



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

ZAČLEŇOVÁNÍ STŘÍDAČOVÝCH VÝROBEN V REŽIMECH GRID-FORMING A GRID-FOLLOWING DO SOUSTAVY

INTEGRATION OF GRID-FORMING AND GRID-FOLLOWING INVERTERS INTO THE GRID

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Sýkora

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

BRNO 2024

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika a komunikační technologie**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Jan Sýkora

ID: 217653

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Začleňování střídačových výroben v režimech Grid-Forming a Grid-Following do soustavy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Stav a vývoj zdrojové základy ČR, synchronní generátory vs. měničové zdroje
2. Studie limitního podílu Grid-Forming a Grid-Following zdrojů pro bezpečnost a spolehlivost soustavy.
3. Podstata měničových zdrojů v režimu Grid-Forming a Grid-Following, varianty řešení
4. Realizace modelu a vzorové simulace chování při vybraných scénářích provozu
5. Zkoušky střídačů a jejich provozu v laboratorních podmínkách
6. Porovnání matematického modelu s měřením na reálném měnič
7. Zhodnocení výsledků

DOPORUČENÁ LITERATURA:

doporučená literatura podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 20.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce pojednává o začleňování výroben v režimech "Grid-Forming" a "Grid-Following" do soustavy. Klíčovými částmi této práce jsou pak zhodnocení aktuálního stavu a vývoje zdrojové základny ČR, kritická studie limitního podílu zdrojů, postrádajících přirozenou setrvačnost, pro zachování stabilního a bezpečného chodu soustavy a vydefinování podstaty měničových zdrojů v režimech "Grid-Forming" a "Grid-Following". Hlavním přínosem práce je vytvoření modelů "Grid-Forming" a "Grid-Following" měničů za účelem ověření způsobilosti provozu v grid-on režimu a jejich reakce na poruchy v soustavě.

KLÍČOVÁ SLOVA

měnič, grid forming, grid following, umělá setrvačnost, stabilita elektrizační soustavy, NAP SG, PSCADTM, obnovitelné zdroje energie, smart grids

ABSTRACT

The thesis deals with the integration of Grid-Forming and Grid-Following generation plants into the grid. The key parts of this thesis are the assessment of the current state and development of the resource base of the Czech Republic, a critical study of the limiting share of resources lacking natural inertia for maintaining stable and safe operation of the grid and the definition of the nature of inverter resources in "Grid-Forming" and "Grid-Following" modes. The main contribution of the work is the development of models of "Grid-Forming" and "Grid-Following" inverters in order to verify the capability of operation in grid-on mode and their response to disturbances in the system.

KEYWORDS

inverter, grid forming, grid following, synthetic inertia, power system stability, NAP SG, PSCADTM, renewable energy sources, smart grids

SÝKORA, Jan. *Elektroenergetika a komunikační technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2024, 74 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora:	Bc. Jan Sýkora
VUT ID autora:	217653
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2023/24
Téma závěrečné práce:	Elektroenergetika a komunikační technologie

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Lukáši Radilovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	12
1 Stav a vývoj zdrojové základny ČR	13
1.1 Aktuální stav a historický vývoj	13
1.2 Předpokládaný vývoj	15
1.2.1 Předpokládaný vývoj instalovaného výkonu OZE dle PDS	16
1.2.2 Progresivní scénář	17
1.2.3 Konzervativní scénář	18
1.2.4 Referenční scénář	19
1.2.5 Zhodnocení předpokládaného vývoje	20
2 Limitní podíl Grid-Forming a Grid-Following zdrojů	22
2.1 Zdroje založené na měničové technologii	22
2.1.1 Fotovoltaické elektrárny	22
2.1.2 Větrné elektrárny	23
2.1.3 Bateriová úložiště (BESS)	23
2.2 Stabilita soustavy	23
3 Podstata měničových zdrojů v režimu Grid-Forming a Grid-Following, varianty řešení	27
3.1 Měniče v režimu Grid-Following	27
3.1.1 Synchronizace GFL se sítí	29
3.1.2 Regulátor proudu	30
3.2 Měniče v režimu Grid-Forming	32
3.2.1 Zjednodušená základní řídicí struktura GFM měniče	32
3.2.2 Řízení provozu GFM	33
4 Realizace modelů měničů a simulace	38
4.1 Standardní řídicí modely GFM měniče	38
4.2 Model GFM na bázi multi-loop droop control	40
4.2.1 Popis hlavních prvků modelu GFM	41
4.3 Model GFL na bázi PLL single-loop droop control	48
4.3.1 Popis hlavních prvků modelu GFL	49
4.4 Testované scénáře	53
4.4.1 Simulační síť	54
4.4.2 Provoz v síti s i bez synchronního zdroje	55
4.4.3 Provoz ve spolupráci s jinými IBR	57
4.4.4 Schopnost udržování výkonové rovnováhy	58

4.4.5	Schopnost udržování napěťové stability	60
4.4.6	Odolnost v případech FRT	61
4.4.7	Přispívání k systémové stabilitě sítě	62
4.4.8	Odolnost vůči posunu fáze	64
Závěr		66
Literatura		68
Seznam symbolů a zkratk		73
A Rozšířený set průběhů pro jednotlivé testy		74
B Modely využité při provedených zkouškách		74
C Výstupní data z průběhů zkoušek		74

Seznam obrázků

1.1	Vývoj instalovaného výkonu ES ČR 2019-2022 (MW)	14
1.2	Vývoj instalovaného výkonu OZE v oblasti ČEZ distribuce	16
1.3	Progresivní scénář vývoje zdrojové základny ČR	17
1.4	Konzervativní scénář vývoje zdrojové základny ČR	19
1.5	Referenční scénář vývoje zdrojové základny ČR	20
2.1	Sít IEEE 39 bus	24
2.2	Grid-forming (VOC)	25
2.3	Grid-forming (droop)	25
2.4	Grid-following	25
2.5	Stabilita systému pro různé variace začlenění	26
3.1	Zjednodušené zapojení měniče v režimu GFL	28
3.2	Základní řídicí struktura měniče v režimu GFL	29
3.3	Blokové schéma PLL v synchronním souřadnicovém systému	30
3.4	Zjednodušené zapojení měniče v režimu GFM	32
3.5	Základní řídicí struktura měniče v režimu GFM	33
3.6	Závislosti frekvence a napětí na činném a jalovém výkonu v soustavách s ind. charakterem	35
3.7	Závislosti frekvence a napětí na činném a jalovém výkonu v soustavách s rez. charakterem	35
3.8	Blokové schéma SPC řídicí struktury	36
4.1	Blokové schéma fungování řízení multi-loop droop control	40
4.2	Model zdroje v PSCAD	41
4.3	Modul pro výpočet výkon v PSCAD	42
4.4	Modul Power filter v PSCAD	42
4.5	Modul AGC v PSCAD	43
4.6	Modul Droop power control v PSCAD	44
4.7	Modul napěťové smyčky v PSCAD	45
4.8	Modul proudové smyčky v PSCAD	46
4.9	Převod dq do ABC v PSCAD	47
4.10	Zdroje napětí v PSCAD	47
4.11	Základní řídicí struktura měniče v režimu GFL	48
4.12	Model zdroje závěsu v PSCAD	49
4.13	Model PLL závěsu v PSCAD	49
4.14	Model PLL závěsu - detail v PSCAD	50
4.15	Modul výpočtu výkonu v PSCAD	50
4.16	Modul výkonového regulátoru v PSCAD	51
4.17	Modul proudové smyčky v PSCAD	52

4.18	Převod dq do ABC v PSCAD	53
4.19	Zdroje napětí v PSCAD	53
4.20	Návrh testovací sítě v PSCAD	54
4.21	Frekvenční odezva GFM měniče	55
4.22	Frekvenční odezva GFM-GFM měniče	55
4.23	Frekvenční odezva GFM-GFL měniče	56
4.24	Frekvenční odezva GFL měniče	56
4.25	Frekvenční odezva GFM-GML měničů	57
4.26	Frekvenční odezva GFM-GFL měničů	57
4.27	Rozdělení činného výkonu GFM-GFM měničů	58
4.28	Rozdělení činného výkonu GFM-GFL měničů	58
4.29	Rozdělení činného výkonu GFM/GFL-Grid	59
4.30	Frekvenční odezva GFM měniče	59
4.31	Frekvenční odezva GFL měniče	59
4.32	Jalový výkon dodávaný GFM měničem	60
4.33	Napěťová odezva GFM měniče	60
4.34	Napěťová odezva GFL měniče	61
4.35	Jalový výkon dodávaný GFL měničem	61
4.36	Napěťová odezva GFM měniče	62
4.37	Napěťová odezva GFL měniče	62
4.38	Frekvenční odezva GFM měniče - proměnlivý VR	63
4.39	Činný výkon dodávaný GFM měniče - proměnlivý VR	63
4.40	Posun fáze na 3-fázovém průběhu napětí - GFM	64
4.41	Posun fáze na 3-fázovém průběhu napětí - GFL	64
4.42	Posun fáze GFM	65
4.43	Posun fáze GFL	65
4.44	Frekvenční odezva GFM měniče na posun fáze	65
4.45	Činný výkon dodávaný GFM měniče na posun fáze	65

Seznam tabulek

1.1	Vývoj instalovaného výkonu ES ČR 2019-2022 (MW)	14
1.2	Vývoj instalovaného výkonu OZE v oblasti ČEZ distribuce	16
1.3	Progresivní scénář vývoje zdrojové základny ČR	17
1.4	Konzervativní scénář vývoje zdrojové základny ČR	18
1.5	Referenční scénář vývoje zdrojové základny ČR	19
4.1	Rozdíly v provozování GFL a GFM měniče	39

Úvod

Současný vývoj elektrizační soustavy ČR prioritizuje začleňování obnovitelných zdrojů elektrické energie jakožto důsledek aktuálního úsilí Evropské unie ke snižování skleníkových plynů s příslibem klimatické neutrality. Zároveň dochází k postupnému útlumu v oblasti klasických kondenzačních zdrojů, pro jejich dosluhující technologii a rostoucí náklady na provoz, spojené právě s požadavky na snížení produkce skleníkových plynů.

Kombinace těchto faktorů má za následek postupné zvyšování podílu měničových zdrojů, což vede ke snížení přirozené setrvačnosti soustavy, která je dána především hmotou konvenčních synchronních generátorů nebo synchronních kompenzátorů. Tato přirozená setrvačnost je žadáným aspektem, který napomáhá k udržení frekvenční stability v soustavě v případě prudkých změn, jako je například výpadek zdroje nebo významného odběru.

Jako náhradu, nebo spíše doplnění přirozené setrvačnosti soustavy lze využít tzv. umělou setrvačnost. Pro její získání lze implementovat řadu opatření a technologií, jako jsou například virtuální generátory, které využívají měniče k simulování chování konvenčních synchronních generátorů a zlepšují tak schopnost sítě udržet stabilitu. Další technologií mohou být bateriová uložení, která lze využít pro rychlou výměnu činného výkonu se sítí na základě frekvence a rovněž tak napomáhat k udržení stability.

Schopnost Grid-Forming měničů generovat napětí a frekvenci může být rovněž klíčová při obnově soustavy po výpadku nebo pro udržení stability v odlehlých částech soustavy.

Jedním z úskalí postupně rostoucího podílu obnovitelných zdrojů energie je jejich vysoká volatilita způsobená závislostí těchto zdrojů na klimatických podmínkách v dané oblasti. Využívané Grid-Forming a Grid-following měniče tak umožňují větší flexibilitu v provozu elektrizační soustavy a jejich schopnost dynamicky reagovat na změnu zatížení přispívá k rychlému a adaptabilnímu řízení elektrické sítě.

V neposlední řadě mohou být Grid-Forming měniče klíčovým prvkem při tvoření autonomních mikrosítí a udržování jejich stabilního chodu.

Celkově lze říci, že hlavní motivací pro začleňování Grid-Forming měničů spočívá v zajištění stability a efektivního provozu elektrických sítí, zejména v prostředí s rostoucím podílem obnovitelných zdrojů energie a potřebou flexibilního řízení energetických systémů.

Cílem této práce je tak komplexní studie těchto měničů a ověření jejich schopností a využitelnosti v teoretických matematických modelech a simulacích.

1 Stav a vývoj zdrojové základny ČR

Elektrizační soustavu České republiky (ES ČR) lze rozdělit na Přenosovou soustavu (PS), ve správě společnosti ČEPS, a. s., a Distribuční soustavu (DS), která je ve správě distribučních společností ČEZ Distribuce, a. s, EG.D, a. s. a PREDistribuce, a. s.. Při návrhu ES ČR bylo původním záměrem připojení velkých centrálních zdrojů do PS na hladinách 400 a 220 kV. DS byla navrhována převážně jako pasivní, s minimem významných zdrojů. Tok výkonů byl tak zamýšlen směrem z vyšších napěťových hladin k odběratelům na hladinách 110 kV a nižších. Přímo do PS je připojena více než polovina instalovaného výkonu elektráren ČR, jehož celková hodnota je 20 852 MW. Elektrárny připojené do PS tak disponují výkonem 11 177 MW (53,6%), elektrárny připojené do DS pak 9 675 MW (46,4%). [1]

S rozmachem obnovitelných zdrojů energie (OZE) se však situace postupně mění, jelikož přibývá tzv. DECE zdrojů, které jsou připojovány do distribuční soustavy na všech hladinách. Typicky se pak jedná o malé uhelné elektrárny, teplárny a větrné parky (110 kV), malé vodní elektrárny a solární parky (35/22 kV) a mikro zdroje (0,4 kV).

Rovněž dochází k postupnému ústupu od klasických kondenzačních zdrojů, které jsou jedním z hlavních zástupců velkých centrálních zdrojů. Příčinou těchto změn jsou převážně ekologicko-ekonomické důvody. Tento přechod má za následek snížení setrvačnosti a stability sítě a rovněž přetok výkonů do vyšších napěťových hladin, jelikož se zdrojová základna přesouvá na nižší napěťové hladiny.

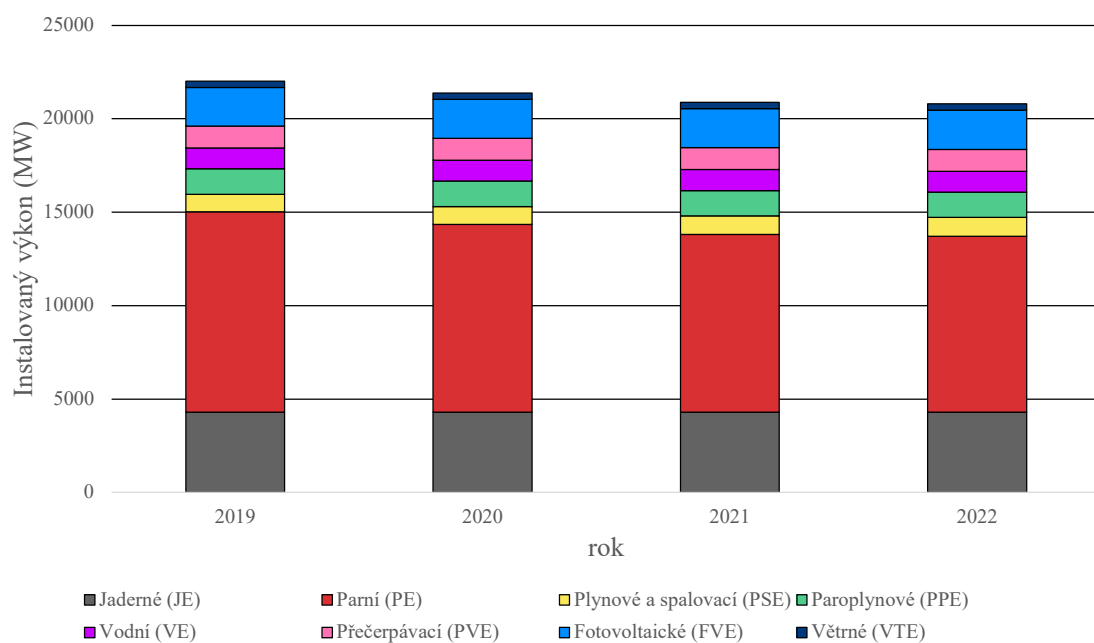
Podíl instalovaného výkonu OZE vůči klasickým zdrojům tak neustále roste a podle dat organizace Eurostat k roku 2021 činil na území ČR 17,67%. [2]

1.1 Aktuální stav a historický vývoj

Jak lze pozorovat v Tab. 1.1, tak v aktuálním rozložení zdrojové základny, i přes dlouhodobý pokles, jsou stále dominantním zdrojem v ES ČR parní elektrárny, které na konci roku 2022 tvořily 45,3% s výrobou 48,5%. Více jak pětinu instalovaného výkonu i nadále tvoří jaderné elektrárny s 20,6%, a výrobou 36,7%. OZE pak dle roční zprávy ERÚ [3] tvoří 17,67% instalovaného výkonu s výrobou 12,4%.

Tab. 1.1: Vývoj instalovaného výkonu ES ČR 2019-2022 (MW), převzato z [3] a upraveno autorem

Zdroj energie (MW)	2019	2020	2021	2022
Jaderné (JE)	4290,0	4290,0	4290,0	4290,0
Parní (PE)	10729,9	10058,8	9527,7	9415,9
Paroplynové (PPE)	1363,5	1363,5	1 363,50	1363,5
Plynové a spalovací (PSE)	937,7	961,7	983,2	1012,2
Vodní (VE)	1113,2	1113,9	1114,6	1113,6
Přečerpávací (PVE)	1171,5	1171,5	1171,5	1171,5
Větrné (VTE)	339,4	339,4	339,4	339,1
Fotovoltaické (FVE)	2069,1	2079,5	2087,7	2 100,40
Celkem ČR	22014,3	21378,5	20877,6	20806,2



Obr. 1.1: Vývoj instalovaného výkonu ES ČR 2019-2022 (MW) převzato z [3]

Je nutné však podotknout, že z celkové výroby OZE tvoří 71,83% elektrárny spalující biomasu, bioplyn nebo elektrárny vodní. Tyto elektrárny rovněž dodávají do soustavy přirozenou setrvačnost, jelikož jejich výroba je založená na synchronních generátorech. Lze tak říci, že aktuálně více než 88% zdrojů je schopno při svém provozu přispívat k setrvačnosti a s tím také ke stabilitě soustavy.

1.2 Předpokládaný vývoj

(Tato podkapitola vychází ze studie „Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040“, neboli MAF CZ, zpracované společností ČEPS a.s. v roce 2022 [6])

Na základě studie MAF CZ z roku 2022 [6], lze v následujících letech očekávat pokračování dlouhotrvajícího trendu poklesu uhelných zdrojů.

Jednou z hlavních motivací jsou ekonomicko-ekologické důvody, podmíněné příslibem snížení produkce skleníkových plynů. Dle MAF CZ 2022, tak lze uvažovat 3 možné scénáře, progresivní, konzervativní a referenční. Výsledky progresivního a konzervativního scénáře reflektují současné trendy v českém energetickém sektoru, nové cíle Evropské unie a rozvoj nízkoemisní energetiky. Konzervativní scénář slouží také jako základ pro formulaci dokumentu Očekávané dlouhodobé rovnováhy (ODDR) [7] do roku 2050. Referenční scénář je vytvořen na základě zjištění z provedeného dotazníkového šetření [6].

Všechny tyto scénáře pak pracují s předpokladem navýšení výrobních kapacit jaderných elektráren po roce 2035. Tento předpoklad však představuje riziko, jelikož dostavba jaderných bloků na území České republiky je sice plánovaná, avšak velice nejistá. Naopak je důležité zmínit již dosluhující technologii JE Dukovany, která i za předpokladu maximalizace životnosti nebude po roce 2047 schopna dalšího provozu. Tento fakt společně s plánovaným ústupem od fosilních paliv staví energetiku České republiky do velice nejisté budoucnosti, především pak kvůli problematické náhradě těchto zdrojů. Jednou z možných variant pak představují OZE, na území České republiky pak především FVE, jelikož geografické podmínky ČR neumožňují ve větší míře efektivní provoz VTE. Využití energie poskytované vodními toky na našem území je již na svém maximu.

Toto řešení však nezajišťuje úplnou, ani ideální náhradu, jelikož OZE a především FVE jsou obvykle výrazně závislé na geografických a meteorologických podmínkách, což z nich dělá vysoce volatilní zdroj s problematickou predikcí a řízením. Tento jev pak lze částečně kompenzovat různými způsoby, mezi které lze zahrnout akumulaci energie, jako například bateriová a gravitační úložiště, nebo dynamické řízení spotřeby, dle možností výroby. [8]

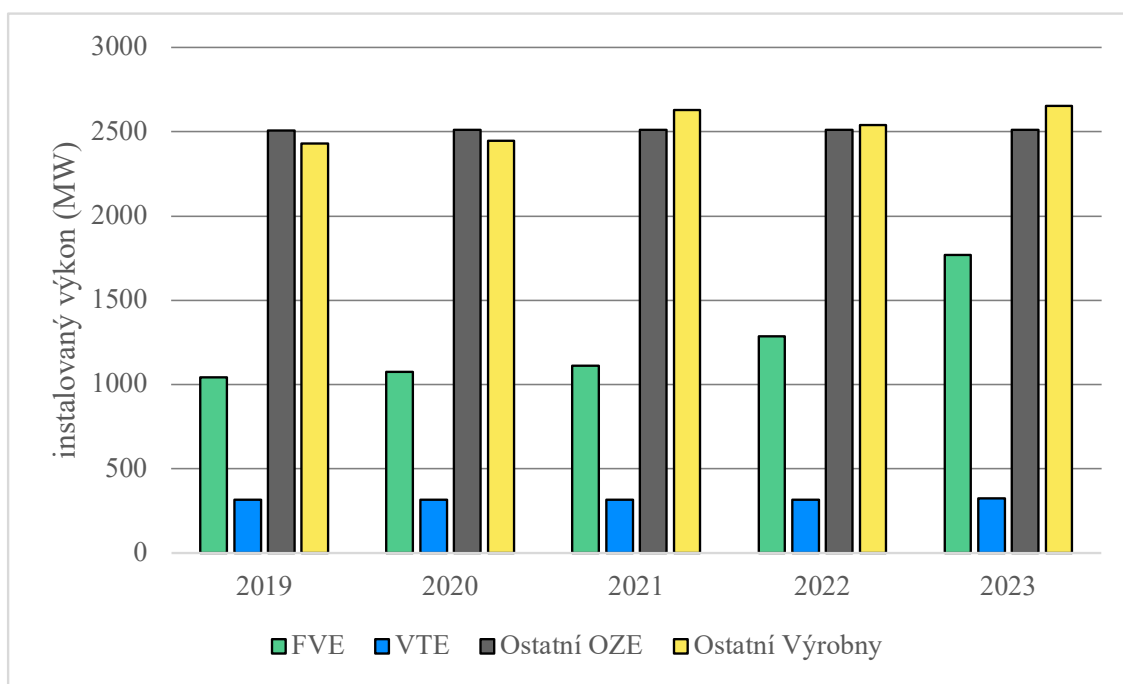
V předpokládaných scénářích vývoje zdrojové základny ČR se pak s těmito technologiemi uvažuje a preferovanou možností jsou po vzoru EU bateriová úložiště. Tyto úložiště pak lze využívat pro poskytování podpůrných služeb pro PS a DS ve špičkových obdobích. Předpokládaný způsob připojení těchto úložišť do elektrizační soustavy je pak prostřednictvím Grid-forming měničů, pro jejich versatilní využití v oblasti podpůrných služeb.

1.2.1 Předpokládaný vývoj instalovaného výkonu OZE dle PDS

Dle dat poskytovatelů distribučních soustav (PDS), konkrétně pak společnosti ČEZ Distribuce, a. s., lze předpokládat zvyšující se nárůst v oblasti měničových zdrojů. Především pak v oblasti FVE, kde je pro rok 2024 v soustavě ČEZ distribuce plánováno navýšení počtu na 130 000 instalovaných výroben z nichž přibližně 112 500 je tvořeno mikrozdroji, viz 1.2. Tento vývoj je pak možné extrapolovat na ostatní PDS na území České republiky. Z tohoto vyjádření pak lze předpokládat obecné navýšení výrobních kapacit v oblasti FVE, popřípadě VTE.

Tab. 1.2: Vývoj instalovaného výkonu OZE v oblasti ČEZ distribuce

Typ výroby	2019		2020		2021		2022		2023		2024
	ks	MW	ks	MW	ks	MW	ks	MW	ks	MW	ks
FVE	22034	1044	26122	1075	31992	1113	53277	1287	96737	1770	130000
VTE	88	316	88	316	87	316	89	316	95	325	110
Ostatní OZE	1577	2509	1581	2511	1585	2512	1583	2512	1588	2512	1595
Ostatní výroby	409	2429	438	2445	458	2628	459	2540	475	2652	490
Celkový součet	24108	6298	28229	6347	34122	6569	55408	6755	98895	7259	132195
z toho Mikrozdroje	4640	20.3	8609	40.0	14324	71.0	35185	222.2	75947	557.6	112500



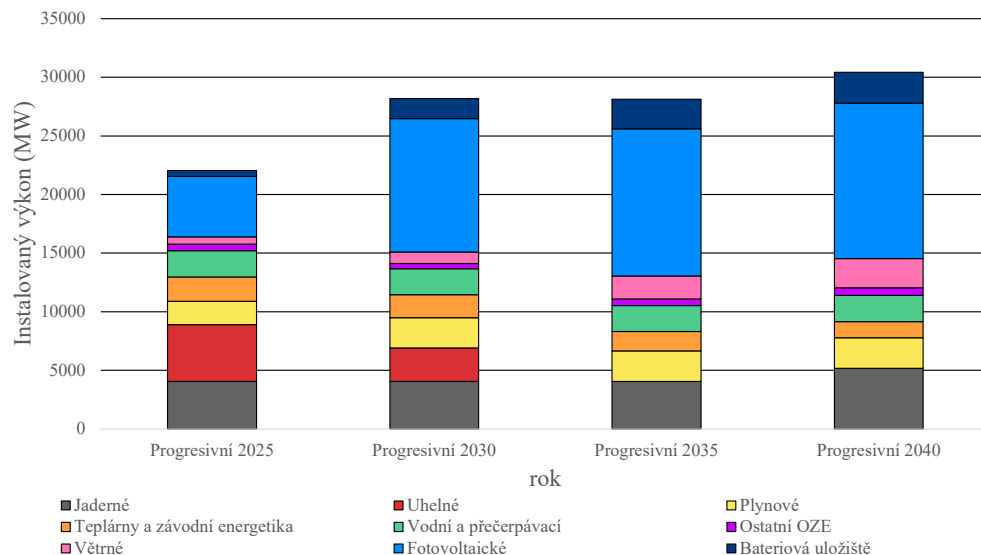
Obr. 1.2: Vývoj instalovaného výkonu OZE v oblasti ČEZ distribuce

1.2.2 Progresivní scénář

Tento scénář představuje zrychlený útlum uhelných zdrojů a vyšší penetraci obnovitelných zdrojů energie. Oproti konzervativnímu scénáři je kompletní odstoupení od uhlí stanoveno o pět let dříve, konkrétně na rok 2033. Předpokládaný provoz tepláren a závodní energetiky je shodný s konzervativním scénářem. Rozvoj instalovaného výkonu větrných a fotovoltaických elektráren odpovídá progresivní predikci těchto obnovitelných zdrojů.

Zdroj energie (Progresivní)	2025	2030	2035	2040
Bateriová uložení	514	1711	2513	2648
Fotovoltaické	5159	11406	12567	13238
Větrné	617	958	1959	2500
Ostatní OZE	555	451	538	648
Vodní a přečerpávací	2231	2231	2231	2231
Teplárny a závodní energetika	2086	1943	1659	1373
Plynové	1986	2602	2602	2602
Uhelné	4851	2850	0	0
Jaderné	4047	4047	4047	5187
Celkem ČR	22046	28199	28116	30427

Tab. 1.3: Progresivní scénář vývoje zdrojové základny ČR převzato z [6]



Obr. 1.3: Progresivní scénář vývoje zdrojové základny ČR převzato z [6]

Instalovaný výkon v ostatních segmentech decentralizované výroby elektřiny je v souladu s Národní energetickou koncepcí České republiky. Scénář je postaven na progresivním scénáři spotřeby [6], který zohledňuje ambiciózní cíle Evropské unie v oblasti snižování emisí a předpokládá pro Českou republiku trajektorii rychlé zelené transformace, což znamená zvýšenou spotřebu elektřiny v důsledku rozsáhlé elektrifikace.

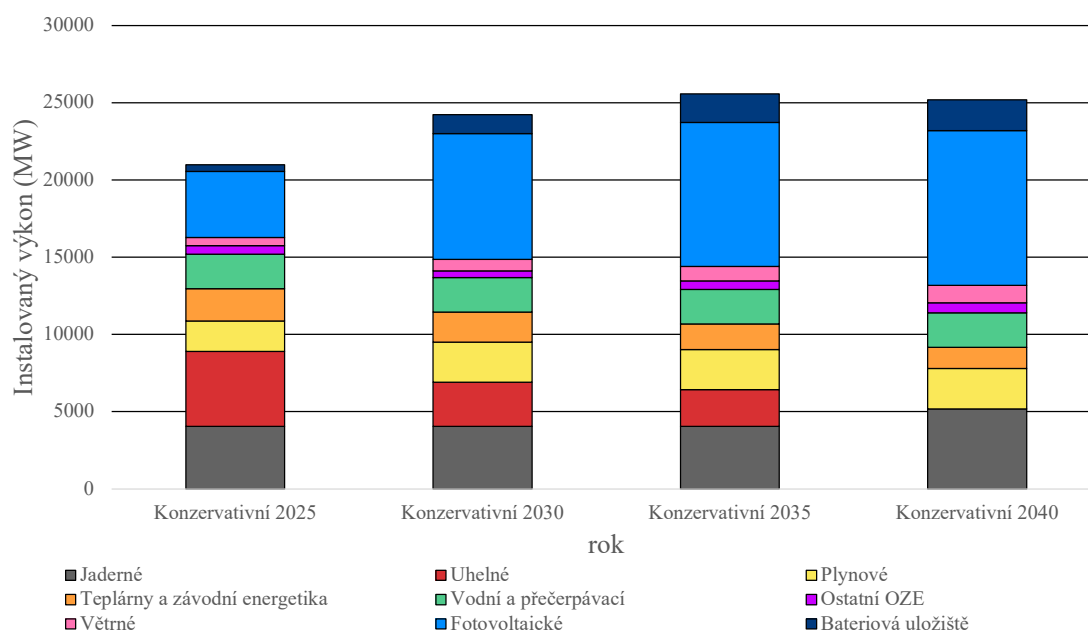
1.2.3 Konzervativní scénář

Tento scénář je založen na výsledcích z dotazníkového šetření do roku 2025. Po této době se předpokládá výrazné snížení využití uhelných zdrojů. Rovněž se předpokládá, že do roku 2038 dojde k úplnému ústupu od uhelné energetiky. Co se týče vývoje spotřeby elektřiny, tento scénář koresponduje s konzervativním scénářem spotřeby, viz MAF 2022 [6].

Zdroj energie (Konzervativní)	2025	2030	2035	2040
Bateriová uložení	427	1220	1863	2001
Fotovoltaické	4268	8133	9317	10005
Větrné	529	742	942	1141
Ostatní OZE	555	451	538	648
Vodní a přečerpávací	2231	2231	2231	2231
Teplárny a závodní energetika	2086	1943	1659	1373
Plynové	1986	2602	2602	2602
Uhelné	4851	2851	2382	0
Jaderné	4047	4047	4047	5187
Celkem ČR	20980	24220	25581	25188

Tab. 1.4: Konzervativní scénář vývoje zdrojové základny ČR převzato z [6]

Rozvoj instalovaného výkonu větrných a fotovoltaických elektráren odpovídá realistické predikci. V případě fotovoltaických zdrojů se předpokládá výraznější nárůst instalovaného výkonu v rámci realistického výhledu, díky prostředkům z Modernizačního fondu a dalším programům podporujícím obnovitelné zdroje. Bateriová akumulace spolu s investicemi do OZE po roce 2030 dle předpokladu postupně dosáhne až 20 % celkového instalovaného výkonu ve fotovoltaických elektrárnách [6].



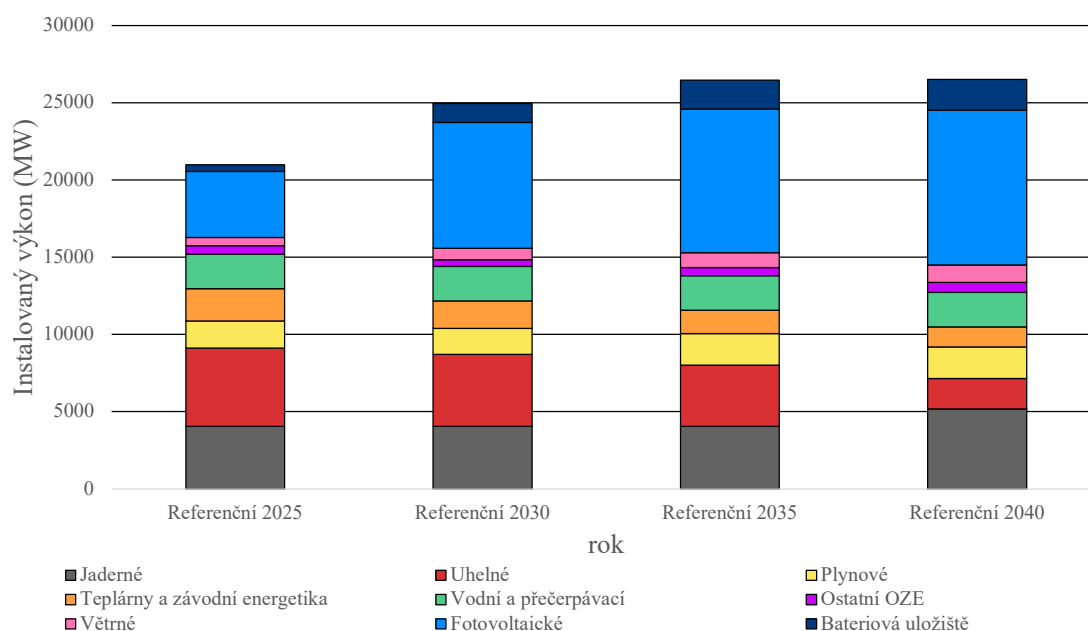
Obr. 1.4: Konzervativní scénář vývoje zdrojové základny ČR převzato z [6]

1.2.4 Referenční scénář

Referenční scénář je sestaven na základě dat získaných od poskytovatelů elektrické energie v rámci dotazníkového šetření provedeného ČEPS v roce 2021.

Zdroj energie (Referenční)	2025	2030	2035	2040
Bateriová uložení	427	1220	1863	2001
Fotovoltaické	4268	8133	9317	10005
Větrné	529	742	942	1141
Ostatní OZE	555	451	538	648
Vodní a přečerpávací	2231	2231	2231	2231
Teplárny a závodní energetika	2086	1777	1510	1289
Plynové	1760	1698	2058	2058
Uhelné	5076	4654	3960	1950
Jaderné	4047	4047	4047	5187
Celkem ČR	20980	24220	25581	25188

Tab. 1.5: Referenční scénář vývoje zdrojové základny ČR převzato z [6]



Obr. 1.5: Referenční scénář vývoje zdrojové základny ČR převzato z [6]

Toto dotazníkové šetření naznačuje několik klíčových trendů:

- Předpokládá se postupný útlum současných fosilních zdrojů z důvodu dosluhující technologie, ovšem v pomalejším tempu než u konzervativního a progresivního scénáře.
- Část odstaveného uhelného instalovaného výkonu bude nahrazena plynovými zdroji, což se týká jak kategorie uhelných elektráren, tak kategorie tepláren a závodní energetiky.
- Pro odhad budoucího vývoje spotřeby elektřiny se využívá stejný scénář spotřeby jako u konzervativního scénáře, který je založen na aktuálních strategiích a plánech vlády v souladu s předpokladem dekarbonizace do roku 2050.

Scénář předpokládá postupný ústup od uhlí, přičemž se však nepočítá s úplným ukončením provozu uhelných elektráren do roku 2038. Vývoj instalovaného výkonu větrných a fotovoltaických elektráren odpovídá Realistické predikci.

1.2.5 Zhodnocení předpokládaného vývoje

Na základě srovnání scénářů tak lze do roku 2040 uvažovat úplný útlum uhelných elektráren a postupný nárůst využití FVE a to až na hodnotu instalovaného výkonu v rozmezí o 10 005 MW (Konzervativní scénář) až 13 238 MW (Progresivní scénář), s uvažováním instalace bateriové akumulace v rozmezí 2 001 MW až 2 648 MW.

Rovněž by mělo dojít i k poměrně významnému nárůstu na poli VTE, na úroveň v rozmezí 1 141 MW až 2 500 MW a plynových elektráren na hodnotu 2 602 MW. U ostatních typů zdrojů se výrazné změny neočekávají, viz Tab. 1.3, Tab. 1.4.

S uvažováním těchto scénářů tak lze předpokládat, že ČR se po roce 2030 stane z pohledu energetiky importní zemí. Nicméně vybudování nových zdrojů by mělo většinově zabezpečit poptávku vzniklou ústupem od uhelných zdrojů. Avšak je důležité zmínit nárůst problémů vzniklých v souvislosti s bezpečným řízením ES, které jsou spojeny s vysokou volatilitou OZE a absencí většinového podílu spolehlivě říditelných zdrojů. Z těchto důvodů bude nutné zavedení potřebných opatření v podobě nových podpůrných prvků, jako je např. zmiňovaná bateriová akumulace případně řízení na straně spotřeby.

2 Limitní podíl Grid-Forming a Grid-Following zdrojů

Hlavním rizikem spojeným se zvyšujícím se podílem Grid-Forming (GFM) a Grid-Following (GFL) měničů do soustavy, je částečná ztráta přirozené setrvačnosti soustavy. Tento jev může vést k narušení synchronismu soustavy a jejímu rozpadu. Narušení stability soustavy, vlivem zvyšujícího se počtu zdrojů založených na měničové technologii tedy představuje významné riziko.

2.1 Zdroje založené na měničové technologii

Pro nastínění problematiky je dobré vydefinovat zdroje využívající měničovou technologii (IBR) pro připojení do soustavy. Mezi tyto zdroje převážně patří netočivé zdroje jako fotovoltaické elektrárny, případně bateriová úložiště, rovněž lze do této kategorie zařadit i technologii HVDC (High-Voltage Direct Current), která je v Evropě hojně využívána k propojení jednotlivých soustav, nebo připojení off-shore elektráren. IBR se rovněž implementuje k připojení zdrojů využívajících točivých zdrojů nižších výkonů (do 10 kW), typicky pak větrné elektrárny využívající synchronní generátory, ale i větrné elektrárny nad 10 kW, jenž využívají asynchronní generátory. Jak je patrné z kapitoly 1., především pak tabulky 1.2, potenciál a nárůst zdrojů v této kategorii je za posledních 5 let patrný. Rovněž vzhledem ke směřování Evropské energetiky je předpokládán většinový přechod na IBR zdroje, což rovněž dokládá studie MAF CZ [6].

2.1.1 Fotovoltaické elektrárny

Fotovoltaické elektrárny jsou momentálně na území ČR nejrozšířenějším IBR zdrojem. Jejich instalovaný výkon činí 10 % celkového instalovaného výkonu a více jak 95 % těchto zdrojů je připojeno prostřednictvím GFL měničů, tedy způsobem, kdy neumožňují poskytování systémových služeb. Z hlediska zapojení je lze rovněž rozdělit do 3 kategorií:

- Autonomní systémy
- Hybridní systémy s akumulací
- Systémy připojené do soustavy

Autonomní, neboli grid-off FVE elektrárny nejsou připojeny do elektrizační soustavy a jsou určeny pouze k napájení objektu. Hybridní FVE jsou připojeny do soustavy, nicméně s důrazem na minimální dodávku. Účelem těchto elektráren je krytí vlastní spotřeby objektu s ukládáním přebytků do akumulacních spotřebičů, jakými mohou

být například baterie, či akumulární nádrže. Systémy přímo připojené do soustavy, neboli grid-on FVE, jsou naopak určeny primárně k dodávce elektrické energie do soustavy, lze je tedy považovat za plnohodnotné elektrárny. Jedná se pak o elektrárny s instalovaným výkonem v rozsahu 20 kWp až jednotek MWp. [9]

2.1.2 Větrné elektrárny

Větrné elektrárny lze dělit na základě výkonu. Malé VTE do výkonu 10 kW obvykle využívají synchronní generátory s permanentními magnety. VTE vyšších výkonů pak převážně využívají asynchronních generátorů s kotvou na krátko nebo s napájeným rotorem (DFIG). Řešení DFIG pak oproti generátorům s kotvou na krátko umožňuje vyšší regulační rozsah otáček. Pro VTE velkých výkonů se rovněž hojně využívá synchronních generátorů, které jsou připojeny přes měničovou spojku [9].

2.1.3 Bateriová úložiště (BESS)

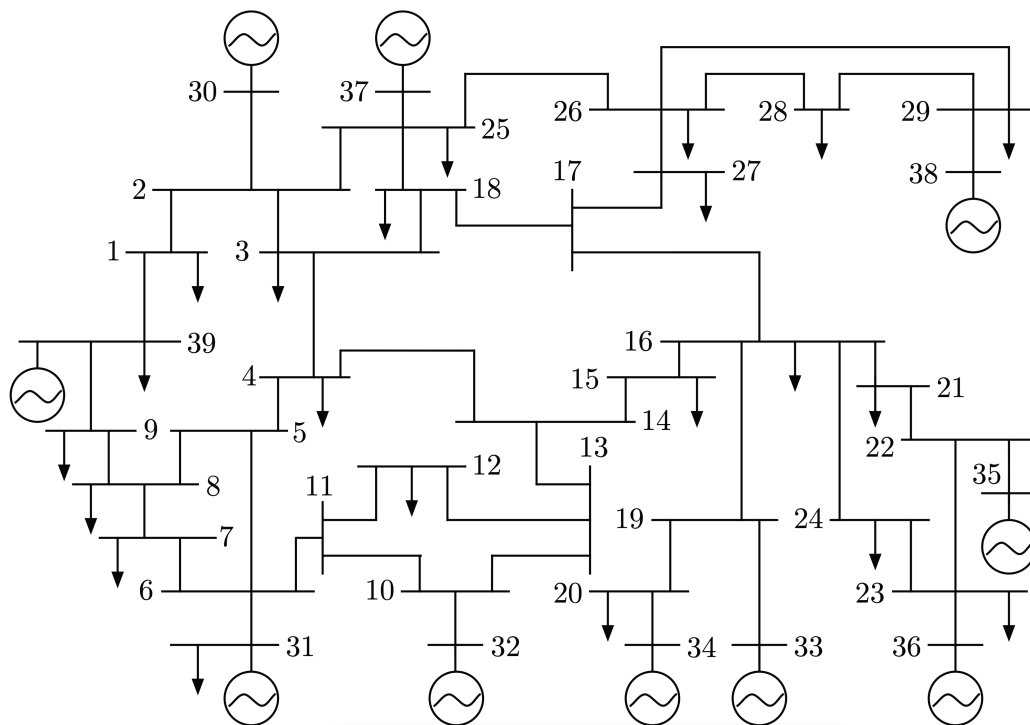
Bateriový systém ukládání energie (BESS) představuje elektrochemickou jednotku, navrženou k akumulaci elektrické energie a její následné deponování či vydávání. Lithium-iontové baterie patří mezi nejefektivnější technologie využívané při procesu ukládání energie. Tyto baterie vynikají vysokou energetickou hustotou, dlouhou životností, minimálním samo-vybitím a schopností rychlého dobíjení, což zvyšuje efektivitu a spolehlivost bateriových systémů. BESS lze aplikovat pro rozmanité účely, včetně akumulace přebytečné energie z obnovitelných zdrojů, poskytování záložního napájení pro nouzové situace, vyrovnávání špičkových zátěží v elektrických sítích a další energeticky náročné procesy. Stále probíhá výzkum nových technologií a materiálů v oblasti ukládání energie s cílem zvyšovat účinnost, snižovat náklady a zlepšovat udržitelnost těchto systémů. Tyto jednotky je vhodné do soustavy připojit prostřednictvím GFM měničů, vzhledem k jejich schopnosti okamžitého výkonu, což lze využít pro PpS.

2.2 Stabilita soustavy

Zhodnocení stability soustavy s ohledem na podíl zdrojů založených na měničové technologii je velice obtížná úloha, už jen z počtu proměnných co do soustavy vstupují a o jaké události v síti se zajímáme, tj. poruchy a přechodné jevy, jelikož soustava v ustáleném stavu bude fungovat vždy stabilně, nehledě na složení zdrojové základy. Vhodnějším přístupem je pak vydefinování modelů řízení měničů, které k nestabilitě soustavy vedou, případně vlivy na jejich spolehlivý provoz a stabilitu.

Tato problematika pak byla zkoumána pracovní skupinou pod záštitou organizace NREL a její výsledky, zveřejněné v roce 2021 v článku [10], jasně vypovídají, že kritickým bodem pro udržení stability v systému založeném na zdrojích IBR, je jejich princip řízení.

Studie byla provedena na testovací síti IEEE - 39 bus, viz obr. 2.1, podstatou této studie pak je vydefinování vlivů na stabilitu tohoto systému s ohledem na podíl IBR zdrojů a jejich typu. Hlavním cílem je pak, aby se prozkoumala stabilita systému při zvyšování úrovně integrace střídačů, tj. při postupném nahrazování synchronních zdrojů střídači.



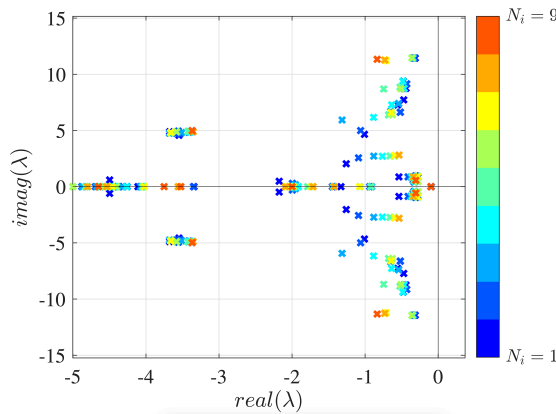
Obr. 2.1: Síť IEEE 39 bus, převzato z [10]

Pro testování pak byly zvoleny 3 způsoby provozu IBR, a to v režimech:

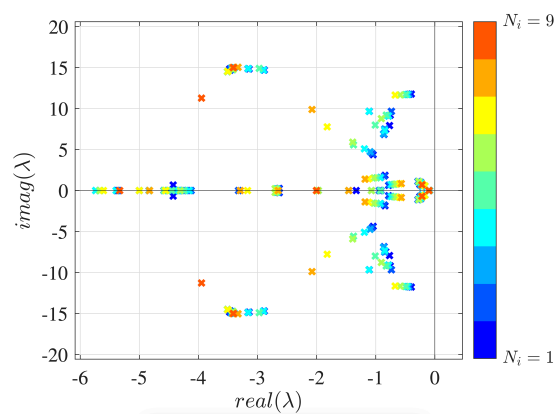
- **Grid-forming typu VOC** (Grid forming měnič v režimu virtual oscillator controller funguje tak, že imituje chování harmonického oscilátoru pro generování stabilního napětí a frekvence nezávisle na externích zdrojích, čímž umožňuje synchronizaci a stabilizaci elektrické sítě),
- **Grid-forming typu droop** (Grid forming měnič v režimu droop nastavuje výkon a frekvenci podle předem definovaného poměru (droop charakteristiky), což umožňuje koordinovanou práci s ostatními zdroji v síti a udržuje stabilitu i při kolísání zátěže),
- **Grid-following** (Grid following měnič sleduje a reaguje na existující napětí

a frekvenci v síti, reguluje svůj výkon podle těchto parametrů a přizpůsobuje se tak stávajícím podmínkám elektrické sítě).

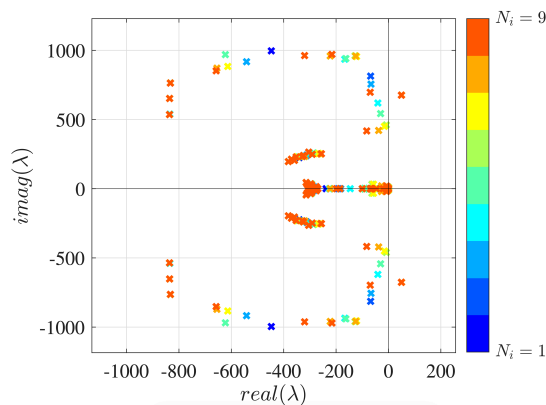
Pro tyto typy zdrojů byla následně provedena root locus analýza, pro nalezení stability systému, za předpokladu variabilního počtu IBR zdrojů v systému.



Obr. 2.2: Grid-forming (VOC)



Obr. 2.3: Grid-forming (droop)



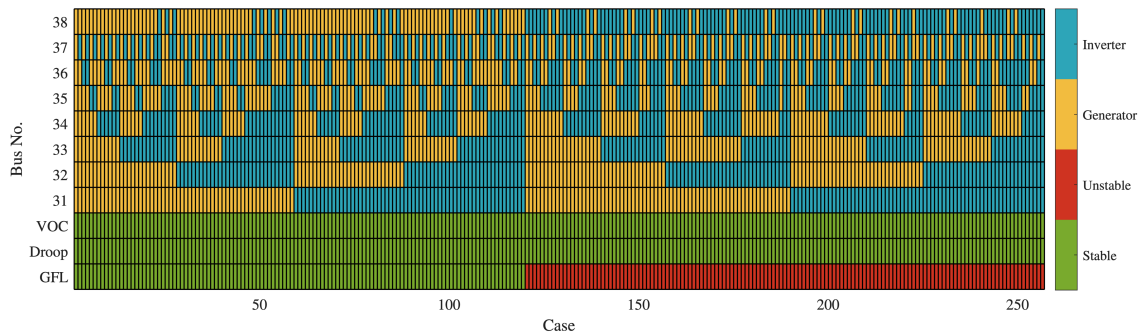
Obr. 2.4: Grid-following

Z této analýzy je patrné, že v případě „droop control“, 2.3 a „VOC“, 2.2 je systém stabilní v celém průběhu integrace IBR zdrojů, což znamená potenciál pro dosažení vysoké úrovně DECE IBR zdrojů při zachování stability. Naproti tomu případ „Grid-following“, 2.4 při výměně 8 zdrojů, tedy 100 % nasazení, vykazuje známky nestability.

Na základě tohoto zjištění byla provedena modální analýza, jež nasvědčuje výrazný vliv indukčního výstupního filtru IBR na jeho vlastní stabilitu. Dále bylo zjištěno že se snižující se indukčností filtru se systém stává nestabilním i s nižším počtem nahrazených generátorů, což naznačuje, že nižší indukčnost filtru vede k méně stabilnímu systému.

Tato závislost byla však prokázána pouze v případě Grid-following režimu, v režimech „droop“ a „VOC“ není stabilita výrazně ovlivněna změnami indukčnosti filtru.

Hlavním výstupem je pak analýze stability soustavy v případě postupného nahrazování generátorů 1-8 IBR ve zmiňovaných režimech. Výsledek této analýzy je patrný na obr. 2.5, který v horní polovině naznačuje kombinaci zdrojů (IBR vs. generátor) v síti IEEE 39 bus a v dolní polovině stabilitu v daných případech, s využitím různých typů řízení.



Obr. 2.5: Stabilita systému pro různé variace začlenění, převzato z [10]

Z této analýzy je patrné, že implementace měničů v režimu grid-forming (VOC/droop), nemá na stabilitu systému přímý vliv, respektive za předpokladu využití GFM systém zůstal stabilní ve všech kombinacích implementace a to i při 100 % nasazení IBR.

Naopak začleňování IBR v režimu GFL má na stabilitu systému výrazný vliv, jak je patrné z 2.5, ve více než polovině případů systém ztratil stabilitu. Je rovněž pozoruhodné, že na stabilitu systému má vliv umístění IBR zdroje, dalším z definujících proměnných je zmiňovaný výstupní indukční filtr GFL měniče.

Z těchto zjištění je patrné, že pro začlenění GFM zdrojů, nelze stanovit limitní podíl, jelikož tyto zdroje jsou schopny samostatného stabilního provozu i v 100 % IBR síti.

3 Podstata měničových zdrojů v režimu Grid-Forming a Grid-Following, varianty řešení

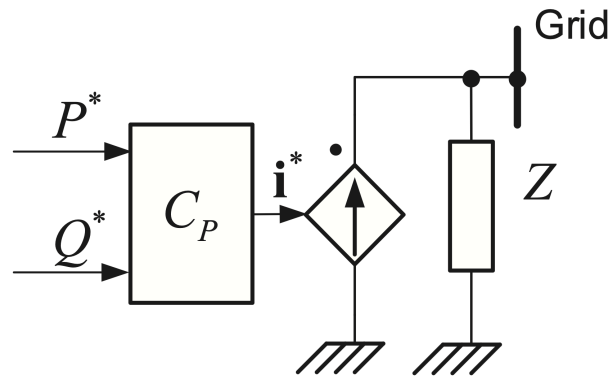
Postupný nárůst počtu zdrojů založených na měničové technologii, mezi které se v drtivé většině řadí zdroje typu FVE a VTE, vede ke snižování setrvačnosti systému, což může vést k problémům spojeným s kolísáním frekvence soustavy. Například PDS v Irsku [11], Texasu [12] nebo v jižní Austrálii [13] se již v určitých částech dne potýkají s překážkami spojenými s vysokou penetrací IBR, proto pochopení významu systémů s nízkou nebo nulovou setrvačností hraje důležitou roli v bezpečném provozování ES. Vhodné začlenění IBR v režimech Grid-Forming a Grid-Following může přispět k řešení nově vzniklých problémů, ale i zlepšení poměrů v síti, jelikož umožňují dynamické řízení činné a jalové složky výkonu, případně injekcí jalového proudu jako odezvu na poruchy v síti, čímž se mohou podílet na řízení napětí a frekvence sítě, a přispívat tak k celkovému zefektivnění řízení soustavy a lepšímu využití DECE zdrojů. Využití DECE zdrojů přináší mnoho výhod, jako například snížení fyzické i elektrické vzdálenosti mezi zdroji a odběrateli, což přispívá ke snižování ztrát na vedení, zlepšení napěťové stability, odlehčení slabých míst v soustavě nebo zlepšení spolehlivosti provozu celé soustavy. Nicméně základním problémem implementace DECE zdrojů je technická složitost jejich ovládání s ohledem na jejich počet; řádově deseti až statisíce. Ovládání je pak obvykle řešeno autonomními mechanismy založenými na lokálních měřeních. I proto je nutné porozumět chování zmiňovaných IBR zdrojů, jejich vlastnostem a možnostem implementace v soustavě.

Rozdíl mezi GFM a GFL je zásadní. IBR v režimu GFM jsou schopné svým řízením udržovat stabilitu frekvence, díky čemuž je síť odolnější vůči oscilacím a změnám frekvence. IBR v režimu GFM se v důsledku chová jako setrvačnický a svým řízením umožňuje tyto výkyvy tlumit, tvoří tzv. "umělou setrvačnost". Naopak IBR v režimu GFL, které jsou momentálně hojně využívány pro připojení FVE a VTE do soustavy v režimu maximální dodávky do sítě, mohou s rostoucí penetrací k těmto problémům přispívat. Proto je nutné volit vhodné rozložení zmiňovaných zdrojů společně s řídicími a kontrolními mechanismy, tak aby byla zachována stabilita soustavy.

3.1 Měniče v režimu Grid-Following

IBR v režimu GFL jsou měniče, které slouží k připojení DC zdroje do soustavy. Fungují jako říditelný proudový zdroj, tak aby dodávaly do soustavy požadovanou hodnotu činného a jalového výkonu. Řízení činné a jalové složky dodávané do sítě je založeno na měření napětí a úhlu soustavy a následujícím výpočtu odpovídajících referenčních hodnot pro regulátor proudu. Jelikož IBR v režimu GFL odpovídají

svým chováním proudovému zdroji, jsou vhodné pro paralelní připojení k síti. Na Obr. 3.1, lze pozorovat zjednodušené schéma měniče v režimu GFL, kde P^* a Q^* jsou referenčními hodnotami činného a jalového výkonu získané měřením uvažované sítě.



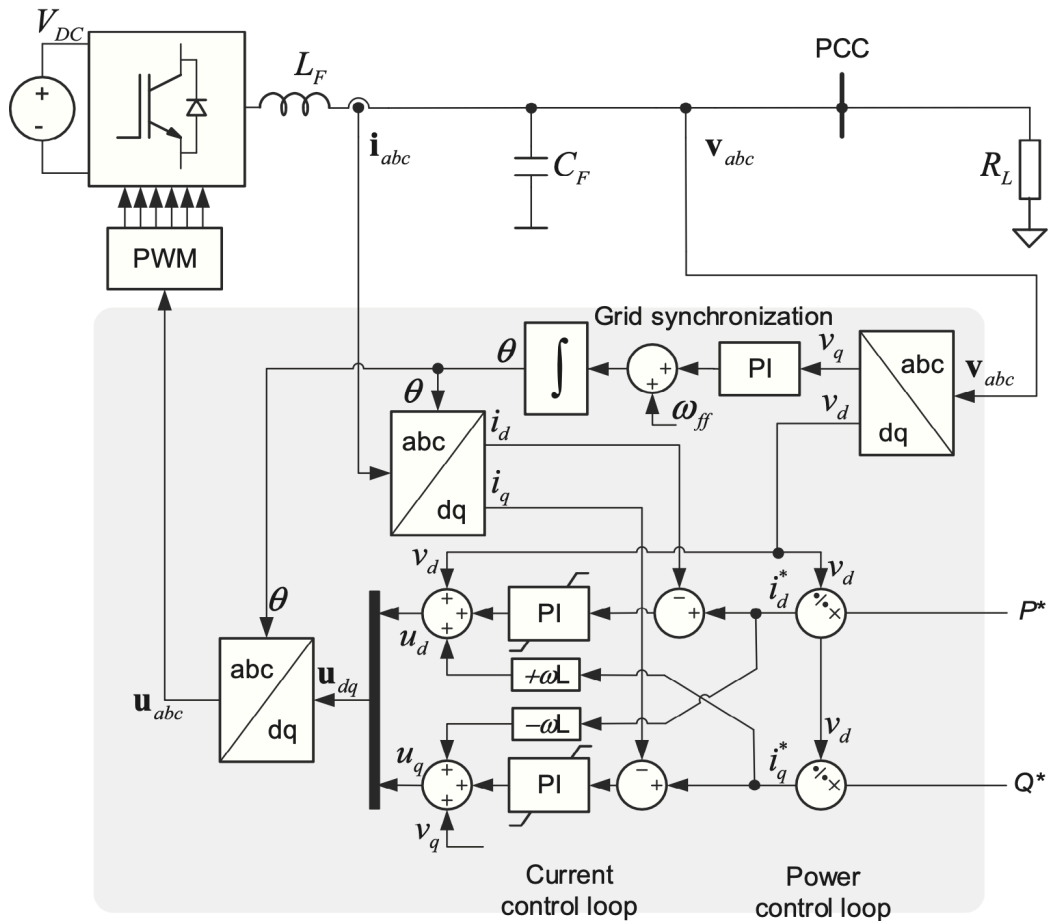
Obr. 3.1: Zjednodušené zapojení měniče v režimu GFL převzato z [14]

Při tomto zapojení je nutné zdůraznit, že regulátor proudu, který obstarává řízení injektovaného proudu do soustavy by měl být v ideálním případě v dokonalém synchronismu s AC napětím v připojovacím místě (velikost napětí, úhel napětí a frekvence), aby bylo možné přesně regulovat velikost činné a jalové složky dodávané do sítě [14].

V současnosti většina měničů využívaných pro připojení FVE a VTE pracuje v režimu GFL [16]. I přes to, že tyto měniče obvykle pracují v režimu maximální dodávky do sítě, aby maximalizovali výtěžnost ze zmiňovaných OZE, mohou rovněž přispívat k udržování napěťových poměrů v soustavě a frekvence, zařazením dodatečné kontrolní smyčky, pro úpravu referenčních hodnot dodávaného činného a jalového výkonu [17].

Ve své podstatě však nemohou měniče v režimu GFL pracovat jako primární zdroj v ostrovním režimu, pokud v dané ostrovní soustavě není alespoň jeden zdroj schopný nastavení a řízení síťových parametrů (amplitudy napětí, úhlu napětí a frekvence). Takovým zdrojem pak může být synchronní generátor, nebo měnič v režimu GFM. To je dáno především vlastním fungováním GFL měniče, který je v případě ztráty referenčních hodnot napětí a frekvence, nastaven aby odpojil zdroj od sítě [15], jelikož si není schopný emulovat síťové parametry sám.

Na Obr. 3.2 lze vidět základní řídicí strukturu měniče v režimu GFL, ta se sestává především z jednotky pro synchronizaci sítě, regulátoru proudu a regulátoru výkonu. (řídicí schémata jsou blíže popsány v kapitole 4.2



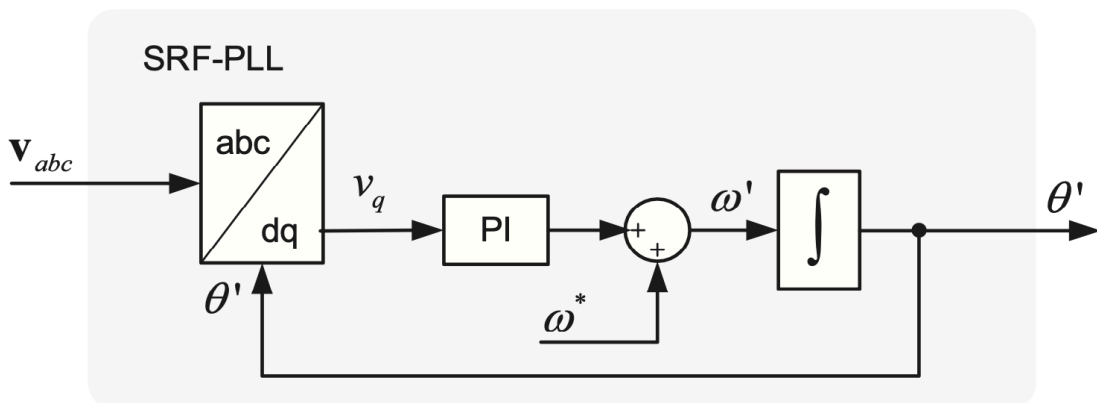
Obr. 3.2: Základní řídicí struktura měniče v režimu GFL převzato z [14]

3.1.1 Synchronizace GFL se sítí

Přesné stanovení síťových parametrů sítě má významný dopad na dodávaný výkon a celkový chod GFL měniče. Ke stanovení síťových parametrů je tedy zapotřebí patřičný algoritmus pro synchronizaci se sítí. Tyto hodnoty jsou nezbytné pro správné řízení okamžitého činného a jalového výkonu dodávaného do sítě. Kromě toho je rovněž nutné přesné monitorování stavu soustavy, aby bylo možné provozovat GFL měnič co možná nejefektivněji s ohledem na výrobu jeho zdroje a dodávku do soustavy, stejně tak pro jeho vhodné sekvence připojování a odpojování od soustavy, jeli to z pohledu soustavy a zdroje zapotřebí [14]. Uplatňuje se pak hojně využívaný PLL (phase-locked loop) závěs. Jedná se o řídicí systém, který udržuje konstantní fázový vztah mezi vstupním signálem a výstupním signálem. [18] Tyto smyčky jsou navrženy ke sledování a estimaci frekvence AC sítě, jelikož přesné určení frekvence je klíčové pro správnou synchronizaci měniče se soustavou.

PLL v synchronním souřadnicovém systému

Technologie PLL závěsu byla v minulosti vyvinuta a využívána pro synchronizaci a připojení měničů k soustavě. V třífázových systémech je jedním z nejvyužívanějších typů PLL v synchronním souřadnicovém systému (SRF-PLL). Jeho blokové schéma lze vidět na Obr. 3.3. SRF-PLL převádí parametry napětí z abc souřadnic do dq souřadnic za pomoci Parkovy transformace. Výstup transformace do dq synchronní soustavy v_q je použit jako regulační odchylka pro regulátor PI. Regulátor PI představuje regulátor kmitočtu ω , ten má na svém výstupu takový kmitočet, aby udržoval regulační odchylku blízkou nule. [19].



Obr. 3.3: Blokové schéma PLL v synchronním souřadnicovém systému převzato z [14]

Tento typ PLL závěsu je velice účinný, avšak pouze za předpokladu vyvážené symetrické soustavy. V případě, že je 3-fázový vstupní signál nevyvážený nebo zkreslený, efektivnost a funkčnost zmiňovaného PLL závěsu klesá. Pro překonání tohoto nedostatku byly navrženy modifikace, jako například decoupled double-SRF PLL. Tento typ PLL závěsu v synchronním souřadnicovém systému pracuje na stejném principu jako jeho základní varianta, s vylepšeným odhadem fázového natočení a amplitudy napětí pro nevyvážené 3-fázové soustavy [20].

3.1.2 Regulátor proudu

Vnitřní regulační smyčka GFL měničů je založena na rychlých regulátorech proudu, které regulují proud dodávaný do sítě. Referenční hodnoty pro proudové regulátory jsou často generovány výkonovými regulátory, které určují množství výkonu, jež má být dodáno/vyměněno se sítí. Takové referenční proudy se obvykle počítají jako funkce referenčních výkonů P^* a Q^* . Nejpoužívanější řešení pro implementaci

lineárních regulátorů proudu v 3-fázových soustavách jsou založeny na PI regulátoru pracujícím v dq synchronním souřadnicovém systému, nebo na implementaci rezonančního regulátoru pracujícího v $\alpha\beta$ -ortogonální soustavě [14].

PI regulátor v dq synchronním souřadnicovém systému

Implementace regulátorů proudu založených na dq – SRF se hojně využívá pro řízení proudu v třífázových systémech. Prostřednictvím Parkovy transformace lze sinusový proud reprezentovat jako stejnosměrnou veličinu v souřadnicích dq , které se otáčejí synchronně se základní frekvencí sítě. V tomto souřadnicovém systému mají regulaci d složky a q složky proudu na starosti dvě nezávislé regulační smyčky. V případě GFL měničů jsou referenční proudy i_d^* a i_q^* obvykle zajišťovány výkonovým regulátorem, který reguluje činný a jalový výkon dodávaný do sítě. Okamžité složky činného a jalového výkonu se vypočítají podle vzorců:

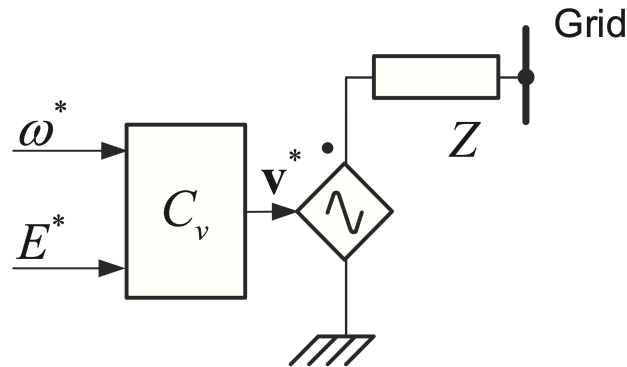
$$p = v_d i_d + v_q i_q \quad (3.1)$$

$$q = v_d i_q - v_q i_d \quad (3.2)$$

Na Obr.3.2 je znázorněno zapojení synchronní regulace proudu na bázi dq , včetně napětového posuvu sítě a oddělovací sítě používané ke zvýšení výkonu regulátoru. V tomto standardním zapojení však PI regulátory nejsou schopny potlačit oscilace, které se objevují v signálech dq při nesymetrických podmínkách sítě. K překonání této nevýhody mohou být implementovány dva synchronní regulátory dq , aby bylo možné nezávisle regulovat jak souslednou, tak zpětnou složku dodávaného výkonu [20].

3.2 Měníče v režimu Grid-Forming

Zásadním rozdílem pro měnič v režimu GFM, je jeho schopnost pracovat ve všech provozních stavech a to i v případě rozpadu, obnovy soustavy či v ostrovním režimu a to i bez spolupráce se synchronními generátory. GFM měnič lze zjednodušeně jako řízený zdroj napětí se stanovenou amplitudou a frekvencí, viz Obr. 3.4.



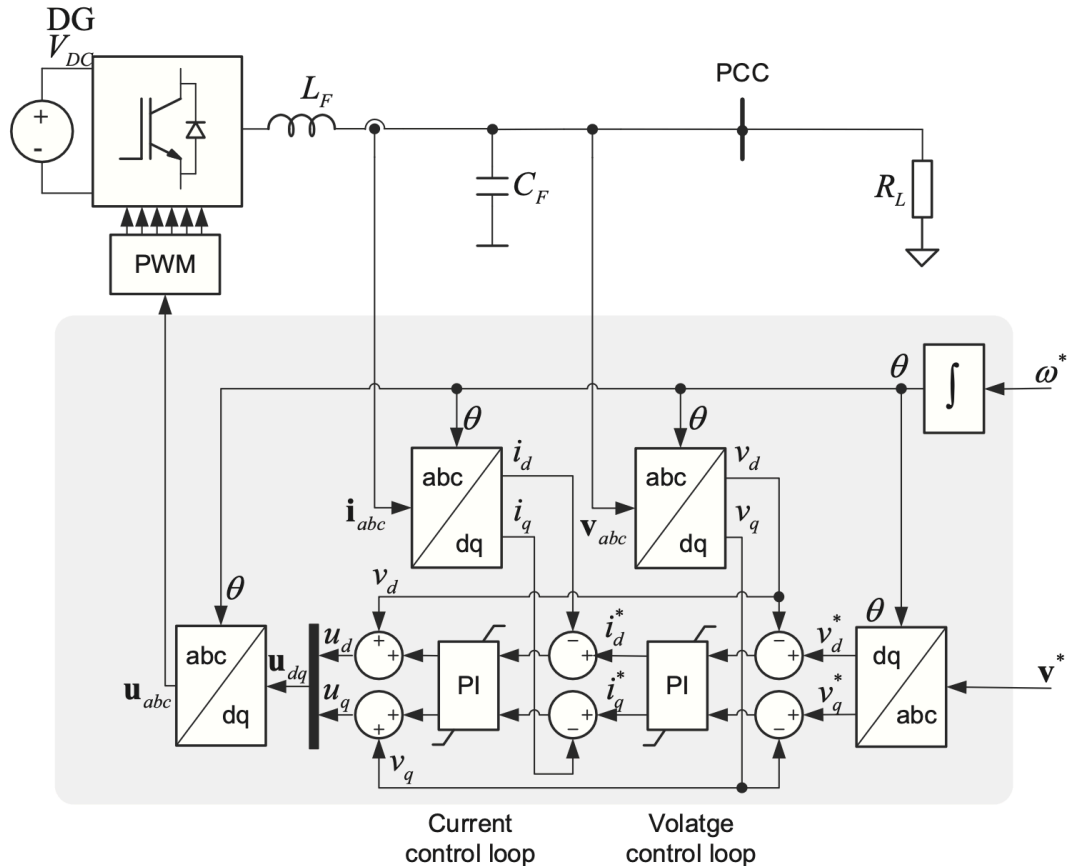
Obr. 3.4: Zjednodušené zapojení měniče v režimu GFM převzato z [14]

Jakožto napěťový zdroj má takový zdroj velice nízký vnitřní odpor, tudíž nelze spoléhat na přirozené rozdělení výkonu (závislé na velikosti vnitřního odporu zdroje). Tento jev pak komplikuje paralelní provoz více GFM měničů, z tohoto důvodu je zapotřebí, aby v reálné implementaci takové měniče disponovaly vnitřním regulátorem proudu k řízení a omezení maximálního dodávaného proudu měničem do soustavy. Rovněž GFM měniče disponují vnějšími regulačními smyčkami, které přispívají k regulaci parametrů sítě změnami referenčních hodnot jalové a činné složky dodávaného výkonu. Tyto regulační smyčky principiálně emulují funkci regulátorů otáček, případně buzení u synchronních generátorů.

3.2.1 Zjednodušená základní řídicí struktura GFM měniče

Na Obr.3.5 lze pozorovat řídicí strukturu zjednodušeného GFM měniče, ta se sestává z dvou kaskádně zapojených PI regulátorů pracujících v dq -souřadnicovém systému. Vnější řídicí smyčka pak reguluje výstupní napětí měniče, tak aby odpovídala referenční hodnotě. Vnitřní smyčka má poté na starosti proud dodávaný měničem do soustavy. Při uvažování této zjednodušené řídicí struktury je však dobré zmínit, že vnější smyčka řídicí výstupní napětí soustavy by byla aktivní pouze v případě ostrovního provozu měniče. V opačném případě, kdy by se v soustavě nacházel větší

počet GFM měničů, by jednotlivé měniče nedokázaly samostatně synchronizovat síťové napětí. [14]



Obr. 3.5: Základní řídicí struktura měniče v režimu GFM převzato z [14]

3.2.2 Řízení provozu GFM

Jak bylo zmíněno, zapojení zjednodušené řídicí struktury na Obr.3.5 neumožňuje paralelní provoz více GFM měničů v jedné soustavě, respektive neumožňuje řízení rozdělení výkonu mezi jednotlivé zdroje. Lze proto přistoupit k variantním řešením této problematiky, jako například pomocí centrálního řídicího systému, řízení typu master-slave, nebo průměrným rozdělením zátěže. Pro tyto řešení se však předpokládá vzájemná komunikace a s tím i zřízení komunikační linky. [21]. Zřízení komunikační linky však nemusí být v reálných scénářích z ekonomického či technického hlediska možné, proto se hojně využívá dělení výkonu typu tzv. Droop control (DP). Pomocí tohoto typu řízení pak lze řídit rovnoměrné rozdělení zatížení mezi jednotlivé zdroje bez potřeby externí komunikace mezi zdroji, což eliminuje omezení daná fyzickou polohou zdrojů a zlepšuje se tak výkon sítě, díky přirozenému rozdělení výkonu [14].

Vliv impedance sítě na "Droop control"

Při uvažování GFM měniče jako ideálně říditelného zdroje napětí, který je připojen do soustavy vedením o dané impedanci, můžeme velikost činné a jalové složky výkonu zapsat následujícími vztahy [14]:

$$P_A = \frac{U_A}{R^2 + X^2} [R(U_A - U_B \cos \delta) + XU_B \sin \delta], \quad (3.3)$$

$$Q_A = \frac{U_A}{R^2 + X^2} [-RU_B \sin \delta + X(U_A - U_B \cos \delta)], \quad (3.4)$$

kde P_A a Q_A představují činnou a jalovou složku výkonu dodávanou z měniče (A) do soustavy (B), U_A a U_B pak velikost napětí těchto zdrojů, δ odpovídá fázovému posuvu těchto napětí. $Z = R + jX$ představuje impedanci přes kterou je měnič do soustavy připojen, jednotlivé složky pak lze zapsat také jako $R = Z \cdot \cos \Theta$ a $X = Z \cdot \sin \Theta$.

Induktivní síť

Induktivní složka impedance vedení v přenosových sítích velmi vysokého (vvn) a vysokého (vn) napětí je obvykle mnohem vyšší než odporová. Proto je při aplikaci těchto rovnic 3.3, 3.4 v sítích vvn/vn možné jejich zjednodušení zanedbáním odporu vedení, jelikož ve vysokonapěťových systémech obvykle výrazně převládá reaktance nad rezistancí a lze uvažovat rezistanci vedení $R = 0 \Omega$. Rovněž fázový posuv v těchto soustavách bývá malý a lze uvažovat, že $\sin \delta \approx \delta$ a $\cos \delta \approx 1$. Vztahy pak lze díky těmto zjednodušením upravit následovně [22]:

$$P_A \approx \frac{U_A}{X} (U_B \sin \delta) \rightarrow \delta \approx \frac{XP_A}{U_A U_B}, \quad (3.5)$$

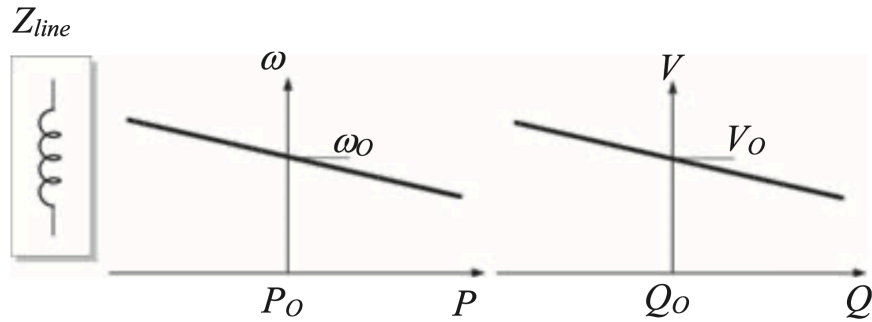
$$Q_A \approx \frac{U_A}{X} (U_A - U_B \cos \delta) \rightarrow U_A - U_B \approx \frac{XQ_A}{U_A}. \quad (3.6)$$

Z těchto vztahů je pak jasně patrný vztah mezi činnou složkou výkonu a úhlem a rovněž vztah mezi jalovou složkou a úbytkem napětí. Následně pak lze dojít ke vztahům:

$$f - f_0 = -k_p(P - P_0), \quad (3.7)$$

$$U - U_0 = -k_q(Q - Q_0), \quad (3.8)$$

kteří slouží právě pro DP. Tyto vztahy umožňují regulaci frekvence a napětí sítě, v místě připojení IBR, řízením činné a jalové složky dodávaného výkonu. Odpovídající závislosti pak lze pozorovat na Obr.3.6. Na základě těchto charakteristik je pak GFM měnič schopný přispívat k regulaci frekvence a napětí v soustavě. Sklon charakteristik na Obr.3.6 je řízen pomocí parametrů k_p a k_q , dle rovnic 3.7, 3.8[14].



Obr. 3.6: Závislosti frekvence a napětí na činném a jalovém výkonu v soustavách s ind. charakterem, převzato z [14]

Rezistivní síť

Na rozdíl od sítí vn je impedance sítě v sítích nízkého napětí (nn) převážně rezistivní, analogicky k sítím s induktivním charakterem, lze tak induktivní část zanedbat. V důsledku toho a při zachování předpokladu, že výkonový úhel δ je malý, lze rovnice 3.3, 3.4 zapsat ve tvaru:

$$P_A \approx \frac{U_A}{R}(U_A - U_B \cos \delta) \rightarrow (U_A - U_B) \approx \frac{RP_A}{U_A}, \quad (3.9)$$

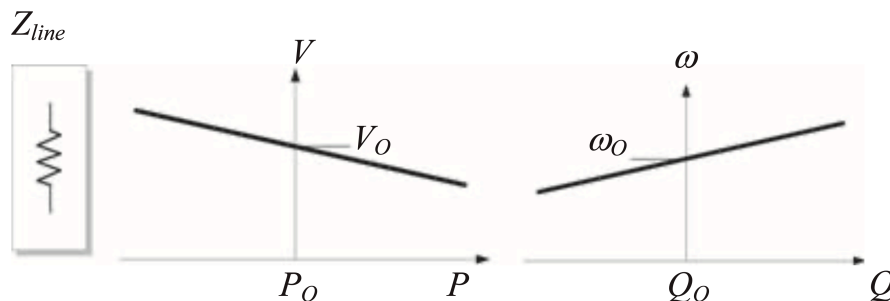
$$Q_A \approx \frac{U_A \cdot U_B}{R}(\sin \delta) \rightarrow \delta \approx \frac{RQ_A}{U_A U_B}. \quad (3.10)$$

Amplituda napětí v sítích nn tedy závisí především na toku činného výkonu, zatímco jejich frekvence je ovlivněna především dodávkou jalového výkonu. Z rovnic 3.9 a 3.10 lze pro rezistivní síť zapsat následující droop control následovně:

$$U - U_0 = -k_p(P - P_0), \quad (3.11)$$

$$f - f_0 = -k_q(Q - Q_0), \quad (3.12)$$

Odpovídající závislosti pak lze pozorovat na Obr.3.7, [14].

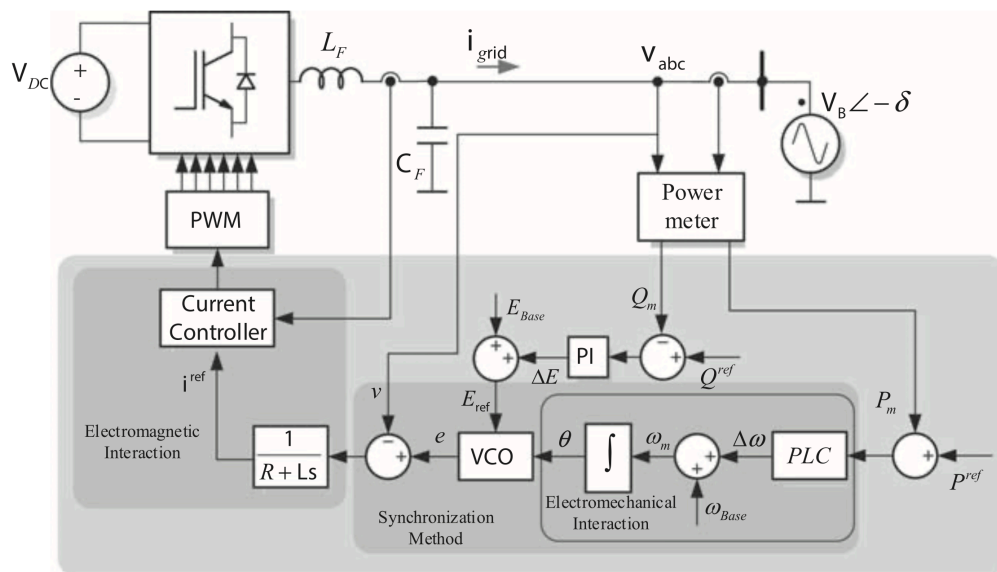


Obr. 3.7: Závislosti frekvence a napětí na činném a jalovém výkonu v soustavách s rez. charakterem, převzato z [14]

Rozdělení výkonu založené na synchronním regulátoru výkonu (SPC)

I přesto, že DP řízení umožňuje měniči přispívat k řízení soustavy, nejsou schopny emulovat dynamickou odezvu na změny v síti jako synchronní generátory. Toto omezení je zvláště problematické s ohledem na požadavky na GFM měniče jako je odezva setrvačnosti, v případě přechodných odchylek frekvence. Právě to je hlavní motivací pro implementaci GFM měničů jakožto virtuálních synchronních strojů (VSM). V takové implementaci je řídicí struktura měniče schopná napodobit dynamickou odezvu elektromechanických synchronních strojů [14].

Mezi možnými přístupy se pak SPC jeví jako jednoduché a efektivní řešení. Zapojení SPC viz Obr.3.8.



Obr. 3.8: Blokové schéma SPC řídicí struktury, převzato z [14]

SPC pak řídí měnič jako proudový zdroj, to umožňuje implementaci SPC i ve většině GFL měničů. V případě implementace pro GFM měnič je nutné zařadit do řídicí struktury virtuální admitanci, jelikož je zde využít regulátor proudu pro řízení napětového zdroje, kterým GFM je. Tento virtuální admitanční blok má na vstupu rozdíl napětí sítě (v) a virtuálního elektromotorického napětí (e). Přenosová funkce virtuálního admitančního bloku má tvar:

$$Y_a(s) = \frac{1}{R + Ls}, \quad (3.13)$$

kde R představuje velikost virtuální rezistance a L velikost virtuální indukčnosti, tato přenosová funkce má podobu dolní propusti, to vede ke stabilnější realizaci

virtuální impedance (admittance). Parametry tohoto bloku jsou voleny tak, aby respektovaly a podporovaly možnosti injektování jalového výkonu do soustavy v rámci síťových služeb poskytovaných GFM měničem.

Virtuální elektromotorické napětí (e) regulátoru je generováno za pomoci napěťově řízeného oscilátoru, který kombinuje výstup regulátoru výkonu (PLC) a regulátoru jalové složky založeném na PI regulátoru [14].

4 Realizace modelů měničů a simulace

Pro realizaci a simulace v této práci byl zvolen program PSCADTM od společnosti Manitoba Hydro International Ltd.. Tento simulační program je vhodný hlavně z důvodu možnosti simulace přechodných jevů v grafickém prostředí založeném na imperativním programovacím jazyku Fortran. Pro simulace jsou využity navržené testovací sítě vhodné pro studium vybraných síťových poruch.

Cílem práce je porovnání chování a odezvy na poruchy v síti měniče s funkcemi a řízením typu GFM a GFL. Pro potřeby simulace je vytvořena sada testovacích soustav, sestávající se z síťového napáječe schopného emulovat síťové poruchy, statické a proměnlivé zátěže, variabilního počtu IBR zdrojů s různými typy řízení a možností aplikace nízkoimpedančního spojení.

4.1 Standardní řídicí modely GFM měniče

Pro řízení GFM měniče neexistuje žádná oficiální definice. [23] Nicméně je tato otázka aktuálně diskutována a požadavky na definici GFM, jejich vlastnosti a synchronizační služby jsou dle projektu OSMOSE [24] v následujícím znění: "Jednotka GFM musí být schopna samosynchronizace, autonomie a poskytování synchronizačních služeb, což znamená, že se při synchronizaci nespolehá na podmínky v síti a pomůže ostatním jednotkám udržet synchronizaci, přičemž stále splňuje ostatní obecné požadavky vztahující se na konkrétní technologii."

Jak již bylo zmíněno, hlavním rozdílem mezi provozováním GFL a GFM měniče je proces synchronizace. Pro decentralní zdroje energie založené na střídačích bylo dříve navrženo mnoho schémat synchronizace sítě, která kladou důraz na odolnost vůči rušivým vlivům, jako jsou vyšší harmonické složky, kolísání napětí a poruchy, a na stabilitu synchronizace v "měkkých sítích". Střídače GFL obvykle využívají synchronizaci sítě na základě napětí [25], kdy se jednotka GFL synchronizuje s měřeným nebo odhadovaným úhlem napětí v síti prostřednictvím prvků, jako je fázový (PLL) nebo frekvenční závěs (FLL). Naproti tomu četné metody řízení měničů GFM pracují bez potřeby PLL nebo FLL závěsu. Řídicí schémata GFM mohou být založena na výkonové synchronizaci [25], a kopírovat principy výkonové synchronizace synchronních generátorů (SG). Významný rozdíl v chování GFL a GFM lze rovněž pozorovat v jejich odezvě na poruchy a přechodné jevy v síti. V ustáleném stavu se tyto typy chovají bez větších rozdílů.

4.1 uvádí základní přehled hlavních rysů a rozdílů týkajících se principů řízení a synchronizace střídačů GFL a GFM.

Tab. 4.1: Rozdíly v provozování GFL a GFM měniče, převzato z [26] a upraveno autorem

GFL měniče	GFM měniče
Provozované jako řízený zdroj proudu s vysokou paralelní impedancí	Provozované jako zdroj napětí s nízkou sériovou impedancí
Očekává se chod v již fungující síti	Očekává se, že bude vytvářet a udržovat síť
Obvykle potřebuje PLL nebo FLL pro synchronizaci se sítí na základě napětí.	Obvykle nepotřebuje PLL nebo FLL a využívá synchronizaci založenou na výkonu (je však možné i řízení GFM založené na PLL).
Řízení proudu na bázi dq	Řízení velikosti napětí a frekvence/fáze
Oddělené řízení P a Q	Mírná vazba mezi řízením P a Q
Nelze použít pro Start ze tmy tj. potřebuje napětí v místě připojení, aby bylo možné injektovat P a Q.	Lze použít pro start ze tmy (např. v microgridech)
Nelze provozovat v síti založené 100 % na IBR bez GFM IBR nebo SG.	Může teoreticky fungovat v sítích 100 % založených na IBR (jako mikrogridy) bez SG a společně s IBR řízenými GFL (v současné době však není mnoho praktických zkušeností s velkými soustavami tohoto typu).

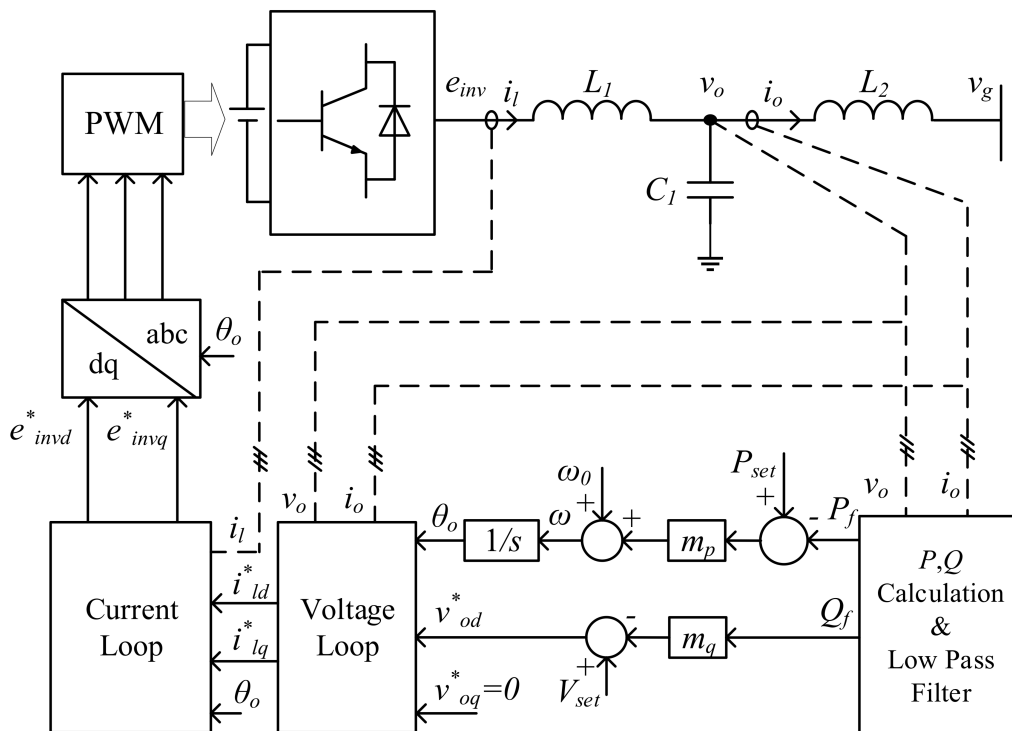
Již dříve bylo navrženo několik alternativních schémat řízení GFM, která jsou prezentována v [25], těmi mohou například být:

- Metody řízení na bázi Droop control (např. základní řízení a řízení pomocí dolnoproputného filtru),
- Multi-loop droop control
- Smyčka synchronizace výkonu / řízení synchronizace výkonu (PSC)
- Napětově řízený měnič (VCI)
- Virtuální synchronní stroj (VSM) / Virtuální synchronní generátor (VSG)
- řízení virtuálního oscilátoru (VOC) / Dispečerské řízení virtuálního oscilátoru (dVOC)
- Řízení přizpůsobení (Matching control)
- Modifikované metody řízení proudu na bázi PLL
- Přímé řízení výkonu (DirectPowerControl) (DPC).

Metody řízení na bázi droop control a řízení synchronizace výkonu jsou nejběžnějšími schémata řízení GFM a lze je také považovat za vzájemně rovnocenné [6]. Na druhou stranu například schéma řízení GFM založené na VOC je poměrně nedávná nelineární metoda, která umožňuje měničům vzájemnou synchronizaci bez jakékoliv komunikace mezi nimi. Kromě toho byla navržena také různá modifikovaná schémata řízení VSM/VSG. Výhody a nevýhody různých proudových a napěťových schémat řízení VSG byly shrnuty a porovnány v [26] a [27].

4.2 Model GFM na bázi multi-loop droop control

Po důkladném zvážení byla pro vytvoření modelu IBR zdroje s využitím GFM měniče, na základě srovnání doposud zamýšlených metod, zvolena metoda řízení multi-loop droop control. Tato metoda pracuje bez přímé potřeby PLL nebo FLL závěsu, jelikož její řízení je založeno na výkonové synchronizaci, a kopíruje tak princip výkonové synchronizace synchronních generátorů. Tento model řízení byl zvolen na základě studie v rámci projektu Evropské unie MIGRATE, [28], pro jeho efektivnost a stabilitu. Princip řízení byl dále studován a popsán v práci [29], ze kterého tvorba modelů vychází, viz schéma 4.1.



Obr. 4.1: Blokové schéma fungování řízení multi-loop droop control, převzato z [29]

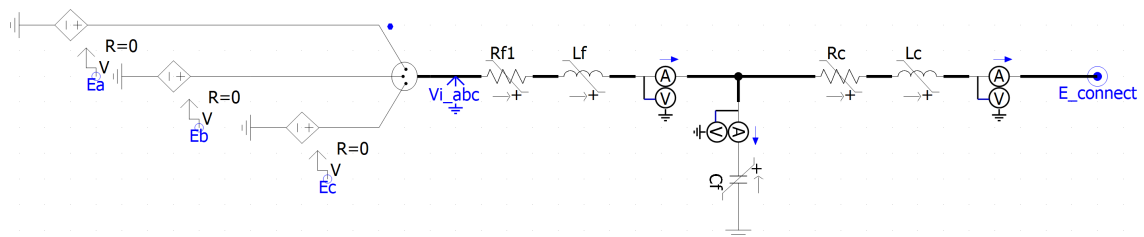
Jako výchozí bod pro modelování byl zvolen již zhotovený model organizace

NREL, který je blíže popsán ve zprávě [30]. Tento model byl následně přepracován autorem pro potřeby simulací. Z modelu byly pro jeho zjednodušení odstraněny vybrané kontrolní a limitující mechanismy, nicméně s ohledem na zachování funkčnosti, stability a kvality řídicího systému. Zbývající kostra byla využita pro nastavbu vlastního řídicího systému s využitím multi-loop droop řízení a parametrizována pro požadované podmínky evropské elektrizační soustavy. Model je uzpůsoben pro samostatnou práci v ostrovní síti, jakožto jediný zdroj, na což je simulace zaměřena.

4.2.1 Popis hlavních prvků modelu GFM

Model zdroje

Model pracuje jako zdroj napětí paralelně připojený do soustavy. Při tvorbě byl zvolen zjednodušující předpoklad zdroje nekonečného výkonu. Model je tedy složen ze tří jednofázových zdrojů napětí, které disponují LC filtrem pro potlačení zvlnění a následně je tento zdroj připojen do soustavy přes vazební impedanci ($Z_c = R_c + j\omega L_c$). Pro potřeby řízení zdroje je model zdroje opatřen multimetrem na výstupu ze zdroje stejně tak multimetrem v připojovacím bodu, z pohledu zdroje za vazební impedanci, pro získání parametrů sítě. Tento model také poskytuje podporu sítě v podobě umělé setrvačnosti, tj. nastavení žádané hodnoty výkonu v závislosti na změně frekvence, a také regulaci napětí v uzavřené smyčce prostřednictvím PI regulátoru. Vyznačuje se pak schopností ostrovního provozu, který je umožněn díky způsobu řízení na bázi výkonové synchronizace. Pro tyto potřeby je úhel θ_{int} v inicializační fázi stanoven na počáteční hodnotu 0° a po sepnutí režimu GFM dále dopočítáván prostřednictvím bloku Droop power control.



Obr. 4.2: Model zdroje v PSCAD

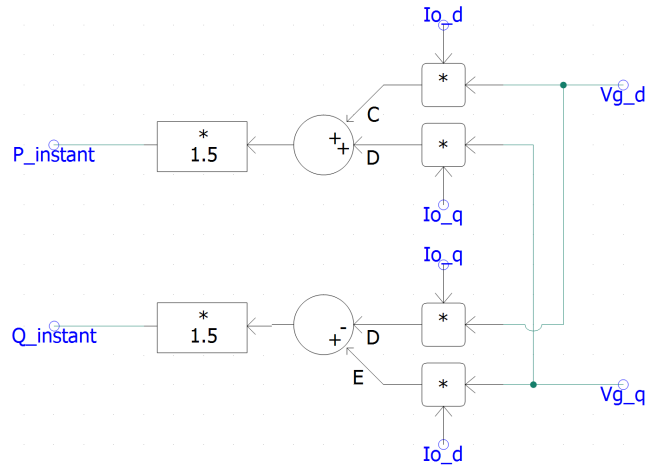
Výpočet výkonu

Řízení zdroje je založeno na výkonové synchronizaci, stejně jak je tomu u u synchronních generátorů. V první řadě je tedy zapotřebí provést výpočet okamžitých výkonů, činného a jalového jdoucí ze zdroje. Pro tento výpočet je využito vztahů:

$$P_{instant} = \frac{3}{2} \cdot (u_{gd} \cdot i_{0d} + u_{gq} \cdot i_{0q}) \quad (4.1)$$

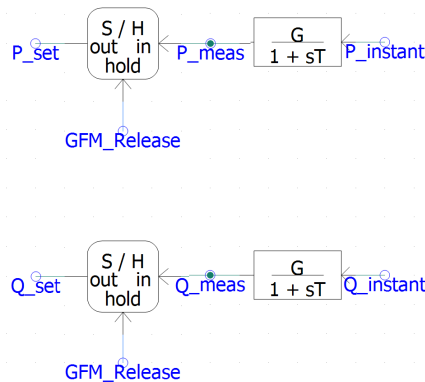
$$Q_{instant} = \frac{3}{2} \cdot (u_{gd} \cdot i_{0q} - u_{gq} \cdot i_{0d}), \quad (4.2)$$

kde u_{gd}, u_{gq} reprezentuje okamžité napětí sítě v dq souřadnicích
 i_{0d}, i_{0q} reprezentuje proud dodávaný zdrojem v dq souřadnicích.
 Model tohoto výpočtu v prostředí PSCAD je patrný na Obr. 4.3.



Obr. 4.3: Modul pro výpočet výkon v PSCAD

Pro převod hodnot napětí sítě a proudu jdocího ze zdroje z abc do dq souřadnicového systému, byl využit blok z knihovny PSCAD "*abc- dq0 Transformation*". Pro řízení převodu tohoto bloku je v počátku simulace využit inicializační úhel $\theta = 0^\circ$, po ukončení inicializační fáze je tento úhel počítán v rámci droop power control bloku a vychází z velikosti emulované frekvence.

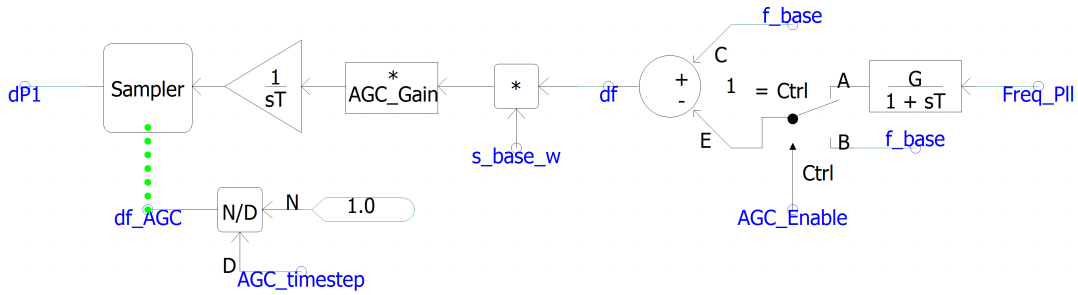


Obr. 4.4: Modul Power filter v PSCAD

V návaznosti na tento modul je provedena filtrace výkonového signálu pomocí dolnoprostupního filtru. Získané hodnoty měřených výkonů P_{meas} , Q_{meas} jsou následně využity jako vstup pro modul droop power control, stejně jako ustálené hodnoty výkonů v rámci inicializační fáze P_{set} , Q_{set} , které slouží jako výchozí hodnoty pro další výpočty.

AGC - automatic gain controller

Modul AGC, neboli automatic gain controller slouží k měření odchylky síťové frekvence od frekvence nominální a následně tuto odchylku lineárně převádí prostřednictvím funkce gain na odchylku výkonovou. Ta je následně přivedena na vstup modulu power droop control.



Obr. 4.5: Modul AGC v PSCAD

Droop power control

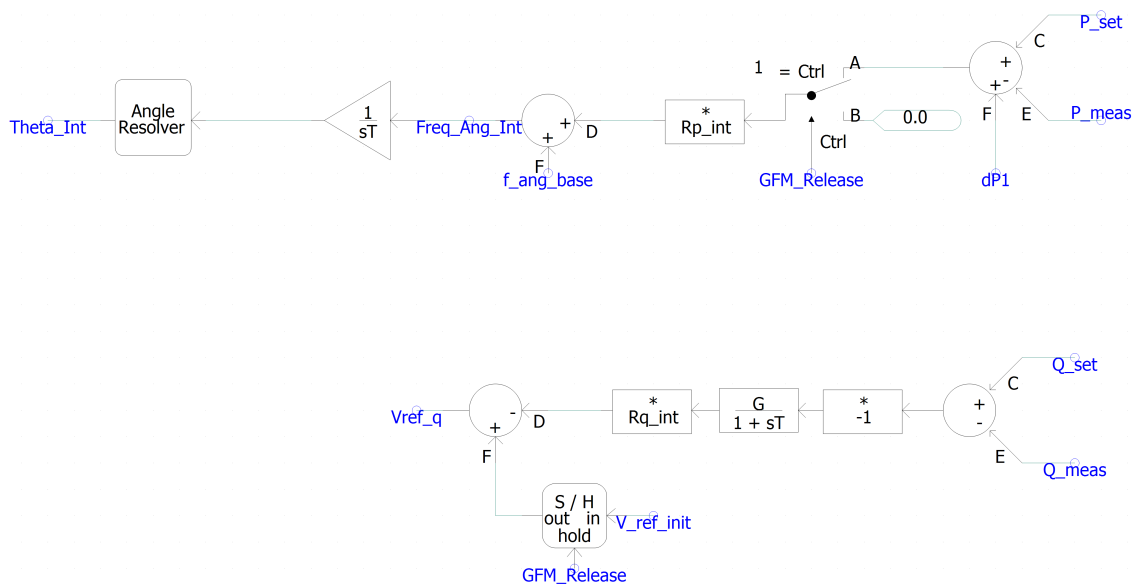
Modul Droop power control je složen ze dvou výpočtů, z nichž první slouží pro stanovení úhlu θ_{int} z hodnot činného výkonu. A druhý pak slouží pro stanovení referenčního napětí v_{ref}^q pro napětovou smyčku řídicího mechanismu.

$$\theta_{int} = \omega_n + M_p \cdot (p_{set} - p_{meas}), \quad (4.3)$$

$$v_{ref}^q = v_{init}^q + M_q \cdot (q_{set} - q_{meas}), \quad (4.4)$$

- kde
- θ_{int} je vnitřní úhel využitý pro řízení frekvence
 - M_p je zesílení frekvence
 - p_{set} , q_{set} jsou ustálené hodnoty výkonů v inicializační fázi (před změnou)
 - p_{meas} , q_{meas} jsou okamžité hodnoty činného a jalového výkonu po dolnoprostupním filtru s cut-off frekvencí 100 Hz

v_{ref}^q je referenční hodnota pro regulátor napětí
 v_{init}^q je ustálené napětí před poruchou a
 M_q je zesílení poklesu napětí.



Obr. 4.6: Modul Droop power control v PSCAD

Na vstup výpočtu θ_{int} je rovněž přivedena výstupní hodnota z AGC, tedy Δp , ta reprezentuje odchylku frekvence od jmenovité frekvence, prostřednictvím odchylky činného výkonu a poskytuje tak schopnost droop controleru pro návrat na jmenovitou frekvenci po změně v síti.

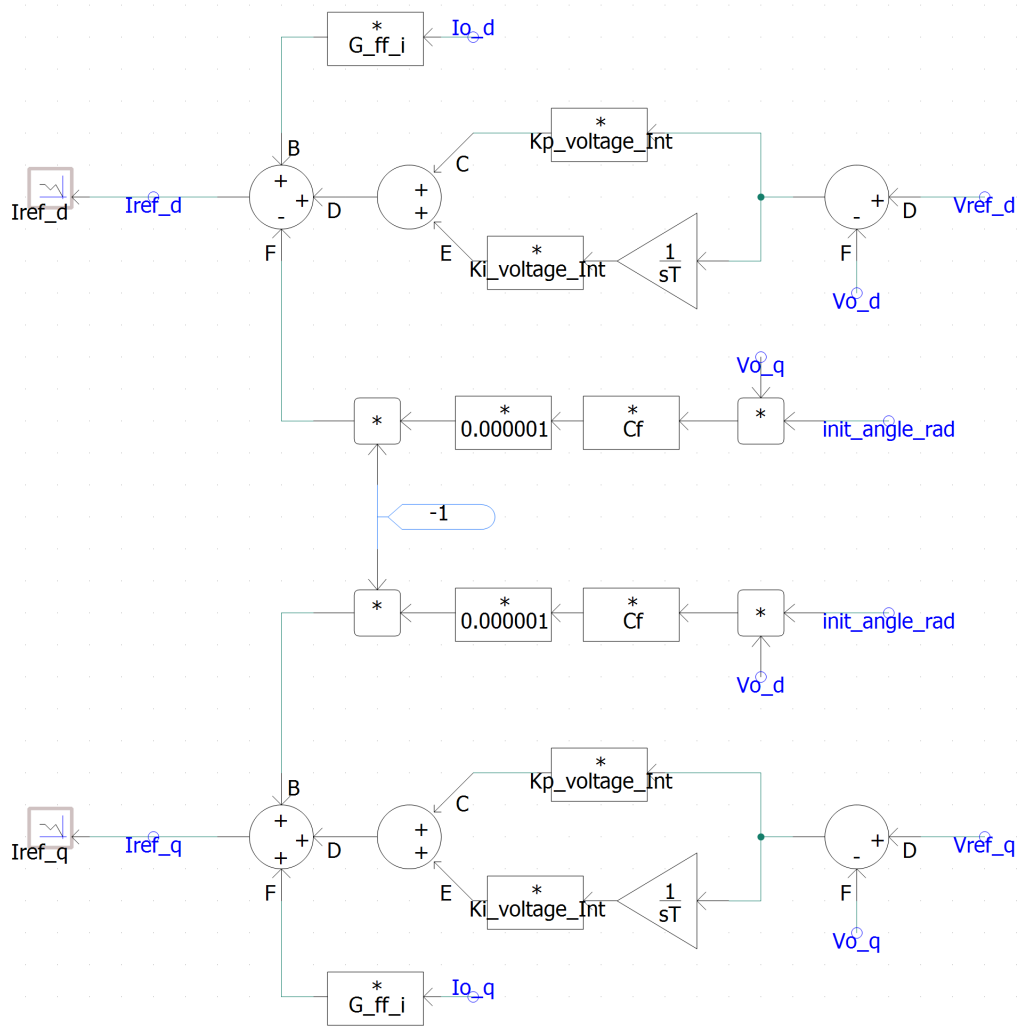
Napěťová smyčka

Napěťová smyčka je založena na PI regulátoru, jak je patrné na schéma 4.7. Tento regulátor lze reprezentovat rovnicemi:

$$\xi^{dq} = v_{ref}^{dq} - v_{out}^{dq}, \quad (4.5)$$

$$i_{ref}^{dq} = (k_U^i \cdot \xi^{dq} + k_U^p \cdot \xi^{dq}) - (j\omega_{ref} \cdot C_f \cdot v_{out}) + (G_U \cdot i_{out}^{dq}), \quad (4.6)$$

- kde ξ^{dq} je chybová odchylka integrátoru,
 k_U^i je integrální zesílení,
 k_U^p je proporcionální zesílení,
 G_U je proudové feed-forward zesílení.
 C_f je kapacita kondenzátoru na výstupu zdroje.



Obr. 4.7: Modul napěťové smyčky v PSCAD

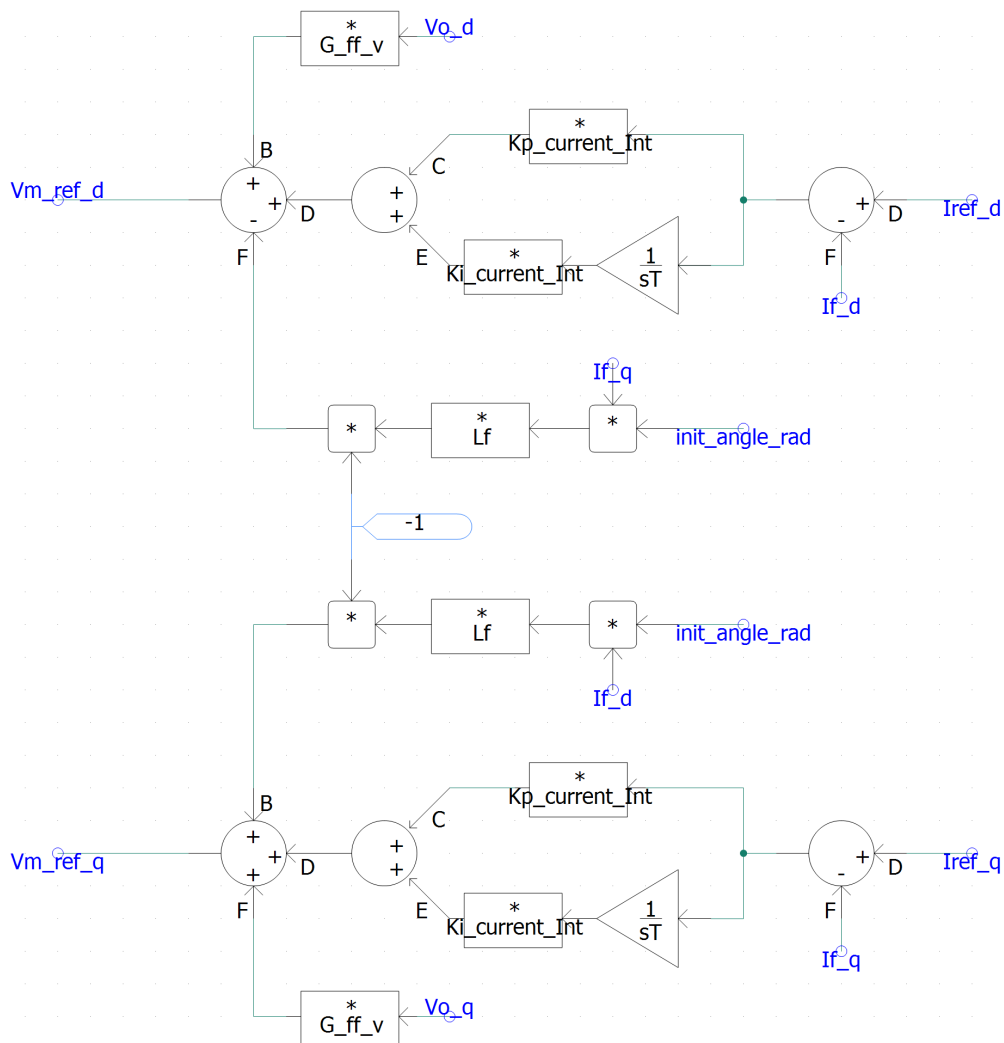
Proudová smyčka

Proudová smyčka rovněž pracuje na principu PI regulátoru a její topologie je obdobná té u napěťové smyčky. Topologie v prostředí PSCAD je k nahlédnutí, viz 4.8 a její princip lze popsat rovnicemi:

$$\gamma^{dq} = i_{ref}^{dq} - i_f^{dq}, \quad (4.7)$$

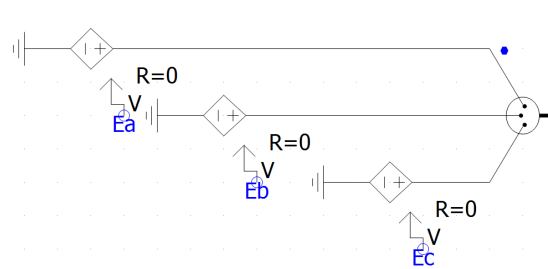
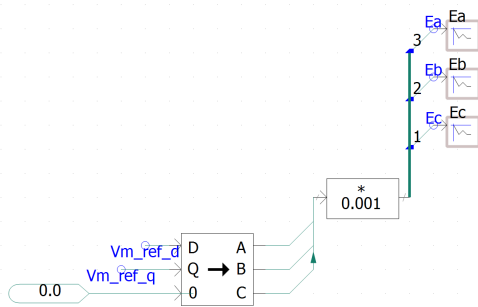
$$v_{ref}^{dq} = (k_I^i \cdot \gamma^{dq} + k_I^p \cdot \gamma^{dq}) - (j\omega_{ref} \cdot L_f \cdot i_{out}) + (G_I \cdot v_{out}^{dq}), \quad (4.8)$$

kde γ^{dq} je chybová odchylka integrátoru,
 k_I^i je integrální zesílení,
 k_I^p je proporcionalní zesílení,
 G_I je napěťové feed-forward zesílení.
 L_f je indukčnost na výstupu zdroje.



Obr. 4.8: Modul proudové smyčky v PSCAD

Výstupní signál řídicího obvodu

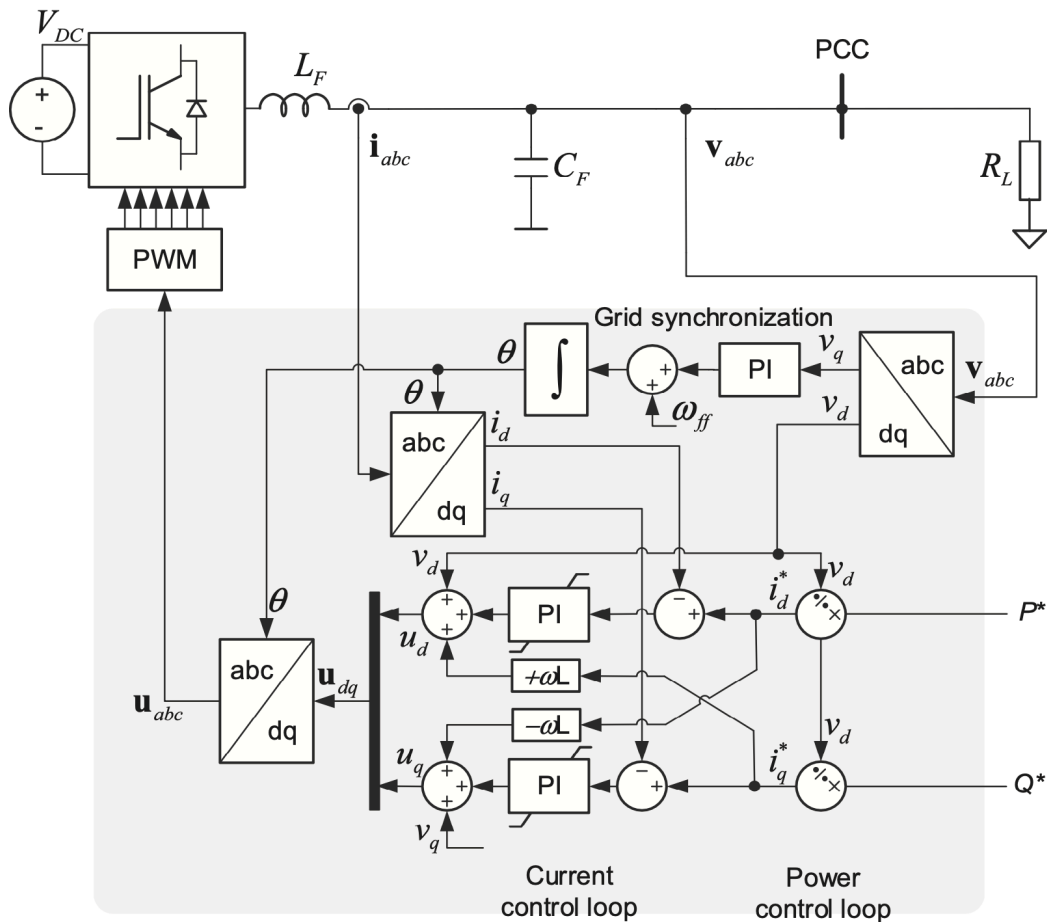


Obr. 4.9: Převod dq do ABC v PSCAD Obr. 4.10: Zdroje napětí v PSCAD

Výstupem z proudové smyčky je řídicí signál V_{reg}^{dq} , který je následně převeden pomocí bloku "ABC - DQ0 Transformation" zpět do ABC-souřadnicového systému a přiveden a využit, jakožto řídicí signál pro jednotlivé zdroje napětí, jež byly popsány v části *Model zdroje*.

4.3 Model GFL na bázi PLL single-loop droop control

Pro srovnání možností GFM měniče byl rovněž vytvořen model měniče na bázi GFL. Pro tento model byl zvolen základní princip řízení využívající PLL závěsu, založený na jednoduchém výkonovém droop control se závislou proudovou smyčkou. Tento princip řízení odpovídá nejrozšířenějšímu modelu. Stejně jako u modelu GFM měniče byl zvolen zjednodušující předpoklad zdroje nekonečného výkonu složeného z tří jednofázových napěťových zdrojů, nicméně řízených jakožto proudové zdroje. Rovněž model obsahuje blok sloužící pro limitaci výstupního výkonu.



Obr. 4.11: Základní řídicí struktura měniče v režimu GFL převzato z [14]

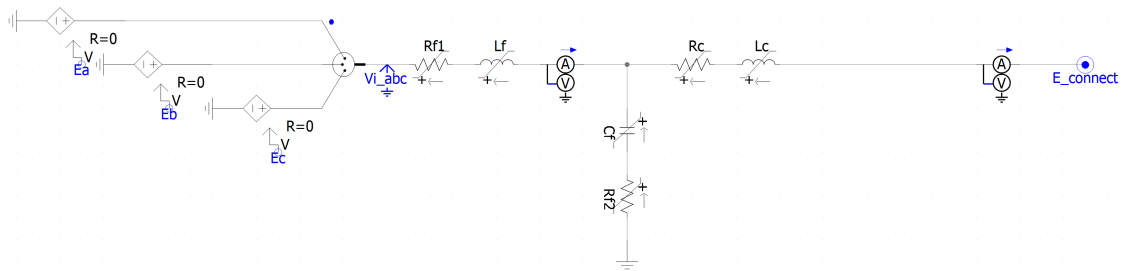
Jak již bylo zmíněno, zdroj je založen na základním modelu řízení a nedisponuje tak schopností podpory sítě v žádné formě. Model využívá PLL závěsu ke sledování síťových parametrů a startovací P/Q rampu, pro nastavení výstupních hodnot činného a jalového výkonů. Měnič se díky těmto prvkům naváže na parametry sítě, které sleduje a dodává stanovené hodnoty výkonu, nehledě na změny v soustavě. Jako výchozí bod pro modelování byl zvolen již zhotovený model organizace NREL,

nicméně pro potřeby simulace byl přepracován model řízení na základě doporučení vycházejících z [14].

4.3.1 Popis hlavních prvků modelu GFL

Model zdroje

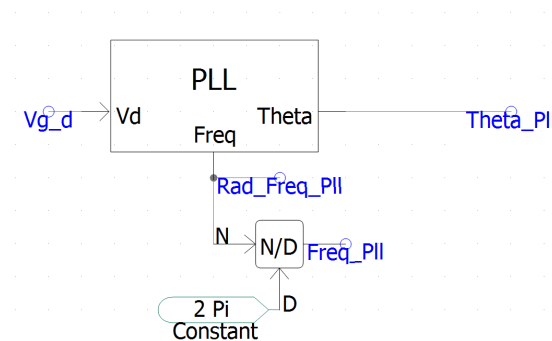
Model zdroje pro GFL zdroj je ekvivalentní s modelem pro GFM. Jedná se rovněž o napěťový zdroj složený ze tří jednofázových zdrojů, paralelně připojený do soustavy prostřednictvím vazební impedance Z_c . Model je rovněž osazen měřicími prvky jako jsou multimetry pro zajištění potřebných parametrů výstupního výkonu, stejně jako parametrů sítě, které jsou potřebné pro správnou synchronizaci.



Obr. 4.12: Model PLL zdroje PSCAD

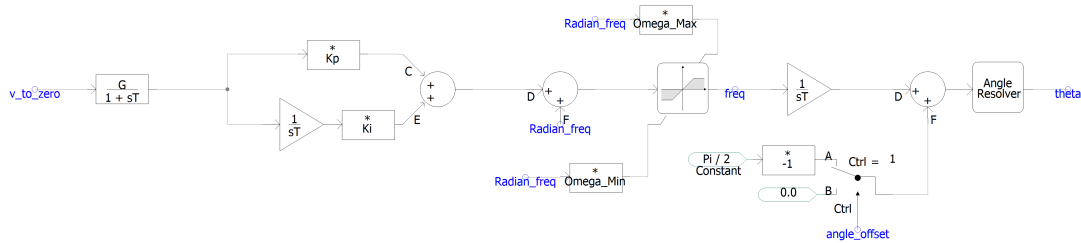
PLL závěs

Pro sledování parametrů sítě, především frekvence je začleněn jednoduchý PLL závěs, převzatý z knihovny NREL. Model je navržen na základě typu SRF-PLL a odpovídá PLL závěsu popsaném v části 3.3.



Obr. 4.13: Model PLL závěsu PSCAD

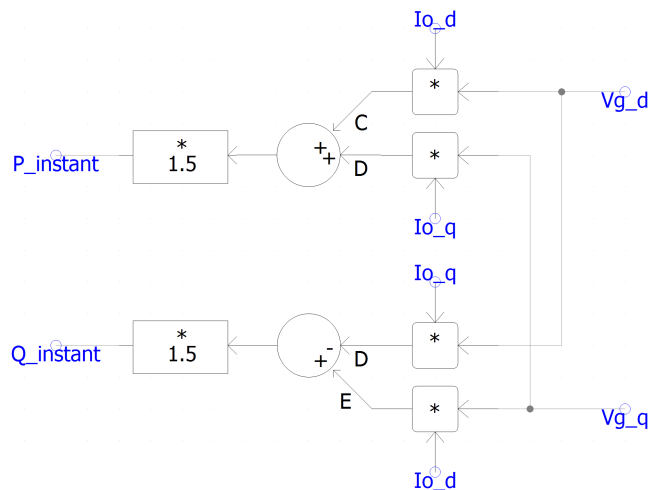
Je složen z PI regulátoru a doplněn o prvek limitující *min/max* hodnotu frekvence za součtovým členem, viz 4.14. Jeho vstupním parametrem je pak napětí sítě V_{grid} v dq -souřadnicovém systému. Vstupní frekvence pak vychází ze základní frekvence systému 50 Hz.



Obr. 4.14: Model PLL závěsu - detail PSCAD

Výstupem z modulu PLL je pak úhel θ , jež slouží pro řízení parametrů výstupního výkonu prostřednictvím bloků transformace $abc2dq$ a $dq2abc$. To zajišťuje správnou synchronizaci se sítí a poskytování výkonu o správných parametrech.

Výpočet výkonu



Obr. 4.15: Modul výpočtu výkonu v PSCAD

Modul pro výpočet výkonu je shodný s tím u GFM měniče a lze ho popsat následujícími rovnicemi.

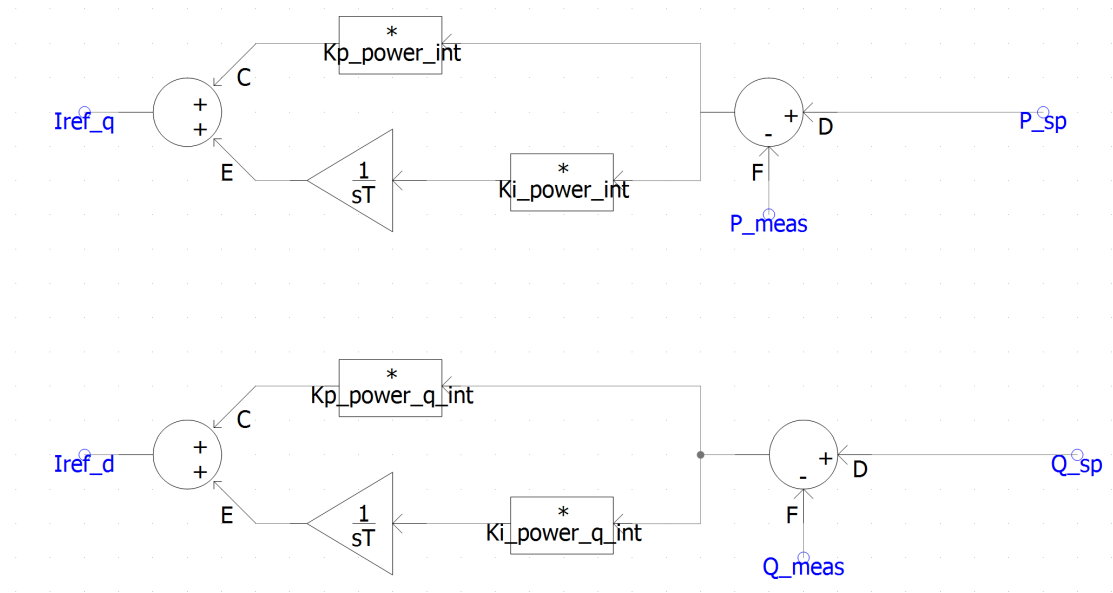
$$P_{instant} = \frac{3}{2} \cdot (u_{gd} \cdot i_{0d} + u_{gq} \cdot i_{0q}) \quad (4.9)$$

$$Q_{instant} = \frac{3}{2} \cdot (u_{gd} \cdot i_{0q} - u_{gq} \cdot i_{0d}) \quad (4.10)$$

, kde u_{gd}, u_{gq} reprezentuje okamžité napětí sítě v dq souřadnicích
 i_{0d}, i_{0q} reprezentuje proud dodávaný zdrojem v dq souřadnicích.

Výkonový regulátor

Pro řízení referenčních hodnot je využito 2 PI regulátorů, pro *činný* a *jalový* výkon. Tyto PI regulátory srovnávají měřený výstupní výkon s nastaveným požadovaným výkonem a tuto odchylku přivádí na proudovou smyčku řídicího systému.



Obr. 4.16: Modul výkonového regulátoru v PSCAD

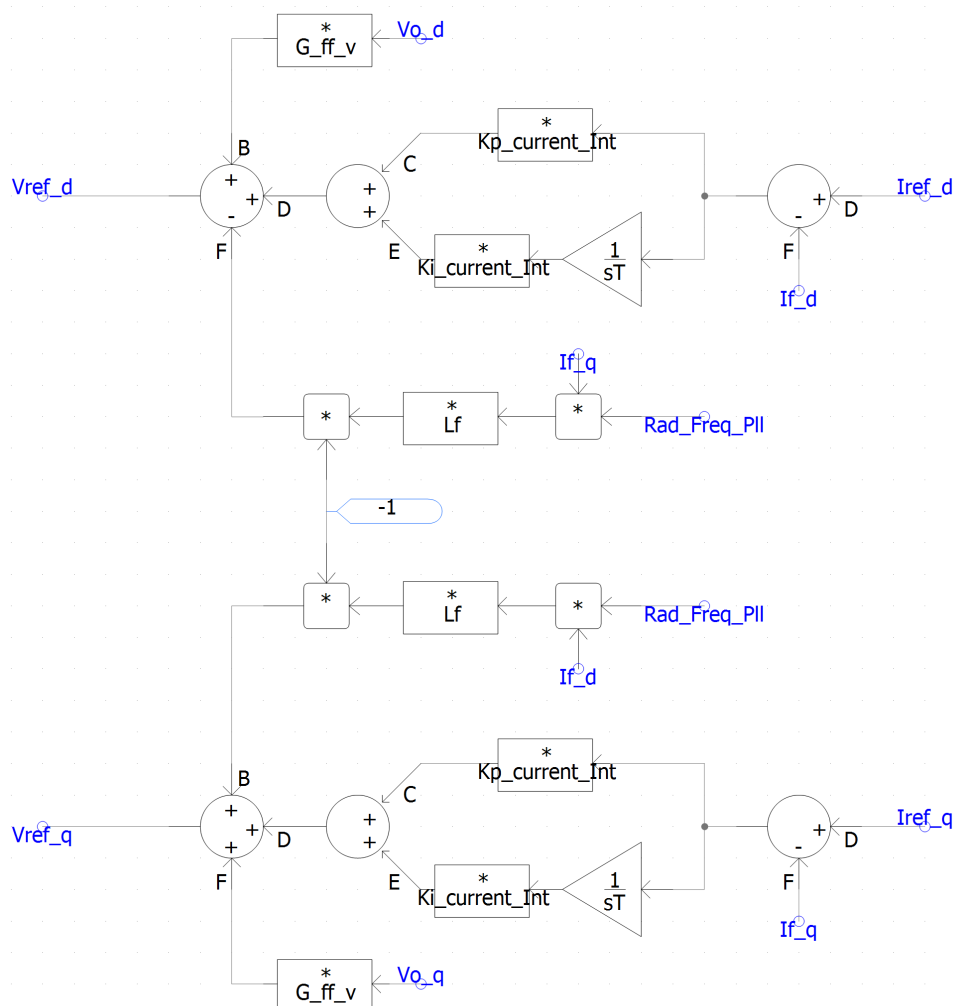
Proudová smyčka

Proudová smyčka rovněž pracuje na principu PI regulátoru a její topologie je obdobná té u proudové smyčky GFM měniče. Topologie v prostředí PSCAD je k nahlédnutí, viz 4.17 a její princip lze popsat rovnicemi:

$$\gamma^{dq} = i_{ref}^{dq} - i_f^{dq}, \quad (4.11)$$

$$v_{ref}^{dq} = (k_I^i \cdot \gamma^{dq} + k_I^p \cdot \gamma^{dq}) - (j\omega_{ref} \cdot L_f \cdot i_{out}) + (G_I \cdot v_{out}^{dq}), \quad (4.12)$$

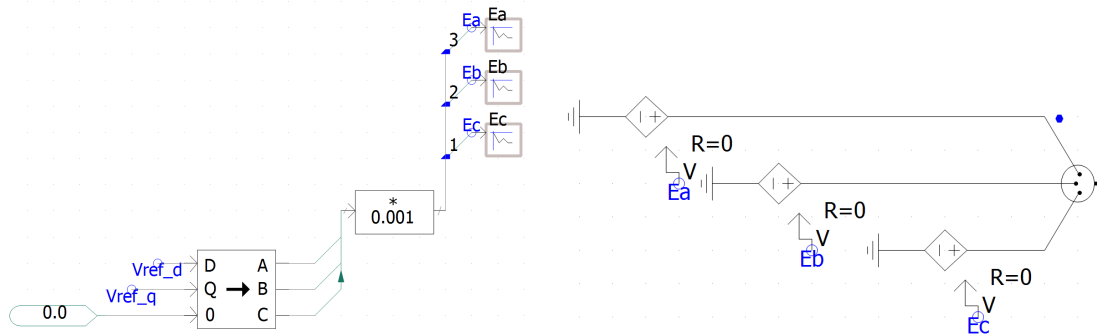
kde γ^{dq} je chybová odchylka integrátoru,
 k_I^i je integrální zesílení,
 k_I^p je proporcionální zesílení,
 G_I je napěťové feed-forward zesílení.
 L_f je indukčnost na výstupu zdroje.



Obr. 4.17: Modul proudové smyčky v PSCAD

Výstupní signál řídicího obvodu

Výstup celé řídicí smyčky, tedy referenční napětí je následně převedeno zpět do základního abc -souřadnicového systému a využito jakožto řídicí signál pro jednotlivé jednofázové zdroje. Pro tento účel je využito bloku „dq2abc“ z knihovny PSCAD. Vstupy pro tento blok jsou pak hodnoty referenčního napětí z proudové smyčky v dq -souřadnicích a úhel θ získaný pomocí PLL závěsu.



Obr. 4.18: Převod dq do ABC v PSCAD Obr. 4.19: Zdroje napětí v PSCAD

4.4 Testované scénáře

Cílem testování je ověření schopností měniče v režimu GFM s multi-loop droop control a splnění požadavků kladených na tento typ zdroje. Dalším z cílů je pak sledování a zhodnocení reakce zdroje na různé síťové poruchy, které se mohou v systému běžně vyskytovat. Pro pochopení výhod širší implementace GFM měničů v blízké budoucnosti jsou rovněž přiloženy srovnatelné scénáře pro měnič v režimu GFL a jejich srovnání.

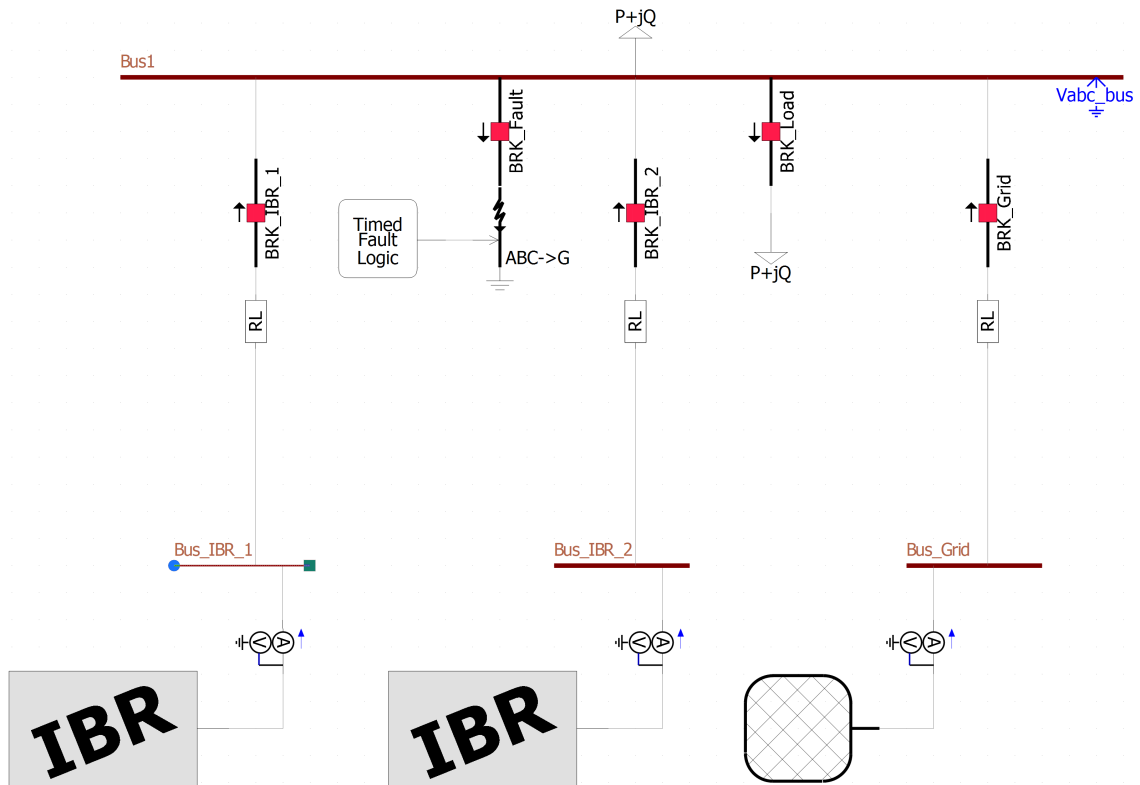
Jak již bylo zmíněno při popisu GFM technologie, oficiální požadavky definující GFM měnič nejsou přímo stanoveny, nicméně obecně udávané a předpokládané požadavky na GFM měnič jsou následující:

- provoz v síti s i bez synchronního zdroje
- provoz ve spolupráci s jinými IBR
- schopnost udržování výkonové rovnováhy
- schopnost udržování napěťové stability
- odolnost v případech FRT
- udržování kvality elektrické energie
- přispívání k systémové stabilitě sítě

Testování zmiňovaných IBR zdrojů tedy bude zaměřeno na tyto požadavky s ohledem na možnosti simulace.

4.4.1 Simulační síť

Pro potřeby testování byla vytvořena jednoduchá soustava (viz 4.20) s parametry 22 kV/50 Hz, skládající se z 2 přípojovacích míst pro IBR zdroje, připojené přes multimetr pro kontrolní měření, výkonový vypínač a vedení s impedancí $Z_{ved} = (0.7 + j0.85) \Omega$. Dalším prvkem v soustavě je síťový napáječ, jež je připojený přes shodný set zařízení a vedení s impedancí $Z_{ved} = (7 + j8.5) \Omega$, tedy v poměru $R/X = 0.82$. Síťový napáječ pak složí k vyvolání systémových poruch jakými mohou být například skoková změna frekvence, napětí či fáze.



Obr. 4.20: Návrh testovací sítě v PSCAD

Všechny tyto zařízení jsou sdruženy v jedné přípojnici „Bus1“, do které je rovněž připojena statická 3-fázová zátěž $(2.2+j0.8)$ MVA a přípínatelná zátěž $(0.6+j0.3)$ MVA, do přípojnice je také přes vypínač připojen 3-fázový zkrat. Celá soustava je rovněž osazena měřicími zařízeními pro získání požadovaných hodnot. Dodatečně pro nepřesnost bezprostředního měření frekvence za pomoci bloku multimetru, je pro stanovení frekvence využito PLL závěsu.

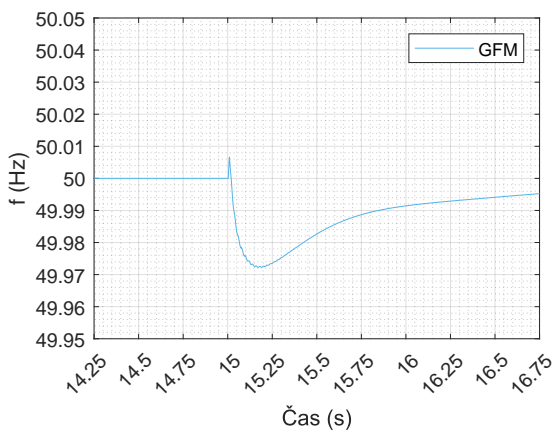
4.4.2 Provoz v síti s i bez synchronního zdroje

Pro ověření schopnosti provozu IBR v síti s i bez synchronního zdroje byl zvolen scénář náhodného odpojení od soustavy do ostrovního provozu se zátěží. Výchozím stavem je soustava využívající 1 IBR zdroj a síťový napáječ zastávající roli sítě se synchronními zdroji. Tyto zdroje pak společně pracují do zátěže na přípojnicí „Bus1“. Po nájezdu a proběhlé synchronizaci, tedy za ustáleného stavu v čase $T = 15$ s dochází k rozepnutí vypínače „BRK_Grid“, rozpadu soustavy a s tím k přejití části soustavy do ostrovního režimu, respektive do 100 % IBR soustavy.

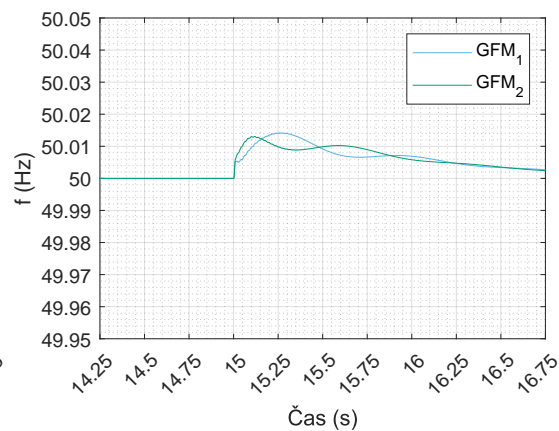
Zkouška je provedena v konfiguraci:

- GFM, Síťový napáječ do statické zátěže
- GFL, Síťový napáječ do statické zátěže
- GFM, GFM, síťový napáječ do statické zátěže
- GFM, GFL, síťový napáječ do statické zátěže

Jak je patrné z průběhů frekvence pro samostatný GFM a kombinaci GFM-GFM, provoz v síti s synchronním strojem a rovněž přechod do 100 % IBR sítě probíhá pro stanovený model bez problému, dle předpokladu. Z průběhu 4.21 lze pozorovat mírný nárůst frekvence v okamžiku po odpojení a následný propad, ten je dán převzetím 100 % zátěže po přechodu do ostrovního režimu.



Obr. 4.21: Frekvence odezva GFM měniče

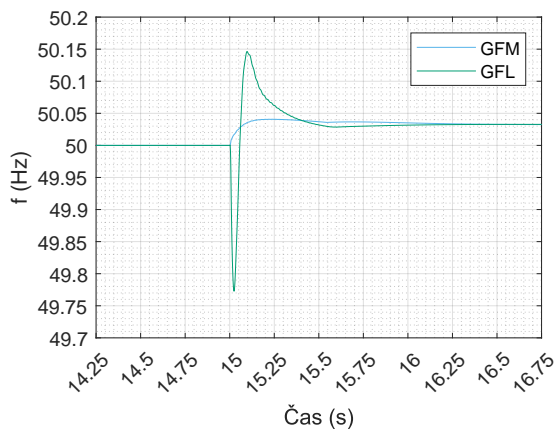


Obr. 4.22: Frekvence odezva GFM-GFM měniče

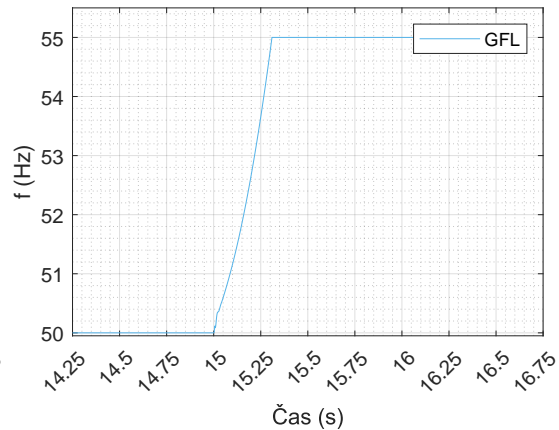
V ostatních případech je efekt opačný, to je však dáno rozdělením výkonů mezi zdroji, které v kombinacích, nebo i samostatném provozu GFL převyšují spotřebu v testovací soustavě a dodávají výkon do „sítě“ za napáječem. V případě spolupráce GFM-GFM (4.22), dochází k mírnému zvlnění v čase po odpojení od síťového napáječe. Tento jev je způsoben novým přerozdělením zátěže mezi jednotlivé zdroje na základě výkonových parametrů měničů. Obecně se jedná o jev nežádoucí, nicméně

je nutné vzít v potaz velikost kmitu a velikost celé odchylky, která je v maximum $\Delta f = 15$ mHz. Z průběhu frekvence a průběhů výkonu a napětí v síti (viz 4.4.8) lze považovat GFM měnič schopný provozu v síti s i bez synchronního zdroje.

Při bližším pohledu na průběh spolupráce GFM-GFL (4.23) lze pozorovat okamžitý propad frekvence GFL měniče, vzápětí s nárůstem a překmitem, to je dáno řízením samotného GFL měniče, který disponuje pouze proudovou smyčkou a nedisponuje umělou setrvačností v jakékoliv podobě. Z těchto důvodů se jakékoliv změny v síti, respektive změny síťových parametrů, okamžitě projeví na provozu GFL, jelikož je na síť přímo zavěšen.



Obr. 4.23: Frekvenční odezva GFM-GFL měniče



Obr. 4.24: Frekvenční odezva GFL měniče

Průběh frekvence v případě samostatného GFL (4.24) pak odpovídá předpokladům. Při spolupráci se synchronním strojem, je jeho provoz bezproblémový a řídí se parametry sítě, nicméně po odpojení a přechodu do samostatného provozu není schopný tyto parametry udržet, což vzápětí vede k prudkému nárůstu frekvence a následném odpojení od soustavy.

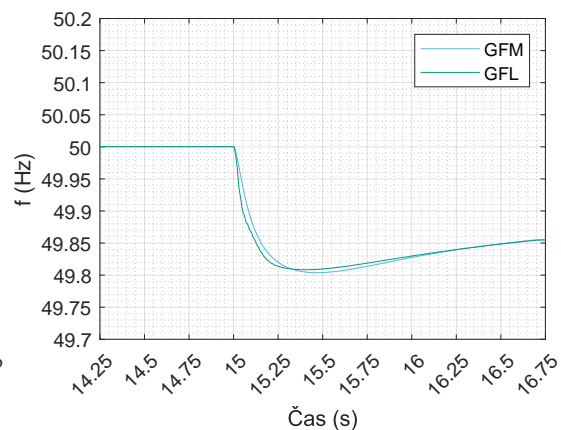
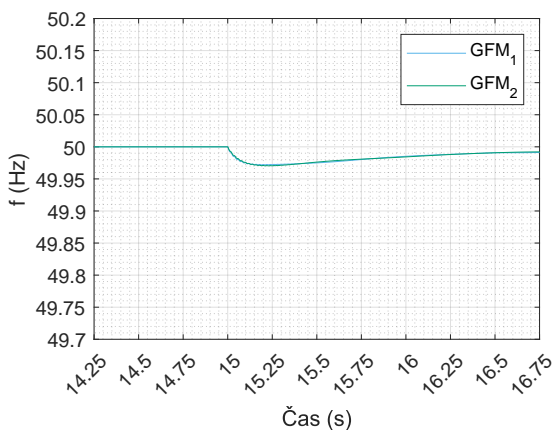
Z těchto zjištění je patrné, že GFM měnič je schopný pracovat v soustavě s i bez synchronního zdroje za jakýchkoliv okolností. Pro GFL zdroj pak lze konstatovat, že je schopný pracovat v soustavě s i bez synchronního zdroje, nicméně vždy potřebuje alespoň 1 GFM/SG zdroj pro stanovení parametrů.

4.4.3 Provoz ve spolupráci s jinými IBR

Pro ověření schopnosti spolupráce GFM s jinými zdroji je soustava pouze v ostrovním režimu s 2 IBR zdroji a proměnlivou zátěží. Účelem této zkoušky je pozorovat chování spolupráce GFM a GFL měničů navzájem. Pro tento účel je po ustálení soustavy, v čase $T = 15$ s připojena dodatečná zátěž. Účelem je poté pozorovat frekvenční odezvu jednotlivých IBR na tuto zátěž a nové rozdělení „činného“ výkonu. Zkouška je provedena v konfiguraci:

- spolupráce GFM + GFM do proměnlivé zátěže
- spolupráce GFM + GFL do proměnlivé zátěže

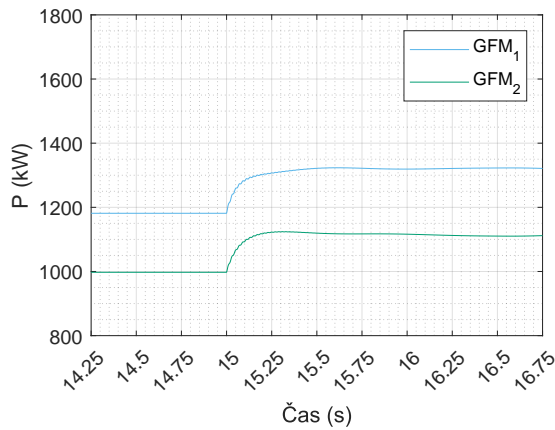
Tato zkouška je obdobná zkoušce předchozí, nicméně zdroje spolupracují v 100 % IBR síti již od počátku a není zde zahrnut synchronní zdroj. Rozdíl v odezvě měničů je pak na první pohled patrný.



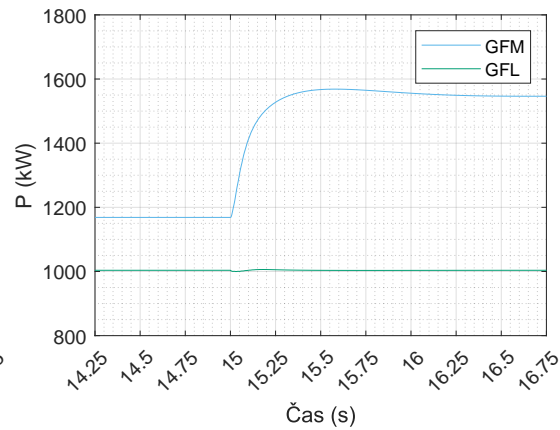
Obr. 4.25: Frekvenční odezva GFM-GFM měničů

Obr. 4.26: Frekvenční odezva GFM-GFL měničů

Z pohledu frekvenční odezvy na změnu zátěže lze pozorovat výrazně nižší propad v případě kombinace GFM-GFM (4.25), to je dáno schopností GFM měničů poskytovat podporu výkonové rovnováhy a jejich okamžitou odezvou na změnu. Na druhé straně kombinace GFM-GFL jeví násobně vyšší propad, jelikož GFM měnič je v této soustavě jediným zdrojem vyrovnávající zmíněnou disbalanci a GFL měnič pouze kopíruje výstupní frekvenci v síti. Na průbězích 4.27 a 4.28 lze toto chování jasně pozorovat; v případě GFM-GFM je nově připojená zátěž rovnoměrně rozdělena mezi jednotlivé zdroje na základě droop-control mechanismu.



Obr. 4.27: Rozdělení činného výkonu GFM-GFM měničů



Obr. 4.28: Rozdělení činného výkonu GFM-GFL měničů

V případě GFM-GFL lze naopak pozorovat neměnnou velikost dodávaného činného výkonu GFL měniče, jež je předem stanovená a její změnu může zapříčinit pouze nedostatečná dodávka výkonu ze zařízení za měničem.

Z těchto zjištění je patrné, že GFM i GFL měnič, jsou schopny spolupráce s jinými IBR zdroji.

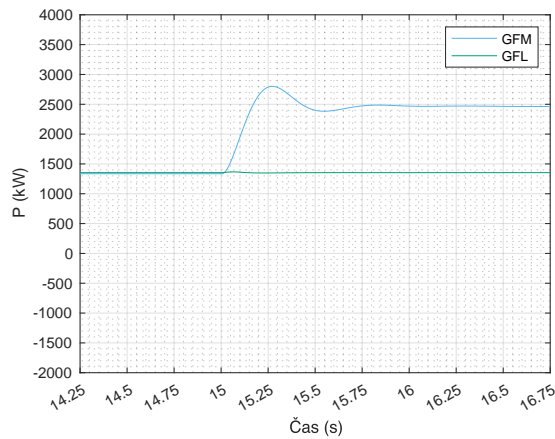
4.4.4 Schopnost udržování výkonové rovnováhy

Schopnost udržování výkonové rovnováhy je přímo spojena s frekvenční odezvou zdroje, tudíž zkoušky za účelem ověření této schopnosti zdroje jsou navrženy jako úmyslné zanesení frekvenční difference, za pomoci síťového napáječe a následné pozorování frekvenční a výkonové odezvy jednotlivých IBR. Tato difference je zanesena v ustáleném stavu v čase $T = 15$ s a způsob provedení je za pomoci skokové změny frekvence $\Delta f = -500$ mHz na síťovém napáječi. Hlavními sledovanými parametry jsou poté frekvenční a výkonová odezva zdroje na změnu.

Zkouška je provedena v konfiguraci:

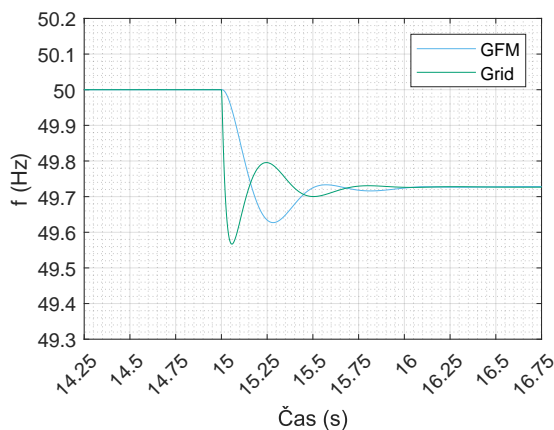
- GFM + Síťový napáječ do statické zátěže
- GFL + Síťový napáječ do statické zátěže

Schopnost udržování výkonové rovnováhy, je schopnost zdrojů automaticky reagovat na změny poměrů v síti navýšením/snížením dodávaného výkonu, případná disbalance má nežádoucí vliv na frekvenci v síti. Jak lze pozorovat na průběhu dodávaného výkonu (4.29), GFM měnič okamžitě reagoval na pokles frekvence, navýšením výkonu.

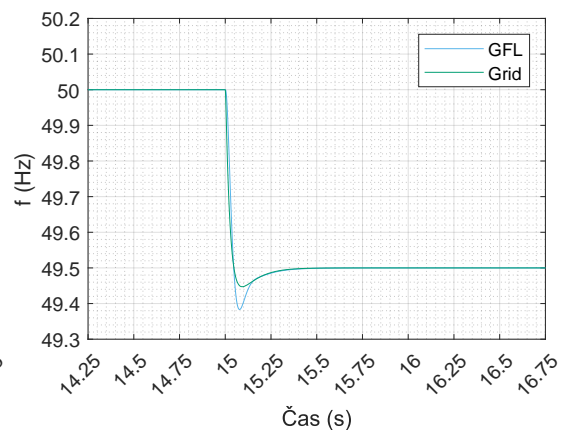


Obr. 4.29: Rozdělení činného výkonu GFM/GFL-Grid

Díky této reakci byl frekvenční propad podstatně zmírněn a maximální rychlost změny frekvence dosáhla hodnoty $RoCoF = 1,89 \text{ Hz/s}$. Na průběhu frekvence je dále patrné 4.30, že po vyrovnání výkonů mezi měničem a síťovým napáječem se hodnota frekvence v síti ustálila na hodnotě $f = 49,72 \text{ Hz}$.



Obr. 4.30: Frekvenční odezva GFM měniče



Obr. 4.31: Frekvenční odezva GFL měniče

Model GFL měniče již z principu svojí funkce na frekvenční změnu nikterak nereaguje a nadále udržuje svůj stanovený výstupní výkon. Na základě frekvence z PLL závěsu pak následuje pokles frekvence síťového napáječe na stanovenou hodnotu $f = 49,5 \text{ Hz}$.

Z těchto zjištění je patrné, že GFM měnič, na rozdíl od GFL disponuje schopností udržování výkonové rovnováhy.

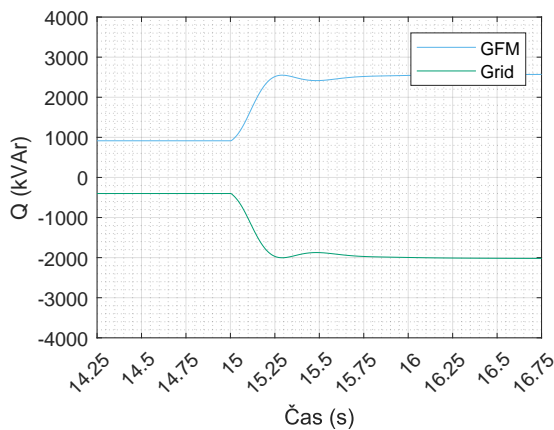
4.4.5 Schopnost udržování napěťové stability

Zkouška pro ověření schopnosti udržování napěťové stability je provedena prostřednictvím síťového napáječe, jenž v čase $T = 15$ s mění úroveň napětí o $\Delta U = -5\%$, čímž vyvolá odchylku napětí v celé soustavě. Výstupy sledované při této zkoušce je především napěťová odezva IBR zdroje, společně s dodávkou jalového výkonu do soustavy.

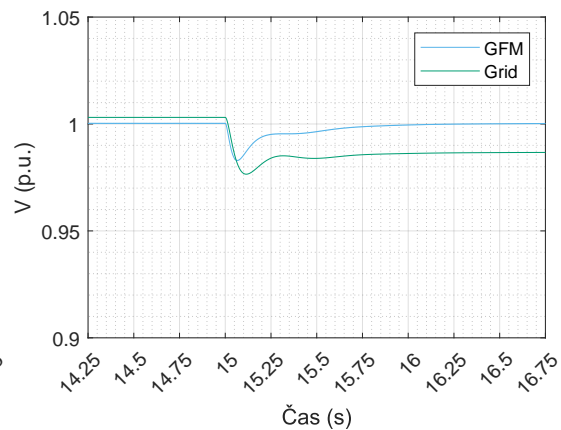
Zkouška je provedena v konfiguraci:

- GFM + Síťový napáječ do statické zátěže
- GFL + Síťový napáječ do statické zátěže

Napěťová stabilita je úzce spjata s dodávkou jalového výkonu do sítě. Obdobně jako v případě výkonové rovnováhy, i zde GFM měnič jeví předpokládané chování a to sice okamžitou reakci na změnu napětí v propojené soustavě, zapříčiněnou "poruchou za síťovým napáječem", zvýšením dodávky jalového výkonu (viz 4.32) na potřebnou úroveň pro vyrovnání napětí v jeho připojovacím místě.



Obr. 4.32: Jalový výkon dodávaný GFM měničem

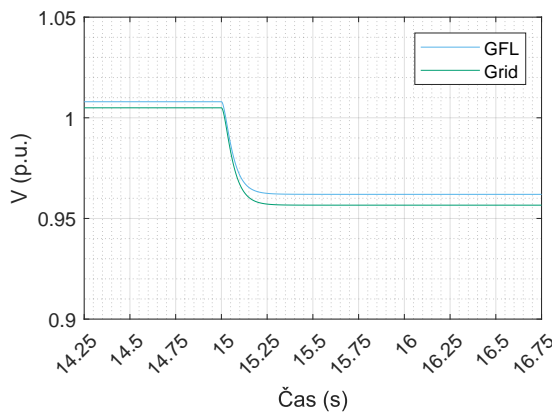


Obr. 4.33: Napěťová odezva GFM měniče

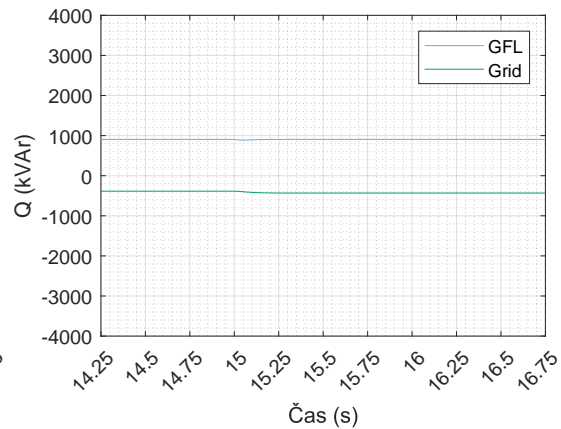
Díky této odezvě byl pokles napětí v místě připojení zdroje zastaven na úrovni 98,3 % jmenovité hodnoty a následně vyrovnán na nominální hodnotu 22 kV. Tato změna vede k novému přerozdělení jalového výkonu a vzhledem k místu poruchy je GFM měničem jalový výkon nově dodáván nejen do zátěže, ale rovněž do sítě za síťovým napáječem. GFM měnič tak poskytuje podporu pro udržení napěťové stability v celé soustavě.

Při pohledu na průběhy jalového výkonu (4.35) a napětí (4.34), při využití GFL, je patrné, že tento měnič touto schopností nedisponuje. Stejně jako v případě odezvy činného výkonu při zkoušce poskytování služeb výkonové rovnováhy, měnič z pohledu jalového výkonu, nereaguje na změnu v soustavě a pouze následuje prudkou změnu

napětí v síti. Hodnota napětí je následně ustálena na 96,2% (změna nedošla na stanovený parametr $\Delta U = -5\%$ vlivem rozdílného místa připojení GFL zdroje a síťového napáječe a impedance vedení mezi nimi.



Obr. 4.34: Napěťová odezva GFL měniče



Obr. 4.35: Jalový výkon dodávaný GFL měničem

Z těchto zjištění je patrné, že GFM měnič, na rozdíl od GFL disponuje schopností udržování napěťové stability a je schopný doregulovat na nominální hodnotu, pokud disponuje dostatečným výkonem.

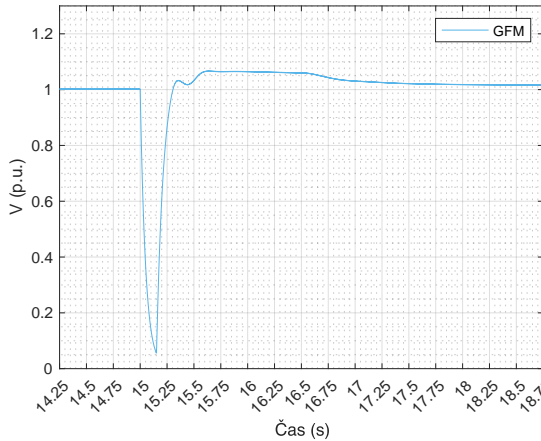
4.4.6 Odolnost v případech FRT

FRT, neboli fault-ride-through je velice důležitá schopnost IBR zdroje, zajišťující jeho správné fungování i v případech podpětí, ke kterým může krátkodobě nastat, například zkratem na vedení. Schopnost udržet se v soustavě a po odeznění poruchy nadále pracovat v nominálním stavu je kritická. Pro její testování je vytvořena zkouška, ve spolupráci se síťovým napáječem. Po nájezdu a správné synchronizaci dochází k 3-fázovému zkratu na přípojnici „Bus1“, který vyvolá krátkodobé podpětí. Smyslem zkoušky je pozorovat odezvu IBR zdroje na tuto síťovou poruchu a jeho schopnost návratu do původních parametrů po odeznění této poruchy. Dle regulace Evropské unie *Commission Regulation (EU) 2016/631* je stanovena pro IBR zdroj minimální doba, po kterou musí překlenout poruchu 150 ms. Dále dle Kodexu PS musí takový zdroj obnovit hladinu napětí ($\pm 5\%$) do 3 s od vzniku poruchy.

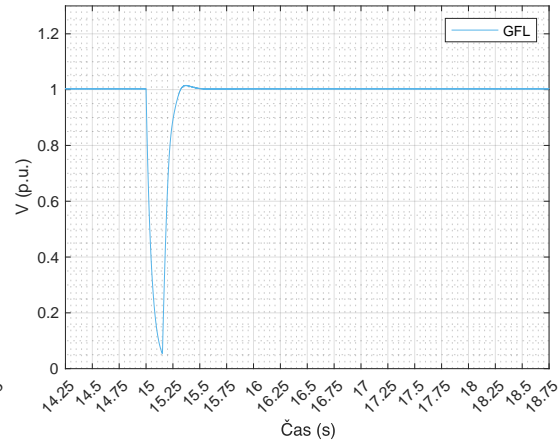
Zkouška je provedena v konfiguraci:

- GFM + Síťový napáječ do statické zátěže
- GFL + Síťový napáječ do statické zátěže

Po aplikaci 3-fázového zkratu po dobu 150 ms došlo, v případě obou měničů, vlivem zkratu k poklesu napětí téměř na nulu, nicméně měnič setrval v síti. Okamžitě po odeznění zkratu, se napětí vrací na nominální hodnotu, nicméně v případě GFM měniče lze pozorovat mírný překmit s hodnotou 6 %, dobou trvání 1.2 s od vzniku poruchy a následným návratem k hodnotě nominální.



Obr. 4.36: Napěťová odezva GFM měniče



Obr. 4.37: Napěťová odezva GFL měniče

Tento jev je nežádoucí, nicméně i přes tento nedostatek, zapříčiněný principem řízení prostřednictvím multi-loop droop control, oba měniče splňují požadavek na odolnost v případech FRT.

4.4.7 Přispívání k systémové stabilitě sítě

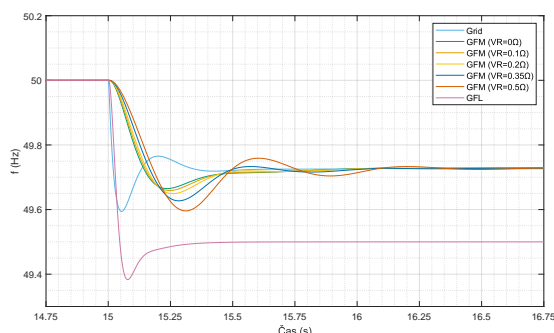
Příspěvek k síťové stabilitě lze pojímat převážně jako podílení se na setrvačnosti soustavy, tedy odpor zdroje vůči změnám. U běžných synchronních zdrojů je tohoto jevu docíleno díky velkým rotujícím hmotám, které disponují přirozenou setrvačností zmíněných těles. Z pohledu IBR je pro dosažení této vlastnosti zapotřebí implementace virtuální setrvačnosti v podobě například virtuálního rezistoru. Řízení založené na virtuálním rezistoru je schopné zlepšit stabilitu IBR z hlediska tlumení nežádoucích přechodných jevů, snižuje chybu ustáleného stavu a také je chrání před vysokými zatěžovacími proudy. Tato zkouška představuje schopnost příspěvku ke stabilitě sítě pro řadu parametrů virtuálního rezistoru GFM měniče, rovněž je doplněna o referenční hodnotu reakce GFL zdroje. Zkouška je provedena prostřednictvím difference frekvence v ustáleném stavu v čase $T = 15$ s a způsob provedení je za pomoci skokové změny frekvence $\Delta f = -500$ mHz.

Zkouška je provedena v konfiguraci:

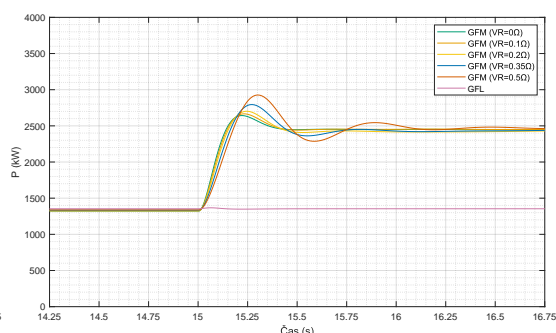
- GFM + Síťový napáječ do statické zátěže

- GFL + Síťový napáječ do statické zátěže

Jak lze pozorovat na průběhu frekvenční odezvy (4.38), rozdíl v činnosti GFM a GFL měniče je na první pohled zřejmý. Reakce na skokovou změnu frekvence z pohledu GFL měniče se jeví jako prudký propad frekvence ($RoCoF = 6,17 \text{ Hz/s}$) s překmitem a ustálením na hodnotě stanovené při změně, vyvolané prostřednictvím síťového napáječe, tedy $f = 49,5 \text{ Hz}$. Při této zkoušce je zkoumaným parametrem právě rychlost změny frekvence, jakožto parametr schopný vyjádřit míru setrvačnosti, kterou je zdroj schopný přispívat do sítě.



Obr. 4.38: Frekvenční odezva GFM měniče - proměnlivý VR



Obr. 4.39: Činný výkon dodávaný GFM měniče - proměnlivý VR

Tato schopnost je kritická z hlediska udržení stability v síti. Dle měření je tedy zřejmé, že GFL měnič oproti GFM měniči nepřispívá ke stabilitě soustavy.

Při pohledu na průběh frekvenční odezvy GFM, schopnost měniče přispívat k systémové stabilitě je pro tento princip řízení přirozená, nicméně tuto schopnost lze přizpůsobit za pomoci virtuálního rezistoru, který tuto vlastnost dokáže ještě podpořit, nicméně za cenu vyššího propadu a zvlnění, proto je zapotřebí volit velikost virtuálního rezistoru jako kompromis, mezi velikostí a rychlostí změny frekvence v reakci na změny v síti.

S vyšší hodnotou VR je měnič odolnější na změny v síti a přispívá výrazněji k virtuální setrvačnosti sítě, nicméně příliš vysoká hodnota může představovat odchylku frekvence mimo povolené limity. Rovněž je řízení frekvence provázáno s dodávkou činného výkonu, která je VR rovněž ovlivněna, a to v podobném duchu, jakožto frekvenční odezva, tedy s rostoucí hodnotou VR dochází k větší výkonové odezvě, s pomalejší reakcí a také s vyšším zvlněním.

Na základě provedené zkoušky lze tedy prohlásit, že měniče v režimu GFM jsou schopny přispívat k systémové stabilitě.

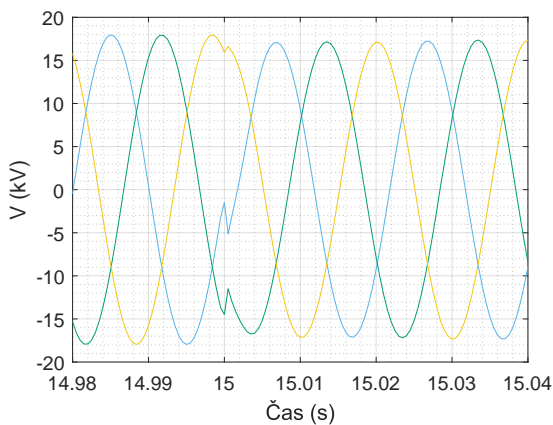
4.4.8 Odolnost vůči posunu fáze

IBR zdroj by měl mimo jiné rovněž odolat fázovému posuvu a bezprostředně navázat na tuto změnu kontinuálním provozem bez přerušení dodávky či výpadku ze synchronismu. Pro ověření této schopnosti je navržena zkouška využívající síťového napáječe, který uměle vyvolává posun fáze o $\Delta\theta = -40^\circ$ v čase $T = 15$ s. Sledovanými parametry je následně frekvenční odezva zdroje společně s reakcí na fázový posuv jako takový.

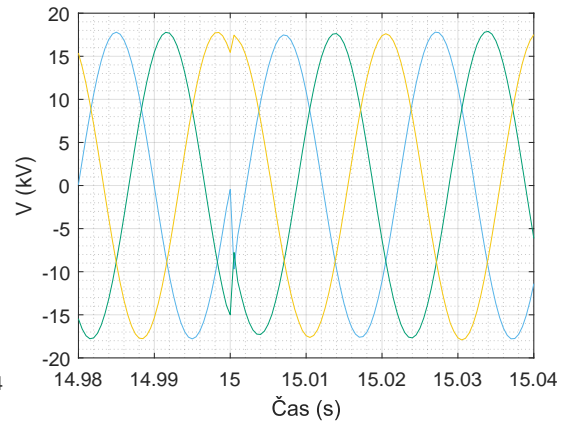
Zkouška je provedena v konfiguraci:

- GFM + Síťový napáječ do statické zátěže
- GFL + Síťový napáječ do statické zátěže

Již z napětového průběhu jednotlivých měničů je patrné, že posun fáze v případě GFM měniče proběhl o výrazně nižší hodnotu, to je mimo jiné dobře patrné i z průběhů (4.42) a (4.43). To je dáno, již v předchozích zkouškách ověřenými, schopnostmi GFM měniče bránit prudkým změnám v soustavě a přispívat tak k systémové stabilitě a výkonové rovnováze.

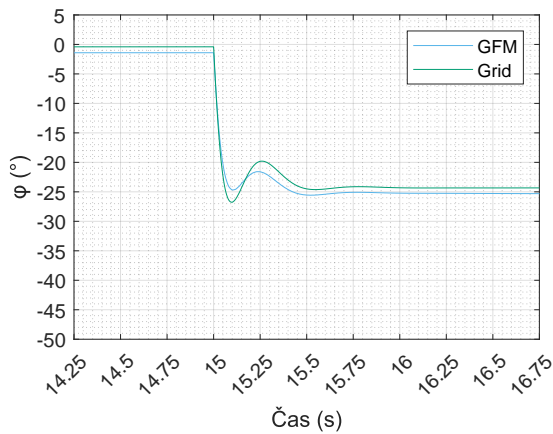


Obr. 4.40: Posun fáze na 3-fázovém průběhu napětí - GFM

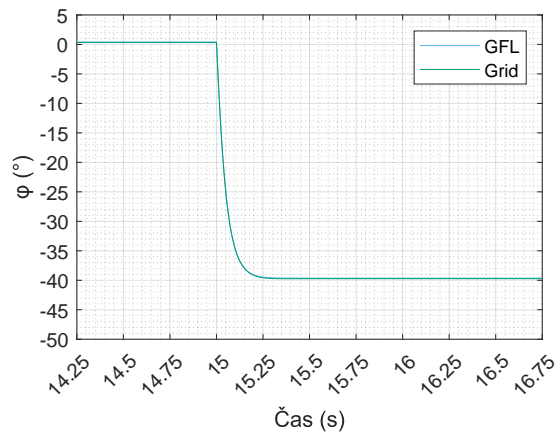


Obr. 4.41: ČPosun fáze na 3-fázovém průběhu napětí - GFL

Touto vlastností však GFL měnič nedisponuje, proto jak je patrné z (4.43), pouze tuto změnu ve fázi následuje na stanovenou hodnotu $\theta = -40^\circ$ a rovněž jeví propad frekvence až na hodnotu $f = 46,9$ Hz což dle frekvenčního plánu ČEPS je již nepřijatelný stav, který vede k odpojení od ES.

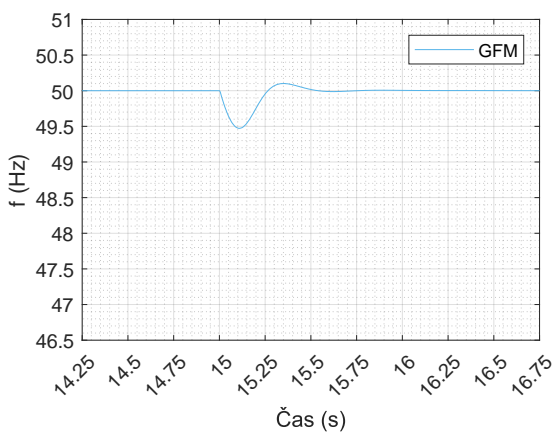


Obr. 4.42: Posun fáze GFM

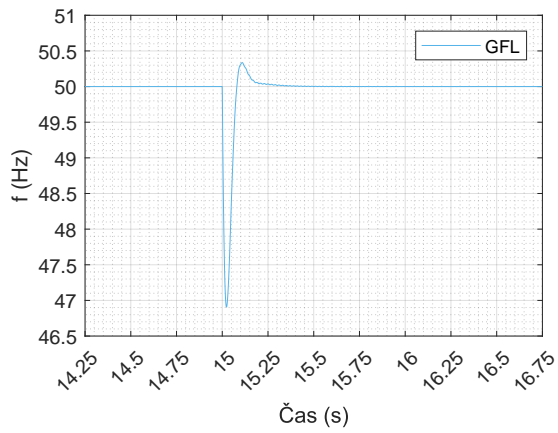


Obr. 4.43: Posun fáze GFL

Frekvenční odezva z pohledu GFM měniče je naopak více než přívětivá, nejenže GFM měnič je schopný aktivně omezit posun, ale také měřená odchylka frekvence v maximum dosahuje $\Delta f = 0.5$ Hz.



Obr. 4.44: Frekvenční odezva GFM měniče na posun fáze



Obr. 4.45: Činný výkon dodávaný GFM měniče na posun fáze

Na základě provedené zkoušky lze konstatovat, že model GFM měniče, oproti GFL, jeví výrazně vyšší odolnost na posun fáze včetně dodržení požadavků stanovených Kodexem PS.

Závěr

Rostoucí podíl IBR zdrojů v ES společně s jejich decentralizovaným charakterem představuje budoucí riziko z pohledu udržení systémové stability, z důvodu převládající absence poskytování systémových služeb. Za předpokladu neustálého zvyšování podílu OZE a postupného ústupu zdrojů založených na SG, je nutné implementovat řešení, které zajistí schopnost poskytování podpůrných služeb i zdrojům bez SG, jakými jsou např. FVE, VTE či BESS.

S těmito změnami v oblasti zdrojové základny rovněž vyvstává problém spojený s úbytkem přirozené setrvačnosti soustavy, která je odvislá právě od hmoty synchronních rotačních zdrojů. Jako variantní řešení se nabízí vyšší penetrace GFM měničů, které jsou schopny dodávat virtuální setrvačnost do soustavy a v případě rozpadu soustavy, nebo ostrovním provozu vyčleněné části sítě jsou schopny vytvořit a udržovat jmenovité parametry dané části sítě.

Nejrozšířenějším typem měniče je v dnešní době měnič založený na principu GFL, nicméně tyto měniče, i přes možné variace umožňující poskytování omezené podpory sítě, ostrovního provozu, či v určitých specifických případech spolupráce s jinými IBR, nedosahují požadavků stanovených Evropskou komisí. Dalším krokem tak mohou být měniče pracující v režimu GFM. Tyto měniče a jejich funkce ještě nebyly v plném rozsahu definovány, nicméně základními požadavky jsou provoz v síti s i bez synchronního stroje, spolupráce s jinými IBR, schopnost udržování výkonové rovnováhy a napěťové stability, odolnost v případech FRT, udržování kvality elektrické energie a přispívání k systémové stabilitě.

Pro ověření těchto požadavků, jejich účinnosti a smyslu implementace jednotlivých typů zařízení tak byly vytvořeny matematické a simulační modely v prostředí PSCAD. Pro tvorbu modelu GFL měniče pak byl zvolen základní princip řízení pomocí PLL single-loop droop control. Tento typ řízení funguje na principu synchronizace se sítí prostřednictvím PLL a následné dodávky dle předem stanoveného výstupního výkonu. Tento model byl vytvořen za účelem názorného srovnání s funkcionalitami robustnějšího a víceúčelového GFM řízení.

Pro tvorbu modelu GFM měniče byl, po důkladném zvážení, zvolen model multi-loop droop control, rovněž navrhovaný v rámci projektu MIGRATE. Tento model nedisponuje PLL ani FLL závěsem a synchronizaci se sítí provádí na základě výkonové synchronizace obdobně jako klasické SG, což umožňuje jednoduchý, nicméně robustní princip řízení s dobrou odezvou a stabilním chodem.

Pro ověření těchto vlastností a stanovení vhodnosti implementace vybraných typů měničů tak byla vytvořena simulační síť, na které byly provedeny zkoušky dle předem definovaných scénářů sledující odezvu dvou odlišných způsobů řízení a jejich případné spolupráce.

Výsledky popsané v kapitole 4.4, jasně vypovídají o robustnosti a spolehlivosti modelu GFM. Tento model ve srovnání s modelem GFL předvedl správnou odezvu na přechodné jevy jako jsou síťové poruchy a odchylky vybraných parametrů, stejně tak byl schopný stabilního provozu v kooperaci s jinými, nejen IBR, zdroji, ale i samostatně. GFL měnič v základním modelu řízení nebyl schopný tyto požadavky naplnit, to však nutně neznamená, že technologie GFL nemá využití. GFL lze uplatnit v široké škále aplikací a to především s ohledem na způsob použití a náklady.

Technologie GFM měničů je stále ve vývoji, tudíž její implementace ve větším měřítku tedy není stále možná, rovněž náklady na GFM měnič výrazně převyšují ty na GFL, je tomu dáno právě neustálým vývojem a potřebou zakoupení licencí, uvolňující potřebné funkce měniče. Obě technologie tak mají své specifické pole uplatnění, v závislosti na požadavcích zákazníka, případně PPS/PDS.

GFM měniče zatím nacházejí uplatnění právě ve větších instalacích FVE, VTE či BESS, kde jejich schopnost poskytování systémových služeb představuje výrazný přínos pro celou PS. GFL měniče mohou stále najít široké uplatnění u malých a středních instalacích, přednostně pak u mikrozdrojů a to především díky jejich nízké pořizovací ceně, nenáročné instalaci a údržbě. Jejich jednoduchý princip tak zaručuje robustnost a spolehlivost, za předpokladu přítomnosti dostatečného množství zdrojů udržujících chod a stabilitu soustavy.

Mezi hlavní přínosy práce lze zahrnout zasvěcení do problematiky, návrh a ověření vhodných modelů pro další vývoj v oblasti GFM měničů a náhled na správné fungování a spolupráci těchto zařízení. Stejně tak vydefinování podstaty a vhodnosti začlenění jednotlivých typů.

V případě dalšího zkoumání této problematiky doporučují vytvoření a srovnání odlišných přístupů řízení zmiňovaných v 4.1. Velkým přínosem by bylo rovněž srovnání zmiňovaných modelů s funkcemi reálného měniče využívající těchto technologií. Díky tomuto srovnání by bylo následně možné verifikovat jak simulační modely tak reálné měniče. Dalším krokem je pak jednotná definice funkcí a požadavků pro provoz GFM měničů v soustavě.

Literatura

- [1] ČEPS, a.s. *Desetiletý plán rozvoje přenosové soustavy České republiky 2023 – 2032* [online]. Praha: 2022 Dostupné z URL:
<<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwies8fXot0CAxUggf0HHT02AC8QFnoECC0QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ero.cz%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fobsah%2Fprilohy%2Fnavrh-dprps-2023-2032.pdf&usg=AOvVaw0i1wS0pVWxB5qrXz4LsM8N&opi=89978449>>.
- [2] EUROSTAT *Share of energy from renewable sources* [online]. Lucembursko: 2009 poslední aktualizace 19. 7. 2023 [cit. 19. 11. 2023]. Dostupné z URL:
<https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/nrg_ind_ren/>.
- [3] ERÚ *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy České Republiky 2022* [online]. Energetický regulační úřad 2024 poslední aktualizace 30. 6. 2023 [cit. 03. 01. 2024]. Dostupné z URL:
<<https://eru.gov.cz/rocn-zprava-o-provozu-elektrizacni-soustavy-cr-pro-rok-2022>>.
- [4] OTE, a.s. *Zbytkový energetický mix* [online]. OTE 2018 [cit. 03. 01. 2024]. Dostupné z URL:
<<https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/zbytkovy-energeticky-mix>>.
- [5] PETRUŽELA, Ivan. *Regulace frekvence a napětí v ES* [online]. 2016 [cit. 19. 11. 2023]. Dostupné z URL:
<https://www.powerwiki.cz/attach/PPE/PPE_pr06_fUreg.pdf>.
- [6] ČEPS, a.s. *Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ)* [online]. ČEPS únor 2022 [cit. 03. 01. 2024]. Dostupné z URL:
<https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/elektroenergetika/2022/2/Hodnoceni-zdrojove-primerenosti-elektrizacni-soustavy-CR-_2021__v2.pdf>.
- [7] OTE, a.s. *Zpráva o očekávané dlouhodobé rovnováze mezi nabídkou a poptávkou elektřiny a plynu* [online]. OTE 2017 [cit. 05. 01. 2024]. Dostupné z URL:
<https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/2017/8/Zprava-o-ocekavane-dlouhodobé-rovnovaze-mezi-nabidkou-elektřiny-a-plynu-_2016_.pdf>.
- [8] SÝKORA, Jan. *Pilotní projekt řízení flexibility na úrovni NN*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,

- Ústav elektroenergetiky, 2022, 83 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Lukáš Radil, Ph.D. Dostupné z URL:
<<https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/142369>>.
- [9] MASTNÝ Petr, DRÁPELA Jiří, MIŠÁK Stanislav, MACHÁČEK Jan, PTÁČEK Michal, RADIL Lukáš, BARTOŠÍK Tomáš, Pavelka Tomáš. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN978- 80-01-04937-2.
- [10] Y. Lin, G. -S. Seo, S. Vijayshankar, B. Johnson and S. Dhople, "Impact of Increased Inverter-based Resources on Power System Small-signal Stability" 2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Washington, DC, USA, 2021, pp. 01-05, doi: 10.1109/PESGM46819.2021.9638094. Dostupné z URL:
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/9638094>>.
- [11] EirGrid SONI, *DS3: System Services Review TSO Recommendations* [online]. Dublin 2013. Dostupné z URL:
<<https://www.eirgridgroup.com/site-files/library/EirGrid/System-Services-TSO-Recommendations-May2013.pdf>>.
- [12] MATEVOSYAN, Julia, DU, Pengwei, "Wind integration in ERCOT" [online]. Austin 2017 Dostupné z URL:
<<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj6r6o3-SDAxVXKxAlHbIaCeEQFn0ECA0QAQ&url=http%3A%2F%2Fndl.ethernet.edu.et%2Fbitstream%2F123456789%2F19015%2F1%2F71.pdf&usq=A0vVaw2Q0Jj1c1Bc-fUAXGy4V71f&opi=89978449>>.
- [13] Australian Energy Market Operator, *Black System South Australia* [online]. Melbourne 2017. Dostupné z URL:
<https://www.aemo.com.au/-/media/files/electricity/nem/market_notices_and_events/power_system_incident_reports/2017/integrated-final-report-sa-black-system-28-september-2016.pdf>.
- [14] BLAABJERG, Frede. *Control of Power Electronic Converters and Systems*. [online]. 2021. Academic Press, 2021. ISBN 9780128194331. [cit. 2024-01-09]. Dostupné z URL:
<<https://shop.elsevier.com/books/control-of-power-electronic-converters-and-systems/blaabjerg/978-0-12-819432-4>>.
- [15] R. H. Lasseter, Z. Chen and D. Pattabiraman, "Grid-Forming Inverters: A Critical Asset for the Power Grid," in *IEEE Journal of Emerging and Selected*

- Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 2, pp. 925-935, June 2020, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2959271. Dostupné z URL: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8932418>>.
- [16] BIALASIEWICZ, J. T., *Renewable Energy Systems With Photovoltaic Power Generators: Operation and Modeling*, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics* vol. 55, no. 7, pp. 2752-2758, July 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.920583. [cit. 2024-01-09]. Dostupné z URL: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4470592>>.
- [17] Zeineldin, H.H. & El-Saadany, Ehab & Salama, M.M.A.. *Distributed Generation Micro-Grid Operation: Control and Protection*. [online]. (2006). 105 - 111. 10.1109/PSAMP.2006.285379. [cit. 2024-01-09]. Dostupné z URL: <https://www.researchgate.net/publication/224760416_Distributed_Generation_Micro-Grid_Operation_Control_and_Protection>.
- [18] VÁGNER Petr, *PLL syntezátor v pásmu X*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2005, 71 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing.Petr Kutín Dostupné z URL: <<https://www.radio.feec.vutbr.cz/esl/files/Projects/StudentProjects/Vagner/diplomka.pdf>>.
- [19] P. Rodriguez, A. Lunar, R. Teodorescu, F. Iov and F. Blaabjerg, "Fault ride-through capability implementation in wind turbine converters using a decoupled double synchronous reference frame PLL," 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2007, pp. 1-10, doi: 10.1109/EPE.2007.4417783. Dostupné z URL: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4417783>>.
- [20] Se-Kyo Chung, "A phase tracking system for three phase utility interface inverters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, no. 3, pp. 431-438, May 2000, doi: 10.1109/63.844502. Dostupné z URL: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=844502>>.
- [21] J. M. Guerrero, J. Matas, L. G. de Vicuna, N. Berbel and J. Sosa, "Wireless-control strategy for parallel operation of distributed generation inverters," *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2005. ISIE 2005.*, Dubrovnik, Croatia, 2005, pp. 845-850 vol. 2,

- doi: 10.1109/ISIE.2005.1529025. Dostupné z URL:
<<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1529025>>.
- [22] A. Engler, *Applicability of droops in low voltage grids* Int. J. Distrib. Energy Resour. Smart Grids 1 (1) (2005) 1e5. Dostupné z URL:
<<http://microgrids.eu/micro2000/presentations/18.pdf>>.
- [23] R. Rosso, X. Wang, M. Liserre, X. Lu, and S. Engelken, "Grid-forming converters: Control approaches, grid-synchronization, and future trends—A review" IEEE Open J. Ind. Appl., vol. 2, pp.93–109, 2021, doi: 10.1109/OJIA.2021.3074028. Dostupné z URL:
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/9408354>>.
- [24] OSMOSE—Final Report. 2020 [Online]. Dostupné z URL:
<<https://www.osmose-h2020.eu/wp-content/uploads/2022/03/OSMOSE-Final-Brochure-Full-version.pdf>>
- [25] X. Wang, M. G. Taul, H. Wu, Y. Liao, F. Blaabjerg, and L. Harnefors, "Grid-synchronization stability of converter-based resources—An overview", IEEE Open J. Ind. Appl., vol. 1, pp. 115–134, 2020, doi: 10.1109/OJIA.2020.3020392. Dostupné z URL:
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/9181463>>
- [26] H. Laaksonen, "Universal Grid-Forming Method for Future Power Systems," in IEEE Access, vol. 10, pp. 133109-133125, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3231479. Dostupné z URL:
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/9996352>>
- [27] W. Sang, W. Guo, S. Dai, C. Tian, S. Yu, and Y. Teng, "Virtual synchronous generator, a comprehensive overview", Energies, vol. 15, no. 17, p. 6148, Aug. 2022, doi: 10.3390/en15176148. Dostupné z URL:
<<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/17/6148>>
- [28] T. Qoria, Q. Cossart, C. Li, X. Guillaud, F. Gruson, and X. Kestelyn, "Deliverable 3.2: Local Control and Simulation Tools for Large Transmission Systems", MIGRATE. Dostupné z URL:
<https://www.researchgate.net/publication/337530884_D32_-_Local_control_and_simulation_tools_for_large_transmission_systems>
- [29] W. Du, Z. Chen, K. P. Schneider, R. H. Lasseter, S. Pushpak, F. K. Tuffner, and S. Kundu, "A comparative study of two widely used grid-forming droop

controls on microgrid small signal stability” pp. 1–1. Dostupné z URL:
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/8844715>>

- [30] Kenyon, Rick Wallace, Amirhossein Sajadi, Andy Hoke, and Bri-Mathias Hodge. 2021. *"Open-Source PSCAD Grid-Following and Grid-Forming Inverters and a Benchmark for Zero-Inertia Power System Simulations: Preprint"* Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/CP-5D00-78402. Dostupné z URL:
<<https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78402.pdf>>

Seznam symbolů a zkratek

Zkratka	Vysvětlivky
ES ČR	Elektrizační soustavu České republiky
PS	Přenosová soustava
DS	Distribuční soustava
DECE	Decentrální výroba
OZE	Obnovitelné zdroje energie
FVE	Fotovoltaická elektrárna
VTE	Větrná elektrárna
PPS	Provozovatel přenosové soustavy
PDS	Provozovatel distribuční soustavy
ODDR	Očekávaná dlouhodobá rovnováha
IBR	Inverter-based resource
GFM	Grid-forming inverter
GFL	Grid-following inverter
PLL	Phase-locked loop
DP	Droop control
SPC	Synchronous power controller
VSM	Virtual synchronous machine
DFIG	double-fed induction generator

A Rozšířený set průběhů pro jednotlivé testy

Příloha A obsahuje původní rozšířený set průběhů v grafické podobě pro jednotlivé zkoušky a měniče, které mohou napomoci k porozumění odezvy IBR zdrojů.

B Modely využité při provedených zkouškách

Příloha B obsahuje soubory s modely v prostředí PSCAD, jež byly využity v průběhu zkoušek jednotlivých požadavků na IBR zdroje.

C Výstupní data z průběhů zkoušek

Příloha C obsahuje excelovské soubory s výstupními dat z provedených zkoušek a MATLAB script využitý pro jejich převedení do grafické podoby.