

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Rekonstrukce systému ochran a kompenzace účinníku
MVE**

vedoucí práce: Prof. Ing. Jan Mühlbacher, CSc.

2013

autor: Michal Muška

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal MUŠKA**
Osobní číslo: **E11N0191P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Rekonstrukce systému ochran a kompenzace účinníku MVE**
Zadávající 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 systém ochran generátorů.
2. Určete způsob zlepšení ochrany generátoru před nejčastějšími poruchami, tj. 1f. zemní a 2f. mezifázový zkrat.
3. Navrhněte systém regulace účinníku pro všechny varianty provozu - účinník v předávacím bodě.
4. Proveďte optimalizaci systému ochran transformátorů (vývodový a vlastní spotřeba).

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. **Tlustý, J. a kol.: Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav**

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Jan Mühlbacher, CSc.**
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




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

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na systém chránění generátorů, a to synchronních i asynchronních, různých výkonů, především se zaměřením na malé vodní elektrárny. Dále se práce zabývá způsoby chránění transformátorů a uvedením starších i současně nasazovaných ochran. V neposlední řadě pak nastiňuje problematiku kompenzace účinníku, analýzu kvality účinníku na konkrétní malé vodní elektrárně a návrh kompenzace potřebné k dodržení podmínek PDS. Tato diplomová práce také obsahuje výsledky měření kvality elektrické energie provedeného autorem na konkrétní elektrárně MVE Olešná I.

Klíčová slova

malá vodní elektrárna, ochrana generátoru, ochrana transformátoru, kompenzace účinníku, kvalita elektrické energie

Abstract

This master thesis is focused on the generators protection system with included synchronous and asynchronous generators of different power. Main emphasis was placed on small hydropower. Furthermore, the thesis deal with the ways of transformer's protection. Both the compensation of power factor and quality of power energy analysis at small hydropower are mentioned here, incl. the proposal of compensation necessary to comply with the DSO conditions. The results of electric power quality measurement performed by the author at small hydropower Olešná I close this paper.

Key words

small hydro power plant, generator protection, transformer protection, power factor correction, quality of power energy

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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.

V Plzni dne 6.5.2013

Michal Muška

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Janu Mühlbacherovi, CSc. a Ing. Karlu Cvačkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval p. Netušilovi za potřebné rady v oblasti chránění distribučních transformátorů. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mým rodičům za podporu v celé době mého studia.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 SYSTÉM OCHRAN GENERÁTORŮ	12
1.1 PORUCHY NA GENERÁTORECH	12
1.2 OCHRANY	13
1.2.1 Požadavky na ochrany	14
1.2.2 Zařízení pro ochrany	15
1.3 CHRÁNĚNÍ SYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ	15
1.3.1 Nadproudová ochrana časově nezávislá a časově závislá	16
1.3.2 Ochrana proti tepelnému přetížení statoru	18
1.3.3 Rozdílová ochrana generátoru	19
1.3.4 Ochrana proti zemnímu spojení statoru generátoru	20
1.3.5 Ochrana proti zemnímu spojení rotoru generátoru	24
1.3.6 Ochrana při podbuzení a ztrátě buzení	25
1.3.7 Ochrana při nesymetrickém zatížení generátoru	27
1.3.8 Přepěťová ochrana a podpěťová ochrana	29
1.3.9 Nadfrekvenční a podfrekvenční ochrana	30
1.3.10 Zpětná wattová ochrana	32
1.4 CHRÁNĚNÍ ASYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ	33
2 CHRÁNĚNÍ GENERÁTORŮ PŘED NEJČASTĚJŠÍMI PORUCHAMI A JEJICH ZLEPŠENÍ	36
3 MVE OLEŠNÁ	38
3.1 MVE OLEŠNÁ I, II	38
3.2 MVE OLEŠNÁ U ČERNÝCH	39
4 SYSTÉM CHRÁNĚNÍ TRANSFORMÁTORŮ VE VZTAHU K NAPÁJENÍ Z MVE OLEŠNÁ	40
4.1 OCHRANY TRANSFORMÁTORŮ DLE NORMY ČSN 33 3051	40
4.2 BUCHHOLZOVO RELÉ	41
4.3 OCHRANNÉ MODULY RIS A DGPT II	42
4.4 OCHRANA SUCHÝCH TRANSFORMÁTORŮ	43
4.5 CHRÁNĚNÍ TRANSFORMÁTORU 400 kVA NA MVE OLEŠNÁ	43
4.5.1 Distribuční transformátor	43
4.5.2 Použité ochrany	44
5 KOMPENZACE ÚČINNÍKU A VLIV MVE NA PROVOZ DS	45
5.1 Účinník	45
5.2 ÚČEL KOMPENZACE ÚČINNÍKU	46
5.3 DŮLEŽITÉ ASPEKTY A VLIV KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU NA PROVOZ DS	46
5.4 REGULACE JALOVÉHO VÝKONU	49
5.5 VLIV KOMPENZACE ÚČINNÍKU NA HDO	50
5.6 ZPŮSOBY KOMPENZACE ÚČINNÍKU NA MVE	52
6 MĚŘENÍ KVALITY EL. ENERGIE A OVĚŘENÍ KOMPENZACE MVE OLEŠNÁ I.	53
6.1 MĚŘENÍ	53
6.2 ANALÝZA VÝSLEDKŮ	53
6.2.1 Rozběh generátoru 55 kW - napěťové a proudové poměry	54
6.2.2 Výpadek sítě a funkce blokování zapnutí 35 min	56

6.2.3	<i>Ustálený chod generátoru 55 kW - průběh napětí a proudu</i>	58
6.2.4	<i>Kontrola THD_U a THD_I</i>	60
6.2.5	<i>Kontrola účinníku $\cos \varphi$ a skutečného účinníku PF</i>	62
6.3	VÝPOČET A NÁVRH KOMPENZACE	64
6.3.1	<i>Současná kompenzace</i>	64
6.3.2	<i>Úprava kompenzace</i>	64
7	ZÁVĚR	66
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	67
	PŘÍLOHY	1
	SEZNAM PŘÍLOH	1

Úvod

Stále se zvyšující poptávka po elektrické energii, zapracování nových zdrojů do elektrizační soustavy, ale také nezbytnost ohledu na životní prostředí. To jsou dnešní nejdiskutovanější problémy elektroenergetiky. Je nutné, aby všechny prvky elektrizační soustavy byly dostatečně spolehlivé. Aby byl zajištěn nepřetržitý chod soustavy. Tento problém se dá nazvat spojením „spolehlivost dodávky elektrické energie“. S tou však souvisí nejen správně navržené přenosové cesty nebo efektivně vybudované elektrárny, ale také oblast týkající se kvality elektrické energie.

Problematika týkající se kvality elektrické energie v sobě skrývá mnoho zkoumaných veličin (kvalita napětí, frekvence, výkonu nebo například účinníku). Velikost napětí je zpravidla velmi citlivá na toky jalového výkonu. Je tedy nutno správně kompenzovat jalový výkon. V mé diplomové práci se budu touto problematikou zabývat především z hlediska malých vodních elektráren. K tomu, abych byl schopen tuto problematiku konkrétně a výstižně popsat, jsem využil možnosti navštívit a měřit na MVE Olešná na řece Berounce.

Pro bezporuchový stav elektrizační soustavy je nesmírně důležitý systém chránění. Ochrany se dnes využívají ve výrobnách (elektrárnách), v elektrických stanicích, ale také při přenosu elektrické energie. Dnešní trend se postupně uchyluje především k digitalizování zastaralých systémů chránění. Tento proces lze sledovat právě na malých vodních elektrárnách, které se na území ČR výrazně rozšířily na přelomu 18. a 19. století. V mé diplomové práci bych chtěl uvést systémy ochran synchronních a asynchronních generátorů napříč velikosti výkonů a způsobu využití. S chráněním malé vodní elektrárny také samozřejmě souvisí vyvedení výkonu. Proto se budu z části zabývat také způsobu chránění transformátorů při respektování vybraných platných českých norem.

Tuto diplomovou práci jsem si vybral proto, abych rozšířil svůj přehled o dané problematice získaný v menší míře v předmětech na naší fakultě. Víím, že chránění a ochrany obecně jsou velmi složitým oborem, který má základ především v teorii elektrotechniky. Přesto mě však zaujalo spojení systému ochran a malých vodních elektráren. Možná z toho důvodu, že zcela na počátku vývoje výroby elektrické energie nebylo nutné řešit současné trendy a úskalí elektrizační soustavy. Přesto se dnes na MVE již od velmi malých výkonů objevují sofistikované digitální ochrany, které nechrání pouze samotný generátor, ale také vlastní distribuční síť. S otázkou chránění asynchronních generátorů na MVE také souvisí způsob kompenzace, čemuž v mé diplomové práci budu věnovat patřičný prostor.

Seznam symbolů a zkratk

K_{\max}	Nebezpečná hodnota naakumulované tepelné energie v rotoru generátoru při nesymetrickém zatížení
P_n	Jmenovitý činný výkon
P_{rev}	Zpětný činný výkon
Q_{ind}	Induktivní složka jalového výkonu
S_n	Jmenovitý zdánlivý výkon
U_n	Jmenovité napětí
X_q	Příčná reaktance generátoru
τ_θ	Teplotní časová konstanta
ϑ	Zátěžný úhel generátoru
1. K. z.	První Kirchoffův zákon
$1f, 3f$	Počet fází
AG	Asynchronní generátor
AS	Asynchronní stroj
$\cos \varphi$	Účinník
DS	Distribuční soustava
HDO	Hromadné dálkové ovládání
MTP	Měřicí transformátor proudu
MVE	Malá vodní elektrárna
PDS	Provozovatel distribuční soustavy
PPDS	Pravidla provozování distribuční soustavy
PTP	Přístrojový transformátor proudu
PTN	Přístrojový transformátor napětí
SG	Synchronní generátor
VS	Vlastní spotřeba
ZS	Zemní spojení

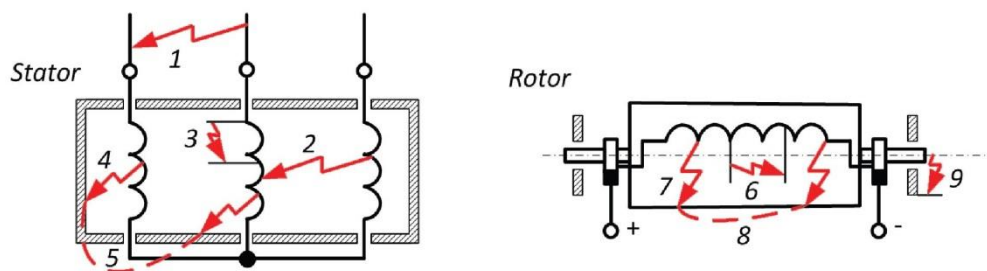
1 Systém ochran generátorů

Obecně je účelem ochran generátorů omezit resp. minimalizovat škody na generátoru, které by vznikly při nedostatečném nebo žádném chránění těchto strojů. Je tedy potřeba spolehlivě zabezpečit ochranu generátoru při vzniku poruch a nenormálních provozních stavech. Snahou je, aby na postiženém generátoru konkrétním poruchovým stavem vznikla pokud možno co nejmenší přijatelná škoda. Naopak by ale neměl být zbytečně odstavován blok výroby, čímž by byla ohrožena plynulost dodávky elektrické energie. Obecné zásady navrhování ochran a jejich funkcí pro konkrétní výkony elektrických strojů (generátorů) definuje norma ČSN 33 3051 – Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení 1992. Dle normy by měla tato zařízení splňovat následující činnosti:

- rychle a spolehlivě určit poruchu nebo překročení meze normálního provozu chráněného zařízení
- vypnout je v čase, který musí být stanoven tak, aby se zabránilo vzniku škod nebo se omezil jejich rozsah na stroji nebo zařízení a zajistila se tak ochrana osob před účinky elektrické energie
- snížit riziko požáru v důsledku tepelných účinků zkratového proudu
- zajistit, aby se porucha nerozšířila na ostatní prvky ES a neohrozila její chod a napájení spotřebitele [12].

1.1 Poruchy na generátorech

Jelikož srdcem každé elektrárny je generátor, je třeba zabývat se podrobně jeho chráněním a tím pádem i přehledně vymezit poruchy, které na něm mohou vzniknout, viz Obr. 1.1. Při vzniku většiny vnitřních izolačních poruch generátoru se generátor musí ihned odpojit. Při některých vnějších poruchách nebo nenormálních podmínkách chodu existuje možnost tolerovat jistou dobu před odstavením, po kterou je generátor v provozu.



Obr. 1.1 - Poruchy na generátoru, převzato z [1].

Obecné rozdělení poruch generátoru:

Tab. 1.1 - Tabulka izolačních poruch generátoru.

<i>Izolační poruchy</i>	
<i>Statoru</i>	<i>Rotoru</i>
<i>vnější zkrat (1)</i>	<i>závitový zkrat (6)</i>
<i>vnitřní zkrat (2)</i>	<i>zemní spojení (7)</i>
<i>závitový zkrat (3)</i>	<i>druhé zemní spojení (8)</i>
<i>zemní spojení (4)</i>	<i>ložiskové proudy (9)</i>
<i>druhé zemní spojení (5)</i>	

Tab. 1.2 - Tabulka poruch při nenormálních podmínkách chodu.

<i>Nenormální podmínky chodu</i>		
<i>Statoru</i>	<i>Rotoru</i>	<i>Pohonu</i>
<i>přetížení</i>	<i>ztráta buzení</i>	<i>zpětný tok výkonu</i>
<i>přepětí</i>	<i>nesouměrnost</i>	<i>nadsynchronní otáčky</i>
<i>samobuzení</i>		<i>posuny rotoru</i>
<i>podsyncronní otáčky</i>		<i>kmitání stroje</i>
		<i>strojní poruchy turbíny</i>
		<i>poruchy kotle</i>

1.2 Ochrany

Elektrické ochrany jsou taková zařízení, která jsou schopna monitorovat chráněný objekt nebo část sítě. Jsou uzpůsobeny k tomu, aby v požadovaném čase bezpečně a spolehlivě eliminovala vliv vzniklé poruchy působící na chráněný objekt (zařízení). Ochrany jsou obecně schopny před poruchovými účinky chránit zařízení jen dočasně (řádově desítky ms, s, až minuty) takovým způsobem, aby nedošlo k překročení meze odolnosti zařízení. Jinými slovy se ochrany dimenzují na minimální hodnoty poruchových veličin; např. minimální hodnota zkratového proudu $I_{k \text{ min}}$. Ochrany tedy nejsou schopny zajistit ochranu před impulsními účinky poruch. Tyto účinky se odstraňují pomocí svodičů přepětí, konstrukčním provedením a magnetickým stíněním zařízení atd.

1.2.1 Požadavky na ochrany

Hlavní důvod k použití ochrany nebo celého systému ochran je prakticky okamžité izolování části zařízení nebo sítě, na které vznikla porucha a to tak, aby nepostižená část zařízení nepotřebovala dodatečnou obsluhu. Vyplyvající požadavky na ochrany jsou následující:

Spolehlivost funkce ochrany – je to schopnost ochrany provést nastavenou operaci v daném čase s požadovanými parametry. Spolehlivost ochrany je rozdělena na 2 části – funkčnost a bezpečnost působení. Funkčnost ochrany znamená, že ochrana zapůsobí správně. Naopak bezpečnost znamená, že s největší pravděpodobností ochrana nezapůsobí nesprávně. Jinými slovy ochrana nebude v poruše a ani nebude zbytečně působit, když nemusí.

Odolnost ochrany při rušení – v okolí energetického zařízení mohou působit okolní vlivy, jako jsou elektrická a magnetická pole např. při zkratech, přítomnost agresivních plynů v ovzduší elektrárny, otřesy či prašné prostředí. Ochrana tedy musí odolat těmto vlivům.

Rychlost působení ochrany – je parametr, kterým je dána rychlost ochrany. Je to doba od identifikace poruchy k zapůsobení ochrany. Rychlost působení ochrany zvyšuje odolnost chráněného objektu z hlediska míry poškození a zvětšuje také stabilitu soustavy. Hlavní faktory, které ovlivňují rychlost působení, jsou – minimalizace rozsahu poškození, zmenšení nebezpečí úrazu osob, selektivita, zachování dynamické stability soustavy. Celková a rozhodující doba zapůsobení ochrany je součtem rychlosti vybavení ochrany a rychlosti vypnutí vypínače.

Selektivita ochran – je to schopnost dané ochrany působit pouze na chráněný objekt nebo na nastavenou stavovou veličinu. Také je to schopnost, při které v systému ochran zapůsobí ta ochrana, která je blíže k vzniklé poruše.

Citlivost ochrany – v provozu je nutno dbát na bezpečnost chránění. Ochrana je tedy nastavena tak, aby vybavila již při méně nebezpečné hodnotě hlídané veličiny, než je samotná porucha.

Jednoduchost údržby a obsluhy – ochrana by měla být navržena tak, aby byla co nejjednodušší z hlediska obsluhy a zároveň, aby plnila své nastavené funkce. Jednoduše řečeno čím méně dalších nadbytečných funkcionalit, tím menší riziko chybné manipulace.

Ekonomická návratnost – je potřeba vybrat ochrany nebo systém ochran tak, aby byla zajištěna ekonomická návratnost. To lze posoudit zejména vyhodnocením četnosti poruch, které by nenasazením ochran vznikaly a následným ekonomickým zhodnocením.

1.2.2 Zařízení pro ochrany

Pro funkčnost ochrany jsou důležitá především měřicí zařízení, která jsou schopna změřit s dostatečnou přesností potřebné veličiny. Jelikož jde převážně o velké provozní proudy (napětí) a měřicí zařízení pro ochrany na takové hladině by byla krajně neekonomická, je potřeba tyto hodnoty převést na přijatelné a bezpečné hodnoty analogových signálů. K tomuto obvykle slouží přístrojové transformátory proudu PTP a přístrojové transformátory napětí PTN.

- PTP – přístrojové transformátory proudu

Primární vinutí PTP je přímo tvořeno vodičem měřeného energetického systému. Na sekundární stranu PTP se připojí potřebné přístroje. PTP nainstalované v soustavě vn neovlivňují její poměry, jelikož hlavní a rozptylové reaktance jsou nízké.

- PTN – přístrojové transformátory napětí

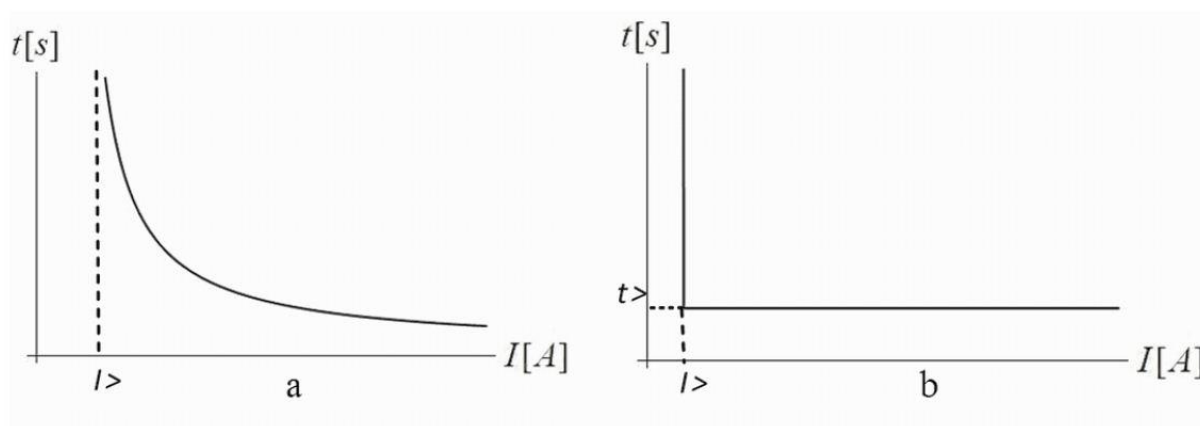
Primární vinutí zapojeno paralelně k měřenému energetickému systému, jehož napětí se transformuje do obvodu sekundárního. Vlastnosti PTN jsou velmi blízké a v podstatě obdobné jako u výkonových transformátorů. Má však malý typový výkon, malé napětí nakrátko. Ideální PTN by měl mít výstupní napětí úměrné vstupnímu dle převodu, avšak to je v praxi nemožné.

1.3 Chránění synchronních generátorů

Při normálních podmínkách, tedy za bezporuchového stavu, je provoz synchronních generátorů řízen pomocí automatického regulátoru napětí a řídicím systémem turbíny. Když nastane nějaká mimořádná situace, což může být např. porucha, při které se jedna nebo více konkrétních veličin generátoru odchyluje od normálních hodnot, je nutný zásah elektrických ochrany. Nejzávažnější poruchy generátoru jsou zkratky a zemní spojení. Tyto poruchy musí být pomocí ochrany okamžitě detekovány a odstraněny. Další nenormální stavy synchronního generátoru jsou proudové přetížení, podpětí, nadpětí, podbuzení, nadfrekvence, podfrekvence apod. Jelikož se téma mé diplomové práce zabývá především generátory MVE, zaměřím se převážně na ochranu synchronních generátorů malých a středních výkonů.

1.3.1 Nadproudová ochrana časově nezávislá a časově závislá

Nadproudová ochrana je svým principem v podstatě jednoduchá, což však pro použití k ochraně generátorů není vždy 100% výhodou. Ochrana vybavuje při překročení naměřeného proudu v chráněném místě generátoru. Funkce ochrany souvisí s nastavením podmínek (velikost proudu, čas). Nadproudová ochrana tedy může být časově závislá nebo časově nezávislá. Těmto dvěma typům odpovídají i jejich charakteristiky. Z pravidla se hlídají proudy všech tří fází a/nebo zemní proud. V zařízení však mohou nastat různé druhy nadproudu. Např. zkratový proud, který je potřeba vypnout co nejdříve, nebo déletrvající nadproud, který se vypíná po určité době trvání. Výsledná charakteristika ochrany tedy nemusí být vždy jednoduchá. Může být složena kombinací jednotlivých charakteristik (časově závislá, nezávislá, viz Obr. 1.2). Charakteristikám mohou odpovídat specificky odstupňované nadproudy (označované např. jako: $I>$, $I>>$, $I>>>$...).



Obr. 1.2 - Charakteristika nadproudové ochrany a) časově závislá, b) časově nezávislá, převzato z [1].

Základní podmínka k nastavení ochrany pro **zkratové proudy** je

$$I_{kmin}'' > I_p > I_{L\ peak\ max}$$

, kde I_p – nastavený proud ochrany pro $I>>$

I_{kmin}'' – min. hodnota zkratového proudu

$I_{L\ peak\ max}$ – max. okamžitá hodnota proudu zátěže,

přičemž výrobci doporučují minimálně $I_p \geq 1,5 \div 1,6 \cdot I_{L\ peak\ max}$ a současně hodnota minimálního zkratového proudu by měla být $I_{kmin}'' \geq 2 \cdot I_p$. Z těchto požadavků je zřejmé, že je nutné mít k dispozici dostatečný zkratový výkon sítě. Toto je splněno např. u elektráren s točivými stroji. Fotovoltaické elektrárny nebo sítě s rozptýlenou výrobou mohou mít naopak problém s velikostí zkratového výkonu.

Podmínka k nastavení ochrany pro **nadproudy** je

$$I_{L \text{ peak max}} > I_p > I_{L \text{ max}}$$

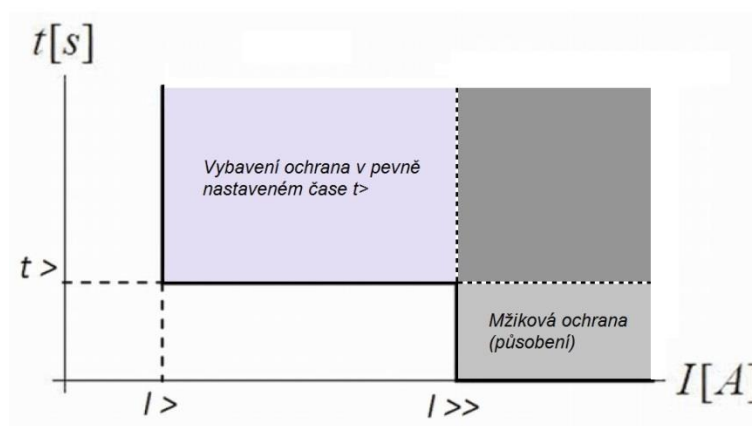
kde $I_{L \text{ max}}$ – max. ustálený proud zátěže

I_p – nastavený proud ochrany pro $I >$,

přičemž by mělo být časové odstupňování nastaveno tak, aby ochrana reagovala správně (tedy nereagovala na dočasnou hodnotu $I_{L \text{ peak max}}$). Výrobci doporučují $I_p \geq 1,2 \div 1,4 \cdot I_{L \text{ max}}$.

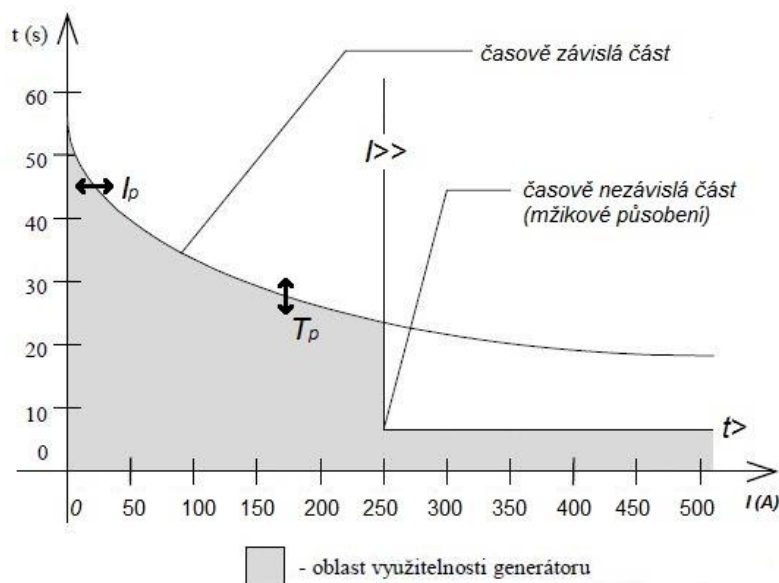
Příkladem nastavení ochrany časově nezávislého charakteru může být např. tato kombinace časově nezávislých charakteristik nadproudové ochrany (viz Obr. 1.3). V případě, že poruchový proud je:

- v mezích $I >$ a $I >>$ - ochrana vybaví v nastaveném čase $t >$,
- větší než $I >>$ - ochrana vybaví okamžitě (mžiková ochrana).



Obr. 1.3 - Kombinace dvou nezávislých časových charakteristik nadproudové ochrany.

Časově nezávislých charakteristik (nastavení ochran) se využívá zejména k chránění před zkratovými proudy. Ve většině případů je nutná kombinace s časově závislou charakteristikou (viz Obr. 1.4).



Obr. 1.4 - Kombinace časově závislé a nezávislé nadproudové ochrany.

1.3.2 Ochrana proti tepelnému přetížení statoru

Každý generátor je od výroby konstruován tak, aby byl schopen sám sebe uchládit při normálním provozním zatížení. Při provozu generátoru totiž vznikají tepelné ztráty, které se dají vyjádřit následovně:

$$W = 3R \int_0^T i^2(t) dt$$

kde W – je energie akumulovaná ve statorovém vinutí stroje,

R – odpor jedné fáze statorového vinutí,

$i(t)$ – proud procházející statorovým vinutím,

T – doba trvání proudového přetížení.

Teplo vznikající při provozu generátoru je průběžně odváděno chladicími zařízeními typickými pro každý určitý stroj. Při přetížení však přibývá neodvedeného akumulovaného tepla a tím se zvyšuje i teplota vinutí. To má následně vliv na životnost izolace a mohlo by v budoucnu dojít k poruše (např. zkrat, zemní spojení) nebo v horším případě i akutnímu přetížení a zničení stroje. Rychlost růstu teploty při přetížení je do jisté míry závislá na velikosti generátoru a je dána teplotní časovou konstantou τ_9 .

Generátory pro velké elektrárenské bloky

U velkých generátorů je teplotní časová konstanta τ_9 poměrně malá. Je to dáno tím, že dnešní stroje jsou navrhovány na maximální výkon z hlediska velikosti a další zvyšování výkonu jde na úkor zlepšování chlazení. Zde je tedy akumulace tepla při přetížení velmi

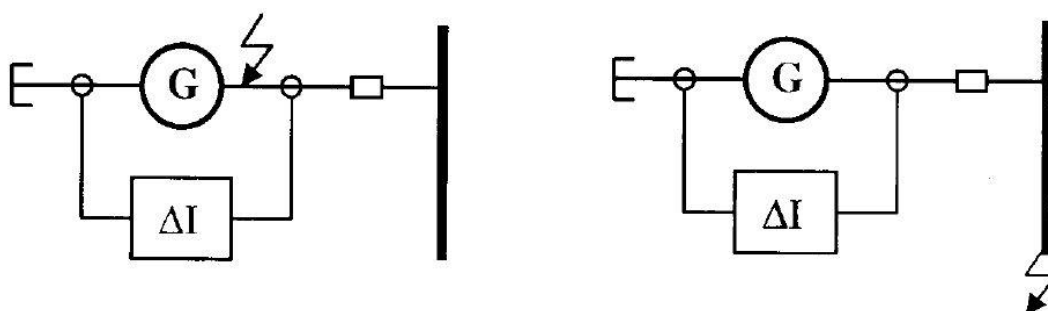
výrazná a dochází k velmi rychlému oteplování. Je zde tedy obecně potřeba použít nezávislou proudovou ochranu proti přetížení.

Menší synchronní generátory

Generátory, které mě ale v mé diplomové práci zajímají více, jsou menších výkonů. Právě takové generátory, pracující např. v malých vodních elektrárnách, jejichž dodávaný výkon do sítě příliš nepřesahuje aktuální velikost spotřeby v dané lokalitě. Z důvodů flukтуаčního charakteru takového zatížení je generátor nucen snést krátkodobé přetížení. Zde se tedy účelně používá závislá proudová ochrana proti přetížení. To umožňuje výhodnější využití samotného generátoru.

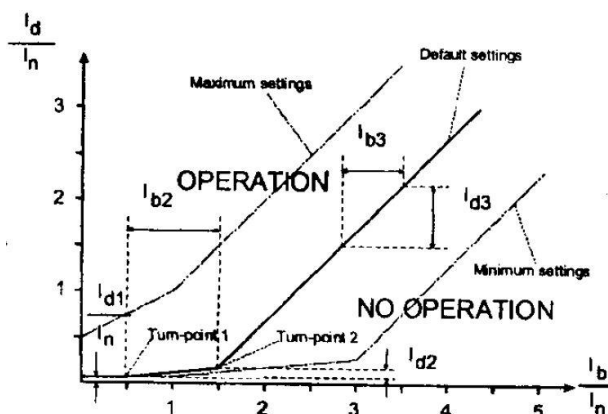
1.3.3 Rozdílová ochrana generátoru

Rozdílová ochrana generátoru je jedna z možných zkratových ochrany. Funguje na principu 1. K. z. – porovnávání proudů na vstupu a výstupu do objektu. Za normálního stavu bez poruchy se součet proudů na výstupu rovná proudům na vstupu. Rozdílová ochrana je velmi důležitým prvkem pro chránění generátoru z hlediska zkratů. Ze selektivity, jakožto jednoho z požadavků na ochrany vyplývá následující. Rozdílová ochrana musí být schopna rozlišit, zda došlo k vnitřnímu zkratu či zkratu mimo chráněnou oblast. Musí působit pouze v 1. případě (viz Obr. 1.5a).



Obr. 1.5 - a) porucha uvnitř chráněné oblasti (vnitřní zkrat), b) porucha vně chráněné oblasti (vnější zkrat), převzato z [4].

V případě vnějšího zkratu (viz Obr. 1.5b) působí obvykle nadproudová ochrana s časovým zpožděním, doplněna blokováním podpěťovou ochranou. Aby bylo působení rozdílové ochrany spolehlivé, měly by být správně zvoleny PTP. To znamená, že je nutno použít PTP, schopný obstarat minimálně vzorek 0,5 periody měřeného proudu v čase. Příkladem konkrétní rozdílové ochrany pro generátory může být terminál REM od firmy ABB. Tato ochrana disponuje dvěma stupni.



Obr. 1.6 - Stabilizovaná vypínací charakteristika terminálu REM, převzato z [4].

První stupeň reprezentuje stabilizační charakteristika (viz Obr. 1.6), kde je popudová hodnota rozdílového proudu pohyblivá a závisí na hodnotě průchozího proudu. To znamená, že pro vyšší procházející proud roste i hodnota vybavení rozdílové ochrany. Tato vypínací charakteristika má za úkol kompenzovat rozdílový proud, který je vyvolán nepřesností nebo dílčím přesycením PTP. Eliminuje tedy nesprávné působení ze strany PTP.

Druhý nestabilizovaný stupeň, který je nastaven na menší citlivost, je předurčen k rychlé eliminaci těžkých vnitřních zkratových poruch uvnitř chráněné zóny.

1.3.4 Ochrana proti zemnímu spojení statoru generátoru

V normálním bezporuchovém provozu je statorové vinutí izolováno vůči kostře generátoru. Může však dojít k situaci, kdy se tato izolace poruší a dochází tak k 1f zemnímu spojení statoru. V některých případech může nejprve nastat mezifázový zkrat, který následně přechází v zemní spojení. Tato porucha není pro stroj tak nebezpečná, jako např. zkrat. To však platí pouze v případě, že je zemní spojení včas detekováno. Je tedy nepřijatelný dlouhotrvající průchod proudu vzniklým místem ZS.

Pokud nastane zemní spojení, lze ho detekovat poměrně jednoduchým způsobem. Vlivem ZS dochází k nesymetrii napětí. Nesymetrie má za následek přítomnost napětí v uzlu generátoru proti zemi a toto napětí se dá při ZS generátoru naměřit. Poruchové napětí je závislé na místě vzniku zemního spojení.

Chránění proti zemnímu spojení statoru je odlišné podle druhu provozování generátoru:

- generátor pracuje v bloku s transformátorem
- generátor pracuje přímo do přípojníc nekompensované vn sítě
- generátor pracuje přímo do přípojníc kompenzované vn sítě

ad a) Chránění generátoru proti ZS pracujícího v bloku s transformátorem

Při tomto druhu provozování generátoru se k indikaci zemního spojení používají frekvenčně závislé napěťové ochrany. Měří se napětí mezi uzlem generátoru a zemí. Nejvhodnější je taková ochrana, která je citlivá pouze na 1. harmonickou a pro vyšší harmonické (speciálně 3. násobky) je necitlivá. Takovou ochranou je právě napěťová závislá ochrana. Podrobněji se budu této ochraně věnovat v kapitole 2.

ad b) Chránění generátoru proti ZS pracujícího přímo do přípojnice nekompenzované sítě

Pokud se generátor provozuje přímo do přípojnice nekompenzované sítě, nelze mít ochranu nastavenou tak, aby vybavovala na popud indikovaných napětí a proudů změřených přímo ve statoru generátoru. Je totiž možné, že vznikne zemní spojení v síti a nulou alternátoru by procházel kapacitní proud sítě, na kterou je generátor připojen. Ochrana generátoru pochopitelně musí vybavovat pouze na popud ZS generátoru. Je tedy nutné provést výpočet zemních kapacitních proudů generátoru I_{CG} a sítě I_{CS} :

$$I_{CG} = 3 \cdot \omega \cdot C_{0S} \cdot U_N \quad (A)$$

$$I_{CS} = 3 \cdot \omega \cdot C_{0G} \cdot U_N \quad (A)$$

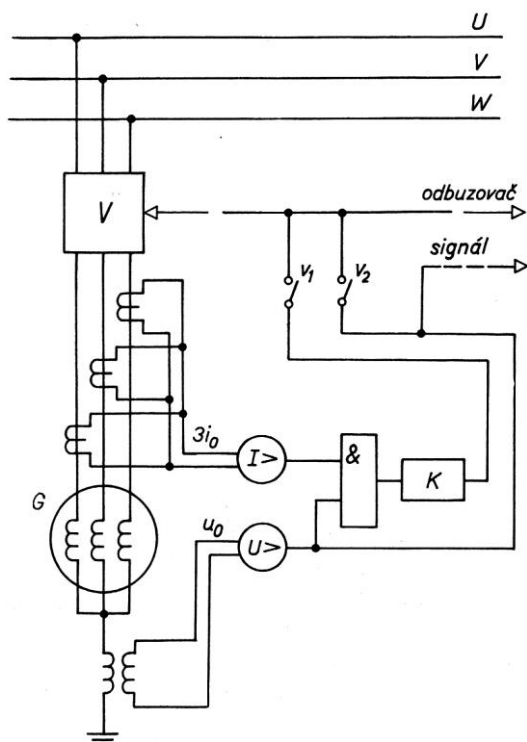
kde I_{CS} – kapacitní proud sítě,

I_{CG} – kapacitní proud generátoru,

C_{0S} – nulová kapacita jedné fáze sítě,

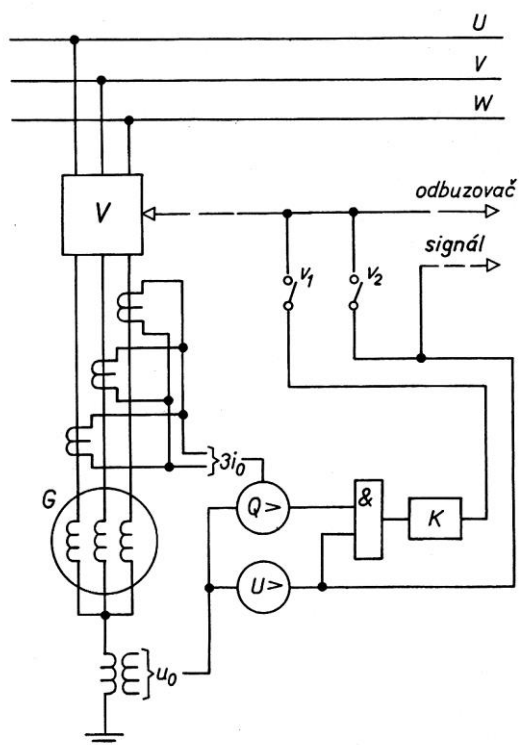
C_{0G} – nulová kapacita jedné fáze generátoru,

U_N – jmenovité fázové napětí.



Obr. 1.7 - Ochrana proti ZS generátoru pracujícího do nekompensované sítě při stavu $I_{CS} \gg I_{CG}$, převzato z [5].

Při takovém stavu, kdy $I_{CS} \gg I_{CG}$ se použije následující koncept ochrany (viz Obr. 1.7). Pokud vznikne zemní spojení ve statoru generátoru, proudí do stroje nulová složka kapacitního proudu sítě I_{CS} . Naopak pokud dojde k ZS v síti, proudí z generátoru nulová složka kapacitního proudu generátoru I_{CG} . Otevřený trojúhelník PTP, připojený k vinutí statoru na stranu svorek, měří proud ve všech třech fázích ($I = 3I_0$) a vyhodnocuje pouze velikost proudu I . Velikost tohoto proudu hlídá proudová ochrana $I >$ nastavená na velikost I_C . Kde $I_{CG} < I_C < I_{CS}$. Zároveň je zde použita frekvenčně napěťová ochrana $U >$ (ochrana na U_0), která má za úkol chránit stroj v době před fázováním generátoru k síti. Tato ochrana se po zapnutí vypínače generátoru samočinně odpojí. [5]



Obr. 1.8 - Ochrana proti ZS generátoru pracujícího do nekompensované sítě při stavu $I_{CS} \doteq I_{CG}$, převzato z [5].

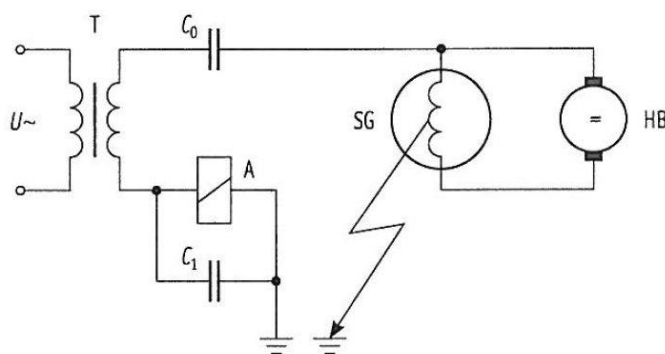
Pokud kapacitní proud sítě není mnohokrát větší než generátoru, $I_{CS} \doteq I_{CG}$, použije se následující koncept ochrany (viz Obr. 1.8). V tomto případě je ochrana založena na principu směru proudu při ZS v generátoru nebo v síti. Směr proudu je tedy odlišný podle místa vzniku ZS. Pokud vznikne zemní spojení ve statoru generátoru, je síť napájena kapacitním proudem z generátoru I_{CG} . Naopak pokud dojde k ZS v síti, je generátor napájen kapacitním proudem sítě I_{CS} . Směr toku kapacitního proudu, tj. směr toku jalové energie, určuje jalová ochrana $Q >$. Ochrana působí jen při ZS uvnitř generátoru. Nulová složka proudu se dá měřit několika způsoby. Jsou to například Holmgreenova skupina PTP nebo průvlekový PTP. K ochraně generátoru po dobu rozběhu opět zajišťuje frekvenční napěťová ochrana $U >$. [5]

ad c) Chránění generátoru proti ZS pracujícího přímo do přípojnice kompenzované sítě

Pro takto provozovaný generátor je systém ochrany proti zemnímu spojení obdobný, jako v případě b). Odlišný je však v charakteru zemního poruchového proudu. Tento proud tedy nemá kapacitní, ale činný charakter. Používá se zde proto wattová ochrana $P >$ namísto ochrany $Q >$.

1.3.5 Ochrana proti zemnímu spojení rotoru generátoru

Při normálním provozování generátoru je budicí obvod odizolován od země. Hřídel stroje je uzemněna pomocí zemního kartáče. V rotoru generátoru se mohou vyskytnout přídavné ztráty vlivem nesouměrného zatížení nebo se mohou vyskytnout vířivé proudy uzavírající se v tělese rotoru. Izolace rotorového vinutí je namáhána i mechanicky – odstředivé síly a rázy při přechodných jevech. Regulací budicího proudu generátoru může dojít k napěťovým špičkám, které se nepříznivě projevují ve slabších místech izolace rotorového vinutí. Pokud následkem těchto jevů vznikne zemní spojení budicího (rotorového) vinutí – spojení s kostrou stroje, neznamená to pro stroj bezprostřední ohrožení provozu. Při jednoduchém (prvním) zemním spojení se pomocí ochrany provádí pouze signalizace a je třeba po odstavení stroje rotor opravit. Pokud by ale byl generátor s prvním ZS provozován dlouhodobě, mohlo by dojít k tzv. druhému zemnímu spojení – druhé spojení vinutí s kostrou. To má za následek vznik magnetické nesymetrie rotoru, který způsobuje jednostranný tah na rotor. Pak mohou vznikat nebezpečné vibrace rotoru, v horších případech dochází k havárii stroje. Vznik druhého ZS je tedy pro stroj krajně nepřípustný. V případě, že je stroj provozován s jedním ZS, je nutné stroj vybavit ochranou, která je schopna při vzniku druhého ZS generátor odstavit z provozu. Ochrana musí být však nastavena tak, aby nevybavovala v případě přechodových stavů. Proto se mimo mžikového nastavení ochrany používá i zpožděného odstavení právě ze zmíněného důvodu selektivity ochrany.



Obr. 1.9 - Zemní ochrana rotoru generátoru, převzato z [2].

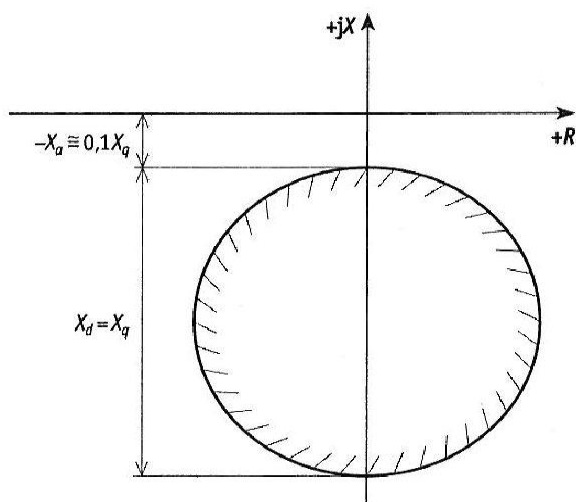
Příkladem použité ochrany proti zemnímu spojení rotoru může být například ochrana, která indikuje zemní spojení v rotoru pomocí střídavého zdroje (viz Obr. 1.9). Zdrojem střídavého napětí je zde transformátor T, který je napájen např. z vlastní spotřeby elektrárny. Oddělení stejnosměrného budicího vinutí rotoru od střídavého obvodu ochrany zajišťuje kondenzátor C_0 . V obvodu rotoru vznikají vyšší harmonické, které je potřeba eliminovat. To zajišťuje kondenzátor C_1 , paralelně připojený k proudovému relé A. Ochrana funguje

následujícím způsobem. Pokud dojde k zemnímu spojení rotorového vinutí s kostrou (zemí), uzavře se pomocný střídavý obvod. Dojde k průchodu proudu skrz relé A, které sepne a vyšle signalizační impuls o zemním spojení.

1.3.6 Ochrana při podbuzení a ztrátě buzení

K výpadku buzení synchronního generátoru může dojít například důsledkem ztráty napájení, případně může dojít k poškození budiče nebo ke zkratu na budičím vinutí. Taková ztráta buzení představuje v určité míře nebezpečí poškození generátoru. Při ztrátě buzení klesá proud budičím vinutím po exponenciále až na nulu. Proto také klesá elektromotorické napětí uvnitř stroje a oslabuje se elektromagnetická vazba mezi statorem a rotorem. Tento jev se projeví na svorkách generátoru tak, že se jalový výkon přiblíží k mezi podbuzení. Zde proto dojde ke ztrátě synchronismu, jelikož elektromagnetická vazba mezi rotorem a statorem je už příliš slabá. Ke ztrátě synchronismu vlivem podbuzení dochází u strojů s vyniklými póly, tedy u hydrogenerátorů. Turbogenerátory, tedy stroje s hladkým rotorem, na podbuzení v podobě vážnějších změn provozního stavu nijak výrazně nereagují. V tomto případě generátor přejde do asynchronního chodu a jeho otáčky slabě vzrostou. Hodnota přenášeného středního výkonu zůstává stejná.

Ochrana při podbuzení zajišťuje ochranu synchronního generátoru před negativními následky výpadku buzení. Ochrana funguje následujícím způsobem: posuzuje se, zda stroj pracuje v asynchronním chodu či nikoliv. Asynchronní chod totiž vždy v případě podbuzení nastane. Jednoduše lze vysvětlit vyhodnocování ochrany tím, že se vyhodnocuje poměr napětí na svorkách generátoru k magnetizačnímu proudu odebíraného ze sítě. Toto měření je zajištěno prostřednictvím PTP v uzlu a PTN na svorkách. Měří tedy prakticky aktuální impedanci stroje. Toto měření provádí reaktanční měřicí člen, jehož charakteristika (oblast působení) se nachází v záporné reaktanční části (v kapacitním směru, $-jX$) komplexní roviny (viz Obr. 1.10). Tato ochrana se nastavuje na příčnou reaktanci generátoru X_q a působí při ztrátě statické stability generátoru. Kontrolu stability generátoru zajišťuje ukazatel zátěžného úhlu ϑ . Důležité je to, aby oblast působení ochrany neprocházela počátek souřadnicového systému. To by totiž mohlo způsobit, že by ochrana působila i při nezátíženém nebo nenabuzeném stroji.



Obr. 1.10 - Tvar vypínací charakteristiky při ztrátě buzení generátoru (oblast působení ochrany), převzato z [2].

Ochrana působí rozdílně pro hydrogenerátory a turbogenerátory:

Hydrogenerátory

Při ztrátě buzení ochrana generátor ihned odstavuje z provozu. Vyšle signál na rychlouzávěr turbíny, vypínače a odbuzovač. Hydrogenerátory se při podbuzení neprovozují z toho důvodu, že vypadnou ze synchronismu a tak přechází v asynchronní chod. To je však nepřijatelné, jelikož zde mohou vznikat proudy blízké velikostem zkratu (proudové rázy). Ty jsou pro životnost generátoru nepříznivé.

Turbogenerátory

Zde ochrana při odbuzení generátor neodstavuje okamžitě, ale vysílá signál automaticce při ztrátě buzení. Tak si již obstarává svou funkci následovně:

- regulátorem turbíny se sníží výkon, pomocí časového členu se měří čas. Pokud v nastaveném čase t_1 (60 s) se nepovede regulátorem nastavit výkon pod hodnotu 40% P_n , dojde k odstavení generátoru. Pokud regulátor dokáže dostat výkon pod hodnotu 40% P_n , generátor pokračuje v provozu.
- nastává další časové měření času t_2 (15 min). Do té doby musí regulátor snížit výkon stroje pod 30% P_n . pokud se tak nestane, stroj se odstaví. Pokud ano, generátor dále zůstává v provozu.
- poslední časové odstupňování je nastaveno na čas t_3 (30 min). Pokud se do této doby nepodaří obnovit buzení generátoru, je stroj konečně odstaven.

1.3.7 Ochrana při nesymetrickém zatížení generátoru

V bezporuchovém stavu jsou proudy v 3f generátoru symetrické. Nesymetrické zatížení je takové zatížení, při kterém jednotlivými fázemi statoru protékají proudy rozdílné velikosti. Generátor je tedy zatěžován nesymetricky. To je nepříjemné především pro části generátoru, jako jsou rotor nebo tlumič. Vlivem nesymetrické zátěže je vyvoláváno zpětné točivé pole, které působí dvojnásobnou frekvencí právě na tyto části. Dochází zde k akumulaci přídavného tepla působením zpětné složky statorového proudu. Na povrchu rotoru se totiž indukují vířivé proudy, které způsobují lokální přehřátí na koncích rotoru nebo v drážkách. Jako příklad akumulace tepla v rotoru můžeme uvést výpočet této naakumulované energie $K(T)$, [2]:

$$K(T) = \int_0^T i_2^2(t) dt, \text{ kde } T - \text{doba nesymetrického provozu,}$$

i_2 – zpětný proud v poměrných jednotkách,

$$\text{tedy } i_2(t) = \frac{I_2(t)}{I_n}, \text{ kde } I_2(t) - \text{skutečná hodnota zpětné složky } I,$$

I_n – jmenovitý proud generátoru.

Jelikož celková tepelná energie $K(T)$ je funkcí času, výrobci stanovují pro jednotlivé generátory hodnotu K_{max} , pro kterou je nebezpečné stroj provozovat. Hodnoty K_{max} se dosáhne tím dříve, čím větší bude zpětný proud $i_2(t)$. Bezpečný chod generátoru je definován pro K_{max} definované následujícím vztahem:

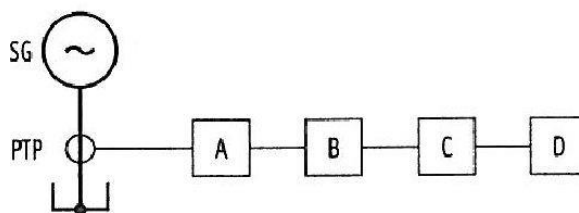
$$K_{max} \geq \int_0^T i_2^2(t) dt$$

Reálné velikosti K_{max} např. pro generátory ŠKODA jsou v následující tabulce:

Tab. 1.3 – převzato z [2].

Typový výkon P_n (MW)	50	100	200	500
K_{max} (s)	14	10	8	5

Pro chránění nesymetrického zatížení generátoru se používá např. ochrana pracující na principu vyhodnocení velikosti zpětné složky statorového proudu (i_2). Ochrana také zároveň měří dobu trvání nesymetrie. Taková ochrana se označuje ANSI 46. Na Obr. 1.11 je vidět schématická funkce ochrany.

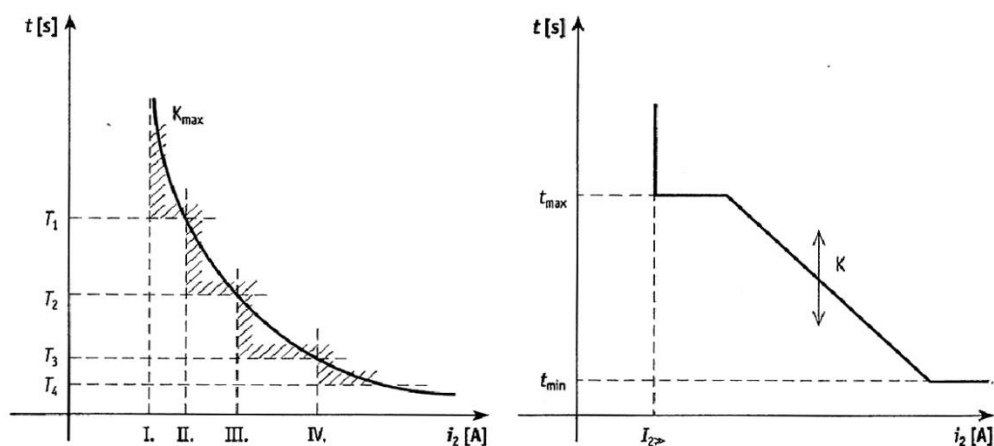


Obr. 1.11 - Schématické zapojení ochrany proti nesymetrii, převzato z [2].

Jednotlivé členy obsahují:

- A. – filtr zpětné složky proudu
- B. – filtr proudu 50 Hz
- C. – proudová měřicí část
- D. – časové měřicí relé

Měřicí proudové a časové články ochrany se dají nastavit dle potřeby. Nastavením parametrů ochranné funkce se dá velmi dobře přizpůsobit konkrétnímu typu generátoru. Vhodným nastavením ochrany lze získat charakteristiku na Obr. 1.12. Je zde příklad pro klasickou a novější digitální ochranu.



Obr. 1.12 - Vypínací charakteristiky ochrany proti nesymetrickému zatížení – a) klasická, b) digitální. Převzato z [2].

Tato ochrana proti nesymetrické zátěži je v jisté míře i zálohovou ochranou pro ostatní použité ochrany stroje. Ochrana je totiž schopna rozpoznat i všechny druhy zkratů, jednopólové a dvoupólové zkraty nebo záměnu připojených PTP.

1.3.8 Přepět'ová ochrana a podpět'ová ochrana

Přepět'ová neboli nadpět'ová ochrana složí k chránění generátoru před zvýšeným napětím a zároveň tedy chrání izolaci stroje před jejím poškozením. Při normálním stavu je napětí na generátoru drženo v povoleném intervalu pomocí regulátoru napětí a jeho omezovačů. Může však dojít ke zvýšení napětí vlivem např. chybné obsluhy při ručním řízení budicí soustavy nebo nesprávnou funkcí automatického regulátoru napětí. Zvýšení napětí na svorkách generátoru může zavinit také rychlé odlehčení generátoru odpojením zátěže či odpojením generátoru od sítě. U hydrogenerátorů je časté přetočení generátoru (zvýšení otáček). Přepět'ová ochrana reaguje také v případě napět'ových špiček vznikajících při poruchách v ES. Velikost budicího proudu, který byl nastaven pro určitou velikost zatížení generátoru tak způsobí rychlý nárůst napětí na svorkách generátoru.

Prvořadým úkolem je ochránit statorové vinutí generátoru před poškozením vlivem vyššího napětí, než je dovolené. Turbogenerátory se chrání pomocí přepět'ové ochrany s jednostupňovou nezávislou časovou charakteristikou. Hydrogenerátory se chrání přepět'ovou ochranou s dvojestupňovou nezávislou časovou charakteristikou.

Pokud regulátor buzení generátoru není schopen udržet dovolené napětí, musí tato ochrana zapůsobit. Hodnotu velikosti napětí pro přepět'ovou ochranu obstarávají nezávislé PTN. Tím je myšleno, že jsou to jiné PTN, než které obstarávají měření napětí pro regulátor buzení. Ochrana je nastavena v případě dvou stupňů ($U>$, $U>>$) takto:

- 1. stupeň ($U>$) – nastaven na $110\% \div 115\% U_n$ s určitým časovým zpožděním,
- 2. stupeň ($U>>$) – nastaven na $130\% \div 150\% U_n$ s okamžitým působením nebo velmi malým zpožděním.

Podpět'ová ochrana generátoru se používá převážně v kombinaci s nadproudovou ochranou. A to tak, že podpět'ová ochrana slouží k blokování proudové ochrany z důvodu zvýšení její selektivity. Samotná podpět'ová ochrana se používá jen zřídka. Například v aplikacích s velkými asynchronními motory a generátory (např. přečerpávací elektrárny). Zde ochrana zamezuje nestabilnímu chování stroje vlivem sníženého napětí.

1.3.9 Nadfrekvenční a podfrekvenční ochrana

Synchronní generátor, jakožto stroj pracující synchronními otáčkami, je závislý na frekvenci sítě a je navrhován tak, že pracuje při trvalém provozu v režimu právě síťové frekvence. Z toho vyplývá, že velikost frekvence svorkového napětí je úměrná velikosti otáček stroje. Funkce frekvenční ochrany spočívá v detekování anomálních velikostí frekvence generátoru. Buď nadfrekvence nebo podfrekvence.

K těmto stavům může dojít následujícími způsoby [1],[4]:

Podfrekvence

- najíždění turbíny z malých otáček, při průchodu pásma tzv. kritických otáček – zde dochází k mechanickým rezoncím a zvýšeným vibracím
- zvýšenou spotřebou činného výkonu
- nesprávnou funkčností frekvenční nebo otáčkové regulace
- při práci generátoru v ostrovním provozu

Nadfrekvence

- může být způsobena snížením zátěže, např. v ostrovní síti
- poruchou frekvenční regulace

Následky obou těchto stavů jsou následující[1],[4]:

Podfrekvence

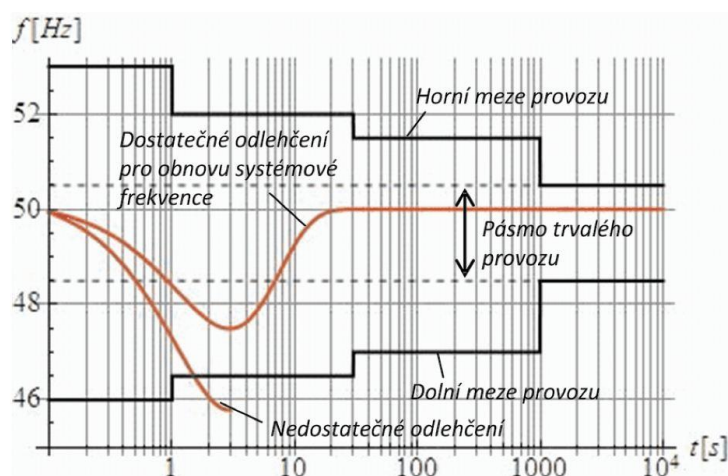
- zvýšené vibrace turbosoustrojí při kritických otáčkách → mechanická rezonance → snížení životnosti lopatek turbíny
- snížení výkonu zařízení vlastní spotřeby (čerpadla, mlýny atd.)
- zvýšení teploty vlivem zvýšení magnetizačních proudů
- přebuzení blokových transformátorů
- pokles výkonu chlazení

Nadfrekvence

- velké odstředivé síly → může způsobit poškození turbíny

Chráněný generátor má výrobcem stanoveny maximální doby, po které se může provozovat v určitých hodnotách podfrekvence a nadfrekvence, nalézajících se mimo hranice frekvencí stálého provozu (např. $48,5 \div 50,5$ Hz). Pokud se frekvence generátoru dostane mimo dovolené meze, musí zareagovat příslušný regulační element (dispečer). Ten by měl využít celý rozsah regulace výkonu k navrácení frekvence do dovolených mezí. Pokud

správně funguje systém odlehčování, frekvence se vrátí v únosně krátké době na původní provozní hodnotu. Příklad průběhu frekvenčního odlehčování můžete vidět na Obr. 1.13.



Obr. 1.13 - Příklad průběhu frekvenčního odlehčování (dostatečného, nedostatečného), převzato z [1].

Systém frekvenčního odlehčování neboli odhazování zátěže je nutný zohlednit při nastavování frekvenční ochrany. Při procesu odlehčování totiž může docházet k výraznějším poklesům kmitočtu. Ochrana je proto nastavena tak, aby na tyto krátkodobé přechodné jevy nereagovala a nezpůsobila tak nepřijatelné stavy z hlediska provozu stroje. Nastavení je provedeno odstupňováním s časovou prodlevou pro jednotlivé stupně. Příklad nastavení frekvenční ochrany můžete vidět v následující tabulce:

Tab. 1.4 - Příklad nastavení frekvenční ochrany, převzato z [20].

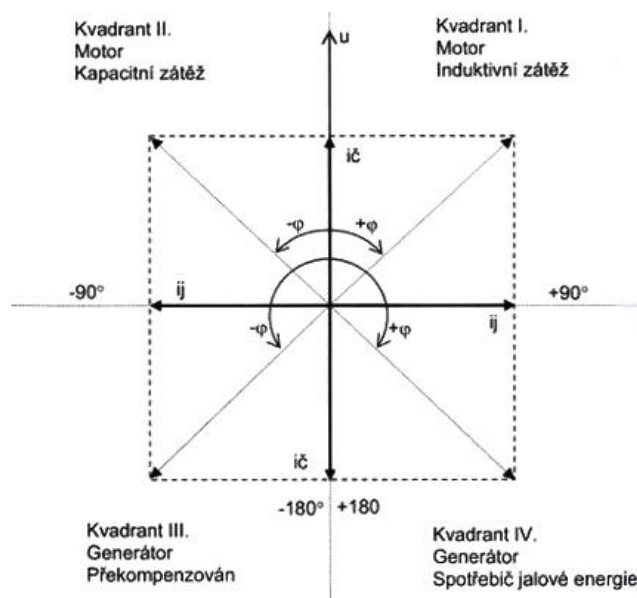
stupeň	nastavená hodnota			opatření
	při $f_N = 50$ Hz	při $f_N = 60$ Hz	zpoždění	
f_1	48,0	58,0	1 s	odpojení od sítě
f_2	47,0	57,0	6 s	odstavení
f_3	49,5	59,5	20 s	výstraha
f_4	52	62	10 s	výstraha nebo vypnutí

1.3.10 Zpětná wattová ochrana

Dalším nenormálním stavem v provozování generátoru může být zpětný tok výkonu. Tento stav může nastat tak, že turbína ztratí svůj hnací výkon a generátor je tedy nucen zaujmout postoj hnacího zařízení. Stává se z něj tedy přechodně synchronní motor, který odebírá ze sítě činný výkon, potřebný pro dodání energie turbíně. Tento stav je však velmi nepříjemný, jelikož by mohlo dojít k poškození dané turbíny. Např. u vodní elektrárny při náhlém uzavření vtoku se může stát, že zůstane voda v turbíně. Zvýšené tlakové podmínky mohou následně způsobit kavitaci lopatek. Tento stav musí být tedy v krátkém čase vypnut. K tomu se používá zpětná (nebo také směrová) wattová ochrana. Měří směr toku činného výkonu. Pokud dojde k tomu, že generátorem začne téci výkon opačným směrem (ztráty soustrojí jsou hrazeny elektrickým výkonem ze sítě), ochrana vyhodnotí jeho velikost a podle nastavení zapůsobí a generátor se odpojí. Takto se provádí provozní odstavení generátoru. Rozhodujícím parametrem pro vybavení ochrany je poměrná hodnota zpětného výkonu – poměr P_{rev} k jmenovitému výkonu generátoru S_n . Tato poměrná hodnota je různá podle toho, v jaké aplikaci dochází ke zpětnému toku činné energie. Obecné dělení by mohlo být na vodní, parní nebo plynové turbíny nebo také na diesel-generátory.

1.4 Chránění asynchronních generátorů

Asynchronní generátory (dále také AG) jsou často využívány v malých vodních dílech. Jsou voleny spíše pro provoz drobných MVE, mini-elektráren a mikro-zdrojů. Tzn. výkony řádově desítky až max. několik stovek kW. Asynchronní generátory se na MVE používají především díky jejich nízké pořizovací ceně, malým nákladům na spotřebu, dobré dostupnosti a jednoduchosti. Výhodou oproti synchronním alternátorům je také to, že pro připojení k síti nevyužívají fázovač. Nevýhody AG především z pohledu energetické soustavy spočívají např. v neschopnosti samostatného pracování na síti, spotřeba jalové energie a z toho vyplývající nutnost kompenzace. Zejména pak ovlivňují právě kompenzační baterie provozní podmínky v síti (vliv na HDO), nepříznivé chování při přechodných stavech v systému atd. Asynchronní generátory jsou oproti synchronním generátorům typově řešeny jako stroje s menšími výkony, tudíž systém chránění generátoru je podstatně jednodušší.



Obr. 1.14 - Provozní fázorový diagram asynchronního stroje, převzato z [3].

V normálním provozním stavu pracuje AG v generátorickém režimu; dodává činný výkon P a spotřebovává jalovou induktivní složku výkonu Q_{ind} – tomu odpovídá kvadrant IV. fázorového diagramu (viz Obr. 1.14). Pokud dojde k výpadku poháněcího stroje, AG přechází do motorického chodu a v tuto chvíli musí vybavit zpětná wattová ochrana. Z hlediska kompenzování AG je důležité, aby nedocházelo k překompensování stroje (kvadrant III.). V takovém případě totiž může dojít k rezonančním jevům doprovázených přepětím a možným proudovým přetížením připojených zařízení.

Volba ochrany pro asynchronní generátory je ve vybraných případech podobná systému chránění synchronních generátorů, některé ochrany se zde nepoužívají z důvodu malého

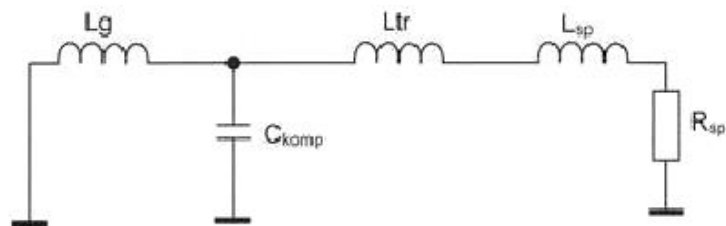
výkonu AG a zbytečně velkých nákladů na tyto ochrany, které by pozbývaly větší smysl. Požadavky na ochrany pro určité výkonové úrovně hydrogenerátorů definuje norma ČSN 33 3051.

AG se zdánlivým výkonem $S < 2,5$ MVA se dle normy ČSN 33 3051 vybavují ochranami:

- Nadproudová zkratová časově nezávislá
 - ochrana může být s odblokováním při podpětí
 - pro $P < 500$ kW lze použít jistič
 - Přetížení statoru
 - Nadpět'ová (přepět'ová)
 - frekvenčně nezávislá
 - u vn alternátorů dvoustupňová
 - Podpět'ová
 - Zpětná wattová
 - použita pouze u zařízení bez trvalé obsluhy
 - pro výkony $S > 30$ kVA
 - Nadproudová kompenzačních kondenzátorů
- Nejsou nutné, ale doporučují se:
- NADFREKVENČNÍ
 - NESOUMĚRNÉ ZATÍŽENÍ
 - KONTROLA ROZTOČENÍ – použito u PVE s asynchronním rozběhem soustrojí

Prakticky všechny uvedené ochrany používané také pro AG jsem podrobně rozepsal a vysvětlil v kapitole 1.3.

Specifickou ochranou pro AG je **nadproudová ochrana kompenzačních kondenzátorů**. Tato ochrana má význam při rezonančních jevech jak už jsem zmínil výše. Důsledkem je odsávání vyšších harmonických kondenzátorem. Tím je kondenzátor proudově více zatěžován a je potřeba kondenzátor odpojit. Pokud se režim stroje dostane do kvadrantu III. – překompenzování (viz Obr. 1.14), může dojít k zmíněným rezonančním jevům.



Obr. 1.15 - Náhradní schéma (AS + TR + S), převzato z [3].

L_g – Indukčnost statoru AS

C_{komp} – Kapacita kompenzačního kondenzátoru

L_{tr} – Indukčnost transformátoru

L_{sp} – Indukčnost připojené zátěže

R_{sp} – Činný odpor připojené zátěže

Rezonanční frekvence:

Řád vyšší harmonické:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \text{ [Hz]}$$

$$n = \frac{f_r}{f_1} \text{ [-]}$$

kde $f_1 = 50 \text{ Hz}$ – frekvence základní h.

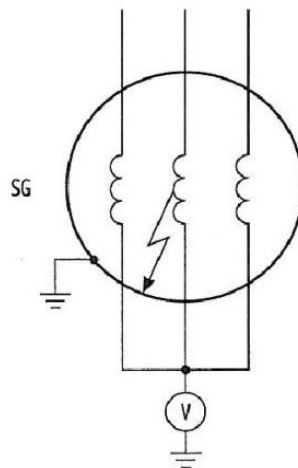
Podle zdroje [3], příkladná rezonance může nastávat mezi nezatíženým transformátorem a kompenzátorovými bateriemi. Z Obr. 1.15 vyplývá, že velikost rezonanční frekvence f_r ovlivňují tyto aspekty:

- kompenzační výkon kompenzátoru,
- zkratová impedance transformátoru,
- zkratová impedance soustavy,
- jalový výkon generátoru odebíraný z kompenzátoru při provozu (dle $\cos \varphi_{AG}$),
- činná zátěž systému způsobující tlumení v rezonančním obvodu.

Proudovému přetěžování kompenzačních kondenzátorů se tedy musí zabránit; dlouhotrvající nadproudy by mohly poškodit nebo zničit kondenzátory. Z tohoto vyplývá, že je nutno volit správně nejen ochrany generátoru, ale s tím i související chránění kompenzace nadproudovou ochranou, potlačením vyšších harmonických atd. Toto se v praxi provádí kompenzačním regulátorem, blokovacími filtry, hradicími členy atd., dále v kapitole 5 Kompenzace účinníku a vliv MVE na provoz DS.

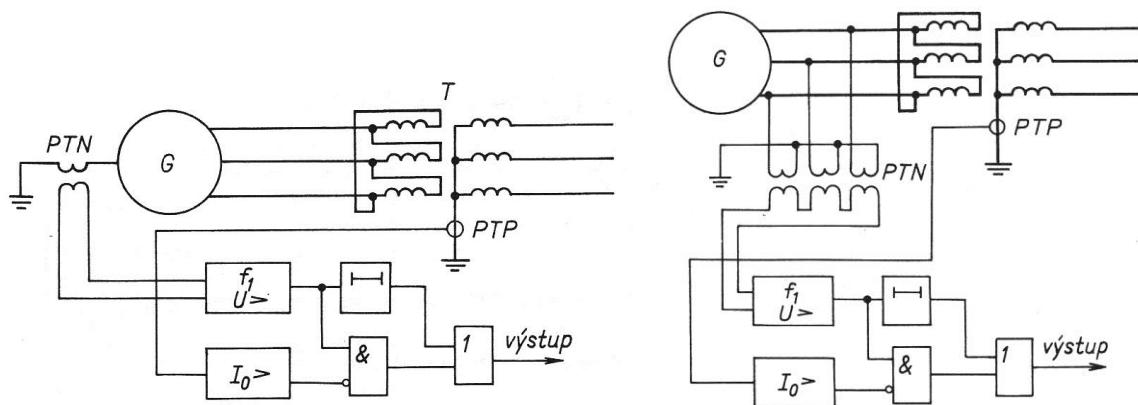
2 Chránění generátorů před nejčastějšími poruchami a jejich zlepšení

Jak jsem již v kapitole 1.3.4. zmínil, při provozu generátoru může nastat situace, kdy vznikne 1f či 2f mezifázový zkrat. Ten má za následek v některých případech to, že se porucha může rozšířit v jednofázové zemní spojení. V případě, že je zemní spojení včas detekováno, není tato porucha tak nebezpečná jako zkrat. Je tedy nepřijatelný dlouhotrvající průchod proudu vzniklým místem ZS. Pokud nastane zemní spojení, lze ho detekovat poměrně jednoduchým způsobem. Princip jsem popsal ve výše zmíněné kapitole. Pro vypracování následující problematiky jsem zdrojů [1], [2]. Důležité je v tomto případě to, že poruchové napětí, které se promítá do nesymetrie v uzlu, je závislé na místě vzniku zemního spojení. Při ZS na svorkách generátoru dosahuje poruchové napětí fázové hodnoty. Směrem k uzlu generátoru se toto napětí zmenšuje úměrně se vzdáleností. Pokud vznikne ZS v blízkosti uzlu, blíží se velikost poruchového napětí nule.



Obr. 2.1 - Zemní spojení statoru generátoru, převzato z [2].

V případě provozování generátoru do bloku s transformátorem se k indikaci zemního spojení používají frekvenčně závislé napěťové ochrany. Měří se napětí mezi uzlem generátoru a zemí. Nejvhodnější je taková ochrana, která je citlivá pouze na 1. harmonickou a pro vyšší harmonické (speciálně 3. násobky) je necitlivá. Takovou ochranou je právě napěťová závislá ochrana. Způsob připojení ochrany lze realizovat dvěma způsoby. První možností je, že se měří nulová složka napětí pomocí PTN v uzlu generátoru proti zemi (viz Obr. 2.2a). Druhou možností je připojení PTN trojfázově na trojúhelník na svorkách generátoru (viz Obr. 2.2b).



Obr. 2.2 - Zemní ochrana na základní harmonickou statorového vinutí generátoru pracujícího do bloku s transformátorem – a) PTN v uzlu stroje, b) PTN na svorkách stroje, převzato z [5].

V tomto případě a s pomocí ochrany na základní harmonickou lze pouze chránit $\pm 90\%$ statorového vinutí směrem od svorek generátoru. Větší citlivosti však dosáhnou nelze, jelikož velikost napětí v uzlu je při ZS tak nízká, že vlivem nesouměrnosti PTN a generátoru nelze tuto poruchu spolehlivě detekovat.

Aby bylo možné chránit spolehlivě 100% statorového vinutí, používají se dnes různé způsoby detekce zemního spojení podle jednotlivých výrobců ochran. Zpravidla se jedná o doplnění ochrany přidavným členem, který svou funkčností zajistí kompletní chránění statorového vinutí. Tato ochrana se nazývá 100% zemní statorová ochrana.

Jedním z takových způsobů zlepšení ochrany je doplnění o přidavný člen, který je schopen měřit nulovou složku napětí 3. harmonické. Princip je založen na porovnávání velikosti nulové složky napětí 3. harmonické v uzlu a na svorkách stroje. Pokud dojde k ZS v blízkosti uzlu, tato ochrana jev rozpozná a zapůsobí. Díky tomuto spojení dvou ochran je celkové chránění statorového vinutí 100%.

Jiný způsob zlepšení ochrany může být injektování napětí do uzlu generátoru o sníženém kmitočtu (např. 15 Hz). Následně ochrana vyhodnocuje velikosti proudů, odpovídajícím dané frekvenci. Tento princip ochrany využívá toho, že při zemní poruše dochází k poklesu kapacity části vinutí, přičemž se mění také impedance.

3 MVE Olešná

Malé vodní dílo Olešná leží na řece Berounce v lokalitě Olešná E31 33 824 Němcovice. Je rozděleno do dvou výroben (Olešná I, II a Olešná U Černých), jejichž výkon je vyveden do společného distribučního transformátoru. Vyrobená elektrická energie je dodávána do distribuční sítě ČEZ Distribuce pomocí transformátoru 400 kVA přes společný nn rozvaděč DTS Olešná „Mlýn“ č. RO_0377.¹

Tuto elektrárnu jsem navštívil, abych se na vlastní oči přesvědčil, jak vypadá systém chránění generátorů, chránění distribučního transformátoru, ale také jakým způsobem je zde provedena kompenzace účiníku. Provedl jsem měření parametrů dodávané elektrické energie při různých provozních a poruchových stavech, jako je spouštění stroje, výpadek sítě a znovuoobnovení napětí a kontrola kvality el. energie.

3.1 MVE Olešná I, II

Tato výrobní sestáva z dvou soustrojí složených ze Semi-Kaplan turbín a dvou 3f asynchronních generátorů², jejichž současně využívaný výkon (1x50 kW a 1x55 kW) je vyveden do podružných rozvaděčů (ER) ER1 a ER2. Zde jsou umístěny čtyřkvadrantové elektroměry pro obchodní měření a hlavní jističe HJ1 a HJ2 - typ OEZ Letohrad 125 A (B).³ Na zadní straně rozvaděče jsou umístěny MTP pro obchodní měření 125/5 A, 10 VA, $t_p = 0,5S$. Obchodní měření je provedeno pro každý generátor zvlášť. Na výstupu do trafostanice (vyvedení výkonu kabelem AYKY 3x240/120 mm²) je společný jistič OEZ Letohrad⁴ 3x250 A. V přípojkové skříni⁵ v místě trafostanice, na hranici vlastnictví, se nachází říditelný jistič OEZ 3x630 A nastavený na 3x400 A. Poté je v přípojkové skříni výkon vyveden na společnou přípojnicí s elektrárnou U Černých.

Parametry strojů Olešná I, II

<i>Turbína</i>	<i>Semi-Kaplan</i>	<i>2x OK 860</i>
<i>Generátor</i>	<i>Asynchronní 3f</i>	<i>Poland 3-PH GJEM 98</i>

¹ Distribuční transformátor 400 kVA a společný nn rozvaděč č. RO_0377, viz Příloha A.

² Soustrojí asynchronních generátorů Olešná I, II., viz Příloha D.

³ Rozvaděč ER, viz Příloha B.

⁴ Tamtéž.

⁵ Viz Příloha C.

Jmenovitý výkon	55	kW
Jmenovitý proud při $\cos \varphi = 0,77$	80	A
Rozběhový proud	$79 \times 3 = 240$	A
Napětí	400/3x230	V
Jmenovité otáčky	760	ot./min.
Stupeň krytí	IP 55	

3.2 MVE Olešná U Černých

Tato výrobní sestava sestává z dvou soustrojí složených ze Semi-Kaplan turbín a dvou 3f asynchronních generátorů, jejichž výkon (2x130 kW) je vyveden do společného rozvaděče ER, umístěného, stejně jako v předchozím případě, ve zděném elektroměrovém pilíři s oceloplechovým rozvaděčem. Zde je použito obchodní měření pomocí proudových transformátorů. Obchodní měření je zde společné pro oba generátory (2x130 kW). Výkon do trafostanice je vyveden pomocí kabelu AYKY 3x240/120 mm². V přípojkové skříni v místě trafostanice, na hranici vlastnictví, se nachází říditelný jistič OEZ 3x630 A nastavený na 3x400 A. Poté je v přípojkové skříni výkon vyveden na společnou přípojnicí s elektrárnou Olešná I, II.

Parametry strojů Olešná U Černých

Turbína	Semi-Kaplan	2x OK 1200
Generátor	2x Asynchronní 3f	Siemens 1LG4318-8AB90-Z 315L
Jmenovitý výkon	130	kW
Jmenovitý proud při $\cos \varphi = 0,77$	325	A
Rozběhový proud	$190 \times 3 = 570$	A
Napětí	400/3x230	V
Jmenovité otáčky	758	ot./min.
Stupeň krytí	IP 55	

4 Systém chránění transformátorů ve vztahu k napájení z MVE Olešná

4.1 Ochrany transformátorů dle normy ČSN 33 3051

Chránění transformátorů lze dělit podle několika hledisek. Odlišné je zpravidla chránění blokových transformátorů a transformátorů vlastní spotřeby (transformátor v odbočce alternátoru). Dále se odlišují ochrany podle druhu vzniklé poruchy. Porucha může být průchozí nebo vnitřní. Průchozí poruchy nastávají převážně působením připojených zařízení. Svým delším působením způsobují nárůst teploty zařízení vlivem průchodu zvýšeného proudu. Dle typu se dělí průchozí poruchy na přetížení resp. vnější zkrat na připojeném objektu. Tyto poruchy vybavuje nadproudová ochrana proti přetížení (tepelný obraz, závislá ochrana) resp. nezávislá nadproudová ochrana. Vnitřní poruchy jsou obvykle nenadálého charakteru nebo se projevují pozvolna. Náhlé poruchy, jako jsou zkraty na svorkách, na vinutích, mezi vinutími, zemní poruchy atd., jsou vybavovány rozdílovými, srovnávacími, distančními ochranami a plynovým relé. Poruchy projevující se pozvolna (špatné galvanické styky, nedokonalá izolace plechů - oblouk v olejové nádobě transformátoru, poruchy chlazení nebo vyrovnávací proudy) dokáže detekovat v prvotní fázi pouze plynové relé⁶.

Způsob a systém chránění transformátorů v různých místech výroben a sítě popisuje norma ČSN EN 33 3051. Já zde s ohledem na zadání uvedu pouze ochrany pro blokové transformátory a transformátory vlastní spotřeby (dále jen transformátory VS). Použité ochrany pro blokové transformátory do výkonu 5 MVA se víceméně neliší. Musí zde být použita nadproudová zkratová ochrana⁷ na primární straně, nadproudová nebo impedanční ochrana alternátoru. Rozdíl je zde pouze v případě, že při výkonu nad 1,7 MVA je nutná rozdílová ochrana, zatímco pro nižší výkony se pouze doporučuje, tedy nemusí být; popřípadě se dle situace použije plynová ochrana (plynové relé). V případě chránění transformátoru VS jsou použity ochrany obdobným způsobem. Navíc se použije nadproudová ochrana při přetížení prostřednictvím nadproudového časově závislého či nezávislého relé. Toto je přesněji popsáno pro vybrané výkonové hladiny transformátorů ve výše zmíněné normě⁸.

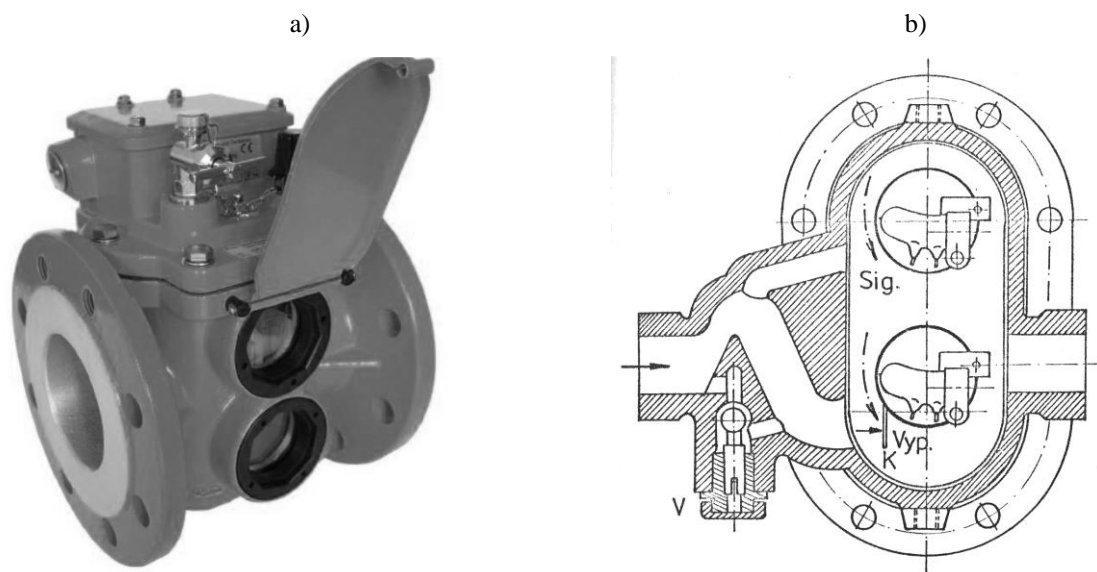
⁶ *Buchholzovo relé* - je plynové relé, které slouží jako ochrana transformátoru. Umisťuje se mezi dilatační nádobu a nádobu transformátoru. Reaguje na ztrátu oleje, náhlé zatížení či zkrat uvnitř nádoby. Více v kapitole 4.2 Buchholzovo relé.

⁷ Podle normy [12] se ochrana použije pouze v případě, je-li transformátor používán pro najíždění vl. spotřeby ze soustavy vvn (zvn).

⁸ ČSN 33 3051. *Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení*. 1992.; tabulka 7, 8 - str. 14, 15.

4.2 Buchholzovo relé

Transformátory se vyzbrojují několika podobnými ochranami jako např. alternátory. Speciálním případem pro ochranu, která má využití pouze pro transformátory, je plynové relé (jinak označované jako Buchholzovo relé). Jak udávají v literatuře [7], [8], [9] - Buchholzovo relé se používá výhradně pro transformátory s olejovým chlazením. Je umístěováno v místě spojovacího potrubí mezi konzervátorem oleje a nádobou transformátoru.



Obr. 4.1 - Buchholzovo relé - a) moderní konstrukce, převzato z SENSE Engineering Co.Ltd.⁹ b) řez dřívějším typem relé BR1, převzato z [9].

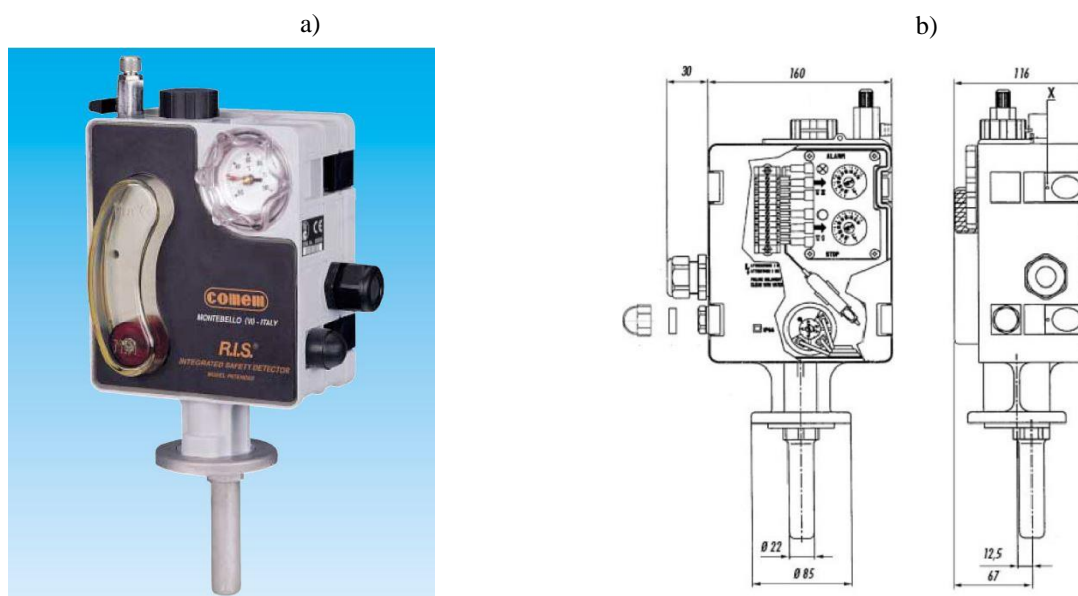
Podstatou ochrany je indikace množství plynu vzniklého nebo vniklého do olejové nádoby. Plyn může vzniknout v oleji více způsoby. Například při poruše izolace (nejčastěji vlivem zkratu). V takovém případě vyvolá zvýšená teplota oleje v místě poruchy vznik plynových bublinek, které stoupají potrubím až do konzervátoru. Díky tomuto jevu klesá hladina oleje i uvnitř relé a nejprve horní plovák signalizuje poruchu obsluze. Pokud porucha není přechodného charakteru nebo se neodstraní, klesne hladina v relé ještě níže. Na to zareaguje druhý (spodní) plovák, jehož zapůsobení znamená odstavení celého transformátoru. Princip Buchholzovo relé je vidět také z obr. v Příloze E. Lze provést nastavení signalizace vypínání v závislosti na velikosti a provozu transformátoru. Plynem v nádobě transformátoru může být také vzduch pocházející z chladicí soustavy nuceného chlazení. Také může vniknout vzduch následkem úniku oleje z nádoby transformátoru.

⁹ SENSE Engineering Co.Ltd. [online]. [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: <http://www.sense-eng.com>

Využití Buchholzova relé je s dobou rozdílné. Dříve se osazovala plynová relé na olejové transformátory už od výkonu 630 kVA; ve výjimečných či speciálních případech i na 400 kVA. Dnes je situace v praxi jiná. Buchholzovo relé se v současnosti nasazuje na transformátory o výkonech nad 1 MVA a to převážně na transformátory sloužící v průmyslových závodech atd.

4.3 Ochranné moduly RIS a DGPT II

S rostoucím vývojem hermetizovaných transformátorů¹⁰ se začaly objevovat i nové podoby ochran, podobné svými funkcemi plynovému relé. R.I.S. a DGPT II jsou integrovaná měřicí a jisticí zařízení, která vznikla z potřeby nahradit více druhů příslušenství transformátoru jedním sofistikovaným přístrojem. Zatímco plynové Buchholzovo relé kontroluje pouze hladinu a tlak oleje (teplota se musí měřit zvlášť pomocí ručkového teploměru), tyto nově používané ochrany jsou zároveň schopny detekovat teplotu a plyn.



Obr. 4.2 - Integrovaná ochrana R.I.S. - a) typická konstrukce, b) řez ochranou R.I.S. (detail viz Příloha F), převzato z [23].

Ochrana R.I.S. (viz Obr. 4.2) umožňuje hlídání nastavitelného tlaku oleje (100 až 500 mbar). Dále, stejně jako plynové relé, obsahuje viditelný ukazatel výkyvů hladiny oleje a také spínání a rozpínání při velkých výkyvech hladiny. Navíc je doplněna o viditelný ukazatel teploty, maximální dosažené teploty oleje a dvěma nastavitelnými termostaty v rozmezí 30 °C

¹⁰ Transformátor je hermetizovaný, jsou-li aktivní části transformátoru hermeticky uzavřené v nádobě; změna objemu oleje se vyrovnává pouze dilatujícími chladicími vlnami nádoby.

až 120 °C. Posledním ochranným členem je číslo vývinu plynů (max. 170 cm³, které spíná nebo rozpíná připojený obvod.

Stejným způsobem funguje i ochrana DGPT II. Tyto novější integrované ochrany se již neumísťují mezi nádobu transformátoru a konzervátor, ale do předem připravených otvorů ve víku transformátoru (viz Příloha G).

4.4 Ochrana suchých transformátorů

Suché transformátory mají také svůj způsob ochrany pro přehřátí, které může vzniknout z mnoha důvodů. K hlídání teploty uvnitř vinutí nebo jádra transformátoru se u současných suchých transformátorů používá např. přístroj pro hlídání teploty TS 01 (viz Obr. 4.3). Ten hlídá teplotu pomocí termistorů PTC umístěných ve vinutí nebo v jádře transformátoru. Ochrana je vybavena dvěma stupni, ke kterým jsou přiřazena 2 nastavitelná relé na požadovanou hlídanou teplotu.



Obr. 4.3 - Přístroj pro hlídání teploty TS01, převzato z [24].

4.5 Chránění transformátoru 400 kVA na MVE Olešná

4.5.1 Distribuční transformátor

Všechny výše jmenované generátory (viz kapitola 3 MVE Olešná) mají teoretický součet jmenovitého výrobního výkonu v plném provozu $P = 365 \text{ kW}$ při $\cos \varphi = 0,77$. Tato hodnota výkonu je však pouze výpočtová, jelikož je použita individuální kompenzace u jednotlivých točivých strojů. Proto tedy postačuje transformační výkon 400 kVA pro přenesení výkonu do distribuční sítě.

Parametry použitého transformátoru vn/nn

Tab. 4.1

<i>Typ transformátoru</i>	<i>Olejový - hermetizovaný</i>
<i>Jmenovitý výkon S_r</i>	<i>400 kVA</i>
<i>Jmenovité napětí U_r</i>	<i>22 / 0,4 kV</i>
<i>Zapojení</i>	<i>Dyn1</i>
<i>Napětí nakrátko u_k</i>	<i>4 %</i>
<i>Ztráty nakrátko P_0</i>	<i>610 W</i>
<i>Ztráty nakrátko P_k</i>	<i>4600 W</i>
<i>Chlazení</i>	<i>ONAN</i>
<i>Hmotnost</i>	<i>1260 kg</i>

4.5.2 Použité ochrany

Na výše uvedený transformátor jsou použity ochrany vyžadované normou ČSN EN 33 3051. Ta specifikuje pro transformátory vn/nn pro výkon 400 kVA pouze ochranu proti nadproudu na primární straně transformátoru. Pokud je transformátor vybaven plynovým relé, musí být tato ochrana také použita. Vzhledem k tomu, že se jedná o olejový transformátor s výkonem 400 kVA a pro tyto výkony se plynové relé v dnešní době standardně neosazuje, není zde tato ochrana použita. Jak jsem již výše uvedl, je doporučena rozdílová ochrana. V případě vodního díla MVE Olešná, s ohledem na relativně malý výrobní výkon a velikost transformátoru, by byla podle mého názoru investice do rozdílové ochrany zbytečně nákladná. Také proto zde zřejmě rozdílová ochrana není použita.

Tab. 4.2 - Konkrétní ochrany použité na transformátoru 400 kVA

<i>Druh ochrany</i>	
<i>Nadproudová zkratová</i>	<i>Jistič typ O EZ Letohrad 3x630 A (na straně nn)</i>
<i>Plynová</i>	<i>--- nepoužita ---</i>
<i>Rozdílová</i>	<i>--- nepoužita---</i>

5 Kompenzace účinníku a vliv MVE na provoz DS

5.1 Účinník

Účinník, popř. $\cos \varphi$ je důležitým ukazatelem kvality elektrické energie. Z hlediska přenášení el. energie je účinník velmi důležitý a je třeba věnovat jeho regulaci, popř. kompenzaci značnou pozornost. Definice účinníku vypadá obecně takto:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} (-)$$

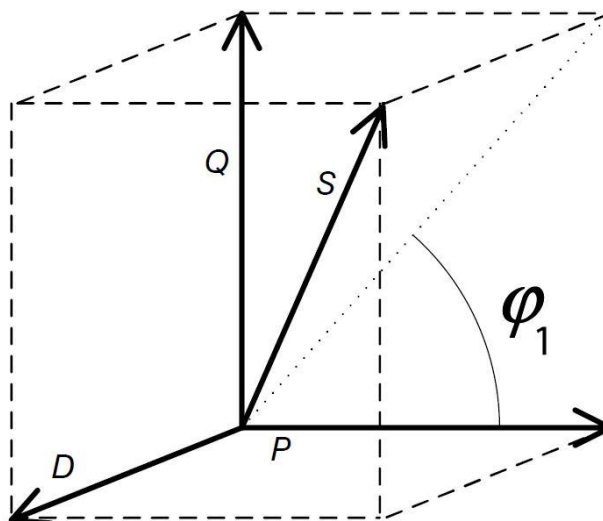
kde P_1 – odebíraný činný výkon základní harmonické (W)

S_1 – odebíraný zdánlivý výkon základní harmonické (VA).

Předchozí stav platí ovšem právě a pouze pro el. energii charakterizovanou U, I^{11} o frekvenci 50 Hz. Takovéto průběhy jsou charakterizovány sinusovkami těchto veličin. U deformovaných¹² průběhů není tvar křivky sinusový, ale je zdeformován vlivem vyšších harmonických (dále také VH). Při zařazení základních i vyšších harmonických výkonů, dostaneme ještě obecnější a přesnější definici účinníku – skutečný účinník – λ .

$$\lambda = PF = \frac{P}{S} \neq \frac{P_1}{S_1} (-)$$

kde $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$ – odebíraný zdánlivý výkon se zahrnutím deformačního (distorzního) výkonu. [10]



Obr. 4.1 – Prostorová interpretace výkonů při působení VH (vliv D na velikosti celkového S); $\varphi_1 \dots$ fázový posun základní harmonické, převzato z [21].

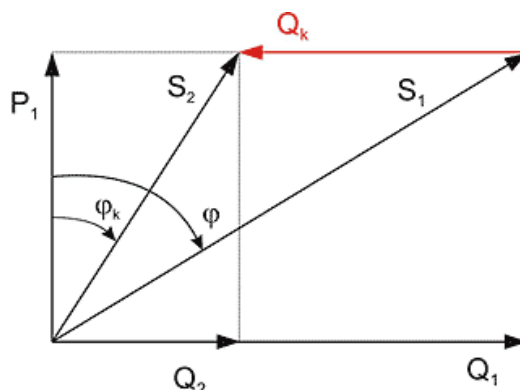
¹¹ U (V) – elektrické napětí, I (A) – elektrický proud

¹² Deformované (nesinusové) průběhy vznikají díky vyšším harmonickým složkám

5.2 Účel kompenzace účinníku

V distribuční síti je snaha udržovat $\cos \varphi \rightarrow 1$. Z pravidla platí, že čím větší je přenášený jalový výkon vedením, tím jsou ztráty větší. Z tohoto vyplývá, že je třeba kompenzovat jalový výkon v případech, kdy se více či méně liší od hodnoty 1. Kompenzací jalového výkonu se docílí stavu, kdy je účinník přibližně roven hodnotě 1 (vykompenzovaný stav)¹³. Základní účely kompenzace jsou následující:

- snížení ztrát na vedení
- zmenšení úbytku napětí
- zlepšení zkratových poměrů v síti
- snížení nákladů na energetická zařízení



Obr. 5.2 - Účinek kompenzace na požadovanou hodnotu účinníku.

5.3 Důležité aspekty a vliv kompenzace jalového výkonu na provoz DS

Následující kapitola se zabývá problematikou, kterou jsem čerpal ze zdrojů [10], [6] a [11]. Jak už jsem zmínil výše, převládá snaha snížit ztráty přenášeného výkonu. Přestože existují i preventivní kroky k zvětšení účinníku i bez kompenzace¹⁴, z převážné části se dá vyřešit právě kompenzací jalového výkonu pomocí kompenzátorů. Existuje více druhů, přičemž nejčastějším a nejjednodušším je kompenzační kondenzátor používaný převážně k individuální, skupinové stupňovité kompenzaci. Může být však použit i rotační kompenzátor v podobě nezatíženého přebuzeného synchronního motoru nebo modernější způsob v podobě aktivních filtrů.

¹³ Nejvíce ekonomický stav sítě pro provoz energetického zařízení z hlediska sítě (minimální ΔU – úbytek napětí, malé ztráty výkonu), což znamená optimální využití elektrizační soustavy.

¹⁴ Zvětšení účinníku bez kompenzace se dá dosáhnout např. použitím SM místo AM (nad 100 kW), efektivním dimenzováním motorů, omezením chodu motorů a transformátorů naprázdno (nízký provozní účinník), připojením málo zatížených motorů na nižší napětí, atd. (viz [6]).

Vysoký podíl kabelů a kompenzačních kondenzátorů, které jsou použity k místní kompenzaci zařízení, může způsobit stav, kdy bude celkový účinník v distribuční síti PDS nebo v její části ležet v kapacitní oblasti. V takovém případě je naopak potřeba zabránit dalšímu růstu kapacitního výkonu směrem od kompenzačního zařízení. PDS mohou proto v jednotlivých případech¹⁵ upustit od povinné kompenzace jalového výkonu; a tedy dostávají výjimku. Důležité je také posoudit kompenzaci z pohledu druhu kompenzace (individuální, skupinová nebo centrální) s ohledem na PDS.

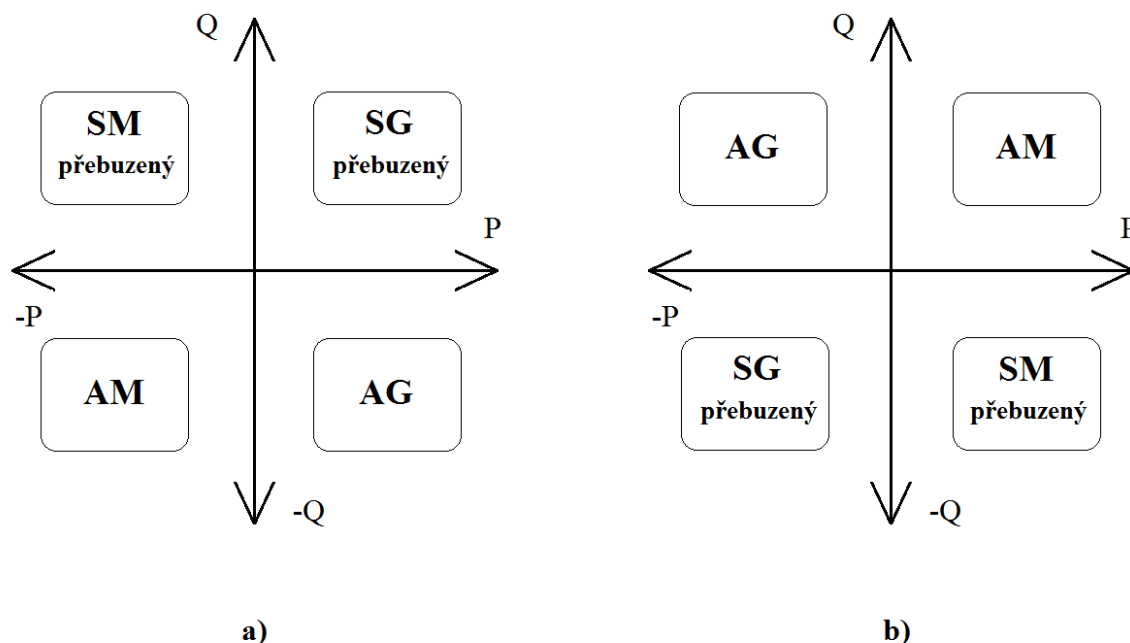
Tab. 5.1 – Zobrazení pásem účinníku a orientace dodávaných a odebíraných výkonů, převzato z [11].

<i>Příklad</i>	<i>Zdrojová orientace</i>	<i>Spotřebičová orientace</i>
<i>Synchronní generátor (přebuzený)</i>	$P > 0$ a $Q > 0$	$P < 0$ a $Q < 0$
	$0^\circ < \varphi < 90^\circ$	$180^\circ < \varphi < 270^\circ$
<i>Asynchronní generátor</i>	$P > 0$ a $Q < 0$	$P < 0$ a $Q > 0$
	$270^\circ < \varphi < 360^\circ$	$90^\circ < \varphi < 180^\circ$
<i>Synchronní motor (přebuzený)</i>	$P < 0$ a $Q > 0$	$P > 0$ a $Q < 0$
	$90^\circ < \varphi < 180^\circ$	$270^\circ < \varphi < 360^\circ$
<i>Asynchronní motor</i>	$P < 0$ a $Q < 0$	$P > 0$ a $Q > 0$
	$180^\circ < \varphi < 270^\circ$	$0^\circ < \varphi < 90^\circ$

Velký rozdíl v charakteru odebíraných a dodávaných výkonů strojů pracujících jako generátory, resp. motory, hraje právě typ stroje. Synchronní generátory jsou pro síť výhodnějšími, pracují paralelně se sítí šetrněji a nepotřebují ke kompenzaci účinníku žádné externí kompenzační zařízení. Oproti tomu asynchronní stroje jsou v tomto ohledu nevýhodné při větších výkonech, avšak pro MVE řádově kolem 100 kVA se finančně vyplácí jejich nasazování. Bilance dodávaných a odebíraných výkonů, resp. jednoznačné přiřazení pásem účinníku¹⁶ jsem znázornil v Tab. 4.1 a na Obr. 4.3. Z těchto dvou znázornění lze vyzorovat chování strojů, příčiny a nutnost kompenzace jalového výkonu.

¹⁵ Např. u malých asynchronních generátorů s výkonem řádově jednotky až desítky kW; v případě, že by odběr jalového výkonu v daném místě sítě nezpůsobil potíže s kvalitou elektrické energie.

¹⁶ Aby se přecházelo rozporům v klasifikaci účinníku, je podle [11] zvykem, resp. se doporučuje využívat k interpretaci spotřebičovou orientaci.



Obr. 5.3 – Orientace dodávaných a odebíraných výkonů: a) zdrojová -, b) spotřebičová orientace.

Jak už jsem se zmínil v kapitole 1.4 *Chránění asynchronních generátorů*, při použití kompenzačních kondenzátorů je potřeba brát v úvahu také skutečnost, že při vyšší frekvenci než 50 Hz dochází k paralelní rezonanci mezi rozptylovou reaktancí napájecího transformátoru a součtem všech síťových kapacit. Následkem toho může při slabém zatížení dojít ke zvýšení impedance sítě. Připojením kompenzačního kondenzátoru se tento rezonanční kmitočet posune k nižším frekvencím, což u některých vn sítí může vést ke zvýšení napětí harmonických v síti. K odstranění tohoto jevu se využívají např. blokovací indukčnosti, které se předřazují ke kondenzátoru. Vzhledem k tomu, že může dojít k odsátí signálu např. na frekvenci HDO, je potřebný souhlas s PDS. Případně se může dodatečně použít hradicí člen¹⁷. V kondenzátoru je nahromaděný náboj, který v něm po vypnutí obvodu zůstává a může způsobit vyšší dotykové napětí, než je přípustné podle [13]. Navíc může dojít při znovuzapnutí k destrukci kondenzátoru vlivem jeho předchozího nabitého stavu. U vyšších výkonů jsou z těchto důvodů nutné přídavné vybíjecí odpory nebo vhodně zapojené PTN.

¹⁷ Hradicí člen je paralelní kombinace tlumivky a kondenzátoru. Je naladěn právě na frekvenci, kterou vyžadujeme ochránit (např. frekvence HDO 216,67).

5.4 Regulace jalového výkonu

Způsob řízení jalového výkonu se liší podle konkrétního místa v distribuční soustavě a po konzultaci s výrobcem provozovaného zdroje ho určuje místní provozovatel distribuční soustavy. Podrobná pravidla určuje např. dokument PPDS [11], ze kterého jsem čerpal pro zpracování této kapitoly.

Zdroje pracující do sítě nn

Jak je dáno v PPDS, účinník zdroje pracujícího do sítě nn za normálních ustálených provozních podmínek při dovoleném rozsahu tolerancí jmenovitého napětí musí být podle [15] mezi 0,95 kapacitního a 0,95 induktivního charakteru s předpokladem, že činná složka výkonu je nad 20 % jmenovitého výkonu zdroje. Toto platí pro zdroje do 16 A/fázi včetně. Kompenzace účinníku se naopak nepožaduje u fotovoltaických elektráren do výkonu 4,6 kVA/fázi.

Zdroje pracující do sítí vn a 110 kV

U výroben o instalovaném výkonu nad $S = 100$ kVA musí být jalový výkon říditelný, přičemž jeho dohodnutý rozsah by měl být využitelný během několika minut a měl by být k dispozici libovolně často. Jalový výkon je řízen provozovatelem distribuční soustavy buď zadanou pevnou hodnotou nebo dálkově nastavitelnou žádanou hodnotou, pokud to vyžaduje aktuální stav sítě. Žádaná hodnota může mít dle [11] následující podoby:

- pevná hodnota zadaného účinníku $\cos \varphi$
- hodnota účinníku $\cos \varphi = f(P)$
- zadaná hodnota jalového výkonu
- zadaná hodnota napětí
- charakteristika $Q(U)$

V případě, že PDS zadá žádanou hodnotu v podobě charakteristiky, musí být podle [11] automaticky nastavena hodnota jalového výkonu:

- pro charakteristiku $\cos \varphi = f(P)$ v průběhu 10 s
- pro charakteristiku $Q(U)$ nastavitelně mezi 10 s a jednou minutou (udává PDS)

Volba žádaných hodnot volí PDS individuálně dle jednotlivých provozovaných výroben, dle výkonu, typu a technických možností výroby.

Požadavek na regulaci jalového výkonu může být dán dohodou, harmonogramem nebo tzv. on-line zadáváním. On-line zadávání je specifické tím, že je potřeba, aby došlo k docílení

nového pracovního bodu změny jalového výkonu nejdéle do jedné minuty od zadání požadované hodnoty. U významně fluktuujících zdrojů, ke kterým patří např. větrná elektrárna, musí být provedena regulace jalového výkonu automaticky a s dostatečnou rychlostí. Podstatný je však také způsob připínání a odpínání kompenzačních kondenzátorů. Připínání kondenzátorů se provádí vždy až po zapnutí generátoru a vypínají se současně s generátorem.

U ostatních zdrojů lze konstatovat ty samé podmínky pro regulaci jalového výkonu (viz výše – zdroje pracující do sítě nn).

Jinak je to ale u výrobců druhé kategorie¹⁸, kde podle [19] musí být při dodávce činného výkonu do DS a při dovoleném rozsahu tolerancí jmenovitého napětí účiník v předávacím bodě mezi 0,95 kapacitního a 0,95 induktivního charakteru za předpokladu, že činná složka výkonu je nad 20% jmenovitého proudu (transformátoru proudu) předávacího místa. Kvalitu účiníku v konkrétním předávacím místě výroby s DS určuje vždy PDS [11].

5.5 Vliv kompenzace účiníku na HDO

Signál hromadného dálkového ovládání a souvisejících zařízení HDO jsou ovlivňovány z velké části hlavně výrobny a zařízeními pro kompenzaci účiníku (dále jen KZ). Použitá frekvence HDO se může lišit podle místa v síti a dle PDS. Vysílací napěťová hladina signálu je zpravidla v rozmezí 1,6 % až 2,5 % U_n . Obvykle použité frekvence pro signál HDO se pohybují mezi hranicemi 183,3 a 283,3 Hz; z toho nejobvyklejší je frekvence 216,67 Hz.

Výrobny (např. MVE) a KZ napojené na přípojnici, do které je vysílán signál HDO, ovlivňují vysílač hromadného dálkového ovládání přidavným zatížením, plynoucí z vlastního zařízení výroby nebo vlivem zvýšeného zatížení sítě, které je připojeno k síti v důsledku výroby. Právě v těchto situacích je posuzován vliv konkrétních výroben na zatížení vysílačů HDO. Informace o zatížení vysílače hromadného dálkového ovládání dodává PDS. Připojení výroby bez opatření není dovoleno v případě, že je zatížení blízké maximální hodnotě.

¹⁸ Výrobce druhé kategorie je dle [15] takový výrobce, který není výrobcem první kategorie. Výrobcem první kategorie je výrobce, který elektřinu vyrobenou v jím provozované výrobně elektřiny dodává do přenosové nebo distribuční soustavy a jehož roční spotřeba elektřiny včetně případné spotřeby elektřiny jiného účastníka trhu s elektřinou v areálu výroby elektřiny dosahuje nejvýše 20% ročního množství elektřiny vyrobené ve výrobně elektřiny sníženého o technologickou vlastní spotřebu elektřiny, nebo výrobce, který poskytuje podpůrnou službu typu rychle startující záloha nebo dispečerská záloha, kategorizace výrobců se posuzuje pro každou výrobnu elektřiny zvlášť.

V opačném případě jsou hodnoty zatížení přípustné a jsou tedy podle [11] do 20 A u vysílače, který pracuje do sítě vn. (U vysílače pracujícího do sítě 110 kV je dovolená hodnota do 5 A.)

V případě připojování výroby resp. KZ k síti v místě jiném, než na přípojnicí (do přípojnice je vysílán signál HDO), je dovoleno snížení úrovně signálu maximálně o 5%; musí však být měřením prokázána minimální dovolená týdenní úroveň signálu HDO a to i při netradiční konfiguraci místní sítě. Minimální úroveň signálu HDO pro:

hladinu	nn	150 % U_f ,
	vn	190 % U_f ,
	(110 kV	200 % U_f), kde $U_f \sim 0,8 - 0,9 \% U_n$. ¹⁹

V předávacím bodě je třeba předcházet nedovoleným změnám úrovně signálu HDO. Tato situace se řeší již výše zmíněnými hradicími členy, které by měl odsouhlasit PDS. Výroby (MVE) s asynchronními a synchronními generátory jsou připojeny do sítě přes transformátor a způsobují pokles signálu HDO. Míra tohoto poklesu je dána reaktancemi generátoru a transformátoru, zkratovým výkonem sítě a kmitočtem HDO. V případě, že výroba svým kompenzačním zařízením ovlivňuje zařízení HDO nepřehlednutelnou měrou, je provozovatel výroby povinen podniknout kroky k eliminaci vlivu. Při uvedení výroby do provozu se provádí měření zpětného vlivu na síť s ohledem na signál HDO. Výsledky, které jsou změřeny a vyhodnoceny, předkládá provozovatel výroby do rukou PDS. V situaci, kdy výroby splňují požadavky na výkon v předávacím bodě a výkon celé síťové oblasti (viz Tab. 4.2), je možno takovou výrobu připojit bez posuzování vlivu na HDO.

Tab. 5.2 - Převzato z [11].

Napěťová úroveň	Celkový výkon výrobních zařízení		
		V přípojném bodu (kVA)	V síťové oblasti (kVA)
nn		5	10
	(FVE) ²⁰	(20)	(40)
vn		500	1000
110 kV		5 000	10 000

¹⁹ U_f je náběhové napětí přijímače, které obvykle bývá v rozmezí 0,8 - 0,9 % U_n , podrobnosti k této problematice jsou uvedeny v normě [18].

²⁰ V případě fotovoltaických elektráren, které jsou k síti připojeny přes střídače, jsou hodnoty výkonů podstatně zvýšené, jelikož obvykle příliš neovlivňují zařízení HDO.

U elektráren (výroben) s točivými zdroji (generátory - turbogenerátory, hydrogenerátory, kogenerační jednotky, větrné elektrárny...) nad 1 MW instalovaného výkonu, které jsou připojeny do sítě vn, je vyžadováno, aby byla výrobní vybavena hradičím členem [11].

5.6 Způsoby kompenzace účiníku na MVE

Na malé vodní elektrárně není příliš způsobů, jak se dá kompenzovat jalový výkon. Speciálně potom pro MVE malých výkonů, kde jsou použity asynchronní generátory. V případě synchronních generátorů lze kompenzovat účiník automaticky přibuzením stroje. Kompenzace v těchto elektrárnách se tedy příliš neřeší. V případě asynchronních generátorů je potřeba vyřešit kompenzaci jiným způsobem. Nejčastěji se kompenzace řeší pomocí statických kondenzátorů, umístěných v ovládací skříni rozvaděče. Tímto způsobem je provedena kompenzace také na MVE Olešná, kterou jsem navštívil a na které jsem měřil kompenzaci (viz kapitola 6 Měření kvality el. energie a ověření kompenzace MVE Olešná I.).



Obr. 5.1 - Kompenzační pasivní kondenzátory, převzato z katalogu výrobce²¹.

Existují i jiné způsoby kompenzace jalového výkonu. Například mohou být použity speciální kompenzační sekce nebo dokonce kompenzační filtry, které mají za úkol zároveň filtraci harmonických proudů či kontrolu vlivu na HDO. Kompenzaci je možno provést také rotačním kompenzátozem (přebuzeným synchronním strojem resp. motorem). Tato varianta je však velmi finančně náročná. Navíc stroj pro svoji funkčnost odebírá činný výkon a je též prostorově náročný. U MVE by bylo tedy využití rotačního kompenzátozu nevhodné.

²¹ ZEZ SILKO, s.r.o. *Katalog kompenzace jalové energie*. 2013, 40 s. Dostupné z: <http://www.zez-silko.cz/customZone/files/pfcnew.pdf>

6 Měření kvality el. energie a ověření kompenzace MVE Olešná I.

6.1 Měření

Abych ověřil skutečnou kvalitu elektrické energie na výstupu generátoru 55 kW MVE Olešná I., bylo potřeba, abych provedl měření přímo na elektrárně. Cílem bylo především získat velikost skutečného účinníku a jeho vyhodnocení s ohledem na požadavky pro paralelní spolupráci s provozovatelem distribuční soustavy. Zároveň jsem ověřoval působení frekvenčně - napěťové RUFm ochrany při výpadku sítě. Také jsem si dal za úkol zjistit proudové a napěťové poměry při rozběhu generátoru, především pak dovolené meze rozběhového proudu a poklesu napětí.

Měření jsem provedl v zadní části rozvaděče ER (viz Příloha H) pomocí měřicího přístroje kvality elektrické energie zapůjčeného od doc. Martínka z katedry elektroenergetiky a ekologie: ELCOM Network Analyzer model ENA330.11.9 (Obr. 6.1)

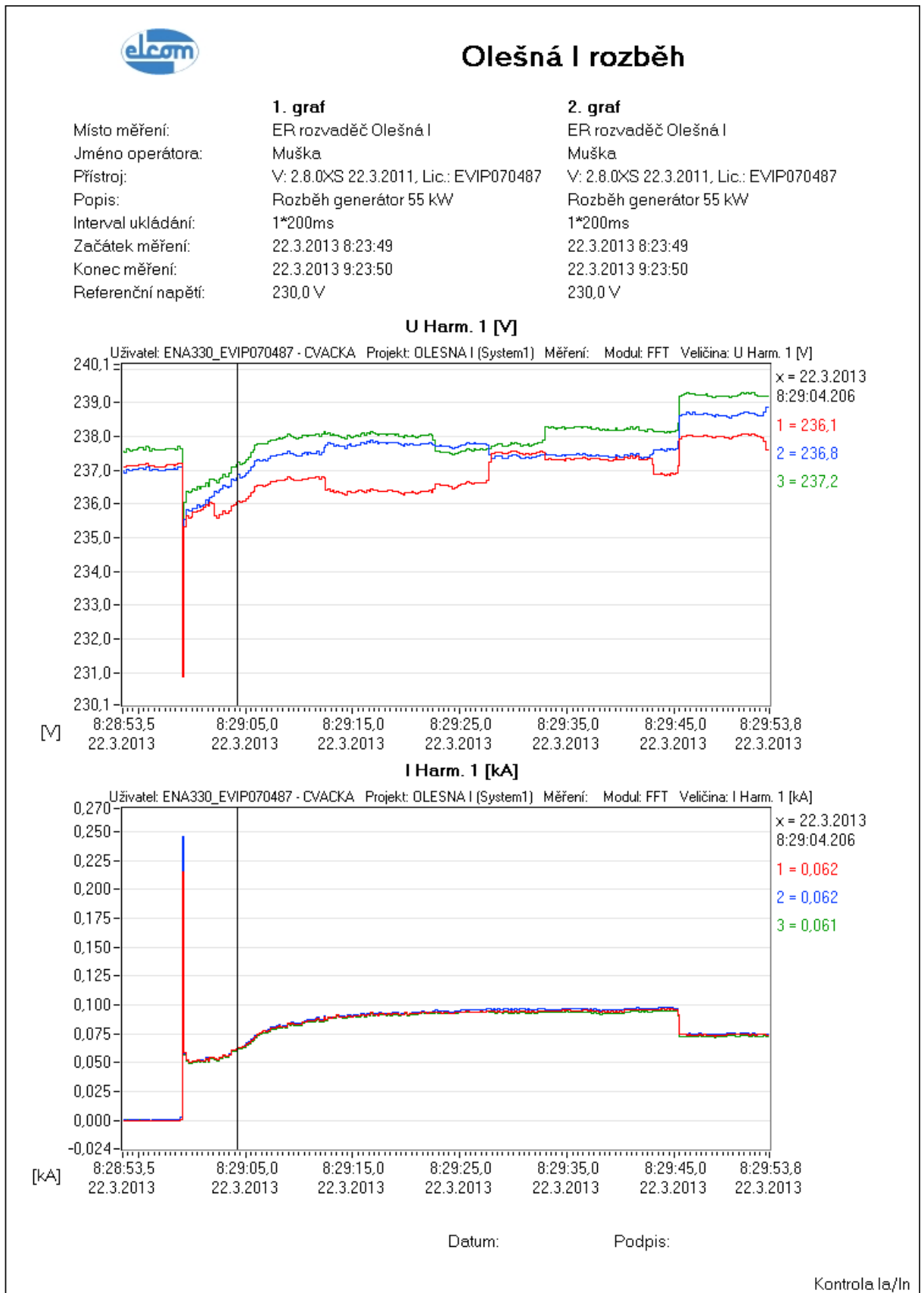


Obr. 6.1 - ELCOM Network Analyzer model ENA330.11.9

6.2 Analýza výsledků

Na následujících grafech jsou vidět průběhy všech měření, které jsem provedl. Odečetl jsem z průběhů potřebné hodnoty k analyzování stavu kvality elektrické energie dodávané generátorem Olešná I. 55 kW. Pro názornost jsem zařadil naměřené průběhy do textu, aby se čtenář pohodlněji orientoval. Vždy jsem uvedl průběh daného měření a na následující straně jsem ho okomentoval v souvislosti s platnými normami, PPDS a technickými podmínkami připojení PDS (ČEZ).

6.2.1 Rozběh generátoru 55 kW - napěťové a proudové poměry



Obr. 6.2 - Průběhy U (V) a I (kA) při rozběhu generátoru 55 kW - MVE Olešná I

Komentář

Smyslem tohoto měření bylo ověřit technické podmínky připojení (dále jen TPP) ve smyslu dodržení PPDS. Podle PPDS a TPP nesmí změny napětí, které způsobuje připojování a odpojování jednotlivých generátorů, ve společném napájecím bodě způsobovat nepřipustné vlivy. Konkrétně nesmí dojít k změně napětí větší než 3 %, neboli:

$$\Delta u_{\max nn} \leq 3\% .$$

V mém případě jsem naměřil následující hodnoty, které lze odečíst z průběhu napětí v grafech (viz Obr. 6.2 a Příloha L):

$$\begin{array}{ll} U_1 = 237,2 \text{ V} & U_1 \dots \text{napětí před rozběhem} \\ U_2 = 230,9 \text{ V} & U_2 \dots \text{pokles napětí při rozběhu} \end{array}$$

$$\Delta u_{\max nn} = 237,2 - 230,9 = 6,30 \text{ V}$$

$$3\% \sim 0,03 \cdot U_1 = 237,2 \cdot 0,03 = 7,12 \text{ V}$$

$$\mathbf{6,30 \leq 7,12} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{\Delta u_{\max nn} \leq 3\%}$$

Výpočtem jsem ověřil, že zmíněná podmínka o největší změně napětí o 3 % platí. Pro MVE, které navíc nejsou spínány často (velmi malá četnost spínání - 1x denně), může PDS připustit větší změny napětí (např. 5 %).

Dále jsem ověřil, zda platí podmínka uvedená rovněž v PPDS a TPP. Musí být zajištěno, aby při přiřazování výroby k distribuční síti byl rozběhový proud I_a max. $3,2 \times I_n$, neboli:

$$I_a \leq 3,2 \cdot I_n$$

Z průběhu proudu v grafech výše (viz Obr. 6.2 a Příloha L) lze odečíst hodnotu rozběhového proudu, kterou jsem naměřil při rozběhu:

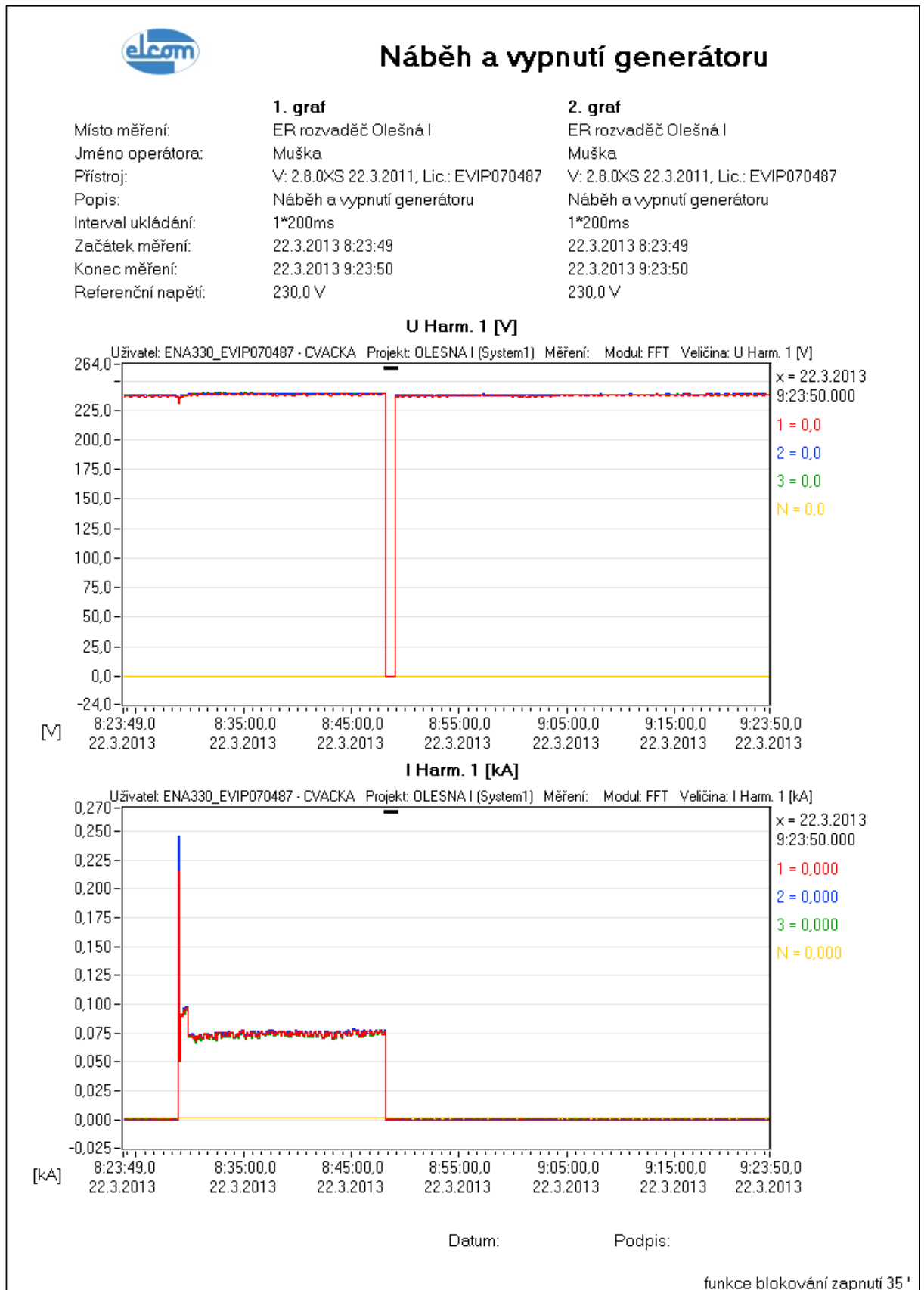
$$\begin{array}{ll} I_a = 245 \text{ A} & I_a \dots \text{proud při rozběhu} \\ I_n = 80 \text{ A} & I_n \dots \text{jmenovitý proud generátoru} \end{array}$$

$$245 \leq 3,2 \cdot 80$$

$$\mathbf{245 \leq 256} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{I_a \leq 3,2 \cdot I_n}$$

Z tohoto výpočtu plyne, že je splněna i tato podmínka. Rozběhový proud I_a je tedy v dovolených mezích.

6.2.2 Výpadek sítě a funkce blokování zapnutí 35 min



Obr. 6.3 - Průběhy U (V) a I (kA) při rozběhu a vypnutí generátoru, funkce blokování zapnutí 35 min

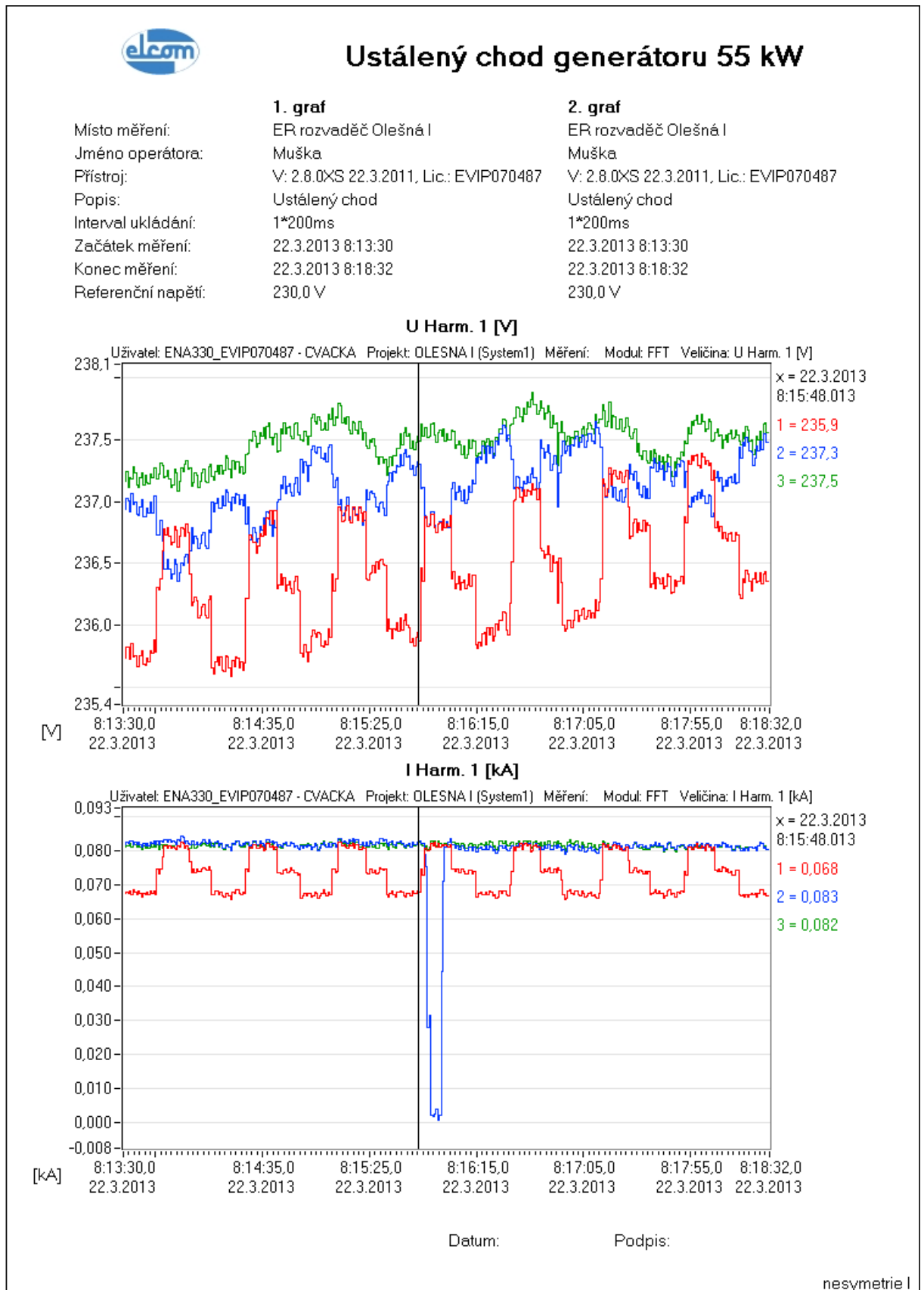
Komentář

Z grafického průběhu na Obr. 6.3 lze vidět, že je po určité době normálního chodu generátor vypnut. Vypnutím a následně znovu zapnutím hlavního jističe na vývodu generátoru Olešná I. 55 KW jsem simuloval výpadek sítě, do které generátor dodává. Tím jsem docílil, že zareagovala síťová ochrana RUFm, která vyslala popud na pomocné relé a odstavila generátor působením na veškeré silové stykače generátoru, kompenzace a pomocných zařízení. Při obnovení napětí opětovným nahozením jističe došlo přes ochranu RUFm k popudu na časové relé v automatu „Slave“, kde je odpočítáván nastavený čas na 35 minut. Tento čas (35 minut) je nastaven na ochraně s ohledem na PPDS [11]. Po výpadku sítě je předepsáno čekat 20 minut do znovu najetí výroby. Zde je navíc, z důvodu spolupráce dalších tří generátorů do stejného předávacího bodu, přidána čekací doba 3x5 min. Generátory totiž musí být přifázovány k distribuční soustavě s minimálním časovým odstupem 5 minut.

Cílem tohoto měření bylo zjistit, zda je správně nastavena tato doba a zda správně funguje funkce blokování zapnutí na dobu 35 minut.

Výsledkem mého měření je fakt, že tato automatika a ochrany jsou nastaveny správně, protože generátor zapnul po 35 minutách. Z průběhu na Obr. 6.3 to však není zřejmé, jelikož jsem měl nastavenou dobu měření pouze na 1 hodinu, a do daného intervalu generátor nestihl zapnout. V případě dostatečného časového rozsahu by tento rozběh byl vidět a byl by prakticky totožný s prvním zapnutím generátoru (kapitola 6.2.1).

6.2.3 Ustálený chod generátoru 55 kW - průběh napětí a proudu

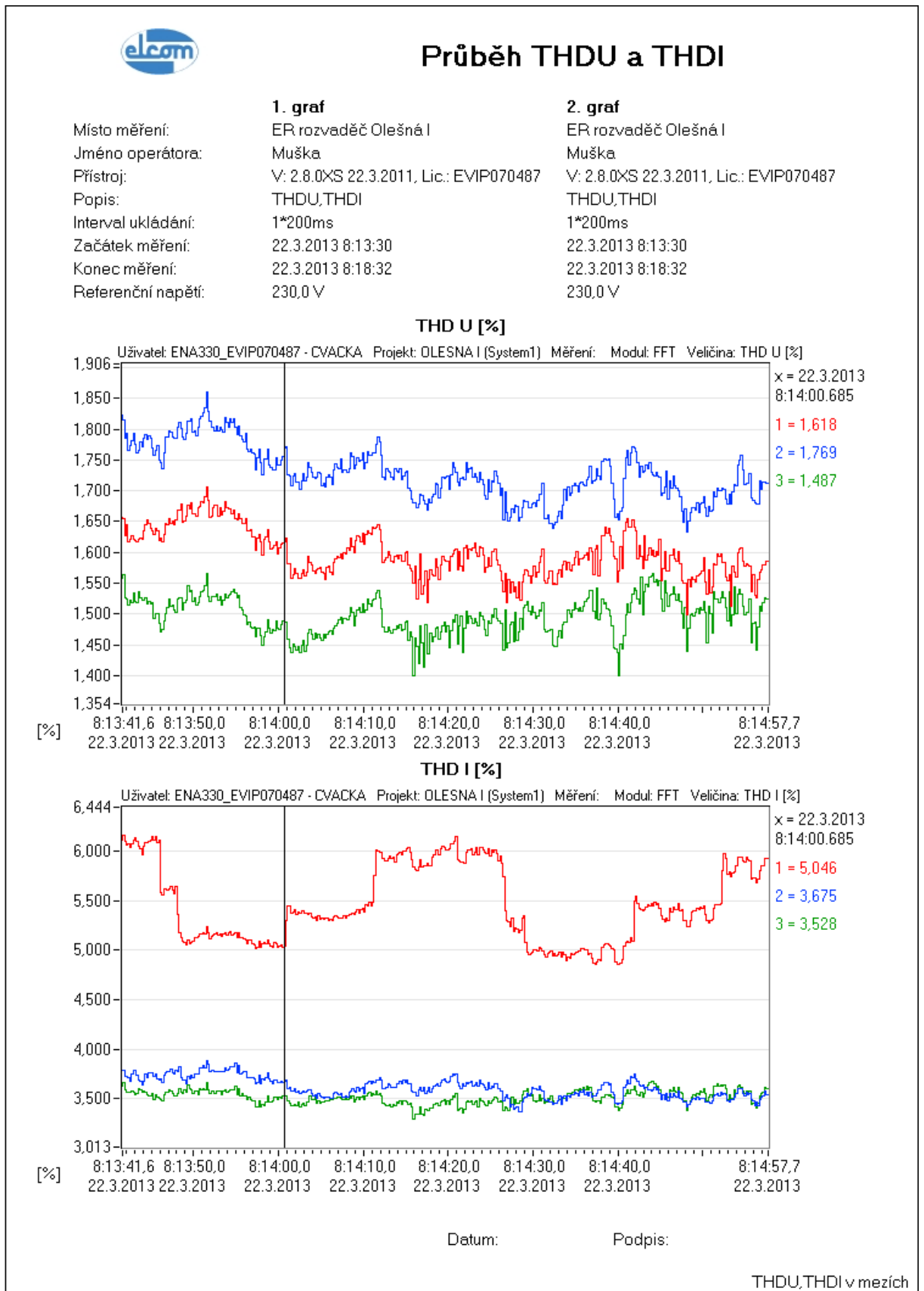


Obr. 6.4 - Průběhy U (V) a I (kA) při ustáleném chodu generátoru

Komentář

V další části měření jsem provedl analýzu ustáleného chodu generátoru. Provedl jsem měření v rozmezí několika minut. Průběhy jsou vidět na Obr 6.4. Především z průběhu proudu je patrná nesymetrie jedné fáze přibližně 10 A s opakující se odchylkou. Také je zde za dobu měření jedna špička u druhé fáze. Tyto nesymetrie dodávaného výkonu jsou způsobeny odběrem el. energie různého charakteru do sousedního objektu.

6.2.4 Kontrola THD_U a THD_I



Obr. 6.5 - Průběhy harmonického zkreslení U a I vlivem vyšších harmonických.

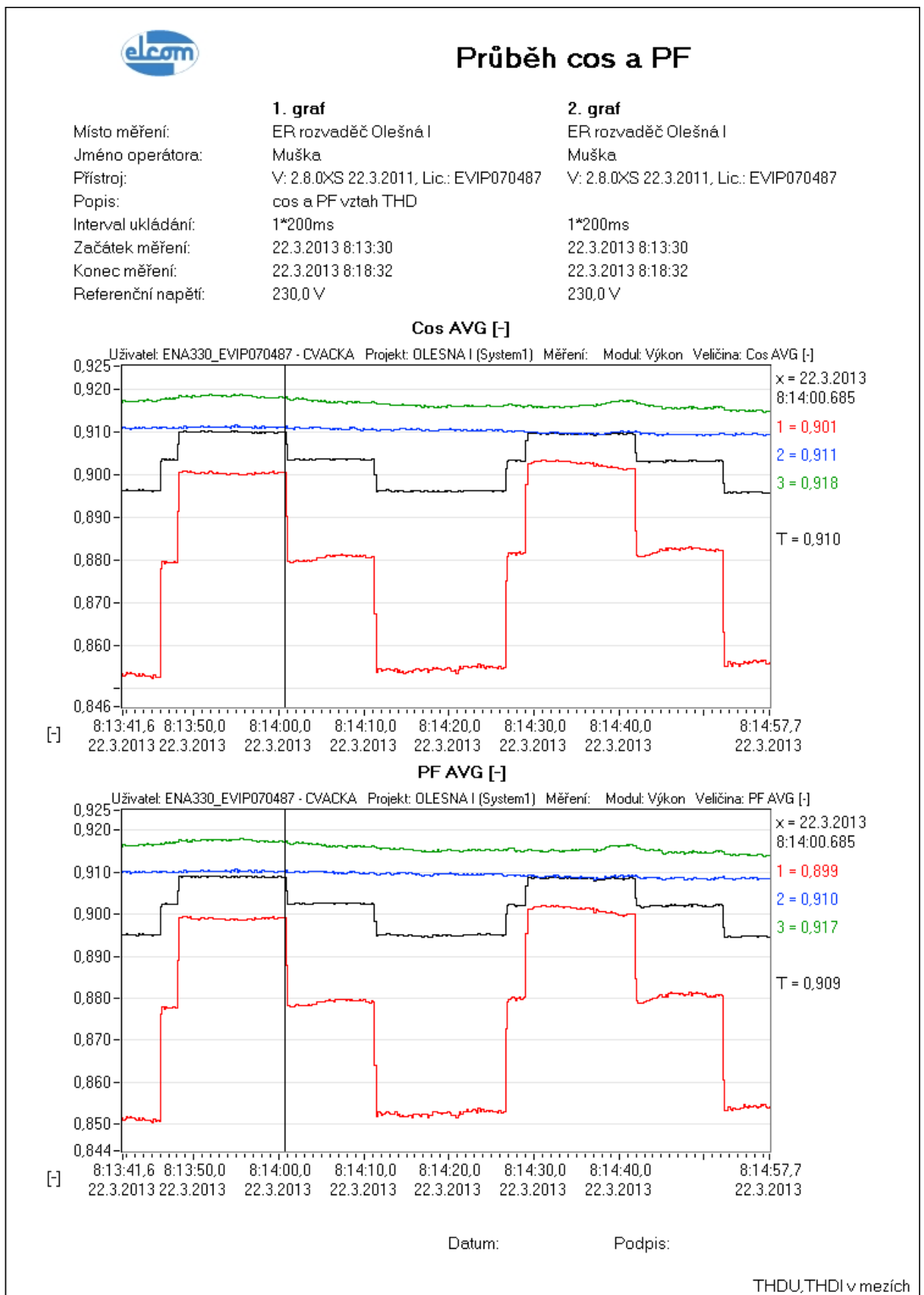
Komentář

THD je dle norem ČSN EN 50160 [14], PNE 33 34030-0 [16] a PNE 33 34030-1 [17] celkové harmonické zkreslení. THD je poměr efektivní hodnoty součtu všech harmonických složek až do stanoveného řádu a efektivní hodnoty základní složky. Podrobněji THD vysvětlují v Příloze I.

Harmonické zkreslení průběhu napětí je s velikou rezervou v normě. Nejvyšší hodnota THD_U dosahuje hodnoty $\sim 1,85 \%$ a průměrná hodnota všech tří fází se pohybuje kolem $\sim 1,6 \%$ (viz Obr. 6.5). Tyto hodnoty tedy prokazují, že je zde harmonické zkreslení průběhu napětí při ustáleném chodu asynchronního generátoru 55 kW zcela v pořádku. Velkou měrou k tomuto faktu přispívá zřejmě dostatečně velká impedance vývodového transformátoru.

Pokud jde o průběh harmonického zkreslení proudu THD_I , mohu konstatovat, že se pohybuje také v povolených mezích (obvyklá povolení hodnota $THD_I = 16\%$). Přičemž 1. fáze vykazuje větší zkreslení z důvodu připojeného 1-f odběrového zařízení neznámého charakteru.

6.2.5 Kontrola účiníku $\cos \varphi$ a skutečného účiníku PF



Obr. 6.6 - Průběhy účiníku $\cos \varphi$ (-) a skutečného účiníku PF (-).

Komentář

V neposlední řadě jsem provedl měření účinníku s ohledem na dodržení předepsané velikosti kompenzace účinníku podle [11]. Na Obr. 6.6 lze v horní části vidět průběhy účinníku $\cos \varphi$ (-) a ve spodní části průběhy skutečného účinníku PF (-), jenž je ovlivněn působením vyšších harmonických složek (viz kapitola 5.1 Účinník).

1. fáze opět vykazuje nesymetrii oproti zbývajícím fázím ze stejného důvodu. V této fázi se pohybuje $\cos \varphi$ kolem hodnoty $\sim 0,88$. $\cos \varphi$ ve zbývajících dvou fázích se pohybuje mezi hodnotami 0,91 a 0,92. Celkově lze účinník hodnotit také podle středního účinníku, jehož průběh je znázorněn černou barvou. Hodnota tohoto účinníku se pohybuje kolem $\sim 0,90$. To znamená, že není splněna podmínka uvedená v PPDS (také viz kapitola 5.4 Regulace jalového výkonu).

Skutečný účinník PF (spodní část Obr. 6.6) se příliš neodlišuje od $\cos \varphi$. Změna je pouze v řádech tisícín, což způsobuje v podstatě stejné průběhy. Je to způsobeno především malým harmonickým zkreslením THD. Fakt, že se oba průběhy účinníku ($\cos \varphi$ a PF) téměř kopírují, potvrzuje malé harmonické zkreslení THD_U a THD_I , znázorněné na předchozích grafech (kapitola 6.2.4).

Jelikož účinník na výstupu generátoru je přibližně $\cos \varphi = 0,9$, je potřeba navrhnout zvýšení výkonu kompenzačního zařízení, případně provést rekonstrukci stávající kompenzace. Tím se zabývám v následující kapitole.

6.3 Výpočet a návrh kompenzace

6.3.1 Současná kompenzace

V době, kdy jsem prováděl měření na bloku Olešná I. (55 kW) jsem naměřil následující hodnotu účinníku:

$$\cos \varphi_{k1} = 0,9 \text{ (-)}$$

Tento účinník je výsledkem kompenzace pomocí stávajících kompenzačních kondenzátorů umístěných v rozvaděči DT1. Kompenzační kondenzátory jsou zřejmě zastaralé a neodpovídají původním předpokladům a zamýšlenému záměru. Kompenzace je zde podle dokumentace provedena individuálně pro jeden asynchronní generátor pomocí kondenzátorů o celkové velikosti $Q_{c1} = 45 \text{ kVAr}$.

Velikost kompenzačního výkonu jsem si ověřil výpočtem.

Účinník generátoru	$\cos \varphi = 0,77$	$\tan \varphi = 0,829$
Účinník po kompenzaci	$\cos \varphi_{k1} = 0,9$	$\tan \varphi_{k1} = 0,484$

$$Q_{kom1} = U^2 \cdot \omega \cdot C = P \cdot (\tan \varphi - \tan \varphi_{k1})$$

$$Q_{kom1} = P \cdot (\tan \varphi - \tan \varphi_{k1})$$

$$Q_{kom1} = 55 \cdot (0,829 - 0,484)$$

$$Q_{kom1} = 18,975 \doteq 19 \text{ kVAr}$$

6.3.2 Úprava kompenzace

Podle schématu strojovny (viz Příloha J) jsou připojeny kompenzační baterie o celkové velikosti 45 kVAr. Já výpočtem ověřil velikost kompenzačního výkonu kondenzátorů, přičemž stávající kompenzační výkon je 19 kVAr. Podle PPDS [11] musí být induktivní účinník minimálně $\cos \varphi = 0,95$, což v tomto případě není splněno. Následujícím výpočtem určím, kolik je potřeba připojit ke stávajícím kondenzátorům kompenzačního výkonu, aby tato podmínka byla splněna.

Současný účinník	$\cos \varphi_{k1} = 0,9$	$\tan \varphi_{k1} = 0,484$
Min. požadovaný účinník	$\cos \varphi_{k2} = 0,95$	$\tan \varphi_{k2} = 0,329$

$$Q_{kom2} = P \cdot (\tan \varphi_{k1} - \tan \varphi_{k2})$$

$$Q_{kom1} = 55 \cdot (0,484 - 0,329)$$

$$Q_{kom1} = 8,525 \doteq 8,5 \text{ kVAr}$$

V tomto případě by bylo možné použít kompenzační kondenzátor o velikosti 10 kVAr. Tato hodnota je v řadě kondenzátorů daných výrobcí. Konkrétně bych použil např. válcový kondenzátor od firmy ZEZ Silko: typ CSADG 1-0,4/10 (viz katalog výrobce - Příloha K) [22]. Cena kondenzátoru se pohybuje kolem 1 000 Kč bez DPH.

V případě navýšení kompenzačního výkonu Q_{c1} o výkon kondenzátoru Q_{c2} dostaneme celkový výkon Q_c , který zlepší účinník na hodnotu $\cos \varphi_k$. Následujícím výpočtem jsem ověřil, zda navýšením kompenzačního výkonu bude MVE splňovat podmínky regulace jalového výkonu podle PPDS [11].

$$Q_{c1} = 19 \text{ kVAr} \quad Q_{c2} = 10 \text{ kVAr}$$

$$Q_{c1} + Q_{c2}$$

$$Q_c = Q_{c1} + Q_{c2} = 19 + 10 = 29 \text{ kVAr}$$

$$Q_c = P \cdot (\tan \varphi - \tan \varphi_k)$$

$$\tan \varphi_k = \frac{P \cdot \tan \varphi - Q_c}{P}$$

$$\tan \varphi_k = \frac{55 \cdot 0,829 - 29}{55}$$

$$\tan \varphi_k = 0,302 \quad \Rightarrow \quad \underline{\cos \varphi_k = 0,957}$$

Výsledný navrhovaný účinník mi vyšel 0,957, což odpovídá podmínkám PPDS [11]. Přidání kompenzačního kondenzátoru o výkonu $Q_{c2} = 10 \text{ kVAr}$ ke stávající kompenzaci je tedy dostačující.

Jiné řešení by bylo možné provést pomocí odstranění stávajících a nedostačujících kompenzačních kondenzátorů za nové. Navrhuji výkon $Q_{c2} = 2 \times 15 \text{ kVAr}$. Výsledný navržený účinník by se příliš nezměnil.

7 Závěr

V mé diplomové práci jsem popsal systém chránění generátorů. Tematicky jsem tuto kapitolu rozdělil na synchronní a asynchronní generátory. Po nastudování této problematiky z uvedených zdrojů jsem došel k následujícímu závěru. Systém chránění synchronních strojů je obecně složitější. Je to dáno podstatou stroje a jeho nasazováním do výroben s ohledem na velikost vyráběného výkonu. Zatímco asynchronní generátory se využívají v malých zdrojích, převážně v malých vodních elektrárnách (max. do ~ 2 MW), synchronními generátory jsou osazovány elektrárny i větších výkonů. Z toho vyplývá použití složitějších a sofistikovanějších ochran pro synchronní alternátory.

Dále jsem se v práci zabýval chráněním transformátorů, především pak transformátorů vývodových. Zde bych chtěl zmínit následující poznatky. Tuto problematiku, stejně jako způsob chránění generátoru, popisují výše zmíněné normy. Byl jsem se o této problematice informovat ve firmě SEG s.r.o., která se zabývá mimo jiné servisem transformátorů. Pokud jde o transformátory s výkonem v řádech stovek kVA (případ MVE Olešná), používají se zde pouze nadproudové ochrany. V případě olejových transformátorů větších výkonů (nad 1 MVA) může být navíc použita plynová ochrana v podobě Buchholzova relé. Od této ochrany se však v dnešní době (hermetizovaných transformátorů) ustupuje a nahrazují je integrované ochrany R.I.S. nebo DGPT II, které se montují na víko transformátoru.

Za uplynulý rok jsem také navštívil několik malých vodních elektráren, jako jsou např. MVE Černé jezero, MVE Doudlevice, ale také MVE Olešná na řece Berounce. Zde jsem provedl měření kvality elektrické energie, zkoušel jsem funkci zpožděného zapnutí generátoru po výpadku sítě a také jsem ověřil kvalitu kompenzace účinníku. Kvalitou elektrické energie MVE Olešná I. odpovídá normám a PPDS. Analýzou výsledků jsem však zjistil, že zde není dostatečná kompenzace jalového výkonu. Stávající kompenzační kondenzátory nevyhovují. Proto jsem navrhl kompenzační kondenzátory pro doplnění stávající kompenzace nebo kompletní výměnu, uvedl jsem také pro první variantu konkrétní model, výrobce a cenu. Při dodržení tohoto návrhu by měl blok MVE Olešná dodávat elektrickou energii do distribuční sítě o účinníku $\cos \varphi \geq 0,95$.

Tato má diplomová práce mi rozšířila přehled o systému chránění generátorů, transformátorů. Současně jsem také dostal do podvědomí normy, PPDS a různé přípojovací podmínky zdrojů el. energie v kontextu chránění, kvality elektrické energie a kompenzace účinníku.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] TLUSTÝ, Josef a kol. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2011, 255 s.
- [2] JANÍČEK, František a kol. *Digitální ochrany v elektrizačné soustavě*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2004, 360 s.
- [3] CHMELÍK, Karel. *Chránění III: elektrická zařízení vysokého napětí*. Havířov: IRIS, c2005, 279 s. Pracovní a učební pomůcky.
- [4] GRYM, Rudolf. *Chránění II: elektrická zařízení vysokého napětí, chránění zařízení v průmyslu*. Havířov: IRIS, c2004, 305 s. Pracovní a učební pomůcky.
- [5] DOHNÁLEK, Petr. *Ochrany pro průmysl a energetiku*. Praha: SNTL, 1991, 339 s.
- [6] TESAŘOVÁ, Miloslava a Milada ŠTROBLOVÁ. *Průmyslová elektroenergetika*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 154 s. ISBN 80-708-2703-3.
- [7] IBLER, Zbyněk a Miloš BERAN. *Elektrárny II*. Plzeň: Ediční středisko VŠSE Plzeň, 1982.
- [8] BERAN, Miloš. *Elektrické ochrany strojů a zařízení elektrizační soustavy*. Plzeň: Ediční středisko VŠSE Plzeň, 1979.
- [9] BOHÁČ, Oto a Jaroslav NOCAR. *Elektroenergetika II*. Bratislava: ALFA, n. p., 1971.
- [10] TESAŘOVÁ, M.: *Průmyslová energetika [přednášky]*, 2012.
- [11] PPDS - Příloha 4: *Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele lokálních distribučních soustav*.
- [12] ČSN 33 3051. *Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení*. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1992.
- [13] ČSN 33 3201: *Elektrické instalace nad AC 1 kV*. 12/2002.
- [14] ČSN EN 50160 (33 01222). *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*.
- [15] ČSN EN 50 438. *Požadavky na paralelní připojení mikrogenerátorů s veřejnými distribučními sítěmi nízkého napětí*.
- [16] PNE 33 3430-0. *Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav*. 4. vydání.
- [17] PNE 33 3430-1. *Parametry kvality elektrické energie - část 1: Harmonické a meziharmonické*. 3. vydání.
- [18] PNE 33 3430-6. *Parametry kvality elektrické energie - část 6: Omezení zpětných vlivů na hromadné dálkové ovládání*.
- [19] VYHLÁŠKA ERÚ č. 541/2006 sb. o *Pravidlech trhu s elektřinou, zásadách tvorby cen za činnosti operátora trhu s elektřinou a provedení některých dalších ustanovení energetického zákona v platném znění*.
- [20] Generator Protection: *Protection of a Medium-Sized Generator up to 5 MW*. In: [online]. [cit. 2012-11-28]. Dostupné z: http://siemens-russia.com/titan_img/ecatalog/App1_21_Medium_sized_Generator_Protection_en.pdf
- [21] ŽÁČEK, Jaroslav. ELEKTRO: Odborný časopis pro elektrotechniku. *Účinník v teorii a praxi*. 2004, roč. 2004, č. 12. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/e1120404.pdf>
- [22] ZEZE SILKO, s.r.o. *Katalog kompenzace jalové energie*. 2013, 40 s. Dostupné z: <http://www.zeze-silko.cz/customZone/files/pfcnew.pdf>
- [23] Elpro-Energo, s. r. o. *Produktový list - Přístroj R.I.S.* 4 s. Dostupné z: http://www.elpro-energo.cz/download/olejove-transformatory/RIS_CZ.pdf
- [24] Elpro-Energo, s. r. o. *Návod - Přístroj pro hlídání teploty Elbag TS01*. 9 s. Dostupné z: http://www.elpro-energo.cz/download/suche-transformatory/TS01_CZ.pdf

Přílohy

Seznam příloh

Příloha A - Distribuční transformátor 400 kVA a společný nn rozvaděč DTS Olešná č. RO_0377	2
Příloha B - Přední panel rozvaděče ER - jističe a obchodní měření	3
Příloha C - Vyvedení výkonu MVE Olešná I., II. a Olešná U Černých na společnou přípojnicí v přípojkové skříni	4
Příloha D - Soustrojí generátorů Olešná I., II.	4
Příloha E - Funkce Buchholzovo relé	5
Příloha F - Nákres ochrany R.I.S.	6
Příloha G - Otvor na víku hermetizovaného transformátoru připravený pro montáž integrované ochrany R.I.S. nebo DGPT II.	7
Příloha H - H1 - zadní část rozvaděče ER	8
H2 - zadní část rozvaděče ER - zapojení měření	9
Příloha I - Harmonické zkreslení	10
Příloha J - Přehledové schéma strojovny MVE Olešná I., II.	11
Příloha K - Ukázka katalogu výrobce kompenzačních kondenzátorů	12
Příloha L - Rozběh generátoru 55 kW (přiblíženo lupou v čase rozběhu)	13

**Příloha A - Distribuční transformátor 400 kVA a společný nn rozvaděč DTS
Olešná č. RO_0377**



Příloha B - Přední panel rozvaděče ER - jističe a obchodní měření



Příloha C - Vyvedení výkonu MVE Olešná I., II. a Olešná U Černých na společnou přípojnici v přípojkové skříni.



Příloha D - Soustrojí generátorů Olešná I., II.



Příloha E - Funkce Buchholzovo relé, převzato z *SENSE Engineering Co.Ltd.* [online]. [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: <http://www.sense-eng.com>

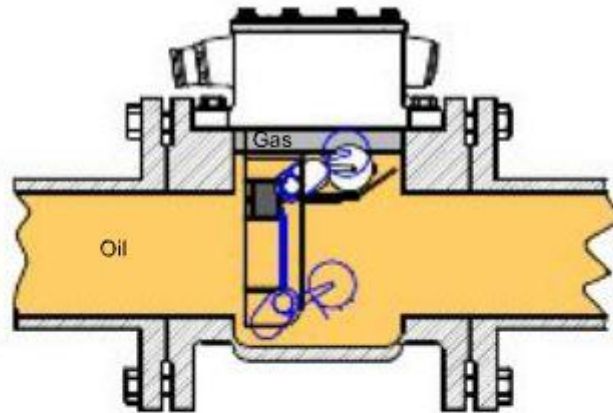


Figure 4: Gas accumulation

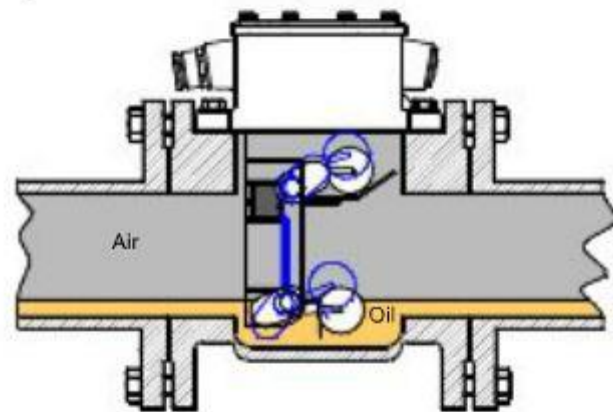


Figure 5: Insulating liquid loss

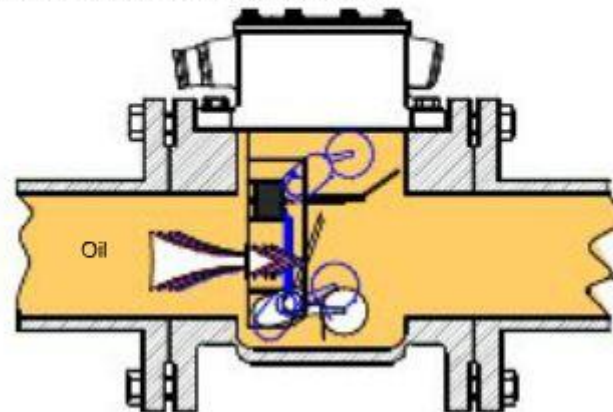
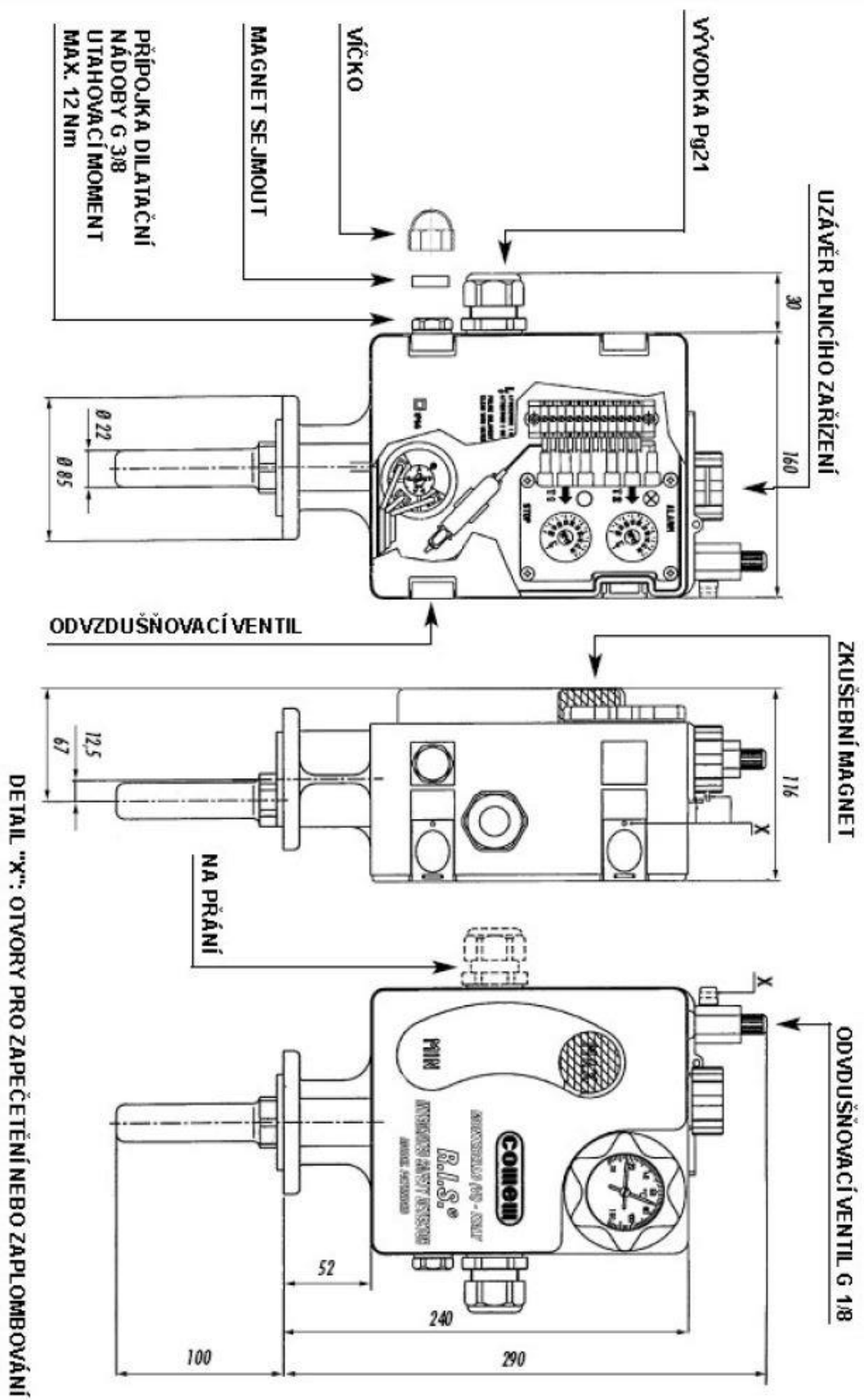


Figure 6: Insulating liquid flow

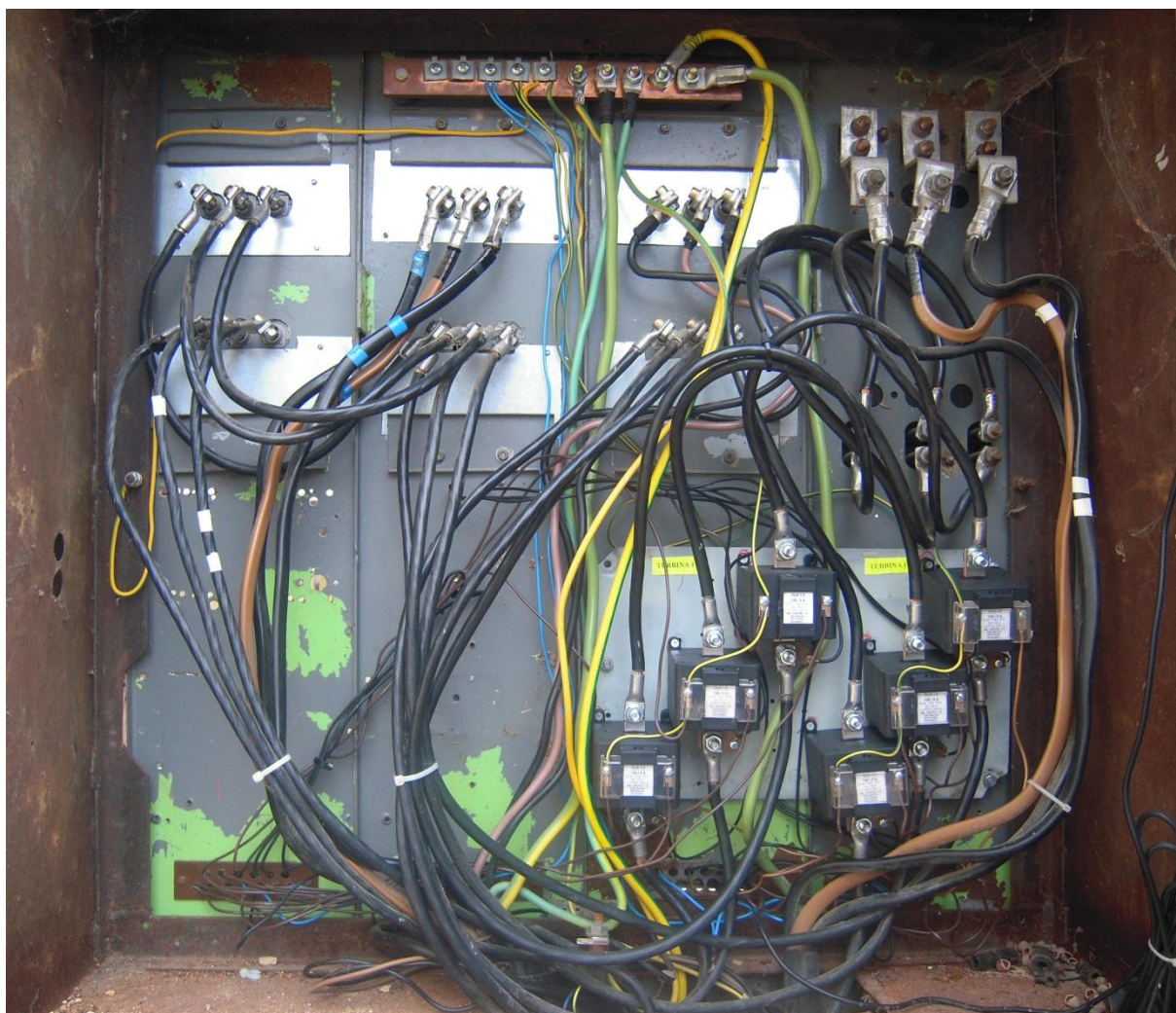
Příloha F - Nákres ochrany R.I.S., převzato z [23].



Příloha G - Otvor na víku hermetizovaného transformátoru připravený pro montáž integrované ochrany R.I.S. nebo DGPT II.



Příloha H - H1 - zadní část rozvaděče ER



Příloha H - H2 - zadní část rozvaděče ER - zapojení měření



Příloha I - Harmonické zkreslení, [16], [17], [14].

Celkové harmonické zkreslení sestává dle [17] z poměru efektivní hodnoty součtu všech harmonických složek (do stanoveného řádu - s označením H) a efektivní hodnoty základní složky:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left(\frac{Q_h}{Q_1}\right)^2}$$

- kde Q je veličina - proud I nebo napětí U,
 Q₁ je efektivní hodnota základní složky,
 h je řád harmonické,
 Q_h efektivní hodnota harmonické složky řádu h,
 H všeobecně se rovná 50, může být však i 25 v případě, že riziko rezonance je na vyšších řádech nízké.

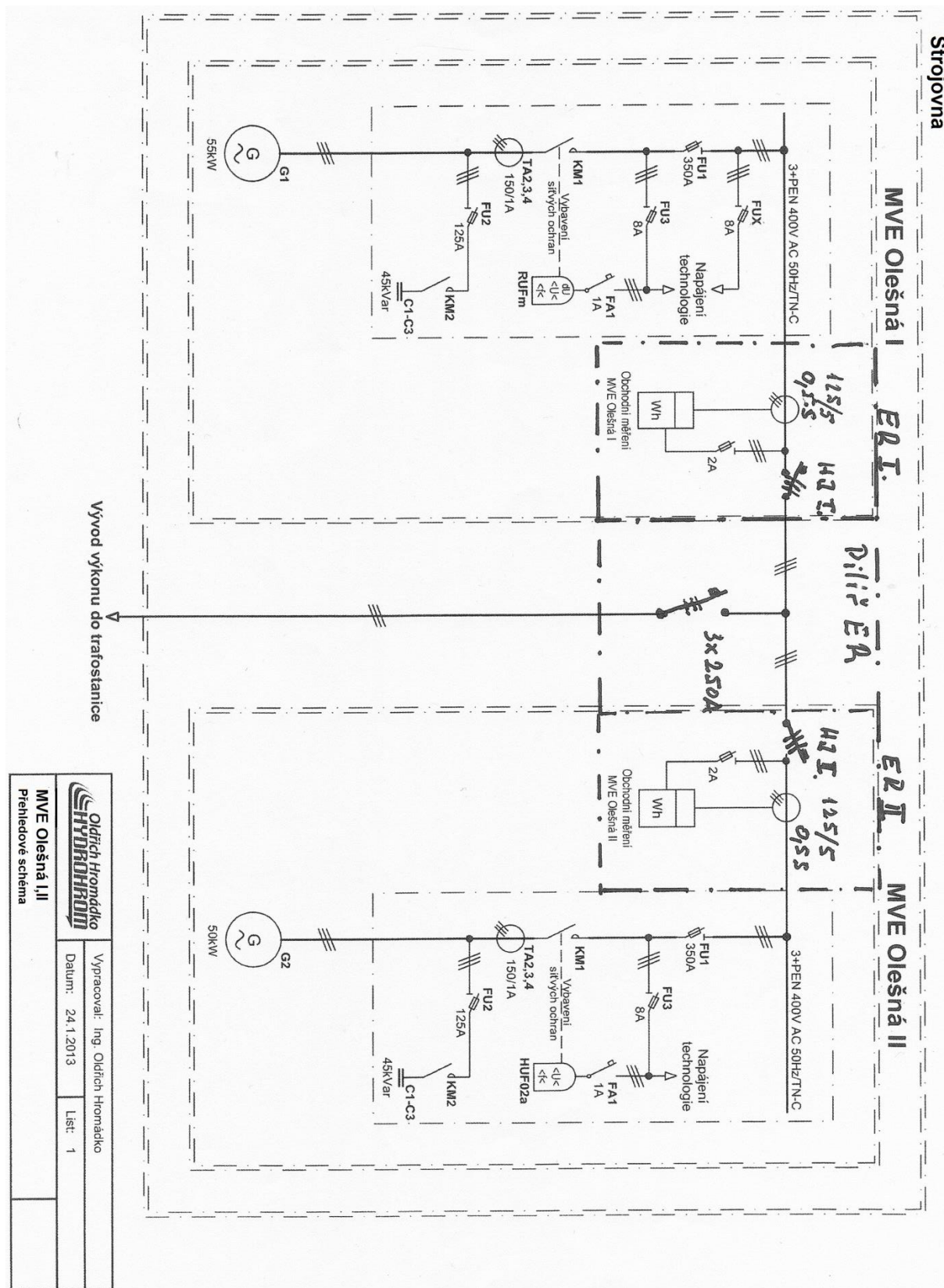
Harmonické zkreslení podle [16] udává, jakou měrou je ovlivněno síťové napětí vlivem vyšších harmonických složek (dále jen VH). Harmonické zkreslení lze přičíst faktu, že nelineární odběry lze klasifikovat jako proudové zdroje VH. Každá hodnota napětí harmonických, která je přítomna v síti, přispívá svou hodnotou k harmonickému zkreslení, k němuž přispívají zároveň všechna zařízení odběratelů svými emisemi proudů VH a závisí na těchto parametrech:

- impedance sítě pro harmonické,
- amplituda a fáze proudů VH emitovaných každým odběratelem,
- počet zařízení odběratelů připojených současně k síti.

Příliš velký obsah VH v síťovém napětí by mohlo vést k ovlivnění provozu sítě a připojených zařízení. Proto je důležité posouzení provozu připojeného zařízení k síti z hlediska VH. Toto posouzení vychází ze stanovení mezních emisních hodnot. Hodnotu THD lze uvést pro jednotlivé úrovně VH nebo se udává odpovídající kompatibilní úroveň pro celkové harmonické zkreslení (viz níže).

V problematice související s mou diplomovou prací jde především o dodržení harmonického zkreslení napětí (celkový obsah harmonických) - $THD_U \leq 8\%$ na výstupu asynchronního generátoru 55 kW na MVE Olešná I. K tomuto problému jsem čerpal z [16], [17], [14], kde lze nalézt podrobnosti také k harmonickému zkreslení THD_I.

Příloha J - Přehledové schéma strojovny MVE Olešná I., II., ručně doplněné, převzato z Projektové dokumentace MVE.



	Vyracoval: Ing. Olářův Hromádko	
	Datum: 24.1.2013	List: 1
MVE Olešná I,II Přehledové schéma		

Příloha K - Tabulka nn kompenzačních kondenzátoru od výrobce ZEZ Silko, s.r.o., převzalo z [22].



LOW-VOLTAGE CAPACITORS (CYLINDRICAL) KOMPENZAČNÍ KONDENZÁTORY NN (VÁLCOVÁ AL NÁDOBA)

Three-Phase Capacitors 400 V AC, 50 Hz, MKP dry,
delta connection

Třífázové kondenzátory 400 V AC, 50 Hz, MKP suché,
zapojení do trojúhelníku

Type Typ	Output Výkon Q_N [kvar]	Current Proud I_N [A]	Capacitance Kapacita C_N μ	Dimensions Rozměry \varnothing D x H [mm]	Weight Hmotnost [kg]	Protection degree Stupeň krytí	Drawing Výkres
CSADG 1-0,4/1	1,00	1,4	3 x 6,6	85 x 175	0,6	IP20	1
CSADG 1-0,4/1,5	1,50	2,2	3 x 9,9	85 x 175	0,6	IP20	1
CSADG 1-0,4/2	2,00	2,9	3 x 13,3	85 x 175	0,7	IP20	1
CSADG 1-0,4/2,5	2,50	3,6	3 x 16,6	85 x 175	0,7	IP20	1
CSADG 1-0,4/3,15	3,15	4,5	3 x 20,9	85 x 175	0,7	IP20	1
CSADG 1-0,4/4	4,00	5,8	3 x 26,5	85 x 175	0,8	IP20	1
CSADG 1-0,4/5	5,00	7,2	3 x 33,2	85 x 175	0,9	IP20	1
CSADG 1-0,4/6,25	6,25	9,0	3 x 41,4	85 x 175	1,0	IP20	1
CSADG 1-0,4/8	8,00	11,5	3 x 53,1	85 x 245	1,0	IP20	1
CSADG 1-0,4/10	10,00	14,4	3 x 66,3	85 x 245	1,1	IP20	1
CSADG 1-0,4/12,5	12,50	18,0	3 x 82,9	85 x 245	1,2	IP20	1
CSADG 1-0,4/15	15,00	21,7	3 x 99,5	110 x 245	1,6	IP20	1
CSADG 1-0,4/20	20,00	28,9	3 x 132,6	110 x 245	1,9	IP20	1
CSADG 1-0,4/25	25,00	36,1	3 x 165,8	110 x 245	2,1	IP20	1
CSADG 3-0,4/30	30,00	43,3	3 x 198,9	136 x 220	3,3	IP20	1
CSADG 3-0,4/33,3	33,30	48,1	3 x 220,8	136 x 261	4,0	IP20	2
CSADG 3-0,4/37,5	37,50	54,1	3 x 248,7	136 x 261	4,0	IP20	2
CSADG 3-0,4/40	40,00	57,7	3 x 265,3	136 x 261	4,0	IP20	2
CSADP 3-0,4/50	50,00	72,2	3 x 331,6	136 x 355	5,5	IP20	2

Příloha L - Průběhy U (V) a I (kA) při rozběhu generátoru 55 kW - MVE Olešná I (přibliženo lupou v čase rozběhu)

