečně nejmenších¹) je použito čtyřpólových synchronních generátorů. Jmenovité frekvenci 50 Hz tak odpovídají mechanické otáčky hřídele 1500 RPM, pro 60 Hz zas 1800 RPM. Použití čtyřpólových synchronních generátorů je dáno převážně tím, že spalovací motory jsou obvykle konstruované tak, aby v pásmu mezi 1400 - 2000 RPM měly optimální vlastnosti, t.j. dobré dynamické vlastnosti, mechanický výkon na hřídeli a uspokojivou energetickou účinnost v co nejširším rozsahu zatížení.

Pro menší výkony plně postačují lineární tříválcové motory, pak lze podle dalších okolností použít vyšší počet válců. Pro největší výkony (od 1 MW výše) je navíc vhodnější použít uložení válců do V, e.g. V12, V16, pro nejvyšší výkony V20 a více. Kolísání točivého momentu je řešeno setrvačnickem se zmagnetovanými zuby, které společně s magnetickým pick-upem slouží pro měření otáček hřídele.

¹ Příkladem je řada MICRO české firmy TEDOM, která pro generaci používá asynchronních motorů v generátorickém režimu[31].

Kogenerační jednotky se užívají výhradně se zážehovými motory na plynná paliva. Do chladicího okruhu je přes třicestý ventil zařazen tepelný výměník a nádrž na teplou užitkovou vodu. Odpadní teplo z provozu motorogenerátoru je tak dále využito jako další užitná komodita, odtud název kogenerace.

Nepříjemnou vlastností plynových zážehových motorů je bohužel jejich značně nestabilní chod kvůli proměnné kvalitě paliva a velké dopravní zpoždění, dané značnými rozměry palivové cesty (směšovač, turbodmychadlo, mezichladič) a stlačitelnosti plynného paliva. V případě skokového navýšení zátěže navíc nezanedbatelnou dobu trvá, než se vůbec otevře plynová klapka do nově požadované polohy pro původní otáčky. V případě prudkého odlehčení je zde navíc ještě znát efekt turbodmychadla. Stejně tak bohužel problematické nastavit plynovou klapku tak, aby nedocházelo k překmitům v okamžitých otáčkách stroje a tak i generátorové frekvenci. Jde o kompromis - přesná regulace otáček bez překmitů či drobných oscilací je možná pouze velmi plynulou a jemnou změnou polohy plynové klapky, což je ale v přímém rozporu s požadavkem rychle reagovat na změnu zatížení, kde je naopak vyžadována co nejrychlejší odezva akčního členu, tedy plynové klapky.

4.2 Ostrovní provoz

Obecně ostrovní provoz může nastat ve dvou situacích: buďto dlouhodobý úmyslný provoz, kde je motorogenerátor jedinným či dominantním zdrojem energie, nebo krátkodobě v případě odpojení distribuční sítě a provozem na tzv. 'záskokový' motorogenerátor.

V tomto režimu je vyráběný činný a jalový výkon přímo dán zátěží a zajištění regulace frekvence - či spíše otáček motoru - a napětí bohatě postačuje.

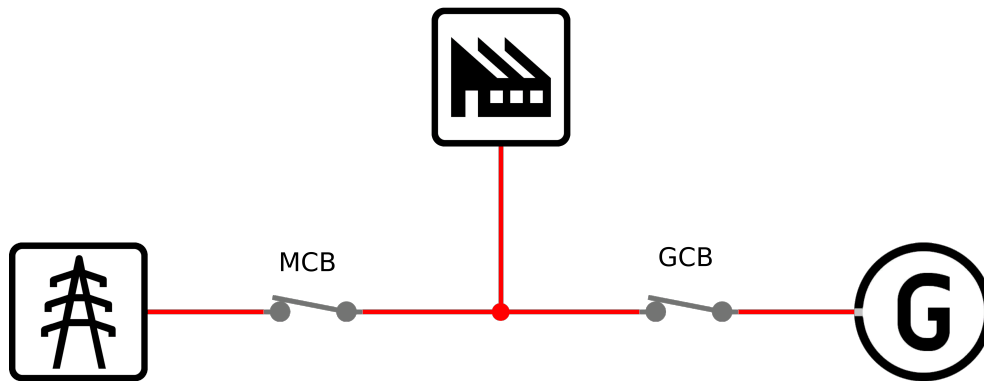
Motorogenerátor může být vybaven řídicím systémem pro přifázování a připojení k síti - jedná se však výhradně o krátkodobý provoz paralelně k síti (do 100 ms) a slouží pouze pro opětovné přehození zátěže zpět na distribuční síť bez výpadku napájení.

Pro tyto topologie se používají výhradně motorogenerátory se vznětovými motory na motorovou naftu, větší stroje s turbodmychadlem - i dvoustupňovým (biturbo), neboť jsou schopny velice pružně reagovat na prudké změny zatížení. Narozdíl od kogenerací, odpadní teplo zde není využito, od motorogenerátoru se chce pouze výroba elektrické energie, mají tedy nízkou účinnost. Stejně tak má motorová nafta výrazně vyšší pořizovací náklady než zemní plyn. Z těchto a mnoha dalších důvodů tyto stroje nepracují dlouhodobě paralelně k síti, nevztahují se tak na ně požadavky, definované v Grid Codes, nejsou tak předmětem této práce a takto hrubý popis pro úplnost běžně používaných topologií tak postačuje.

4.3 Jeden genset, pracující do sítě

Jedná se o jeden motorogenerátor, pracující dlouhodobě paralelně k síti. Drtivá většina kogeneračních jednotek pracuje v této topologii z některých těchto důvodů:

- Výkon stroje je volen s ohledem na požadavky pokrytí vlastní spotřeby.
- Výkon stroje může být omezen množstvím vyráběného paliva (bioplyn, důlní plyn).
- Trvalý export do distribuční sítě může být omezen stávající ampacitou vedení či jmenovitým výkonem transformátorů.



Obrázek 4.1: Ukázka topologie jeden genset, pracující do sítě

- Spalovací motor má v režimu malého zatížení velice nízkou účinnost.

Pro čističky odpadních vod a bioplynové stanice je tato topologie nejčastější. Motorgenerátor obecně může a nemusí být schopen práce v ostrově. Celé řešení, včetně řízení chodu bioplynového reaktoru, spalovacího motoru, synchronního generátoru, řízení a ochran je obvykle dodáváno jako celek specializovanými firmami, e.g. agriKomp[12].

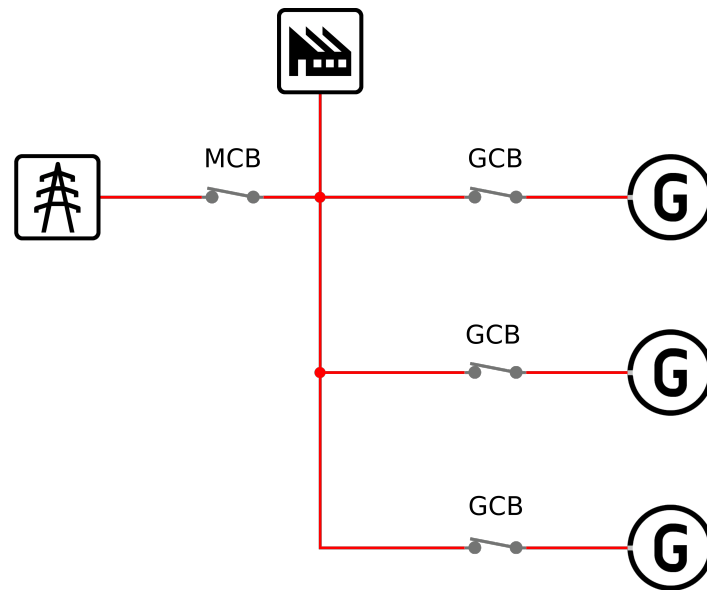
V topologii se obvykle vyskytují dva stykače či ovládané jističe. Funkce generátorového stykače, GCB, je zjevná. Síťový stykač, MCB, umožňuje v případě poruchy na síti bezpečně odpojit zátěž tak aby nebyly na zátěži překročeny bezpečné hodnoty napětí i frekvence a umožňuje i provoz v ostrovním režimu, pokud je jmenovitý výkon motorgenerátoru vyšší než maximální možná zátěž - nebo je možné méně důležitou zátěž řízeně odpojit.

Platí samozřejmě požadavky z kapitoly 3. věnované detailně Grid Codes. Řízení činného a jalového výkonu je opět na dohodě s provozovatelem distribuční soustavy. Znovu je nutné připomenout, že provozovatel distribuční soustavy může požadovat změnu řízení jalového výkonu kdykoliv během provozu motorgenerátoru.

4.4 Více gensetů, pracujících do sítě

V případě proměnlivé zátěže či požadavku na redundanci zdroje je možné použít vícero motorgenerátorů na jedné instalaci. Velice elegantně je řešen problém nízké účinnosti při malém zatížení spalovacích motorů - je možné je strojově zastavovat i startovat dle aktuální zátěže. Vznikne nicméně nový, závažnější problém: řízení P i Q vzhledem ke Grid Codes i v ostrovním provozu pokud je povolen. Pro tyto topologie je nutné uvažovat následující fakta:

- Měření P a Q vyráběné motorgenerátory není lokalizované v PCC.
- Pouhý součet vyráběného P i Q nemusí nutně odpovídat importu/exportu kvůli chování vlastní spotřeby. Obvykle je nutné přímé měření I/E vůči PCC.



Obrázek 4.2: Příklad topologie více gensetů, pracujících do sítě

- Motorgenerátory nemusí mít shodné jmenovité výkony - ani činné, ani zdánlivé.
- Topologie může být (a velice pravděpodobně bude) prostorově rozlehlá. Není tak možné provádět měření a řízení centrálně.

Z těchto faktů vyplývá nutnost použití nějakého typu real-time komunikace a alespoň částečná decentralizace řízení P i Q. Obecně je žádoucí každý genset v takovéto topologii zatížit poměrně k jeho jmenovitému výkonu stejně. Lidsky řečeno se gensety o zátěž 'rovnoměrně podělí', viz sekce o motorgenerátorech.

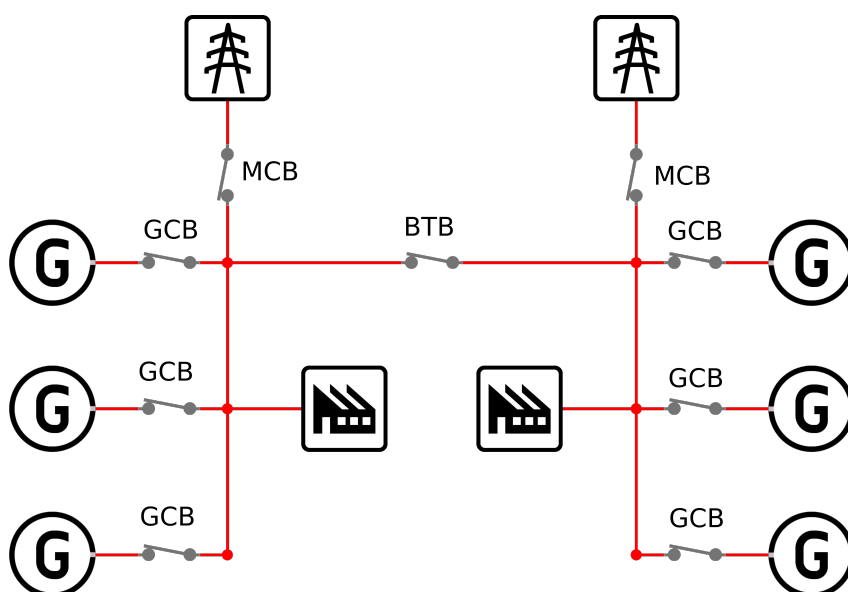
Tato topologie má však jedno velké úskalí. Není principiálně možné pro celou instalaci globálně stanovit P-Q diagram (i.e. bezpečnou pracovní oblast) synchronních generátorů. Řízení každého jednoho motorgenerátoru by mělo zohledňovat křivku kapability danou výrobcem konkrétního stroje. V případě, že bude potřeba dodat do sítě dané množství jalového výkonu, může dle aktuálně běžících motorgenerátorů dojít k omezení výroby P ve prospěch Q pokud se všechny běžící motorgenerátory nacházejí na hranici bezpečné pracovní oblasti anebo naopak nemusí a navenek, kdy je instalace vnímána jako black-box, není možné jinak určit zda k tomu dojde či nikoliv.

4.5 Složitější topologie - H

Tyto topologie jsou časté u instalací, kde je vyžadována nějaká forma redundance. Nejjednodušším způsobem je H-topologie.

Typické pro tuto topologii je užití dvou nezávislých přiváděčů na instalaci a existence ovládané spojky mezi nimi, obvykle značené jako BTB - Bus Tie Breaker. Zátěž obecně může být na levé sběrnici, na pravé, může být rozdělena rovnoměrně. Stejně tak mohou být na obou stranách různé motorgenerátory, pokud ovšem je klíčová právě redundance zdrojů energie, nebývá tomu tak.

Spojení těchto přiváděčů na instalaci skrze spojku je většinou zakázáno a explicitní spojení těchto dvou distribučních sítí musí být dojednáno s provozovateli obou sítí. Při takovémto spojení



Obrázek 4.3: Příklad H-topologie

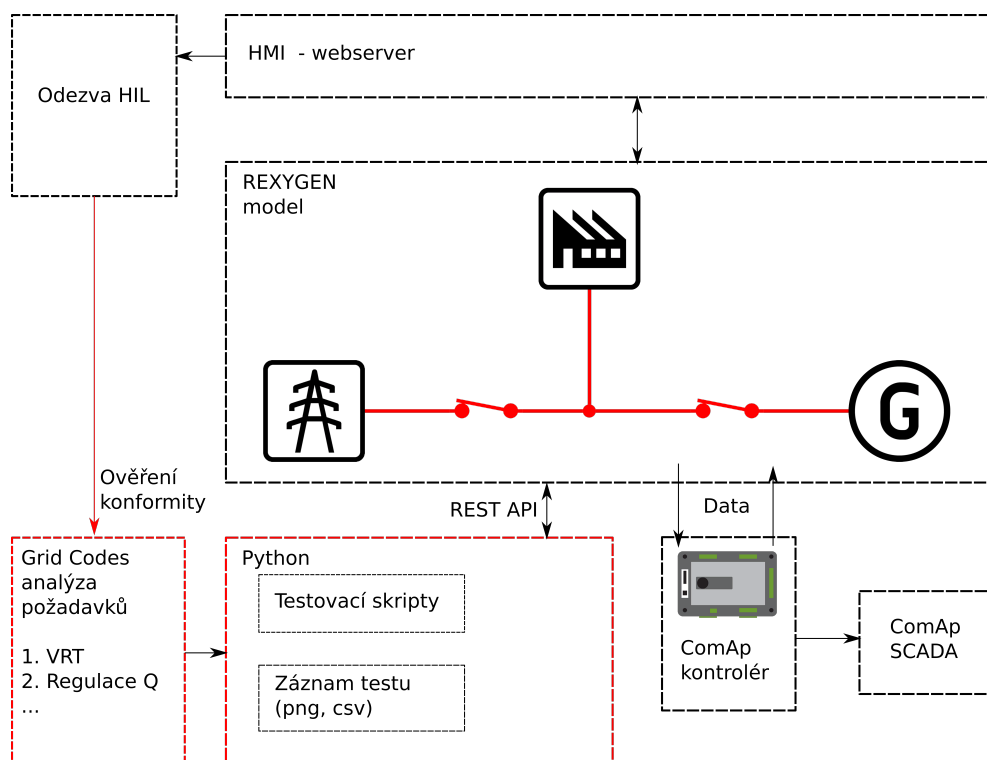
dochází ke změně topologie, která není uvažována v matematických modelech časového vývoje toků energie, jež slouží pro plánování výroby a posouzení stability pomocí N-1 kritéria.

V případě obzvláště vysokých nároků na redundanci (nemocnice, datacentra) je také možno použít kruhovou topologii s několika přivaděči. Takové instalace však už zpravidla bývají záskokové² a splnění Grid Codes je požadováno pouze pro zpětné přifázování a hladké odlehčení motorgenerátorů.

²Jakkoliv je problematika řízení frekvence, napětí a toků výkonů v takto vzniklých malých, ostrovních sítích komplexní a zajímavé téma, není předmětem této práce.

5.1 Prostředí a ekosystém

Jak již bylo zmíněno, práce se zabývá modelováním událostí pokrytých problematikou Grid Codes na již existujícím modelu gensetu firmy ComAp a.s., jež je používán pro školení zákazníků[14]. Celé prostředí popisuje následující diagram.



Obrázek 5.1: Prostředí ComAp HIL

5.1.1 Hardware-in-loop

V této práci je použito obecně standartního produktu firmy ComAp IntelliSys Gas[20], v metodě HIL (Hardware-In-Loop). Tato metoda se obecně používá pro simulaci elektromechanických systémů, které jsou řízeny elektronickou řídicí jednotkou. Typickým příkladem takového systému je spalovací motor (v tomto případě celý motorgenerátor), který je ovládán motorovou řídicí jednotkou.

V případě že simulovaný systém je dostatečně věrohodný, jsou výhody a hlavní použití této metody jsou následující:

- Je možné bezpečně a opakovaně provádět testy, které by za normálních okolností způsobily nevratné poškození či destrukci řízené technologie. Toto je jedním z hlavních cílů této práce. Jako příklad uvedme ověření funkce Over Voltage Ride-Through (viz 3.2.4). V případě chyby v implementaci požadavku v řídicím systému a neodpojení od sítě při příliš vysokém přepětí by mohlo dojít k mezizávrtovému zkratu ve statoru synchronního generátoru a tak k jeho nevratnému poškození.
- Testy na simulátoru krom již zmíněné bezpečnosti, mají další velice praktickou výhodu - nespotřebovávají palivo. V případě certifikací reálných záskokových gensetů e.g. pro nemocnice se jedná o spotřebu několika stovek litrů motorové nafty na hodinu provozu, je tedy zřetelné že možnost provést certifikační testy 'nanečisto' na simulátoru výrazně snižuje pravděpodobnost nesplnění podmínek certifikace, následných oprav a re-certifikace.
- Škálovatelnost v případě použití per-unit parametrizace modelu.
- Je možné na simulátorech provádět výcvik obsluhy, viz [14].

5.1.2 REXYGEN

REXYGEN[29] je otevřený nástroj pro konfiguraci a realizaci řídicích procesů. Jeho výhodou spočívá ve značném množství podporovaných zařízení a komunikačních protokolů, v grafickém programování pomocí značného množství vestavěných bloků a v dostupnosti diagnostiky za běhu. Další klíčovou vlastností je podpora webserveru pro vizualizaci a HMI, a podpora REST API, skrze které jsou publikovány veškeré veličiny a stavy aktuálního projektu. Tato vlastnost je pro další práci naprosto zásadní.

Knihovna vestavěných bloků byla ve spolupráci se Západočeskou Univerzitou pro účely použití ve firmě ComAp a.s. doplněna o proprietární funkční bloky pro simulaci distribuovaných zdrojů energie. Na těchto knihovnách jsou vystavěné modely topologií, zmíněných v kapitole Zdroje a topologie.

5.1.3 REST API

REST API[27, 28] je obecně webové API, které je ve shodě s REST architekturou. REST je zkratka, která znamená REpresentational State Transfer, volně přeloženo jako reprezentační přenos stavů. Klíčové aspekty shrnou oč jde mnohem lépe:

- Jedná se o komunikaci klient-server, kde obě protistrany mají jednoznačně dané zodpovědnosti.

- Komunikace je bezstavová, i.e. každý požadavek klienta musí obsahovat všechny informace, které server potřebuje pro zpracování požadavku.
- Data z odpovědi jsou principiálně cacheovatelná a musí být možné označit je explicitně označit zda jsou či nejsou cacheovatelná.
- Jednoznačný interface. Každý zdroj zahrnutý v transakci mezi klientem a serverem musí být jednoznačně identifikovatelný a každá zpráva musí obsahovat informace jak ji zpracovat.
- Reprezentaci dat je možné předat ve více formátech, e.g. JSON, HTML, čistý text

Vlastností REST api je mnohem více, jejich popis a vysvětlení však nejsou předmětem této práce a tyto klíčové vlastnosti jsou zmíněny z toho důvodu, že jsou klíčové pro ovládání modelu zvenku skrz jazyk Python. Dominantním formátem reprezentací dat je JSON, neboť je velice dobře čitelný lidsky i strojově. Není tedy důvodu znovu se pokoušet vynalézat kolo a užít jiného formátu reprezentace dat.

5.1.4 Python

Jedná se o open-source interpretovaný, multiplatformní, multiparadigmatický jazyk, původně určený k tvorbě jednoduchých skriptů, zastávající filozofii „včetně baterií¹“, jež vyjadřuje vestavěnou podporu značného množství funkcionalit, bez nutnosti dodatečné instalace dalších komponent[23]. Je tak možné velice rychle a efektivně řešit konkrétní technické problémy z hlediska lidského času potřebného k implementaci řešení. Jazyk Python podporuje rozšíření pro práci s vektory, lineární algebry, numerické řešení diferenciálních rovnic, optimalizační úloh v rozšíření SciPy[30] na straně jedné, přes vizualizaci v podobě grafů knihovny Matplotlib[21] až po práci s http skrze knihovnu requests[24], která je použita pro komunikaci skrze REST API.

Aby bylo vzorkování dat z modelu neblokující pro realizaci simulace poruchy, je nutné použít tzv. vláken[26]. To samo o sobě je pro účely simulace extrémně problematické, neboť vlákna v Pythonu jsou přepínána s periodou 5ms a tento fakt může ohrozit časování simulace. Není možné použít separátní proces kvůli oddělené paměti procesů a tak značné obtížnosti proces logování dat řízeně zastavit. Proto bylo užito metody `setswitchinterval` z knihovny `sys`[25], jež umožňuje nastavit periodu, s jakou jsou přepínána vlákna. Pro principiální zamezení potenciálních problémů s kolizí dvou vláken (hlavní a logovací) jsou metody pro nastavení a získání dat prováděny pod zámekem (`threading.Lock`[26]) a není tak možné současné volání těchto metod z více míst v kódu. Přístup je to nepochybně konzervativní, dle zkušeností autora je však vždy lepší tento mechanismus odstranit v případě že se ukáže zbytečným, než se ho do kódu zpětně pokoušet zavést za cenu rozsáhlé refaktORIZACE.

5.2 Modelování

5.2.1 Hlavní účel modelů ComAp

Účel ComAp modelů je primárně modelovat chování distribuovaných zdrojů pro účely vývoje a testování řídicích systémů z hlediska regulací činného a jalového výkonu, pro modelování poruch

¹Komunita uživatelů i vývojářů jazyka Python má tendenci používat tato jednoduchá, jasná a úderná přirovnání s odůvodněním, že přispívají k vyšší srozumitelnosti. Krásným příkladem je sada doporučených pravidel PEP20[22].

sítě (např. zkratové jevy apod.) nebyl původně zamýšlen. Veškeré potřebné veličiny pro modelování poruch, pokrytých problematikou Grid Codes (i.e. napětí a frekvence) jsou zveřejněné skrze REST API, na čemž tato práce staví.

5.2.2 Spalovací motor

Model spalovacího motoru jako takový je záležitost spadající spíše pod fakultu strojní a pro potřeby této práce plně postačuje popis jevů a veličin, jež jsou modelovány. Jsou to:

- Chování palivového okruhu (nádrž, ventil, palivový filtr).
- Chování interního regulátoru otáček (Speed Governor).
- Proces spalování paliva.
- Proces startování (točivý moment pastorku startéru).
- Mechanické ztráty (e.g. tření pístů o stěny válců).
- Moment setrvačnosti soustrojí kliková hřídel-písty-synchronní generátor.

Rozšíření do budoucna může zohledňovat typ použitého paliva a tím i typ motoru (zážehový/vznětový), vliv turbodmychadla a podobné jevy. Pro tuto chvíli model spalovacího motoru tak, jak je, plně postačuje.

5.2.3 Synchronní generátor

Obecný model synchronního stroje v knihovně REXYGEN je určen především pro simulaci provozu synchronního generátoru v reálném čase. Předpokládá se jeho využití pro návrh a testování řídicích jednotek gensetů a jeho komponent, tedy regulátoru otáček, buzení, pro vývoj a testování řízení činného a jalového výkonu.

Model předpokládá následující:

- Vinutí statoru je rozloženo „sinusově“ podél vzduchové mezery.
- Drážky statoru nezpůsobují kolísání indukčností rotoru v závislosti na poloze rotoru.
- Magnetická hystereze je zanedbatelná.
- Magnetická saturace v železe je zanedbatelná.
- Model pracuje s efektivními hodnotami veličin a předpokládá jejich harmonické průběhy.

Model tedy nebyl navržen pro simulaci poruchových stavů jako jsou jednofázové zkraty, trojfázové zkraty a podobné. Tento limit by však neměl pro tuto práci být relevantní a je uváděn pro úplnost popisu.

5.2.4 Síť

Modelování sítě jako takové je výpočetně velmi náročná úloha a není v knihovně REXYGEN plně k dispozici. Síť je tak zjednodušeně modelována jako nekonečně tvrdý zdroj definovaného napětí o definované frekvenci a pro dosavadní účely to plně postačovalo. Jak ale již bylo zmíněno, napětí i frekvence jsou dostupné skrze REST API, což nás přivádí k hlavnímu cíli této práce, a to je právě modelování poruchových jevů na síti, pokrytých problematikou Grid Codes, a pokusit se poté posoudit, zda je HIL řídicí jednotka ve shodě s Grid Codes či nikoliv.

Má smysl modelovat pouze poruchové jevy, které jsou časově závislé. Jmenovitě tedy:

- Voltage Ride-Through
- Frequency Ride-Through
- RoCoF Ride-Through
- Regulace jalového výkonu

Simulace proběhla na mobilní pracovní stanici Lenovo Thinkpad P53, i7-9750H (6c12t@2.6-4.5 GHz) v prostředí REXYGEN, ve stejný okamžik na stejném stroji byly spuštěny standardní monitorovací nástroje firmy ComAp, stejně tak probíhalo modelování poruch skrze Python skripty.

6.1 Chování modelu

Vzhledem k tomu, že původní účel stávajících modelů je modelovat distribuovanou výrobu a regulaci činného a jalového výkonu, je potřeba před započítím samotné práce na modelování poruchových stavů provést ověření stávajícího chování modelu motorgenerátoru a posoudit vhodnost použití pro účely této práce.

6.1.1 Vzorový genset

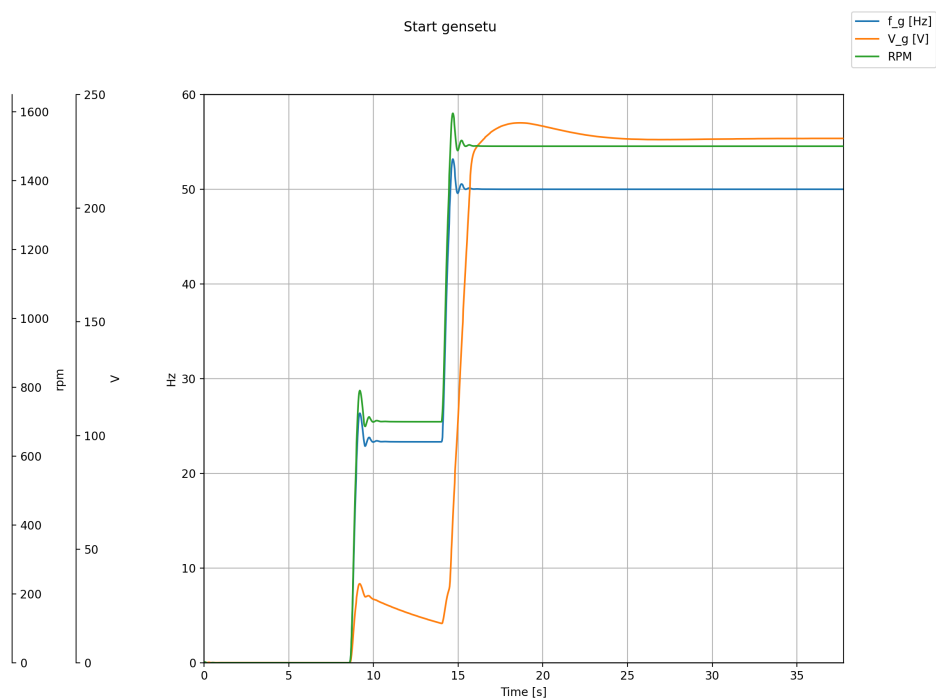
Štítkové parametry pro vzorový model, na němž je práce vystavěna, jsou shrnuty následující tabulkou.

Parametr	Hodnota	Vysvětlivka
P_n	100 kW	Jmenovitý výkon gensetu
U_n	231 V	Jmenovité napětí sítě i generátoru
f_n	50 Hz	Jmenovitá frekvence
p_p	2	Počet pól párů synchronního generátoru

Tabulka 6.1: Štítkové parametry generátoru v modelu gensetu

Následující komentované grafy mají za úkol popsat chování vzorového gensetu.

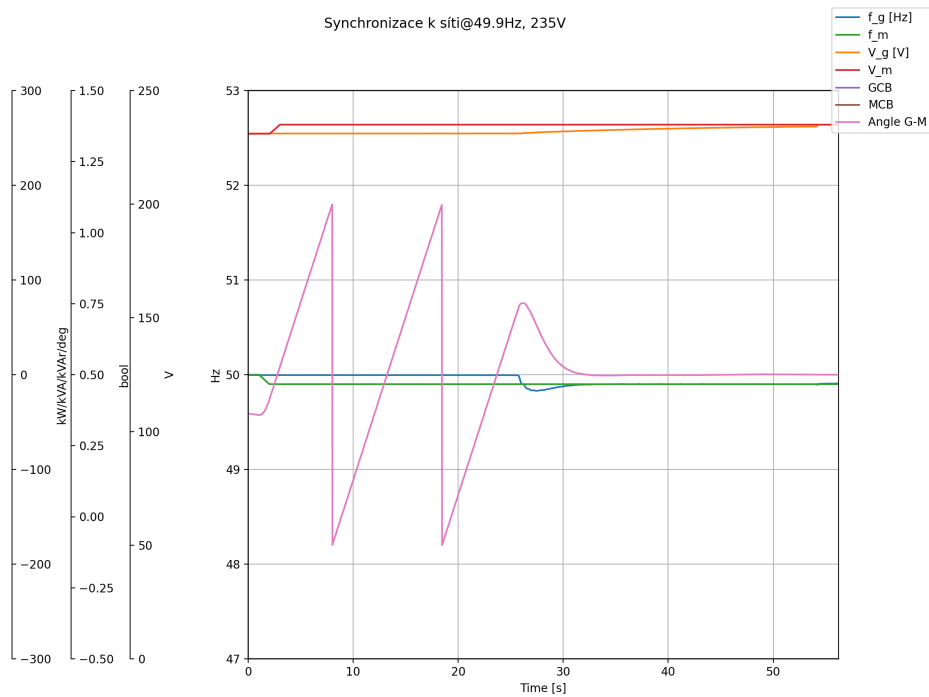
6.1.2 Start gensetu



Obrázek 6.1: Start vzorového gensetu

Samotný start motorgenerátoru vypadá jako fyzikálně uvěřitelný. Překmitky v otáčkách motoru vcelku odpovídají chování plynového zážehového motoru. Stabilizace napětí oproti frekvenci probíhá podstatně déle, řádově několi jednotek až desítek vteřin.

6.1.3 Synchronizace gensetu k síti



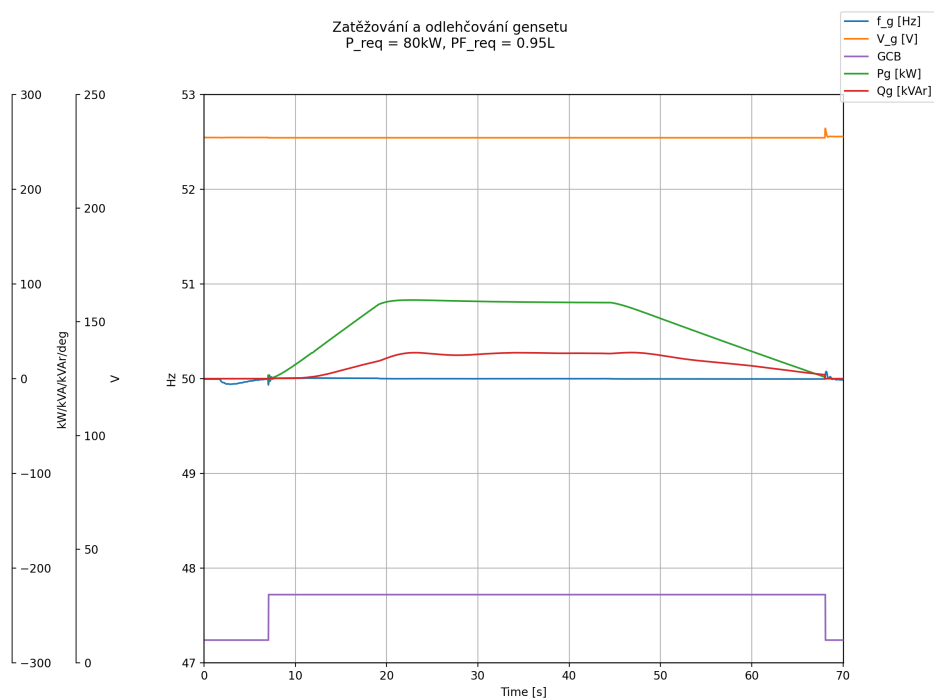
Obrázek 6.2: Fázevání vzorového gensetu

Testované podmínky fázevání jsou následující:

- Frekvence sítě $f_m = 49,9$ Hz
- Napětí sítě $V_m = 235$ V
- Maximální povolený úhel mezi sítí a generátorem $\Delta\varphi \leq 3^\circ$
- Maximální povolená napěťová odchylka generátoru vůči sítí $\Delta V \leq 0.5\%$

Jak je vidět, genset dokázal dostat úhlovou odchylku do požadovaných mezí velice rychle. Odchylku v napětí ne tak zcela. Toto zjištění koresponduje se zjištěním z předchozí sekce.

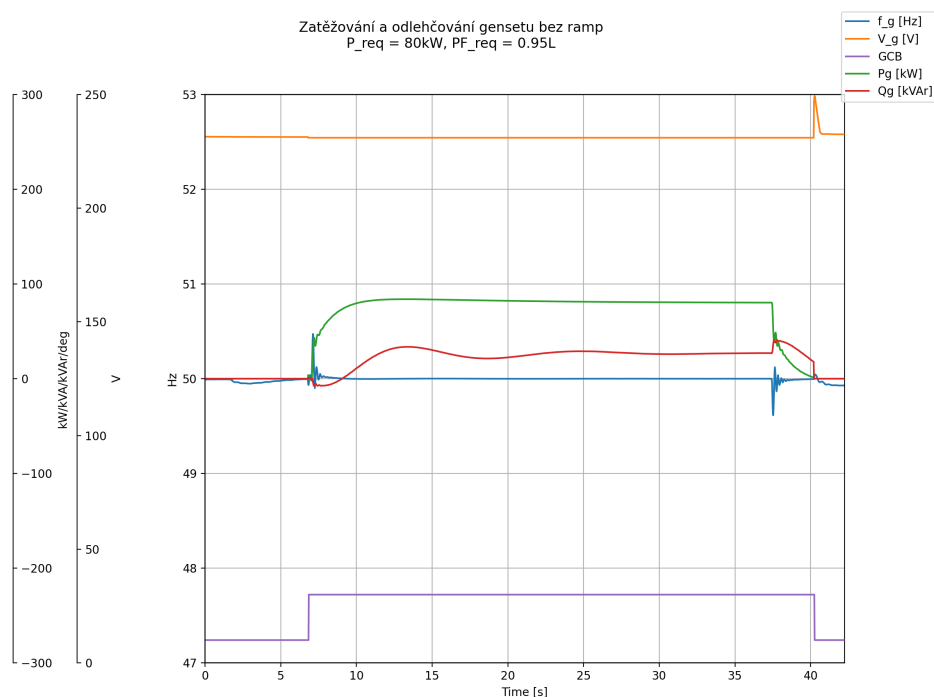
6.1.4 Zatížení a odlehčení gensetu po rampě



Obrázek 6.3: Zatěžování a odlehčování vzorového gensetu po rampě

V této situaci je časová změna výkonu omežována zatěžovací rampou (0-100%→15 s) a odlehčovací rampou (100-0%→30 s). Reálně bude požadavek na činný výkon omežován podle delších ramp, pro principiální ověření shody s Grid Codes při a priori předpokladu že změnu výkonu v čase lze omezovat snadno pouhým nastavením několika málo parametrů je tento stav adekvátní.

6.1.5 Zatížení a odlehčení gensetu bez rampy



Obrázek 6.4: Zatěžování a odlehčování vzorového gensetu bez omezení časové změny výkonu

Časová změna výkonu prodeř není nijak omežována. Jak je vidět, chování gensetu se drasticky změnilo. Toto je mimo jiné důvod, proč je nutné při zatěžování i odlehčování respektovat setrvačnost technologií prime moverů obecně.

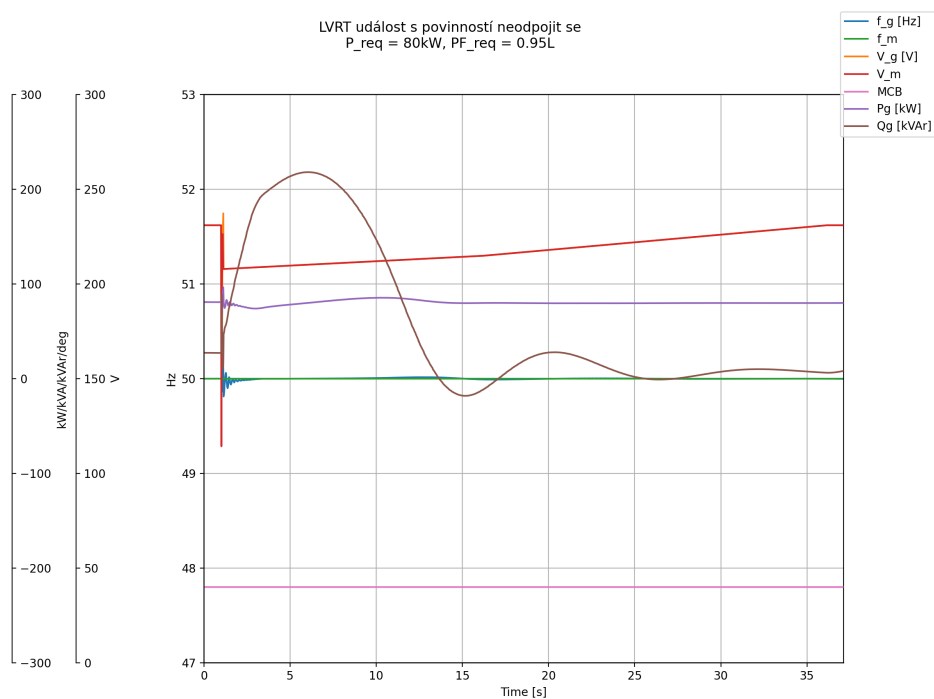
6.1.6 Zhodnocení chování vzorového gensetu

Po diskuzi s vedoucím této práce bylo chování vzorového gensetu shledáno jako akceptovatelné a neblokuující další práci.

6.2 Výsledky simulací

Samotná realizace simulací poruchových jevů probíhá formou nastavování frekvence a napětí sítě s časovým krokem menším, než je krok simulace. Dále v případě, že není testováno odpojení od sítě, se předpokládá shoda síťového napětí a frekvence s generátorovými kvůli úspoře datového toku při pořizování záznamů.

6.2.1 LVRT - povinnost neodpojit zdroj od sítě



Obrázek 6.5: Simulace LVRT události s povinností neodpojit zdroj

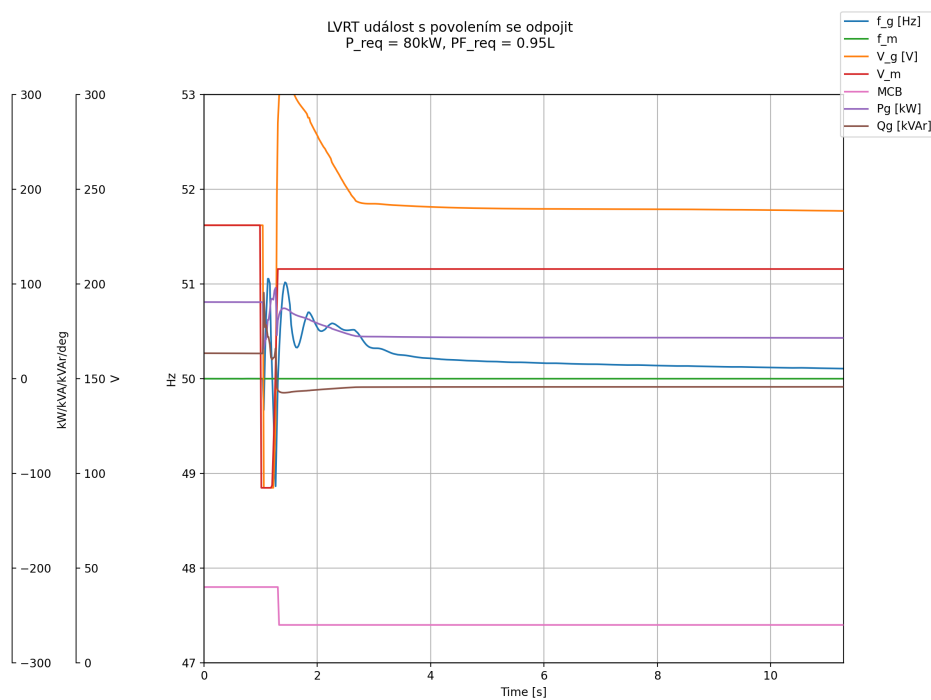
Tato událost je modelována hodnotami v tabulce 6.2, mezi kterými je provedena lineární interpolace, poté následuje rampa od 90% V_{nom} do 0.93% V_{nom} po dobu 15 s, pak rampa od 0.93% V_{nom} do 100% V_{nom} po dobu 20 s.

Jak je vidět ze záznamu, dojde k zuřivým oscilacím jalového výkonu v souladu s předpokladem. Průběh jalového výkonu naznačuje, že se řídicí systém pokusil tyto oscilace ztlumit v souladu s tímto konkrétním požadavkem Grid Codes.

t	V
[ms]	[%V _{nom}]
0	40
20	70
30	85
40	105
50	88
65	103
90	90

Tabulka 6.2: Tabulka hodnot LVRT události s povinností neodpojit zdroj

6.2.2 LVRT - povolení odpojit zdroj od sítě



Obrázek 6.6: Simulace LVRT události s povolením odpojit zdroj

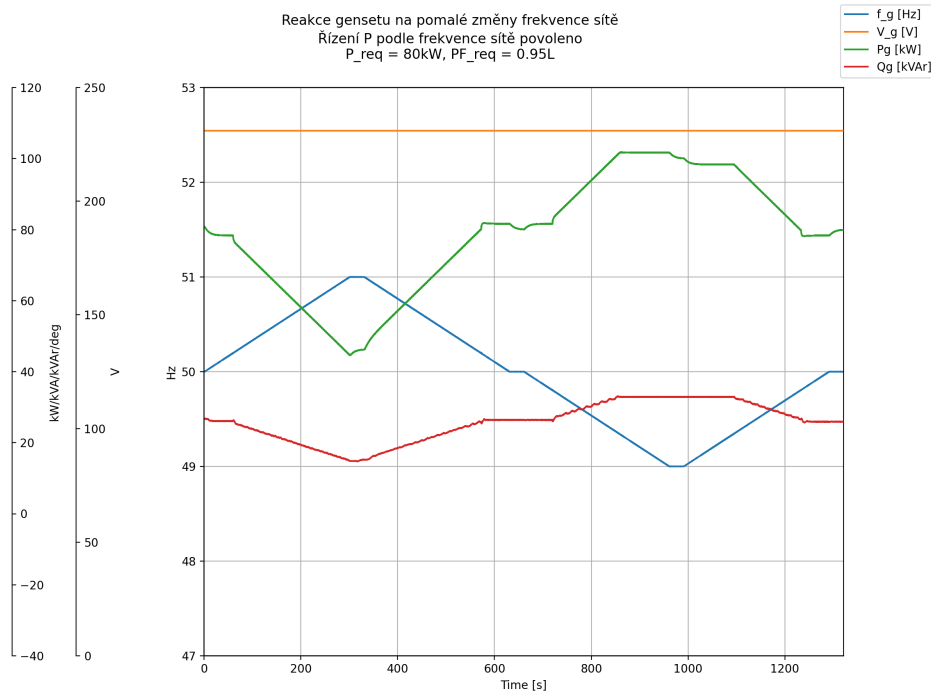
Jako v předchozím případě, událost je modelovaná tabulkou hodnot s lineární interpolací.

t	V
[ms]	[%V _{nom}]
5	40
200	40
250	60
300	90

Tabulka 6.3: Tabulka hodnot LVRT události s povolením odpojit zdroj

Ze záznamu je vidět odpojení zdroje od sítě rozpojením silového stykače na síťové straně. Skok v generátorovém napětí, přesahující cca 130 % jmenovitého napětí, je pravděpodobně příliš velký a může souviset se známými omezeními modelu (nejsou respektovány nelineární vlastnosti magnetického obvodu). Pokud pomineme tento malý zádrhel, řídicí jednotka provedla oprávněný zásah, v událostní historii řídicího systému opravdu byl nalezen záznam o odpojení na LVRT událost a shoda s Grid Codes v tomto konkrétním případě byla opravdu ověřena na HIL simulaci.

6.2.3 Aktivní řízení P na základě frekvence

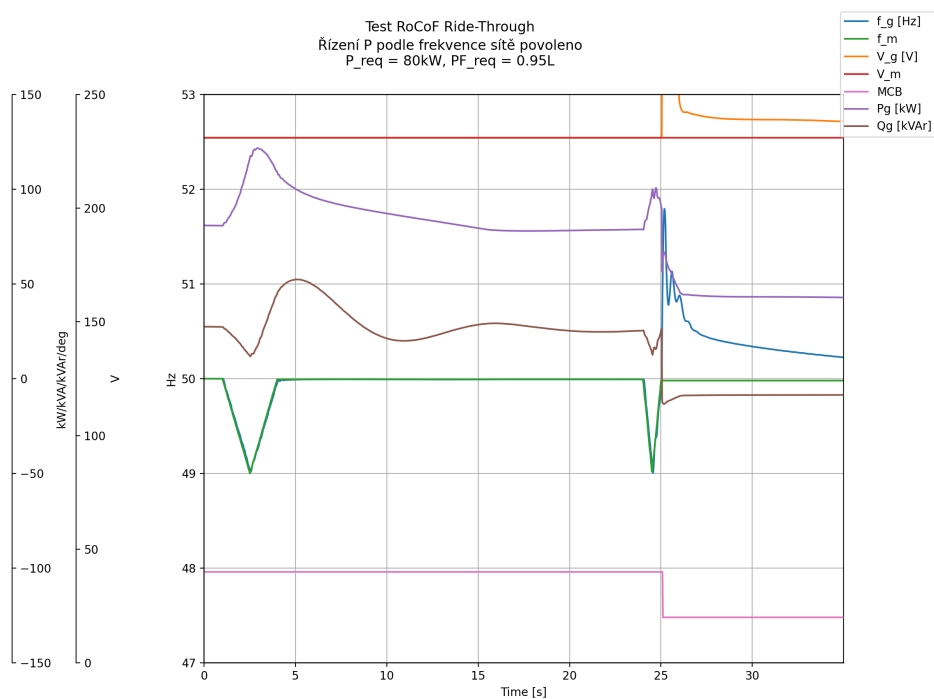


Obrázek 6.7: Simulace změn frekvence sítě za účelem vyšetření řízení P na základě frekvence sítě

Tato simulace spočívá v pomalých lineárních změnách frekvence sítě s následnou stabilizační fází. Ze záznamu je vidět v čase cca 50 s, že změna frekvence má bezprostřední vliv na činný výkon. Po tomto čase však řídicí systém detekuje odchylku frekvence vyšší, než povolený deadband, a začne aktivně činný výkon omezovat dle nadfrekvence, a v případě podfrekvence opačně. Všimněme si však, že na výkonu cca 100kW už nadále nedochází ke zvyšování výkonu dle frekvence. Genset dosáhl svého jmenovitého činného výkonu a řídicí systém tak správně požadavek na činný výkon na této hodnotě saturuje a snaží se tuto hodnotu udržet.

Toto chování HIL simulace je opět plně ve shodě s Grid Codes. Pokus dále zvyšovat výkon by znamenal odpojení na přetížení stroje, což je v přímém rozporu se záměrem Grid Codes.

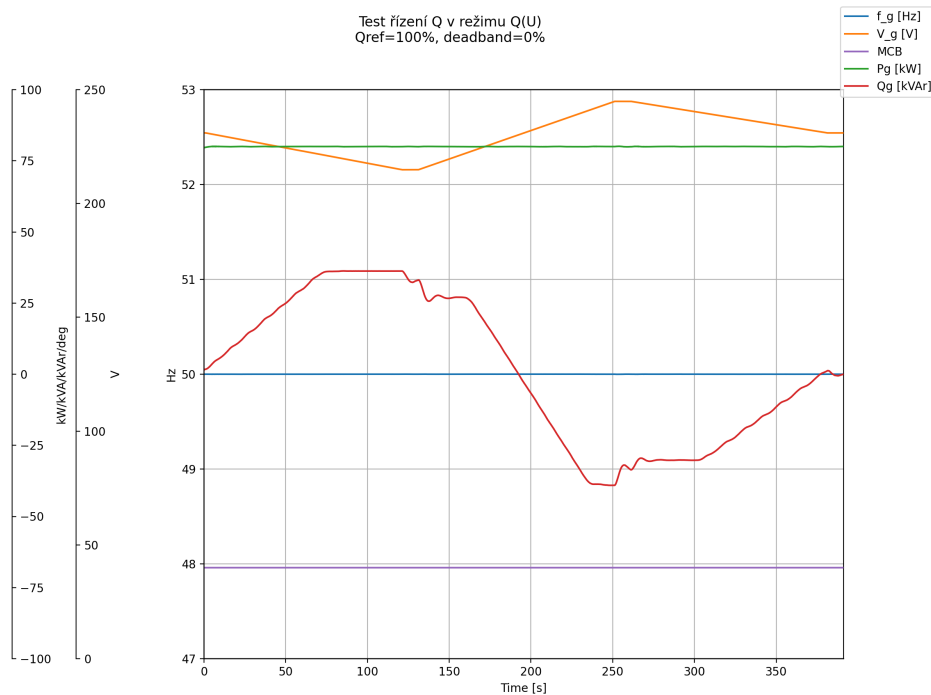
6.2.4 RoCoF Ride-Through



Obrázek 6.8: Simulace RoCoF rampami frekvence

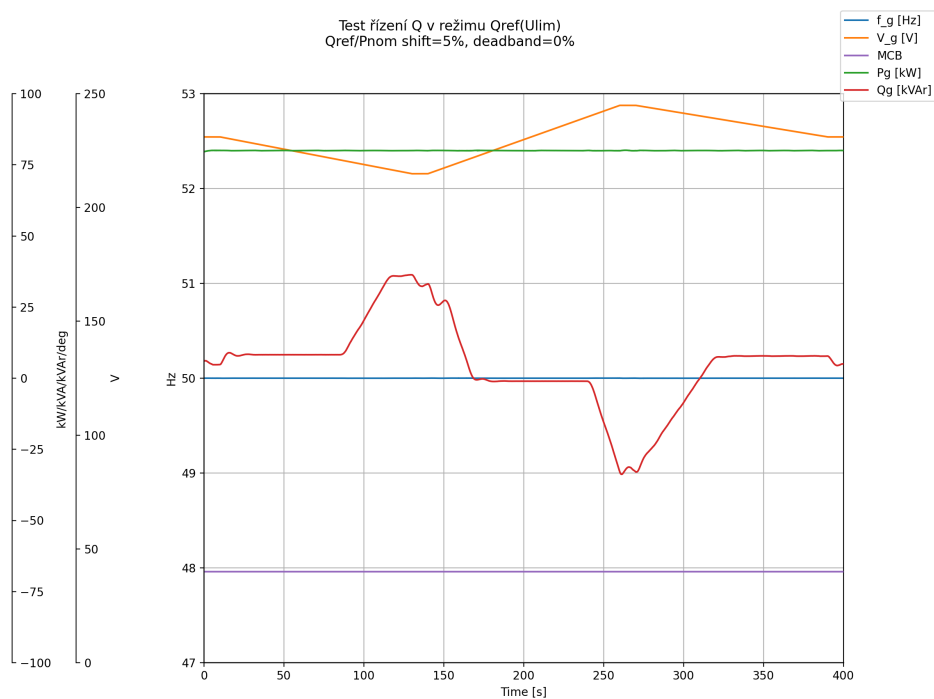
Tato simulace je jasná a přímočará. První rampa síťové frekvence na frekvenci 49 Hz a zpět na jmenovitou frekvenci má trvání 1.5 s, tedy $RoCoF = 0.66\text{ Hz/s}$. Druhá rampa má trvání 0,5 s a tedy $RoCoF = 2\text{ Hz/s}$ a ze záznamu je vidět, že opravdu došlo k odpojení zdroje od sítě. Toto chování je opět ve shodě s Grid Codes, v tomto konkrétním případě s VDE 4105 a VDE 4110.

6.2.5 Q(U)



Obrázek 6.9: Simulace změn napětí sítě za účelem vyšetření metody řízení jalového výkonu Q(U)

Při porovnání časového průběhu simulované hodnoty jalového výkonu s požadovanou řídicí charakteristikou Q(U) je vidět, že chování většinou odpovídá. Dochází ke změnám Q dle napětí sítě, trend Q sleduje trend V, Q je opravdu saturováno na $\pm 33\% Q/P_{\text{nom}}$. Podezřelé je chování Q v případě opouštění režimu saturace, jedno z možných vysvětlení jsou překmity ve výstupu regulátoru buzení, které mohly vzniknout vlivem ostrých hran v požadavku které pravděpodobně vznikly vsazenou stabilizační fází napětí sítě na konci ramp. V tomto okamžiku není první časová derivace vstupního signálu spojitá. Potvrzení či vyvrácení této hypotézy neproběhlo z důvodu nedostatku času.

6.2.6 $Q(U_{lim})$ 

Obrázek 6.10: Simulace změn napětí sítě za účelem vyšetření metody řízení jalového výkonu $Q_{ref}(U_{lim})$

Artefakty ze simulace předchozí metody řízení jalového výkonu 6.2.5 jsou znatelné i zde, a to za stejných okolností. V každém případě je po porovnání s příslušným požadavkem zjevná shoda s Grid Codes.

7.1 Zhodnocení modelování

- Přestože pro tento účel nebyl primárně zamýšlen, bylo chování modelu vzorového gensetu shledáno jako vyhovující a dostatečně reprezentativní pro problematiku Grid Codes.
- Vybrané požadavky bylo principiálně možno ověřit.
- Scénáře byly sepsané jako strojově opakovatelné a principiálně parametrizovatelné.

7.2 Zhodnocení práce s REST API a testovacích skriptů

- Průměrná doba čtení veličiny zjištěna cca 1 ms, průměrná doba zápisu do veličiny cca 2,5 ms. Takto krátké doby byly realizovatelné pouze na serveru na localhost, tedy na stejné stanici. V okamžiku kdyby simulace běžela na jiné stanici, takto krátké doby čtení a zápisu by nebyly v žádném případě dosažitelné, nebylo by možné provést periodický sběr dat kvůli latenci TCP-IP protokolu a omezené propustnosti dané datové sítě a v žádném případě by nebylo možné modelování poruchových jevů na síti smysluplně a reprodukovatelně realizovat.
- Tento čas je dominantně dán blokujícím čekáním na odpověď ze serveru skrze REST API, náročnost samotné realizace poruchových jevů je oproti tomuto zanedbatelná. Je zde tedy potenciál modelovat výrazně složitější jevy.
- Získávání více veličin naráz ze stejného funkčního bloku REST API v zásadě umožňovalo a bylo s výhodou využito ve vlákně sběru vzorků ze simulace, neboť takto získané vzorky měly stejné časové razítko a byly tak vzájemně porovnatelné. Veškeré záznamy byly tvořeny výhradně tímto mechanismem, což zachovává abstrakci od konkrétního hardwaru, tak i implementace modelu s HIL a zaručuje tak snadnou přenositelnost testovacích skriptů.
- Krok simulace byl nastaven na 20 ms, tedy jednu periodu frekvence sítě při 50 Hz. S přihlédnutím ke známým omezením REST API a k dosaženým dobám čtení a zápisu je tak velmi pravděpodobné, že byl dodržen vzorkovací teorém. Python však ze zkušeností

autora obecně nedokáže dodržet reálný čas a zavést v podobných studiích mechanismus kontroly dodržení vzorkovacího teoremu důrazně doporučeno.

- Pro potřebu zobrazení modelovaných dějů v grafu byla využita knihovna Matplotlib, u které se ukázalo problematické pracovat s více osami naráz. Z tohoto důvodu bylo nutné veličiny, jež měly v simulacích podobné hodnoty, sdružovat do jedné osy pro více fyzikálních jednotek. Jako příklad uveďme osu výkonů (kW, kVA, kVAr) jež byla použita i pro zobrazení úhlu mezi generátorem a sítí ve stupních. Společně s grafem je výstupem testu i csv s odebranými vzorky.
- Rozsahem se testovací skripty dle zkušeností autora blíží většímu dílu, jež by si za účelem udržovatelnosti, rozšiřovatelnosti a přenositelnosti kódu v době sepisování této práce zasloužilo revizi a následné úpravy od nezávislého pozorovatele. Jako v případě obecného vývoje softwaru, vhodná oponentura a konstruktivní kritika je nezbytnou součástí samotného vývoje pro splnění požadavků.
- Při vývoji skriptů se ukázala výhoda jazyka Python jakožto high-level jazyka, neboť bylo několikrát nutné úplně změnit přístup k řešení problému a provést nemalou refaktORIZACI pro další postup. Užití jazyka Python znamenalo menší časovou náročnost refaktORIZACE.

8.1 Seznámení s technickými specifikacemi

Seznámení a rozbor technických požadavků pro připojování distribuovaných zdrojů energie do distribuční sítě bylo provedeno. Byly identifikovány a analyzovány klíčové požadavky, relevantní pro motorgenerátory a kogenerační jednotky, které je možné prověřit v rámci simulace metodou hardware-in-loop (HIL).

8.2 Přehled a modelování provozních topologií

Přehled topologií byl vypracován, dále byl proveden rozbor jejich účelů a okolností použití. Bylo využito již existující modelové prostředí REXYGEN firmy ComAp v topologii jednoho motorgenerátoru, pracujícího do sítě a bylo navrženo modelování poruch na síti, spadajících do problematiky Grid Codes.

8.3 Simulace

Simulace byly provedeny pomocí skriptů v jazyce Python manipulací s parametry a veličinami modelu prostřednictvím REST API. Bylo provedeno ověření shody konkrétního řídicího systému v HIL simulaci s Grid Codes. Vzniklé skripty jsou abstrahované od konkrétní implementace modelu (tj. nejsou vázány na prostředí REXYGEN) a jsou přenositelné na jakýkoliv model, jež zveřejňuje potřebné veličiny skrze REST API.

8.4 Doporučení pro další rozvoj

- Zprovoznění simulace s pomocí stávajících skriptů na modelu více motorgenerátorů, pracujících do sítě (multi-parallel).
- Využití testovacích skriptů při vývoji a zejména testování řídicích systémů firmy ComAp.
- Zařazení HIL simulace do standardní regresní testovací sady pro řídicí systémy ComAp.

- Vytvoření rigorózních scénářů zrcadlících certifikační testy.

8.5 Vize

- Podpora bloků transformátoru a vedení v modelech topologií.
- Podpora škálovatelnosti motorgenerátorů: turbodmychadlo ano/ne, palivo nafta/zemní plyn/bioplyn.
- Nasazení v systému continuous integration (strojový cyklus vývoj-test-zpětná vazba-oprava chyb-opakovat).

- BTB Bus Tie Breaker = silový stykač, jež spojuje dvě silové sběrnice.
- FRT Fault Ride-Through = překlenutí poruchy bez odpojení
- FVE Fotovoltaická elektrárna
- GCB Generator Circuit Breaker = silový stykač na generátorové straně
- HMI Human Machine Interface = volně přeložitelné jako interface člověka a stroje
- LVRT Lower Voltage Ride-Through = překlenutí podpětí bez odpojení
- MCB Mains Circuit Breaker = silový stykač na síťové straně
- OVRT Over Voltage Ride-Through = překlenutí podpětí bez odpojení
- OZE Obnovitelné zdroje energie
- $P_{av,e}$ $P_{av,e}$ = export činného výkonu do sítě v PCC, sjednaný provozovatelem zdroje i operátorem distribuční sítě.
- PCC PCC, point of common coupling = místo připojení do distribuční soustavy
- P_{mom} Průměr činného výkonu za posledních 200ms, zdroj: VDE 4105, VDE 4110
- P_{mom} Průměr činného výkonu za posledních 200ms, zdroj: VDE 4105, VDE 4110
- RoCoF Rate of Change of Frequency = časová změna frekvence

1.1	Mapa lokality, ve které došlo k rozpadu sítě, klíčové lokality vyznačeny (zdroj: [4, 6])	3
1.2	Časový průběh okamžitých hodnot napětí v rozvodně Ryhall, 9. srpna 2019 (zdroj [4])	4
1.3	Časový průběh efektivních hodnot podpětí v Anglii, 9. srpna 2019 (zdroj [4])	5
2.1	Vzorový příklad struktury elektrizační sítě	9
3.1	Vzorový příklad Voltage Ride-Through kritéria	20
3.2	Příklad řídicí charakteristiky činného výkonu v závislosti na aktuální frekvenci sítě	22
3.3	P-Q diagram generátoru Leroy-Sommer LSA 54 M75[2]	23
3.4	Oblast povolené redukce činného výkonu ve prospěch jalového výkonu dle VDE 4110	24
3.5	Řídicí charakteristika jalového výkonu v závislosti na napětí sítě	25
3.6	Řídicí charakteristika konstantního jalového výkonu s limitací síťovým napětím	26
4.1	Ukázka topologie jeden genset, pracující do sítě	29
4.2	Příklad topologie více gensetů, pracujících do sítě	30
4.3	Příklad H-topologie	31
5.1	Prostředí ComAp HIL	32
6.1	Start vzorového gensetu	38
6.2	Fázování vzorového gensetu	39
6.3	Zatěžování a odlehčování vzorového gensetu po rampě	40
6.4	Zatěžování a odlehčování vzorového gensetu bez omezení časové změny výkonu	41
6.5	Simulace LVRT události s povinností neodpojit zdroj	42
6.6	Simulace LVRT události s povolením odpojit zdroj	43
6.7	Simulace změn frekvence sítě za účelem vyšetření řízení P na základě frekvence sítě	45
6.8	Simulace RoCoF rampami frekvence	46

6.9	Simulace změn napětí sítě za účelem vyšetření metody řízení jalového výkonu	
	$Q(U)$	47
6.10	Simulace změn napětí sítě za účelem vyšetření metody řízení jalového výkonu	
	$Q_{\text{ref}}(U_{\text{lim}})$	48

3.1	Příklady Grid Codes standardů	12
3.2	Požadavky na přesnost měření frekvence dle VDE 4105 a VDE 4110	14
3.3	Požadavky na přesnosti měření v ustáleném stavu dle IEEE 1547	14
3.4	Požadavky na přesnosti měření během přechodových dějů dle IEEE 1547	15
3.5	Požadavky na stav sítě před připojením zdroje dle VDE 4105	15
3.6	Požadavky na stav sítě před připojením zdroje dle VDE 4110	16
3.7	Požadavky na stav sítě před připojením zdroje dle IEEE 1547	17
3.8	Požadavky na fázování zdroje do sítě dle IEEE 1547	17
3.9	Porovnání defaultního nastavení ochran dle VDE 4105 a IEEE 1547	18
3.10	Požadavky na Frequency Ride-Through dle VDE 4105 i 4110	21
6.1	Štítkové parametry generátoru v modelu gensetu	37
6.2	Tabulka hodnot LVRT události s povinností neodpojit zdroj	43
6.3	Tabulka hodnot LVRT události s povolením odpojit zdroj	44

- [1] *IEEE Std 1547-2018 Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces.*
- [2] Leroy-Somer LSA 54 alternator datasheet. Dostupné z: https://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/4939_en.pdf.
- [3] OFGEM Investigation into 9 August 2019 power outage, . Dostupné z: https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/2020/01/9_august_2019_power_outage_report.pdf.
- [4] OFGEM Technical Report on the events of 9 August 2019, . Dostupné z: https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/2019/09/eso_technical_report_-_final.pdf.
- [5] OFGEM Appendices to the Technical Report on the events of 9 August 2019, . Dostupné z: https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/2019/09/eso_technical_report_-_appendices_-_final.pdf.
- [6] OFGEM National Grid ESO Report LFDD 9 August 2019, . Dostupné z: https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/2020/07/national_grid_eso_report_lfdd_9_august_2019.pdf.
- [7] *VDE-AR-N 4105 Technical Minimum Requirements for the Connection to and Parallel Operation with Low-Voltage Distribution Networks.*, .
- [8] *VDE-AR-N 4110 Technical rules for the connection of customer installations to the medium-voltage grid and their operation (TAR medium voltage)*, .
- [9] *VDE-AR-N 4120 Technical conditions for connecting customer plants to the high-voltage grid and operating them on said grid (TAR high voltage)*, .
- [10] *VDE-AR-N 4130 Technical Rules for the connection of customer installations to the extra-high voltage grid and their operation (Extra-high voltage TCRs)*, .
- [11] *VDE-AR-N 4140 Cascading of measures for system security in electricity supply grids*, .

- [12] agriKomp dokumentace, ©agriKomp GmbH.
- [13] VODNÍ ELEKTRÁRNA LIPNO. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/lipno-58166>.
- [14] ComAp Virtual Hands-On Training. Dostupné z: [https://www.comap-control.com/training/hands-on-training/course/virtual-hands-on-complex-applications-training-\(on](https://www.comap-control.com/training/hands-on-training/course/virtual-hands-on-complex-applications-training-(on).
- [15] *UNE-EN 50549-2 - Requirements for generating plants to be connected with distribution networks.*
- [16] *Engineering Recommendation G99 - Requirements for the connection of generation equipment in parallel with public distribution networks on or after 27 April 2019.*
- [17] EU 2016/631. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=CELEX:32016R0631>.
- [18] Hornsea One, . Dostupné z: <https://hornseaprojectone.co.uk/about-the-project#project-timeline-2020>.
- [19] Hornsea Two, . Dostupné z: <https://hornseaprojects.co.uk/hornsea-project-two>.
- [20] IntelliSys Gas manual. Dostupné z: <https://www.comap-control.com/products/detail/intelisisys-gas#datasheets>.
- [21] Matplotlib: Visualization with Python. Dostupné z: <https://matplotlib.org/>.
- [22] PEP 20 – The Zen of Python. Dostupné z: <https://www.python.org/dev/peps/pep-0020/>.
- [23] Python, . Dostupné z: <https://www.python.org/>.
- [24] Requests: HTTP for Humans, . Dostupné z: <https://docs.python-requests.org/en/latest/>.
- [25] sys — System-specific parameters and functions, . Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/sys.html>.
- [26] threading — Thread-based parallelism, . Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/threading.html>.
- [27] What is REST, . Dostupné z: <https://restfulapi.net/>.
- [28] What is a REST API, . Dostupné z: <https://www.redhat.com/en/topics/api/what-is-a-rest-api>.
- [29] REXYGEN. Dostupné z: <https://www.rexygen.com/cs/>.
- [30] SciPy. Dostupné z: <https://scipy.org/>.
- [31] TEDOM portfolio. Dostupné z: <https://www.tedom.com/cs/kogeneracni-jednotky/zemni-plyn>.