

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Realizace modelu kontroléru pro automatický záložní motorgenerátor

Controller Model for Automated Backup Genset

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika
Vedoucí práce: Ing. Tomáš Vydra

Martin Maschita
Praha 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Maschita** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **456372**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Realizace modelu kontroléru pro automatický záložní motorgenerátor

Název bakalářské práce anglicky:

Controller Model for Automated Backup Genset

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši využití motorgenerátorů jako záložních zdrojů elektrické energie
- 2) Popište konstrukci motorgenerátoru a vzájemnou interakci prvků elektromechanické soustavy s důrazem na elektrickou část realizovanou synchronním generátorem
- 3) Zpracujte přehled stavového řízení a regulačních prvků řídicí soustavy motorgenerátoru ve vybraných režimech
- 4) Modelujte chování stavového řízení a obecné regulační soustavy motorgenerátoru v prostředí REXYGEN Studio

Seznam doporučené literatury:

- [1] Elektrické stroje MĚŘIČKA, J., HAMATA, V., VOŽENÍLEK, P. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02109-2
[2] Meranie a modelovanie elektrických strojov HRABOVCOVÁ, V., RAFAJDUS, P., FRANKO, M a HUDÁK, P. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2009. ISBN 978-80-8070-924-2

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. Tomáš Vydra, ComAp a.s.


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


Datum zadání bakalářské práce: **01.10.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **07.01.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

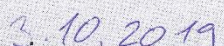

Ing. Tomáš Vydra
podpis vedoucí(ho) práce



podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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


Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne 7.1. 2020

Martin Maschita

Poděkování

Děkuji panu Ing. Tomáši Vydrovi a společnosti ComAp, a.s., za odborné rady a podněty, které pomohly zvýšit úroveň této práce. Velký dík taktéž patří Ing. Jakubu Suchému, jehož připomínky k prototypům mě udržely na správné cestě k definitivnímu dokončení kontroléru. Dále chci poděkovat mé rodině za ustavičnou podporu během celé délky studia i během psaní bakalářské práce.

Abstrakt:

Bakalářská práce pojednává o použití a provedení motorgenerátorů jako záložních zdrojů elektrické energie. Druhá část práce popisuje koncept řízení záložního motorgenerátoru pomocí virtuálního kontroléru, jehož praktická realizace v podobě konečného stavového automatu je dále představena s pomocí systému REXYGEN.

Klíčová slova:

kontrolér, vznětový motor, synchronní generátor, motorgenerátor, regulace

Abstract:

This bachelor thesis discusses use and design of gensets working as backup power sources. The second part of this text describes concept of the control for the backup genset by virtual controller modeled as finite state automaton in REXYGEN system.

Keywords:

controller, diesel engine, synchronous generator, genset, regulation

Obsah

1	Úvod	1
2	Použití motorgenerátorů	2
3	Princip činnosti motorgenerátoru	4
3.1	Motorová část	4
3.2	Elektrická část	5
3.2.1	Synchronní generátor s vyniklými póly	5
3.2.2	Budicí systém PMG	7
3.3	Řídicí systém	8
4	Model motorgenerátoru	9
4.1	Elektromechanická soustava	9
4.2	Nastavení zátěže	11
5	Struktura řídicího systému	12
6	Řízení motoru pomocí FSA	13
6.1	Návrh FSA motoru	13
6.2	Popis provozních stavů	14
6.2.1	Not ready	15
6.2.2	Ready	15
6.2.3	Cranking	15
6.2.4	Idle	17
6.2.5	Running	17
6.2.6	Cooling	18
6.2.7	Stopping	18
6.3	Chybové stavy	20
6.3.1	Chybové úrovně	20
6.3.2	Kvitování chyby	21
7	Řízení generátoru pomocí FSA	22
7.1	Návrh FSA generátoru	22
7.2	Popis provozních stavů	24
7.2.1	Stopped	24
7.2.2	Engine starting	24
7.2.3	Ready to load	24
7.2.4	GCB closing island (nebo parallel)	26
7.2.5	Island	26
7.2.6	Reverse synchronization (a Synchronization)	27
7.2.7	Parallel	29
7.2.8	Soft load	30

7.2.9	Soft unload	32
7.2.10	GCB opening	34
7.2.11	Engine stopping	35
7.3	Chybové stavy a ochrany	35
7.3.1	GenFreq BOC	36
7.3.2	GenV BOC (a Sd).....	36
7.3.3	IDMT protection BOC	37
7.4	Logika řízení stykačů	38
7.5	Beznárazové přepínání regulátorů	40
7.6	Seřízení regulátorů.....	42
8	Testování funkce kontroléru	45
8.1	Ostrovní provoz	46
8.2	Ostrovní provoz s návratem do paralelního chodu	48
8.3	Paralelní provoz s přechodem do ostrovního režimu a zpět.....	52
8.4	Regulace dodávky jalového výkonu (paralelní provoz)	55
8.5	Vybrané atypické situace v provozu motorgenerátoru	57
8.5.1	Výpadek sítě během fázování.....	57
8.5.2	Cyklické zatěžování (odlehčování) generátoru	58
8.6	Reakce na chybu úrovně Sd	60
8.7	Reakce na chybu úrovně BOC	62
9	Závěr.....	65
	Použité zdroje	66
	Přílohy	68

1 Úvod

Motorgenerátory (neboli gen-sety) představují skupinu zdrojů elektrické energie s širokým spektrem aplikací. Nezastupitelné místo zauímají jako záložní zdroje (v součinnosti s bateriovými systémy), dále se s nimi setkáváme v ostrovních provozech, a to jako se samostatně pracujícími generátory v místech s dočasnou spotřebou elektrické energie, případně i s celými skupinami desítek paralelně pracujících gen-setů, představujících mnohdy jediný elektrifikační prvek dané lokality. V neposlední řadě potom dieselové generátory poslouží při pokrývání odběru v rámci tarifu čtvrt hodinového maxima (tzv. peak shaving). Krátkodobým provozem těchto generátorů tak lze předcházet penalizaci při překročení smluvně nastavených limitů odebíraného výkonu ve sledovaném období.

Cílem práce je navrhnout řídicí systém motorgenerátoru, jenž umožní řízení dodávaného výkonu do zátěže při výpadku primárního zdroje elektrické energie, ze které zátěž prioritně výkon odebírá.

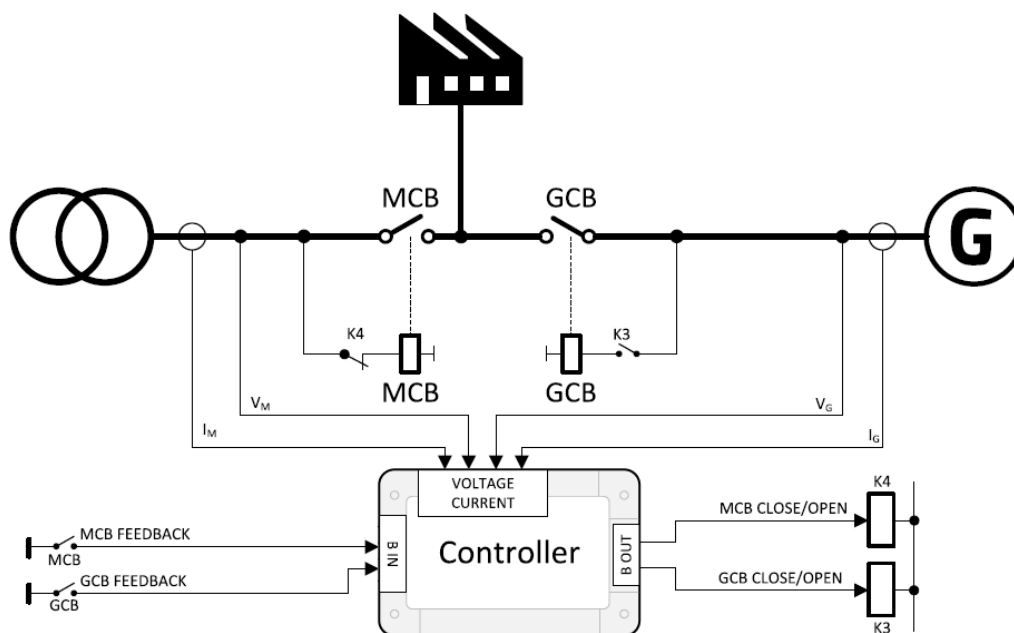
2 Použití motorgenerátorů

Použití motorgenerátoru, tedy zdrojových soustrojí střídavého proudu poháněných spalovacími motory, jež mají sloužit jako záložní zdroje, vychází z obecných požadavků na elektrický rozvod a zásad zajištění dodávky elektrické energie v průmyslových provozovnách. Zmíněné požadavky charakterizuje norma ČSN 34 1610, jež zároveň vymezuje pojem stupně důležitosti. Dle stupně důležitosti dělíme dodávky elektrické energie do tří kategorií.

Dodávky 1. stupně jsou takové, „*kteřé musí být zajištěny za každých okolností, jelikož jejich přerušeni může způsobit buď ohrožení lidských životů (...), nebo velké národohospodářské ztráty (...)*“ [1], přičemž dodávku elektrické energie na tomto stupni musíme zajistit dvěma nezávislými zdroji. V případě relativně malých výkonů můžeme jako záložní zdroj použít právě soustrojí se spalovacím motorem. Přejchod na záložní zdroj lze dle podmínek provozu realizovat automaticky nebo manuálně za současné signalizace vzniklé závady v případě poruchy kteréhokoliv ze zdrojů.

Za 2. stupeň důležitosti považujeme dodávky, „*kteřé mají být pokud možno zajištěny, jelikož jejich přerušeni (...) může způsobit jen podstatné zmenšení nebo zastavení výroby (aniž při tom nastane ohrožení osob)*“ [1]. Dostatečné zajištění však v tomto případě představuje připojení na dva transformátory (popřípadě dvě skupiny transformátorů) a mizí tak požadavek na nezávislý zdroj energie.

Odběr na 3. stupni důležitosti stačí uskutečnit připojením na jediný zdroj, přičemž není třeba dalších opatření. Z uvedených možných provozů nám tak vychází, že hlavní roli motorgenerátory sehrávají v zálohách dodávek 1. stupně důležitosti, které většinou navíc představují prvky kritické infrastruktury s doplňujícími požadavky vymezené v rámci zákona č. 240/2000 Sb., jejichž neprovoznost znamená ohrožení bezpečnosti státu a základních životních potřeb obyvatelstva [1].



Obrázek 1 Typické připojení záložního zdroje k síti s jeho řídicím systémem [převzato z 2]

Specifické provozy motorgenerátorů potom udává norma ČSN ISO 8528 – 1. V případě použití motorgenerátoru jako záložního zdroje se dle uvedené normy jedná o aplikační kritérium označované jako časově omezený provoz při proměnném zatížení (podpůrná funkce zálohovaného objektu při poruše napájení z veřejné sítě). S ohledem na neznámou dobu trvání poruchy sítě (potenciálně permanentní), můžeme aplikační kritérium gen-setu považovat i za nepřetržitý provoz při proměnné zátěži. Dále tato norma mimo jiné přesně specifikuje obecné požadavky na výrobce motorgenerátorů, především jaké informace k dodávanému zařízení musí poskytnout např. v kontextu místa instalace produktu a požadavků zákazníka. V neposlední řadě norma definuje některé základní pojmy jako jmenovitý výkon zdrojového soustrojí (musí být vyjádřen v kW pro jmenovitý kmitočet a induktivní účinník $\cos\varphi = 0,8$ není-li stanoveno jinak), jakožto nutnou informaci pro začlenění motorgenerátoru do soustavy a kategorie jmenovitých výkonů. Typicky se jedná o nepřetržitý dodávaný výkon při konstantním a proměnném zatížení, popřípadě maximální dosažitelný výkon během proměnného sledu elektrického výkonu (tedy při výpadku sítě) [3].

Regulaci otáček motoru zohledňuje norma ČSN ISO 8528 – 2, jež stanovuje jaké typy regulátorů (P, PI a PID) lze použít pro různé třídy výkonových charakteristik (G1 – G4), jež popisují požadavky odlišných typů zatížení (platí, že pro všechny druhy zatížení lze použít PI či PID regulátory) [4].

Charakteristiky generátorů střídavého proudu s regulovaným napětím a parametry těchto generátorů vymezuje norma ČSN ISO 8528 – 3. Pro návrh řídicího systému z hlediska regulace napětí generátoru je nejzajímavější částí textu určení požadavků na paralelní chod generátoru se zdrojem napětí (tedy sítí nebo soustavou dalších zdrojových soustrojí). Hlavní kritérium představuje stabilita chodu, jíž dosáhneme tak, „že na automatický regulátor napětí se působí snímacím obvodem s přídavnou složkou jalového proudu. Tím se zapříčiní výskyt charakteristiky úbytku napětí u jalových zatížení“ [5]. Pro zmíněné výkonnostní třídy potom norma dále stanovuje odchylky přechodových napětí při změnách zatížení [5].

Řídicí části systému a spínacím přístrojům je potom věnovaná norma ČSN ISO 8528 – 4, jež představuje požadavky na funkci těchto zařízení. Pro správnou funkci systémů automatických záložních motorgenerátorů specifikuje norma technické prostředky, s jejichž pomocí lze řídit zálohování sítě (tyto prostředky tak musíme v rámci návrhu kontroléru implementovat). Konkrétně se jedná o detekci výpadku sítě, sekvenční řízení startování/vypínání motoru a volbu zatížení. Nedílnou součástí takového systému navíc musí být monitorovací zařízení (měřicí přístroje ampérmetr, voltmetr, wattmetr) a ochrany realizované jak autonomně (nadproudová relé, pojistky), tak i v rámci kontroléru [6].

3 Princip činnosti motorgenerátoru

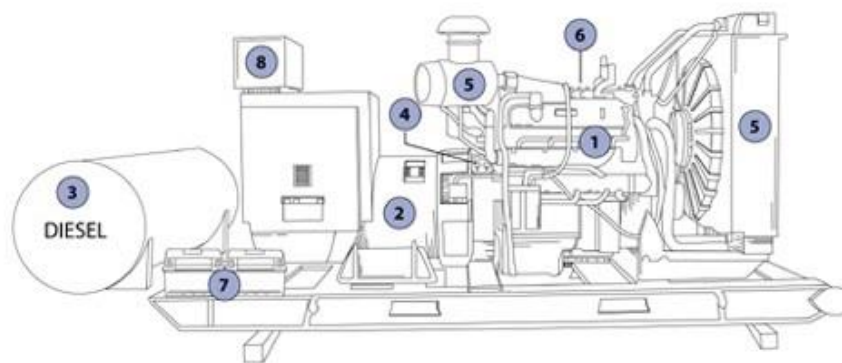
Z hlediska řízení vnímáme typický motorgenerátor v tom nejobecnějším smyslu jako soustavu skládající se ze tří hlavních částí – tepelného motoru s vnitřním spalováním, elektromechanického měniče a řídicího systému. Zmíněné členy jsou vzájemně provázány ať už mechanicky (společná hřídel motor – generátor), či elektricky (např. komunikace řídicí systém – motor), přičemž projevy těchto vazeb musí řídicí systém správně interpretovat.

3.1 Motorová část

Tepelný motor, jakožto zdroj mechanické energie, jež je následně měněna na energii elektrickou, lze považovat z hlediska konstrukce a prostorového uspořádání soustavy za největší komponentu motorgenerátoru. V případě tradičně rozšířených gen-setů můžeme motory v první fázi rozřadit dle typu používaného paliva. Motory malých výkonů bývají zážehové, avšak v aplikacích s krátkodobým provozem se typicky setkáváme spíše s motory středních výkonů (v řádech stovek kW), které jsou standardně navrženy jako vznětové. Mezi další hojně využívaná paliva řadíme propan a zemní plyn, přičemž tato paliva lze kombinovat s upraveným dieselovým motorem disponujícím možností duálního přívodu pohonných hmot v tzv. bi-fuel režimu [7].

Motorová část nezahrnuje pouze samotný spalovací motor, ale i nepostradatelné podpůrné systémy zajišťující chod motoru. Data z těchto systémů potom také slouží jako vstupní veličiny kontroléru, který rozhoduje o provozu motoru. Prvním z těchto prvků je palivový systém, jenž zajišťuje skladování a přívod pohonných hmot do motoru. Hlavní požadavky na palivový systém spočívají v dostatečné kapacitě palivové nádrže odpovídající provozu s ohledem na danou aplikaci (v průměru zásoba na 8 hodin), spolehlivost palivové pumpy pro nízkotlakou část palivového okruhu, zajištění správné funkce odlučovače vody z paliva a chod vysokotlakých vstřikovačů do spalovacích komor [8].

Další nedílnou součástí motoru představuje chladicí systém. Chod motoru je provázen ohřevem jeho komponent, přičemž chladit musíme většinou i statorové vinutí generátoru zodpovídající za vyvedení výkonu do soustavy se zátěží. Základní chladicí systémy realizujeme jako vodní, kdy k ochlazení média dochází v radiátoru jakožto integrální součástí sestavy motorgenerátoru. K zvýšení účinnosti chlazení statorového vinutí u velkých jednotek (výkony v řádech jednotek MW) lze využít místo vody vodík, jenž má asi 3,5x větší měrnou tepelnou kapacitu, avšak i ten nakonec musí předávat tepelnou energii vodě ve zvláštním výměníku [9].



Obrázek 2 Uspořádání funkčních celků motorogenerátoru [převzato z 7]

- | | |
|----------------------|--------------------------------|
| (1) Motor | (5) Chladicí a výfukový systém |
| (2) Generátor | (6) Mazací systém |
| (3) Zásobník paliva | (7) Dobíjení baterií |
| (4) Regulátor napětí | (8) Ovládací panel |

Pro zajištění spolehlivého dlouhotrvajícího provozu pohyblivých mechanických částí motorogenerátoru je i gen-set (ostatně jako každý jiný motor) vybaven olejovým mazacím systémem s vlastní pumpou. Motory pochopitelně obsahují větší množství částí, než bylo zmíněno, avšak s uvedenými komponentami motoru pracujeme i na úrovni kontroléru, neboť každá svým způsobem předává důležitou informaci o stavu stroje a možnostech jeho provozu.

3.2 Elektrická část

Za dodání elektrického výkonu zátěži zodpovídá elektromechanický měnič, jenž má v systémech záložních motorogenerátoru již prakticky výlučně podobu synchronního stroje s vyniklými póly. Drtivá většina třífázových synchronních generátorů pracujících na středních výkonech (případ záložních zdrojů) obsahuje čtyřpólové rotory. Nutnou podmínkou činnosti synchronního generátoru je nabuzení rotorového vinutí stejnosměrným proudem, přičemž řízený budič musí již z povahy záložního zdroje pracovat nezávisle na síti.

3.2.1 Synchronní generátor s vyniklými póly

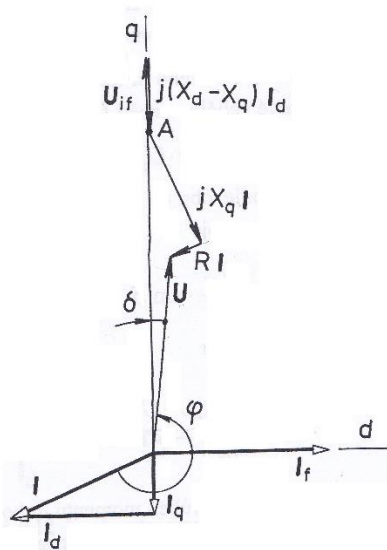
Synchronní generátor disponuje třemi myšlenými cívkami statorového vinutí, jež jsou prostorově pootočený o 120° [10]. Otáčením nabuzeného rotoru dochází k indukci střídavého napětí na těchto cívkách, přičemž díky uspořádání cívek jsou i průběhy střídavých napětí posunuty vůči sobě o fázový rozdíl 120° . Frekvence indukovaného napětí potom závisí na otáčkách rotoru a počtu pólů. Z uvedených informací tak již při známém požadavku na frekvenci napětí v evropské síti (50 Hz) a použití standardního motorogenerátoru ($p = 4$) můžeme dopočítat otáčky hřídele motoru (resp. rotoru generátoru) dle vztahu:

$$n = \frac{60 \cdot f}{\frac{p}{2}}$$

Kde n jsou otáčky rotoru v RPM a f požadovaná frekvence indukovaného napětí. Po připojení motoru k zátěži se „magnetické pole vytvořené statorovými proudy otáčí stejnou rychlostí jako rotor (synchronně s rotorem) a má vůči točivému poli rotoru stálou polohu“ [10].

Synchronní generátor s vyniklými póly nese druhou část svého názvu dle uložení rotorového vinutí, jež se nachází na jádrech pólů uspořádaných po obvodu rotoru, díky čemuž má tento stroj proměnnou velikost vzduchové mezery. „V podélné ose je vzduchová mezera minimální magnetická vodivost cesty hlavního magnetického toku je velká (...) na rozdíl od magnetické cesty v příčné ose. Platí tedy $X_d > X_q$ “ [10]. Po připojení synchronního generátoru do soustavy a odeznění přechodného děje lze sestavit napěťovou rovnici ve tvaru pro sestavení fázorového diagramu:

$$\hat{U} - R \cdot \hat{I} - jX_q \cdot \hat{I} = j(X_d - X_q) \cdot \hat{I}_d + \hat{U}_{if}$$



Obrázek 3 Fázorový diagram přebuzeného synchronního generátoru s vyniklými póly [převzato z 10]

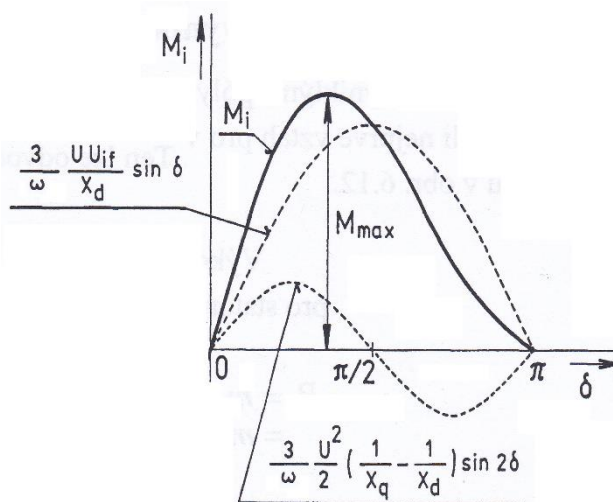
Kde \hat{U} je fázor statorového napětí, \hat{I} fázor statorového proudu, \hat{I}_d složka fázoru proudu statorem v podélné ose, \hat{I}_q složka fázoru proudu statorem v příčné ose, R odpor statorového vinutí, X_d podélná reaktance, X_q příčná reaktance, \hat{I}_f fázor budicího proudu, \hat{U}_{if} fázor indukovaného napětí stroje naprázdno, δ zátěžný úhel a φ představuje fázový posun mezi statorovým napětím a proudem.

Ze zjednodušeného fázorového diagramu synchronního stroje s vyniklými póly lze potom odvodit vztah pro činný výkon 3f stroje v závislosti na zátěžném úhlu a svázáním výkonu s momentem přes otáčky tento moment vyjádříme.

$$M = \frac{3}{\omega} \cdot \frac{U \cdot U_{if}}{X_d} \cdot \sin\delta + \frac{3}{\omega} \cdot \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\delta$$

Veličina ω v tomto případě značí mechanické otáčky rotoru (s^{-1}). Druhý člen uvedeného vztahu představuje složku momentu nezávislou na buzení a známe jej jako moment reluktanční. Grafický průběh závislosti momentu na zátěžném úhlu vytyčuje maximální dosažitelný moment (výkon)

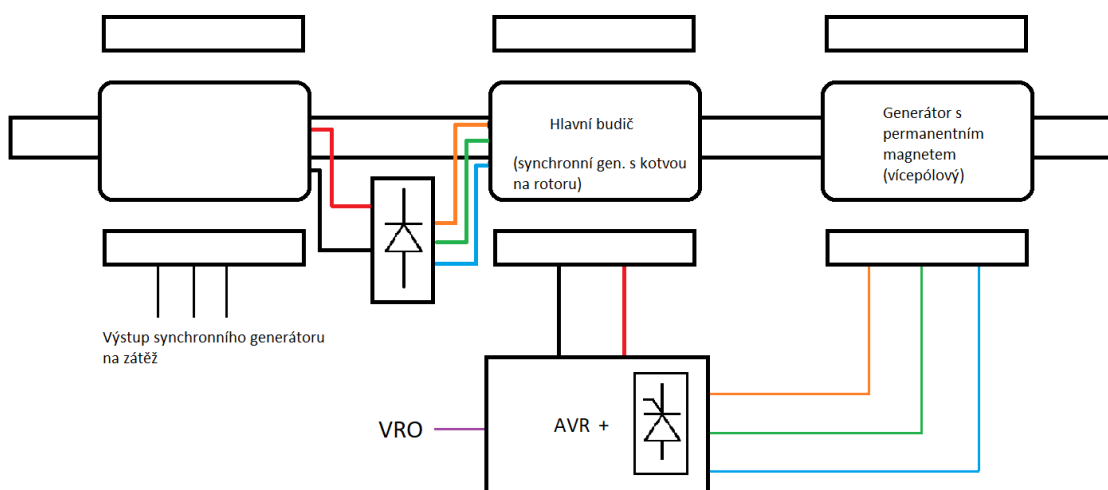
generátoru. Při práci na síti (za konstantního buzení) navíc změnou hnacího momentu dochází ke krátkodobému urychlení rotoru, což ovlivňuje i zátěžný úhel δ a navýšení výkonu nelze kvůli existenci meze statické stability dosáhnout (jinak hrozí výpadek ze synchronismu) [10].



Graf 1 Moment synchronního generátoru s vyniklými póly [převzato z 10]

3.2.2 Budicí systém PMG

Systémy zajišťující napájení rotorového vinutí stejnosměrným proudem označujeme jako budicí soustavy. Řešení budicích soustav existuje celá řada a v kontextu práce se zaměříme pouze na jednu. Ta totiž splňuje nejen požadavek na zmíněnou nezávislost na síti, ale umožňuje i regulaci z externího zdroje. Nutnou podmínkou správné funkce budicího systému je přítomnost AVR, jímž v současné době disponují prakticky všechny motorgenerátory (snad s výjimkou těch nejlevnějších s malým výkonem).



Obrázek 4 Řízená budicí soustava PMG

Základ systému spočívá v umístění dvou podružných rotorů synchronních generátorů uložených na společné hřídeli s generátorem dodávajícím výkon zátěži. Nabuzení zajišťuje až šestnáctipólový třífázový stroj s permanentními magnety, indukující napětí na statorové vinutí, jež vyvádíme do AVR. Jednotka AVR na základě požadavku parametru **VRO** ovládá spínání řízeného můstkového

tyristorového usměrňovače a tím přivádí napětí na statorové vinutí hlavního budiče, jehož 3f kotva je jako jediná v soustavě na rotoru. Abychom mohli nabudit synchronní generátor, jenž již má dodávat výkon zátěži, musíme samozřejmě výstup hlavního budiče usměrnit přes diodový můstek (rotující součást hřídele).

Uvedený způsob v současné době představuje asi nejběžnější realizaci buzení záložních generátorů, přičemž jeho hlavní výhoda spočívá v bezkartáčovém provedení budiče. Dále nedochází k nežádoucímu odbuzení při startu zařízení. Nevýhodou naopak je vyšší hmotnost hřídele způsobena umístěním dalších rotorů s vinutími [11].

AVR obecně nemusí regulovat budicí napětí pouze podle vstupu **VRO** (např. jej může ovládat řídicí jednotka stroje), bez použití kontroléru dodávaného třetí stranou minimálně sleduje výstupní napětí generátoru, u lepších provedení podporuje i měření odebíraného výkonu zátěží (a roli kontroléru tak fakticky nahrazuje).

3.3 Řídicí systém

Prvek, jenž zajišťuje součinnost elektrické a motorové části gen-setu vzhledem k vnějším podmínkám (např. stavu sítě), slouží jako uživatelské rozhraní motorgenerátoru (HMI) a vyhodnocuje jeho provoz, označujeme jako kontrolér. Mezi klíčové vlastnosti takového kontroléru patří automatické spuštění gen-setu v situacích odpovídajících požadavkům zvolené aplikace (např. výpadek dodávky el. energie, blížení se překročení limitu čtvrt hodinového maxima).

Kontrolér tak kromě provozních parametrů motorgenerátoru samotného, obdržených z vlastní řídicí jednotky (ECU) zařízení, pracuje i s informacemi získaných elektrickým měřením na síti a na výstupu synchronního generátoru. Dále systém přímo pracuje s ovládacími prvky motoru vázaných na jeho spuštění a vypnutí (řízení palivového ventilu, startér). V aplikacích, kdy nesmí dojít k výpadku dodávky elektrického proudu do zátěže, tak kontrolér navíc zajišťuje fázování generátoru na obnovenou síť a ovládá příslušné stykače [12].

V případě vyhodnocování elektrických parametrů sítě a výstupních veličin generátoru standardně měříme efektivní hodnotu fázového napětí a frekvenci, při nepřímém měření výkonu i proud na zvolené fázi (za předpokladu symetrického zatěžování v 3f aplikaci). Pro vyhodnocení stavu motoru se zajímáme o provozní kapaliny (množství paliva, oleje, chladicího média), tlak oleje, teplotu chladicího média a okamžité otáčky motoru. Právě realizaci kontroléru a jeho reakci na změny měřených veličin se věnují následující kapitoly.

4 Model motorgenerátoru

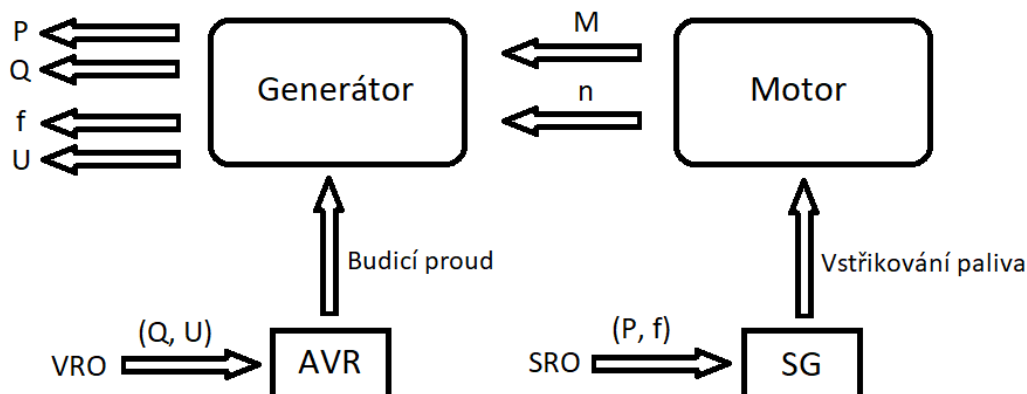
Nutným předpokladem pro ověření funkčnosti modelu kontroléru je vytvoření měřených vstupních veličin, jež charakterizují provoz motorgenerátoru v daných režimech. Proto tvořený kontrolér musí přímo komunikovat s matematickým modelem motorgenerátoru, který poskytuje věrné průběhy přechodných dějů po uskutečnění regulačních zásahů. Bez těchto odezev bychom sice byli schopni simulovat stavové řízení ve zjednodušené formě (binárními signály a úrovněmi některých veličin), avšak regulační soustavu bychom nikdy nerealizovali.

Předmětem práce není tvorba značně komplikovaného modelu motorgenerátoru, alespoň však musíme zmínit některé vlastnosti modelu použitého. Matematický model motorgenerátoru připojovaný k navrženému kontroléru vznikl na základě požadavků spol. ComAp, a.s., právě pro účely testování návrhu řídicích systémů a jeho konkrétní provedení spadá do duševního vlastnictví uvedené společnosti.

4.1 Elektromechanická soustava

Model synchronního generátoru s vyniklými póly vychází z doporučení IEEE [13], což odpovídá matematickému popisu využívajícího transformace třífázového systému statorového vinutí do dvoufázového, tedy Parkově transformaci d-q-0 [14]. Zmíněný standard specifikuje celou řadu požadavků na modely simulovaných aplikací a ilustruje použití právě d-q-0 transformace pro přepočítání proměnných magnetických toků fází (ψ_a, ψ_b, ψ_c), budicího toku (ψ_{fd}), napětí fází (u_a, u_b, u_c) a budicího napětí (u_{fd}) do referenčního rámce rotoru [13]. Mělo by tak být patrné, že použitý model synchronního generátoru je 8. řádu.

Matematický model motoru představuje výrazně jednodušší systém, neboť se fakticky jedná pouze o mechanickou charakteristiku čtyřválcového vznětového motoru bez přepínání s upraveným průběhem rozběhu a doběhu (např. pootočení hřídele proti původnímu směru rotace při zastavení vlivem zbývajícího tlaku nad válcem).



Obrázek 5 Zjednodušené schéma modelu

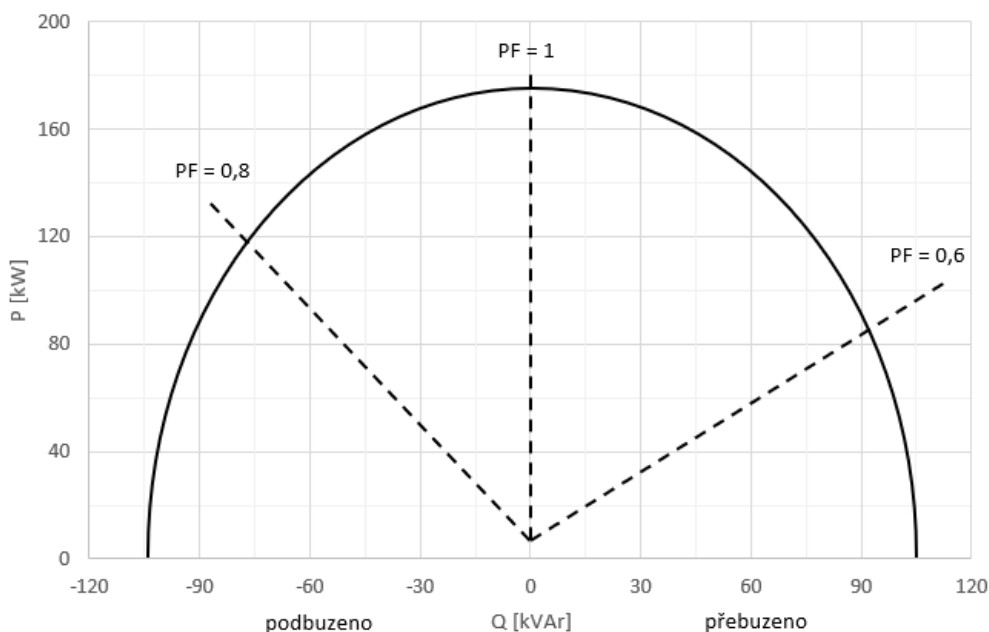
Motor tak synchronnímu generátoru předává na hřídeli hnací moment. Zátěžný moment generátoru potom odpovídá vztahu pro vnitřní elektromagnetický moment představeném v kapitole 3.2.1. Nejsou-li tyto momenty v rovnováze, pozorujeme vznik momentu dynamického:

$$M_d = M_{hnací} - M_{zátěžný} = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

Kde J je moment setrvačnosti soustavy rotoru synchronního generátoru, hřídele zajišťující vazbu motor – generátor a klikové hřídele s válci uvnitř motoru. Změnou hnacího momentu (případně změnou parametrů zátěže) tak dochází k urychlení/přibrzdění na novou úroveň otáček, na což musí reagovat regulátor SG (dle vstupu **SRO**), aby udržel synchronní rychlost (resp. požadovanou frekvenci). V neregulované soustavě tak s rostoucím odebíraným výkonem bude klesat frekvence sítě, obdobně s jalovým zatížením (dodávkou induktivní zátěži) klesá v systému napětí.

Výše popsaná činnost motorgenerátoru platila pouze v ostrovním provozu. V případě práce na tvrdé síti změnou hnacího momentu nedocílíme změny frekvence napětí. Při navýšení hnacího momentu předbíhá fázor napětí rotoru naprázdno \hat{U}_{if} fázor výstupního svorkového napětí \hat{U} o zátěžný úhel δ , přičemž roste dodávka činného výkonu až na mez statické stability ($\delta = 90^\circ$). Změnou budicího proudu na síti můžeme zvětšovat velikost napětí \hat{U}_{if} , avšak bez vlivu na posunutí fáze vůči \hat{U} , čímž dojde k přebuzení generátoru a ten do sítě dodává jalový výkon (jeví se jako kondenzátor). Naopak důsledkem snížení budicího proudu je zmenšení napětí \hat{U}_{if} a podbuzení generátoru, jenž jalový výkon ze sítě odebírá (čímž se projevuje jako tlumivka) [10].

Závislost činného a jalového výkonu na napěťových a proudových hodnotách synchronního generátoru označujeme jako provozní diagram. Graf 2 představuje ideální podobu takového provozního diagramu, kde právě proudová omezení nevystupují. Zejména vlivem statorového proudu, ať už přímým ohřevem při průchodu vinutím, nebo účinkem rozptylového magnetického pole v podbuzeném stavu, jež indukuje vířivé proudy v čelních prostorech generátoru, zmenšujeme plochu kruhu, v němž se pracovní bod generátoru může nacházet. V podbuzeném stavu dále musíme zkoumat mez statické stability [15].



Graf 2 Ideální provozní diagram synchronního generátoru

4.2 Nastavení zátěže

V rámci našeho modelu nenastavujeme parametry obecné proměnné zátěže jako kombinaci odporu, indukčnosti a kapacity, ale definujeme ji přímo velikostí odebíraného činného a jalového výkonu v provozním diagramu. Odebírané výkony na zátěži potom s měřenými efektivními hodnotami proudu a napětí souvisí podle známých vztahů:

$$P = \sqrt{3} U \cdot \sqrt{3} I \cdot \cos\varphi = 3 \cdot UI \cdot \cos\varphi$$

$$Q = \sqrt{3} U \cdot \sqrt{3} I \cdot \sin\varphi = 3 \cdot UI \cdot \sin\varphi$$

Z těchto informací parametry zátěže snadno dopočítáme, protože velikost impedance zátěže určíme jako poměr měřeného napětí a proudu, odpor jako poměr příkonu a druhé mocniny proudu. Díky impedanci známe i výslednou reaktanci zátěže ($X = Z \cdot \sin\varphi$), přičemž dle toku jalového výkonu víme i pod jakým charakterem zátěž vystupuje (reálné hodnoty kapacity a indukčnosti zátěže totiž již nezjistíme, sama se kompenzuje).

5 Struktura řídicího systému

Řídicí systém (kontrolér) motorgenerátoru je uspořádán do tří základních úrovní. První úroveň představuje blok kontroléru samotného, jenž připojujeme k modelu motorgenerátoru. Tato úroveň disponuje jediným vstupem a výstupem, přes které kontrolér komunikuje s modelem motorgenerátoru předáváním vektorů obsahujících řídicí veličiny a okamžité parametry motorgenerátoru.

V druhé úrovni řídicího systému dochází k rozdělení vektoru parametrů motorgenerátoru na jednotlivé veličiny vstupující do dvou základních funkčních celků kontroléru, tedy do řídicí části diesellového motoru a řídicí části generátoru. V této úrovni jsou taktéž zmíněné celky provázány a ze svých výstupů skládají vektor řídicích veličin pro model motorgenerátoru.








Třetí úroveň potom obsahuje konečné stavové automaty (FSA) obou řídicích celků (tedy motoru a generátoru) s funkcemi vázanými na tyto části, včetně ochran zařízení.

Konečnými stavovými automaty rozumíme matematické systémy operující s konečnými množinami vstupů, výstupů a stavů, kdy plněním podmínek přechodových funkcí C (tedy určitou kombinací vstupů) dochází ke změně stavů automatu, přičemž automat v dosaženém stavu zůstává, nedojde-li ke splnění další podmínky přechodové funkce, která stav S překlápí do nového stavu S+1 (automat má tedy paměť aktuálního stavu). Každý takový stav potom svým výstupem Q budí logickou funkci, jež definuje novou podobu množiny výstupů.

Chceme-li realizovat řízení motorgenerátoru výše zmíněnými stavovými automaty, musíme si zavést konkrétní veličiny (kompletní seznam v příloze) pro množiny vstupů, výstupů a stavů. Vstupy a výstupy máme fakticky pevně dané modelem motorgenerátoru, na základě námi definovaných stavů tak pouze ovlivňujeme funkce budící výstupy kontroléru.

Základní podoba tvořeného kontroléru vychází konceptuálně z produktů spol. ComAp a.s. [2] a model kontroléru by se měl reálnému návrhu co do principu funkce blížit takovým způsobem, abychom byli schopni demonstrovat věrné řízení motorgenerátoru stavovým automatem. Z toho důvodu došlo k implementaci některých funkcí a postupů specifických pro kontroléry spol. ComAp a.s. Pro přehlednost a zachování možnosti interního použití modelu kontroléru zmíněnou společností bylo dodrženo značení nastavitelných parametrů a předávaných veličin v projektu (tabulka níže).

Tabulka 1 Barevné značení bloků modelu

Barevné značení	Popis
	Vstup/Výstup (obecný)
	Uživatelský binární vstup
	Měřená veličina
	Vnitřní proměnná modelu
	Nastavitelný parametr
	Regulovaná veličina
	Varování o dosažení saturační meze regulátoru

6 Řízení motoru pomocí FSA

Výchozí struktura stavového automatu motoru na nejnižší úrovni počítá s rozlišením dvou možností, ve kterých se motor (resp. stavový automat) může nacházet. První vymezení tak odděluje provozní a poruchové stavy. Provozními stavy rozumíme všechny fáze standardního chodu motoru, při kterých na motoru nedetekujeme žádné poruchy (ať za běhu nebo před spuštěním). Poruchové stavy lze sjednotit pod jednu globální událost („*Error*“) za současného vyhodnocení chyby, která fakticky odpovídá splnění podmínky popisující příslušný problém a nastavení příznaku chyby. V případě, že motor běží a příznak chyby je aktivní, musí dojít k zastavení motoru. Aktivní příznak chyby dále blokuje opětovné spuštění motoru, chybu tak musíme kvitovat před obnovením provozu.

Rozlišení chybových a provozních stavů je navíc důležité z praktického hlediska návrhu. Množství chybových stavů reálně totiž několikanásobně převyšuje počet stavů provozních, přičemž jako chybový stav vnímáme i reakci konfigurovatelné ochrany na změny sledovaných parametrů mimo zvolené toleranční rozsahy (mající za následek zastavení motoru).

6.1 Návrh FSA motoru

Provozní stavy využívané v návrhu FSA motoru ve své nejčistší formě intuitivně reflektují realitu provozu libovolného motoru. Lze tak odtušit, že jádrem stavového řízení bude vykonávání sekvence Start – Běh – Zastavení. S přihlédnutím k možnosti vzniku poruchy na zařízení, rozšíříme FSA o stav chybový, do kterého se lze dostávat ze všech stavů provozních (byť nepřímo). Poslední úpravy potom spočívají v zařazení stavů specifických pro aplikaci diesellového motoru v soustrojí s generátorem (např. běh v režimu chlazení elektrické části zařízení) a konfigurační stavy předcházející samotnému rozběhu motoru.

Chod motoru tak nyní můžeme rozložit mezi jednotlivé provozní stavy, v nichž dochází k aktivaci příslušných řídicích signálů z množiny výstupů stavového automatu, jež reprezentují povely řídicí jednotce motoru (přímo tak ovládají funkční komponenty motoru) nebo plní roli čistě informační (jejich aktivace tak obsluze předává zprávu o okamžitém statusu zařízení).

Tabulka 2 Přejchody navrženého motorového FSA

S_i (aktuální stav)	C_i (přejchod)	S_{i+1} (následující stav)	Komentář přejchodu
S0	C0	S1	Změna módu na <i>MAN</i>
S0	C9	S6	Chyba
S1	C1	S0	Změna módu na <i>OFF</i>
S1	C2	S2	Signál spuštění motoru
S1	C9	S6	Chyba
S2	C3	S3	Úspěšné spuštění motoru
S2	C10	S6	Chyba / Signál vypnutí motoru
S3	C4	S4	Dosažení jmen. otáček
S3	C10	S6	Chyba / Signál vypnutí motoru
S4	C5	S5	Signál vypnutí motoru
S4	C9	S6	Chyba
S5	C6	S4	Signál spuštění motoru
S5	C7	S6	Chyba / Ukončení chlazení
S6	C8	S0	Úspěšné zastavení
S6	C12	S7	Chyba
S7	C11	S0	Kvitování chyby

Stavový diagram v příloze ukazuje možnosti přejchodů mezi stavy FSA dle uvedené tabulky přejchodů, přičemž každý přejchod je vázán na soustavu specifických podmínek, jež budou v popisu příslušných stavů stručně charakterizovány. Na základě tabulky přejchodů (resp. stavového diagramu) byl konfigurován blok stavového automatu v prostředí REXYGEN Studio (zde s názvem ATMT), jež přímo zodpovídá za aktivaci výstupů Q dle dosaženého stavu.

6.2 Popis provozních stavů

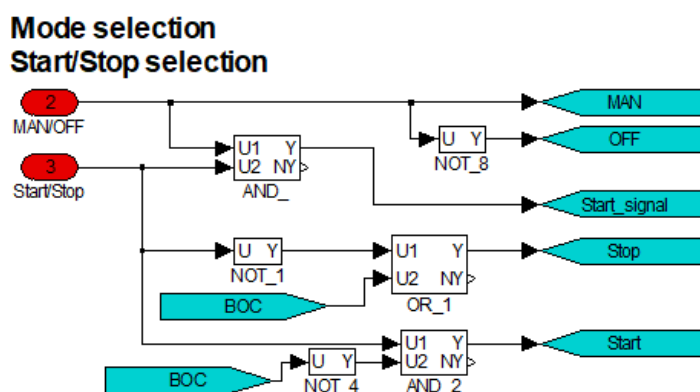
Do provozní sekvence motoru popsané jednotlivými stavy nyní můžeme dodat čtení vstupních veličin, jejichž okamžité hodnoty (standardně analogové, porovnávané s nastavenou hodnotou) poslouží při vyhodnocování přejchodových podmínek. V množině vstupních veličin dále nalezneme i binární vstupy, jež typicky reprezentují řídicí povely obsluhy, případně signály přenášené z výstupní funkce stavového automatu. Popis každého stavu tak v sobě zahrnuje i přejchody do následujících možných stavů.

6.2.1 Not ready

První a výchozí stav s názvem *Not ready* (značení S0) představuje bod konfigurace motorového automatu, kdy obsluha dostává možnost přepnout mezi módem chodu *OFF* (tedy zapnutým, ale neaktivním zařízením) a *MAN* (manuální obsluha, v tomto modelu nutná podmínka spuštění). Tento stav je zcela zásadní z hlediska informace předané binárním výstupem *Operational*, obsluhu totiž upozorňuje na (ne)provozoschopnost zařízení. Zároveň stav *Not ready* zaručuje fakt, že motor je v klidu. Do stavu *Not ready* se navíc vracíme po kompletním dokončení provozního cyklu motoru a kvitování chyby (za předpokladu, že po ukončení chodu přepínáme do módu *OFF*, ve stavu *Not ready* zůstáváme). V reálné aplikaci bychom v tomto stavu mohli volit i mód *AUT* (automatický), kdy by spuštění motoru bylo závislé na vyhodnocování parametrů sítě.

6.2.2 Ready

Do stavu *Ready* (S1) se automat dostává aktivací zmíněného módu *MAN*, přičemž v tuto chvíli již lze zadat povel pro spuštění motoru (nebo se změnou módu na *OFF* vrátit do *Not ready*). Ve stavu *Ready* tak očekáváme spuštění motoru (aktivací binárního vstupu *Start/Stop*).



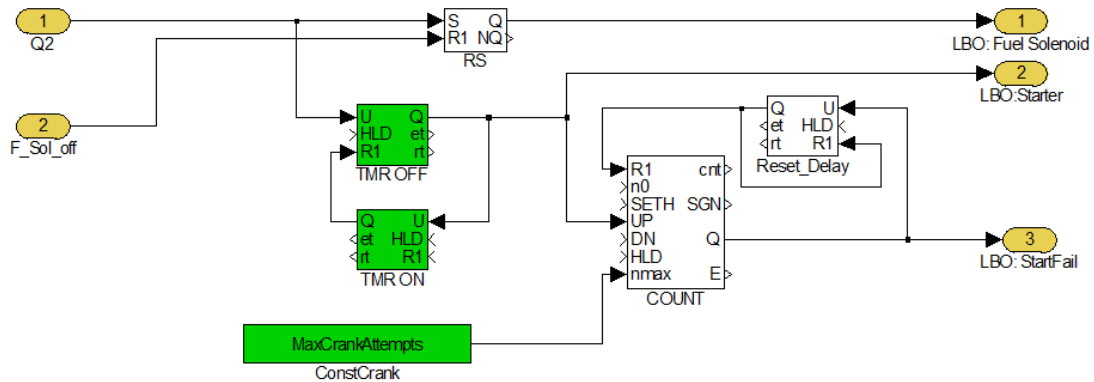
Obrázek 6 Realizace přepínače módů a Start/Stop tlačítka

Na obrázku vidíme předání hodnoty binárních vstupů *MAN/OFF* a *Start/Stop* štitkům odkazujícím na další místa v blokovém návrhu, kde jsou tyto hodnoty dále zpracovávány (ať už jako součást jiné funkce, nebo přímo jako podmínka přechodu stavového automatu bloku ATMT). Zmíněné štitky tak představují vnitřní proměnné systému. Na žádost o zastavení motoru má vliv i hodnota binárního parametru *BOC*, jehož funkce bude popsána v rámci chybových stavů.

6.2.3 Cranking

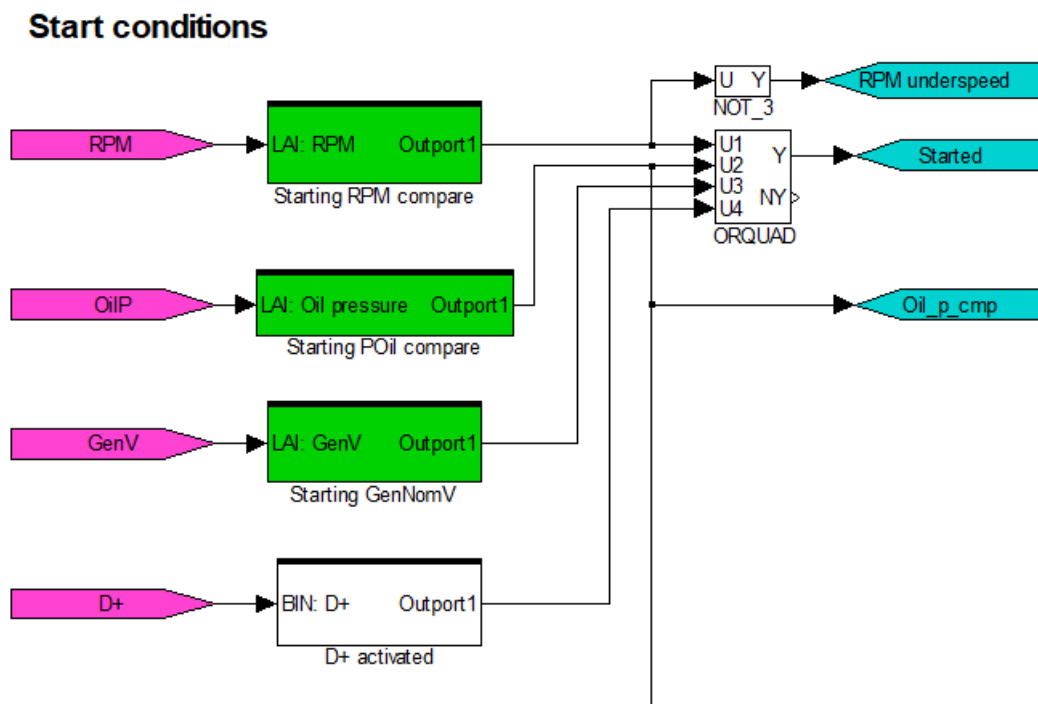
Startování motoru, a tedy přechod do stavu *Cranking* (S2), začíná po překlopení binárního vstupu *Start/Stop* do logické 1. Stav *Cranking* potom budí startovací funkci motoru. V první řadě dochází k otevření palivových ventilů (aktivace binárního výstupu *Fuel solenoid*) a pokusu o nastartování. Pokusem o nastartování rozumíme roztočení startéru, jehož spuštění je reprezentováno binárním výstupem *Starter*. Automatizovaná startovací sekvence se potom skládá ze dvou časovačů, přičemž

TMR ON nastavuje délku časového intervalu, v němž je binární výstup **Starter** aktivní, zatímco **TMR OFF** vymezuje prodlevu mezi jednotlivými spuštěními startéru. V rámci startovací sekvence dochází ke konečnému nastavitelnému počtu pokusů a nastartování motoru (**MaxCrankAttempts**), jejichž překročením budíme binární výstup **Start Fail**, jenž značí nezdařené startování a zahájení zastavování motoru.



Obrázek 7 Realizace funkce Cranking

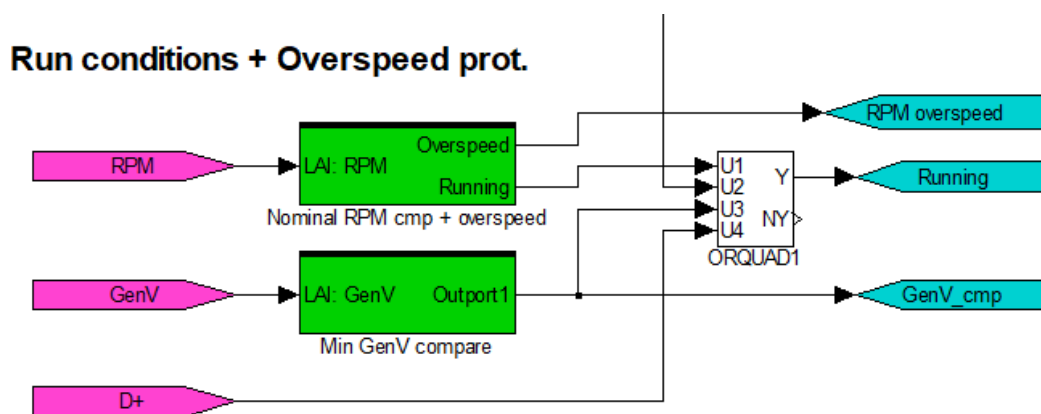
Dále je patrné, že ve stavu **Cranking** trvale otevíráme palivový ventil, jenž zůstává otevřený až do resetu vyvolaném stavem **Stopping**. V případě, že během opakujících se pokusů o nastartování bylo dosaženo požadovaných startovacích otáček nebo další zkoumané parametry (tlak oleje a výstupní napětí na generátoru) vykazují známky nastartovaného motoru, dochází k přechodu do následujícího provozního stavu.



Obrázek 8 Testování podmínek nastartování motoru za využití komparátorů

6.2.4 Idle

Stav *Idle* (S3) vyplňuje prodlevu mezi úspěšným startem motoru a dosažením jmenovité hodnoty otáček. Tento stav tak fakticky charakterizuje přechodový děj rozběhu motoru na požadovanou hodnotu jmenovitých otáček, přičemž je indikován binárním výstupem *Idle run*. Motor navíc po určitou dobu (nastavenou časovačem *IdleRun_TMR*) zůstává na úrovni otáček odpovídajících asi polovině otáček jmenovitých, kdy očekáváme ohřátí motoru a jeho stabilizaci před zahájením dodávky energie. Narozdíl od předchozího stavu *Cranking* tak již nesmí zůstat připojený startér (došlo by k jeho poškození). Při odeznění přechodového děje (rozběhu) potom standardně dochází ke splnění podmínek (typicky dosažení jmenovité hodnoty otáček) umožňujících překlopení do stavu *Running*.



Obrázek 9 Testování podmínek běhu motoru

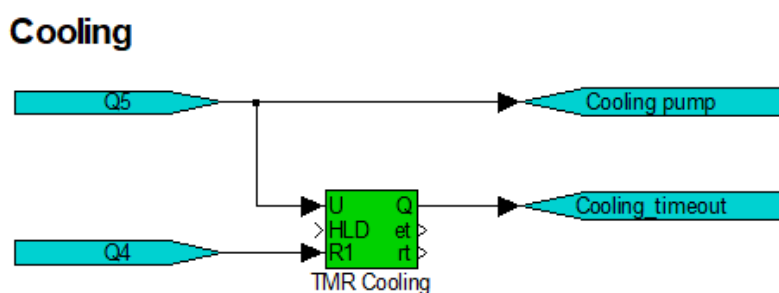
Měření a vyhodnocení otáček neslouží pouze jako přechodová podmínka provozního stavu. Komparátor má implementovanou i ochranu *RPM overspeed*, na které parametrem *Overspeed_threshold* v masce bloku můžeme nastavit procentuální hodnotu jmenovitých otáček, při nichž dojde k chybě a odstavení motoru z důvodu vysokých otáček (analogicky funguje ochrana *RPM underspeed*, upozorňující na problém opačný – nízké otáčky ve stavech, kde mají být otáčky motoru nad úroveň otáček startovacích).

6.2.5 Running

Pro žádanou funkci motorgenerátoru je zcela zásadní stav *Running* (S4) symbolizovaný aktivací stejnojmenného binárního výstupu. V něm totiž typicky dochází k připojení zátěže, přičemž hlavním požadavkem je udržení jmenovité hodnoty otáček v rozsahu umožňujícím nabuzení generátoru. V tuto chvíli z hlediska provozu motorgenerátoru přebírá hlavní roli zmíněný subsystém kontroléru, jenž zodpovídá za chod elektrické části řídicího členu (tj. regulaci otáček, regulaci buzení, synchronizaci apod.). Na základě vyhodnocení potřeby chodu motorgenerátoru potom motor může zůstat ve stavu *Running* (generátor tak dodává energii zátěži), nebo dochází k odpojení zátěže a vytvoření požadavku o zastavení motoru (signál *Stop_signal*), jenž tak přechází do následujícího stavu.

6.2.6 Cooling

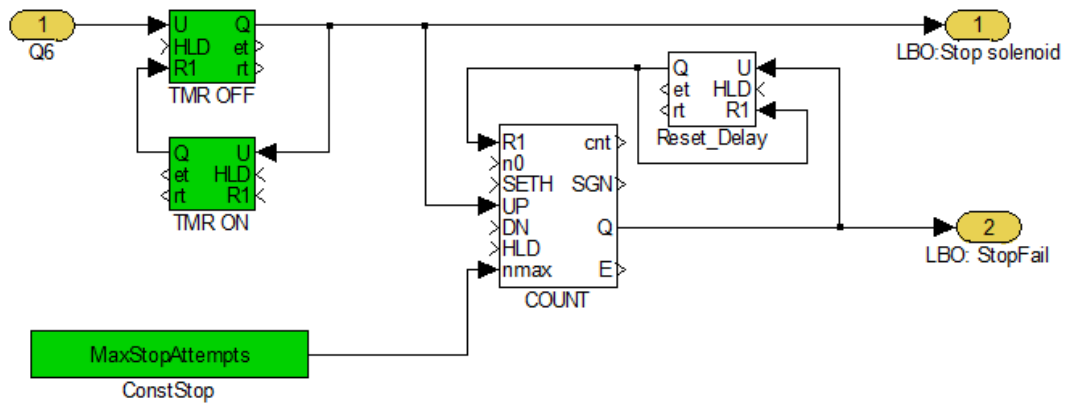
Po odpojení zátěže a trvajícím mechanickém namáhání motoru se dostáváme do procesu zastavování motoru. Před zastavením motoru samotného však musíme projít stavem *Cooling* (S5), v němž zahájíme fázi intenzivního prochlazování zařízení. Stav sám o sobě může být ohlášen binárním výstupem *Cooling*, navíc však dochází k aktivaci dalšího bin. výstupu *Cooling pump*, jenž jak název napovídá, řídí provoz čerpadla chladicího média motorgenerátoru. Chlazení reálně probíhá při volitelné hodnotě otáček, v našem modelu však pro zjednodušení na otáčkách jmenovitých (1500 RPM). Ze stavu *Cooling* totiž nemusíme nutně přecházet do zastavovací sekvence motoru, ale v čase vymezeném pro chlazení (nastaveném pomocí *TMR Cooling*) můžeme očekávat opětovné připojení zátěže (čímž se vracíme do stavu *Running* za současného resetu časovače).



Obrázek 10 Realizace výstupní funkce Cooling

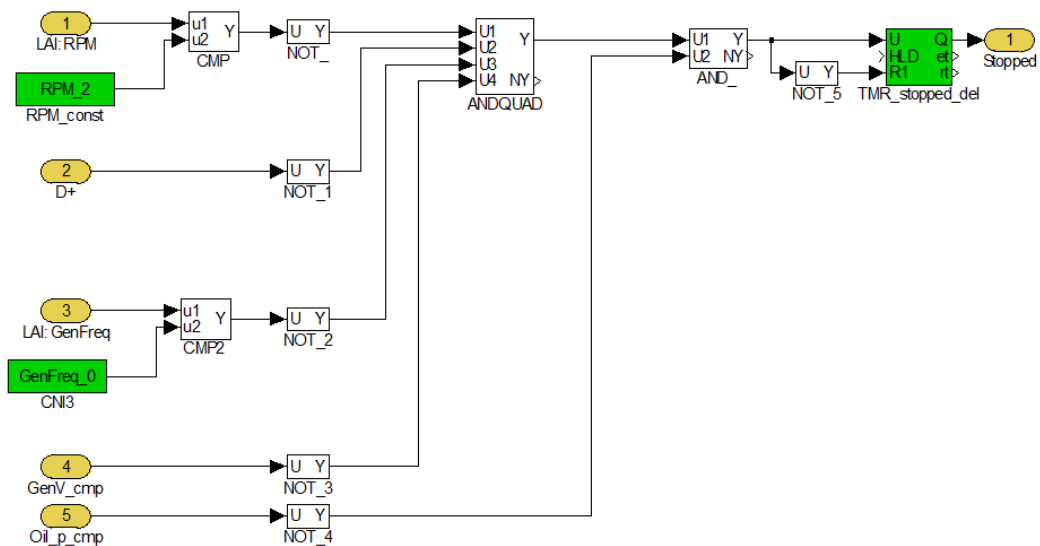
6.2.7 Stopping

V případě, že během fáze prochlazování nedošlo k opětovnému připojení zátěže a uběhl čas vymezený pro stav *Cooling*, přecházíme do posledního provozního stavu *Stopping* (S6), během kterého zastavujeme motor. Do stavu *Stopping* se motor dostává i v případě detekce chyby na nestojícím zařízení (tedy mezi stavy *Cranking* až *Cooling*), neboť snažíme-li se předejít poškození motoru, musíme jej nutně zastavit. V první fázi dochází k uzavření palivových ventilů (binární výstup *Fuel solenoid* přestává být aktivní, realizováno ve výstupní funkci stavu *Cranking* resetem pomocí vstupu *F_sol_off*) a odpojení čerpadla pohonných hmot (binárním výstupem *Stop solenoid*). Stop sekvence potom svou strukturou funkce připomíná rozběh, kdy však nedochází k opakování pokusu o spuštění motoru, ale o jeho zastavení.



Obrázek 11 Realizace výstupní funkce Stopping

Doba aktivace binárního výstupu *Stop solenoid* a prodleva mezi jednotlivými pokusy o zastavení (jejichž počet závisí na hodnotě *MaxStopAttempts*) se tak analogicky nastavuje pomocí časovačů *TMR OFF* a *TMR ON*. Nezdařené zastavení (překročení pokusů *MaxStopAttempts* za současné detekce otáček) spíná binární výstup *StopFail*.



Obrázek 12 Testování podmínek zastaveného motoru

Můžeme si všimnout, že nově je kromě již zmíněných parametrů u rozběhu zkoumaná i frekvence výstupního napětí na generátoru. Na rozdíl od přechodových podmínek pro změny stavů *Cranking – Idle* a *Idle – Running*, kde stačila jediná veličina k úspěšnému překlopení stavu, musí v tomto případě všechny sledované parametry vykazovat známky stojícího motoru a tím i (za normálních okolností) umožnit návrat do výchozího stavu S0.

6.3 Chybové stavy

Chybovým stavem rozumíme situaci, kdy během provozu motoru došlo k nastavení příznaku **Error**. Tato vnitřní logická proměnná potom ukončuje průchod systémem stavového automatu ve stejnojmenném stavu **S7**, kdy po odstranění vzniklého problému, příznak ručně nulujeme (binárním vstupem **Error Reset**) a tím umožňujeme opětovný návrat soustavy do stavů provozních.

Příznak **Error** lze fakticky nastavit v libovolné fázi funkce stavového řízení a v našem případě vede vždy k zastavení motoru, případně ukončení provozu systému za předpokladu, že nedošlo ke spuštění motoru (neexistují zde varování). Zjednodušený model obsahuje příklady možných chyb vyvolaných nevykonáním požadovaných úkonů (resp. nedetekováním odezvy na tyto úkony) v příslušných stavech, dále obecnou závadu vedoucí k zastavení chodu zařízení (reprezentováno binárním vstupem **Emergency Stop**, tedy nouzovým odstavením) nehledě na stav a specifický problém detekce běžícího motoru v nedovoleném stavu (tedy když má motor stát).

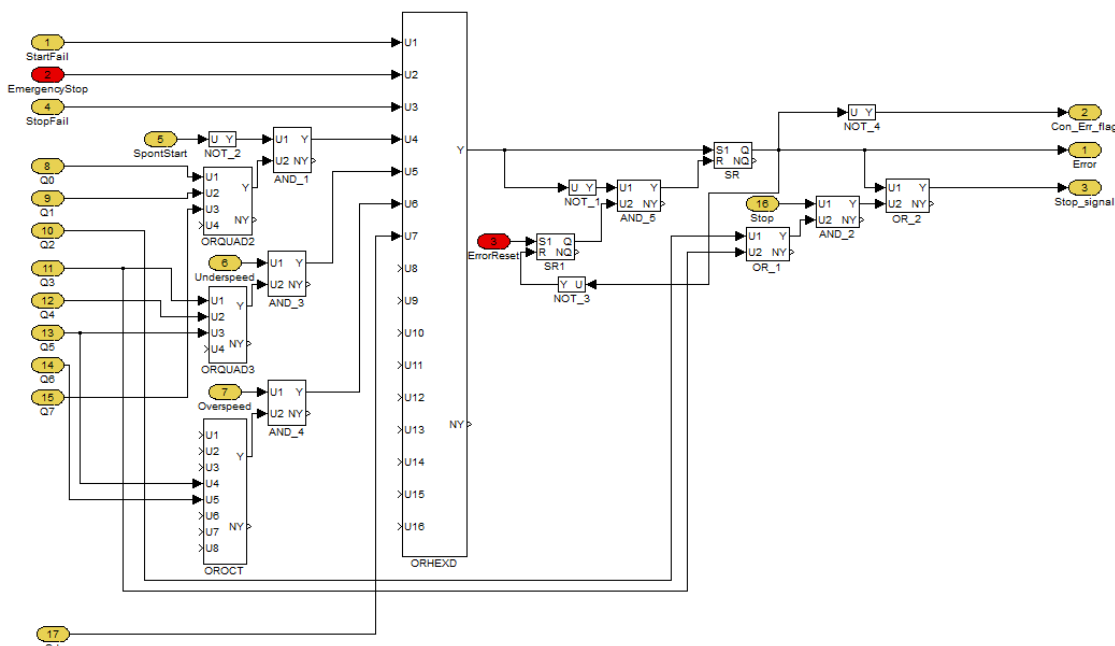
V modelu striktně rozlišujeme mezi chybami vázanými na mechanickou a elektrickou část zařízení, avšak vznik chyby na jednom systému musí nutně ovlivnit systém druhý. Z tohoto pohledu můžeme považovat tzv. *error handling* stavového automatu motorové části za nadřazený stavovému automatu generátorové části, neboť povel k zastavení motoru je vyhodnocován (a fakticky i realizován) na automatu motorovém. Z výše zmíněného plyne potřeba na zavedení dvouúrovňového chybového systému, kdy rozlišujeme mezi chybami typu „*shutdown*“ (dále **Sd**) a „*breaker open and cooling*“ (dále **BOC**).

6.3.1 Chybové úrovně

Z pohledu funkce ochran motorového automatu představují všechny chyby, jež na motorovém automatu mohou nastat, typ **Sd**. Úroveň chyby **Sd** vyvolává okamžité ukončení činnosti motorgenerátoru, tedy zastavení dieslového motoru (přechod do stavu **Stopping** za nastavení příznaku **Error**). Mezi takovéto chyby vázané v modelu přímo na motorový automat řadíme již představené **RPM overspeed** a **RPM underspeed**, dále indikace **Start fail** a **Stop fail**. Poslední ochranou potom je **Spontaneous start**, která se aktivuje v momentě, kdy detekujeme nenulové otáčky ve stavech stojícího motoru.

Všechny ochrany musíme vázat na provozní stavy motorového automatu, z čehož plyne, že množina aktivních ochran je v čase proměnná. Za předpokladu, že bychom ochrany na provozní stavy nevážali, docházelo by ke zcela zbytečnému odstavení motoru a jeho neprovoznosti. Typickým zástupcem zmíněného nežádoucího chování může být ochrana **RPM underspeed**. V případě vyhodnocování této chyby např. ve stavu **Cranking** by motor totiž nikdy nenastartoval, neboť bychom určitě detekovali otáčky motoru pod úrovní otáček startovacích, což má za následek přechod do chybového stavu a ukončení startovací sekvence. Z toho důvodu vyhodnocujeme ochranu **RPM underspeed** pouze v provozních stavech **Idle – Running – Cooling**. Obdobně můžeme hovořit i o blokaci ochran zbylých, jež jsou taktéž ošetřeny v rámci chybových stavů.

Typ ochrany **BOC**, vázaný na stavový automat elektrické části zařízení, nevede k okamžitému odstavení motoru, ale k zahájení vypínací sekvence se standardním průchodem přes stav **Cooling** s prochlazováním za současného nastavení příznaku chyby a následného rozpojení stykače na straně generátoru (**GCB**). Pověštinou se jedná o důsledek proudového přetížení generátoru, případně detekce trvajících přepětí určité úrovně. Svým chováním tak ochrana úrovně **BOC** odpovídá povelu **Stop** (respektive zmizení žádosti o **Start**).



Obrázek 13 Subsystém nastavující chybový příznak a jeho kvitace

Na obrázku výše vidíme realizaci kombinační logiky pro nastavení příznaku **Error** na základě aktivních ochran pro dané stavy (S0 – S7) motorového automatu úrovně **Sd**. Informace o chybě ze strany generátorového automatu je předávána binárním vstupem **Sd** a nepřímo vstupem **Stop** (provázaný právě s **BOC** signálem), jenž taktéž budí výstup **Stop_signal** nutný pro splnění přechodové podmínky zahájení zastavovací sekvence motoru.

6.3.2 Kvitování chyby

Při reakci ochrany na vzniklou závadu na zařízení dochází k nastavení příznaku **Error** přes RS blok (na obrázku SR). Kombinační obvod kvitování chyby je realizován tak, aby v případě neaktivního výstupu tohoto RS bloku byl vstup **ErrorReset** nečinný (tedy soustavně resetován blokem SR1). Zároveň lze chybu potvrdit až v momentě, kdy došlo k jejímu odstranění (příznak **Error** zůstává díky bloku SR aktivní, avšak ochrany již chybu nedetekují), k čemuž standardně dochází po dosažení chybového stavu S7.

Vidíme, že příznak **Error** je přes negaci svázán s výstupem **Con_Err_flag** (potvrzení chyby), takže po vymizení a kvitování chyby právě tento výstup umožní přechod z chybového stavu S7 do provozního stavu S0.

7 Řízení generátoru pomocí FSA

Co do principu, je řízení elektrické části motorgenerátoru (tedy generátoru) shodné s řízením diesellového motoru. Opět v první řadě oddělíme provozní a poruchové stavy. Novinku v případě možných poruchových stavů představuje zavedení zmíněných ochran typu **BOC**, jejichž aktivace vede k specifickému chování systému, jež bylo popsáno v předchozí kapitole (žádost o zastavení zařízení). Další odlišnost stavového řízení generátoru spočívá ve variabilitě průchodu provozními stavy. Zatímco automat motoru má za běhu posloupnost přepínání stavů pevně definovanou, sekvence FSA generátoru závisí na celé řadě vnějších parametrů, přičemž rozhodujícím faktorem je stav sítě, na jehož základě vzniká potřeba paralelního provozu generátoru na síti, případně ostrovního režimu. Situace se navíc značně komplikuje tím, že stavový automat generátoru musí během své činnosti na výpadek (nebo obnovení) sítě reagovat a měnit režim chodu během jednoho provozního cyklu (typicky se jedná o změnu z ostrovního režimu na paralelní provoz).

Kromě samotného stavového automatu generátoru obsahuje řídicí subsystém elektrické části i ovládání stykačů na straně sítě (**MCB**) a na straně generátoru (**GCB**). Dále zmíněný celek zodpovídá za vyhodnocení zdraví sítě. Z výše uvedeného plyne, že ne veškeré funkce FSA generátoru podmiňujeme chodem stavového automatu diesellového motoru. Právě výsledek měření na síti a případná detekce poruchy sítě může přímo sloužit jako povel k vytvoření požadavku na start motorgenerátoru. Subsystémy stavových automatů obou částí zařízení tak nutně musíme vnímat jako rovnocenné, přestože FSA generátoru fakticky přebírá řídicí úlohu pouze v jediném stavu chodu stavového automatu motoru.

7.1 Návrh FSA generátoru

Stavový automat generátoru se stává aktivním v okamžiku zahájení činnosti kontroléru (v našem případě připojením k modelu a startem simulace), kdy v první chvíli čeká na rozběh diesellového motoru a stabilizaci výstupních parametrů generátoru, jež při rozběhu nereguluje (neděje se ani v praxi). Až po odeznění tohoto děje nastává vyhodnocení provozu generátoru. Nejjednodušší případ představuje chod čistě v ostrovním režimu, tedy zahájení a ukončení provozu motorgenerátoru bez účasti sítě za celou dobu běhu zařízení. Další (pro záložní generátor typický) cyklus spočívá ve startu motorgenerátoru při nefunkční síti, kdy během dodávky elektrické energie v ostrovním režimu dojde k obnovení sítě, načež vzniká potřeba zpětné synchronizace generátoru k síti a jeho vypnutí bez přerušování dodávky energie. Poslední případ lze vnímat jako očekávaný výpadek sítě, tedy zahájení a ukončení chodu zařízení paralelně na síti (přičemž k výpadku sítě během provozu ani dojít nemusí).

Zmíněné provozní stavy se navíc mohou dále kombinovat, k výpadkům sítě může docházet opakovaně za běhu motorgenerátoru a požadavek na ostrovní či paralelní režim se kdykoliv může změnit. Stavové řízení tak musí být natolik versatelní, aby na vzniklé situace správně reagovalo, a hlavně svým chováním zařízení nepoškodilo (např. připojením generátoru na síť bez synchronizační sekvence).

Po zohlednění výše uvedených nároků na řídicí systém vznikl stavový diagram FSA generátoru (v příloze), jehož přechody jsou stručně shrnuty v tabulce.

Tabulka 3 Přechody navrženého generátorového FSA

S_i (aktuální stav)	C_i (přechod)	S_{i+1} (následující stav)	Komentář přechodu
S0	C2	S2	Požadavek na start
S0	C28	S13	Chyba
S1	C0	S0	Úspěšné zastavení
S1	C1	S2	Požadavek na start během zastavování
S1	C27	S13	Chyba
S2	C3	S1	Požadavek na stop během rozběhu
S2	C4	S3	Stabilní výstupní parametry generátoru
S2	C28	S13	Chyba
S3	C5	S1	Požadavek na stop po rozběhu
S3	C6	S4	Ostrovni režim, MCB rozepruto
S3	C7	S10	Paralelní režim, MCB sepruto
S3	C28	S13	Chyba
S4	C10	S5	GCB úspěšně sepruto
S4	C28	S13	Chyba
S5	C11	S6	Stabilní síť, zahájení zpětné synchronizace
S5	C12	S9	Požadavek na stop v ostrovni režimu
S5	C28	S13	Chyba
S6	C13	S9	Požadavek na stop během synchronizace
S6	C14	S5	Výpadek síť během zpětné synchronizace
S6	C15	S7	Úspěšná zpětná synchronizace
S6	C28	S13	Chyba
S7	C16	S5	Výpadek síť během paralelního chodu
S7	C17	S8	Požadavek na stop, odlehčení generátoru
S7	C28	S13	Chyba
S8	C18	S9	Úspěšné odlehčení
S8	C29	S12	Obnovení dodávky energie během odlehčování
S8	C28	S13	Chyba
S9	C25	S1	GCB úspěšně rozepruto
S9	C28	S13	Chyba
S10	C8	S3	Výpadek síť během synchronizace
S10	C9	S1	Požadavek na stop během synchronizace
S10	C19	S11	Úspěšná synchronizace
S10	C28	S13	Chyba
S11	C20	S5	Seprnutí GCB při rozeprnutém MCB
S11	C21	S12	Úspěšné seprnutí GCB
S11	C28	S13	Chyba
S12	C22	S5	Výpadek síť během zatěžování generátoru
S12	C23	S7	Úspěšné zatížení generátoru
S12	C24	S8	Přerušeni dodávky energie během zatěžování generátoru
S12	C28	S13	Chyba
S13	C26	S0	Kvitování chyby

7.2 Popis provozních stavů

Po vzoru stavového automatu motoru nyní FSA generátoru pracuje s přiřazenými vstupními elektrickými veličinami. Kromě buzení výstupní kombinační logiky, jež binárními signály zajišťuje zmíněné řízení stykačů, musí FSA generátoru ve většině svých provozních stavů regulovat otáčky motoru a budicí napětí generátoru. Při dosažení příslušných stavů tak dochází k inicializaci regulačních smyček, charakteristických pro vybraný provozní režim. V popisech jednotlivých provozních stavů zohledníme i funkce zajišťující hladkou regulaci a detailněji rozebereme přechodové podmínky stavového automatu, jenž pracuje s celou řadou doposud nepředstavených parametrů.

7.2.1 Stopped

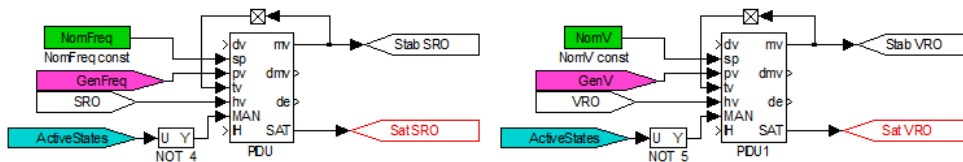
První stav *Stopped* (S0) slouží jako výchozí bod stavového řízení elektrické části zařízení a motorgenerátor v tomto stavu setrvává po dobu neaktivního požadavku na start, tedy dokud vnitřní binární proměnná *Start* nepřeklopí do logické úrovně 1. K tomu dochází v momentě, kdy obsluha vybrala provozní režim *MAN* a sepnula vstup *Start/Stop* (nativně na zařízení bez příznaku chyby). Mělo by být patrné, že stavu *Stopped* na FSA generátoru odpovídají stavy *Not ready* (S0) a *Ready* (S1) motorového FSA. Po příchodu požadavku na start je splněna podmínka pro přechod do následujícího stavu generátoru (*Engine starting* - S2). Další možnost spočívá v aktivaci jedné ze dvou úrovní ochran, což má za následek pád do chybového stavu *Error* (S13) – platí pro všechny popisované stavy a nebude dále zmiňováno.

7.2.2 Engine starting

Stav *Engine starting* (S2) představuje fázi, při níž dochází k rozběhu diesellového motoru na jmenovité otáčky. V tomto stavu se tedy nacházíme po dobu startovací sekvence motorového FSA, čemuž odpovídá *Cranking* (S2), *Idle* (S3) a dosažení *Running* (S4). V případě standardního běhu se stabilizují otáčky (frekvence) a výstupní napětí generátoru za současné indikace stavu *Running*, načež pozorujeme přechod do stavu elektrické části zařízení *Ready to load* (S3). Alternativně může dojít k vymizení požadavku na start, kdy FSA generátoru překlápí do stavu *Engine stopping* (S1).

7.2.3 Ready to load

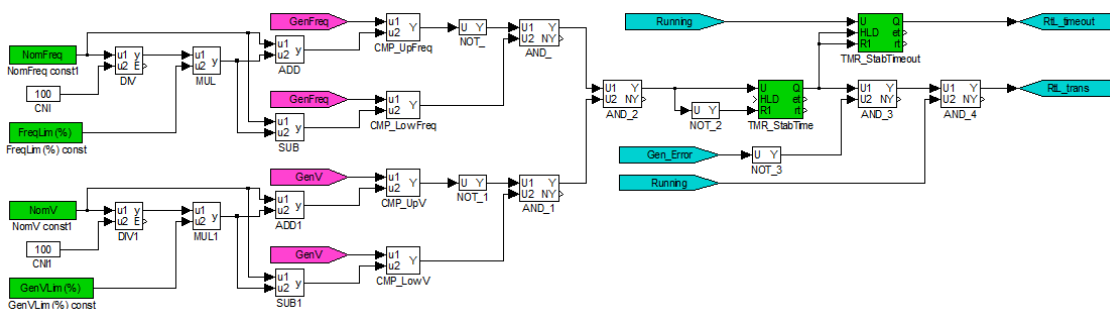
Dosažením stavu *Ready to load* (S3) dochází k prvnímu zapojení regulační smyčky sloužící pro udržení stabilních elektrických parametrů generátoru. Až po tento stav (včetně) bylo možné spínat (případně rozepínat) *MCB* bez jakéhokoliv vlivu na průchod stavovým diagramem. Abychom mohli přejít do následujících provozních režimů, ovlivněných aktuální pozicí síťového stykače, musíme v první řadě zajistit právě neměnnost výstupního napětí a frekvence generátoru, jež představují regulované veličiny.



Obrázek 14 Stabilizační regulátory napětí a frekvence

Parametry *NomFreq* a *NomV* odpovídají jmenovitým hodnotám frekvence a fázového napětí generátoru, přičemž představují žádané hodnoty (nastavitelné v masce stabilizačního bloku). Skutečnými hodnotami jsou vstupy *GenFreq* a *GenV*. Nenulový rozdíl žádaných a skutečných hodnot potom vede k regulačnímu zásahu zprostředkovanému výstupními veličinami regulátoru *Stab SRO* a *Stab VRO*. Vnitřní vstupní proměnná *ActiveStates* předává informaci o zahájení provozu regulátoru ve stavech, kdy má být tento regulátor aktivní (přerušuje manuální režim regulátoru, viz kapitola 7.5). Informace o dosažení saturačních mezí regulátorů v průběhu regulace předávají výstupy *Sat SRO* a *Sat VRO*.

V případě, že disponujeme stabilními výstupními parametry generátoru (hodnota napětí a frekvence se pohybuje v nastavené toleranci *FreqLim (%)* a *GenVLim (%)*), nastavujeme binární proměnnou *RtL_trans* do logické 1 a propisujeme ji na výstup stabilizační funkce, kde potom v rámci modelu kontroléru slouží jako vlajka *Stable*. Právě zmíněná vlajka musí být aktivní, abychom mohli uskutečnit přechod stavového automatu do jednoho ze dvou možných následujících provozních stavů. Není-li k dispozici síť (došlo k jejímu výpadku, případně její parametry nejsou v definovaných rozsazích), očekáváme chod generátoru v ostrovním režimu a překlápíme do stavu *GCB closing island* (S4). Detekujeme-li naopak sepnutý *MCB* stykač (známka zdravé sítě), musíme zahájit synchronizační sekvenci ve stavu *Synchronization* (S10).



Obrázek 15 Vyhodnocení stability výstupu generátoru s umožněním přechodu

Vidíme, že napětí a frekvence generátoru musí zůstat stabilní po dobu nastavenou na časovači *TMR_StabTime*, jinak k indikaci *Stable* nedojde. Během regulace soustavy se totiž podmínky o okamžitých hodnotách veličin v nastavených mezích můžou i několikrát splnit, avšak těžko lze výstupní parametry generátoru v takovou chvíli považovat za ustálené. Časovač s názvem *TMR_StabTimeout* potom slouží k informování obsluhy o uplynutí času vyhrazeného pro stabilizaci, případně jeho výstup můžeme použít i jako jednu z ochran (na úrovni *BOC*), v případě, že frekvenci a napětí na generátoru se nepodařilo za konfigurovaný čas ustálit.

7.2.4 GCB closing island (nebo parallel)

Po rozhodnutí o provozu v ostrovním režimu a zaručení stability výstupních parametrů generátoru nezbývá nic jiného než připojit zátěž. Připojení zátěže realizujeme sepnutím *GCB* stykače, k čemuž právě stav *GCB closing island* (S4) slouží. Vstupem do tohoto stavu tak budíme kombinační logiku pro řízení stykačů (viz kapitola 7.4), jež generuje řídicí signál *GCB*. Poté čekáme na aktivaci měřeného binárního vstupu *GCBfeedback*, jež představuje zpětnou vazbu informující o úspěšném zavření stykače. Tímto však přechodová podmínka pro vstup do následujícího provozního stavu *Island* (S5) není kompletní, neboť zároveň zkoumáme i vstup *MCBfeedback* (tedy informaci o poloze síťového stykače), jež musí být nutně neaktivní. Přestože spínání síťového stykače v cyklu ostrovního provozu zakazujeme, záruka skutečné nezávislosti soustavy na síti spočívá právě ve čtení *MCBfeedback*. Až tato zpětná vazba umožní přechod do stavu *Island*. Regulaci frekvence a napětí zde nadále zajišťují stabilizační regulátory, stejně jako v případě stavu S3.

Obdobnou úlohu plní i stav *GCB closing parallel* (S11), avšak pro paralelní chod na síti. Zde po úspěšné synchronizaci generátoru na síť musí naopak *MCBfeedback* vykazovat sepnutý stykač abychom zahájili *Soft load* (S12), tedy postupné přebírání zátěže generátorem. V opačném případě by se totiž opět jednalo o provoz v ostrovním režimu (do něhož skutečně při násilném rozpojení *MCB* přejdeme).

7.2.5 Island

Úspěšným sepnutím *GCB* jsme ke generátoru připojili zátěž. Vzhledem k tomu, že do stavu *Island* (S5) se dostáváme jedině bez připojené sítě, nacházíme se v ostrovním provozu a velikost odebíraného výkonu ovlivňují pouze parametry zátěže. Aktivní se z formálních důvodů stává nová dvojice PI regulátorů s výstupy *Ld VRO I* a *Ld SRO I*, neboť disponuje stejnými parametry, jako regulátory stabilizační. Nadále tedy regulujeme na konstantní hodnoty jmenovité frekvence a fázového napětí definované parametry *NomFreq* a *NomV*.

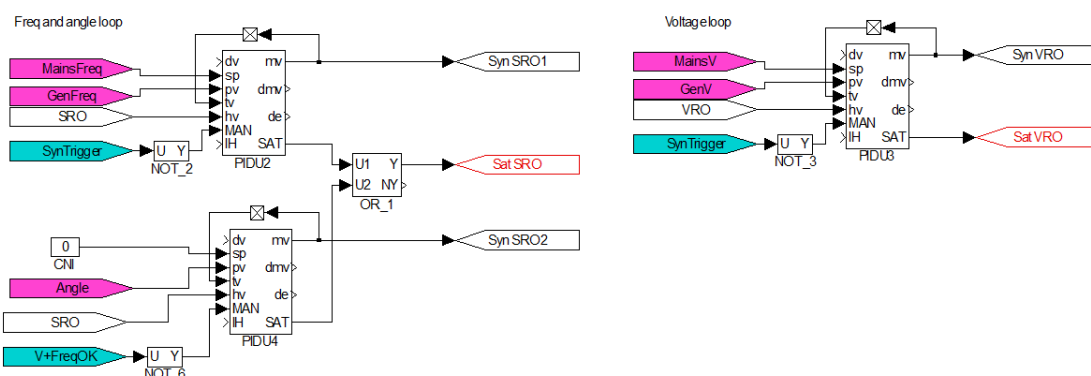
V ostrovním provozu setrváváme, dokud nedojde k vymizení požadavku na start, nebo síť nezačne vykazovat známky provozuschopnosti. Jestliže zmizí požadavek na start, automat překlápí do nového stavu **GCB opening** (S9) nutného pro ukončení dodávky energie motorgenerátorem. V případě obnovení sítě je generátor automaticky nucen přecházet do paralelního provozu, základní funkce tak spočívá v předání zátěže zpět síti bez přerušení dodávky energie. Aby k tomu mohlo dojít, musí zařízení vykonat zpětnou synchronizační sekvenci zahájenou stavem **Reverse synchronization** (S6).

7.2.6 Reverse synchronization (a Synchronization)

Synchronizační sekvence se vykonává ve dvou stavech. Již zmíněná možnost **Reverse synchronization** (S6) spočívá v přechodu z ostrovního do paralelního režimu, přičemž generátor je svým **GCB** stykačem trvale připojen k zátěži a úspěšné sfázování se sítí má za následek sepnutí **MCB**. Během zpětné synchronizace však samozřejmě může dojít k opětovnému výpadku sítě, čímž se zařízení vrací do ostrovního provozu. Vymizení požadavku na start zapříčiní totožné chování jako v ostrovním provozu, tedy přechod do stavu **GCB opening** (S9).

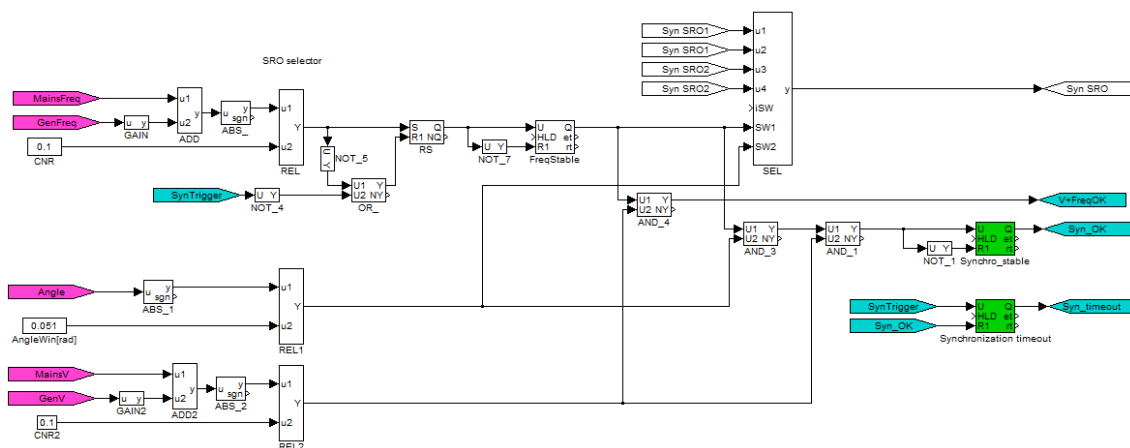
Další příležitost k připojení generátoru na síť přichází ve stavu **Synchronization** (S10), kdy je síť od momentu spuštění generátoru trvale k dispozici a dodává výkon zátěži (**MCB** sepnuto). Snažíme se tak synchronizovat nezátížený generátor a úspěšné sfázování zpozorujeme při sepnutí stykače na straně generátoru (**GCB**) za překlopení do následujícího provozního stavu – **Soft load** (S12). Jestliže při synchronizační sekvenci (v S10) dojde k poruše na síti, stavový automat přechází zpět do stavu **Ready to load** (S3), aby mohl zahájit chod v ostrovním režimu. Poslední nechybovou možností opuštění **Synchronization** je vymizení požadavku na start doprovázené zahájením zastavování motoru ve stavu **Engine stopping** (S1).

Jediný rozdíl mezi výše popsanými stavy spočívá ve výběru ovládaného stykače (**Synchronization** – **GCB**, **Reverse synchronization** - **MCB**), a tak lze synchronizační regulátory implementovat v rámci jediného subsystému, obsluhujícího oba případy fázování.



Obrázek 16 PI regulátory synchronizačních sekvencí

Abychom generátor mohli sfázovat se sítí, musíme splnit všechny podmínky fázování. Sled fází máme zajištěn korektním připojením generátoru do soustavy (tedy byl zkoumán v době instalace zařízení) a kontrolér nepředpokládá, že by síť a generátor neměly propojené příslušné fáze. Za dosažení shodné frekvence odpovídá regulátor, jenž se snaží srovnat frekvenci generátoru (měřený vstup **GenFreq**) s frekvencí sítě (žádaná měřená hodnota **MainsFreq**) řídicí veličinou **Syn SRO1**. Paralelně s regulací otáček dle očekávání regulujeme i velikost výstupního napětí generátoru (**GenV**), tak abychom dosáhli napětí síťového (**MainsV**), což je zajištěno řízením budiče pomocí výstupu **Syn VRO**. Poslední úkol spočívá v odstranění fázového rozdílu napětí sítě a výstupu generátoru v podobě měřené veličiny **Angle**. Potom regulujeme na nulový fázový rozdíl (úhel) veličinou **Syn SRO2** (sledování regulátoru okamžité hodnoty **SRO** je ukončeno při splnění podmínek dosažení požadované frekvence a napětí). Dosažení úhlu spočívá v drobné změně frekvence (dle potřeby navýšení či snížení otáček) výrazně měkčím regulátorem, s nulovou žádanou hodnotou na vstupu, což vede k eliminaci fázového rozdílu (překrytí průběhů napětí na síti a generátoru).



Obrázek 17 Výběr výstupní veličiny regulátoru otáček na základě měření

Fázovací sekvence tak pracuje s dvěma výstupními veličinami regulátoru otáček, přičemž v případě dosažení shodné frekvence pomocí **Syn SRO1** (s tolerancí 0,1 Hz) musí dojít k přepnutí na veličinu **Syn SRO2**, jež odstraní fázový rozdíl obou napětí. Výběr výstupní veličiny zajišťuje selektor (blok **SEL**) s logikou uvedenou v tabulce.

Tabulka 4 Výběr signálu blokem SEL

SW1	SW2	Výstup
0	0	Syn SRO1
0	1	Syn SRO1
1	0	Syn SRO2
1	1	Syn SRO2

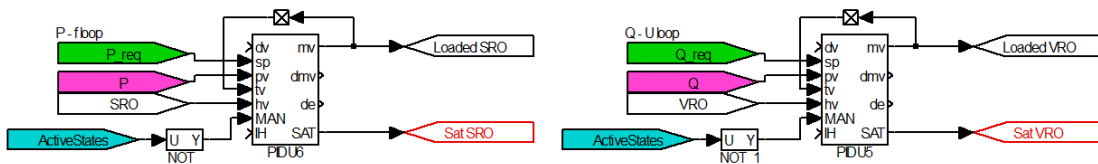
Vstup *SW1* odpovídá splnění podmínky o dosažení frekvence ve zvolené toleranci, *SW2* potom předává informaci o odstranění fázového rozdílu (demonstrováno pro relativně přísnou toleranci 3°). Vidíme tak, že při shodě průběhů napětí zůstává aktivní výstup *Syn SRO2*. Abychom mohli synchronizaci považovat za úspěšnou, musí všechny zkoumané parametry (velikost napětí, frekvence, úhel) setrvat v nadefinovaných mezích alespoň po dobu 1 s (zkoumáno časovačem *Synchro_stable*). Až po uplynutí nastavené doby dochází k aktivaci příznaku *Syn_OK*, jenž umožňuje přechod do následujících provozních stavů (a sepnutí *GCB* nebo *MCB*).

Uvedený způsob fázování označujeme jako „*phase match synchronization*“ a jeho hlavní výhoda spočívá v praktickém odstranění vyrovnávacího proudu po sepnutí stykače. Popsaný algoritmus synchronizace totiž velmi přesně pracuje právě s fázovým rozdílem, jenž je v tomto případě při připojení generátoru na síť prakticky nulový (v praxi až 10°). Jedná se však o postup výrazně delší, než který nabízí proces známý jako „*slip synchronization*“. Srovnání napětí a frekvence lze totiž provést poměrně rychle a stykač můžeme spínat v širokém okně fázového rozdílu, avšak za cenu proudového rázu. Vzhledem k tomu, že předání zátěže zpět síti není časově limitováno, několik desítek sekund provozu motorogenerátoru navíc zřejmě každý rád vymění za elektrické přetěžování soustavy, což byl také důvod, proč systém pracuje s prvně zmíněným postupem synchronizace.

7.2.7 Parallel

Stavu *Parallel* (S7) docílíme úspěšným propojením soustavy sítě a generátoru (za současného dodávání výkonu zátěži) sepnutím stykače *GCB* nebo *MCB* (v závislosti na předcházejícím typu synchronizace). Dodávaný výkon již není ovlivněn charakterem zátěže (jako tomu bylo v případě stavu *Island*), ale musíme jej přímo definovat nastavením parametrů *Base load* (velikost dodávaného činného výkonu) a *Q required* (velikost dodávaného jalového výkonu). Kontrolér totiž kromě uživatelského požadavku na velikost dodávaného výkonu reálně nemá žádnou informaci o podobě zátěže. V naší aplikaci (záložní generátor) považujeme optimální nastavení zmíněných parametrů za takové, kdy právě *Base load* a *Q required* odpovídají odebíraným výkonům dle impedance zátěže (na nominálním napětí a frekvenci). V případě, že zmíněné parametry nenastavíme dle okamžité podoby zátěže, rozdíl vzniklý mezi nastavenými hodnotami výkonů (tedy dodávaným výkonem generátoru) a skutečným požadovaným odběrem je samozřejmě kompenzován ze sítě. Nastavením nižších hodnot výkonů v parametrech *Base load* a *Q required* tak v paralelním provozu vede k odběru ze sítě, neboť nebyla pokryta spotřeba zátěže samotným motorogenerátorem. Při nastavení vyšších hodnot výkonu na generátoru naopak začneme do sítě energii dodávat (nedošlo ke kompletní spotřebě na zátěži).

Generátor v paralelním chodu na modelované tvrdé síti udržuje konstantní výstupní napětí a frekvenci právě dle parametrů sítě a již tedy nemá smysl na tyto veličiny regulovat. Nově ale máme k dispozici požadavek na dodávaný výkon, jehož činnou složku vážeme na moment stroje a jalovou složku na budící proud, regulujeme tak právě na zmíněné výkony.



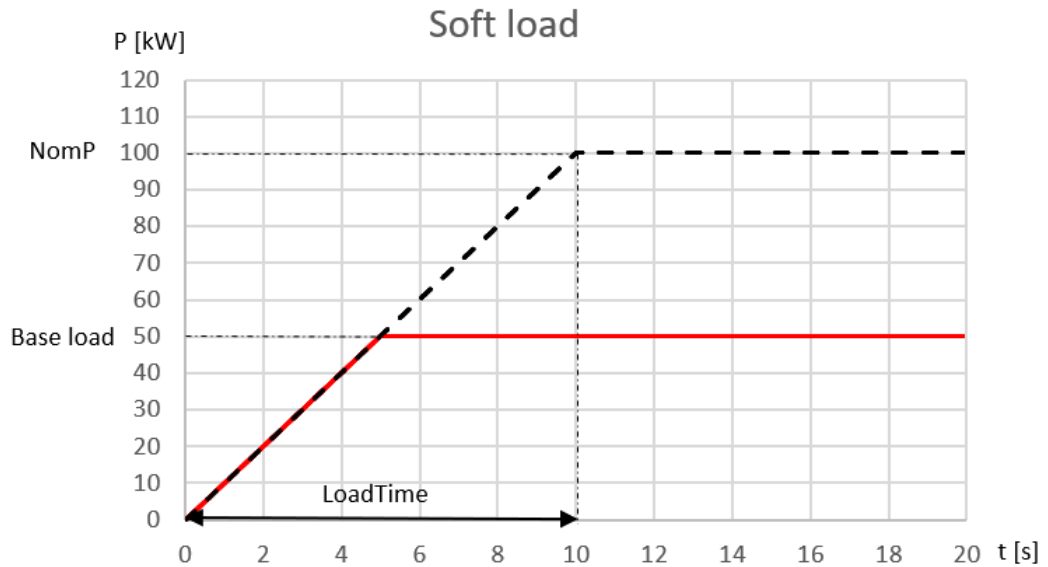
Obrázek 18 PI regulátory pro řízení motorgenerátoru v paralelním režimu

Žádanou hodnotou na vstupu regulátoru otáček je předáváný parametr *Base load* s novým názvem *P_req*. Analogicky reprezentuje žádanou hodnotu regulátoru budícího napětí parametr *Q_req*, zastupující konfiguraci *Q required*. Může nastat situace, kdy obsluha během provozu motorgenerátoru v paralelním režimu uvedené žádané hodnoty výkonů změní (např. při snaze eliminovat odebíraný výkon ze sítě). Z toho důvodu model kontroléru předává žádaným veličinám regulátorů (*P_req* a *Q_req*) vlečný průměr vstupů *Base load* a *Q required*, čímž tvoří rampu a zlepšuje chování systému (nedochází k výrazným výkonovým překmitům).

V případě, že zmizí požadavek na chod motorgenerátoru, přechází automat do stavu *Soft unload* (S8), během něhož probíhá odlehčení generátoru. Alternativní přechod představuje návrat do stavu *Island* (S5), kde v důsledku poruchy sítě (případně stykače) rozepíná *MCB*.

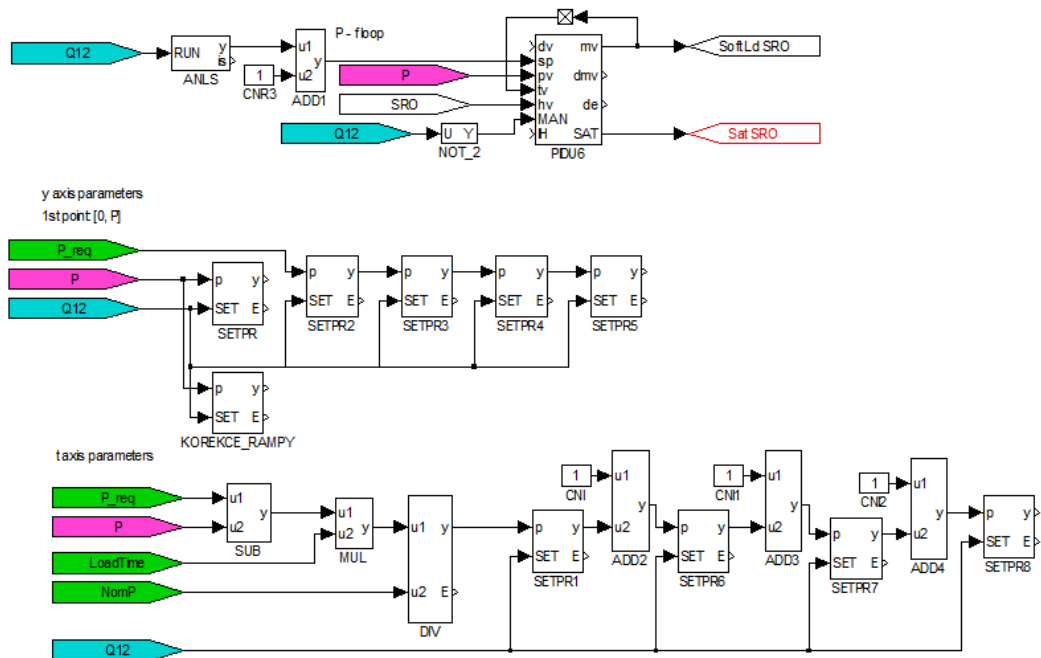
7.2.8 Soft load

Provozu generátoru paralelně na síti, jenž se v rámci svého pracovního cyklu nenacházel v ostrovním režimu (a nevykonal tak zpětnou synchronizaci), předchází stav *Soft load* (S12). Uvedený stav slouží k postupnému zatěžování generátoru na stanovenou mez (*Base load*), tedy k vytvoření lineárního růstu činného výkonu odebíraného z motorgenerátoru. Praktická realizace takové funkce připomíná tvorbu rampy žádané hodnoty výkonu ze stavu *Parallel* (S7). Rozdíl spočívá ve faktu, že zatěžovací křivka je uživatelsky definovaná nominálním výkonem generátoru (*NomP*) a časovým parametrem *LoadTime*, udávajícím dobu dosažení zmíněného jmenovitého výkonu.



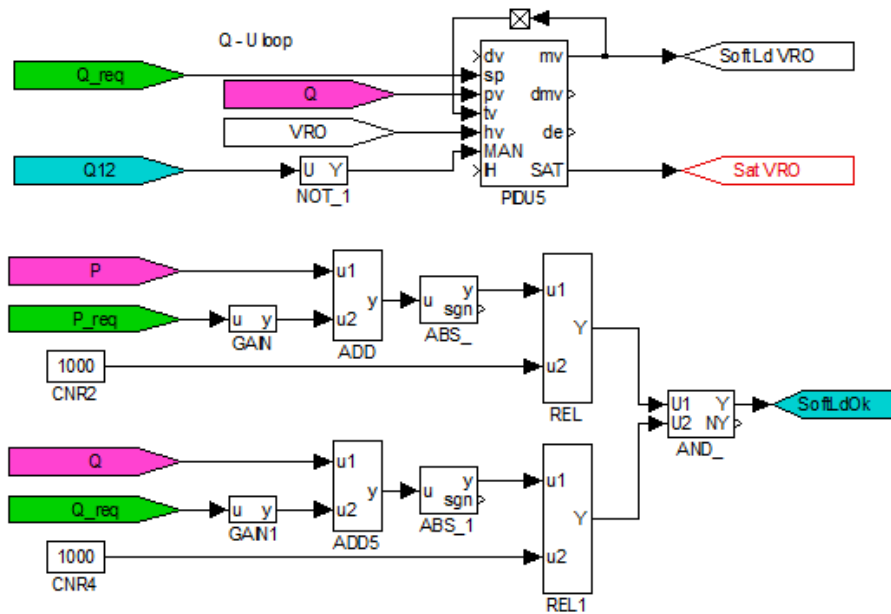
Graf 3 Tvorba žádané hodnoty funkce Soft load

Graf výše zachycuje princip tvorby žádané hodnoty pro regulátor činného výkonu (shodný s regulátorem pro stav *Parallel*), kde obsluha nastavila parametr *Base load* na 50 kW a *LoadTime* na 10 s. Vidíme, že funkce na základě nastavených hodnot (*NomP*, *LoadTime*) vypočítá čas dosažení výkonu *Base load* (tedy P_{req}) a blokem *ANLS* postupně linearizuje průběh žádané hodnoty regulátoru otáček.



Obrázek 19 Funkce pro výpočet linearizovaného zatěžování s regulátorem otáček

Po synchronizaci generátoru se sítí a sepnutí **GCB** není generátor zcela nezátížen, dochází k minimální (nenulové) dodávce výkonu (neboli nelze generátor připojit s ideálním nulovým vyrovnávacím proudem), výpočet zatěžovacího času tak probíhá z onoho okamžitého odebíraného výkonu (ne z nuly patrné v grafu). Uvedené zobecnění navíc umožňuje návrat do stavu **Soft load** během odlehčování generátoru ve stavu **Soft unload** (S8), k čemuž dochází po obnovení žádosti o start zařízení za ukončování jeho provozu. V případě, že z hlediska výkonu činného i jalového bylo dosaženo žádané úrovně zatížení (v tomto případě s tolerancí 1 kW, resp. 1 kVAr) funkce **Soft load** generuje příznak **SoftLdOk** a automat se ocitá ve stavu **Parallel** (S7).

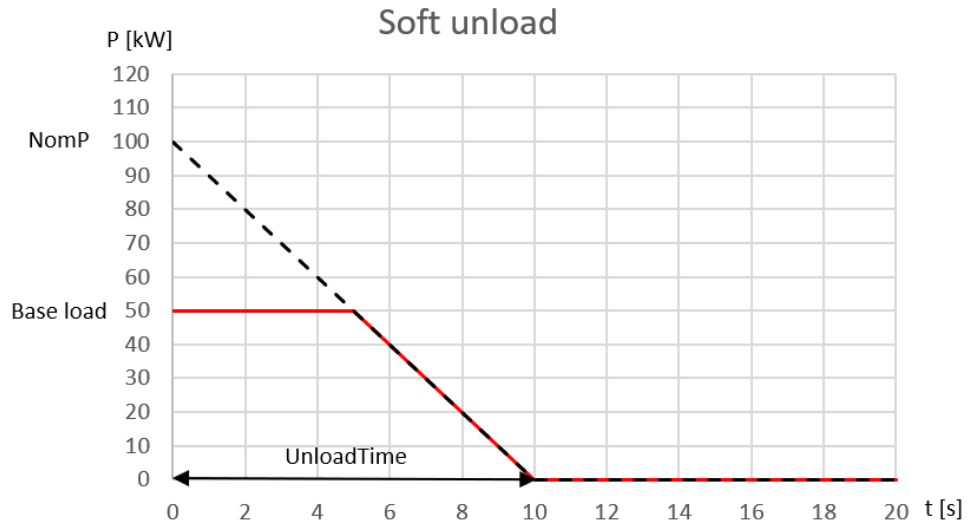


Obrázek 20 Regulátor budicího napětí a vyhodnocení funkce Soft load

Ve chvíli, kdy probíhá postupné zatěžování generátoru však může přijít žádost o vypnutí motorgenerátoru, což znamená, že z dosaženého zatížení generátoru se musíme dostat zpět na téměř nulový výkon, stavu **Parallel** tak není dosaženo a automat překlápí do stavu **Soft unload** (S8). Během zatěžování také může dojít k poruše sítě a rozpojení stykače **MCB**, potom musíme generátor provozovat v ostrovním režimu, což má za následek přechod do stavu **Island** (S5).

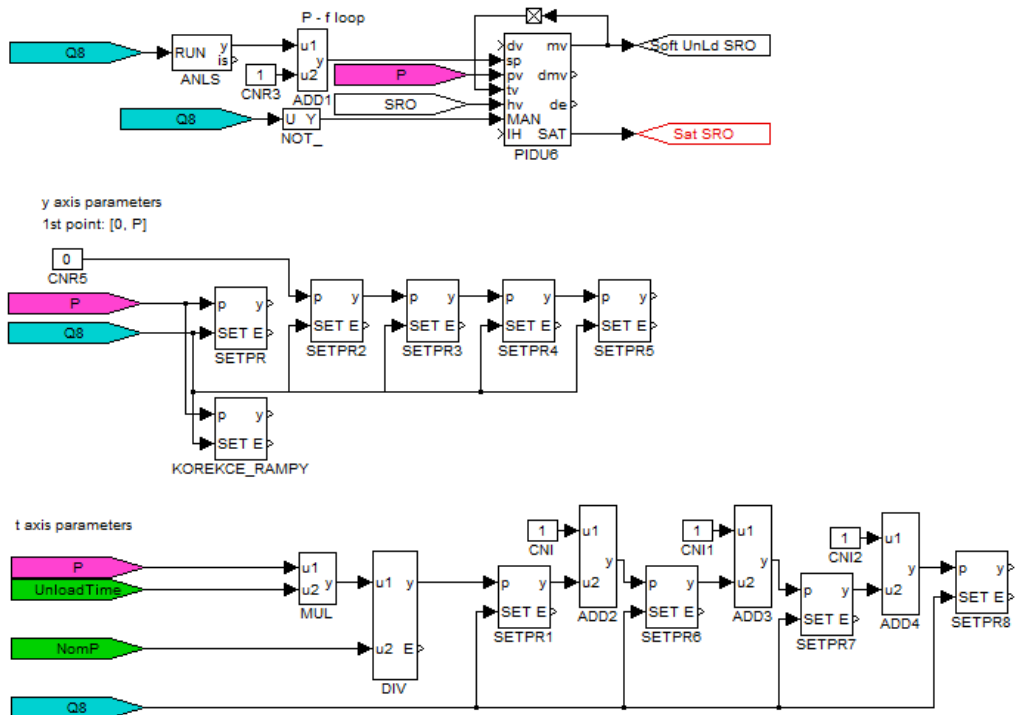
7.2.9 Soft unload

Stav **Soft unload** (S8) svým způsobem představuje antagonistu funkce **Soft load** (S12), přestože pracuje obdobným způsobem. Základní úlohou **Soft unload** je odlehčit generátor a umožnit co možná nejhladší rozpojení **GCB** stykače (tedy s minimálním proudem). Žádaná hodnota výkonu na regulátoru otáček tak v tomto případě představuje rampu klesající k nule parametrizovanou konstantami **NomP** a **UnloadTime**. Analogicky k funkci **Soft load** dochází dle poměru okamžitého odebíraného a nominálního výkonu k výpočtu času odlehčení, přičemž nastavovaný **UnloadTime** odpovídá času dosažení nulového výkonu z hladiny jmenovité.



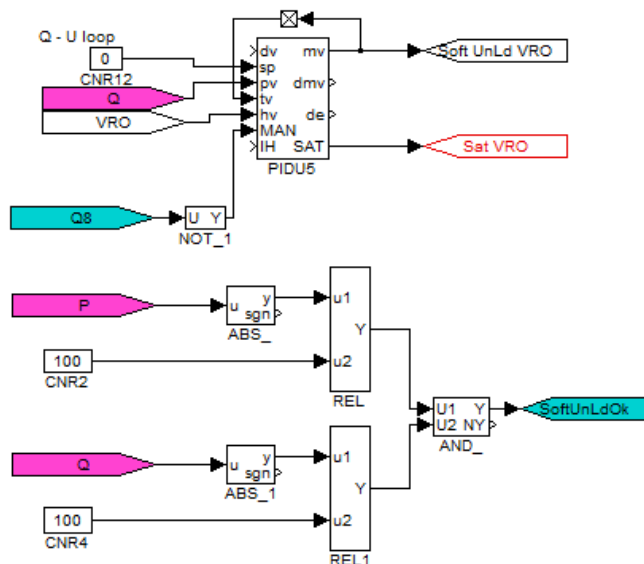
Graf 4 Tvorba žádané hodnoty funkce Soft unload

Z grafu je patrné, že obsluha nastavila parametr **Base load** na 50 kW a **UnloadTime** na 10 s. Reálně potom klesající rampa žádané hodnoty začíná v úrovni okamžitého výkonu generátoru (přibližně tedy **Base load** při přechodu **Parallel – Soft unload**) a čas odlehčení je z tohoto výkonu dopočítán. Ke snižování výkonu nemusí docházet pouze z nastavené hodnoty **Base load**, ale i z libovolné nižší, právě když během stavu **Soft load** (S12) vymizí požadavek na start a pozorujeme přechod **Soft load – Soft unload** (nebylo dosaženo stavu **Parallel**).



Obrázek 21 Funkce pro výpočet linearizovaného odlehčování s regulátorem otáček

Jakmile dodávaný činný výkon nepřesahuje 100 W (jalový 100 VAr), nastavuje funkce *Soft unload* příznak *SoftUnLdOk* a umožní přechod do následujícího provozního stavu *GCB opening* (S9). V případě, že během odlehčování dojde k obnovení požadavku na start a generátor opět musí výkon dodávat, překlápí automat zpět do stavu *Soft load* (s očekávaným dosažením stavu *Parallel*).



Obrázek 22 Regulátor budícího napětí a vyhodnocení funkce Soft unload

Všimněme si, že regulátoru buzení přiřazujeme na žádanou hodnotu přímo nulový jalový výkon (obdobně v případě *Soft load* řadíme na vstup parametr Q_{req}). Funkce postupného zatěžování/odlehčování jsou totiž realizovány pro výkon činný, neboť ten generátor dodává primárně (předpokládá se provoz s vysokým účinníkem, přestože rezervu jalového výkonu k dispozici samozřejmě máme).

7.2.10 GCB opening

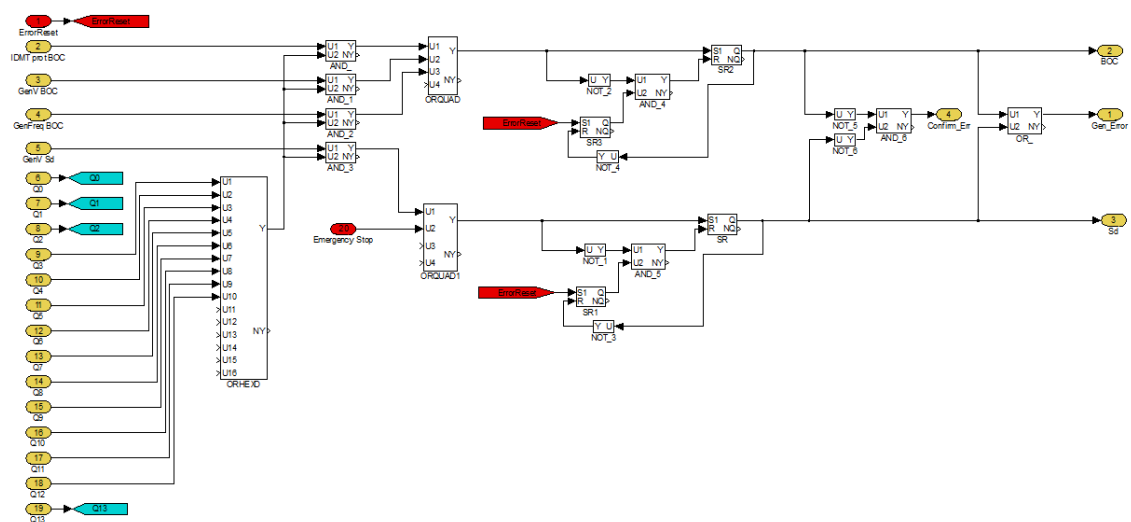
Stejně jako před zahájením dodávky energie bylo nutné propojit generátor se soustavou sítě a zátěže s pomocí stykače *GCB* (stavy S4 a S11), musíme pro ukončení provozu generátor ze soustavy vyjmout. Stav *GCB opening* (S9) tak slouží ke generování povelu pro rozpojení *GCB*, přičemž očekáváme potvrzení úspěšného rozpojení čtením vstupu *GCBfeedback*. Během otevírání *GCB* se již nepředpokládá manipulace se stykačem na straně sítě a v rámci typického cyklu záložního generátoru bývá *MCB* v tomto stavu sepnuto. V případě, že provoz generátoru ukončujeme s rozepnutým *MCB* (tedy nedošlo k obnovení dodávky energie do zátěže), nesmíme generátor v tomto stavu k síti připojovat a vyčkáváme na kompletní průchod přes stav *Ready to load* (za předpokladu že zpozorujeme uzdravení sítě). Přechod do následujícího provozního stavu *Engine stopping* (S1) tak není ani podmíněn vymizením žádosti o start a soustředí se pouze na rozepnutí *GCB*.

7.2.11 Engine stopping

Dosažení stavu **Engine stopping** (S1) umožňuje v rámci standardního provozu generování povelu pro ukončení chodu pohonné jednotky soustavy – diesellového motoru. Došlo k přerušení dodávky elektrické energie z generátoru a motor nyní přechází ze stavu svého FSA **Running** (S4) do stavu **Cooling** (S5). Stavový automat generátoru v tuto chvíli typicky očekává informaci potvrzující zastavení motoru, což mu dovolí překlopit do výchozího stavu **Stopped** (S0). Během prochlazování motoru však může přijít nová žádost o start a FSA motoru vykoná návrat do **Running**. Na tuto skutečnost FSA generátoru reaguje návratem do stavu **Ready to load** (S3), za průchodu stavem **Engine starting** (předpokládáme že při prochlazování udržel výstupní elektrické parametry stabilní) a je připraven vykonat nový pracovní cyklus.

7.3 Chybové stavy a ochrany

Základní koncept řešení chybových přechodů byl téměř kompletně představen u stavového řízení motoru. Do chybového stavu **Error** (S13) lze přecházet z libovolného místa FSA generátoru, přičemž se naplno projevuje dvouúrovňový systém chyb. V případě, že ze stavu, v němž došlo k chybě, přímo přecházíme do **Error**, jedná se o typ poruchy **Sd** (stejnomený příznak chyby). Okamžitě tak generujeme povel pro odstavení motoru a rozpínáme stykač **GCB**. Druhá varianta spočívá v dokončení průchodu cyklů stavových automatů (tj. motorového a generátorového) v rámci odstavení chybou úrovně **BOC** (opět stejnomený příznak), kdy porucha nebyla vyhodnocena jako kritická a bezprostředně neohrožuje zařízení. Pro oba případy však platí, že FSA generátoru ukončuje svou činnost v chybovém stavu, kde očekává kvitování chyby obsluhou.



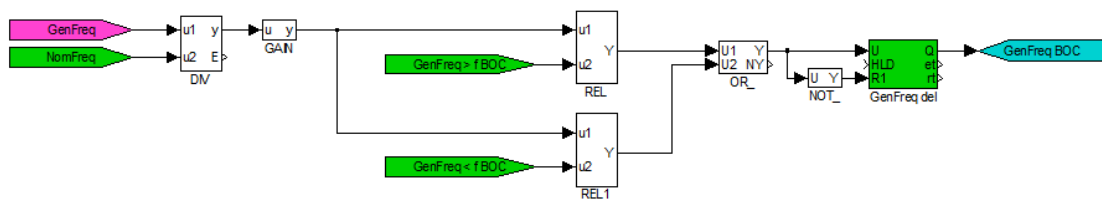
Obrázek 23 Subsystém nastavující chybové příznaky a jejich kvitace

Struktura nastavování chybových příznaků (shrnutých pod společnou vlajku **Gen_Error**) je shodná se systémem FSA motoru. Kvitováním chyby anulujeme obě chybové úrovně naráz (za nastavení **Confirm_Err**). Výstupy **BOC** a **Sd** předáváme stavovému automatu motoru, jenž na jejich základě

rozhodne o výběru zastavovací sekvence (okamžité odstavení nebo dokončení průchodu). Každá z chybových úrovní může být nastavena při detekci vlastní sady chyb, které představují reakce ochrany na nestandardní chování zařízení ve vybraných stavech automatu generátoru. Typické elektrické ochrany (úrovně *BOC*) budou představeny.

7.3.1 GenFreq BOC

První implementovaná ochrana slouží k detekci frekvenční nestability (tedy kolísání otáček) generátoru. Jednoduchým vyčítáním okamžité frekvence výstupního napětí a srovnáním s nastaveným rozsahem rozhodujeme o ukončení provozu motorgenerátoru.

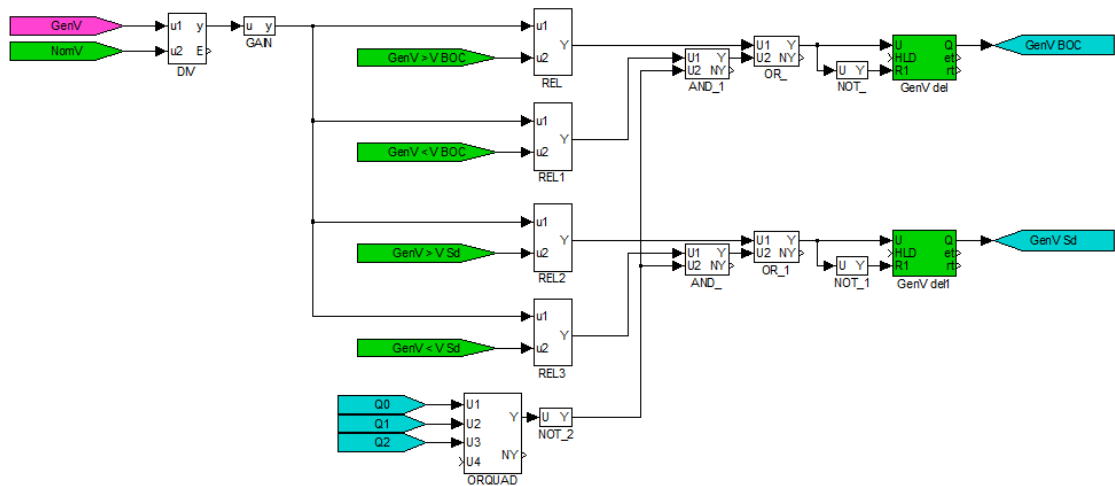


Obrázek 24 Realizace funkce ochrany GenFreq BOC

Příznak *GenFreq BOC* nastavujeme jako aktivní až ve chvíli, kdy se frekvence napětí pohybuje mimo stanovený rozsah pod dobu delší jak časový parametr *GenFreq del*. Tento rozsah definujeme konfigurovatelnými hodnotami *GenFreq > fBOC* (horní mez) a *GenFreq < fBOC* (dolní mez), přičemž se jedná o procentuální vyjádření hranic reakce ochrany.

7.3.2 GenV BOC (a Sd)

Dalším sledovaným parametrem generátoru je jeho efektivní hodnota výstupního fázového napětí. Generátor samozřejmě má definovanou jmenovitou hodnotu fázového napětí parametrem *NomV*, s nímž porovnáváme okamžitou měřenou napětí *GenV*. Na obrázku vidíme, že funkce realizované ochrany vyhodnocuje velikost napětí pro dva rozsahy. Úroveň chyby *BOC* odpovídá jemnějšímu vytyčení intervalu napětí, jenž se na generátoru může objevit (procentuální rozsah nastaven parametry *GenV > VBOC* a *GenV < VBOC*). Chybu *Sd* (tedy přepětí vyžadující okamžité odstavení zařízení) potom analogicky vymezujeme napěťovými hladinami *GenV > VSd* a *GenV < VSd*. V obou případech však na zařízení musíme přepětí (nehledě na úroveň) detekovat alespoň pod dobu *GenV del*.



Obrázek 25 Realizace funkce ochran GenV BOC a GenV Sd

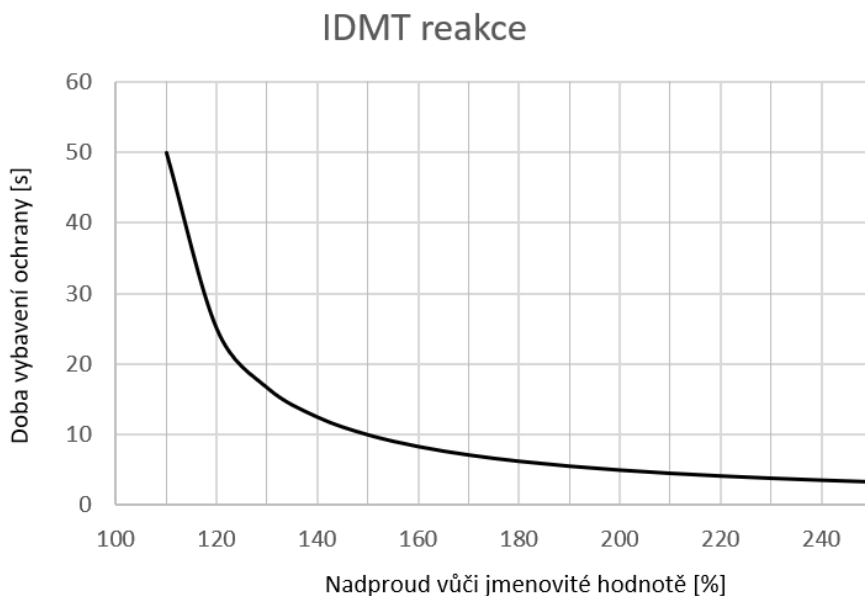
V momentě, kdy ochrana zareaguje na přítomnost přepětí (nebo podpětí), dle dosažené napěťové úrovně dochází k aktivaci výstupů *GenV BOC* nebo *GenV Sd*. Vyhodnocování podpětí blokuje přímo ve funkci pro stavy, kde na generátoru standardně napětí přítomno není, nebo kde se očekává jeho pohyb v širším intervalu (spouštění a vypínání motorgenerátoru), avšak přepětí dále v těchto stavech kontrolujeme.

7.3.3 IDMT protection BOC

Poslední základní elektrickou ochranu představuje funkce pro odstavení generátoru při jeho proudovém přetížení. Princip *IDMT protection BOC* spočívá v proměnném času vybavení ochrany na základě velikosti odebíraného proudu. Uživatel nastavuje dobu reakce pro dvojnásobek deklarovaného jmenovitého proudu parametrem *2Inom del*. Výpočet času vybavení se řídí předpisem [2]:

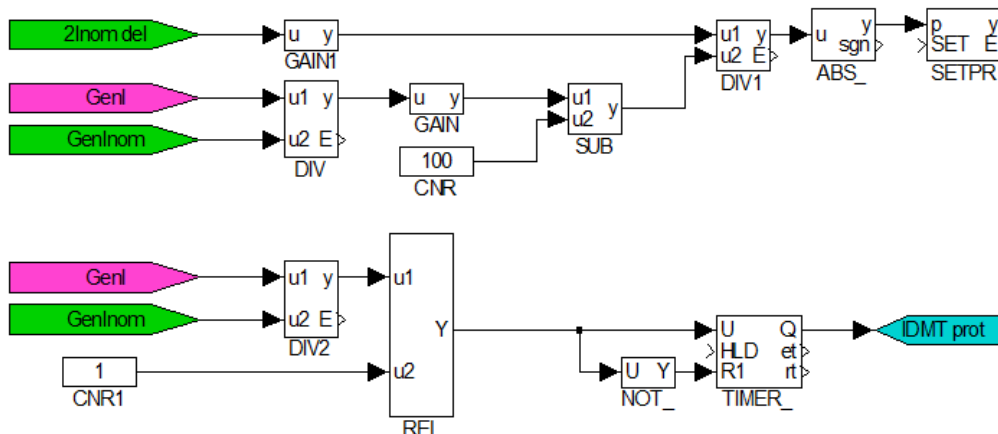
$$t_{vybavení} = \frac{2Inom\ del\ [s] \cdot 100}{Nadproud\ [\%] - 100\ [\%]}$$

Kde nadproud představuje poměr okamžitého měřeného proudu *GenI* a jmenovité hodnoty proudu *GenInom*. Z grafu je patrná závislost času vybavení na velikosti nadproudu pro typickou konfiguraci parametru *2Inom del* = 5 s.



Graf 5 Závislost doby vybavení na nadproudu

Dle vypočtené velikosti nadproudu potom výše uvedeným předpisem stanovíme dobu vybavení ochrany. V případě, že nadproud detekujeme po dobu rovnou nebo delší, než je čas zpožděného sepnutí časovače s nastavenou dobou vybavení (průběžně aktualizována při každé změně poměru *GenI* a *GenInom*), dochází k aktivaci příznaku *IDMT prot.*, jenž generuje chybový signál *BOC* úrovně.

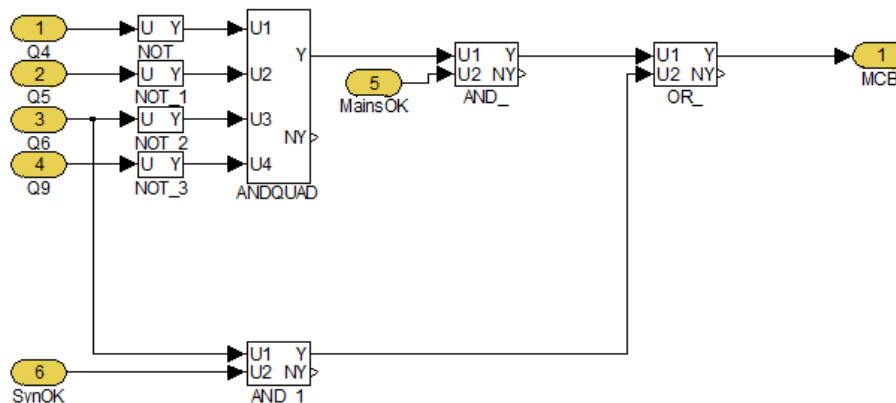


Obrázek 26 Bloková realizace funkce IDMT protection BOC

7.4 Logika řízení stykačů

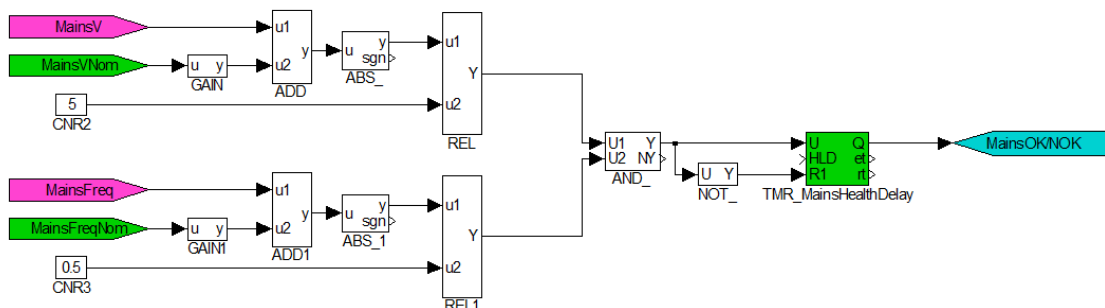
Kromě stavového automatu disponuje řídicí jednotka elektrické části systému kombinační logikou pro řízení stykačů *MCB* a *GCB*. Dosažení určitého stavu potom budí funkci, jež stykač na straně sítě a generátoru spíná či rozpíná. Ve chvíli, kdy jsme v provozních stavech mluvili o ovládání zmíněných stykačů, vždy došlo k aktivaci výstupu právě této logiky.

Za součást ovládání stykače **MCB** můžeme považovat i detekci zdraví sítě, neboť řídicí logika **MCB** stykače se primárně snaží připojit zátěž na síť, kdykoliv je síť k dispozici (tedy funkční). Fakticky **MCB** stykač můžeme spínat vždy, když detekujeme aktivní síť bez závady a stavový automat generátoru se nenachází v ostrovním režimu (nebo stavech přidružených).



Obrázek 27 Logika řízení MCB

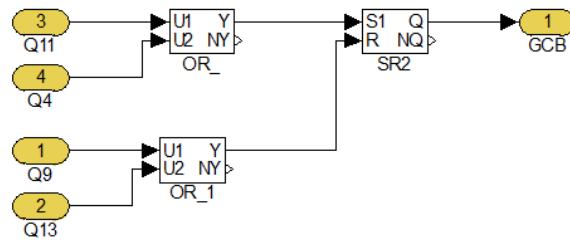
Z logiky řízení **MCB** by mělo být patrné, že generování signálu sepnutí síťového stykače blokuje ve stavech **GCB closing island** (S4), **Island** (S5), **Reverse synchronization** (S6) a **GCB opening** (S9). V případě, že došlo k úspěšnému sfázování generátoru se sítí ve stavu **Reverse synchronization**, můžeme **MCB** spínat, čímž dojde k přechodu do paralelního provozu generátoru na síti.



Obrázek 28 Detekce zdraví sítě

Vstup **Mains OK** figurující v kombinační logice řízení **MCB** odpovídá okamžitému stavu výstupu **MainsOK/NOK** funkce detekce zdraví sítě. Abychom síť mohli prohlásit za funkční, měřené napětí a frekvence sítě musí ležet minimálně po dobu nastavenou časovačem **TMR_MainsHealthDelay** ve stanoveném rozsahu, což má za následek sepnutí **MCB** (v povolených stavech). Bez časového podmínění stability bychom pozorovali opakované nežádoucí spínání síťového stykače během kolísání parametrů sítě.

Jednodušší strukturou řízení disponuje stykač na straně generátoru – **GCB**. Signál sepnutí **GCB** generujeme vždy dosažením stavů **GCB closing island** (S4) a **GCB closing parallel** (S11), jež ve stavovém diagramu existují pouze pro účely spínání **GCB** a potvrzení sepnutí (**GCBfeedback**). Zatímco stykač **MCB** udržuje sepnutý podmínka funkční sítě, **GCB** nastavujeme fixně SR blokem.

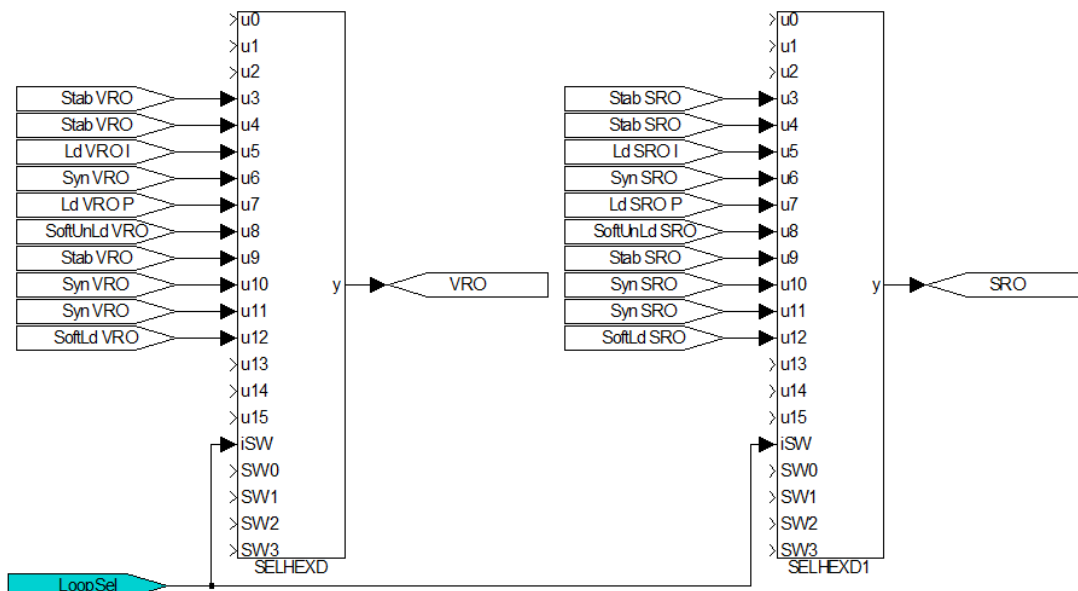


Obrázek 29 Logika řízení GCB

Standardní rozpojení stykače na straně generátoru nastává ve stavu **GCB opening** (S9), kdy provoz generátoru ukončujeme. Dalším možným vstupem resetu SR bloku je stav **Error** (S13), neboť při detekci chyby typu *Sd* musí dojít k okamžitému odpojení zařízení ze soustavy zátěže a sítě.

7.5 Beznárazové přepínání regulátorů

V popisech provozních stavů jsme ukázali, že řízení otáček motoru a budicího proudu generátoru není realizováno jedinou dvojicí regulátorů, ale dle vybraného režimu (resp. okamžitého stavu) regulujeme na různé veličiny. Aktivní výstupní veličiny regulátorů jsou předávány modelu motorgenerátoru parametry **SRO** (otáčky) a **VRO** (buzení). Hodnoty těchto parametrů určujeme na základě stavu dosaženého automatem generátoru (informace nesena vnitřní proměnnou *LoopSel*), kdy přepínač signálu přiřazuje hlavním **SRO/VRO** výstupům podružnou dvojici výstupních veličin regulátorů specifických pro daný stav (veličiny náležící jednotlivým stavům v tabulce). Ve stavech, jež v tabulce zaneseny nejsou, nedochází k regulaci soustavy motorgenerátoru kontrolérem.

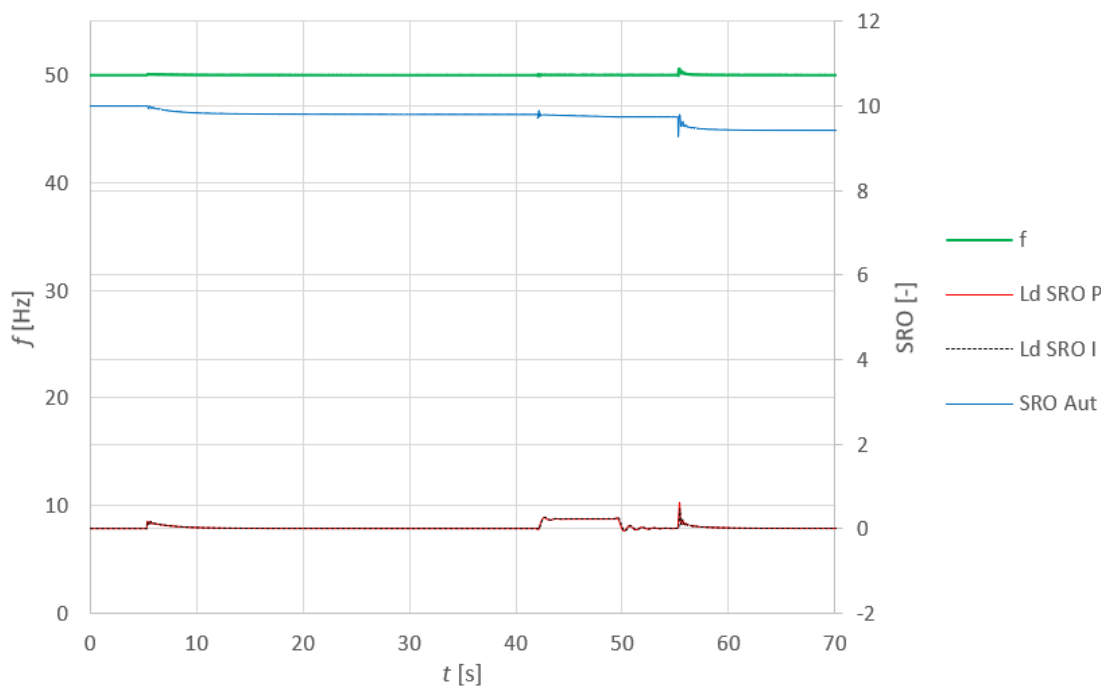


Obrázek 30 Přepínač výstupních veličin regulátorů

Tabulka 5 Aktivní výstupní veličiny regulátorů dle stavů

SRO	VRO	Stav
<i>Stab SRO</i>	<i>Stab VRO</i>	<i>Ready to load (S3)</i>
<i>Stab SRO</i>	<i>Stab VRO</i>	<i>GCB closing island (S4)</i>
<i>Ld SRO I</i>	<i>Ld VRO I</i>	<i>Island (S5)</i>
<i>Syn SRO</i>	<i>Syn VRO</i>	<i>Reverse synchronization (S6)</i>
<i>Ld SRO P</i>	<i>Ld VRO P</i>	<i>Parallel (S7)</i>
<i>SoftUnLd SRO</i>	<i>SoftUnLd VRO</i>	<i>Soft unload (S8)</i>
<i>Stab SRO</i>	<i>Stab VRO</i>	<i>GCB opening (S9)</i>
<i>Syn SRO</i>	<i>Syn VRO</i>	<i>Synchronization (S10)</i>
<i>Syn SRO</i>	<i>Syn VRO</i>	<i>GCB closing parallel (S11)</i>
<i>SoftLd SRO</i>	<i>SoftLd VRO</i>	<i>Soft load (S12)</i>

Z hlediska regulace soustavy nastává problém při změně výstupů regulátorů, jež řídí na různé veličiny (např. přechod *Parallel – Island*). Přepnutí výstupu regulátoru vede ke skoku na vstupu akčního členu (SG, potažmo AVR), na což regulovaná soustava reaguje zásadní úpravou regulované veličiny, jež má za následek vznik (většinou) velké regulační odchylky a nepříznivé odezvy regulátoru. Rozdílnosti výstupních veličin regulátorů jsou ilustrovány na grafu níže, jež zaznamenává část synchronizační sekvence a uvedený příklad přechodu z paralelního do ostrovního režimu.



Graf 6 Časový průběh výstupních veličin regulátorů rychlosti a frekvence napětí na generátoru

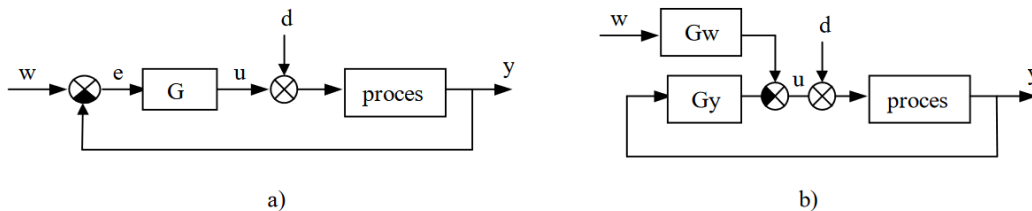
Výstupy regulátoru *Ld SRO P* (paralelní chod) a *Ld SRO I* (ostrovní režim) používáme v modelu pro řízení otáček spalovacího motoru. Uvedené regulátory mají aktivní funkci sledování okamžité hodnoty *SRO*, na niž se během své nečinnosti adaptují (přepočtem implementovaném přímo v bloku PI regulátoru, proto se překrývají). V případě, že bychom uvedené funkce nevyužili, v místě přechodu z paralelního chodu do ostrovního (na grafu přibližně v čase 55 s) dojde k předání hodnoty *SRO Aut* na vstup akčního členu (SG). Potom bychom sledovali krátkodobé urychlení motoru (nárůst frekvence),

neboť výstup z regulátoru bez aktivního sledování se v tomto případě blížil maximální saturační mezi a následující náhlé přibrzdění motoru (důsledek zvýšení regulační odchylky). Uvedené chování je v praxi nežádoucí a může vést i k poškození zařízení.

Veškeré použité regulátory v modelu tak mají výše popsanou funkci sledování aktuální výstupní veličiny aktivního regulátoru spuštěnou (mimo svůj pracovní stav fungují v manuálním režimu, propisují na svůj výstup okamžitou hodnotu používaného **SRO** nebo **VRO**), čímž zajišťujeme právě beznárazovost přepínání (též známé jako „*bumpless switch*“).

7.6 Seřízení regulátorů

Funkční regulace napětí, frekvence, případně výkonů můžeme docílit jedině vhodným seřízením PI regulátorů zajišťujících regulaci na požadované veličiny dle dosaženého provozního stavu. V prostředí REXYGEN Studio bylo pro realizaci všech regulátorů využito bloku PIDU s dvěma stupni volnosti. Tento regulátor tak umožňuje separátní seřízení optimálního potlačení vnější poruchové (d) veličiny a tvaru odezvy na skokovou změnu žádané hodnoty (w), čehož v klasické regulační smyčce nelze docílit, neboť na podobu výstupní veličiny má vliv pouze regulační odchylka (e) [16].



Obrázek 31 a) regulátor s jedním stupněm volnosti

b) regulátor s dvěma stupni volnosti

[převzato z 16]

Z popsané vlastnosti potom vychází použitá varianta řídicího zákona pro námi používané regulátory:

$$U(s) = \pm K \left\{ bW(s) - Y(s) + \frac{1}{T_i s} [W(s) - Y(s)] + \frac{T_d s}{\frac{T_d}{N} s + 1} [cW(s) - Y(s)] \right\} + Z(s)$$

Kde $U(s)$ představuje Laplaceovu transformaci výstupní řídicí veličiny (tedy **SRO** nebo **VRO**), $W(s)$ je Laplaceova transformace žádané hodnoty a $Y(s)$ vyjadřuje Laplaceovu transformaci veličiny regulované (dopředné vazby $Z(s)$ není u žádného z regulátorů využito). Konstanty K, T_i, T_d, N, b, c jsou parametry regulátoru. Dále v bloku regulátoru musíme korektně nastavit časovou konstantu vysledování, jež zajišťuje beznárazové přepínání manuálního a automatického režimu (viz kapitola 7.5) spolu s antiwindup efektem na saturačních mezích konfigurovaných parametry *hilim* a *lolim* [17].

Tabulka 6 Popis konfigurovatelných parametrů PIDU[17]

Konstanta	Popis
K	Zesílení regulátoru
T_i	Integrační časová konstanta
T_d	Derivační časová konstanta
N	Filtr derivační složky
tt	Konstanta vysledování $2\sqrt{T_i}$ pro PI regulátor
b	Váhový faktor proporcionální složky
c	Váhový faktor derivační složky
$hilim$	Horní saturační mez
$lolim$	Dolní saturační mez

Zásadní problém seřizování námi použité regulační soustavy spočívá ve faktu, že vlivem vzájemného provázání regulovaných veličin, nemůžeme činnosti aktivních dvojic regulátorů otáček a buzení oddělit. Taková snaha má vždy za následek nedefinované chování regulovaného systému motorgenerátoru a ztrácíme možnost dostat soustavu na mez stability (a použít Ziegler-Nicholovu metodu). Uvedený problém je nejvíce citelný v případě regulace na činný a jalový výkon, tedy v paralelním chodu se sítí. Seřízení regulátorů probíhalo čistě experimentálně, kdy jsme v prvním kroku pracovali pouze se zesílením regulátorů **SRO** a **VRO**, u kterých jsme hledali takovou kombinaci parametrů K , jež při skokové změně žádané hodnoty (P a Q) nevedla k okamžitému zásahu regulátorů v hraničních saturačních mezích. Po nalezení vhodných parametrů K , již pouze stačilo stanovit integrační časové konstanty. Ze sledovaných průběhů odezvy regulovaných veličin na změny výstupů **SRO** a **VRO** za současného zkoumání času dosažení žádaných hodnot lze do jisté míry odhadnout integrační časovou konstantu jako poměr K a K_i , kde s vyšší hodnotou K_i (resp. menším T_i) klesne doba regulace za cenu překmitu. Kvalitní odezvu potom může představovat maximálně jeden překmit s jedním podkmitem následovaný ustálením na žádané hodnotě.

Tabulka 7 Finální nastavení parametrů regulátorů

Regulátor	Typ	K	T_i	b	tt
SRO stabilizace, ostrov	PI	0,1	0,1	1	0,632
VRO stabilizace, ostrov	PI	0,5	0,1	1	0,632
SRO paralelní chod, soft load, soft unload	PI	0,0001	0,025	1	0,316
VRO paralelní chod, soft load, soft unload	PI	0,001	5	1	4,472
SRO synchronizace frekvence	PI	0,1	0,2	1	0,632
SRO synchronizace úhlu	PI	0,1	1,5	1	2,447
VRO synchronizace napětí	PI	0,5	0,1	1	0,632

Saturační meze jsou pro všechny regulátory **SRO** shodné, $hilim = 10$ a $lolim = -10$. U regulátorů **VRO** se saturační mez dopočítává na základě aktuálního nastavení hodnoty **Voltage bias**, přičemž výchozí horní saturační mez odpovídá $hilim = 100$ a výchozí dolní saturační mez $lolim = 0$. Blokům PIDU (PI regulátorům) potom předáváme nové limity definované jako $hilim - Voltage\ bias$ a $lolim - Voltage\ bias$.

Pro funkci modelu je zcela zásadní podoba výstupů **SRO** a **VRO** regulátorů. Výstupní veličiny svou výchozí úrovní určují nominální hodnoty frekvence (resp. otáček, **SRO** = 0 odpovídá v naší konfiguraci 50 Hz) a buzení ($VRO = 0 + Voltage\ Bias$ zase výstupnímu napětí 230 V), což se projeví zejména v ostrovním provozu (případně při nastartovaném a nabuzeném motorgenerátoru s rozepnutým **GCB**). V paralelním provozu potom efektivní hodnotu napětí a frekvenci drží síť (tj. úrovně se v tomto režimu nemění) a změny v činné a jalové dodávce výkonu definují pulzy udávající žádosti pro akční členy (SG nebo AVR), jež sami o sobě taktéž pracují jako regulátory. Požadavky pro zmíněné systémy regulace otáček a buzení tak v modelu vnímáme jen jako posloupnost signálů, jejichž orientace (kladné, záporné) reprezentuje potřebu navýšení/snížení otáček nebo budicího proudu. Nikdy však z tohoto průběhu nemůžeme usoudit, jakou okamžitou úroveň disponují SG a AVR (opomineme-li odezvy na generované signály).

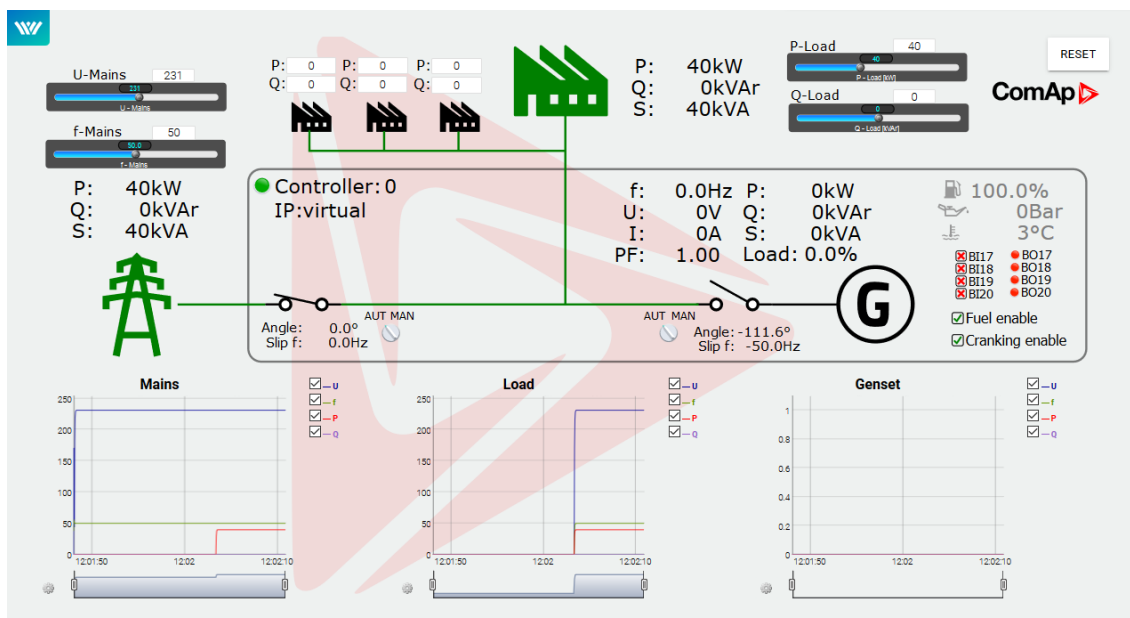
8 Testování funkce kontroléru

K ověření funkčnosti navrženého kontroléru propojíme vytvořený řídicí systém se simulací motorgenerátoru. Součástí simulace je i model sítě a zátěže s nastavitelným příkonem. Základní ovládání modelu lze realizovat přes webové rozhraní (HMI), v němž vytvoříme výpadek sítě a definujeme podobu zátěže. Ovládání kontroléru zprostředkovávají binární vstupy (BI17 – BI20), k nimž jsme přiřadili řídicí prvky dle přiložené tabulky. Webové rozhraní navíc disponuje orientačním zobrazením vybraných měřených veličin v reálném čase, avšak pro demonstraci funkce kontroléru využijeme data exportovaná přímo z modelu v prostředí REXYGEN Studio.

Tabulka 8 Přiřazení ovládacích prvků modelu k webovému rozhraní

Binární vstup	Odpovídající vstup modelu
BI17	<i>MAN/OFF</i>
BI18	<i>Start/Stop</i>
BI19	<i>Emergency stop</i>
BI20	<i>Error reset</i>

Kromě měřených parametrů výstupního napětí generátoru a informací o poskytovaném výkonu vidíme i okamžité polohy stykačů **MCB** a **GCB**. Zmíněné stykače v rámci simulace ponecháme v automatickém režimu, což znamená, že **MCB** a **GCB** budou ovládány řídicími signály tvořenými přímo našim kontrolérem. Ilustrační obrázek webového rozhraní zachycuje stav bezprostředně po spuštění simulace, kdy řídicí systém připojil čistou činnou zátěž (o příkonu 40 kW) ke zdravé síti a motorgenerátor setrvává v režimu **OFF**. Síťové napětí a frekvenci lze nastavovat na jezdcích nacházejících se nad symbolem sítě (zde efektivní hodnota fázového napětí 231 V a frekvence 50 Hz).

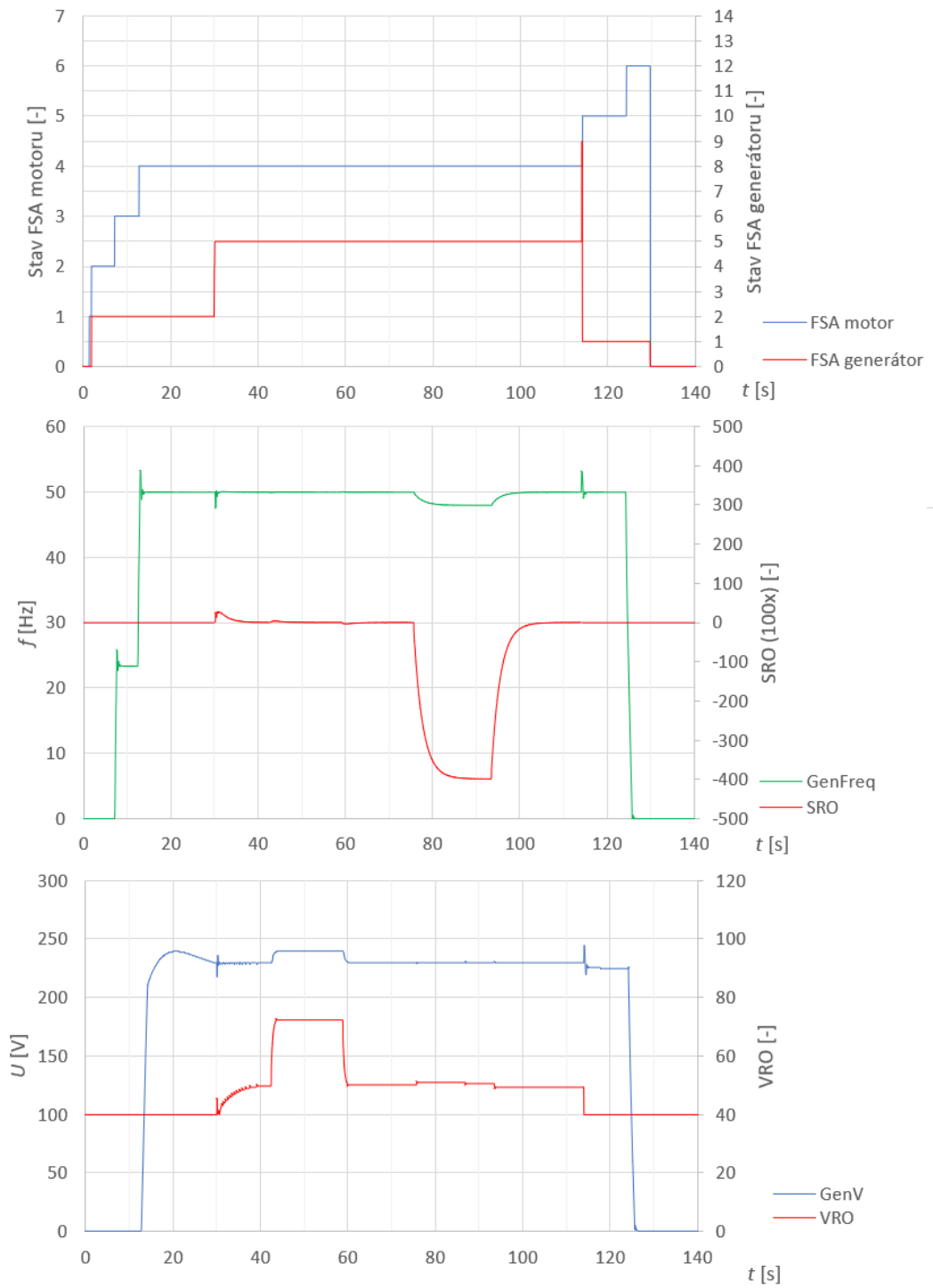


Obrázek 32 Webové rozhraní simulace

Pro testování řídicího systému vytvoříme několik scénářů běhu zařízení. V rámci testování se pokusíme pokrýt typické průchody provozními stavy FSA motoru i generátoru, přičemž důraz bude kladen na přechody mezi těmito stavy, tvorbu specifických řídicích signálů a činnost regulátorů. Neméně důležitý segment demonstrace funkce kontroléru představují chybové přechody a reakce ochran. K tomuto účelu lze použít přiřazený vstup *Emergency stop*, vyvolávající chybu úrovně *Sd*. Vzhledem k tomu, že v simulaci nemáme možnost vytvořit chybu, jež by aktivovala ochranu typu *BOC*, ukázkou chování pro tento případ realizujeme změnou citlivosti ochrany přímo v masce předváděné funkce.

8.1 Ostrovní provoz

Nejjednodušším případem činnosti motorgenerátoru je běh v čistě ostrovním režimu. Po celou dobu simulace není k dispozici síť a výkon zátěži dodáváme pouze v případě, že na ni generátor připojíme. Soustavu regulujeme na frekvenci a napětí, kdy žádané hodnoty těchto veličin představují parametry *NomV* (230 V) a *NomFreq* (50 Hz). Abychom mohli demonstrovat činnost regulátorů, musíme změnit právě hodnoty požadovaného napětí a frekvence. V případě provozu v ostrovním režimu totiž funkce námi používaných regulátorů nahrazují nadřazené regulátory SG a AVR, jež jsou řízeny pomocí ECU motorgenerátoru a přímo zodpovídají za dodávaný výkon. Průběhy výstupů *SRO* a *VRO* sice budou okamžitým odebíraným výkonem korelovány (pokouší se o regulační zásah), avšak jejich výstupy SG spolu s AVR ignorují. Graf 7 zaznamenává překlápění stavů subsystémů řízení motoru a generátoru s průběhem výstupních veličin *SRO* a *VRO*. K propojení soustavy se zátěží došlo v čase $t = 30$ s, přičemž můžeme pozorovat zahájení regulace napětí na výstupu generátoru náběhem řídicí veličiny *VRO* z úrovně *Voltage Bias* na hladiny odpovídajících okamžitým požadavkům na napětí. *SRO* se zpočátku snaží kompenzovat přechodový děj po propojení soustav v čase $t = 75$ s reaguje na nový požadavek otáček (frekvence).

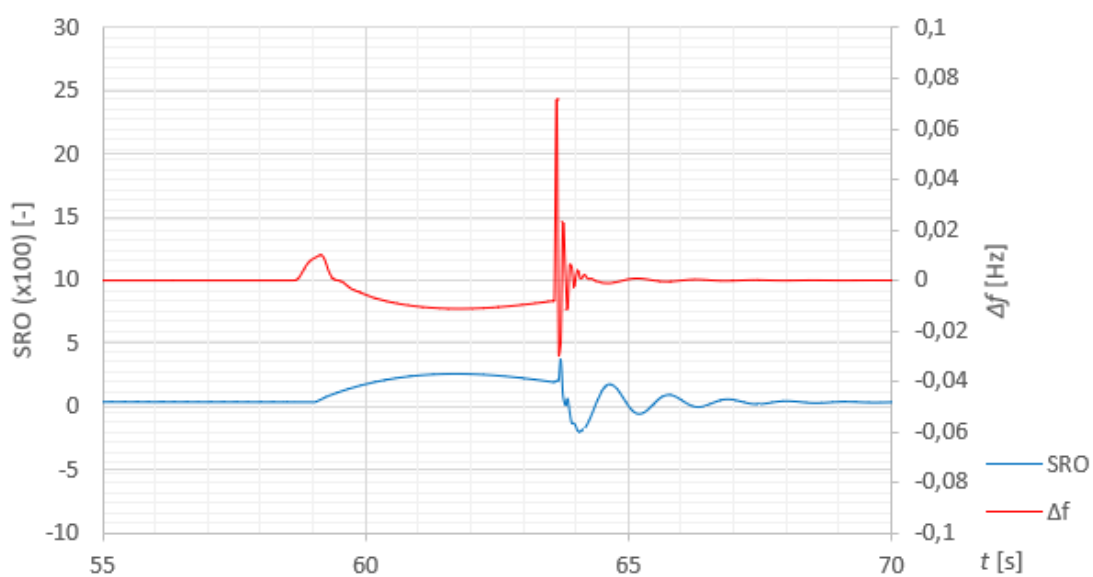
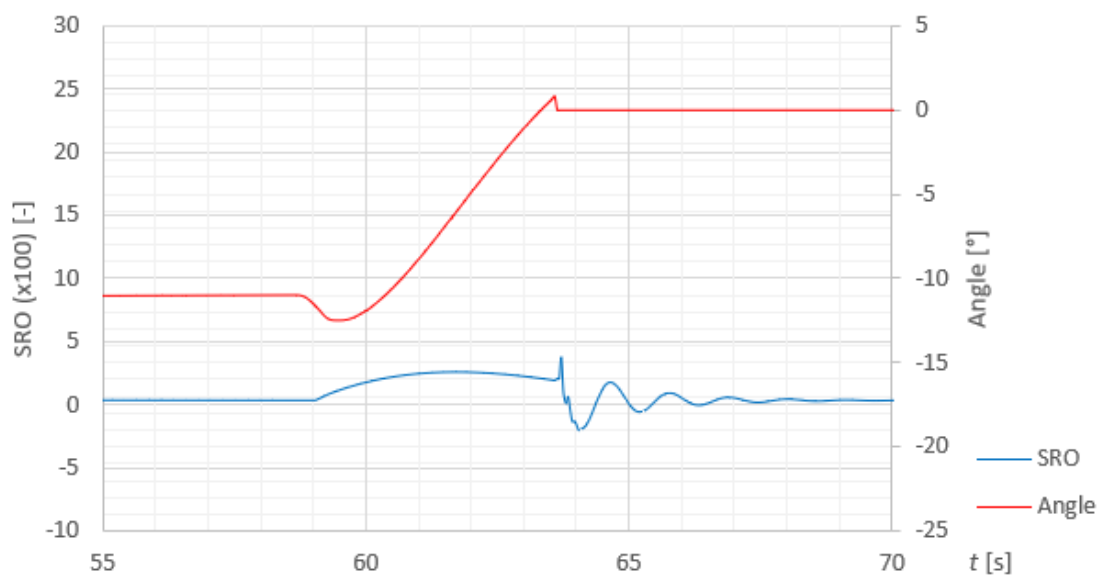
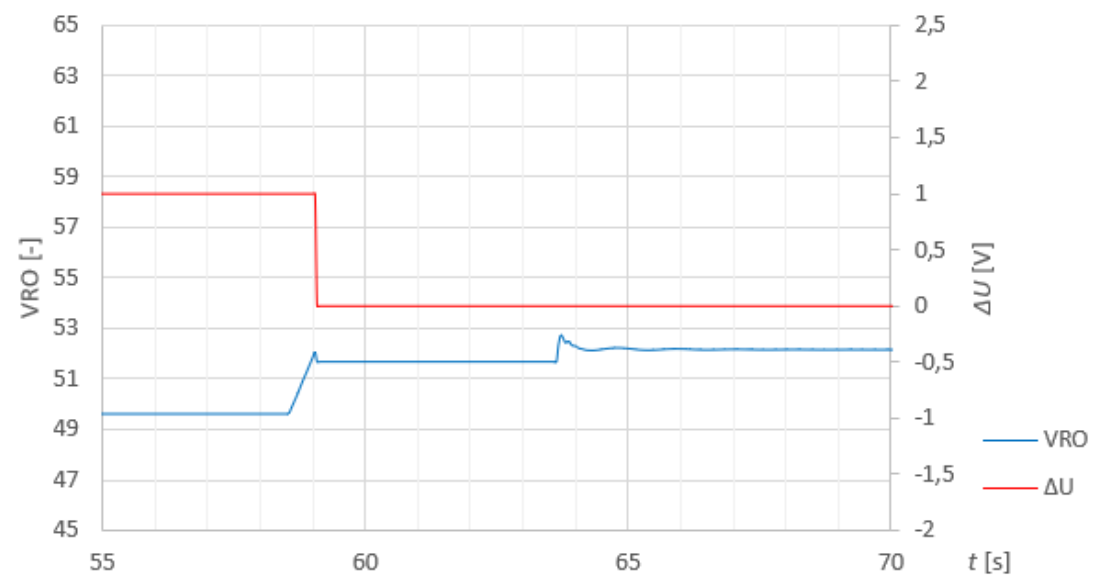


Graf 7 Záznam průchodu stavových automatů v ostrovním provozu s regulací na frekvenci a napětí

8.2 Ostrovní provoz s návratem do paralelního chodu

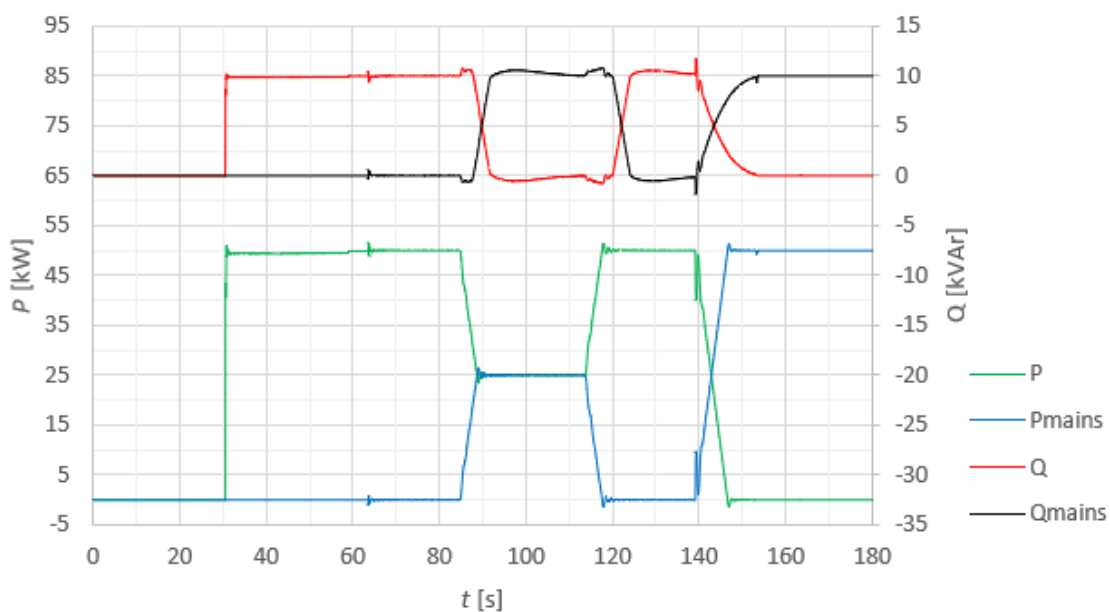
Další zkoumaný scénář představuje typický provozní cyklus záložního generátoru, tedy zahájení činnosti v ostrovním režimu během poruchy sítě s následnou zpětnou synchronizací do paralelního chodu ve chvíli, kdy síť vykazuje standardní parametry. V rámci této simulace navíc ukážeme, jak se projeví neobvyklá změna nastavení parametrů **Base load** a **Q required** (tedy žádaných veličin regulátorů otáček a buzení) během práce generátoru na síti s konstantní zátěží.

Zahájení činnosti motorgenerátoru je shodné s testem v ryze ostrovním provozu (spínání **GCB**, regulace na frekvenci a napětí). Změna však přichází právě ve stavu **Island** (stav 5 FSA generátoru), kdy řídicí subsystém elektrické části detekuje zdravou síť. V tomto okamžiku je kontrolér nucen vykonat zpětnou synchronizaci a pokračovat v paralelním režimu (stav S7 – **Parallel**). Odběr zátěže byl nastaven na 50 kW a 10 kVAr (induktivní charakter). Dle těchto hodnot došlo i ke konfiguraci parametrů **Base load** a **Q required**. Po dokončení synchronizační sekvence tak lze očekávat hladký přechod z ostrovního do paralelního provozu, neboť dodávaný výkon zůstane neměnný a žádané hodnoty výkonů na regulátorech budou prakticky totožné s okamžitým měřeným výkonem. Jinými slovy, optimálním nastavením výše zmíněných parametrů odpovídajících reálným potřebám zátěže zamezíme výraznému regulačnímu zásahu po sepnutí **MCB**.



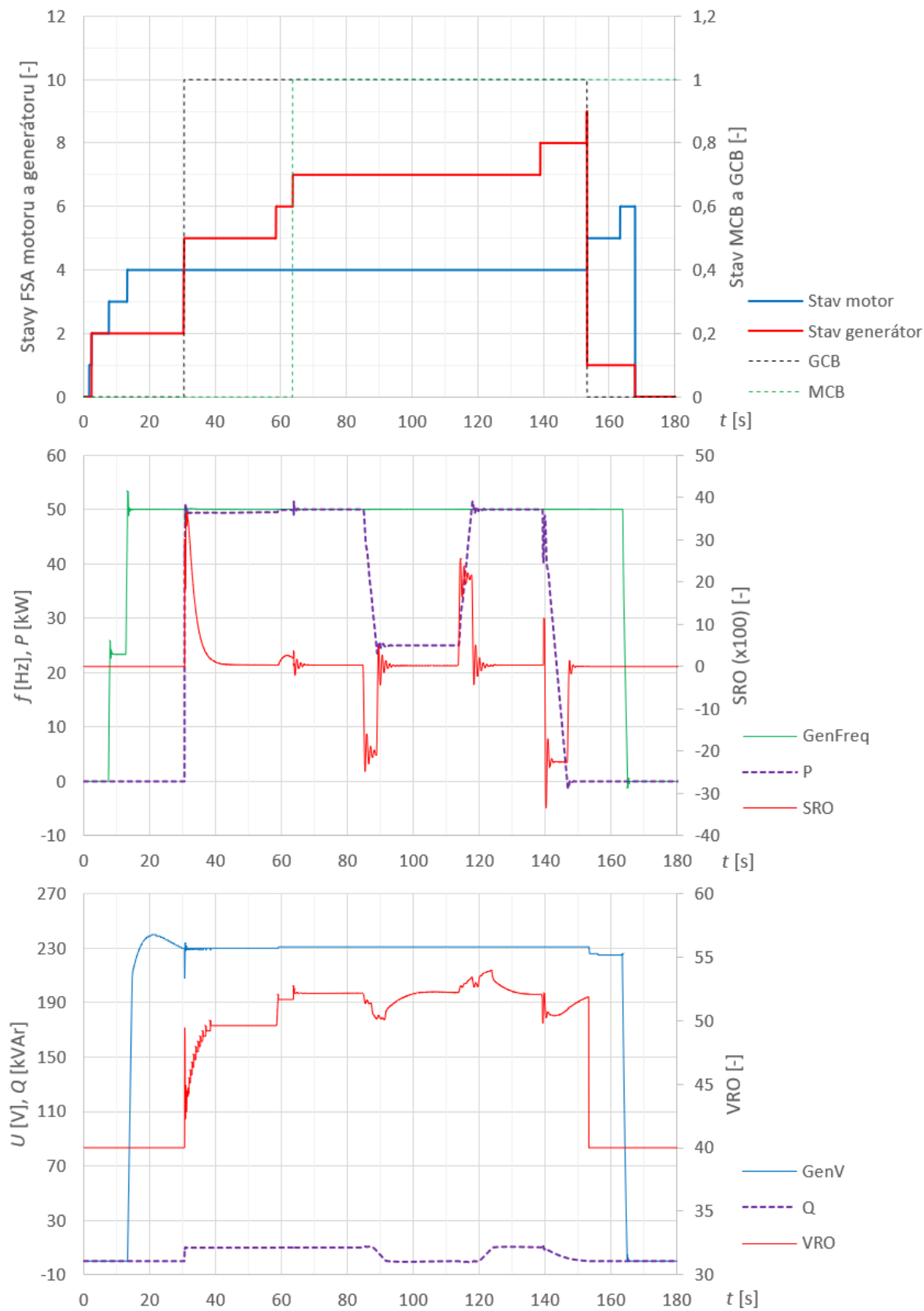
Graf 8 Průběhy synchronizační sekvence

Zpětnou synchronizaci zahajujeme porovnáním výstupního napětí generátoru se sítí. Z časového průběhu výstupní veličiny regulátoru buzení (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**) vidíme, že rozdíl mezi napětím sítě a napětím na generátoru činil 1 V (síťové napětí bylo cíleně nastaveno na vyšší hodnotu). Drobným přibuzením generátoru (změna výstupu *VRO* o 2 % z regulačního rozsahu) prakticky okamžitě dochází ke srovnání napěťových hladin. Paralelně s tímto dějem začíná regulátor otáček eliminovat rozdíl ve frekvencích napětí generátoru a sítě. V zaznamenaném průběhu (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**) již frekvence leží v tolerančním pásmu (generátor v ostrovním režimu udržoval frekvenci napětí shodnou se sítí) vymezeném pro přepnutí vstupu nového *SRO* (viz kapitola 7.2.6) na jemné dotažení úhlu. Časově nejnáročnějším dějem tak je právě odstranění fázového rozdílu měřených napětí, kdy od začátku synchronizace až k sepnutí *MCB* (přechodný děj v čase $t = 101$ s) uběhlo přibližně 45 s.



Graf 9 Průběhy okamžitých činných a jalových výkonů odebíraných z generátoru a sítě

Chování soustavy po zahájení paralelního provozu generátoru na síti asi nejlépe reprezentuje Graf 9. Do místa sfázování generátoru se sítí probíhá regulace na frekvenci a napětí. Připojením na síť začínáme regulovat na výkon, přičemž kolem času $t = 85$ s dochází ke změně nastavení kontroléru. Generátor má nově dodávat pouze činný výkon 25 kW. Vzhledem k tomu, že charakter zátěže zůstává neměnný, požadovanou spotřebu zátěže pokrývá síť. Okamžitý odebíraný výkon ze sítě odpovídá měřeným veličinám $P_{mains} = 25$ kW a $Q_{mains} = 10$ kVAr. Přibližně po 30 s popsaného provozu vracíme nastavení parametrů *Base load* a *Q required* do výchozích hodnot, což má za následek odlehčení sítě a převzetí celé spotřeby zátěže generátorem. Generátor dodává výkon dalších 20 s, než zmizí požadavek na start (obsluha vypíná motorgenerátor). Stavový automat zodpovědný za řízení elektrické části systému vstupuje do nového provozního stavu *Soft unload* (S8), v němž odlehčujeme generátor podle funkce popsané v kapitole 7.2.9. Po dokončení odlehčení generátoru pokrývá síť kompletně spotřebu zátěže (stykač *MCB* samozřejmě udržujeme sepnutý) a motorgenerátor úspěšně vykoná zastavovací sekvenci (s odpojením od soustavy rozepnutím *GCB*).



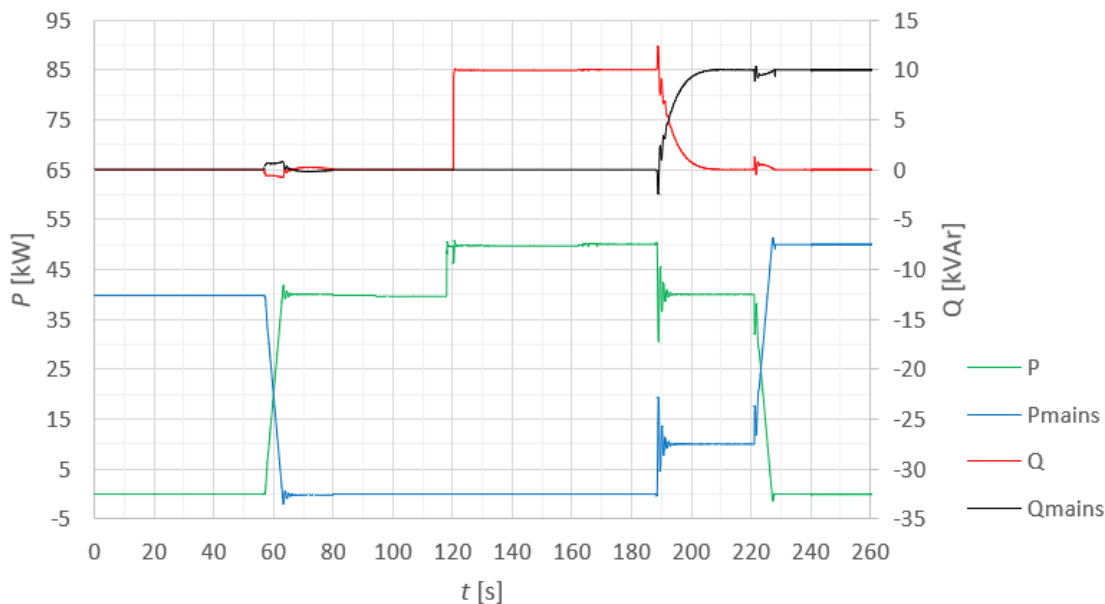
Graf 10 Přehled testovacího scénáře s návratem z Island do Parallel

Zaznamenané průběhy testovacího scénáře ukazují změny výstupů *SRO* a *VRO* aktivních regulátorů s odezvou regulovaných veličin po celou dobu simulace. V uvedených případech tak máme možnost pozorovat funkci postupného beznárazového přepínání s regulačními zásahy prováděnými v jednotlivých provozních stavech FSA generátoru.

8.3 Paralelní provoz s přechodem do ostrovního režimu a zpět

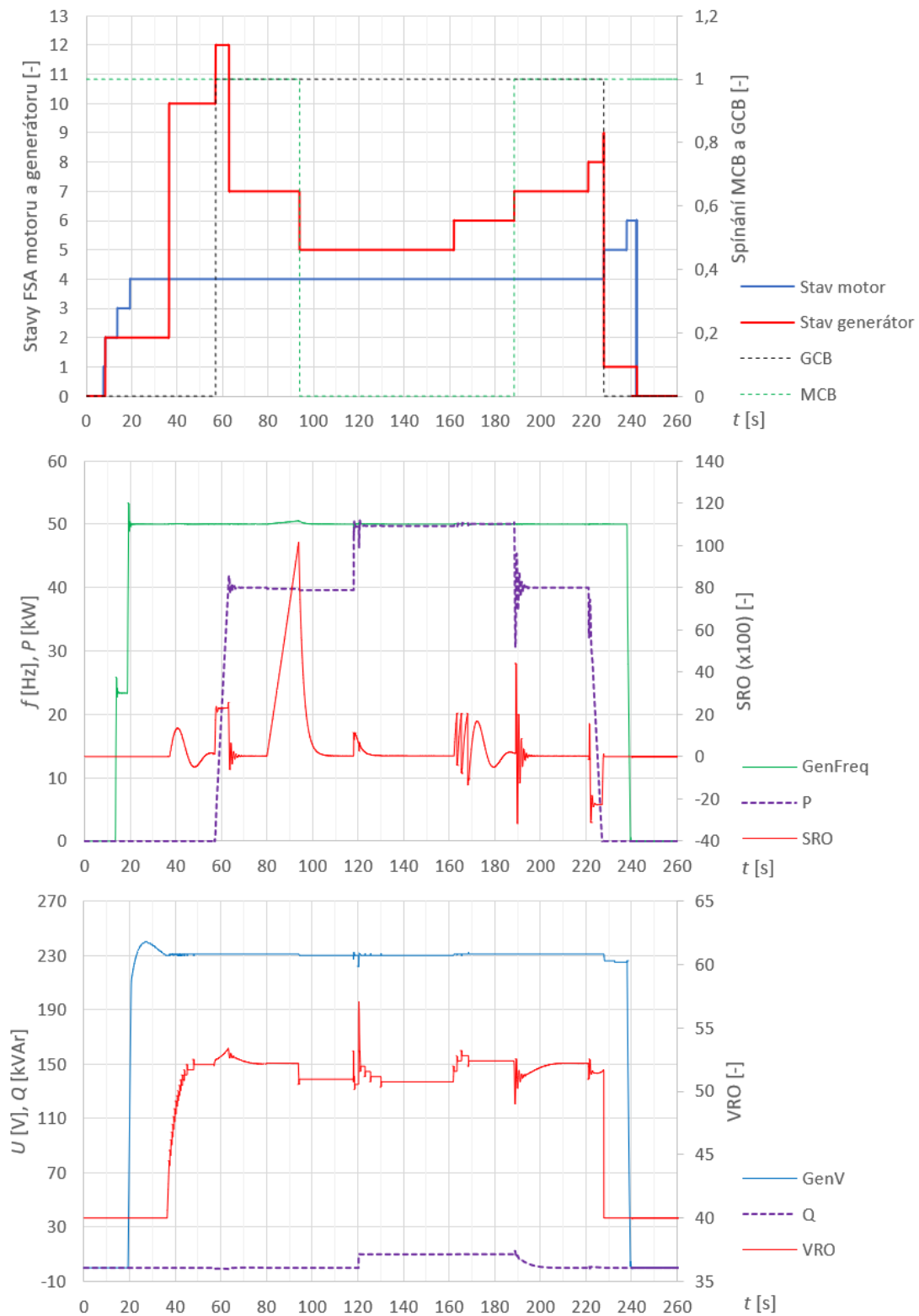
Modelová situace, jež prakticky úplně vyčerpává všechny možné provozní stavy FSA motoru i generátoru, představuje očekávaný výpadek sítě. Činnost zařízení zahájíme se zdravou sítí, na níž se po rozběhu připojíme (sepnutí *GCB*). Poté simulujeme výpadek sítě (přechod do ostrovního režimu) v němž změníme příkon a charakter zátěže. S obnovením sítě dochází k zpětné synchronizaci a návratu do paralelního chodu (sepnutí *MCB*), kde upravíme parametry *Base load* a *Q required* dle nových požadavků zátěže (vede k odlehčení sítě). V posledním kroku provoz motorgenerátoru ukončujeme.

Průběhy sepnutí stykačů *MCB* a *GCB* jasně ukazují, kdy se generátor nacházel v paralelním provozu se sítí. Každému takovému chodu předcházela synchronizační sekvence (stavy FSA generátoru S10 a S6) zajištěná shodnými regulátory popsanými v kapitole 7.2.6. Vzhledem k tomu, že synchronizace ve stavech S10 a S6 jsou stejné (jediný rozdíl spočívá ve spínání různých stykačů), můžeme považovat záznamy průběhů výstupních a regulovaných veličin z předchozího testovacího scénáře za dostatečně ilustrativní i pro tento případ. Činnost motorgenerátoru se však v kontextu ostrovního provozu se zpětnou synchronizací značně odlišuje z hlediska dodávaného výkonu.



Graf 11 Průběhy okamžitých činných a jalových výkonů odebíraných z generátoru a sítě

V časovém intervalu 0 – 55 s vidíme, že dodávaný výkon zátěži (příkon zátěže 40 kW) poskytuje zdravá síť. Po úspěšném rozběhu motorgenerátoru a synchronizaci stavový automat elektrické části zařízení překlápí do stavu *Soft load* (S12), v němž zatěžujeme generátor čistě činným odběrem definovaným parametrem *Base load* o shodné hodnotě s příkonem zátěže. Ukončení funkce *Soft load* se projeví odlehčením sítě, tedy dosažením měřené veličiny *Pmains* = 0 kW. V čase simulace $t = 95$ s dochází k očekávanému výpadku sítě (rozpojení *MCB*) a po dalších dvaceti sekundách zátěž mění charakter z činné na induktivní s požadovaným odběrem 50 kW a 10 kVAr, na což samozřejmě musí reagovat příslušné regulátory. Následuje obnovení sítě (přibližně čas $t = 160$ s) s přechodem do zpětné synchronizace, po jejímž úspěšném vykonání spíná stykač *MCB*. Vzhledem k tomu, že parametry *Base load* a *Q required* nebyly od posledního paralelního režimu měněny, generátor může dodávat pouze činný výkon o velikosti 40 kW. Absentující požadovaný výkon zátěži tak poskytne síť (nárůst měřených výkonů *Pmains* a *Qmains* v čase $t = 190$ s). Paralelní provoz ukončujeme přes funkci *Soft unload* (S8) v čase simulace $t = 360$ s, kde celou zátěž předáme síti a standardním způsobem vypínáme motorgenerátor.



Graf 12 Paralelní provoz s přechodem do ostrovního režimu a zpět

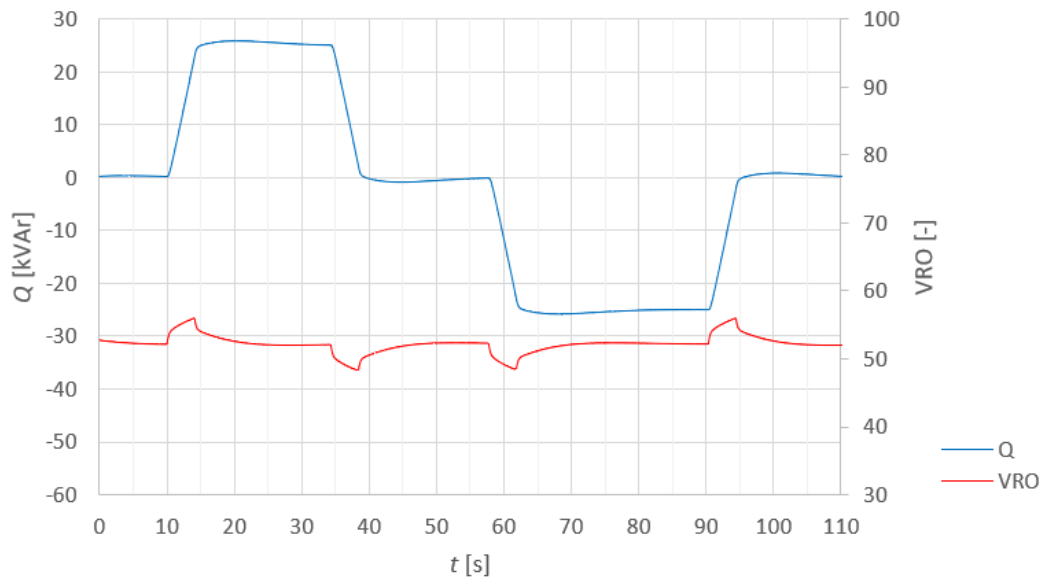
Nutno podotknout, že představený testovací scénář lze taktéž považovat za ukázkou poskytnutí chybějící elektrické energie při blížícím se překročení limitu čtvrt hodinového maxima (bez simulovaného výpadku sítě), kdy spouštěcím mechanismem motorgenerátoru může být právě dosažení stanovené hranice okamžitého požadovaného výkonu zátěže. Obdobnou provozní sekvenci bychom pozorovali i pro případ regulace na účinník, tedy zajištění kompenzace jalového výkonu synchronním generátorem.

8.4 Regulace dodávky jalového výkonu (paralelní provoz)

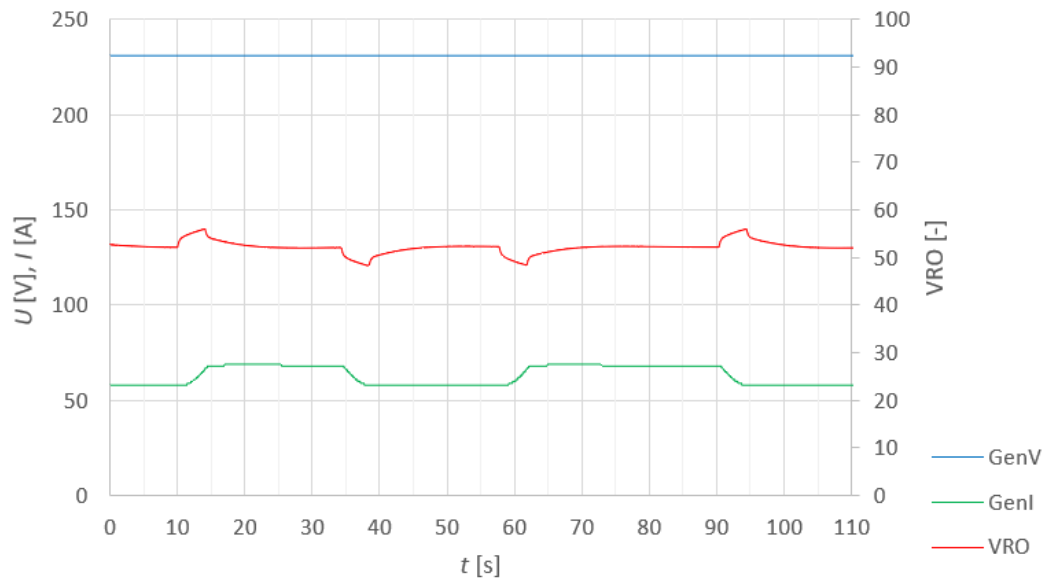
V dosavadních simulacích jsme vždy pracovali s činnou, případně induktivní, zátěží. Řízení činného výkonu pomocí výstupní veličiny regulátoru otáček *SRO* tedy bylo několikrát předvedeno v předchozích ukázkách provozních režimů. Pro demonstraci odezvy regulovaného systému na změnu veličiny *VRO*, jež přes budič přímo zodpovídá za velikost budícího proudu, dojde ke změně charakteru zátěže (na stranu kapacity i indukčnosti, při konstantním požadovaném činném odběru) v paralelním chodu zařízení vzhledem k síti.

V rámci provozu na síti reálně na podobě zátěže z hlediska regulace vůbec nezáleží. Žádaný jalový výkon nastavujeme parametrem *Q required* a v případě, že jej zátěž neodebere, dojde zkrátka k zatížení sítě jalovým výkonem (opomineme-li fakt, že tento jev může být v místě připojení velmi nežádoucí).

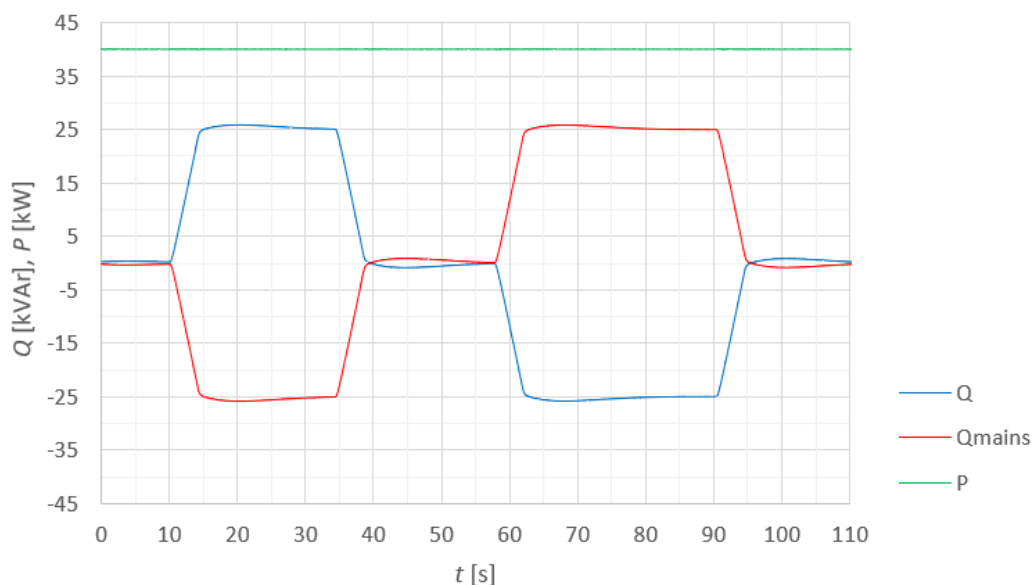
Simulaci zahájíme na zátěži s konstantním příkonem 40 kW (odebíraný proud 57 A), přičemž zátěž setrvává čistě odporová po celou dobu simulace. V čase $t = 10$ s upravíme žádanou hodnotu jalového výkonu na 25 kVAr, čímž dojde k přebuzení synchronního generátoru, jenž začne dodávat jalový výkon do sítě (nárůst odebíraného proudu na 68 A, z pohledu sítě se generátor jeví jako kapacitor). Následně požadavek na dodávku jalového výkonu mizí (odbuzení stroje, generátor poskytuje pouze činný výkon). Pokračujeme úpravou parametru *Q required* na hodnotu -25 kVAr, načež generátor přechází do podbuzeného režimu a odebírá nastavený jalový výkon ze sítě (generátor se v soustavě jeví jako indukčnost, viz Graf 15).



Graf 13 Průběh jalového výkonu generátoru s řídicí veličinou VRO



Graf 14 Průběh výstupního napětí generátoru, statorového proudu a řídicí veličiny VRO



Graf 15 Tok jalového výkonu mezi generátorem a sítí při konstantním činném výkonu generátoru

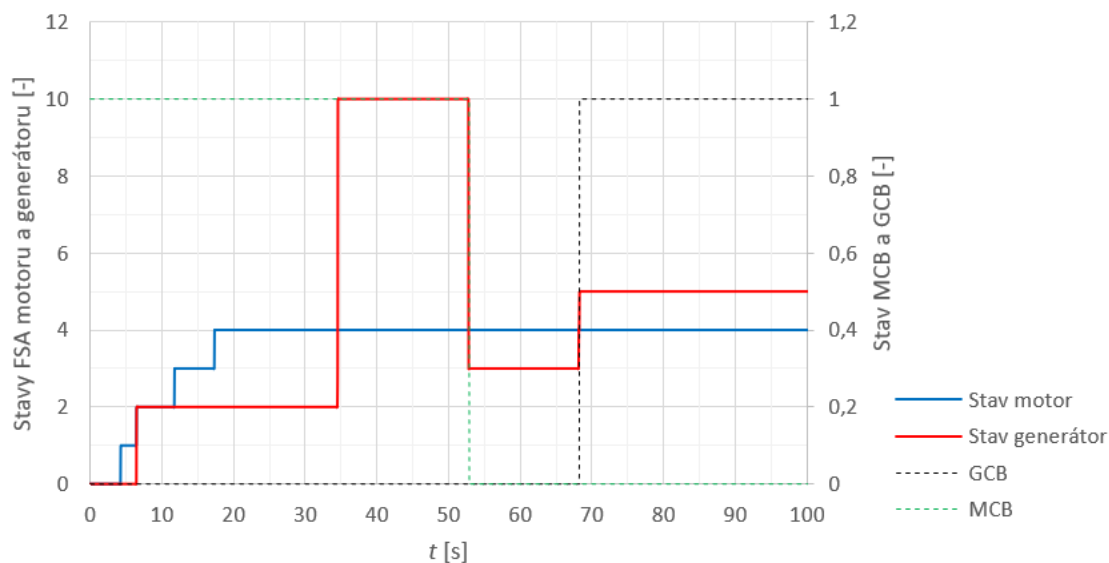
Vzhledem k tomu, že stroj pracuje na tvrdé síti, po celou dobu dodávání (případně odběru) jalového výkonu nedochází ke změně napětí soustavy. Stejně tak síť udržuje konstantní frekvenci napětí. Dalším specifickým paralelního provozu je vývoj žádaných veličin regulátorů řídicích na činný a jalový výkon, kdy se po změně parametru *Q required* na vstupu regulátoru objevuje rampa tvořená jako vlečný průměr žádané hodnoty. Proto ve srovnání s předchozími průběhy výstupní veličiny *VRO* pozoruje v tomto případě hladký výstup regulátoru buzení bez jakýchkoliv zákmitů.

8.5 Vybrané atypické situace v provozu motorgenerátoru

Následující dva scénáře zkráceně zaznamenávají možné nestandardní (resp. z pohledu pracovních cyklů neočekávané) chování simulované soustavy a pokrývají vybrané neporuchové přechody v rámci stavového řízení elektrického systému. Jako příklady takových dějů můžeme demonstrovat výpadek sítě po zahájení synchronizační sekvence a opakované přijetí (vymizení) žádosti o běh zařízení během zatěžování generátoru v paralelním provozu. Uvedené případy pro jednoduchost pracují vždy s činnou zátěží.

8.5.1 Výpadek sítě během fázování

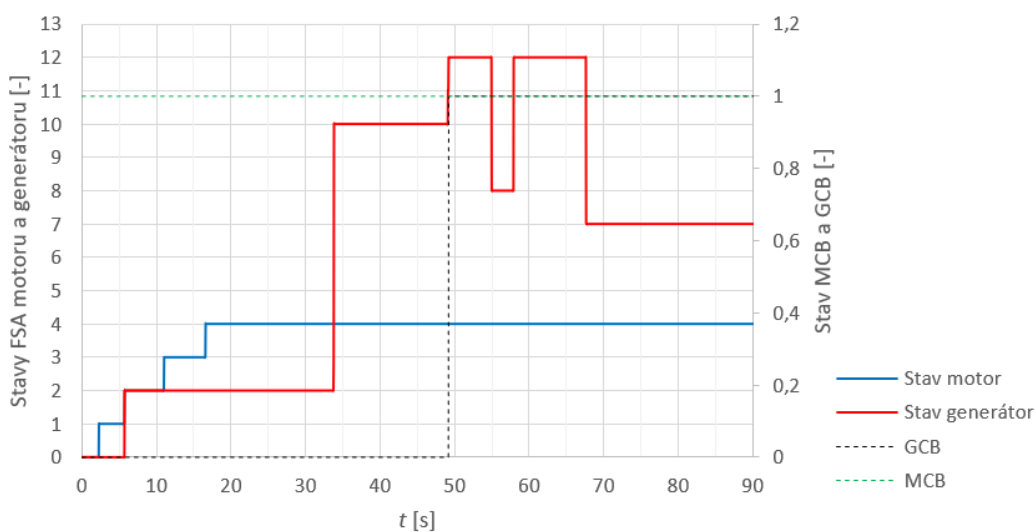
Charakteristickým znakem poruchy sítě během synchronizační sekvence je zmizení žádaných hodnot na vstupech regulátorů. V takovém případě z pochopitelných důvodů nelze ve fázování pokračovat. Stavový automat elektrické části zařízení musí okamžitě vykonat návrat do předchozího provozního stavu *Ready to load* (S3), v němž setrvává po dobu nastavenou parametrem *TMR_MainsHealthDelay* (15 s), abychom měli jistotu, že k výpadku skutečně došlo. Po potvrzení poruchy sítě (nenastalo její obnovení), pokračuje činnost FSA generátoru ve zcela standardním ostrovním režimu. V čase mezi rozepnutím *MCB* a sepnutím *GCB* tak na zátěž není přivedeno napětí.



Graf 16 Průběh stavů FSA motoru a generátoru se spínáním MCB a GCB

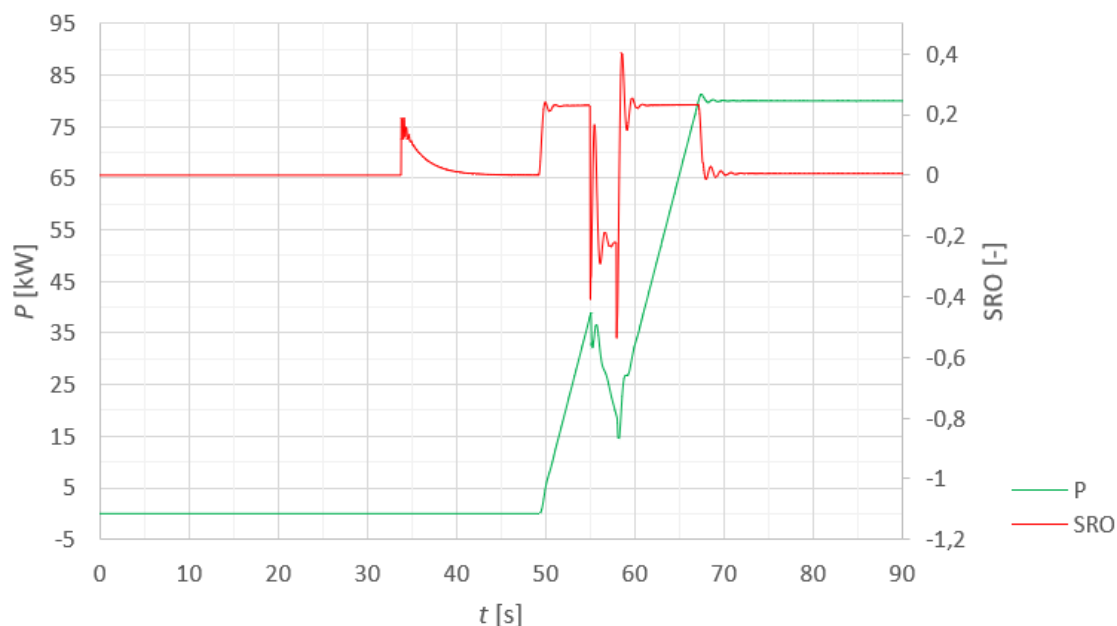
8.5.2 Cyklické zatěžování (odlehčování) generátoru

Po úspěšné synchronizaci na síť (bez předchozího průchodu ostrovním režimem) aktivuje FSA generátoru funkci *Soft load* (S12), v níž má dojít k předání zátěže generátoru, tedy k odlehčení sítě. Zmizí-li během této fáze požadavek na start, musí stavový automat připravit hladké odpojení generátoru od soustavy, což fakticky znamená snížení odebíraného proudu ve stavu S8 – *Soft unload* (na stykači *GCB* se snažíme rozpínat co možná nejmenší induktivní proud). Vykoná tak nestandardní přechod *Soft load* – *Soft unload*. Aby se situace dále komplikovala, v průběhu odlehčování přichází opětovný požadavek na start, čímž je stavový automat nucen zahájit nové zatěžování generátoru, aby mohl posléze překlopit do definitivního paralelního chodu na síti (stav S7) již s plným zatížením stroje – realizuje přechod *Soft unload* – *Soft load*.



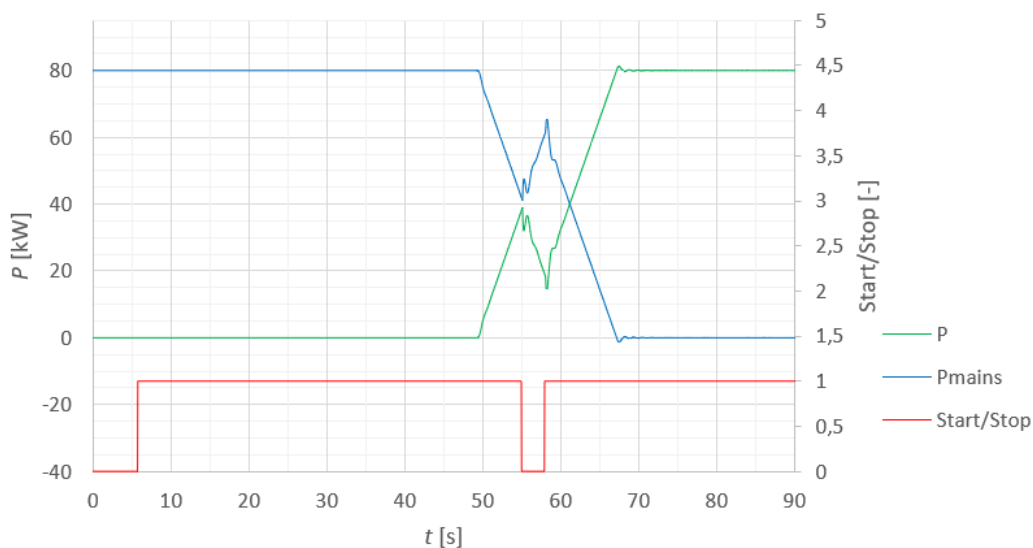
Graf 17 Průchod stavů během cyklického zatěžování s řízením MCB a GCB

Funkce *Soft load* (a *Soft unload*) tvoří rampu žádané hodnoty na vstupu regulátoru pouze pro činný výkon, proto je zvolená ukázka realizovaná pro činnou zátěž o příkonu 80 kW (resp. zaznamenává jen průběh činného výkonu, požadavek na dodávaný jalový výkon nastavený v kontroléru odpovídá nule).



Graf 18 Činný výkon dodávaný generátorem a výstupní řídicí veličina SRO

V čase $t = 50$ s došlo k aktivaci funkce *Soft load*. Po dosažení zatížení na úrovni přibližně 40 kW mizí požadavek na start a generátor je odlehčován funkcí *Soft unload*. Při okamžitém výkonu 15 kW přichází opětovný požadavek na start se zahájením zatěžování podle nově parametrizované rampy žádané hodnoty, a to až na velikost *Base load* (80 kW), kde stavový automat překlápí do stavu *Parallel* (S7).

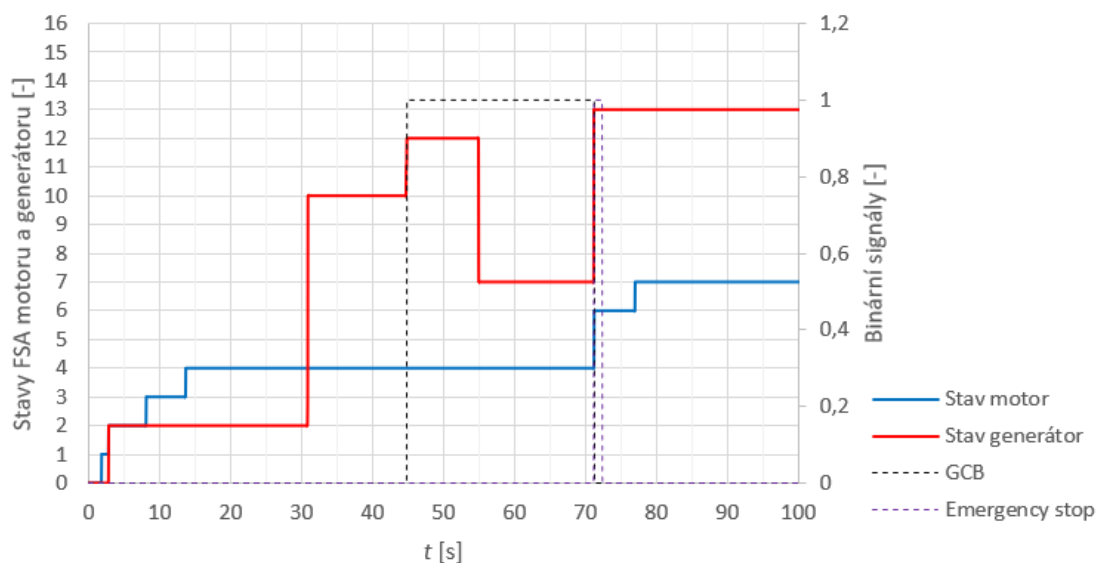


Graf 19 Průběh výkonu dodávaného generátorem a sítí s vynesným požadavkem na start

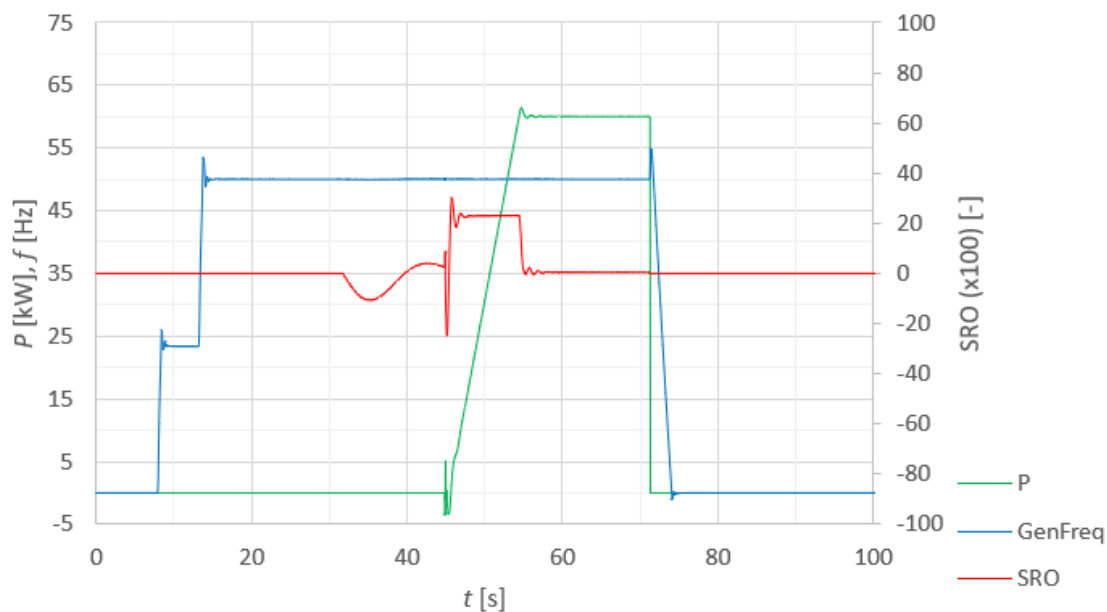
8.6 Reakce na chybu úrovně *Sd*

Vzhledem k tomu, že kontrolér nedisponuje žádnou funkcí „*override*“, jež by vznik chyby na zařízení ignorovala, porucha úrovně *Sd* vede k okamžitému odstavení zařízení nehladě na zatížení generátoru, provozní stavy zúčastněných FSA nebo jiné podmínky. Odstavením zařízení rozumíme odpojení generátoru ze soustavy zátěže a sítě (byl-li připojen, realizováno rozepnutím stykače *GCB*) za současného zastavení dieslového motoru (tedy přechod do stavu *S6* – *Stopping*). Nejjednodušší demonstrace chování systému v chybě *Sd* lze docílit aktivací binárního vstupu *Emergency stop*, což je tlačítko nouzového zastavení motorgenerátoru.

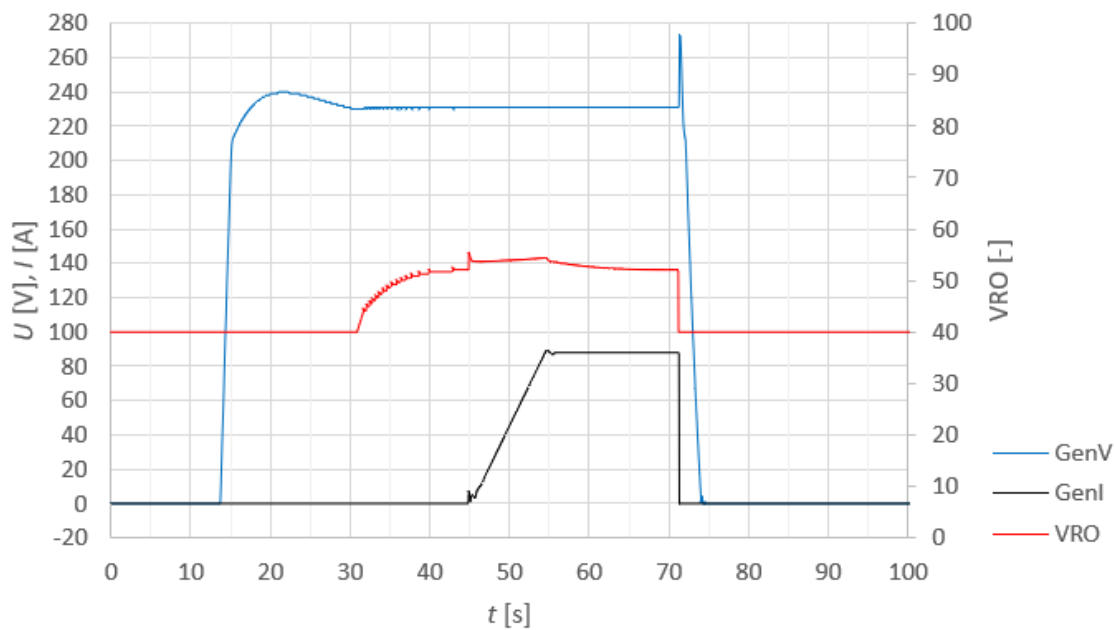
Chyba úrovně *Sd* v naší ukázce nastane v nejhorší možné situaci, tedy na zatíženém generátoru v paralelním chodu se sítí, kde potenciálně může dojít k poškození všech prvků soustavy (nebo alespoň k nežádoucímu zpětnému vlivu). Test zahajujeme standardním spuštěním motorgenerátoru, jenž se sfázuje s funkční sítí. Poruchu, v podobě aktivace vstupu *Emergency stop*, detekujeme ve stavu *Parallel* (*S7* v automatu generátoru). FSA generátoru okamžitě překlápí do chybového stavu *Error* (*S13*), v němž rozpínáme stykač na straně generátoru. Stavový automat navíc před přechodem do vlastního chybového stavu (*S7*) musí úspěšně vykonat zastavovací sekvenci motoru. Test ukončují FSA motoru i generátoru ve svých chybových stavech, kde očekávají kvitování chyby obsluhou.



Graf 20 Průběh stavového řízení s chybou úrovně *Sd*

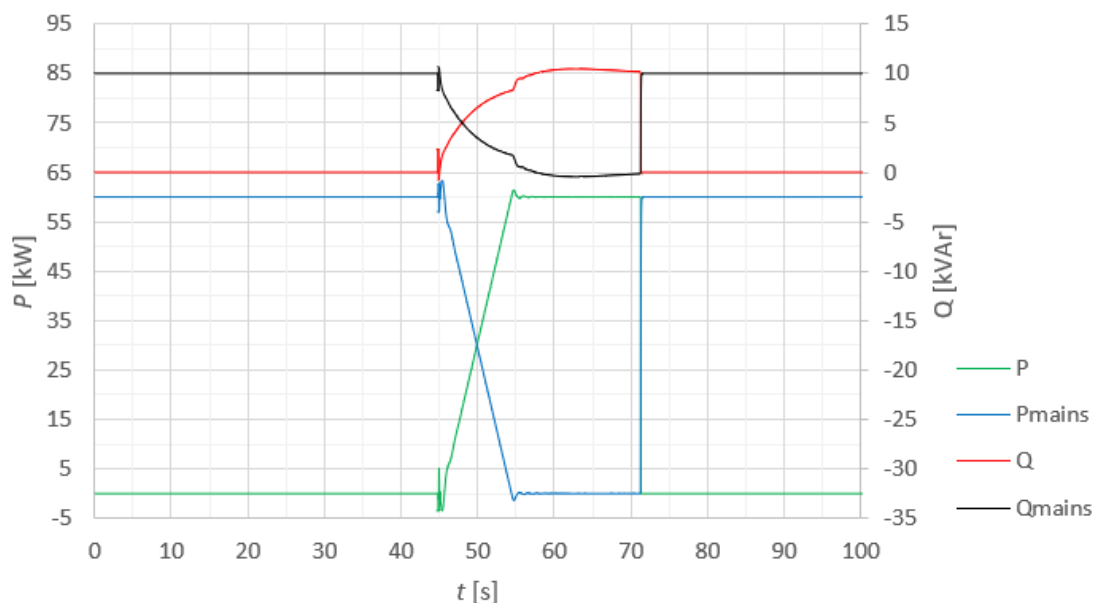


Graf 21 Činný výkon a frekvence napětí na generátoru při přerušení dodávky energie, průběh SRO



Graf 22 Výstupní napětí a proud generátoru při přerušení dodávky energie, průběh VRO

Požadavek na dodávaný činný a jalový výkon zátěži odpovídal 60 kW a 10 kVAr (na zátěži tedy $\cos\varphi = 0,99$ IND). Při odpojení generátoru ze soustavy (pokles měřeného proudu **GenI** na nulu) vlivem jeho prudkého odlehčení dochází k navýšení otáček motoru (pozorovatelné na měřené frekvenci) za současného generování napěťové špičky (stroj zůstává přebuzený).



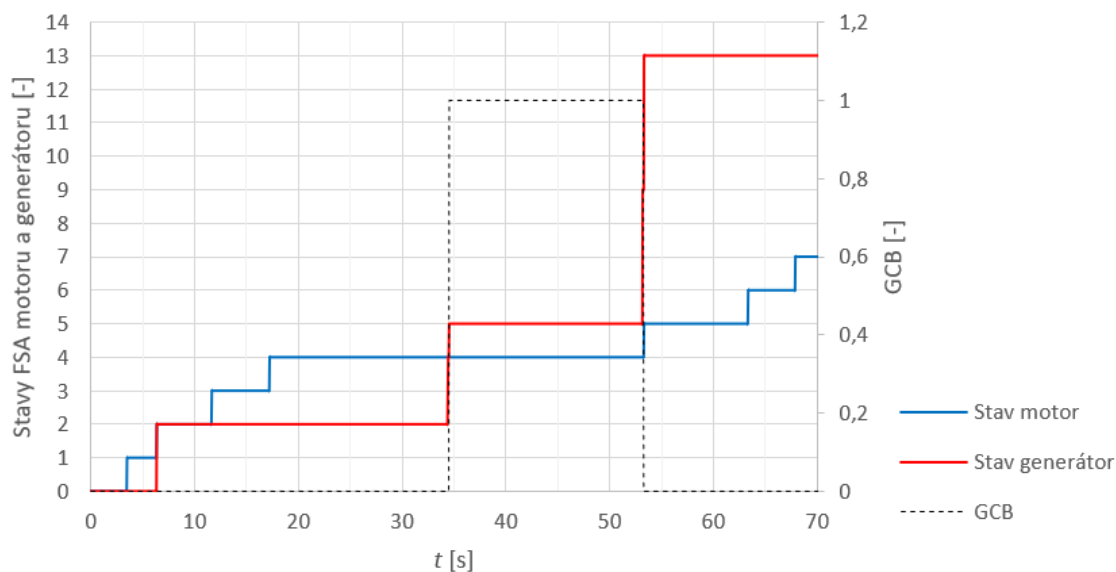
Graf 23 Průběh dodávaného výkonu sítě a generátorem při testu chyby Sd

Poslední graf zaznamenávající děj odstavení generátoru ve své první části zachycuje standardní odlehčení sítě při převzetí zátěže generátorem s optimálním nastavením žádaných hodnot činného a jalového výkonu. V čase přibližně $t = 70$ s potom pozorujeme skokové zatížení sítě, v němž došlo k odpojení generátoru (rozepnutí *GCB*).

8.7 Reakce na chybu úrovně BOC

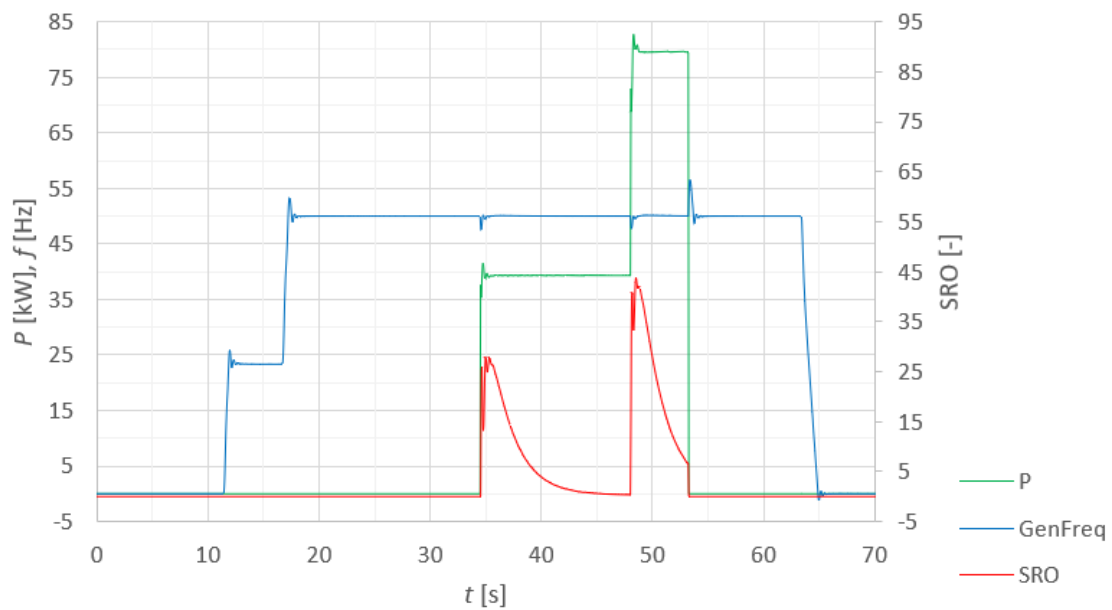
Jako ukázka reakce kontroléru na přijetí chyby úrovně *BOC* poslouží činnost ochrany *IDMT protection BOC*. Princip funkce zmíněné ochrany nalezneme v kapitole 7.3.3. Abychom mohli v rámci simulace vyvolat chybu vzniklou proudovým přetížením stroje, musíme výrazně snížit hodnotu jmenovitého proudu generátoru parametrem *GenInom*. Na základě předchozích testů víme, že pro čistě činnou zátěž o příkonu 40 kW jsme z generátoru odebírali proud $I = 57$ A. Při zachování nastavení $2I_{nom\ del} = 5$ s a zvýšení příkonu zátěže na dvojnásobek (80 kW) potom docílíme dvojnásobného nadproudu ($I = 114$ A), na což již ochrana *IDMT protection BOC* musí za nastavených 5 s reagovat a generátor odpojit (čímž funkci ochrany ověříme).

Abychom navíc během simulace nemuseli konfigurovat parametry pro chod v paralelním režimu (se zvýšením příkonu zátěže bychom museli přenastavit i *Base load*, jinak by byla spotřeba pokryta částečně ze sítě a požadovaného nadproudu bychom nedosáhli), provedeme test v ostrovním režimu.

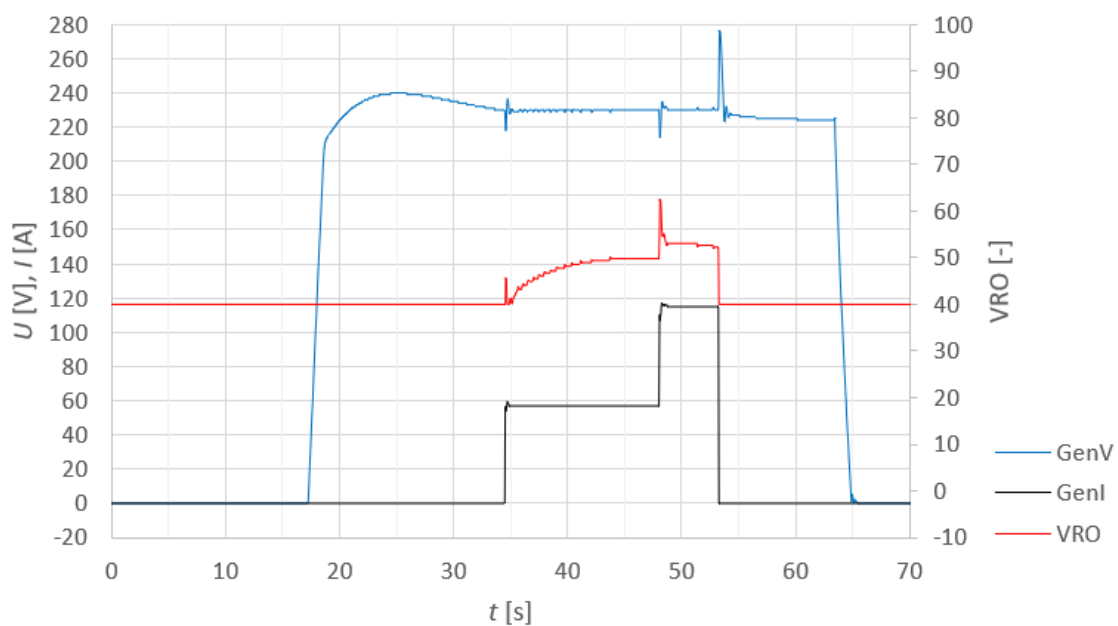


Graf 24 Průchod stavy kontroléru a spínání GCB

S neaktivní sítí zahajujeme tradiční rozběh motorgenerátoru, jenž v čase $t = 35$ s připojíme k zátěži (spíná **GCB**). Po dobu 13 s udržujeme příkon zátěže na 40 kW, načež jej zvedáme na hodnotu 80 kW (Graf 25). Dosahujeme tak dvojnásobného proudového zatížení generátoru (měřená veličina **GenI**, viz Graf 26) a za 5 s nastává očekávaná reakce ochrany **IDMT protection BOC**, která nastavuje právě příznak **BOC** sloužící jako povel pro standardní zastavení motorgenerátoru. Subsystem řídicí elektrickou část zařízení otevírá stykač **GCB** a FSA generátoru překlápí do stavu **Engine stopping (S1)**, jenž předává informaci FSA motoru o dokončení potřebných příprav k zahájení zastavovací sekvence a ukončuje svou činnost v chybovém stavu S13. Stavový automat motoru přechází do stavu **Cooling (S5)**, kde po dobu 10 s chladíme motorgenerátor při jmenovitých otáčkách. Činnost zařízení ukončuje po úspěšném zastavení motoru ve stavu **Stopping (S6)**, přičemž FSA motoru padá do vlastního chybového stavu S7. Stejně jako v případě simulace chyby úrovně **Sd** ukončují stavové automaty provoz ve svých chybových stavech, kde očekáváme zásah operátora a kvitování vzniklé poruchy.



Graf 25 Průběhy navýšení příkonu zátěže, frekvence napětí a veličiny SRO



Graf 26 Průběhy navýšení proudového zatížení, napětí a veličiny VRO

9 Závěr

V práci jsem se snažil zkráceně postihnout nejdůležitější aspekty široké problematiky související s návrhem stavového řízení a základním konceptem regulace dodávky elektrické energie motorgenerátorem. Hlavním přínosem práce ale spočívá v představení realizace modelu kontroléru stavovým automatem, jenž lze již reálně použít jako základ pro průmyslový řídicí systém. Model kontroléru můžeme snadno dále rozšiřovat o doplňující ochrany zdrojových soustrojí střídavého proudu a vzhledem k značnému množství nastavitelných parametrů jej použít v součinnosti s různými druhy zařízení.

Po připojení kontroléru k matematickému modelu motorgenerátoru se spolehlivost stavového řízení potvrdila a kontrolér na provozní stavy reagoval dle očekávání. Pro zachování možnosti vyzkoušení většího množství druhů provozu jsem neimplementoval automatický start a zastavení při výpadku primárního zdroje energie, avšak této funkce můžeme snadno docílit připojením indikace zdravé sítě na vstup spouštěcího signálu (tedy do místa s uživatelským tlačítkem *Start/Stop*).

Největší problém realizace modelu kontroléru spočíval v chování regulační soustavy, kde jsme optimálních výsledků docílili až po značném úsilí. Prvním rozhodujícím faktorem, jenž ladění soustavy výrazně znepříjemňoval, byla citlivost modelu na regulační zásahy. Druhé úskalí představuje především celková nestabilita provázané regulace napětí a frekvence (respektive činného a jalového výkonu). Můžeme však říci, že jsme docílili kvalitních odezev na regulační zásahy (zejména v řízení dodávky jalového výkonu, ostrovní provoz a ostrovní provoz s návratem do paralelního chodu), stejně tak i kvalitního generování řídicích signálů *SRO* a *VRO*. Menší neduh potom představují zákmity na *VRO* při přebírání řízení od AVR a po zahájení synchronizace se nahou o přibuzení stroje, jež se zcela eliminovat nepodařilo (přestože všechny regulátory byly realizovány jako PI, tedy bez derivační složky, která na rozkmity ve fázi vývoje měla jednoznačně největší vliv).

Předmět dalšího zkoumání spočívá v připojení navrženého modelu kontroléru k reálnému soustrojí motorgenerátoru, čehož bychom měli být schopni docílit po vhodné konfiguraci komunikačního rozhraní a přeložení blokového návrhu do programovatelného kontroléru typu UniPi s vhodným periferním vybavením.

Použité zdroje

- [1] *Elektrotechnické předpisy ČSN. Elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1963.
- [2] ComAp [online]. *InteliGen NTC BaseBox. Global Guide.* ©2018. [vid. 2018-07-26]. Dostupné z: https://www.comap-control.com/products/detail/inteligen-ntcbasebox?_ga=2.185739625.1149353338.1565507633-1823730863.1534863540
- [3] *Zdrojová soustrojí střídavého proudu poháněná pístovými spalovacími motory: Část 1: Použití, jmenovité údaje a provedení.* Vydání druhé. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [4] *Zdrojová soustrojí střídavého proudu poháněná pístovými spalovacími motory: Část 2: Motory.* Vydání druhé. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [5] *Zdrojová soustrojí střídavého proudu poháněná pístovými spalovacími motory: Část 3: Generátory střídavého proudu pro zdrojová soustrojí.* Vydání druhé. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [6] *Zdrojová soustrojí střídavého proudu poháněná pístovými spalovacími motory: Část 4: Řídící a spínací přístroje.* Vydání druhé. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [7] *How Does a Generator Create Electricity? How Generators Work* [online]. Diesel Service & Supply. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: https://www.dieselserviceandsupply.com/How_Generators_Work.aspx
- [8] *Generator Fuel Tanks – Determining Fuel Capacity, Tank Types, Approvals and Codes* [online]. Diesel Service & Supply. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: https://www.dieselserviceandsupply.com/Generator_Fuel_Tanks.aspx
- [9] *Generator Cooling Systems* [online]. Diesel Service & Supply. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: https://www.dieselserviceandsupply.com/Generator_Cooling_Systems.aspx
- [10] VOŽENÍLEK, Petr, Vladimír NOVOTNÝ a Pavel MINDL. *Elektromechanické měniče.* 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04875-7.
- [11] *Generator Excitation Control Systems & Methods* [online]. [cit. 2019-12-25]. Dostupné z: <https://www.dieselserviceandsupply.com/Generator-Excitation-Methods.aspx>
- [12] *Generator Control Panel - What it is and How it's Used* [online]. Diesel Service & Supply. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: https://www.dieselserviceandsupply.com/Generator_Control_Panel.aspx

- [13] *IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses*. R2007. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003.
- [14] KOBRLÉ, Pavel a Jiří PAVELKA. *Elektrické pohony a jejich řízení*. 3. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06007-0.
- [15] HABRYCH, Richard. Řízení jalového výkonu synchronního generátoru. *Energetika* [online]. 2015, **2015**(3), 146-152 [cit. 2019-12-28]. Dostupné z:
http://www.orgrez.cz/fileadmin/user_upload/750/E_3_2015_habrych.pdf
- [16] SCHLEGEL, Miloš. *Průmyslové PID regulátory: Teorie pro praxi* [online]. , 13 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <http://zcu.arcao.com/kky/zky/Prago1.pdf>
- [17] *Funkční bloky systému REXYGEN: Referenční příručka* [online]. 20. 4. 2019, , 183 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: https://www.rexygen.com/doc/PDF/CZECH/BRef_CZ.pdf

Přílohy

Přehled použitých zkratk

AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i>	Automatický regulátor napětí
BOC	<i>Breaker Open and Cooling</i>	Otevření stykače a chlazení (typ ochrany)
ECU	<i>Electronic Control Unit</i>	Elektronická řídicí jednotka
FSA	<i>Finite State Automaton</i>	Konečný stavový automat
GCB	<i>Generator Circuit Braker</i>	Stykač na straně generátoru
HMI	<i>Human Machine Interface</i>	Rozhraní člověk – stroj
IDMT	<i>Inverse Definite Minimum Time</i>	Nepřímo úměrná časová závislost (typ reakce ochrany)
IND	-	Induktivní
KAP	-	Kapacitní
MCB	<i>Mains Circuit Braker</i>	Stykač na straně sítě
PF	<i>Power factor</i>	Účinnost
PMG	<i>Permanent Magnetic Generator</i>	Generátor s permanentním magnetem (budicí jednotka)
RPM	<i>Revolutions Per Minute</i>	Otáčky za minutu
Sd	<i>Shutdown</i>	Okamžité vypnutí (typ ochrany)
SG	<i>Speed governor</i>	Regulátor otáček
SRO	<i>Speed regulator output</i>	Výstup regulátoru otáček
VRO	<i>Voltage regulator output</i>	Výstup regulátoru napětí

Přehled použitých fyzikálních veličin

n	$ot \cdot min^{-1}$ (RPM)	Otáčky
f	Hz	Frekvence
U	V	Efektivní hodnota fázového napětí (stator, zátěž)
R	Ω	Odpor (vinutí, zátěže)
I	A	Efektivní hodnota statorového proudu
X_q	Ω	Příčná reaktance
I_q	A	Proud statorom v příčné ose
X_d	Ω	Podélná reaktance
I_d	A	Proud statorom v podélné ose
U_{if}	V	Indukovaného napětí stroje naprázdno
I_f	A	Budicí proud
M	$N \cdot m$	Moment (zátěžný, hnací, vnitřní elektromagnetický, dynamický)
ω	s^{-1}	Úhlová rychlost
δ	–	Zátěžný úhel
φ	–	Fázový posun statorového napětí a proudu
P	W	Činný výkon
Q	VAr	Jalový výkon
J	$kg \cdot m^2$	Moment setrvačnosti
t	s	Čas
X	Ω	Reaktance (zátěže)
Z	Ω	Impedance (zátěže)
ψ_a, ψ_b, ψ_c	Wb	Magnetické toky fází a, b, c
ψ_{fd}	Wb	Budicí magnetický tok
u_a, u_b, u_c	V	Napětí fází a, b, c
u_{fd}	V	Budicí napětí

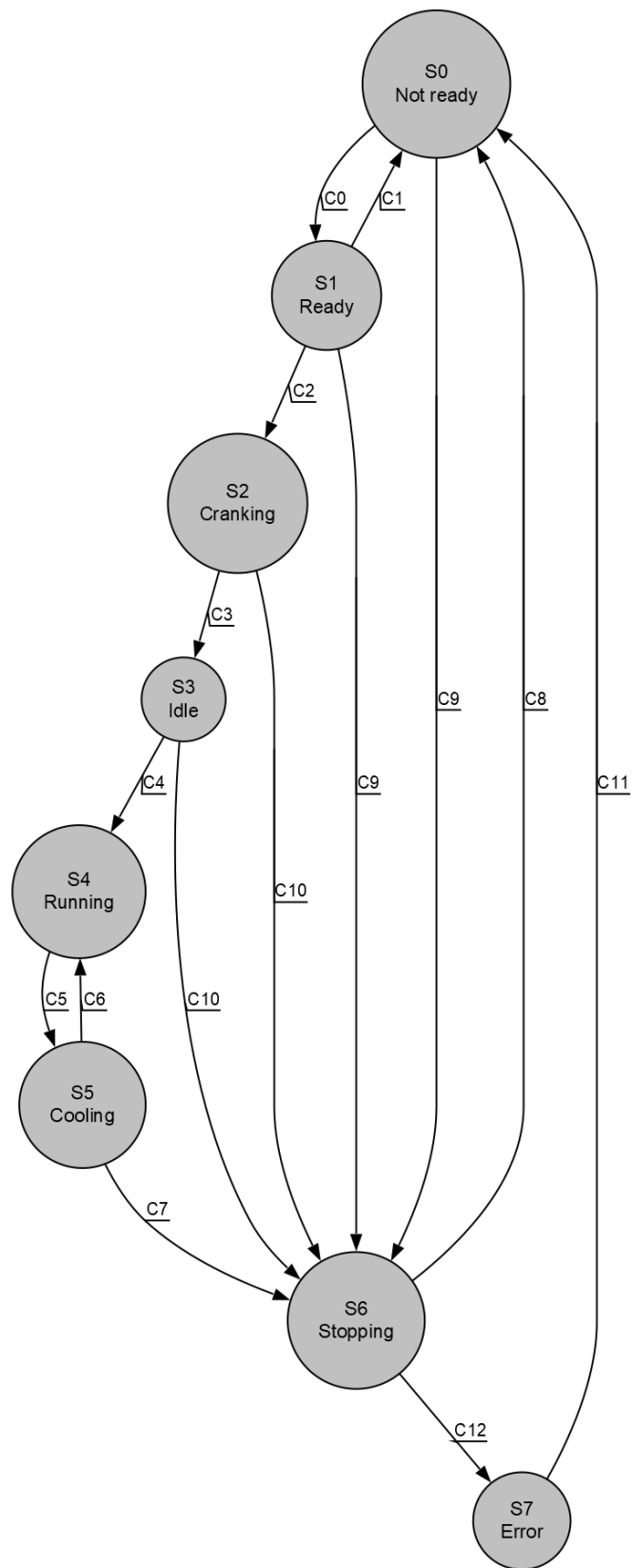
Přehled veličin použitých v modelu

Veličiny	Typ	Značení	Popis
Vstupy	Analogové	RPM	Okamžitá hodnota otáček
		Oil_p	Okamžitá hodnota tlaku oleje
		GenV	Okamžitá efektivní hodnota výstupního fázového napětí generátoru
		GenFreq	Okamžitá hodnota výstupní frekvence napětí generátoru
		GenI	Okamžitá efektivní hodnota výstupního fázového proudu generátoru
		Angle	Fázový rozdíl napětí generátoru a sítě
		P	Okamžitý činný výkon dodávaný generátorem
		Q	Okamžitý jalový výkon na generátoru
		MainsV	Okamžitá efektivní hodnota výstupního fázového napětí sítě
		MainsFreq	Okamžitá hodnota frekvence napětí sítě
		Pmains	Okamžitý činný výkon dodávaný sítí
		Qmains	Okamžitý jalový výkon na síti
	Binární	MAN/OFF	Signál volby módu manuál/vypnuto
		Start/Stop	Signál spuštění/vypnutí motorgenerátoru
		Emergency stop	Signál nouzového tlačítka
		Error Reset	Signál nulování příznaku chyby
		MCB FB	Zpětná vazba stykače na straně sítě
GCB FB		Zpětná vazba stykače na straně generátoru	
Výstupy	Analogové	SRO	Akční výstupní veličina regulátoru otáček
		VRO	Akční výstupní veličina regulátoru buzení
	Binární	Not Ready	Signál indikace stavu Not Ready
		Operational	Signál indikace provozuschopnosti motoru
		Running	Signál indikace stavu Running
		FuelSol	Řídicí signál palivových ventilů
		Starter	Řídicí signál startéru
		Cooling pump	Řídicí signál chladicího čerpadla
		Stop Solenoid	Řídicí signál palivového čerpadla
		Stop fail	Signál indikace stavu nezastavení motoru
		StartFail	Signál indikace stavu nespouštění motoru
		Idle/Nom	Signál indikace otáček Idle/Nom
		GCB	Řídicí signál stykače na straně generátoru
		MCB	Řídicí signál stykače na straně sítě
Alarm	Signál indikace chyby		
Sat Wrn	Signál indikace dosažení saturační meze regulátoru		
Vnitřní proměnné	Diskrétní	MotorState	Pořadové číslo stavu, v němž se nachází FSA motoru
		GenState	Pořadové číslo stavu, v němž se nachází FSA generátoru
		LoopSel	Řídicí signál přepínání regulátorů
	Binární	MAN	Požadavek o mód MAN
		OFF	Požadavek o mód OFF
Start	Požadavek na start motorgenerátoru		

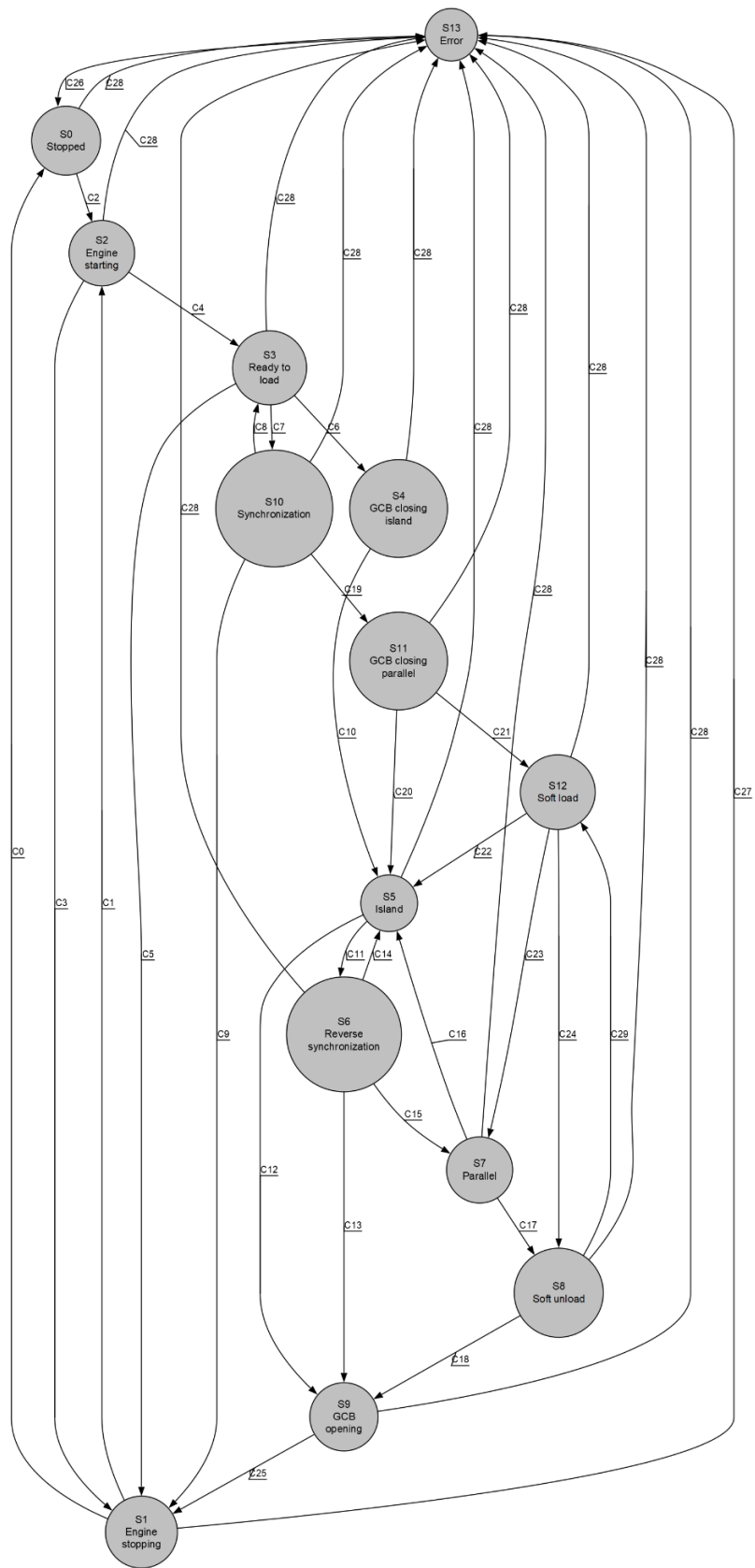
		Stop	Požadavek na zastavení motorgenerátoru
		Start_signal	Signál pro start motoru
		Stop_signal	Signál pro zastavení motoru
		RPM underspeed	Indikace aktivace ochrany underspeed
		RPM overspeed	Indikace aktivace ochrany overspeed
		Started	Indikace úspěšného startu motoru
		GenV_cmp	Výsledek komparátoru napětí na generátoru
		Oil_p_cmp	Výsledek komparátoru tlaku oleje
		Cooling_timeout	Indikace dokončení chladicí sekvence
		StopConfirm	Řídicí signál zastavení motoru od FSA generátoru
		Error	Příznak chyby
		Confirm_Err_flag	Indikace potvrzení chyby
		Stopped	Indikace zastaveného motoru
		Start fail	Neúspěšný rozběh motoru
		Stop fail	Neúspěšné zastavení motoru
		BOC	Indikace chyby úrovně BOC
		Sd	Indikace chyby úrovně Sd
		Q0 – Q7	Buzení výstupních funkcí pro stavy S0 – S7 (motor)
		GCB Open/Close	Předání řídicího signálu GCB
		MCB Open/Close	Předání řídicího signálu MCB
		MainsOK/NOK	Indikace zdraví sítě
		Stable	Indikace stabilních výstupních parametrů generátoru
		Syn_OK	Indikace úspěšné synchronizace
		Syn_timeout	Indikace neúspěšné synchronizace (nepoužito)
		SoftLdOk	Indikace úspěšného zatížení generátoru
		SoftUnLdOk	Indikace úspěšného odlehčení generátoru
		RtL_timeout	Indikace neúspěšné stabilizace (nepoužito)
		IDMT prot BOC	Indikace aktivní ochrany nadproudě IDMT
		GenV BOC	Indikace aktivní napěťové ochrany typu BOC
		GenV Sd	Indikace aktivní napěťové ochrany typu Sd
		GenFreq BOC	Indikace aktivní frekvenční ochrany typu BOC
		Q0 – Q13	Buzení výstupních funkcí pro stavy S0 – S13 (gen.)
Nastavitelné parametry	Diskrétní	Starting RPM	Srovnávací hodnota otáček nastartovaného motoru
		Starting POil	Srovnávací hodnota tlaku oleje nastartovaného motoru
		NomV	Jmenovitá hodnota fázového napětí
		25% GenNomV	25% hodnota jmenovitého výstupního napětí gen.
		Nominal RPM	Jmenovitá hodnota otáček motoru
		NomFreq	Jmenovitá frekvence výstupního napětí gen.
		Min GenV	Minimální výstupní napětí gen.
		FreqLim (%)	Stabilizační rozsah frekvence
		GenVLim (%)	Stabilizační rozsah napětí
		RPM_2	Minimální detekovatelná hodnota otáček motoru

	GenFreq_0	Srovnávací hodnota výstupní frekvence gen.
	Overspeed_threshold	Nastavení procentuálního přesahu Nominal RPM pro overspeed ochranu
	MaxCrankAttempts	Maximální počet pokusů o nastartování
	MaxStopAttempts	Maximální počet pokusů o zastavení
	Base load (P_req)	Žádaná hodnota činného výkonu v paralelním režimu
	Q required (Q_req)	Žádaná hodnota jalového výkonu v paralelním režimu
	VoltageBias	Korekce buzení pomocí VRO
	NomP	Jmenovitý výkon generátoru
	LoadTime	Čas zatížení generátoru na plný výkon
	UnloadTime	Čas odlehčení generátoru na nulový výkon
	Synchro_stable	Čas stabilního fázování
	Synchronization timeout	Maximální čas synchronizace
	TMR_StabTime	Minimální čas stability výstupních parametrů
	TMR_StabTimeout	Doba neúspěšné stabilizace
	GenInom	Jmenovitý proud generátoru
	2Inom del	Čas vybavení nadproudé ochrany pro dvojnásobek proudu jmenovitého
	GenV > V BOC	Horní mez napěťové BOC ochrany (%)
	GenV < V BOC	Dolní mez napěťové BOC ochrany (%)
	GenV > V Sd	Horní mez napěťové Sd ochrany (%)
	GenV < V Sd	Dolní mez napěťové Sd ochrany (%)
	GenFreq > f BOC	Horní mez frekvenční BOC ochrany (%)
	GenFreq < f BOC	Dolní mez frekvenční BOC ochrany (%)
	TMR_MainsHealthDelay	Doba určení stavu sítě (uzdravení)
	MainsVNom	Jmenovité síťové napětí
	MainsFreqNom	Jmenovitá frekvence sítě

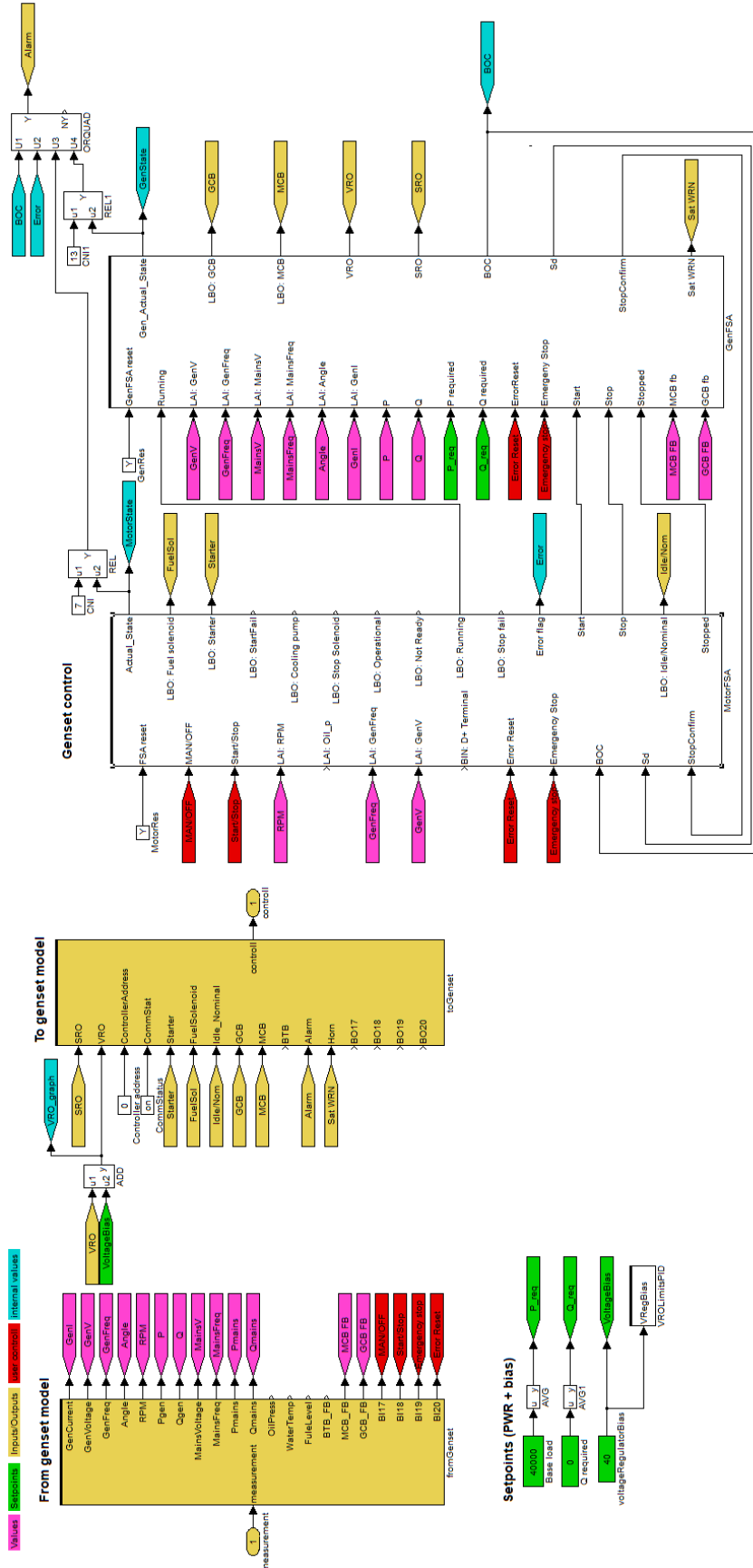
Stavový diagram FSA motoru



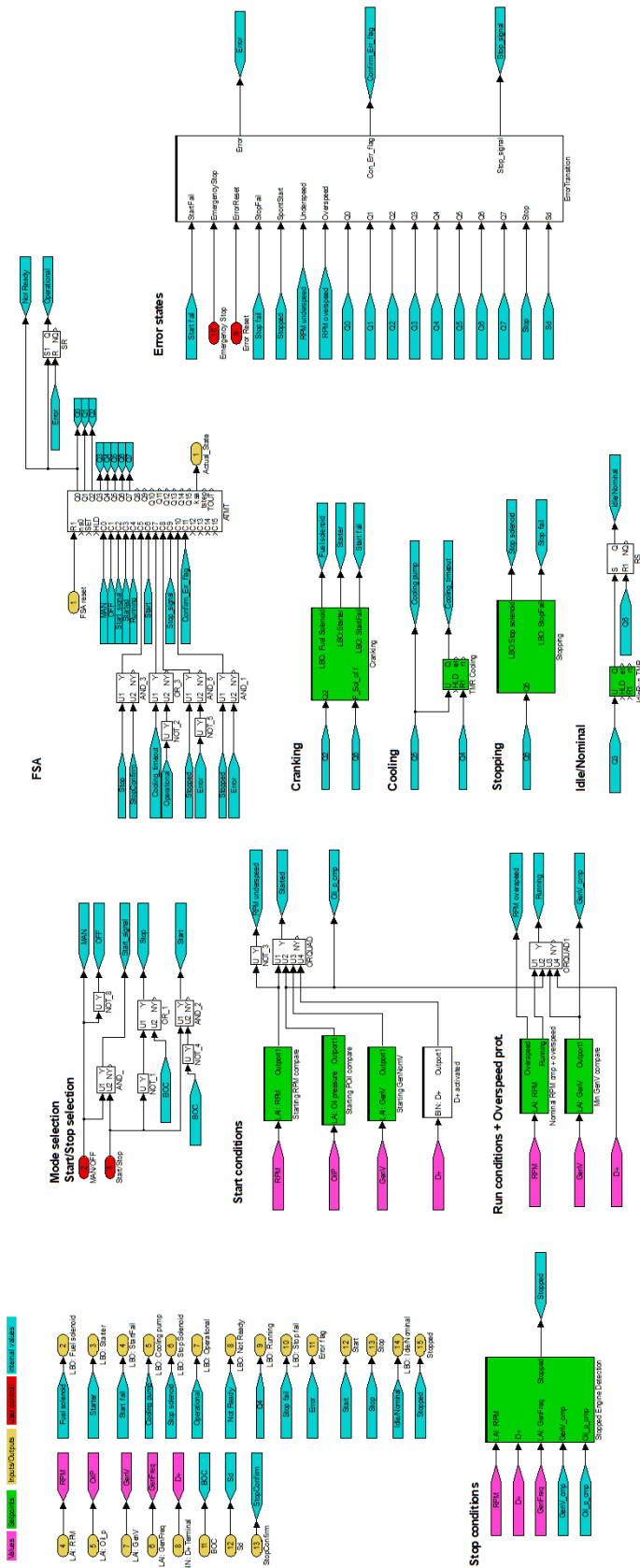
Stavový diagram FSA generátoru



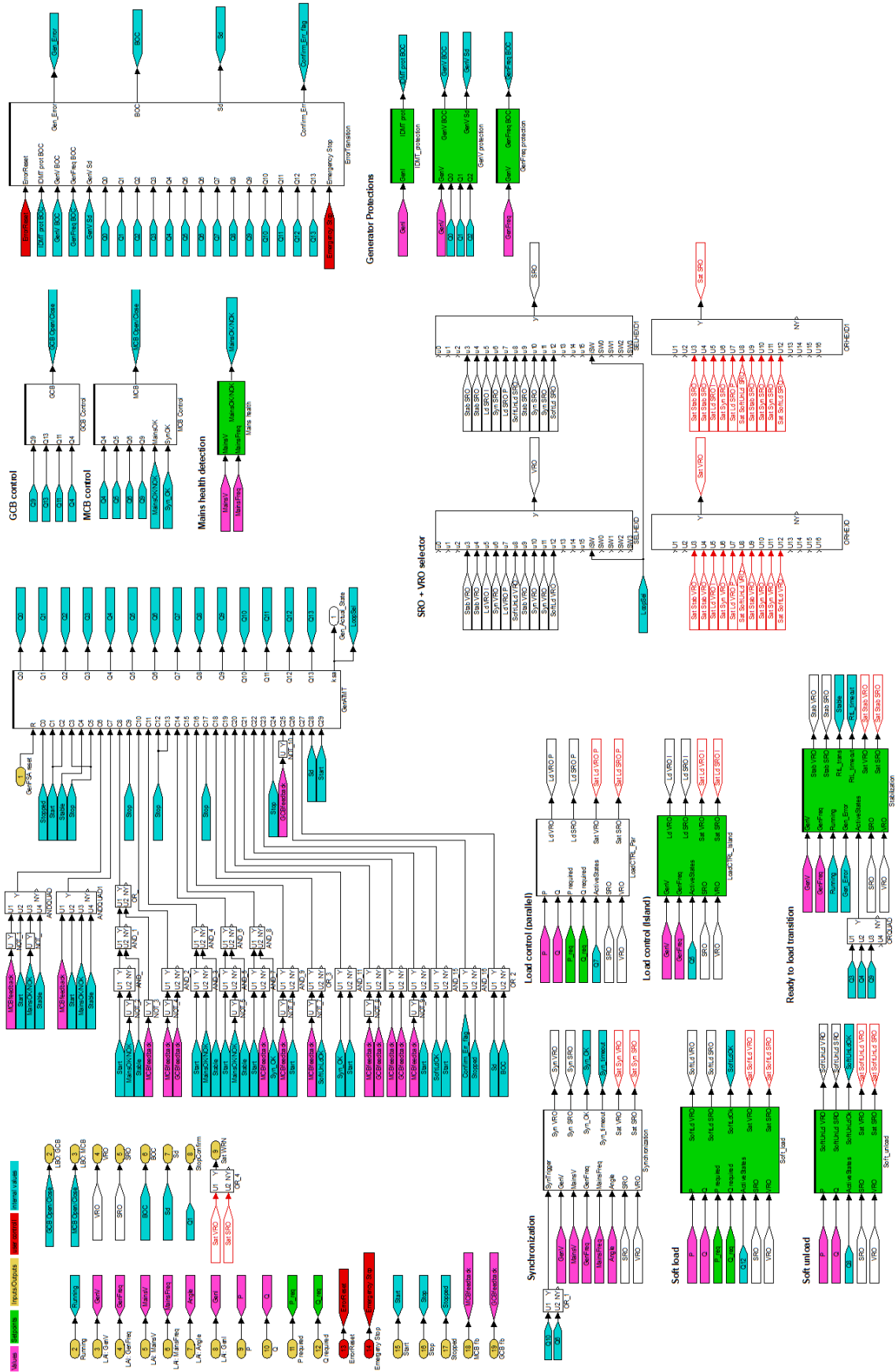
Komunikační úroveň kontroléru



Realizace motorové části kontroléru



Realizace elektrické části kontroléru



Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obrázek 1 Typické připojení záložního zdroje k síti s jeho řídicím systémem [převzato z 2] ..2	
Obrázek 2 Uspořádání funkčních celků motorgenerátoru [převzato z 7]	5
Obrázek 3 Fázorový diagram přebuzeného synchronního generátoru s vyniklými póly [převzato z 10]	6
Obrázek 4 Řízená budicí soustava PMG	7
Obrázek 5 Zjednodušené schéma modelu	9
Obrázek 6 Realizace prepínače módů a Start/Stop tlačítka	15
Obrázek 7 Realizace funkce Cranking	16
Obrázek 8 Testování podmínek nastartování motoru za využití komparátorů	16
Obrázek 9 Testování podmínek běhu motoru	17
Obrázek 10 Realizace výstupní funkce Cooling	18
Obrázek 11 Realizace výstupní funkce Stopping	19
Obrázek 12 Testování podmínek zastaveného motoru	19
Obrázek 13 Subsystem nastavující chybový příznak a jeho kvitace	21
Obrázek 14 Stabilizační regulátory napětí a frekvence	25
Obrázek 15 Vyhodnocení stability výstupu generátoru s umožněním přechodu	25
Obrázek 16 PI regulátory synchronizačních sekvencí	27
Obrázek 17 Výběr výstupní veličiny regulátoru otáček na základě měření	28
Obrázek 18 PI regulátory pro řízení motorgenerátoru v paralelním režimu	30
Obrázek 19 Funkce pro výpočet linearizovaného zatěžování s regulátorem otáček	31
Obrázek 20 Regulátor budicího napětí a vyhodnocení funkce Soft load	32
Obrázek 21 Funkce pro výpočet linearizovaného odlehčování s regulátorem otáček	33
Obrázek 22 Regulátor budicího napětí a vyhodnocení funkce Soft unload	34
Obrázek 23 Subsystem nastavující chybové příznaky a jejich kvitace	35
Obrázek 24 Realizace funkce ochrany GenFreq BOC	36
Obrázek 25 Realizace funkce ochrany GenV BOC a GenV Sd	37
Obrázek 26 Bloková realizace funkce IDMT protection BOC	38
Obrázek 27 Logika řízení MCB	39
Obrázek 28 Detekce zdraví sítě	39
Obrázek 29 Logika řízení GCB	40
Obrázek 30 Prepínač výstupních veličin regulátorů	40
Obrázek 31 a) regulátor s jedním stupněm volnosti b) regulátor s dvěma stupni volnosti [převzato z 16]	42
Obrázek 32 Webové rozhraní simulace	45
Tabulka 1 Barevné značení bloků modelu	12
Tabulka 2 Přechody navrženého motorového FSA	14
Tabulka 3 Přechody navrženého generátorového FSA	23
Tabulka 4 Výběr signálu blokem SEL	28
Tabulka 5 Aktivní výstupní veličiny regulátorů dle stavů	41
Tabulka 6 Popis konfigurovatelných parametrů PIDU[17]	43
Tabulka 7 Finální nastavení parametrů regulátorů	43
Tabulka 8 Přiřazení ovládacích prvků modelu k webovému rozhraní	45

Graf 1 Moment synchronního generátoru s vyniklými póly [převzato z 10].....	7
Graf 2 Ideální provozní diagram synchronního generátoru	11
Graf 3 Tvorba žádané hodnoty funkce Soft load	31
Graf 4 Tvorba žádané hodnoty funkce Soft unload	33
Graf 5 Závislost doby vybavení na nadproudu.....	38
Graf 6 Časový průběh výstupních veličin regulátorů rychlosti a frekvence napětí na generátoru.....	41
Graf 7 Záznam průchodu stavových automatů v ostrovním provozu s regulací na frekvenci a napětí.....	47
Graf 8 Průběhy synchronizační sekvence	49
Graf 9 Průběhy okamžitých činných a jalových výkonů odebíraných z generátoru a sítě	50
Graf 10 Přehled testovacího scénáře s návratem z Island do Parallel.....	51
Graf 11 Průběhy okamžitých činných a jalových výkonů odebíraných z generátoru a sítě	52
Graf 12 Paralelní provoz s přechodem do ostrovního režimu a zpět.....	54
Graf 13 Průběh jalového výkonu generátoru s řídicí veličinou VRO.....	56
Graf 14 Průběh výstupního napětí generátoru, statorového proudu a řídicí veličiny VRO	56
Graf 15 Tok jalového výkonu mezi generátorem a sítí při konstantním činném výkonu generátoru.....	57
Graf 16 Průběh stavů FSA motoru a generátoru se spínáním MCB a GCB	58
Graf 17 Průchod stavu během cyklického zatěžování s řízením MCB a GCB	58
Graf 18 Činný výkon dodávaný generátorem a výstupní řídicí veličina SRO	59
Graf 19 Průběh výkonu dodávaného generátorem a sítí s vynesným požadavkem na start... 59	59
Graf 20 Průběh stavového řízení s chybou úrovně Sd	60
Graf 21 Činný výkon a frekvence napětí na generátoru při přerušení dodávky energie, průběh SRO	61
Graf 22 Výstupní napětí a proud generátoru při přerušení dodávky energie, průběh VRO	61
Graf 23 Průběh dodávaného výkonu sítí a generátorem při testu chyby Sd	62
Graf 24 Průchod stavu kontroléru a spínání GCB	63
Graf 25 Průběhy navýšení příkonu zátěže, frekvence napětí a veličiny SRO	64
Graf 26 Průběhy navýšení proudového zatížení, napětí a veličiny VRO	64