

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studie začlenění trigenerační stanice do stávajícího systému letiště
Qantas - Sydney

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš BENETKA**
Osobní číslo: **E10N0040K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Studie začlenění trigenerační stanice do stávajícího systému letiště Qantas - Sydney**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište stávající napájecí síť VN letiště a zhodnoťte způsob začlenění nové rozvodny trigenerace.
2. Prezentujte energetickou bilanci plynového motoru a popište princip funkce absorpčních jednotek.
3. Proveďte orientační výpočet dynamické stability generátoru a posuďte vliv na možnosti nastavení VN ochran v systému.
4. Posuďte možnosti detekce výpadku nadřazené soustavy při paralelní spolupráci trigenerační stanice.
5. Zhodnoťte navržené zařízení (případě uveďte možnosti dalšího vylepšení či rozšíření).

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.


Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan

L.S.


Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Diplomová práce řeší vybrané technické problémy s připojováním decentralizovaných energo-center malých výkonů do existujících rozvodných sítí. Je prezentováno řešení skutečně realizované instalace trigenerační stanice s plynovými motorgenerátory a je provedeno zhodnocení dosažených výsledků vzhledem k ekonomickému záměru investora.

Klíčová slova

zátěžný úhel rotoru, rovnice kývání, dynamická stabilita, kinetická energie, metoda ploch, prokluz pólů, kritický úhel, kritický čas vypnutí, synchronizační výkon, výpadek sítě, ostrovní provoz, ochrana ROCOF, zátěžový skok, ochrana Vector shift, absorpční jednotka, LiBr, chladicí cyklus, elektrická kompresorová chladicí jednotka, plynový motorgenerátor, kogenerace, trigenerace, využití tepla

Abstract

This paper is focused on the specific questions regarding connection of a small embedded power centers. Adaptation of the real trigeneration gas piston powered engines installation is presented here, followed by an assessment of the reached results in comparison with intentions of the investor.

Key words

rotor load angle, swing equation, transient stability, kinetic energy, equal area method, pole slip, critical clearing angle, critical clearing time, synchronizing power, loss of mains, island operation, ROCOF, load step, Vector shift, absorption chiller, LiBr, cooling cycle, electric compressor chiller, gas piston genset, cogeneration, trigeneration, heat utilization

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 9.5.2013

Bc. Lukáš Benetka

Poděkování

Tímto způsobem bych rád poděkoval Doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. a Ing. Zoltanu Hogyovi za jejich odborné rady a konzultace pro vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat svým pracovním kolegům a svým nejbližším za podporu ve studiu.

Obsah

OBSAH.....	8
ÚVOD	10
1 ELEKTRICKÁ ČÁST PŘIHOJENÍ TRIGENERACE.....	11
1.1 EXISTUJÍCÍ SYSTÉM VN.....	11
1.2 ROZVODNA TRIGENERACE	12
1.3 ALTERNÁTORY TRIGENERAČNÍ STANICE	13
1.4 ŽKRATOVÝ PŘÍSPĚVEK ALTERNÁTORU	14
1.5 ŽKRATOVÝ PŘÍSPĚVEK SÍTĚ.....	14
2 TEPELNÁ ČÁST PŘIHOJENÍ TRIGENERACE.....	15
2.1 ENERGETICKÁ BILANCE PLYNOVÉHO MOTORU.....	15
2.2 VÝROBA CHLADU	16
2.2.1 Absorpce a princip absorpčních jednotek	16
2.2.2 Absorbent	16
2.2.3 Chladicí cyklus.....	16
2.2.4 Diagram cyklu pracovní látky.....	18
2.3 TECHNOLOGICKÉ SCHÉMA VYUŽITÍ TEPLA	19
3 VYBRANÉ PROBLÉMY SE ZAČLEŇOVÁNÍM TRIGENERACE DO MÍSTNÍ SÍTĚ	21
3.1 STABILITA ENERGETICKÉ SOUSTAVY.....	21
3.1.1 Zjednodušený model soustavy	22
3.1.2 Postup řešení stability soustavy (alternátor pracující do sítě).....	23
3.1.3 Metoda ploch.....	26
3.1.4 Stanovení kritické hodnoty zátěžného úhlu	27
3.1.5 Kritický čas vypnutí.....	28
3.1.6 Detekce prokluzu pólů – (ANSI 78)	29
3.1.7 Faktory ovlivňující dynamickou stabilitu.....	30
3.1.8 . Dynamická stabilita synchronního alternátoru posuzované trigenerační stanice.....	31
3.2 ZPŮSOBY DETEKCE OSTROVNÍHO PROVOZU A VÝPADKU NADŘÁZENÉ SOUSTAVY	34
3.2.1 Co je ostrovní provoz:	34
3.2.2 Využití ochrany ROCOF - (ANSI 81R).....	37
3.2.3 Výpočet nastavení ochrany ROCOF pro řešenou instalaci alternátorů 2x 4300 kW.....	39
3.2.4 Ověření vypočtených hodnot praktickou zkouškou	41
3.2.5 Možnosti využití ochrany Vector shift - (ANSI 78)	43
3.2.6 Výpočet nastavení Vector shift pro danou instalaci 2x 4300 kW	44
4 ZÁVĚR.....	47
5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	48
6 SEZNAM PŘÍLOH:	50

Zkratky a pojmy:

S_{ng}	zdánlivý výkon alternátoru
T_a	akcelerační moment
H	inerciální konstanta
J	moment setrvačnosti
W	elektrická práce
δ	zátěžný úhel alternátoru
δ_0	zátěžný úhel při nominálním výkonu
δ_2	úhel maximálního výkyvu
ω	úhlová rychlost
E	vnitřní napětí
U	napětí sítě
V	napětí na svorkách alternátoru
P_0	výkon na počátku přechodného děje
P_m	mechanický výkon
P_e	elektrický výkon
P_{por}	výkon při poruše
P_{max}	maximální přenositelný výkon

Úvod

Předkládaná práce má za cíl prezentovat vybrané otázky, spojené se **začleňováním lokálních energo-center malých výkonů do existující rozvodné sítě**. Taková zařízení jsou instalována za účelem ekonomických úspor, které se dosahují využíváním jinak odpadního tepla z plynových spalovacích motorů, které většinou slouží jako primární pohon takových zařízení. Zachycené teplo se využívá k produkci teplé vody pro místní vytápění (**kogenerace**) nebo i k produkci chladu (**trigenerace**). Tyto malé elektrárny jsou realizovány většinou několika soustrojími plynového pístového motoru a elektrického generátoru. Ty vzájemně spolupracují do místní sítě vysokého nebo i nízkého napětí, obvykle (0,4, 6, 10, 22) kV. Investor tak dosahuje finančních úspor na straně nákupu energií, jelikož kogenerace obecně dosahuje efektivity využití energie v palivu blížící se 90%, a zároveň v některých případech může profitovat i na trhu s podíly produkce škodlivých emisí.

Jako příklad instalace takového zařízení byla zvolena existující **stanice o celkovém výkonu 8,6 MW** zprovozněná v roce 2013 na letišti Qantas v Sydney. Vzhledem ke klimatickým podmínkám, je výchozí teplo z převážné většiny využíváno pro výrobu chladné vody pro klimatizace kancelářských budov a letištních terminálů. Proto jsou v první polovině práce popsány principy výroby chladu pomocí absorpčních vodních a spalinových jednotek a je uvedena tepelná bilance použitých spalovacích motorů. **Elektrický výkon instalace je dostatečný pro pokrytí kompletní místní spotřeby, což vede investora k požadavku minimálního importu z nadřazené sítě**. Požadavek na minimální import s sebou nese jistá úskalí spojená s bezpečností systému vysokého napětí a stabilitou provozu použitých motorgenerátorů. Po úvodu, ve kterém je popsán existující stav VN soustavy a nově připojované zařízení, je **teoreticky rozebrána otázka řešení dynamické stability generátorů** následovaná výpočtem kritického času odpojení pro danou instalaci. Další kapitola se věnuje definování pojmu **ostrovního provozu a možnostem detekce jeho vzniku** běžně používanými metodami ve vztahu k požadavkům dané instalace. Následovně jsou prezentovány pomocné metody výpočtu nastavení, tabulky a grafy, které popisují možnosti praktického využití těchto ochran.

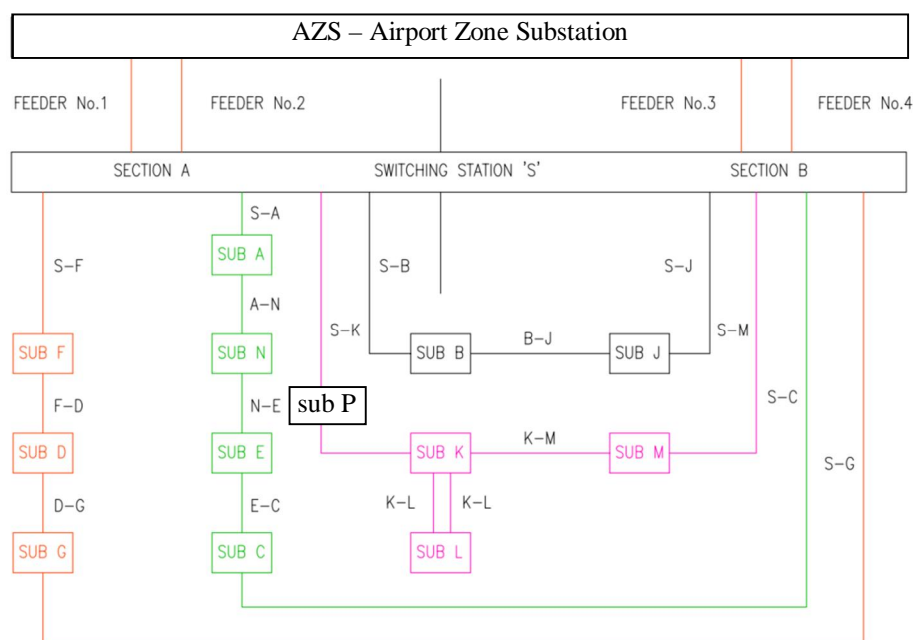
1 Elektrická část připojení trigenerace

Elektrický výkon motorgenerátorů je třeba vhodným způsobem vyvést do existujícího systému. Pro výběr optimálního řešení je třeba vyšetřit existující stav a následně vybrat řešení, které s sebou nese minimální náklady a pokud možno žádná dočasná nebo trvalá omezení pro běžný provoz.

1.1 Existující systém VN

Posuzovaná trigenerační elektrárna je připojena do soustavy 10 kV, napájené hlavním transformátorem s maximálním výkonem 19 MVA a převodem 33/10 kV. Zapojení transformátoru je D/yn, kde uzel sekundárního vinutí je přímo uzemněn. Soustava 10 kV je tvořena hlavní lokální rozvodnou s označením „AZS“ a spínací stanicí, která nese systémové označení „S“. Rozvodna „S“ má dvojitou sběrnici, která je navíc rozdělena vypínači na sekci A a B. Každá ze sekcí je napájena dvěma ze čtyř vývodů z rozvodny AZS.

Distribuce energie z hlavní stanice je realizována systémem okruhů distribučních stanic, které jsou provozovány trvale připojené z obou sekcí stanice „S“ viz. obr. 1. Uspořádání těchto stanic vždy obsahuje sekci pro přívod a vývod do okruhu, ke které je přes sekční spojku připojena sekce s vývody na пониžující distribuční transformátory 10/0,4 kV nebo jinou VN technologii, např. motory kompresorů a čerpadel. Sběrnice těchto rozveden jsou dvojitě. Zkratová odolnost „S“ je 25 kA/3s a distribuované stanice se pohybují v rozmezí od 12,5 kA do 25 kA. Některé stanice jsou dokonce vybaveny máloolejovými vypínači. Měřicí transformátory proudu jsou v celém systému spojujícím rozvodny 10 kV použity s převodem 400/5 A. Nominální proud sběrnic je 1250, vypínače jsou typu SF6 pro proud 630 A. Stáří instalovaného zařízení je přibližně 30 let.



Obrázek 1 - Schéma lokální soustavy 10 kV [25]

Systém chránění je vzhledem ke stáří uskutečněn převážně mechanickými relé anglosaského původu. Kabelová vedení mezi rozvodnami chrání zónová diferenciální ochrana reagující bez zpoždění. Sběrný mají nadproudovou a zemní ochranu s časově závislou charakteristikou.

Vývody do rozvodny „S“ jsou chráněny nadproudovou a diferenciální ochranou. Zónová diferenciální ochrana účinkuje pouze na oblast mezi MTP na vývodech na obou koncích kabelů, detekuje tedy zemní poruchu na kabelu případně i mezifázový zkrat. Protože tato ochrana funguje jen ve vymezené zóně, nemusí být selektivní. Nadproudová ochrana na vývodech v AZS poskytuje záložní chránění pro kabely a slouží jako primární ochrana pro sběrnice rozvodny „S“.

Selektivita je spolehlivě zajištěna v případě poruchy na kabelovém vedení, kdy postižený úsek mezi dvěma rozvodnami je odpojen diferenciální ochranou a více méně tedy nehrozí ztráta napájení pro žádnou z rozvodn. Poruchy na sběrnících zokruhovaných rozvodn jsou chráněny pomocí nadproudové a zemní ochrany na vývodech do kruhu v rozvodně „S“. V případě zkratu na sběrnících některé z rozvodn zapojených v kruhu jsou možnosti selektivity omezené a dojde tím k vypnutí celého kruhu.

1.2 Rozvodna trigenerace

Nově instalovaná rozvodna trigenerace byla včleněna do jednoho z okruhů distribučních stanic tak, že z jedné strany je přímo připojena existujícím vedením

do „S“ a druhým směrem dodává energii přímo do řetězce distribuovaných rozvodů viz. obr. 1. Výkres detailu připojení je v Příloze 1.

Pro označení nové rozvodny trigenerace bylo zvoleno písmeno „P“, jako další v pořadí po existujících rozvodnách. Skladba rozvodny „P“ byla dle zaběhlých zvyklostí zvolena dvou-sekční s kabelovým propojením. Do každé sekce dodává výkon jeden VN generátor 4300 kW. Vyvedení výkonu z rozvodny „P“ je realizováno přes vývody do okruhu, kdy každý z vývodů je zařazen v jedné ze sekcí rozvodny „P“. Dále je z každé sekce napojen transformátor vlastní spotřeby, záložní elektrické kompresorové jednotky pro výrobu chladu a pole měření. Základní parametry rozvodny shrnuje tabulka níže.

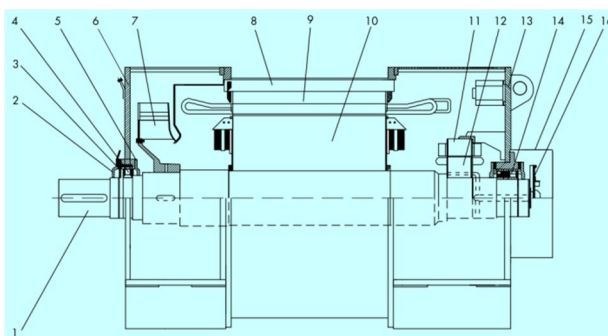
Výrobce, typ	ABB, UniGear ZS1
jmenovité napětí	17,5kV
jmenovitý proud sběrnic	1250A
zkratová odolnost	25kA/3s
jmenovitý proud vypínačů	630A a 1250A
typ vypínačů	HD4 - vakuové
počet polí	15
chránění	diferenciální ochrana sběrnic

Tabulka 1 - Parametry rozvodny „P“ 10 kV [25]

1.3 Alternátory trigenerační stanice

Na instalaci jsou použity bezkartáčové synchronní generátory. Mechanické provedení a základní parametry jsou následující.

- | | | |
|---------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 1 Hřídel | 7 Ventilátor | |
| 2 Vnější víko ložiska | 8 Kryt statoru | |
| 3 Regulátor množství tuku | 9 Stator hlavního generátoru | 13 Ložiskový štít strana B |
| 4 Valivé ložisko strana A | 10 Rotor hlavního generátoru | 14 Valivé ložisko strana B |
| 5 Vnitřní víko ložiska | 11 Stator budiče | 15 Kryt usměrňovače |
| 6 Ložiskový štít strana A | 12 Rotor budiče | 16 Nosič usměrňovače |



Obrázek 2 - Podélný řez alternátorem [25]

výrobce/typ	AvK/DIG 156 m/6	
zdánlivý výkon	5937	kVA
činný výkon	4750	kW
jmenovité napětí	10500	V
jmenovitý proud	326 (312)	A
účinník	-0,95 ÷ 0,8	-
frekvence	50	Hz
otáčky	1000	ot/min
počáteční rázový zkratový proud	1869	A
reaktance	nenasycená/nasycená	
ustálená podélná reaktance x_d	1.713 / 1.542	p.j.
přechodná podélná reaktance x_d'	0.257 / 0.257	p.j.
rázová podélná reaktance x_d''	0.165 / 0.150	p.j.
ustálená impedance zpětné složky x_2	0.193 / 0.175	p.j.
regulátor buzení	BASLER, typ DECS 100	
moment setrvačnosti	780	kgm ²

Tabulka 2 - Parametry alternátoru [25]

1.4 Zkratový příspěvek alternátoru

Pro určení počáteční rázové hodnoty zkratového proudu je třeba přepočíst poměrnou hodnotu nenasyčené rázové reaktance na hodnotu v Ohmech.

$$X_g'' = \frac{x_d''}{100} \cdot \frac{U_{ng}^2}{S_{ng}} \quad (1)$$

Pak již lze dle vztahu určit zkratový příspěvek.

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_{ng}}{\sqrt{3} \cdot X_g''} = \frac{1,1 \cdot 10250}{\sqrt{3} \cdot 3362,8} = 1936 \text{ A} \quad (2)$$

1.5 Zkratový příspěvek sítě

Hodnoty obdržené od provozovatele nadřazené sítě udávají hodnotu zkratového proudu na straně 33 kV viz. tabulka 3.

Zkratový proud na straně 33 kV	minimální hodnota	maximální hodnota
trojfázový zkrat	6,8 kA	10 kA
jednofázový zkrat	4 kA	5,5 kA

Tabulka 3 - Zkratové poměry v soustavě 33 kV [25]

Přepočtení na hladinu 10 kV bude.

Zkratový proud na straně 33kV	minimální hodnota	maximální hodnota
trojfázový zkrat	5,8 kA	6,34 kA
jednofázový zkrat	6,37 kA	6,79 kA

Tabulka 4 - Zkratové poměry v soustavě 10,5 kV [25]

2 Tepelná část připojení trigenerace

Při návrhu připojení teplovodního systému trigenerace je třeba zvolit takové řešení, které zajistí stálost teplot a tlakových poměrů v systému. V případě nerovnováhy průtoků nebo náhlých velkých změn v odběrech tepla mohou nastat problémy s udržováním přípustných teplot v primárních okruzích motoru nebo může docházet k neoptimálnímu chodu čerpadel např. ke kavitaci.

2.1 Energetická bilance plynového motoru

Technická specifikace motorogenerátoru		
Palivo	zemní plyn metanové číslo dolní mez výhřevnosti hustota plynu	80 10,24 kWh/m ³ 0,8 kg/m ³ n
Motor	mechanický výkon na hřídeli otáčky	4 390 kW 1 000 ot/min
Alternátor	jmenovité napětí frekvence	10 500 V 50 Hz
Energetická bilance soustrojí – při výkonu 100%		
elektrický výkon	4 300 kW	
účinnost alternátoru při $\cos\phi=1$	97,9 %	
mechanický výkon na hřídeli	4 390 kW	
teplo motorové vody	1 660 kW	
teplo mezichladiče	432 kW	
teplo mazacího oleje	525 kW	
teplo spalin	2435 kW	
výstupní teplota spalin	458 °C	
objem spalin	23 746 kg/h	
spotřeba paliva	10 238 kW	
elektrická účinnost	42 %	
mechanická účinnost	42,9 %	
tepelná účinnost	45,1 %	
celková účinnost	87,1 %	

Tabulka 5 - Technická specifikace motoru [25]

2.2 Výroba chladu

Principem trigenerace je společná produkce elektrické energie, tepla a chladu. Následující kapitola má za cíl představit princip absorpčního chladicího zařízení, které dokáže využít odpadní teplo z plynového motoru, jako zdroj energie pro ochlazování vody systému klimatizace.

2.2.1 Absorpce a princip absorpčních jednotek

Funkce absorbérů je založena na odebírání tepla ze systémové vody pomocí výměníku, kde na opačné straně výměníku dochází k odpařování ochlazovače (destilovaná voda a příměsi). Vzniklá vodní pára je následně zachycena absorpčním roztokem Lithium-Bromidu. Výsledkem je vodou zředěný roztok LiBr s vodou, který je opět zkoncentrován výparem vody v ohříváku. Celý cyklus probíhá opakovaně.

2.2.2 Absorbent

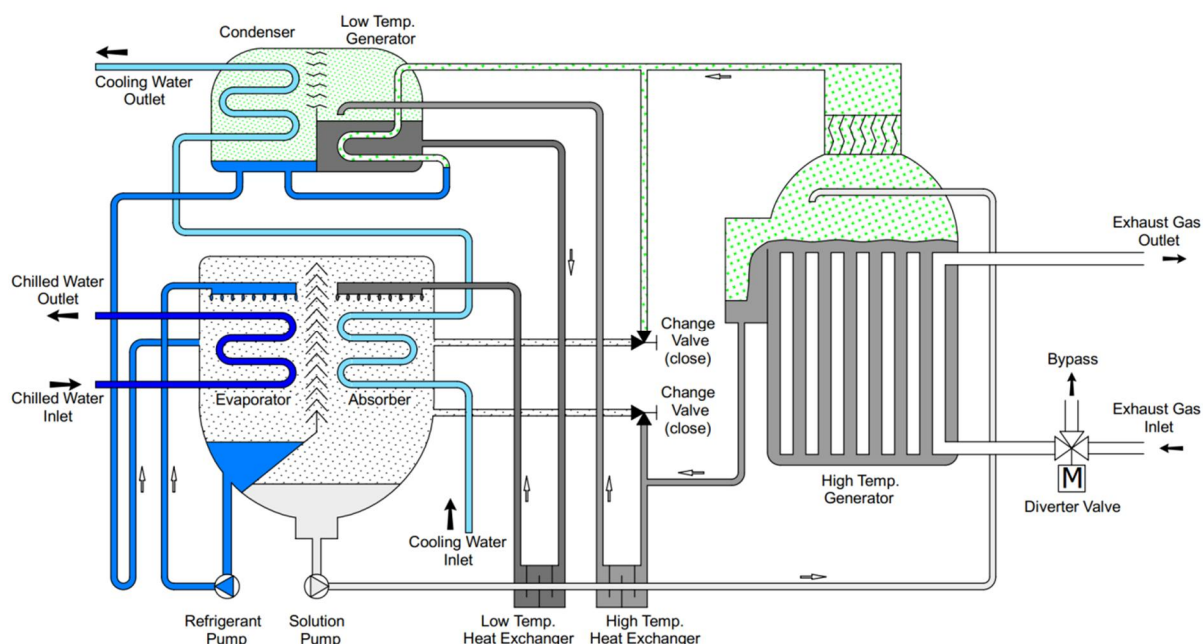
Látkou, která je použita pro zachycování vody, je Lithium-Bromid (LiBr). Tato chemická sloučenina je svými vlastnostmi podobná soli (NaCl), má velmi dobrou schopnost pohlcovat vlhkost z okolí. Čím vyšší je její koncentrace a čím nižší je teplota pohlcované vody (páry), tím je schopnost absorbovat vodu silnější. Během pracovního cyklu absorbéru se koncentrace roztoku vody a LiBr mění.[24]

2.2.3 Chladicí cyklus

Aby bylo docíleno nízké teploty vody ochlazovaného okruhu, je zapotřebí aby se voda vypařovala při dostatečně nízké teplotě. Toho je dosaženo vytvořením vakua ve výparníku absorpční jednotky. Ochlazovaná voda má na vstupu do výparníku teplotu standardně 14°C, pokud je na druhé straně výparníku voda ve vakuu, dojde k jejímu odpařování a tím se odebere teplo ze systémové vody. Takto je možné dosáhnout výstupní teploty ochlazené vody typicky 7°C.

Na obr. (3) je principiální schéma absorpční jednotky, která se skládá z výparníku, absorbéru, kondenzátoru, vysokoteplotního a nízkoteplotního ohříváku, výměníků tepla roztoku, čerpadel vody a roztoku a několika dalších důležitých příslušenství. Celý cyklus začíná ve výparníku, kde trubkovým svazkem proudí ochlazovaná voda, která ve vakuu ohřívá a odpařuje vodu rozstříkovanou na vnější stěny trubek uvnitř výparníku. Vzniklá pára je vtahována do absorbéru, kde je pohlcena koncentrovaným roztokem LiBr. Absorpce vody do roztoku je tím intenzivnější, čím nižší je jeho teplota. Absorpční částí proto prochází další trubkový svazek tentokrát okruhu s chladicí vodou (nikoliv chlazenou) a teplo přijaté

z chlazené vody je odvedeno do okruhu chladících věží a dále uvolněno do okolí. Roztok, vlivem ředění vodou, postupně ztrácí svoji schopnost vázat vodu, a proto je po zředění čerpán do vysokoteplotního (VT) ohříváku. Zdrojem tepla pro tento ohřívák je v případě trigenerace proud spalin nebo motorová voda plynového motoru. Tím se voda z roztoku opět odpaří a pokračuje ve svém cyklu do nízkoteplotního (NT) ohříváku. V NT ohříváku dochází k dodatečnému odpařování vody z roztoku, s využitím tepla odpařené vody z VT ohříváku. Mezi VT a NT ohřívákem koncentrovaný roztok předal část svého tepla přes VT výměník do zředěného roztoku, který je čerpán z absorberu do VT ohříváku. Vodní pára vzniklá v NT ohříváku je následně zkapalněna v kondenzátoru, kde je teplo přes výměník odváděno opět okruhem chladících věží. Vodní pára, která posloužila pro ohřev roztoku v NT ohříváku je také zavedena do kondenzátoru. Zkondenzovaná voda odtud proudí do výparníku a začíná nový chladicí cyklus.

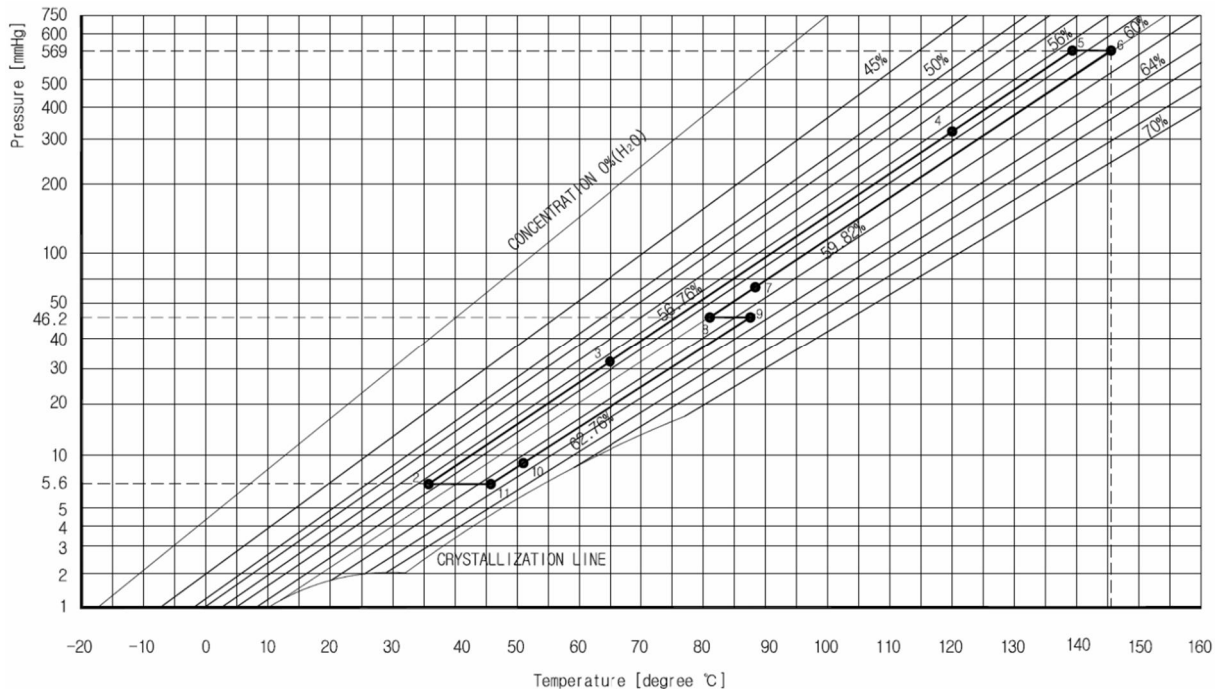


Obrázek 3 - Proces výroby chladu absorpční jednotky pro spolupráci s plynovým motorem [24]

Koncentrovaný roztok z obou ohříváků je zaveden do absorberu, kde se děje další proces absorpce vodní páry. Ještě před tím, než je koncentrovaný roztok rozstříknut v absorberu, odevzdá přes NT výměník teplo zředěnému roztoku na výstupu z absorberu. Takto se docílí zvýšení účinnosti.

2.2.4 Diagram cyklu pracovní látky

Graf 1 níže ukazuje jak pracovní látka, roztok LiBr s H₂O, mění v průběhu cyklu svoji teplotu, tlak a koncentraci.



Graf 1 - Diagram pracovní látky absorbéru [24]

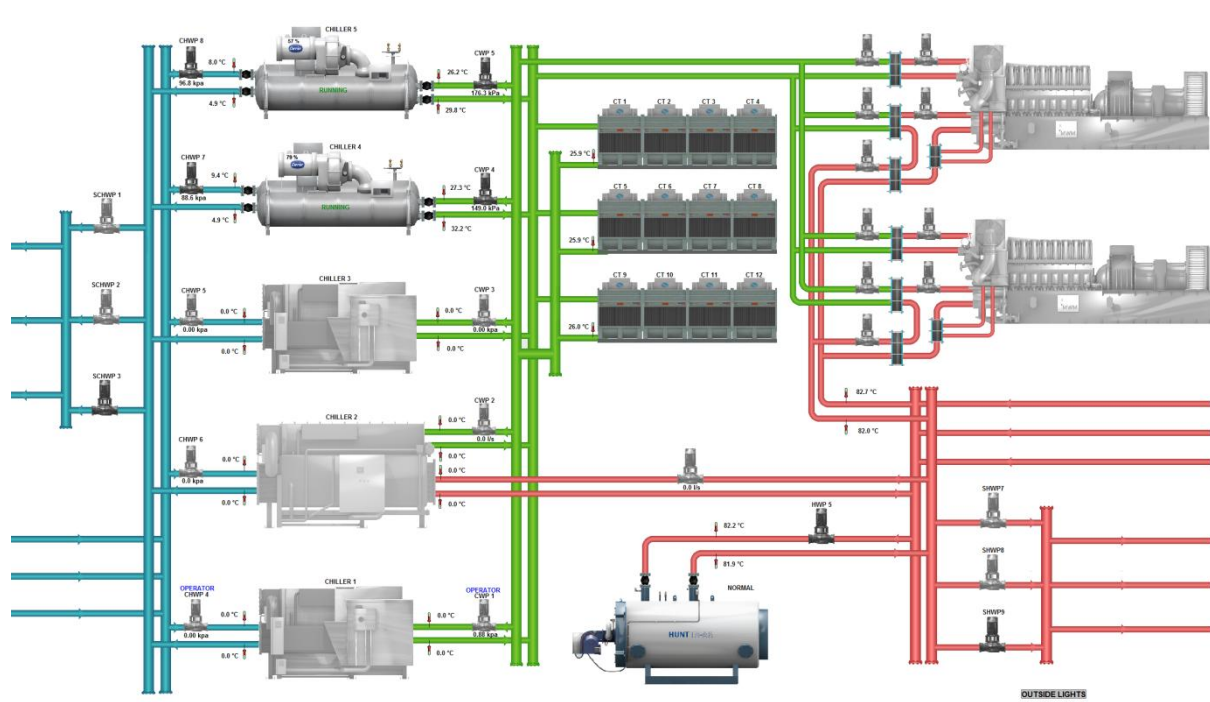
- Bod 1. V bodě 1, který je totožný s bodem 11. koncentrovaný roztok je přiveden do absorbéru a začíná vázat vodní páru přicházející z výparníku.
- Bod 2. Zředěný roztok na výstupu z absorbéru, ale před vstupem do NT výměníku.
- Bod 3. Zředěný roztok ohřátý přes NT výměník teplem z koncentrovaného roztoku.
- Bod 4. Zředěný roztok ohřátý teplem koncentrovaného roztoku, proudícího skrze VT výměník do NT ohříváku.
- Bod 5. Zředěný roztok zahřátý na teplotu varu.
- Bod 6. Středně koncentrovaný roztok odcházející před VT výměník z VT ohříváku do NT ohříváku.

- Bod 7. Středně koncentrovaný roztok před vstupem do NT ohříváku, který předal část tepla přes VT výměník do zředěného roztoku před vstupem do VT ohříváku.
- Bod 8. Středně koncentrovaný roztok v NT ohříváku, který po dodatečném odpaření vody zvýší koncentraci.
- Bod 9. Koncentrovaný stav roztoku před vstupem do NT výměníku.
- Bod 10. Koncentrovaný roztok, který na NT výměníku předal svoje teplo do zředěného roztoku na výstupu z absorbéru.
- Bod 11. Koncentrovaný roztok na tryskách v absorbéru. Díky relativně nižšímu tlaku v absorbéru ztrácí roztok částečně teplotu a tlak.

2.3 Technologické schéma využití tepla

Vodní okruhy trigeneračních jednotek jsou zapojeny tak, aby produkované teplo bylo maximálně využito. Každá jednotka má celkem tři okruhy, ze kterých je možné odebírat teplo. Nejlépe využitelným okruhem s největším obsahem využitelného tepla je okruh motorové vody, který má tepelný spád 92/80°C. Dalším okruhem je chlazení motorového oleje, jehož tepelný spád 88/80°C dává přibližně třetinový tepelný výkon než okruh předchozí. Posledním okruhem je chlazení palivové plnicí směsi po stlačení turbodmychadlem. Teplo tohoto okruhu již není snadno využitelné kvůli nízkým teplotám 45/38°C, a proto se většinou maří na ventilátorových chladičích.

Na obr. 4 je přehledové schéma celého vodního systému v rámci energo-centra. Motory předávají teplo do sekundárního okruhu, ve kterém je zapojen vodní absorbér, který přeměňuje dle principu popsaného v předchozí kapitole horkou vodu na vodu chlazenou a ta je pak čerpána ke spotřebičům. Do horkovodní smyčky je zapojen také záložní plynový kotel, který je schopen pokrýt vyšší nároky absorbéru na dodávku tepla ve špičkách spotřeby, čímž je docíleno optimálního výkonu. Další dvě absorpční jednotky využívají jako zdroj tepla pro výrobu chladu proud spalín plynových motorů. Odebrané teplo z pracovního roztoku absorbérů je odváděno pomocí chladičích věží s otevřeným okruhem. Pro případ odstávky motorů například z důvodu servisu nebo přerušení dodávky plynu, jsou k dispozici záložní elektrické kompresorové absorpční jednotky s výkonem dostatečným pro pokrytí celé spotřeby letiště. Technologické schéma vodních okruhů je v Příloze 2.



Obrázek 4 - Vodní schéma využití tepla [25]

3 Vybrané problémy se začleňováním trigenerace do místní sítě

Připojené alternátory budou při přechodných stavech ovlivňovat parametry v lokální soustavě. Je proto nutné si udělat představu, jak velké tyto vlivy budou a provést potřebná nastavení ochran. Mezi vlivy, které je třeba zhodnotit, patří například:

- zkratové příspěvky,
- provozní tepelné zatížení kabelů,
- dimenzování uzemnění,
- potřebný rozsah chránění generátoru,
- dynamická stabilita,
- způsob detekce ostrovního provozu,
- způsob regulace výkonu.

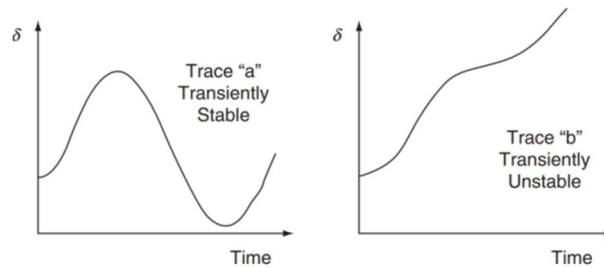
3.1 Stabilita energetické soustavy

Statickou stabilitou ES rozumíme schopnost soustavy setrvat v ustáleném synchronním chodu, tj. ve stavu s konstantními úhlovými rozdíly mezi rotory jednotlivých alternátorů, při vzniku jakékoliv velmi malé změny.[19] Soustava je obecně považována za staticky stabilní pokud se zátěžný úhel pohybuje v rozmezí 0° až 90° .

Dynamická stabilita je schopnost energetického systému zachovat nebo samostatně obnovit synchronní chod (stejně, konstantní úhlové rychlosti rotorů alternátorů), i přesto že byl vystaven mimořádným náhlým přechodným dějům (poruchám), které způsobily velké změny v zatížení jednotlivých alternátorů (změny jejich zátěžných úhlů) do systému pracujících.[17] Jedná se vlastně o jev stability rotoru, kdy všechny alternátory v soustavě musí vzájemně udržet synchronní spolupráci. Pro dynamickou stabilitu je výhodnější, pokud systém pracuje s dostatečnou výkonovou rezervou cca 20%.[19] Při dynamických změnách zátěžného úhlu může dojít k výkyvům přesahujícím zátěžný úhel 90° (až do 180°). V současnosti se jedná o problém hlavně kogeneračních elektráren, vyplývající z relativně malých setrvačných hmot vlastních soustrojí.

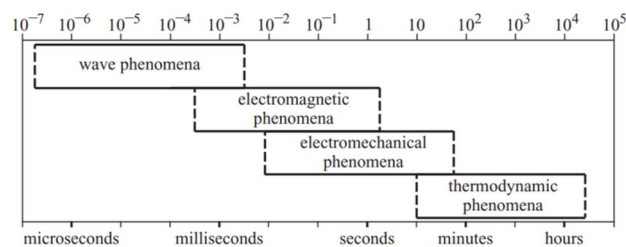
Stabilní a nestabilní stav lze zobrazit jako závislost zátěžného úhlu rotoru alternátoru a času během trvání přechodného děje (poruchy). Křivky v obr. 5 znázorňují stabilní a nestabilní průběh změny zátěžného úhlu rotoru alternátoru v soustavě během přechodného děje (změny parametrů soustavy). Trajektorie „a“ charakterizuje stabilní chování, kde se rotor alternátoru ustálí a osciluje kolem nového rovnovážného bodu, kdežto v případě „b“ zátěžný

úhel aperiodicky roste a alternátor nedosáhne nové ustálené polohy rotoru (zátěžného úhlu) a není tedy dynamicky stabilní. V systému, do kterého pracuje více soustrojí, to znamená, že stroj „vypadne“ ze synchronismu.



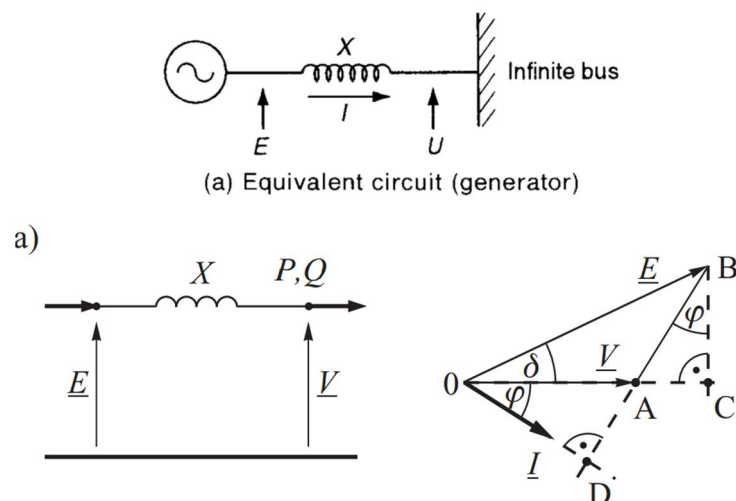
Obrázek 5 - Stabilní a nestabilní průběh změny zátěžného úhlu během přechodného děje [9]

Pro doplnění je uvedena tabulka dimenzí dílčích dynamických jevů v soustavě.



Obrázek 6 - Časový rámec základních dynamických jevů v elektroenergetické soustavě [12]

3.1.1 Zjednodušený model soustavy



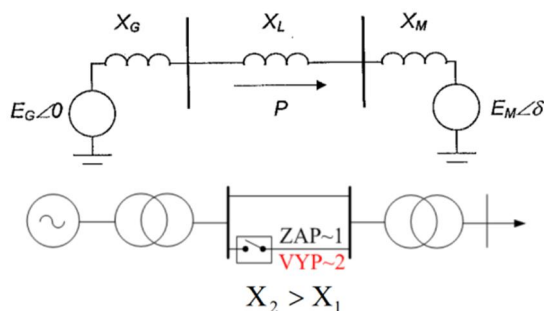
Obrázek 7 - Jednoduchá soustava a její fázorový diagram [12]

Největším zjednodušením je úprava vyšetřované části soustavy na jediný alternátor a nahrazení zbývajících částí soustavy přípojnicemi s konstantním napětím a stálou frekvencí. Takto upravenou část soustavy nazýváme tvrdá síť.[19]

E je vektor indukovaného elektromotorického napětí náhradního alternátoru a U je napětí tvrdé sítě.

Úhel δ je označován jako *zátěžný úhel* a představuje rozdíl úhlů vektorů napětí na obou koncích přenosu (mezi vnitřním napětím alternátoru a napětím tvrdé sítě „za“ impedancí sítě).

Při řešení se uplatňuje přechodná reaktance alternátoru X_d' společně s reaktancí sítě.



Obrázek 8 - Model soustavy s dílčími reaktancemi a příkladem náhlé změny konfigurace soustavy [1]

Zvětšení podélných impedancí (vypnutí jednoho z paralelních vedení) má za následek zeslabení vzájemné vazby mezi alternátory v soustavě. Zmenšení příčných impedancí (zemní spojení, připojení kompenzace) má za následek zmenšení vazebních admitancí. [7]

Výchozí předpoklady (podmínky) pro řešení:

Budící proud alternátoru předpokládáme konstantní pro počáteční stadium přechodného jevu (první 1s – zanedbáváme působení regulátoru buzení). To znamená, že indukované elektromotorické napětí bude mít konstantní velikost. V průběhu přechodného jevu se však mění jeho frekvence, a tedy se mění i poloha fázoru E v komplexní rovině. Napětí U má též konstantní velikost a navíc i konstantní frekvenci, protože předpokládáme tvrdou síť. Svou polohu v komplexní rovině nemění. [17] [19]

3.1.2 Postup řešení stability soustavy (alternátor pracující do sítě)

Rovnice kývání

Rotor alternátoru je běžně spojen pomocí společné hřídele se strojem vytvářejícím takto mechanický točivý moment na rotor. Pokud je zároveň alternátor připojen k zátěži a vinutím rotoru protéká budící proud, vzniká točivé elektromagnetické pole, které kombinací s polem statoru vytváří elektromagnetický brzdný moment působící proti mechanickému momentu rotoru (turbíny, motoru).

Toto zjednodušeně popisuje rovnice:

$$T_a = T_{mech} - T_{elmag} \quad (3)$$

V rovnovážném stavu je akcelerační moment T_a roven nule. Pokud dojde k odlehčení alternátoru, hmota rotoru je urychlována rozdílem momentů $T_{mech} - T_{elmag}$.

Důležitým parametrem společného rotoru soustrojí je setrvačnost daná rozložením hmot materiálů podél jeho poloměru. V praxi se mechanická setrvačnost soustrojí charakterizuje normalizovanou **inerciální konstantou H**, která má časový rozměr (sekundy) a vyjadřuje poměr mezi kinetickou energií rotoru při jmenovitých otáčkách a jmenovitým elektrickým výkonem v MVA. Jinými slovy představuje dobu v sekundách, kterou by alternátoru trvalo dodat stejné množství elektrické energie (rovné kinetické energii rotoru), když bude pracovat na svůj jmenovitý výkon daný v MVA.

Vztah pro akcelerační moment.

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_a \quad (4)$$

Určení inerciální konstanty.

$$H = \frac{W_K}{S_G} = \frac{1}{2} J \omega^2 \frac{1}{S_G} \quad (5)$$

Vztah mezi setrvačností a inerciální konstantou.

$$J = \frac{2H}{\omega^2} S_G \quad (6)$$

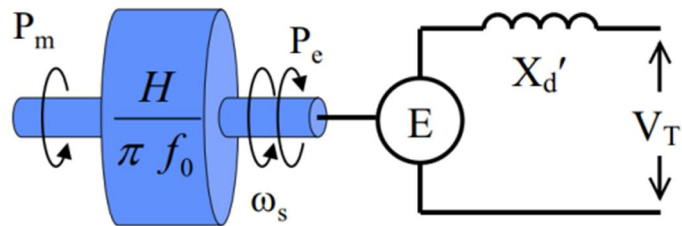
Pomocí těchto vztahů lze vztah pro akcelerační moment zapsat jako:

$$\frac{2H}{\omega^2} \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_{mech} - T_{elmag} \quad (7)$$

Protože výkon P je moment krát úhlová rychlost rotoru, lze rovnici přepsat také do tvaru:

$$\frac{2H}{\omega} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{mech} - P_{elmag} \quad (8)$$

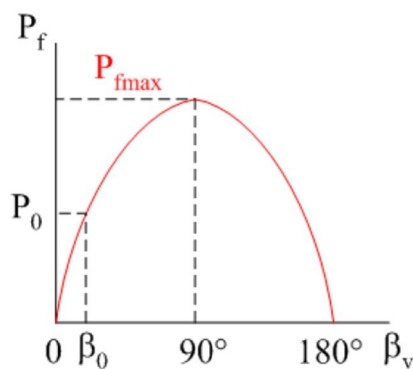
Tato rovnice popisuje dynamické chování rotoru, a proto se nazývá rovnice kývání.



Obrázek 9 - Mechanický model rotoru soustrojí [3]

Zátěžný úhel δ

Následující obrázek popisuje závislost zátěžného úhlu na výkonu dodávaném alternátorem. Výkon roste společně se zátěžným úhlem až do 90° , a potom opět klesá až do nuly při 180° .



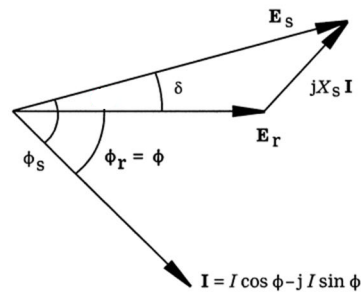
Obrázek 10 - Závislost zátěžného úhlu na výkonu alternátoru [26]

Vztah mezi výkonem alternátoru a zátěžným úhlem rotoru, je popsán rovnicí:

$$P_0 = P_{max} \sin \delta \quad (9)$$

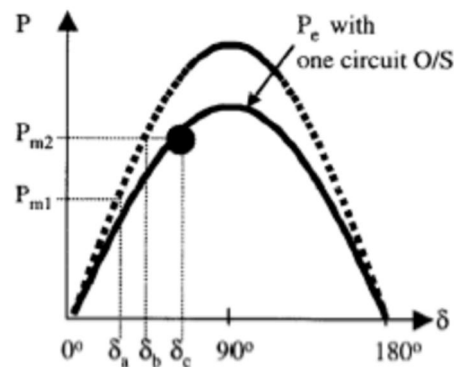
maximální výkon, který je alternátor schopen při konstantním buzení dodat do sítě, je dán součinem poměrných hodnot vnitřního napětí alternátoru a napětí sítě, vztaženým k poměrné hodnotě celkové reaktance mezi napětími (X_d , $X_{vedení}$, $X_{soustavy}$).

$$P_{max} = \frac{|\bar{E}_{alt}| \cdot |\bar{E}_{sys}|}{X_{celk}} \quad (10)$$



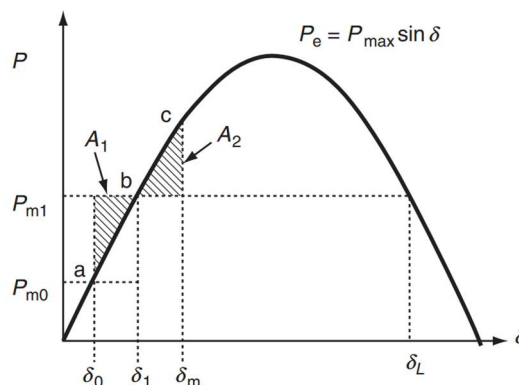
Obrázek 11 – Diagram fázorů napětí alternátoru [26]

Maximální hodnota výkonu je tedy dána vnitřním napětím alternátoru a napětím sítě a hlavně je ovlivněna reaktancí přenosové cesty, tj. součtem přechodové reaktance alternátoru a poruchové reaktance sítě. Čím větší je přenosová reaktance, tím nižší je maximální přenositelný výkon. Platí, že při náhlém zvýšení impedance přenosové cesty dojde k poklesu přenášeného výkonu. Z důvodu stejného mechanického momentu působícího na hřídel rotoru alternátoru dojde ke zvětšení zátěžného úhlu. Z toho plyne potřeba posuzovat, zda taková náhlá změna zátěžného úhlu může vést k nestabilitě chodu alternátoru. Pro posouzení lze využít **metodu ploch**, vycházející z charakteristiky zátěžného úhlu.

Obrázek 12 - Změna maximálního výkonu způsobená např. zvětšením X - vypnutím paralelního vedení [9]

3.1.3 Metoda ploch

Jedná se o kvalitativní posouzení **dynamické stability** pomocí pravidla rovnosti ploch urychlující a zpomalující energie působící na rotor. Pomocí této metody lze určit kritickou hodnotu **zátěžného úhlu**, při kterém dojde ke ztrátě dynamické stability.



Obrázek 13 - Plochy práce potřebné pro změnu kinetické energie rotoru [9]

Při vychýlení rotoru z rovnovážné polohy, musí před ustálením zátěžného úhlu v novém rovnovážném bodě dojít k vyrovnání momentů hřídele a elektromagnetického pole mezi rotorem a statorem. Zátěžný úhel musí dosáhnout nové rovnovážné polohy. Tento jev popisuje rovnice kritéria dynamické stability.

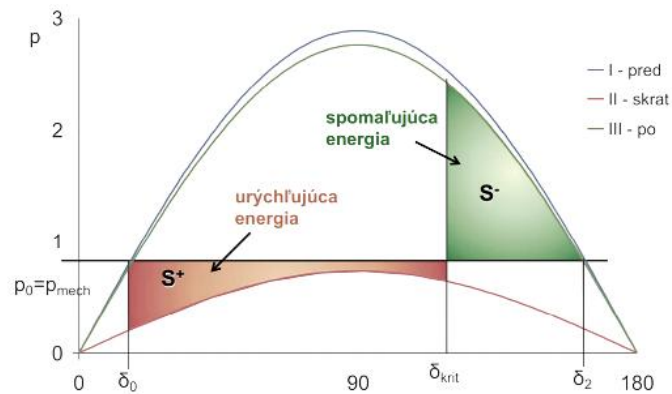
$$\sqrt{\int_{\delta_0}^{\delta} \frac{\omega}{H} (P_m - P_e) d\delta} = \frac{d\delta}{dt} = 0 \quad (11)$$

Rozdíl ploch (práce) A_1 , A_2 vytýčených hodnotami mechanického a elektrického výkonu a hodnotou zátěžného úhlu se musí rovnat nule, aby systém byl stabilní. Oblast A_1 na obrázku 13 představuje kinetickou energii, kterou rotor získal při dodávce mechanického výkonu (práce) a oblast A_2 představuje **kinetickou energii** ztracenou působením elektromagnetického momentu pole (práce) mezi rotorem a statorem. Z vysvětleného je zřejmé, že rotor nesmí přesáhnout jistou kritickou hodnotu zátěžného úhlu, jinak se alternátor stane z důvodu nedostatečného brzdného momentu nestabilním a je třeba ho odpojit od soustavy vypnutím generátorového vypínače. Hodnotu tohoto úhlu lze vypočítat.

3.1.4 Stanovení kritické hodnoty zátěžného úhlu

Kritický úhel je dosažen v okamžiku, kdy by plocha zpomalující energie v charakteristice zátěžného úhlu odpovídající stavu po odpojení poruchy, již nemohla být větší než plocha urychlující energie dle charakteristiky pro stav při poruše. Vychází se tedy z **metody ploch**, jak je znázorněno na následujícím obrázku 14.

$$S^+ = S^-$$



Obrázek 14 - Metoda ploch [17]

Kritický úhel se určí z rovnosti ploch energií.

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_0 - P_{por} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_2} (P_{max} \sin \delta - P_0) d\delta \quad (12)$$

Úpravou rovnice dojdeme ke vztahu pro kritický úhel.

$$\delta_c = \cos^{-1} \left(\frac{P_0(\delta_2 - \delta_0) \frac{\pi}{180^\circ} + P_{max} \cos \delta_2 - P_{por} \cos \delta_0}{P_{max} - P_{por}} \right) \quad (13)$$

Úhel maximálního výkyvu je doplněk do 180° k zátěžnému úhlu před náhlou změnou.

$$\delta_2 = 180^\circ - \delta_0 \quad (14)$$

Na základě informace o kritickém úhlu je jako další logický krok určení času, ve kterém alternátor **kritického úhlu** dosáhne.

3.1.5 Kritický čas vypnutí

Pro praktické využití (nastavení ochran) je potřebné znát kritický čas, ve kterém dosáhne zátěžný úhel kritické hodnoty. Veškeré poruchy v systému potom musí být odpojeny dříve, než úhel rotoru dosáhne kritické hodnoty. Kritický čas je tedy základní údaj pro zachování dynamické stability synchronního alternátoru.

Určení kritického času vychází z rovnice kývání. Uvažuje se, že činný elektrický výkon při poruše je nulový. Mechanický výkon motoru a tím i akcelerační výkon je uvažován po celou dobu konstantní.

$$\frac{2H}{\omega} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (15)$$

$$P_e = 0$$

Z rovnice je potřeba vyjádřit čas t , je proto nutné provést dvojitou integraci.

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\omega}{2H} P_m \int_0^t dt = 1 \frac{\omega}{2H} P_m t \quad (16)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{\omega}{2H} P_m t^2 + \delta_0 \quad (17)$$

Po formální úpravě je výsledkem vztah pro určení doby, během které se zátěžný úhel zvětší až na **kritickou hodnotu**, kdy z důvodu nedostatku brzděné energie dochází k výpadku ze synchronizmu a ztrátě dynamické stability.

$$t = \sqrt{\frac{4H(\delta - \delta_0)}{\omega P_m}} \quad (18)$$

Mechanický výkon je třeba zadat v poměrné hodnotě vztažené k jmenovitému zdánlivému výkonu alternátoru (byla použita také pro výpočet inerciální konstanty H). Rozdíl zátěžných úhlů je třeba převést na úhlové jednotky.

Pokud není k dispozici ochrana, která rozpozná nestabilitu (asynchronní chod) alternátoru, je nutné provést nastavení ochrany tak, aby vypnula generátorový vypínač dříve, než může pro nejnepříznivější případ (dokonalý zkrat na svorkách alternátoru) teoreticky dojít k výpadku ze synchronizmu. Ochranou proti výpadku ze synchronizmu je detekce „prokluzu pólů“ ANSI 78.

3.1.6 Detekce prokluzu pólů – (ANSI 78)

Smysl ochrany pro detekci prokluzu pólů je prostý. Ochrana má za úkol rozlišit mezi kýváním rotoru, které ještě vede zpět ke stabilnímu stavu a kýváním, kdy dojde ke ztrátě synchronizmu. V případě, že dojde ke ztrátě synchronizmu, je alternátor tepelně namáhán jak vyrovnávacím proudem tak i mechanicky - pulzujícím momentem a následně mechanickými rezonancemi, které mohou vést k poškození. Proto v případě prokluzu pólů, je nutné tento stav detekovat a to nejlépe již v první polovině cyklu prokluzu.

Vyhodnocovací proces ochrany je založen na sledování progresivní změny impedance během ztráty synchronizmu a vypnutí vypínače v momentě, kdy je zátěžný úhel menší než 90° . Podmínka úhlu 90° respektuje nadměrné napěťové namáhání vypínače při hodnotách převyšujících tento úhel.

3.1.7 Faktory ovlivňující dynamickou stabilitu

Parametry systému [9]

- tlumič,
- podélná kompenzace,
- reaktance soustavy po odstranění poruchy,
- nastavená reakční doba ochran generátoru,
- setrvačnost rotoru soustrojí (inerciální konstanta),
- vnitřní napětí generátoru (závisí na buzení) a napětí tvrdé sítě,
- zatížení alternátoru před vznikem poruchy (čím blíže maximu, tím blíže nestabilitě),
- reaktance generátoru X_d – čím nižší reaktance, tím vyšší maximální výkon a menší počáteční zátěžný úhel,
- poruchový proud generátoru během poruchy (reaktance soustavy $X_d + X_{sys}$) – závisí na vzdálenosti poruchy od svorek alternátoru a typu poruchy.

Druhy událostí kladoucích nároky na dynamickou stabilitu [7]

- zkraty,
- ztráta zátěže (odpojení spotřebičů),
- ztráta jednoho z alternátorů v soustavě,
- spouštění velkých motorů,
- manipulace v soustavě (zapínání linek, připínání kompenzačních kapacit),
- nárazové zatěžování motorů v soustavě,
- obecně náhlé změny výroby nebo spotřeby elektrické energie.

Řešení problémů se stabilitou [7]

- zvýšení synchronizačního výkonu,
- větší setrvačný moment,
- použití asynchronních generátorů,
- snížení poruchové reaktance (když se odpojí jedno paralelní vedení),
- zlepšení vlastností regulátoru napětí a buzení,
- snížení reaktance přenosové cesty,
- rychlé odpojení od poruchy,
- odpínání zátěží (load shedding),
- rozdělení systému na více menších,
- dynamické brždění,
- power system stabilizer.

3.1.8 Dynamická stabilita synchronního alternátoru posuzované trigenerační stanice

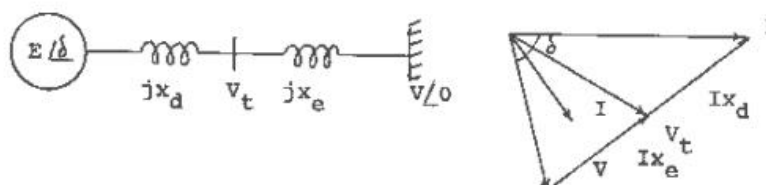
Elektromotorické napětí alternátoru se předpokládá konstantní před poruchou, během poruchy i po ní, neuvažuje se tedy s regulátorem buzení alternátoru. Napětí sítě je považováno za konstantní, jako přirozená vlastnost tvrdé sítě. Dochází jen ke změně vazební reaktance tím, že se z důvodu poruchy nebo spínání mění konfigurace připojené soustavy a tedy i zátěže.

jmenovité otáčky	1000 ot/min
moment setrvačnosti	$J = 1214,25 \text{ kgm}^2$
podélná přechodná reaktance	$X'_d = 0,257/0,257$
zkratové příspěvky z nadřazené sítě	
trojfázový zkratový proud min/max	$I''_{k3} = 5,8/6,34 \text{ kA}$
jednofázový zkratový proud min/max	$I''_{k1} = 6,37/6,79 \text{ kA}$

Tabulka 6 - Parametry soustrojí pro výpočet stability [25]

Určení zátěžného úhlu alternátoru před poruchou (posouzení statické stability)

Pro určení zátěžného úhlu je nutné znát dílčí reaktance spojovací cesty mezi vnitřním napětím alternátoru a napětím soustavy. Určením fázorů těchto napětí a úhlu, který spolu svírají, dojdeme k počáteční hodnotě zátěžného úhlu v ustáleném stavu. Vzájemný vztah mezi veličinami je vidět z následujícího fázorového diagramu.



Obrázek 15 - Fázorový diagram a model soustavy se znázorněním impedancí [15]

Pro splnění musí být zátěžný úhel menší než 90° , při dalším zvyšování výkonu mechanickým momentem na hřídeli by došlo ke ztrátě synchronismu.

Protože byla zadána hodnota zkratového příspěvku ze sítě, je z něj možné zjistit reaktanci sítě.

Reaktance sítě:

$$X_{sys} = \frac{U_{sys}}{\sqrt{3}I''_{k3}} = \frac{10,25}{\sqrt{3} \cdot 5,80423} = 1,01957 \Omega \quad (19)$$

Poměrná hodnota přechodné reaktance alternátoru je dána specifikací od výrobce. Je třeba zjistit její skutečnou hodnotu.

Reaktance generátoru:

$$X'_d = x'_d \frac{U_{alt}^2}{S_{alt}} = 0,257 \frac{11^2}{5,937} = 5,2378 \Omega \quad (20)$$

Před poruchou bude alternátor pracovat na svůj jmenovitý výkon a s účínkem $\cos\varphi=1$. Do sítě bude dodávat svůj jmenovitý proud.

Proud alternátoru:

$$\bar{I}_{alt} = \frac{S_{alt}}{\sqrt{3} \cdot U_{sys}} = \frac{4300}{\sqrt{3} \cdot 10,25 \angle 0^\circ} = 242,2055 \angle 0^\circ \text{ A} \quad (21)$$

Nyní je možné určit úhly fázorů obou napětí a následně odečíst zátěžný úhel alternátoru.

Fázor vnitřního napětí alternátoru je definován jako:

$$\bar{E}_{alt} = \bar{U}_{sys} + \sqrt{3}jX'_d\bar{I}_{alt} = 10,25 + j\sqrt{3} \cdot 5,2378 \cdot 0,242 = \quad (22)$$

$$= 10,25 + j2,195 = \underline{10,4829 \angle + 12,0996^\circ}$$

Alternátor pracuje v přebuzeném stavu.

Fázor napětí systému:

$$\bar{E}_{sys} = \bar{U}_{sys} - \sqrt{3}jX_{sys}\bar{I}_{alt} = 10,25 - j\sqrt{3} \cdot 1,01957 \cdot 0,242 = \quad (23)$$

$$= 10,25 - j0,427 = \underline{10,2589 \angle - 2,3895^\circ}$$

System spotřebovává induktivní výkon.

Počáteční zátěžný úhel se vypočte jako rozdíl úhlů fázorů vnitřního napětí a napětí v síti.

$$\delta_0 = \delta_{alt} - \delta_{sys} \quad (24)$$

$$12,0996^\circ - (-2,3895^\circ) = \underline{14,4891^\circ}$$

Protože výpočet vychází z maximální hodnoty činného proudu, jedná se o maximální provozně dosažitelný zátěžný úhel na daném soustrojí.

Určení maximálního výkonu

Při zátěžném úhlu 90° by byl teoreticky do sítě dodáván výkon

$$P_{max} = \frac{|\bar{E}_{alt}| \cdot |\bar{E}_{sys}|}{X_{celk}} = \frac{|10,4829| \cdot |10,2589|}{5,2378 + 1,01957} = 17,1865 \text{ MW}. \quad (25)$$

Tento výkon je v první řadě omezen mechanickým výkonem plynového motoru na 4300 kWe. Pro kontrolu, při vynásobení hodnoty maximálního výkonu vypočteným zátěžným úhlem, dostaneme maximální činný výkon dosažitelný na daném soustrojí.

$$P_0 = P_{max} \cdot \sin \delta_0 = 17,1865 \cdot \sin 14,4891^\circ = 4,3 \text{ MW} \quad (26)$$

Určení maximálního úhlu výkyvu rotoru

$$\delta_2 = 180^\circ - \delta_0 \quad (27)$$

$$\delta_2 = 180^\circ - \sin^{-1} \frac{P_0}{P_{max}} = 180^\circ - \sin^{-1} \frac{4,3}{17,1865} = 165,51089^\circ \quad (28)$$

Určení kritického zátěžného úhlu

$$\begin{aligned} \delta_c &= \cos^{-1} \left(\frac{P_0 (\delta_2 - \delta_0) \frac{\pi}{180^\circ} + P_{max} \cos \delta_2 - P_{por} \cos \delta_0}{P_{max} - P_{por}} \right) = \quad (29) \\ &= \cos^{-1} \left(\frac{4,3 (165,51089^\circ - 14,4891^\circ) \frac{\pi}{180^\circ} + 17,1865 \cdot \cos 165,51089^\circ - 0}{17,1865 - 0} \right) = \\ &= \cos^{-1}(-0,3087) = \underline{107,982^\circ} \end{aligned}$$

Určení inerciální konstanty soustrojí

$$H = \frac{1}{2} J \omega^2 \frac{1}{S_{alt}} = \frac{1}{2} 1214,25 \left(2\pi \frac{1000 \text{ ot}}{60 \text{ s}} \right)^2 \cdot \frac{1}{5937000} = \underline{1,1214 \text{ s}} \quad (30)$$

Určení kritického času pro vypnutí

$$t_c = \sqrt{\frac{4H(\delta_c - \delta_0)}{\omega P_m}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,1214 \cdot (107,982^\circ - 14,489^\circ) \cdot \frac{\pi}{180^\circ}}{2\pi 50 \cdot \frac{4300}{5937}}} = \underline{179,357 \text{ ms}} \quad (31)$$

V nejméně příznivém případě tedy dle výpočtu pro jeden alternátor dojde ke ztrátě stability za 179,357 ms od počátku poruchy. Rotor kývne na zátěžný úhel 107,982°.

3.2 Způsoby detekce ostrovního provozu a výpadku nadřazené soustavy

Další vybranou problematikou je vyhodnocení vypnutí síťového přívodu. Řídící systém trigenerace musí být schopen rozpoznat, že k odpojení došlo a odstavit generátory nebo přejít do regulace v ostrovním provozu.

3.2.1 Co je ostrovní provoz:

Nastává v případě, kdy je část distribuční sítě napájena z lokálního zdroje a je odpojena od elektrizační soustavy. Taková situace přináší otázky ohledně udržování kvality dodávané energie ve vzniklém ostrově, problém s referenčním bodem uzemnění a s ním související problém bezpečnosti osob a nakonec rizika spojená s opětovným připojením a synchronizací k soustavě.[22]

Zmíněné problémy vedou k potřebě rychlé detekce vzniku ostrovního provozu a tím k možnosti odstranění možných nebezpečí. Při vyhodnocování je třeba čelit několika protichůdným požadavkům, které kladou nemalé nároky na rychlost, citlivost a stabilitu používaných zařízení.

Vzhledem k těmto problémům je běžnou praxí lokální zdroje při odpojení od soustavy v co nejkratším čase odstavit, pomocí vhodných ochranných opatření pro rychlou detekci. V některých případech může být požadován bez-výpadkový přechod do ostrovního provozu, to ovšem klade na příslušné ochrany ještě vyšší nároky.

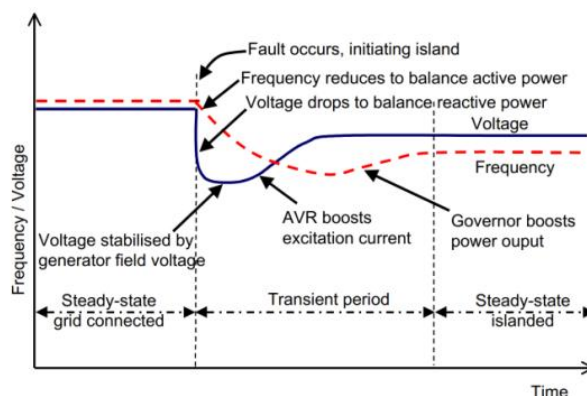
Hlavní podmínkou pro bez-výpadkový přechod mezi paralelním a ostrovním provozem je rovnost výkonu dodávaného alternátorem a spotřeby s ním izolované galvanicky oddělené části sítě. Další podmínkou pro bezpečný provoz je zajištění referenčního bodu uzemnění vzniklé izolované části soustavy.

Přechod do ostrovního provozu je častěji spojen se skokovou změnou zatížení připojeného alternátoru, kdy se spotřeba těsně před okamžikem odpojení od nadřazeného zdroje nerovná výkonu izolované části sítě, který je alternátorem dodáván.

Pokud je spotřeba připojené části větší než aktuální výkon alternátoru, bude ostrov ovlivněn nedostatkem činného a jalového výkonu. Činný výkon bude kompenzován uvolněním kinetické energie z rotoru generátoru a tím dojde k následnému snížení frekvence systému. Nedostatek jalového výkonu způsobí celkové snížení napětí viz. obr. 16.

Tento průběh předchází reakci řídicího systému generátoru. Ten se bude obecně snažit stabilizovat systém tím, že zvýší výkon motoru přivedením většího množství paliva a zajistí tak větší dodávku činného výkonu (dojde k opětovnému zvýšení frekvence), a zároveň přibudí generátor (funkce **droop**), aby zvýšil napětí a tím i dodávku jalového výkonu do systému.

Následující obrázek popisuje průběh události:



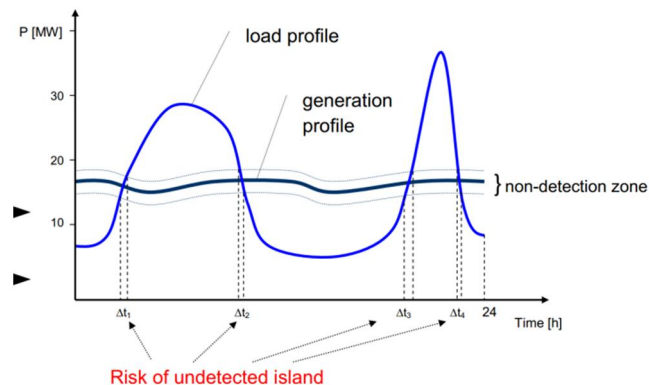
Obrázek 16 - Reakce napětí a frekvence na změnu zatížení v síti [18]

Pro detekci ostrovního provozu jsou klasicky používány ochrany, které jsou založeny právě na vyhodnocení reakce systému na změnu výkonových poměrů a přechodných jevů na izolovaném alternátoru. Nejpoužívanější metody jsou zaměřeny na detekci odchylek od nominální frekvence. Obecně je tato skupina ochran v anglické literatuře označována jako **LOM – Loss Of Mains**.

Problematika ochran LOM spočívá v nalezení optimálního nastavení, aby nedocházelo ke zbytečným výpadkům při falešném vyhodnocení vzniku ostrovního provozu. Ochrana LOM by neměla reagovat na poruchy, které by měly být odstraněny ochranami v systému a neměla by reagovat ani na provozní dynamické změny v zatížení. Jinými slovy není žádoucí, aby se generátor odstavil i v případě, kdy poruchu mohla odstranit jiná, bližší ochrana v systému. Jelikož smysl využívání distribuovaných zdrojů elektrické energie je v úsporách nákladů, je přirozeně nežádoucí, aby docházelo ke zbytečným výpadkům těchto zdrojů.

I přesto, že ochrana LOM by měla reagovat ve všech možných případech zatížení generátoru a sítě, největší výzvou stále zůstává situace, kdy dojde k odpojení od soustavy v momentě, kdy generátor pokrývá spotřebu činného a jalového výkonu s ním odpojené části systému a nedojde tedy po odpojení k významné změně toku jalového výkonu ani momentového zatížení. Problém je znázorněn na obr. 17.

Spolehlivost ochrany LOM se dá ovlivnit délkou doby, která je potřebná pro detekci, že k odpojení do ostrova došlo.



Obrázek 17 - Oblasti nejistoty detekce ostrovního provozu [18]

V současnosti patří mezi „klasické“ v praxi využívané ochrany LOM tyto:

- **Rate of Change of Frequency (ROCOF)**

Má dobrou citlivost na změnu frekvence v čase, ale tím se stává v závislosti na vlastnostech systému náchylná na falešné detekování poruchy. Rychlost detekce odpojení sítě je v řádu stovek milisekund. Platí, že čím pomaleji se frekvence mění, tím delší doba je potřebná pro detekci.

- **Voltage Vector Shift (VS)**

Hlavní přednost této ochrany je v rychlosti detekce sledovaného jevu, ovšem hrozí nebezpečí zbytečného odpojení při zachycení jevu, který je pro danou soustavu normální. např. spínání v nadřazené síti. Doba potřebná pro detekování je ještě kratší než v případě předešlé ochrany. V principu se jedná jen o dvě periody napětí.

- **Under/Over frequency**

Základní ochrana, která může být použita pro detekci, ovšem vyžaduje v porovnání s předchozími nesrovnatelně delší dobu pro detekování v řádu sekund, přičemž kvalita dodávané elektrické energie musí překročit povolené provozní meze.

- **Under/Over voltage**

Disponuje stejnými nevýhodami jako frekvenční ochrana. Slouží spíše jako ochrana pro definitivní odpojení, potom co napětí překročilo přípustné tolerance.

- **Reverse VAR protection**

Její citlivost je omezena nároky systému na jalovou energii, tedy pokud systém pracuje s účinníkem blízkým jedné. Je také ovlivněna kapacitou dlouhých kabelových vedení v systému.

- **Intertripping**

Je spolehlivá metoda signalizace odpojení od nadřazeného systému. Otázkou je cena a náročnost instalace potřebných komunikačních propojů mezi vypínači v systému a řídicím systémem generátoru.

Mimo tyto „klasické“ ochrany jsou na trhu dostupné tzv. aktivní ochrany LOM, které umožňují sledovat další parametry, jako jsou impedance, harmonické složky, tok jalového výkonu a další. Tyto ochrany ovšem nejsou kvůli svým specifickým běžně používány a stále tedy převažují pasivní metody.[6]

3.2.2 Využití ochrany ROCOF - (ANSI 81R)

Proč distribuované generátory potřebují rychlou ochranu pro detekci ztráty sítě?

V případě poruchy v elektrizační soustavě, která je většinou realizována jako vzdušné vedení, jsou na spínacích prvcích využívány funkce opětovného zapnutí, protože povaha poruchy bývá v mnohých případech pouze dočasná a je tedy výhodné pokusit se v krátkém čase vedení opět připojit, aby výpadky dodávky ke spotřebitelům byly minimální.

Funkce opětovného zapnutí představuje pro distribuované zdroje jedno z největších rizik. Opětovné zapnutí je realizováno v řádu několika sekund po rozpojení a tato doba je limitem pro ochranu ROCOF, aby detekovala ostrovní provoz a signálem ke generátorovému vypínači odpojila generátory od soustavy. Pokud by se tak nestalo, spínač s funkcí OZ by sepnul soustavu a distribuované zdroje, které se momentálně snaží dorovnat výkon a tedy otáčky na původní hodnotu, v nesynchronním stavu a došlo by tak k další poruše a pravděpodobně i poškození zařízení. Podobná situace může nastat, pokud je systém nastaven tak, aby při výpadku nebo přetížení přepínal mezi různými přívody (zdroji).

Může také dojít k situaci, kdy se z důvodu změny zátěže generátor dostane do nestabilního stavu, což může způsobit poškození některých připojených zařízení.

Při stanovení časového limitu pro odpojení by se mělo uvažovat jednak s nastaveným intervalem OZ, tak i z vypínací dobou vypínače generátoru. V současné době se považuje vypnutí za 200 ms od detekce poruchy jako okamžité.

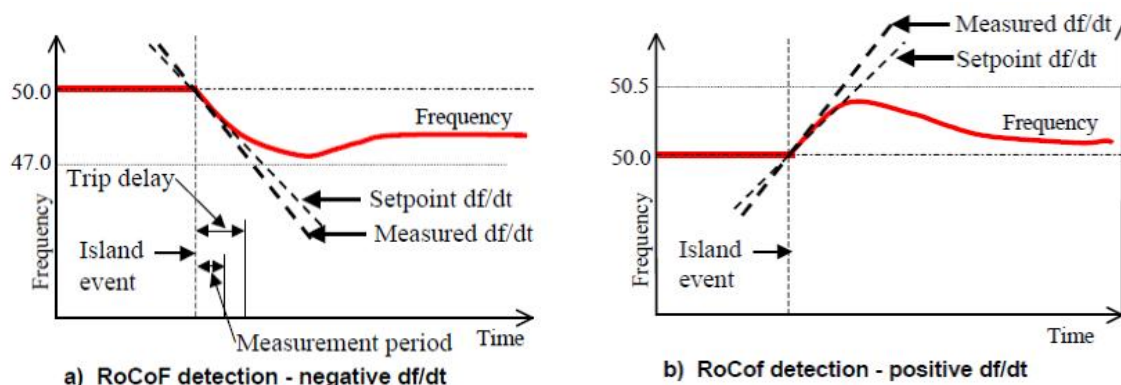
Za normálního chodu má generátor stabilní frekvenci, která je v paralelním režimu udržována připojenou soustavou. ROCOF vyhodnocuje zrychlení otáček generátoru df/dt , které je způsobeno náhlou změnou v jeho zatížení, což se předpokládá v momentě, kdy dochází k odpojení od soustavy. Jinými slovy měří stabilitu frekvence. Změna frekvence je vyjádřena jako funkce tangens v čase Hz/s, tedy $\omega_0 + df/dt$ viz. obr. 18. Ochrana potřebuje určitý počet period napětí, aby mohla vyhodnotit a porovnat jejich frekvenci s referenční hodnotou a následně přednastaveným limitem pro odpojení. Případně je možné nastavit časové zpoždění, před tím než ochrana vyšle signál vypínači.

Pro správnou funkci je nutné nastavit několik parametrů, pomocí kterých je dosaženo vhodné reakce ochrany, jejichž hodnoty se liší vždy pro konkrétní konfiguraci systému. Tím je dosaženo správné meze citlivosti a stability chování ochrany.

Nejdůležitější volitelné parametry jsou:

- počet porovnávaných sinusových period napětí od jedné do desítek cyklů (každý o periodě 20ms). Toto umožňuje zvolit poměr mezi rychlostí detekce odpojení a citlivostí,
- limitní hodnota změny frekvence, která následně způsobí vyslání signálu pro vypnutí generátorového vypínače,
- časové zpoždění reakce ochrany, které umožní dosáhnout selektivity mezi ROCOF ochranami v systému v případě poruchy trvalého charakteru.

Změny napětí a frekvence při odpojení nemusí být vždy výrazné. Závisí to na konkrétních poměrech v daném případě a relativní velikosti zátěže vůči výkonu generátoru. Pokud je změna příliš malá viz. obr. 18. vzhledem k možnostem nastavení, není za takových okolností možné ochranu ROCOF použít.



Obrázek 18 - Princip detekce ROCOF [18]

3.2.3 Výpočet nastavení ochrany ROCOF pro řešenou instalaci alternátorů 2x 4300 kW

Pro stanovení optimálního nastavení ROCOF, je potřeba definovat následující faktory dané instalace:

- poměr mezi generovaným výkonem a požadovanou spotřebou, nebo požadovaný import z nadřazené soustavy
- selektivitu ROCOF z lokálními nadproudovými ochranami v případě vzniku lokální poruchy

Následující vztah umožňuje určit potřebné nastavení ochrany na základě předpokládaného zátěžového skoku v případě odpojení od sítě. Vypočtená hodnota se výrazně liší v závislosti na tom, kolik generátorů je připojeno, přičemž jejich výkon musí být neustále regulován tak, aby při ztrátě sítě došlo k potřebnému minimálnímu skoku v zatížení, který způsobí změnu frekvence, kterou lze detekovat.[10]

$$ROCOF = \frac{\Delta P \cdot f}{2 \cdot S_h \cdot H} \quad (32)$$

Aby bylo možné zajistit odpojení dříve, než dojde k nesynchronnímu sepnutí (OZ, přeprnutí napáječe) a zároveň selektivitu s ochranami v lokálním systému, až k vypínači hlavního napájecího transformátoru, je třeba stanovit také čas, který ochrana potřebuje pro vyhodnocení odpojení v závislosti na potřebné minimální nerovnováze výkonu. Reakční doba musí být kratší, než funkce OZ a pokud možno pomalejší než nadproudové ochrany v lokálním systému, aby nedocházelo ke zbytečnému odpojení generátoru při poruchách, které mohou být odpojeny selektivně příslušnými vypínači v lokálních rozvodnách.

Potřebný čas pro detekci požadované skokové změny výkonu [10]:

$$t_d = -T_a \cdot \ln \left(1 - \frac{2H}{f_0 \cdot \Delta P} \cdot \beta \right) + \Delta t \quad (33)$$

V následujících tabulkách je zpracován přehled minimálních potřebných časových intervalů pro detekci požadovaného zátěžového skoku. Jelikož ekonomika dané instalace počítá s minimálním importem energie z elektrizační soustavy je **cílem nalézt minimální hodnotu importu s časem detekce kratším, než jak jsou nastaveny automatické spínací operace v elektrizační soustavě.**

ROCOF 1 Hz/s pro jeden alternátor 4300 kW												
td	ms	841	436	151	123	116	112	110	109	108	107	107
Ta	ms	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
H	s	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214
delta P	kW	193	200	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4300
delta P	p.u.	0,045	0,047	0,116	0,233	0,349	0,465	0,581	0,698	0,814	0,930	1,000
beta	Hz/s	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
delta t	ms	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102

ROCOF 1 Hz/s pro dva alternátory 4300 kW												
td	ms	841	297	250	151	132	123	119	116	114	112	111
Ta	ms	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
H	s	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214
delta P	kW	386	450	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4300
delta P	p.u.	0,045	0,052	0,058	0,116	0,174	0,233	0,291	0,349	0,407	0,465	0,500
beta	Hz/s	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
delta t	ms	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102

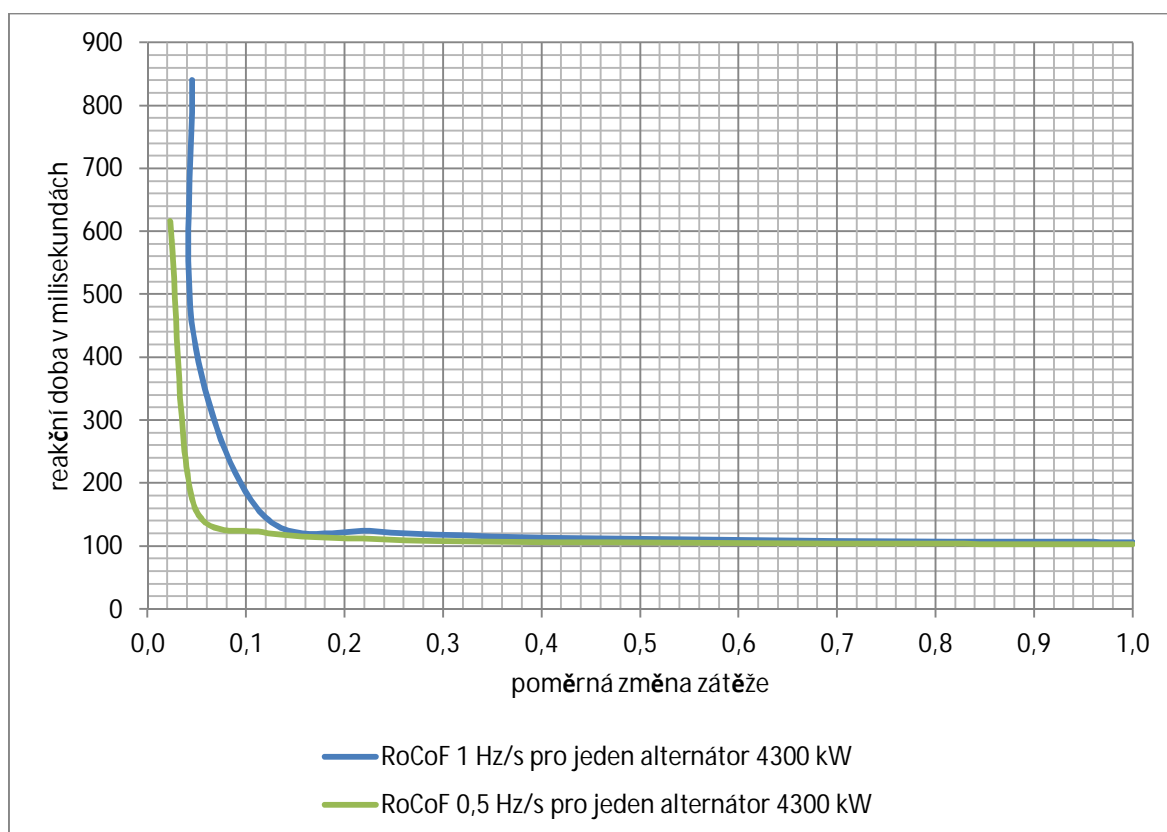
ROCOF 0,5 Hz/s pro jeden alternátor 4300 kW												
td	ms	617	167	122	111	108	106	105	104	104	103	103
Ta	ms	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
H	s	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214
delta P	kW	97	200	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4300
delta P	p.u.	0,023	0,047	0,116	0,233	0,349	0,465	0,581	0,698	0,814	0,930	1,000
beta	Hz/s	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
delta t	ms	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101
ROCOF 0,5 Hz/s pro dva alternátory 4300 kW												
td	ms	840	435	150	122	115	111	109	108	107	106	106
Ta	ms	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
H	s	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214
delta P	kW	193	200	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4300
delta P	p.u.	0,022	0,023	0,058	0,116	0,174	0,233	0,291	0,349	0,407	0,465	0,500
beta	Hz/s	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
delta t	ms	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101

Tabulka 7 – Teoretický reakční čas potřebný pro detekci ROCOF v závislosti na velikosti změny zátěže v kW

Požadované limity pro konkrétní instalaci jsou max. 2,5 sekundy pro detekci včetně operačního času vypínače a uhašení oblouku mezi kontakty. **V tabulce se z nastavením ROCOF na 0,5 Hz/s a spoluprací obou alternátorů dosahuje času 840 ms**, což splňuje zadané požadavky místního provozovatele sítě. Obvyklý požadavek je ovšem v řádu

stovek ms (100-300), v takovém případě by minimální potřebný skok musel být 500 kW dle tabulky 4.

Závislost mezi reakčním časem a skokovou změnou výkonu v předchozích tabulkách byla pro přehlednost vynesena do následujícího grafu. Graf má do osy *x* vynesena kritický zátěžový skok v poměrné hodnotě vůči nominálnímu výkonu alternátoru v MVA a do osy *y* je vynesena reakční doba ochrany.



Graf 2 - Reakční doba ochrany ROCOF, v závislosti na nastavené velikosti skoku v zatížení

Dle získaných výsledků, je možné při nastavení ROCOF na 0,5 Hz/s a importu 500 kW ze sítě detekovat výpadek již za 150 ms.

3.2.4 Ověření vypočtených hodnot praktickou zkouškou

Během závěrečného testování instalace bylo možné nepřímo vyzkoušet a zaznamenat funkčnost vypočteného nastavení ROCOF. Během provozu pouze jedné trigenerační jednotky byla soustava vyregulována na import 200 kW ze soustavy do umělé rezistorové zátěže a následně po ustálení byl manuálně odpojen přívod sítě. Jednotka tak byla vystavena skokové změně zatížení při nastavení ROCOF na 1 Hz/s. Z tabulek 8 a 9, kde jsou zaznamenány hodnoty řídicím systémem během testu, je vidět, že byla překročena

povolená mez ROCOF 1 Hz/s po dobu přibližně 449 ms než došlo k vypnutí vypínače (viz tab. 8, časový interval 1069-620 ms). Graf naměřených hodnot je v Příloze 3.

ITP 6_mains disconnection at AZS									
P Gen	Import/Export	Mains V L1-N	Mains V L2-N	Mains V L3-N	PC Time (ms)	Mains Freq	MaxVectorShift	Act ROCOF	Mains PF
1695	189	5927	5929	5946	0	49,96	0,2	0	0,25
1690	198	5927	5929	5953	155	49,95	0,2	0	0,27
1688	198	5919	5936	5953	310	49,92	0,8	-0,08	0,25
1829	198	6183	6193	6187	465	49,81	0,6	-0,63	0
1913	106	6168	6185	6179	620	49,64	0,7	-1,07	0
1953	106	6146	6171	6157	775	49,46	0,7	-1,15	0
1959	106	6139	6156	6150	914	49,33	0,7	-1,02	0
1956	33	6124	6141	6143	1069	49,16	0,7	-1,05	0
1381	33	768	789	782	1224	0	124,6	0	0
0	11	0	0	0	1379	0	124,6	0	0

Tabulka 8 - Záznam měření ROCOF v místě připojení k síti

	Reason	Date	Time	RPM	P	Q	PF	Va23	Ia1	Ia2	Ia3	Mfra	Vm23	VRO
-85.	GCB opened	26.3.2013	2:45:53.9	999	0	0	0.00	10933	0	0	0	0.0	582	50.0
-86.	Gen stop	26.3.2013	2:45:53.8	996	1208	55	1.00	10750	0	0	0	12.5	1134	50.0
-87.	Soft unload	26.3.2013	2:45:53.6	984	1957	69	1.00	10634	108	108	108	49.2	10681	70.1
-88.	BOC Emerg.Manual	26.3.2013	2:45:53.5	987	1958	74	1.00	10641	108	108	108	49.3	10683	70.0
-89.	Hst Mains Fail	26.3.2013	2:45:53.3	992	1950	126	1.00	10677	108	108	109	49.5	10690	69.3
-90.	Time stamp	26.3.2013	2:45:00.2	999	1617	766	0.90	10284	104	100	100	50.0	10341	63.3
-91.	Time stamp	26.3.2013	2:44:00.2	999	1102	438	0.93	10241	71	66	67	50.0	10295	60.4
-92.	Loaded	26.3.2013	2:43:01.2	1000	-5	-51	-0.10	10168	41	38	38	50.0	10215	50.2
-93.	GCB closed	26.3.2013	2:43:01.0	999	-292	21	-1.00	10154	44	53	47	50.0	10198	50.2
-94.	Soft load	26.3.2013	2:43:01.0	999	-221	17	-1.00	10146	53	62	57	50.0	10198	50.3

Tabulka 9 - Záznam měření řídicího systému na vývodu z alternátoru

Vypočtená hodnota pro nastavení 1 Hz/s při provozu pouze jednoho alternátoru je 436 ms pro skok 200 kW a 841 ms pro skok 193 kW. Dá se tedy prohlásit, že vypočtené hodnoty, uspokojivě odpovídají skutečnosti.

3.2.5 Možnosti využití ochrany Vector shift - (ANSI 78)

Vektorový skok je jednou z metod detekce ostrovního provozu, založenou na principu posunu zátěžného úhlu synchronního alternátoru. Ochrana vektor shift chrání synchronní alternátory v paralelní spolupráci se sítí. Vector shift zajistí velice rychlé odpojení od sítě v případě, že dojde k významnému posunu měřeného vektoru napětí. Pomalé změny frekvence (zapříčiněné například regulátorem otáček) ochranu Vector shift neaktivují. Nejčastěji využívanou metodou pro měření změny úhlu, je průchod nulou. Oproti ROCOF je tedy velmi rychlá, není ovšem citlivá na změnu frekvence, jelikož vyhodnocuje příliš málo period.

V porovnání se změnou frekvence, která je se zátěžovým skokem také přímo spojena, je změna zátěžného úhlu bezprostředním jevem a je detekována jako posun fáze měřeného sinusového napětí, což je označováno jako vektorový skok.[21] V závislosti na nastavení limitu v úhlových stupních, umožňuje tato ochrana okamžité odpojení při změnách zatížení způsobených poruchou a předchází tím tedy škodám, které by jinak vznikly kvůli zpoždění frekvenčních nebo napěťových ochran.

Vstupní hodnotou je pro tuto ochranu perioda sinusovky napětí, kterou ochrana porovnává vždy vůči předešlé (referenční) hodnotě. Pokud dojde ke změně zatížení alternátoru, znamená to, že se změní hodnota dodávaného proudu do spotřeby a tím dojde také ke změně úbytku napětí na jeho vnitřní impedanci. Tato změna způsobí náhlé posunutí vzájemné polohy vektoru vnitřního napětí alternátoru a jeho hodnoty na svorkách. Tím zároveň dojde právě i k posunu průchodu svorkového napětí nulou, a pokud je tato hodnota větší než nastavená mez (úhel) v ochraně Vector shift, ochrana vyhodnotí odpojení sítě a pošle signál pro vypnutí generátorového vypínače. Změna vzájemného úhlu mezi vnitřním a svorkovým napětím může být kladná nebo záporná v závislosti na tom, jestli v okamžiku uvedení do ostrova je dodávaný výkon alternátoru větší nebo menší než spotřeba.

Obr. 19 znázorňuje, jak fázor napětí změní svoji polohu a dojde tím ke změně hodnoty sinusového průběhu napětí. Tento jev je pojmenován fázový nebo vektorový posun. Ochranné relé nepřetržitě měří periodu napětí od počátku každé sinusovky. Perioda průběhu napětí je vnitřně porovnávána referenční hodnotou generovanou na bázi krystalového oscilátoru.

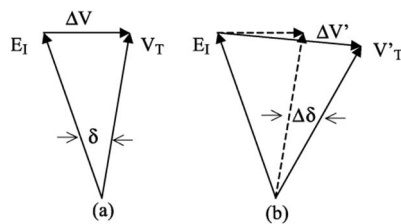


Fig. 2. Internal and terminal voltage phasors: (a) before the opening of CB; (b) after the opening of CB.

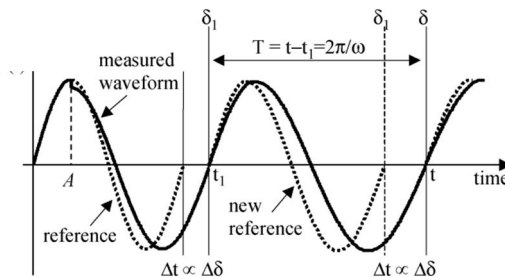


Fig. 3. Voltage vector surge and vector surge relay cycle-by-cycle measurements.

Obrázek 19 - Princip měření a detekce posunu fáze napětí - Vector shift [21]

Obvyklé nastavení Vector shift je mezi 2°-20° s požadavkem na reakční dobu pro odpojení 200-300 ms. Reakce ochrany je vázána také na velikost napětí pro případ zkratu, kdy není žádoucí, aby ochrana reagovala a je proto nutné její funkci vyblokovat. Citlivost ochrany musí být nastavena s ohledem na velikost synchronizačního okna, nebo je nutno zpozdřit aktivaci ochrany tak, aby během synchronizace generátoru nebyla aktivní.

3.2.6 Výpočet nastavení Vector shift pro danou instalaci 2x 4300 kW

Pro výpočet možností nastavení lze použít následující vztahy odvozené dle [21]

$$t = \frac{-\left(2\omega_0 \cdot K \cdot (\alpha - \pi)\right) - \sqrt{D_1}}{2K^2 \cdot (\alpha - 2\pi)} \quad (34)$$

kde:

$$K = \omega_0 \cdot \frac{\Delta P}{2H}$$

$$D_1 = \left(2\omega_0 K (\alpha - \pi)\right)^2 - 4K^2 (\alpha - 2\pi) \cdot (\omega_0^2 \alpha + 2\pi^2 K)$$

α = detekovaný posun úhlu

ω_0 = synchronní úhlová rychlost v rad/s

t = čas potřebný pro vyhodnocení posunu úhlu

Stejně jako pro ROCOF lze charakterizovat chování ochrany Vector shift pomocí závislosti reakční doby na velikosti změny zatížení při odpojení generátoru od sítě. Tabulka 10. shrnuje reakční dobu a potřebný zátěžový skok pro reakci ochrany.

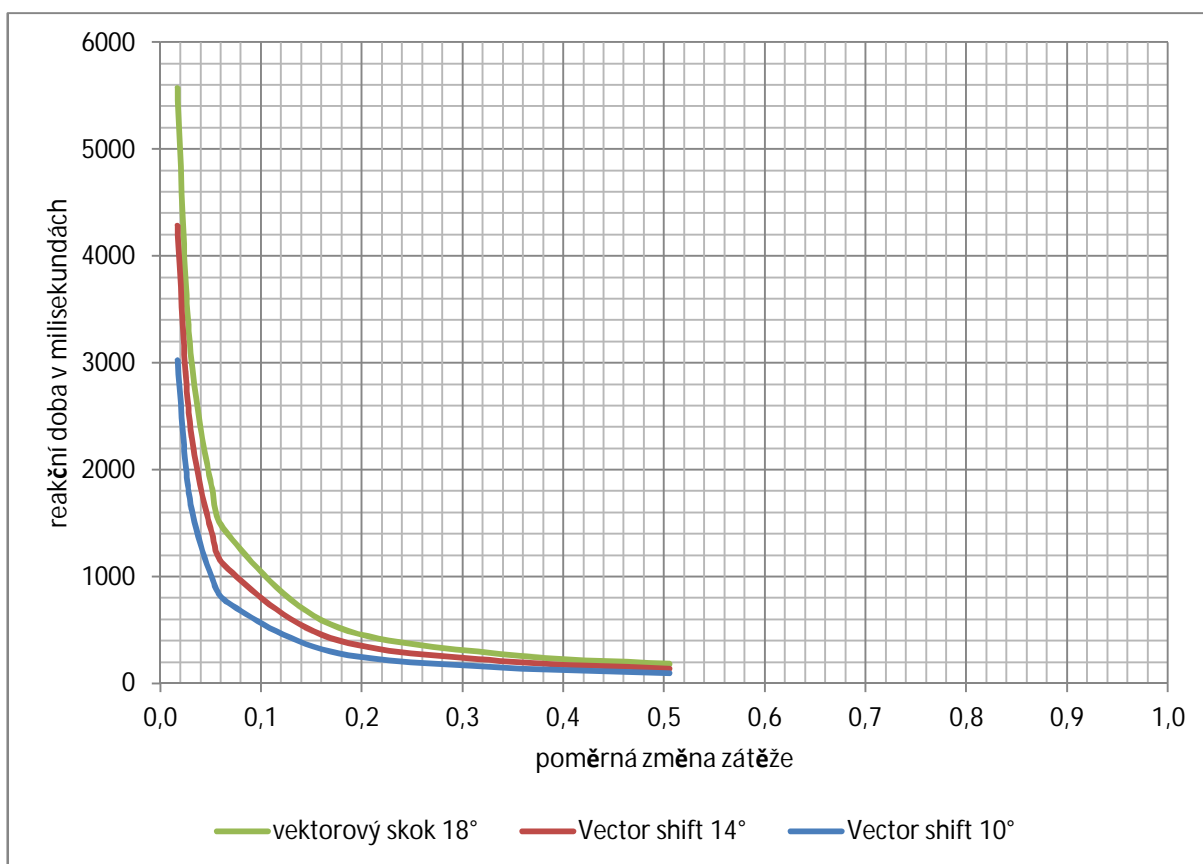
vektorový skok 10°									
minimální čas	ms	3025	2017	1513	1009	756	303	151	101
H	s	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214
delta P	kW	100	150	200	300	400	1000	2000	3000
delta P	p.j. 5937 base	0,017	0,025	0,034	0,051	0,067	0,168	0,337	0,505
úhlová rychlost	rad/s	314,15	314,15	314,15	314,15	314,15	314,15	314,15	314,15
K	-	2,967	4,450	5,934	8,901	11,868	29,669	59,338	89,007
alfa set	°	10	10	10	10	10	10	10	10
D1	-	1,1E+11	2,5E+11	4,5E+11	1E+12	1,8E+12	1,1E+13	4,5E+13	1E+14

vektorový skok 14°									
minimální čas	ms	4285	2856	2142	1428	1071	429	214	143
H	s	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214
delta P	kW	100	150	200	300	400	1000	2000	3000
delta P	p.j. 5937 base	0,017	0,025	0,034	0,051	0,067	0,168	0,337	0,505
úhlová rychlost	rad/s	314,15	314,15	314,15	314,15	314,15	314,15	314,15	314,15
K	-	2,967	4,450	5,934	8,901	11,868	29,669	59,338	89,007
alfa set	°	14	14	14	14	14	14	14	14
D1	-	1,1E+11	2,5E+11	4,5E+11	1E+12	1,8E+12	1,1E+13	4,5E+13	1E+14

vektorový skok 18°									
minimální čas	ms	5573	3715	2787	1858	1393	557	279	186
H	s	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214	1,1214
delta P	kW	100	150	200	300	400	1000	2000	3000
delta P	p.j. 5937 base	0,017	0,025	0,034	0,051	0,067	0,168	0,337	0,505
úhlová rychlost	rad/s	314,15	314,15	314,15	314,15	314,15	314,15	314,15	314,15
K	-	2,967	4,450	5,934	8,901	11,868	29,669	59,338	89,007
alfa set	°	18	18	18	18	18	18	18	18
D1	-	1,1E+11	2,5E+11	4,5E+11	1E+12	1,8E+12	1,1E+13	4,5E+13	1E+14

Tabulka 10 – Časový limit potřebný pro detekci VS pro nastavený úhel a velikost změny zátěže

Následující graf, demonstruje vzájemnou závislost mezi reakčním časem a velikostí zátěžového skoku.



Graf 3 - Reakční doba VS v závislosti na velikosti zátěžového skoku

Podle modré křivky je pro odpojení do 200 ms potřebný zátěžový skok 2000 kW a to při nastavení vektorového skoku na 10°. Aktivace ochrany musí být zpožděna, aby nereagovala při fázování alternátoru k síti, jelikož tolerance synchronizačního okna pro fáze napětí je také 10°. **Pro ekonomický model daného projektu je konstantní dobírání 2000 kW ze sítě nepřijatelné a ochranu Vector shift za takových podmínek nelze využít.**

4 Závěr

Jak je již v textu zmíněno, záměrem investora je a musí být především ekonomická návratnost projektu, které bylo do jisté míry podřízeno i konečné technické řešení. Lokálně vyráběná energie je pro investora levnější než energie nakupovaná ze sítě a z toho důvodu tedy není žádoucí import/nákup elektrické energie z nadřazené soustavy. Zároveň při každém výpadku instalovaného zdroje hrozí investorovi finanční ztráty. Tyto ztráty plynou jednak z ochromení provozů letiště při ztrátě napájení a za druhé, v případě rychlého obnovení provozu soustavy, z nežádoucího importu „drahé“ energie včetně pokut za překročení nasmlouvaných odebíraných kapacit.

Nízká dynamická stabilita soustrojí s pístovými motory má na jednu stranu negativní vliv na udržení soustavy v provozu při systémových poruchách, na druhou stranu však přispívá k možnostem detekce ostrovního provozu. Tím je za cenu odstavení zařízení dosaženo kompromisu mezi spolehlivostí napájení a bezpečností systému ve vztahu k osobám pohybujícím se v blízkosti elektrických zařízení.

Jedním z možných řešení omezení rizika výpadku energie pro napájený systém je přizpůsobení systému pro bez-výpadkový přechod do ostrovního provozu a při obnovení napájení ze sítě opětná synchronizace do paralelní spolupráce. Toto řešení s sebou nese určitý objem nákladů spojených s osazením existujících vypínačů sítě synchronizačním zařízením a úpravě systému, aby dokázal přepínat mezi regulací v paralelním provozu a regulací pro ostrovní provoz. Podmínkou je ovšem udržování vyváženého stavu mezi lokální výrobou a spotřebou elektrické energie, kdy je ještě možné pomocí posuzovaných ochranných detekovat rychle výpadek sítě a zároveň nezpůsobit kolaps lokálního zdroje kvůli přílišnému náhlému přetížení nebo odlehčení. **Další možnou úpravou je rozvážení systému nikoliv směrem importu, ale naopak exportu energie do elektrizační sítě.** Toto řešení by mělo menší negativní dopad na ekonomickou stránku projektu, protože lokálně vyráběná energie znamená pro investora menší náklady než import/nákup ze sítě. **Pro export energie by bylo potřeba posoudit vlivy na distribuční systém, který samozřejmě nebyl navržen na transport energie opačným směrem.** Zároveň politicko-právní aspekty změny statutu investora z lokálního výrobce na účastníka trhu s elektřinou s sebou nesou časové nároky, které jdou opět proti primárnímu záměru dosažení maximální návratnosti investice.

5 Seznam použité literatury

- [1] A. Etxegarai, I. Zamora, P. Eguia, L. Valverde. *Islanding detection of synchronous distributed generators. International Conference on Renewable Energies and Power Quality. (ICREPQ'12) Santiago de Compostela Spain*), 28th to 30th March, 2012. [online]. Dostupné z: <http://ebookbrowse.com/542-etxegarai-pdf-d333468695>
- [2] BAYLISS, C, Janusz W BIALEK a James R BUMBY. *Transmission and distribution: electrical engineering*. 2nd ed. Boston: Newnes, 1999, xxiii, 978 p. ISBN 07-506-4059-6.
- [3] CASAZZA, John a Frank DELEA. *Understanding electric power systems: an overview of the technology and the marketplace*. Hoboken, N.J.: John Wiley, c2003, xviii, 211 p. ISBN 04-714-4652-1.
- [4] Crompton instruments. *Vector Shift and ROCOF Relay*. [online]. Dostupné z: <http://www.cromptonwesterncanada.com/pdfs/Trip%20Relays/P-Vector%20Shift%20&%20ROCOF.pdf>
- [5] Dr. Adam Dyško. *Loss of Mains Protection*. University of Strathclyde Glasgow, UK. [online]. Dostupné z: http://www.nationalgrid.com/NR/rdonlyres/D4DB3F71-A151-44A4-ACC7-61E5E4C319AB/58592/LOM_Review_WG_meeting_10Jan13a.pdf
- [6] DTI Sustainable Energy Programmes. *Assesment of islanded operation of distribution networks and measures for protection*. DTI/Pub URN 01/1119. [online]. Dostupné z: <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.berr.gov.uk/files/file15099.pdf>
- [7] ETAP. *Transient stability presentation, 2003*. [online]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/18022271/11-Transient-Stability>
- [8] GÖNEN, Turan. *Electric power transmission system engineering: analysis and design*. New York: J. Wiley, c1988, xx, 723 p. ISBN 04-718-5993-1.
- [9] GRIGSBY, Leonard L. *Power system stability and control*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, c2007, 1 v. (various pagings). ISBN 08-493-9291-8
- [10] J.C.M. Vieira, W. Freitas, Z. Huang, W. Xu and A. Morelato. *Formulas for predicting the dynamic performance of ROCOF relays for embedded generation applications*. [online]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=1659665>
- [11] KIMBARK, Edward Wilson. *Power system stability*. New York: IEEE Press, c1995, 3 v. ISBN 07-803-1135-3.
- [12] MACHOWSKI, Jan, Janusz W BIALEK a James R BUMBY. *Power System Dynamics: Stability and Control*. 2th ed. West Sussex: Wiley, 2008, xxvii, 629 s. ISBN 978-0-470-72558-0.
- [13] Matthieu GUILLOT, Christian COLLOMBET, Pierre BERTRAND, Bernhard GOTZIG. *Protection of embedded generation connected to a distribution network and loss of mains detection*. Schneider Electric, France. [online]. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=942990&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D942990
- [14] Megacon company. *LOSS OF MAINS PROTECTION RELAY KCG597x*. [online]. Dostupné z: http://www.megacon.com/admin/uploads/Datasheet/Datasheet_KCG597x.pdf

- [15] Mrinal K Pal. *Lecture Notes on Power System Stability*. [online]. Dostupné z: <http://www.mkpalconsulting.com/files/stabilitybook.pdf>
- [16] Rafał Bugdał, Adam Dyśko, G.M. Burt, J.R. McDonald. *Performance analysis of the ROCOF and vector Shift methods using a dynamic protection modelling approach*. University of Strathclyde Glasgow, UK. [online]. Dostupné z: <http://strathprints.strath.ac.uk/37425/>
- [17] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. *Provoz distribučních soustav: electrical engineering*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [18] Tomas Jelen. *InteliPro, Protection Relay for Parallel Applications*. ComAp, spol s.r.o. [online]. Dostupné z: <http://www.comap.cz/products/detail/intelipro/>
- [19] Trojánek, Zdeněk; Hájek, Josef; Kvasnica, Pavol. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1987.
- [20] Tyco Electronics. *Installation and Operating Instructions R.O.C.O.F Protection Relay*. Tyco Electronics UK Limited. [online]. Dostupné z: http://energy.te.com/china/crompton_doc/rocof.pdf
- [21] Walimir Freitas, Member, IEEE, Zhenyu Huang, Member, IEEE, and Wilsun Xu, Senior Member, IEEE. *A Practical Method for Assessing the Effectiveness of Vector Surge Relays for Distributed Generation Applications*. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 20, NO. 1, JANUARY 2005. [online]. Dostupné z: <http://www.multi.fi/~saunaaho/Files/VectorSurgeRelayEffectiveness.pdf>
- [22] X. Ding*, P.A. Crossley* and D.J. Morrow*. *Islanding Detection for Distributed Generation*. Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 2, No. 1, pp. 19~28, 2007. [online]. Dostupné z: [http://pure.qub.ac.uk/portal/files/868297/03-2006-JA-PS-1-020\[1\].pdf](http://pure.qub.ac.uk/portal/files/868297/03-2006-JA-PS-1-020[1].pdf)
- [23] Yvonne Coughlan. *What are the required rate of change of frequency (ROCOF) standards for wind farms in the Irish Grid Code? In addition to generator inertia what are the main influences on the rate of change of frequency?* [online]. Dostupné z: www.cigre.org/.../1/.../C2_PS1_Q1.1_Coughlan.pdf
- [24] World Energy Co., Ltd. *Double effect exhaust gas driven absorption chiller user manual*. [online]. Dostupné z: www.worldenergy.co.kr
- [25] GridX Power Australasia. *Qantas project documentation*. [online]. Dostupné z: www.gridxpower.com
- [26] ACHA, Enrique. *Power electronic control in electrical systems*. Boston: Newnes, 2002, xii, 443 p. ISBN 07-506-5126-1.

6 Seznam příloh:

Příloha č. 1: Schéma začlenění rozvodny „P“	1
Příloha č. 2: Schéma vodních okruhů	2
Příloha č. 3: Graf průběhů hodnot během testu odpojení od soustavy	3

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma lokální soustavy 10 kV [25].....	12
Obrázek 2 - Podélný řez alternátorem [25].....	13
Obrázek 3 - Proces výroby chladu absorpční jednotky pro spolupráci s plynovým motorem [24].....	17
Obrázek 4 - Vodní schéma využití tepla [25].....	20
Obrázek 5 - Stabilní a nestabilní průběh změny zátěžného úhlu během přechodného děje [9]	22
Obrázek 6 - Časový rámeček základních dynamických jevů v elektroenergetické soustavě [12].....	22
Obrázek 7 - Jednoduchá soustava a její fázorový diagram [12].....	22
Obrázek 8 - Model soustavy s dílčími reaktancemi a příkladem náhlé změny konfigurace soustavy [1].....	23
Obrázek 9 - Mechanický model rotoru soustrojí [3]	25
Obrázek 10 - Závislost zátěžného úhlu na výkonu alternátoru [26]	25
Obrázek 11 - Diagram fázorů napětí alternátoru [26].....	26
Obrázek 12 - Změna maximálního výkonu způsobená např. zvětšením X - vypnutím paralelního vedení [9].....	26
Obrázek 13 - Plochy práce potřebné pro změnu kinetické energie rotoru [9].....	27
Obrázek 14 - Metoda ploch [17]	28
Obrázek 15 - Fázorový diagram a model soustavy se znázorněním impedancí [15].....	31
Obrázek 16 - Reakce napětí a frekvence na změnu zatížení v síti [18]	35
Obrázek 17 - Oblasti nejistoty detekce ostrovního provozu [18].....	36
Obrázek 18 - Princip detekce ROCOF [18].....	38
Obrázek 19 - Princip měření a detekce posunu fáze napětí - Vector shift [21].....	44

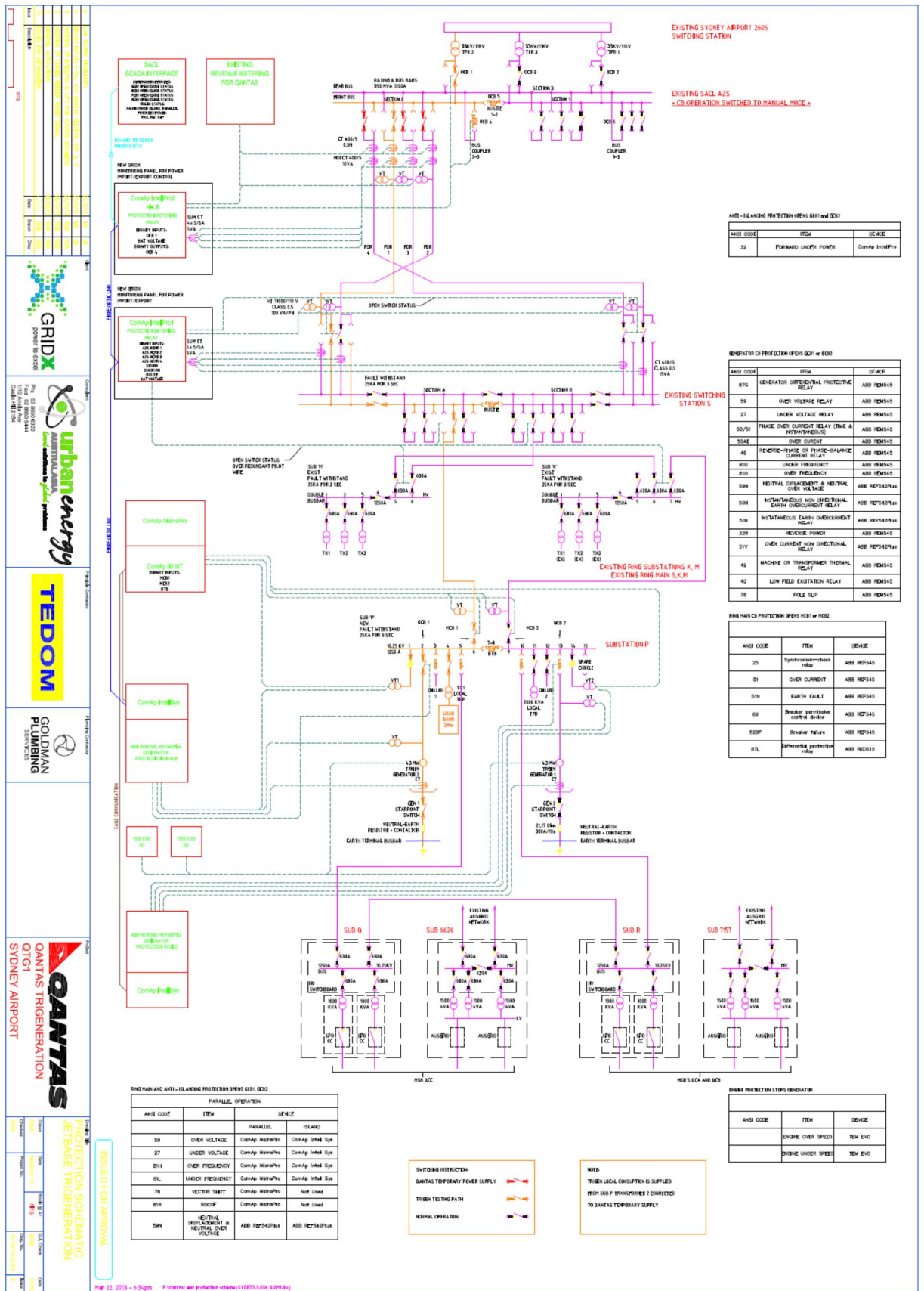
Seznam tabulek

Tabulka 1 - Parametry rozvodny „P“ 10 kV [25].....	13
Tabulka 2 - Parametry alternátoru [25]	14
Tabulka 3 - Zkratové poměry v soustavě 33 kV [25].....	15
Tabulka 4 - Zkratové poměry v soustavě 10,5 kV [25].....	15
Tabulka 5 - Technická specifikace motoru [25].....	15
Tabulka 6 - Parametry soustrojí pro výpočet stability [25].....	31
Tabulka 7 - Teoretický reakční čas potřebný pro detekci ROCOF v závislosti na velikosti změny zátěže v kW.....	40
Tabulka 8 - Záznam měření ROCOF v místě připojení k síti.....	42
Tabulka 9 - Záznam měření řídicího systému na vývodu z alternátoru	42
Tabulka 10 - Časový limit potřebný pro detekci VS pro nastavený úhel a velikost změny zátěže.....	45

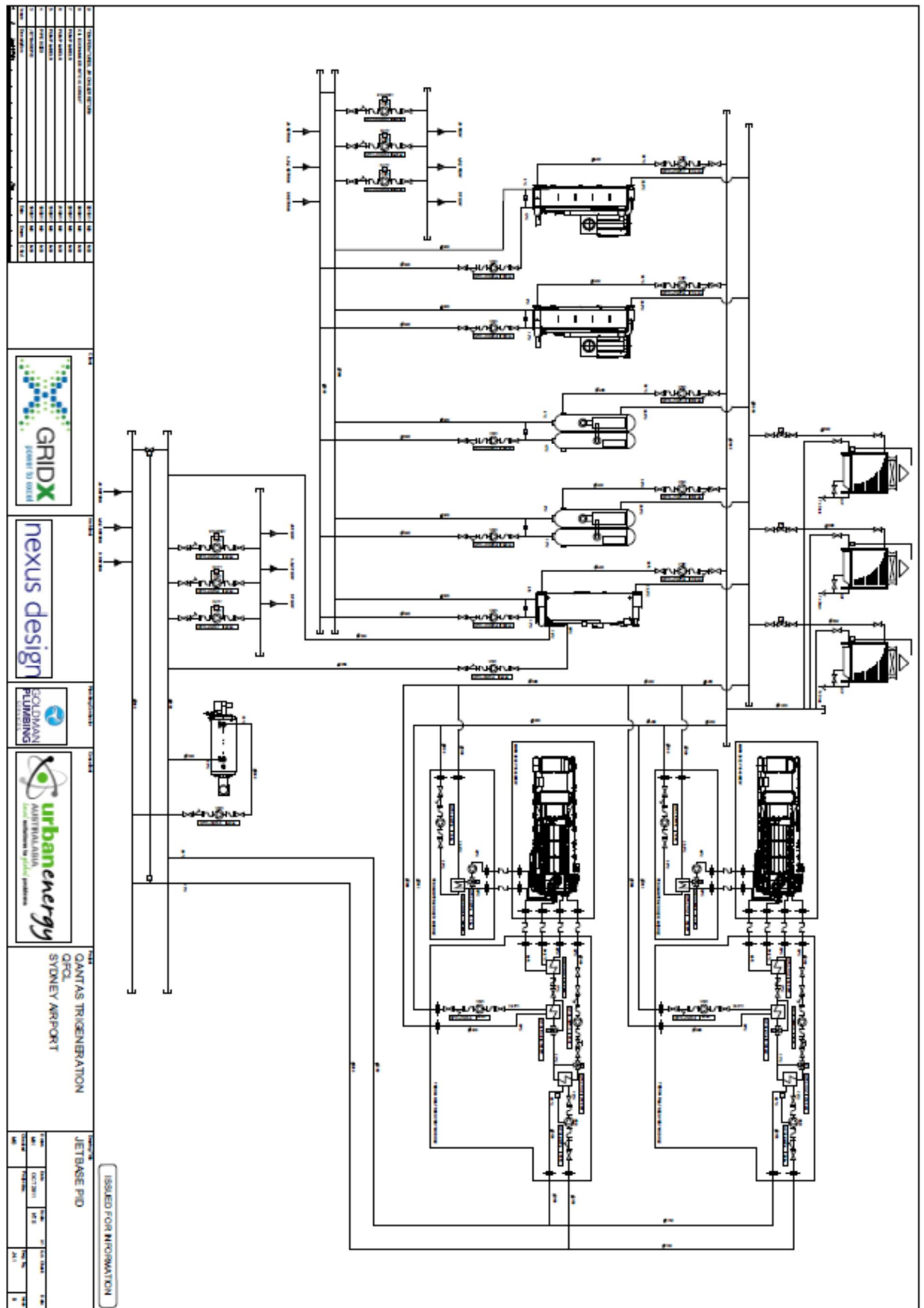
Seznam grafů

Graf 1 - Diagram pracovní látky absorbéru [24]	18
Graf 2 - Reakční doba ochrany ROCOF, v závislosti na nastavené velikosti skoku v zatížení	41
Graf 3 - Reakční doba VS v závislosti na velikosti zátěžového skoku.....	46

Příloha č. 1: Schéma začlenění rozvodny „P“



Příloha č. 2: Schéma vodních okruhů



Příloha č. 3: Graf průběhů hodnot během testu odpojení od soustavy

