

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta

Katedra fyziky

**Moderní metody sledování degradace izolačních systémů
velkých elektrárenských točivých strojů**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Michal Šerý

Autor: Martin Dvořák

Anotace:

Predikce rizika poruchy včasným diagnostikováním rozvíjející se poruchy izolačního systému velkého synchronního generátoru, pracujícího jako významný zdroj elektrizační soustavy v pásmu základního zatížení. Zmenšení rizika poruchy stroje je založeno na doplnění on-line systému, monitorujícího izolační systém generátoru. Na základě dat získaných z on-line monitoringu bude možné diagnostikovat vznikající závady na samém počátku jejich vývoje ještě před tím, než svým charakterem přerostou v mezizávitový zkrat statorového vinutí nebo zkrat v magnetickém obvodu stroje.

Pro sledování stavu izolačního systému stroje v této práci navrhuji použití dvou nezávislých on-line diagnostických metod, sledujících stav izolačního systému za provozu stroje. Dále v této práci předkládám hlavní rysy technického řešení pro vlastní modernizaci zařízení.

Klíčová slova: on-line diagnostika, částečné výboje, core monitoring, SSC sonda.

Abstract:

Prediction diversification disturbances timely diagnosed booming disturbances insulative system big synchronous generator, working like significant source electricity supply system in zone base load boiler. Lessen risk machine fault is based on completion on - line system, following insulative system generator. On the grounds of dates obtained from on-line monitoring will possible to diagnose rising bug on all beginning their development yet before it, than in character grow turn-to-turn fault stator winding or cut off in magnetic circuit machinery.

To following state insulative system machinery in those work I prefer using two independent on - line diagnostic methods, following state insulative system in the working condition machinery. Further in those work set up outlines technical solving for personal modernizing arrangement.

Keywords: on-line diagnostics, partial discharge, core monitoring, SSC probe.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci na téma Moderní metody sledování degradace izolačních systémů velkých elektrárenských točivých strojů vypracoval samostatně, pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě pedagogickou fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích, dne 18.4.2010

Martin Dvořák

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalovi Šerému za účinnou metodickou a pedagogickou pomoc a další cenné rady při zpracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Josefu Vůjtovi za odborné technické konzultace.

1	Úvod a cíle práce.....	6
2	Konstrukce strojů	6
2.1	Princip synchronního stroje.....	6
2.2	Konstrukční popis inovovaného turboalternátoru 1111 MVA.....	8
2.2.1	Buzení	10
2.2.2	Magnetický obvod	10
2.2.3	Rotor	11
2.2.4	Chlazení rotoru a magnetického obvodu	11
2.2.5	Vinutí statoru	12
3	Problematika izolačního systému generátoru.....	13
3.1	Mechanické vlivy	14
3.1.1	Uvolnění tyčí v drážce	15
3.1.2	Uvolnění plechů statoru	15
3.1.3	Vibrace čel vinutí.....	15
3.1.4	Čistota montáže a dodržování technologických postupů.....	15
3.2	Vliv teploty.....	16
3.3	Vliv vlhkosti.....	17
4	On-line diagnostika částečných výbojů	17
4.1	Teorie ČV.....	17
4.1.1	Průvodní jevy výbojové činnosti	22
4.1.2	Veličiny charakterizující ČV	23
4.2	Volba snímačů a metody diagnostiky	24
4.3	Instalace SSC sond.....	27
4.4	Vyhodnocení naměřených údajů.....	31
4.4.1	Měřicí aparatura.....	31
4.4.2	Vyhodnocení dat	33
4.5	Příklady z praxe.....	35
4.5.1	Závislost intenzity ČV na tlaku H ₂	35
4.5.2	Indikace cizího předmětu ve vinutí ze zvýšení ČV	36
5	Core monitoring	38
5.1	Princip core monitoringu.....	38
5.2	Hlavní komponenty	39
5.2.1	GCM-X	39
5.2.2	Funkce GCM-X	39
5.2.3	Princip ionizační komory.....	41
5.2.4	Spojovací potrubí.....	42
5.2.5	Gen-Tags.....	43
5.2.6	Vyhodnocení alarmů a odebraných vzorků	45
6	Příklady havárií izolačních systému u velkých generátorů, rozbor dopadu havárie modernizovaného stroje	47
6.1	2006 V1 Jaslovské Bohunice – blok č.2 (Slovensko).....	47
6.2	2007 Ringhals (Švédsko)	48
6.3	2005 Leibstadt (Švýcarsko).....	49
6.4	Vybrané poruchy TBG 1000 MW (ČR) včetně nároků na opravu	52
6.4.1	Průběh opravy rotoru generátoru 1000 MW	53
6.4.2	Průběh opravy statorového vinutí generátoru 1000 MW.....	54
7	Závěr	55
	Literatura:.....	57
	Seznam příloh	58

1 Úvod a cíle práce

Vývoj a výzkum izolačních systémů pro točivé elektrické stroje je nezbytný pro efektivní a spolehlivý provoz během celé životnosti provozovaného stroje. Vlastní návrh konstrukce a definovaný izolační systém, na který během provozu působí, jak vnější prostředí v kterém stroj pracuje, tak elektrické a mechanické vlastnosti, nám limitují životnost a poruchovost stroje. Nedílnou složkou je údržbový systém a vliv lidského faktoru na prováděných opravách elektrických strojů. Vlivem těchto negativních vlivů dochází k degradaci izolačního systému, tedy jeho stárnutí a tím zkrácení jeho životnosti. Náhlé poruchy mohou mít lehký nebo těžký průběh. Těžké poruchy na takto velkém stroji zpravidla vedou ke vzniku havárie s následnými vysokými ekonomickými náklady na opravu. Z celkového pohledu jsou však náklady na opravu stroje zanedbatelné proti miliardovým ztrátám z nevýroby.

V této práci navrhuji instalování diagnostiky on-line monitoringu částečných výbojů a core-monitoringu na stroji 1000 MW. Na základě údajů získaných z nově instalovaných monitorovacích systémů lze včas odhalit rozvíjející se poruchu a naplánovat opravu stroje. Naopak na základě uspokojivých výsledků lze plánovat rozsah preventivní údržby v potřebném rozsahu a omezit se na nezbytné práce. Tím dosáhneme bezpečného prodloužení intervalů mezi generálními opravami stroje až na šestiletá maxima doporučená výrobcem.

2 Konstrukce strojů

2.1 Princip synchronního stroje

Ve výrobním procesu elektrické energie jsou synchronní stroje využity jako alternátory, motory, popřípadě přebuzené naprázdno běžící motory používané ke kompenzaci účinníku sítě.

Synchronní alternátor slouží k přeměně mechanické energie na energii elektrickou. Mechanickou energii dodávanou vodními turbínami hydroalternátorům a parními turbínami turboalternátorům, tyto stroje přeměňují za využití točivého magnetického pole na energii elektrickou. Pro účely této práce se omezíme na stručný popis trojfázového turboalternátoru o velkém výkonu, jehož statorové vinutí je chlazeno demineralizovanou vodou, rotor, magnetický obvod a ostatní aktivní části stroje jsou

chlazeny vodíkem. Tato konstrukce vytváří základní předpoklady pro aplikaci diagnostické metody Core-monitoring.

Stator turboalternátoru tvoří jeho plášť, který má tvar dutého válce svařeného z plechů s výstužnými žebry. Uvnitř pláště je upevněn magnetický obvod složený z elektrotechnických plechů. Aby nedocházelo k velkým ztrátám v železe, jsou plechy magnetického obvodu od sebe odizolovány lakem. V pravidelných rozestupech se mezi elektrotechnické plechy vkládají distanční vložky, které vytvářejí kanálky umožňující proudění chladicího média, v našem případě vodíku. Celý magnetický obvod je stažen svorníky pomocí čelních stahovacích desek. Vinutí statoru dvojpólového alternátoru tvoří tři cívky umístěné v drážkách na vnitřním obvodu z plechů složeného magnetického obvodu, vzájemně prostorově natočené o 120°. Konce vinutí jsou spojeny do uzlu a začátky jsou vyvedeny přes průchodky zabezpečující plynutěsnost stroje na jeho plášť.

Turboalternátory jsou rychloběžné stroje poháněné parními turbínami pracující nejčastěji s dvojpólovým rotorem na otáčkách 3000 min⁻¹. Z důvodu vysokých otáček se používá výhradně hladký rotor vykováný z jednoho kusu. Jako materiál pro výkovek se používá chromniklová ocel s přísadou molybdenu. Rotorové vinutí je založeno ve vyfrézovaných drážkách a proti vytržení působením odstředivých sil je zabezpečeno bronzovými klíny.

Na prodloužené hřídeli rotoru turboalternátoru jsou umístěny sběrací kroužky, přes které je na rotorové vinutí přivedeno budící napětí. Po připojení budícího napětí začne rotorovým vinutím protékat stejnosměrný proud, jenž v okolí rotoru vytvoří stejnosměrné magnetické pole. Otáčející se rotor poháněný turbínou se stává zdrojem točivého magnetického pole. Toto pole protíná statorové vinutí a indukuje v něm napětí, které je vyvedeno na svorky stroje. Při nezatíženém stroji (například před přifázováním k síti) neprochází statorovým vinutím proud. Po připojení alternátoru k síti začne statorovým vinutím procházet střídavý proud, který vytvoří točivé magnetické pole. Pro námi popisovaný dvojpólový stroj odpovídá jedna perioda střídavého indukovaného napětí jedné otáčky rotoru o 360°. Aby střídavé indukované napětí mělo frekvenci 50 Hz bude tedy pro otáčky stroje obecně platit:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1)$$

n – otáčky synchronního stroje

f – frekvence indukovaného napětí ve statoru v Hz

p – počet pólových dvojic, dvoupólový stroj má $p = 1$

Pro dvoupólový stroj se svorkovým napětím o frekvenci 50 Hz:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (2)$$

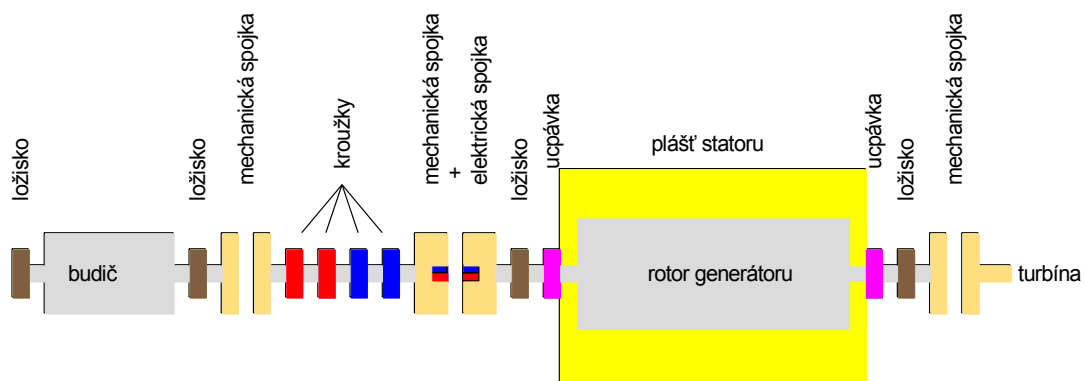
2.2 Konstrukční popis inovovaného turboalternátoru 1111 MVA

Vlastní turbogenerátor je uzavřený dvoupólový, třífázový, synchronní generátor s kombinovaným chlazením. Vinutí statoru, průchodky a nulová spojka jsou chlazeny demineralizovanou vodou, ostatní aktivní části stroje vodíkem a sběrací zařízení vzduchem.

Vnitřní kostra statoru stroje, v níž je uloženo železo statoru s vinutím, je pružně uložena ve dvoudílné vnější kostře, na jejíž obě strany navazuje dvoudílné víko. V každém víku jsou dvě dvoudílné sekce chladiče vodíku.

Rotor stroje je jednodílný výkovek s nasazenou spojkou pro pevné spojení s posledním nízkotlakým rotorem turbíny, tato spojka musí přenést zkratový výkon turbogenerátoru 21155 kNm. Na opačné straně je rotor spojen nakovanou spojkou s rotorem sběracího zařízení, který má na opačném konci ložisko a spojku pro spojení s rotorem budicího generátoru. Ložiska rotoru turbogenerátoru jsou v jeho štítech. Schematické složení je na obrázku č. 1.

Tři fázové vývody proudu ze stroje jsou na spodku víka, strana budiče a tři nulové vývody s nulovou spojkou jsou na vrchu horního víka. Vývody jsou v zapouzdřeném provedení.



Obr. č.1 Schematické složení

Technická data turbogenerátoru:

typ	H682972/2-VH
jmenovitý zdánlivý výkon	1111 MVA
jmenovitý činný výkon	1000 MW
jmenovitý účinník	0,9 IND
jmenovitý kmitočet	50 Hz
jmenovité sdružené napětí statoru	24000 ± 5% V
jmenovitý proud statoru	26730 A
jmenovité otáčky	3000 ot./min
třída izolace vinutí statoru a rotoru	F (využití ve třídě B)
max. induktivní výkon při UN a $\cos \varphi = 0,0$	780 MVA _r
max. kapacitní výkon při UN a $\cos \varphi = 0,0$	350 MVA _r
poměrný proud nakrátko	0,4
zapojení vinutí statoru	hvězda
počet vývodů vinutí statoru	6
smysl otáčení rotoru	vpravo při pohledu od turbíny
buzení (štítkové hodnoty):	
- pro chod naprázdno	2010 A, 122 V
- pro jmenovité zatížení	7280 A, 513 V
odpor vinutí rotoru	0,0562 Ω / 20°C
odpor fáze vinutí	0,00116 Ω / 20°C
kapacita fáze vinutí C0,2 Un	0,21 μF
účinnost stroje včetně ztrát v budícím systému a beze ztrát v ložisku mezi turbinou a strojem	98,78 %
Chlazení:	
primární chladivo vodík:	
tlakový režim	JT
jmenovitý tlak	500 kPa
čistota	97÷99,5 % H ₂
teplota za chladičem max.	40 °C
primární chladivo statorová demivoda:	
celkové průtočné množství	160 m ³ /h

dílčí průtok fázovými vývody	10 m ³ /h
dílčí průtok nulovými vývody včetně nulové spojky	10 m ³ /h
teplota na vstupu do vinutí max.	40 °C
vodivost na vstupu do vinutí max.	4 μS/cm
teplota na výstupu z vinutí cca	66 °C
sekundární chladivo demivoda, vložený okruh:	
celkové průtočné množství chladičem H ₂	900 m ³ /h
celkové odváděné ztráty	8000 kW
teplota na vstupu do chladiče H ₂ max.	33 °C
chladič vodíku:	
počet samostatných dvoudílných sekcí	4

2.2.1 Buzení

Budící proud dodává do turbogenerátoru budící systém. Přenos budícího proudu z budícího systému do vinutí rotoru generátoru umožňuje sběrací zařízení. Budící proud je přiveden pasovinou ke spirálním skříním s držáky uhlíků. Přes uhlíky, kluzný kontakt uhlík – kroužek je proud vodiči uloženými ve vývrtu rotoru sběracího zařízení přiveden k elektrické spojení mezi rotorem sběracího ústrojí a rotorem generátoru. Přívod proudu k vinutí rotoru je uložen ve vývrtu vlastního rotoru, kde je chlazen vodíkem a utěsněn proti jeho úniku ze stroje. Podrobnější popis budícího systému není pro účel této práce podstatný.

2.2.2 Magnetický obvod

Magnetický obvod je složený z nízko ztrátových orientovaných plechů Eo11, tloušťky 0,35 mm, mající povrch izolovaný Kerizolem K2 a dvakrát izolačním lakem třídy F. Chlazení plechů statoru je axiální, plyn prochází ve jhu vyraženými kruhovými otvory. Přívod chladícího média, v našem případě vodíku, je ze strany turbíny, mezi pláštěm vnitřní kostry a jhem magnetického obvodu. Studený plyn je rozváděn do plechů radiálními mezerami. Výfuk plynu je proveden částečně axiálně přes stahovací desky plechů do sání kompresorů, ale větší část otepleného plynu je vyvedena do plynové mezery. Stažení plechů statoru je provedeno nemagnetickými svorníky, procházejícími středem plechů a přitahujícími k sobě masivní nemagnetické desky.

2.2.3 Rotor

Vinutí rotoru je z dutých měděných vodičů, uložených a zaklínovaných v drážkách rotoru a protékaných chladícím vodíkem. V drážkách pro vinutí rotoru a v mělkých drážkách v pólech rotoru jsou uloženy vodiče tlumiče, které jsou vodivě spojeny s drážkovými klíny a s obručkami rotoru. Rotorové obruče chrání čela vinutí před účinky odstředivých sil.

2.2.4 Chlazení rotoru a magnetického obvodu

Na obou koncích hřídele rotoru generátoru jsou instalovány jednostupňové radiální kompresory s bezlopatkovými difuzory zajišťující cirkulaci chladícího vodíku ve všech chladících větvích ve stroji. Kompresor na straně turbíny zajišťuje chlazení statoru a kompresor na straně budícího generátoru zajišťuje chlazení rotoru.

Teplý vodík ženu kompresory do sekcí chladiče, z nichž se vychlazený rozvádí dále. Na straně turbíny proudí vodík od sekcí chladiče do kanálů vnitřní kostry a z nich ke dvěma vstupním zónám železa statoru, odkud proudí do axiálních kanálů ve jhu a v zubech železa statoru. Uprostřed stroje vystupuje výstupní zónou a kanálky v zubech do plynové mezery. Z obou vstupních zón železa statoru proudí část vodíku ke krajům železa, kde chladí jeho stahovací a stínící zařízení a odtud vstupuje do prostoru čelních spojek vinutí.

Chlazení rotoru je oboustranné a symetrické. Na straně budícího generátoru proudí vodík do prostoru vnějších štítů, odkud vstupuje do axiálních kanálů v hřídeli rotoru, proudí pod kompresorovými koly a vstupuje pod obruče rotoru. Odtud proudí dutými vodiči vinutí rotoru do jeho středu, kde vystupuje do plynové mezery. Část vodíku vystupuje z čel vinutí rotoru.

Vodík oteplený železem statoru a jeho krajními částmi a vodík oteplený rotorem proudí společně ke kompresorům, které jej protlačují chladičem.

Chladič vodíku chladí za provozu stroje oteplený vodík. Dvě sekce chladiče, umístěné na bocích víka - strana turbíny, chladí vodík pro stator a dvě sekce chladiče, umístěné na bocích víka - strana budícího generátoru, chladí vodík pro rotor. Každý díl chladiče má samostatná víka a je zcela oddělen od sousedního dílu tvořícího s ním jednu sekci. Na horním víku má přípojovací příruby pro přívod a odvod sekundární chladící demivody a návarky na teploměry. Na spodním víku má armaturu pro vypouštění vody. Převod ztrátového tepla z vodíku do vody se děje v žebrovice chladiče. Pro odvodušnění

je každý díl chladiče opatřen na potrubí odvzdušňovací armaturou. Každý díl chladiče je samostatně napájen vodou a díly každé sekce chladiče jsou na straně vodíku řazené za sebou. Toto uspořádání umožňuje odstavit netěsný díl chladiče a pokračovat v provozu stroje se sníženým výkonem na 66 %.

2.2.5 Vinutí statoru

Vinutí je provedeno v izolační třídě F (155 °C). Trojfázové vinutí stroje je šestiřázově rozstříháno ve smyčkovém dvouvrstvém uspořádání. Má půlcívkové dvouvrstvé uspořádání tvořené Roebelovými tyčemi, které umožňují dosáhnout menších ztrát vířivými proudy a menších vyrovnávacích proudů. Tyče horní a spodní polohy jsou nestejných výšek z důvodu příznivějšího rozdělení přídavných ztrát. Tyče jsou složeny z trojic měděných vodičů. V každé trojici je mezi dvěma plnými izolovanými vodiči jeden holý dutý, kterým proudí chladící voda. Spodní tyč je tvořena ze sestavy 2x6 a horní z 2x8 takovýchto trojic. Vinutí statoru je chlazeno vodou, která prochází přímo všemi aktivními vodivými částmi.

Pro izolaci tyčí je použit izolační systém RELANEX ŠKODA, jehož základním komponentem je předimpregnovaná izolace na bázi remiky (slídového papíru) a skelné delubrikované tkaniny, které jsou vzájemně vázány epoxidovým pojivem. Tento reaktoplastický (***Reaktoplasty** (dříve termosety, duromery, duroplasty) jsou zesíťované polymery, které vytvářejí prostorovou trojrozměrnou síť. Zesíťování nastává až při tváření plastu vlivem tepla a tlaku, někdy působením katalyzátorů. Jakmile je zesíťování dokončeno, není další tváření možné, protože opětovným dodáváním tepelné energie není možno hmotu roztavit. Husté příčné zesíťování se nazývá vytvrzování*) [1] systém vyhovuje třídě "F" (155 °C). Dlouhodobé zkoušky dielektrické pevnosti dosahují hodnoty 24 kV/mm a podle údajů výrobce předpokládané životnosti 35 let.

Jako zlepšená ochrana proti částečným výbojům je použita tzv. vnitřní polovodivá ochrana. Tato ochrana pracuje na principu snížení koncentrace elektrického pole na hranách tyčí a v oblastech permutujících vodičů. Pro snížení částečných výbojů je samotná tyč chráněna ovinutím polovodivou páskou. Vytvrzením polovodivé pásky společně s izolací vodičů vznikne souvislá polovodivá ochrana. Takto vyrobená tyč je natřena polovodivým lakem na bázi grafitu, který na povrchu tyče vytvoří rovnoměrnou polovodivou vrstvu zaručující rovnoměrné rozložení elektrického náboje po povrchu izolace.

Vinutí je upevněno v drážkách klínováním tak, aby byly v co největší míře odstraněny všechny vůle, které by měly za následek pohyb tyče v drážce a zároveň bylo dosaženo co největšího styku polovodivé vrstvy se železem statoru. Zaklínování je provedeno drážkovými klíny ze sklolaminátu, pod které jsou při zavádění zakládány sklotextitové podložky. Za pomoci podložek je dosaženo maximálního tahu klínu v celé jeho délce.

Vodní okruh chlazení vinutí statoru je jednocestný, tzn., že všemi tyčemi vinutí uloženými v drážkách statoru protéká chladicí demivoda paralelně. Vstup vody do tyčí je z rozváděcího kruhu na straně budícího generátoru a výstup vody z tyčí je do rozváděcího kruhu na straně turbíny. Obě tyče každé drážky jsou na obou stranách propojeny s rozváděcím kruhem izolační teflonovou hadicí. Paralelně s tyčemi jsou napájeny fázové a nulové průchodky včetně nulové spojky. Cirkulaci chladicí demivody okruhem vinutí včetně jeho paralelních cest zajišťuje systém vodního hospodářství generátoru se dvěma čerpadly. Obě čerpadla jsou odstředivá, poháněná elektromotory ($Q = 192 \text{ t/h}$, $H = 88 \text{ m}$, 55 kW , 380 V). V provozu je vždy jedno z obou čerpadel jako pracovní a druhé slouží jako záložní.

Rychlost proudění vody v dutých vodičích vinutí je navržena tak, aby odpovídající tlakový spád ve vinutí vyhovoval požadavku přetlaku vodíku proti vodě ve všech místech vodního okruhu ve stroji. V případě malé netěsnosti ve vodním okruhu (šroubení, hadice apod.) bude vnikat vodík do vodního systému, kde je indikován a provoz může pokračovat do té doby, dokud únik vodíku do vody nepřekročí dovolenou mez.

3 Problematika izolačního systému generátoru

Při hodnocení spolehlivosti elektrického stroje hrají hlavní roli elektroizolační materiály. Pro účely diagnostiky stavu izolačního systému se provádějí tyto testy:

- Velikosti změny proudu a napětí
- Mezizávitové zkraty vinutí rotoru
- Elektrický moment a torze hřídele [9]
- Chladiče vodíku a ventilační okruh
- Chlazení vinutí statoru
- Chlazení vinutí rotoru

- Chvění čel vinutí statoru
- Únik chladicího vodíku

Na elektroizolační materiály působí při provozu stroje vždy současně několik degradačních vlivů. Tyto vlivy můžeme rozdělit na podnební, kam patří teplota, vlhkost, sluneční záření, vítr, prach, tlak vzduchu a řada dalších. Další kategorii můžeme vytvořit z vlivů vyplývajících z provozu stroje. Tyto vlivy jsou zejména z elektrického původu: elektromagnetické pole, proudové zatížení, při poruchových stavech je to přepětí nebo zkrat. Do vlivů vyplývajících z provozu stroje patří i mechanické činitele jako vibrace, chvění, radioaktivní záření.

Souhrn všech těchto vlivů má za následek snížení elektrické pevnosti materiálu v čase, tedy jeho stárnutí. Klasifikace těchto činitelů, včetně jejich odstupňování, je uvedeno v ČSN EN 60 721-3 „Klasifikace podmínek prostředí“ Část 3: Klasifikace skupin parametrů prostředí a jejich stupňů přísnosti.

Pro modelování stárnutí izolačních systémů se používá Simoniho model, Ramuuv model, Fallouuv model nebo Carineův model. Popsání principů těchto modelů je nad rozsah této práce.

Elektrická pevnost nám vyjadřuje odolnost izolačního materiálu vůči elektrickému poli. Elektrická pevnost E_p (3) je definována jako poměr průrazného napětí U_p přepočítaného na jednotku tloušťky d proraženého izolantu. Při elektrickém průrazu je překročena elektrická pevnost dielektrika. Elektrická pevnost dielektrika není konstantní. Je závislá na teplotě, tloušťce dielektrika, vlhkosti.

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad [V \cdot m^{-1}] \quad (3)$$

U pevných dielektrik dochází na rozdíl od plyných nebo kapalných k trvalému poškození.

3.1 Mechanické vlivy

Při provozu generátoru dochází k působení velkých mechanických sil na celý elektrický systém stroje. V důsledku působení těchto sil může dojít například k uvolnění tyče vinutí v drážce stroje, popraskání čel vinutí nebo k poškození magnetického obvodu statoru.

3.1.1 Uvolnění tyčí v drážce

Tyč vinutí musí být vyrobena a v drážce uložena s co nejvyšší přesností a pevně zaklínována. Každý sebemenší pohyb tyče vede k poškození polovodivého nátěru, v principu k jeho střídavému přibližování a oddalování od železa statoru. Oddalováním tyče od jádra statoru dochází ke shromažďování náboje na vzniklé kapacitě vzduchové mezery mezi tyčí a jádrem. Následně při dalším doteku dojde k vybití tohoto náboje. K tomuto procesu dochází s dvojnásobnou frekvencí, než je frekvence svorkového napětí stroje.

V důsledku tohoto děje dojde k úplnému odstranění polovodivého nátěru z povrchu tyče a povrch tyče není tedy uzemněn ani nepřímo. Na takovýchto místech pak dochází již ke klasickým drážkovým částečným výbojům, které dále zvyšují míru degradace izolačního systému.

3.1.2 Uvolnění plechů statoru

Dojde-li k uvolnění stažení magnetického obvodu, má to za následek vzájemný pohyb plechů vůči sobě. Vzájemné otírání plechů o sebe postupně odstraní izolační nástřik plechů a dojde k jejich vodivému kontaktu. Po odstranění izolační vrstvy mezi plechy dojde k nárůstu vířivých proudů a jejich působením k lokálnímu zvýšení teploty vedoucího v krajním případě až k natavení magnetického obvodu.

3.1.3 Vibrace čel vinutí

Při uvolnění výztuže nebo její malé pevnosti z doby montáže, dochází k vibracím čel vinutí tzn. konců vinutí mimo drážku statoru. V důsledku těchto vibrací dochází k popraskání a olupování izolace tyčí vedoucí k jejímu průrazu. Mechanické namáhání takto uvolněných tyčí může vést i k porušení těsnosti chladicího okruhu a k úniku demineralizované vody do prostoru stroje. Jako on-line indikátor vibrací čel vinutí lze použít vhodné snímače-akcelerometry.

3.1.4 Čistota montáže a dodržování technologických postupů

Ihned po vyjmutí rotoru před vstupem do stroje je nařízen úklid okolí stroje a vytyčení prostoru čisté montáže. Toto je důležité pro zamezení zanášení nečistot do stroje. Znovu je třeba zdůraznit, že tuhost upevnění vinutí má značný vliv na životnost

vinutí. Při snížení tuhosti začíná docházet k vzájemným pohybům vinutí, které vedou k poškození izolace, jak popisují výše. Tento proces značně zintenzivní právě znečištění vnitřku stroje, zejména znečištění olejem nebo mastnými nečistotami z oděvu či obuvi. Přítomnost mastnoty způsobuje snížení koeficientu tření u všech styčných ploch vinutí s ostatními výztužnými elementy. Tím dochází ke snížení tuhosti vinutí v drážkové i čelní části.

Proto je důležité dodržování technologických postupů při revizích stroje. Do stroje vstupovat vždy po přezutí do čisté bílé obuvi a po převlečení do čistého oděvu. Používat pouze čisticí prostředky a materiály jmenované v technologickém postupu údržby. Veškeré nářadí vnášené do stroje má být evidováno. Důsledky nedodržení těchto postupů jsou patrné z rozboru havárie ve Švédské elektrárně Ringhals.

3.2 Vliv teploty

Roztřídění materiálů podle odolnosti vůči působení tepla se zabývá ČSN EN 60 085 ed.2 vydaná v srpnu 2008. Roztřídění do tříd je uvedeno v tabulce č. 1, kde je každé třídě přiřazena mezní teplota, do které je materiál použitelný.

Tepelná degradace je v první fázi patrná při vizuální prohlídce stroje. Vzhledem k teplotní roztažnosti materiálu dojde k uvolnění klínů fixující tyče statorového vinutí v drážce. Působení částečných výbojů vede k lokálnímu přehřívání izolace. Působení tepelných účinků povrchových výbojů je patrné při prohlídce povrchu izolace.

Celkově lze negativní působení vysoké teploty na izolační systém charakterizovat těmito degradačními projevy:

- dochází ke strukturálním změnám v materiálu
- vznik chemických reakcí
- změny objemu materiálu – dilatace
- v důsledku sublimace vznik dalších dutinek v izolaci – nárůst částečných výbojů

V důsledku působení těchto procesů dochází ke změnám elektrických vlastností materiálu, ztrátě mechanické pevnosti, dochází ke změnám modulu pružnosti, měknutí materiálu a v celkovém součtu ke zkrácení životnosti.

Tabulka č. 1 - Přiřazení tepelných tříd [5]

ATE nebo RTE °C		Tepelná třída °C	Písmenné označení
≥90	<105	90	Y
≥105	<120	105	A
≥120	<130	120	E
≥130	<155	130	B
≥155	<180	155	F
≥180	<200	180	H
≥200	<220	200	N
≥220	<250	220	R
≥250 ^b	<275	250	-

3.3 Vliv vlhkosti

Ačkoliv vlhkost je jedním z nejvýznamnějších činitelů způsobujících degradaci izolačního systému, nebudeme její působení v této práci dále rozpracovávat. Námi diagnostikovaný izolační systém pracuje v atmosféře složené z 99,9 % z plynu H₂ pod tlakem 500 kPa. Po celou dobu provozu je vodík kontinuálně vymrazován dvěma vymrazovači při teplotě -15 °C.

Během odstávek, kdy je H₂ ze stroje vypuštěn, probíhá nepřetržitě profukování vnitřních částí stroje sušeným vzduchem. Pro snížení relat. vlhkosti vzduchu v generátoru je použit sušený vzduch, který je sušen na teplotu rosného bodu -40 °C při tlaku 600÷750 kPa a jehož parametry jsou kontrolovány na výstupu z nízkotlaké kompresorové stanice.

4 On-line diagnostika částečných výbojů

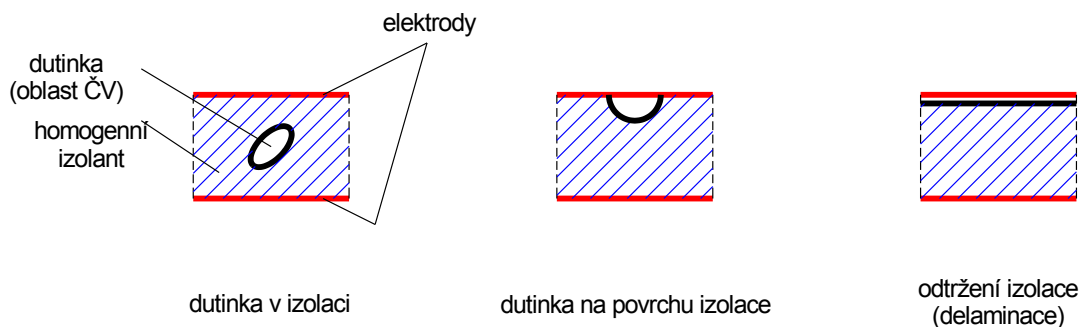
4.1 Teorie ČV

Při výrobě izolačních systémů se nelze vyhnout vzniku mikroskopických nehomogenit v izolačním materiálu. Tyto mikroskopické dutiny různých tvarů jsou ve výsledku náhodně rozloženy v celé tloušťce vyrobené izolace. Jsou vyplněny vzduchem nebo plynem. Dalším procesem, který vede ke vzniku těchto dutinek, je působení

velkého lokálního elektrického namáhání. Tyto dutinky jsou namáhány více než pevný kompaktní izolant - relativní permitivita těchto dutinek je, v závislosti na druhu plynové náplně, několikrát menší než okolní homogenní izolant.

Při působení silného elektrického pole dochází v těchto dutinkách k výbojům. Termín částečné výboje tedy vyplývá z vlastností tohoto výboje. Tímto výbojem není překlenuta celá izolace, ale pouze její část. Zbylá část izolace stále plní svou funkci a vydrží plnou hodnotu zkušební nebo provozního napětí stroje. Délka trvání částečného výboje nepřesahuje 1 μ s. Tyto výboje můžeme zjednodušeně rozdělit podle místa vzniku následovně:

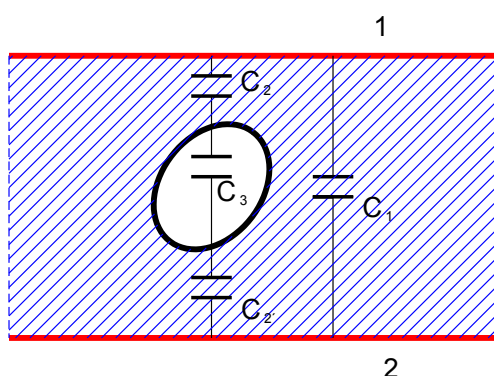
- Mezi vodičem a izolantem při nedokonalém přiléhání izolace (delaminaci) na tyč vinutí.
- V dutinkách uvnitř izolantu.
- Na povrchu izolantu mezi místy s odřeným polovodivým nátěrem tyčového vinutí a železem statoru (tzv. drážkové výboje).
- Na povrchu vinutí v místech výstupu vinutí z drážky (tzv. klouzavé výboje).



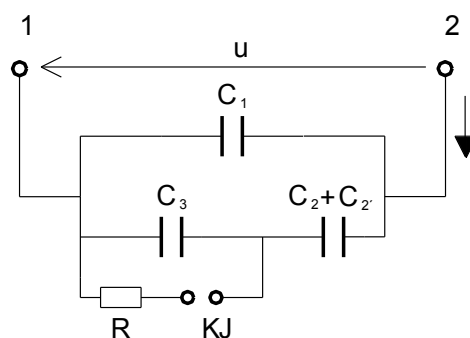
Obr. č.2 Druhy dutinek v izolantu

Ke klouzavým výbojům dochází při dostatečně velké tangenciální složce intenzity elektrického pole označované jak $\text{tg}\delta$. Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ je definován jako tangens úhlu, o který se liší fázový posun proudu zkoušeného izolantu od ideálního čistě kapacitního jalového proudu I_c . Velikost ztrátového činitele je jedním z parametrů, podle kterého lze posuzovat stav (stárnutí) izolačního systému. Pravidelné provádění jeho měření je doporučeno většinou výrobci točivých vn strojů. Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ je bezrozměrné číslo vyjadřující ztráty v dielektriku a nabývá hodnot 0 až 1.

Podle umístění superponovaných impulsů ČV, vzhledem ke křivce sinusového průběhu napájecího napětí, je možné určit zdroj (místo) výbojové činnosti. Na následujícím zjednodušeném modelu je názorně vidět průběh ČV v dutinkách izolantu.



Obr. č.3 Model dutinky v izolantu



Obr. č.4 Náhradní schéma ČV

- C_1 – kapacita homogenního dielektrika
- $C_2 + C_2'$ – kapacita dielektrika v sérii s kapacitou dutinky
- C_3 – kapacita dutinky
- R – odpor výbojového kanálu
- KL – přeskok na kulovém jiskřišti modeluje ČV

Na obrázku č.3, je znázorněna modelová situace částečných výbojů v plynové nehomogenitě v jinak kompaktním izolantu. Na náhradním schématu na obrázku č.4 nám kondenzátor C_1 představuje kapacitu zdravé části izolace, kondenzátory C_2 zdravé části izolace mezi dutinkou a elektrodami. Kondenzátor C_3 nám nahrazuje kapacitu plynem vyplněné dutinky. Na obrázku č. 5 je znázorněn případ výskytu shluku částečných výbojů v prvním kvadrantu. Umístění výbojů vychází z údajů získaných při změření času výskytu částečných výbojů. Časový údaj vymezující začátek a konec shluku výbojů společně s frekvencí napájecího napětí nám umísťuje výboje do příslušného kvadrantu. Podle umístění v příslušném kvadrantu je možné specifikovat typ a místo vzniku ČV.

Příklad výpočtu:

Na zkoumaném zařízení byli naměřeny shluky částečných výbojů ohraničené časy t_1 t_2 pro vznik a ukončení výbojové činnosti první skupiny výbojů a časy t_3 t_4 druhé skupiny výbojů při frekvenci svorkového napětí 50 Hz.

$$f = 50 \text{ Hz} \Rightarrow T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0,02$$

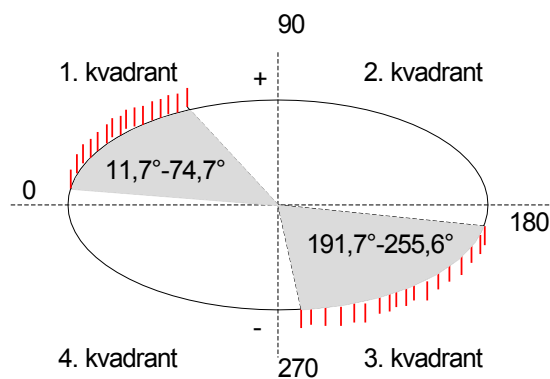
$$t_1 = 0,00065 \text{ s} \quad t_2 = 0,00195 \text{ s}$$

$$t_3 = 0,01065 \text{ s} \quad t_4 = 0,0142 \text{ s}$$

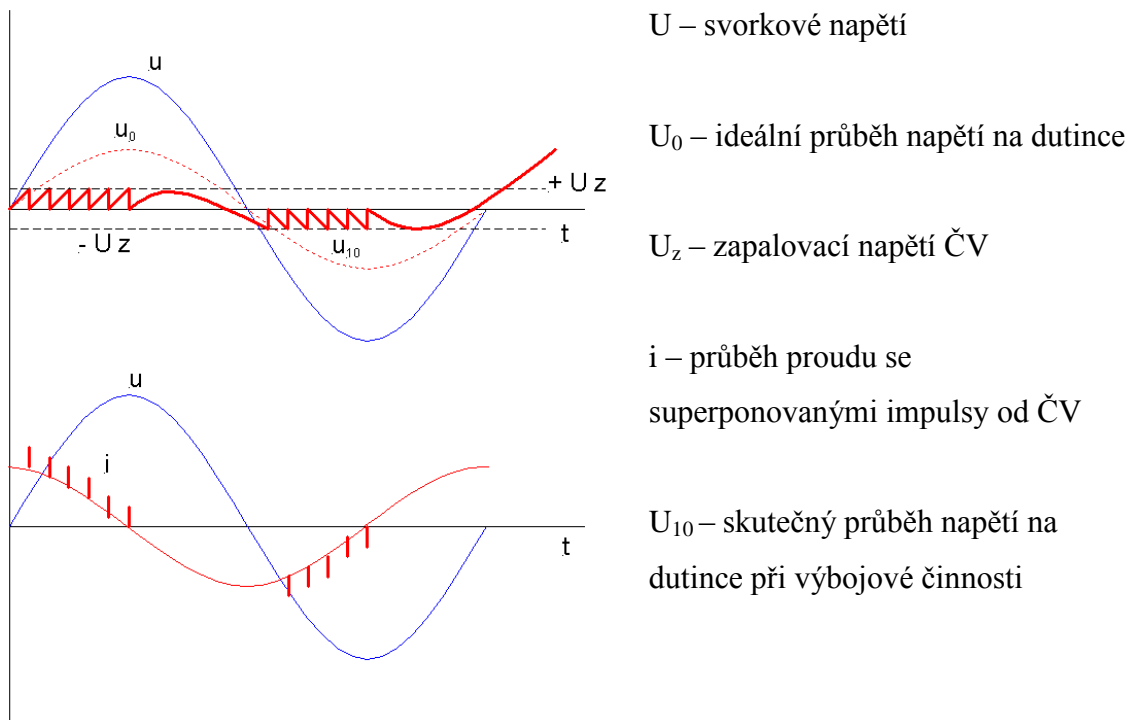
$$\varphi_1 = 360 \cdot \frac{t_1}{T} = 360 \cdot \frac{0,00065}{0,02} = 11,7^\circ \quad \varphi_2 = 360 \cdot \frac{t_2}{T} = 360 \cdot \frac{0,00195}{0,02} = 74,7^\circ$$

$$\varphi_3 = 360 \cdot \frac{t_3}{T} = 360 \cdot \frac{0,01065}{0,02} = 191,7^\circ \quad \varphi_4 = 360 \cdot \frac{t_4}{T} = 360 \cdot \frac{0,0142}{0,02} = 255,6^\circ$$

Umístění výbojové činnosti do prvního a třetího kvadrantu je charakteristické pro výbojovou činnost v dutinkách a dalších nehomogenitách uvnitř izolantu.



Obr. č.5 Umístění výbojů v prvním a třetím kvadrantu



Obr..6 Umístění impulsů ČV na sinusovém průběhu napětí a proudu

Na osciloskopech komerčních měřicích přístrojů se průběhy částečných výbojů zobrazují jako Lissajousovy obrazce se superponovanými impulsy částečných výbojů. Rozlišujeme několik základních typů částečných výbojů, které jsou v odborné literatuře označovány velkými písmeny A až E [4] a [6]. Každý typ částečného výboje je charakteristický velikostí a umístěním pulsů na křivce napájecího napětí. Rozhodující je zejména fázový úhel. Podle těchto charakteristických vlastností lze tedy určit místo, kde ve stroji k výbojové činnosti dochází. Přehled základních typů uvádím v tabulce č.2 [6].

Tabulka č.2 Vyhodnocení obrazců částečných výbojů [6]

Typ	Osciloskopický obraz	Popis	Typ výboje
A		Pulsy stejné velikosti v jedné půlperiodě symetricky okolo napětového maxima. Se zvyšováním napětí narůstá počet pulsů, ale jejich velikost se nemění.	Uspořádání hrot-deska (tyč-rovina) v plynech. Jestliže se pulsy objevují v záporné půlperiodě, je hrot (tyč) na vysokém potenciálu; jestliže se pulsy objevují v kladné půlperiodě, je hrot (tyč) na zemním potenciálu.
B		Pulsy v obou půlperiodách, symetricky okolo napětových maxim; v jedné půlperiodě pulsy větší, v druhé půlperiodě větší počet menších pulsů stejné velikosti. Se zvyšováním napětí počet pulsů narůstá.	Uspořádání hrot-deska (tyč-rovina) v kapalných izolantech. Jestliže se velké pulsy objevují v kladné půlperiodě, je hrot (tyč) na vysokém potenciálu; jestliže se velké pulsy objevují v záporné půlperiodě, je hrot (tyč) na zemním potenciálu.
C		Pulsy mezi průchody nulou napětí a vrcholy v obou půlperiodách. Pulsy v obou půlperiodách mají přibližně stejnou velikost.	Dutinky v pevném izolantu. Vzduchové dutinky v kapalném izolantu. Dotyk izolovaných vodičů. Výboje na povrchu bez galvanického spojení. Neuzemněné kovové části měřicího obvodu.
D		Pulsy mezi průchody nulou napětí a vrcholy v obou půlperiodách. Pulsy v jedné půlperiodě jsou vyšší než pulsy v druhé půlperiodě.	Dutinky v pevném izolantu u elektrod. Vzduchové dutinky v kapalném izolantu u elektrod. Jestliže se velké pulsy objevují v kladné půlperiodě, jsou výboje na vysokém potenciálu; jestliže se velké pulsy objevují v záporné půlperiodě, jsou výboje na zemním potenciálu.
E		Pulsy symetricky kolem obou průchodů nulovým napětím.	Špatný kontakt mezi kovovými částmi nebo mezi polovodivými (odporovými) vrstvami.

4.1.1 Průvodní jevy výbojové činnosti

Průvodní jevy částečných výbojů můžeme dělit na elektrické a neelektrické.

- Elektrické

- Výskyt vysokofrekvenčního elektromagnetického pole
- Zvýšení dielektrických ztrát
- Proudové pulsy

- **Neelektrické**
 - Vznik chemických zplodin působením výbojové činnosti
 - Světelné záblesky v pásmu viditelného i UV záření
 - Zvukové efekty
 - Lokální ohřev dielektrika v místě působení ČV

Od charakteristických jevů provázejících výbojovou činnost se odvíjejí i metody měření částečných výbojů.

Diagnostická metoda on-line měření částečných výbojů navrhovaná v 3. kapitole této práce využívá elektrického průvodního jevu - výskytu vysokofrekvenčního elektromagnetického pole.

Metoda Core monitoringu popisovaná v kapitole 4 využívá mimo tepelných účinků ohřevu magnetického obvodu vlivem vířivých proudů i neelektrických průvodních jevů lokálního ohřevu a vzniku chemických zplodin uvolněných z izolačního systému na bázi epoxidových pryskyřic působením částečných výbojů.

4.1.2 Veličiny charakterizující ČV

Základní veličiny charakterizující částečné výboje jsou:

- Počáteční napětí ČV – označuje se U_i , jednotkou je V - je to taková hodnota přiloženého napětí, při kterém se začnou trvale vyskytovat částečné výboje v diagnostikovaném objektu.
- Zhášecí napětí ČV – označuje se U_e , jednotkou je V – je to taková hodnota přiloženého napětí, při kterém na diagnostikovaném objektu ustane výskyt částečných výbojů.
- Četnost impulsů ČV – n – udává se v s^{-1} a vyčíslují poměr mezi celkovým počtem impulsů ČV a dobou časového úseku, ve kterém bylo měření prováděno.
- Střední proud ČV – označuje se I a je udáván v $C \cdot s^{-1}$ nebo A , je součtem všech absolutních hodnot zdánlivých nábojů naměřených na svorkách stroje za určený časový interval vydělený tímto intervalem.
- Zdánlivý náboj ČV – označuje se q , měříme ho v C , je to náboj, který by po přiložení na svorky stroje vyvolal na měřící aparatuře stejnou výchylku (změnu napětí) jako částečný výboj.
- špičková amplituda Q_m – je špičková amplituda ČV, která odpovídá opakovací frekvenci 10 pulsů/s. Ukazuje, jak vážná je porucha v nejhroším místě izolace.

4.2 Volba snímačů a metody diagnostiky

U generátorů velkých výkonů (obecně nad 800 MW) je vhodné, vzhledem k vyšší hladině výstupního svorkového napětí (námi modernizovaný stroj má svorkové napětí 24 kV) a tím i vyšší úrovni rušení, volit umístění diagnostiky co nejbližší statorovému vinutí. Vysoký stupeň zarušení je dán i rozsáhlou vlastní spotřebou elektrárny připojenou na úrovni svorkového napětí 24 kV viz obr.7. V našem případě se jedná o tři jednofázové transformátorové jednotky 24/400 kV, 400 MW, dva třívínut'ové transformátory 24/6/6 kV, 63 MW, generátorový vypínač, sady PTN a cca 150 m zapouzdřených vodičů 24 kV.

Každoročně je při odstávce uzlu vyvedení výkonu pro revizní práce prováděno měření úrovně částečných výbojů na transformátorových jednotkách 400 MW. Toto měření probíhá s montážně odpojenou linkou 400 kV Temelín – Kočín pro vyloučení rušení přicházejícího z linky. Uzel vyvedení výkonu je pro účely měření napájen z linky 110 kV přes transformátor 7BT1 110/6 kV, rozvodnu 6 kV rezervního napájení vlastní spotřeby a k tomuto účelu vyčleněnou rozvodnu vlastní spotřeby 6 kV BD/a. Vlastní spotřeba bloku elektrárny je po dobu měření převedena na napájení ze sousedního bloku a úroveň rušení neovlivňuje. I při takto omezeném rozsahu připojeného zařízení je měření silně zarušeno. Výtah z protokolu: [8]

Protokol Měření částečných výbojů na transformátorech 2. bloku ETE

Měření proběhlo na napěťových hladinách 0,75 U_n , 0,9 U_n , 1 U_n , 0,9 U_n , 0,9 U_n , 0,75 U_n ,

Naměřené hodnoty při 1 U_n :

Fáze L1 1100 pC

Fáze L2 800 pC

Fáze L3 1950 pC

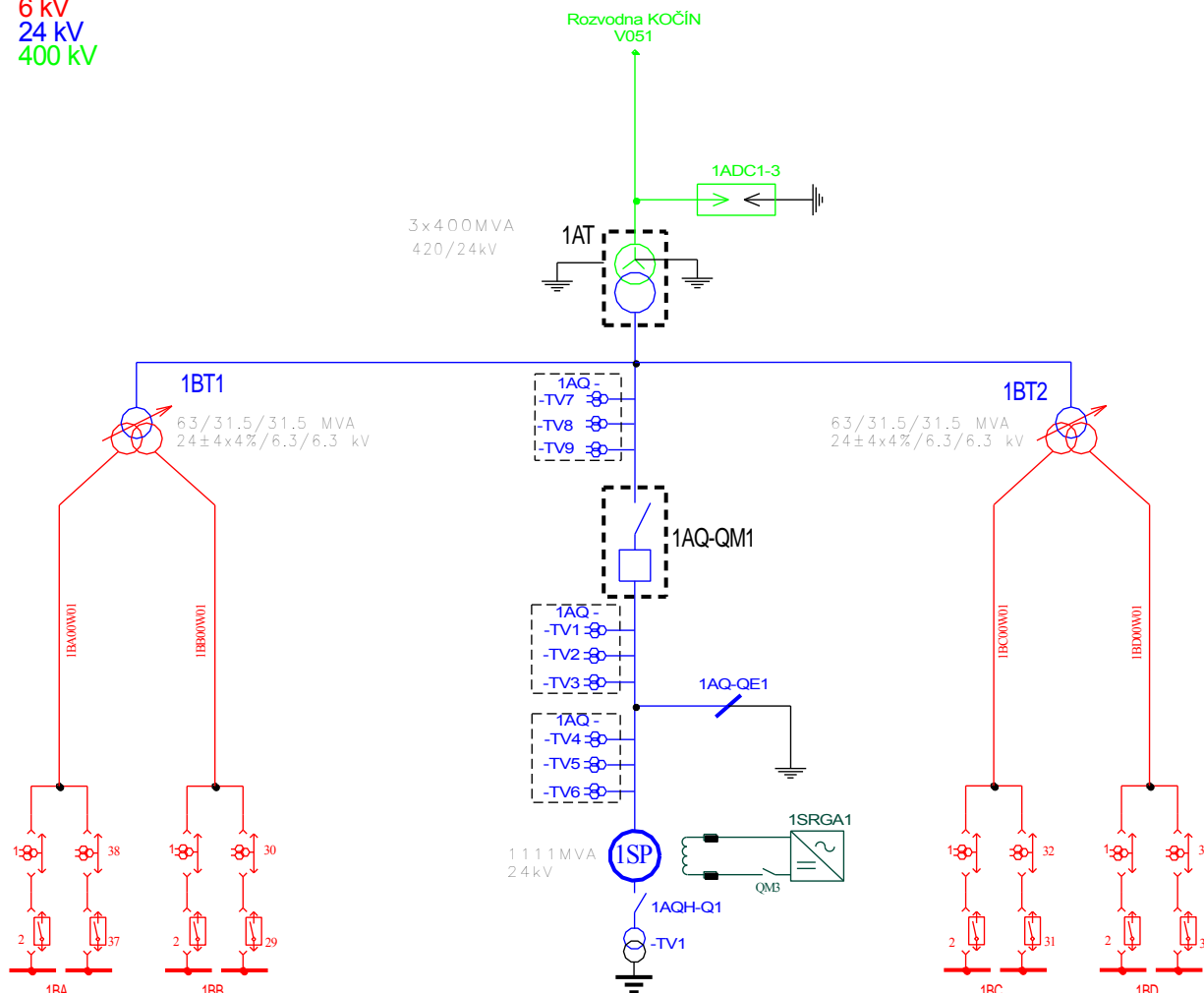
Stav izolační soustavy z hlediska měření částečných výbojů je stabilizovaný. Původ naměřených částečných výbojů nebyl v izolačních systémech transformátorů jednoznačně prokázán. Na jejich vzniku se mohou podílet i izolační soustavy prvků napájecí cesty, měření na straně 24 kV bylo ovlivněno vyšší hladinou rušení a s tím související nižší mezí rozlišitelnosti, kolem 13 000 pC.

Závěr:

Měření je velmi sporné. Rušení dosahuje hodnoty až 13000 pC. Trasa napájení velmi ovlivňuje měření a lze velmi těžko odhalit vznikající poruchu. ČSN připouští hodnoty výbojů 100 - 500 pC. Navrhují od měření upustit, pokud se prokáže spolehlivá funkce kontinuálního monitorovacího systému.

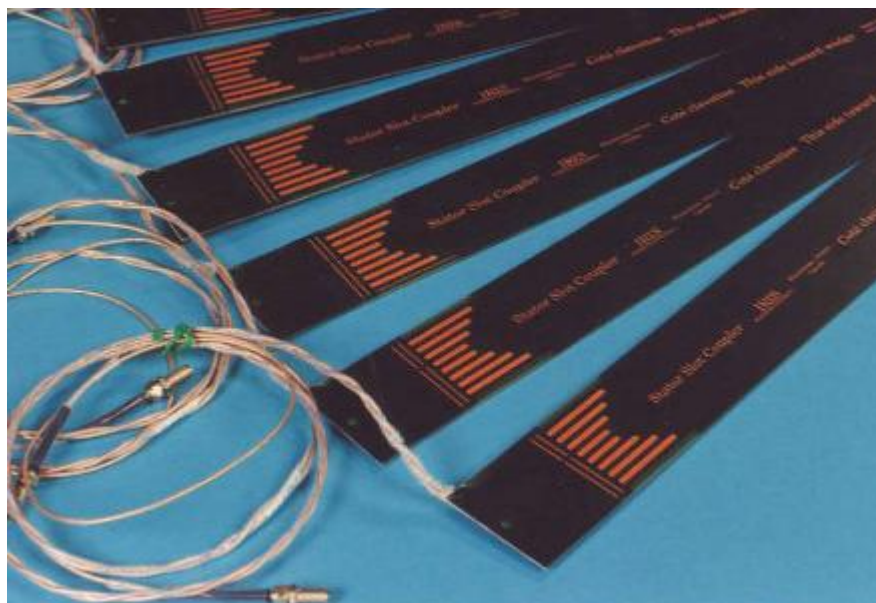
Napěťové hladiny :
 600 V
 6 kV
 24 kV
 400 kV

UZEL PRACOVNÍHO NAPÁJENÍ VLASTNÍ SPOTŘEBY HLAVNÍHO VÝROBNÍHO BLOKU Č.1



Obr. č.7 Rozsah vlastní spotřeby ETE

Vzhledem k těmto výchozím podmínkám se jako vhodné jeví použití sond SSC (Stator Slot Coupler), které se umisťují přímo do krajních částí drážek vinutí stroje. Jedná se v principu o citlivé širokopásmové antény pro příjem pulsů generovaných částečnými výboji. Jejich výhodou je vysoká citlivost, nevýhodou je nutný zásah do stroje při jejich instalaci. SSC sondy se vyrábějí jako tenké podložky (obr. 8) vkládané pod klíny vinutí nebo při navíjení stroje mezi horní a spodní tyč vinutí. Sondu tvoří pásek z izolačního materiálu, jehož jedna strana je pokovená a slouží jako stínění a na druhé straně je přichycen vodič snímající částečné výboje. Její velkou výhodou je necitlivost na vnější rušení.



Obr. č.8 Sada SSC sond od výrobce IRIS POWER LP

Druhou možností je diagnostika on-line částečných výbojů, pro kterou slouží jako zdroj vstupních dat signál získaný pomocí vazebních kondenzátorů zabudovaných do zapouzdřených vodičů za svorkami generátoru. Vazební kondenzátory se připojují jedním vývodem na fázový vodič vyvedení výkonu ze stroje a druhým se spojí galvanicky se zemí. Protože tato diagnostická metoda je více citlivá na rušení, které zmiňuji výše oproti použití metody SSC sondy, nebudu ji dále v této práci podrobně rozpracovávat. Pro úplnost zde ještě uvádím jeden vazební kondenzátor, který by byl použitelný na zařízení našich parametrů od výrobce Power Diagnostix Systems GmbH (obrázek č.9 a 10):

CC25B Coupling Unit

Capacitance:	1nF ($\pm 10\%$)
Rated Voltage:	25 kV _{AC}
Voltage endurance:	50 kV _{AC} (1 min)
PD level:	< 2 pC (>30 kV _{AC})
Temperature range:	-20 °C - +75 °C
Weight:	3,2 kg
Overall Size:	300 x 140 x 170 mm (H x W x D)



Obr. č.9 a 10 Vazební kondenzátory, instalace – katalogový pohled

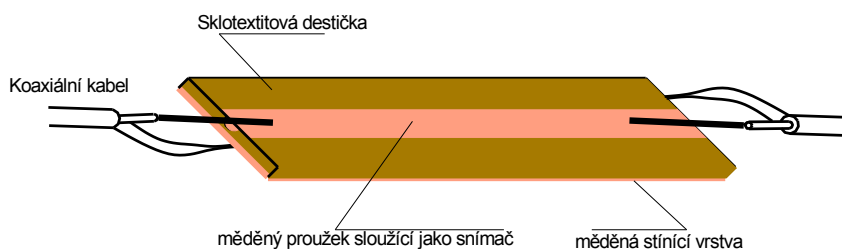
Většina firem na tomto úzce profilovaném trhu se specializuje na generátory menších výkonů nebo na metody využívající vazebních kondenzátorů použitelné na strojích s menším rušením.

Vzhledem k vysoké hladině rušení a komplikovanému filtrování přijímaných signálů jsem jako vhodnější řešení zvolil použití SSC sond, kterým se budu dále věnovat.

4.3. Instalace SSC sond

Největším výrobcem diagnostických on-line systémů pro točivé stroje na světě je firma IRIS POWER LP, která jako jediná nabízí ve svém sortimentu dodávku SSC sond.

SSC sondy se vyrábějí z epoxidového sklolaminátu v tepelné třídě F ve tvaru pásky o tloušťce 2 mm viz obr.11.



Obr. č.11 SSC sonda

Šířku sondy lze upravit zaříznutím podle přesného rozměru drážky, délka dodávané sondy bez úprav je 780 mm, minimální délka, na kterou lze sondu zkrátit je 530 mm. Protože délka klínované části drážky stroje je 7200 mm, nehrozí nám v tomto směru žádné omezení. Ideální okamžik pro instalaci SSC sondy (obr. 12) je při montáži

stroje nebo jeho převýjení, kdy se sondy umísťují jako vložky mezi horní a spodní tyč vinutí.



Obr. č. 12 Montáž SSC sond

U provozovaných strojů se sondy umísťují pod krajní drážkové klíny, kde poté plní i funkci podklínových vymežovacích podložek, které nahradí. U stroje 1000 MW jsou pod klínem dvě vymežovací podložky. Jedna o tloušťce 7 mm a druhá o tloušťce 3 mm. Při instalaci sondy bude druhá 3 mm podložka nahrazena kombinací SSC sondy a 1 mm tlusté podložky, tím bude zachována původní celková tloušťka podklínových podložek a stejné utažení vinutí v drážce viz obrázek č. 13 a 14. Při instalaci sond je nutné postupovat velice opatrně, zejména při vysouvání krajních klínů, kde by při neopatrné manipulaci mohlo snadno dojít k poškození izolace a polovodivého nátěru tyčí. V tomto případě je nutné si vyžádat odborný posudek a schválení navrženého technologického postupu úpravy od výrobce stroje BRUSH SEM s.r.o.. Sondy snímají frekvence v pásmu 10 MHz – 1 GHz. Z hlediska rozlišení ČV od rušení se ukázal tento systém jako velmi efektivní. Zkušenosti popsané v literatuře ukazují, že ČV jsou zde detekovány jako pulsy široké méně než 6 ns, zatímco šířka poloviny pulsu je u rušení nejméně 20 ns. Systém nabízí výbornou lokalizaci zdrojů ČV, lze určit, zda výboje vznikají v drážkách či v čelech vinutí. Nevýhodou SSC sond je přímá detekce ČV jen ze statorové tyče, kde jsou nainstalovány. Případné ČV ve zbývajících drážkách jsou softwarově dopočítávány podle času zaznamenání a velikosti pulsu v jednotlivých sondách.

V nabídce firmy IRIS PWER LP je nabízen pro generátory nad 100 MW výrobní balíček obsahující vše potřebné pro instalaci sond na stroj. I když u strojů nad 800 MW výrobce nabízí v katalogových listech zavedení více než 6 sond, bylo po konzultaci se

zástupcem výrobce diagnostického zařízení a výrobcem generátoru nad konstrukčním řešením modernizovaného stroje, zejména nad provedením statorového vinutí, doporučeno použít i u tohoto výkonu 6 ks sond. Na každou z fází po dvou kusech. Vinutí je uloženo ve 42 drážkách s 1/3 překrytím. Sondy budou uloženy pod klíny krajních tyčí statorového vinutí, jejichž izolace je za provozu namáhána maximálním napětím proti zemi. Pro sledování nejvíce namáhaných částí vinutí navrhuji uložit sondy podle tabulky č.3.

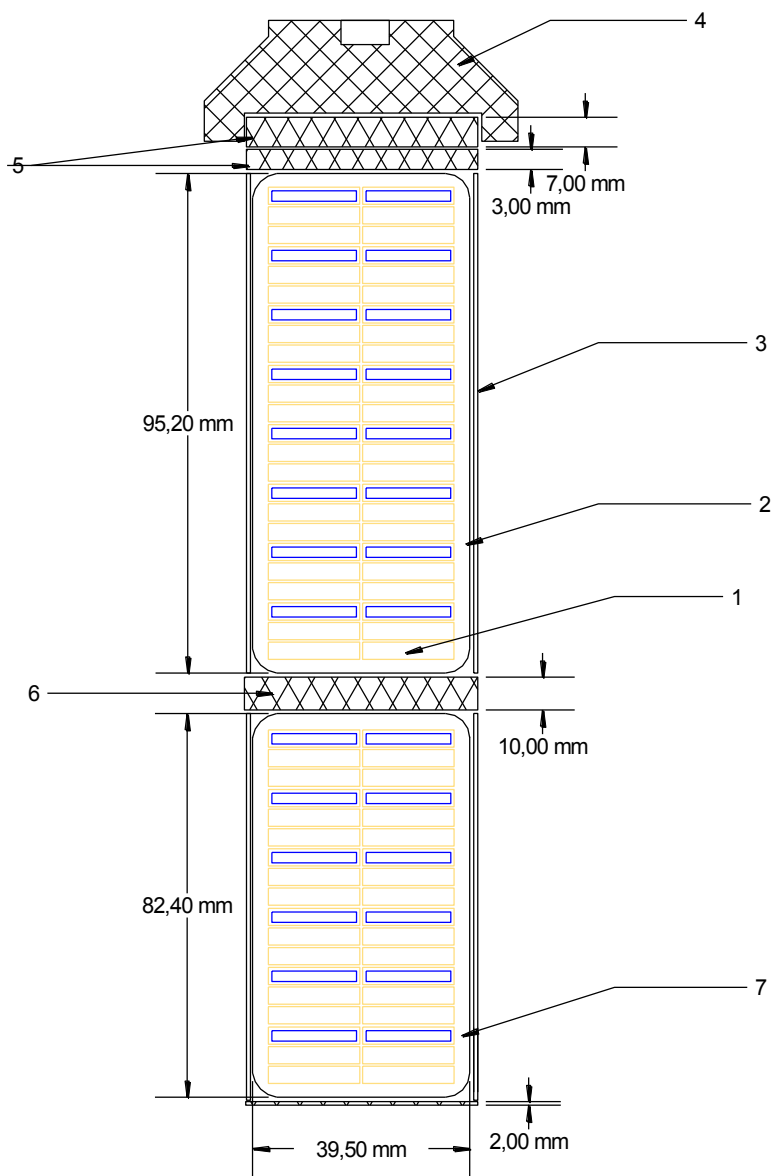
Tabulka č.3 Rozmístění sond v drážkách

Fáze	Číslo drážky 1. sonda	Číslo drážky 2. sonda
L1	42	2
L2	14	16
L3	28	30

Pro stroje chlazené vodíkem je dodáván testovaný systém průchodek koaxiálních kabelů na tlak 2758 kPa. Při provozním režimu PT je inovovaný stroj provozován s přetlakem 600 kPa, což nám dává více než dostatečnou rezervu.

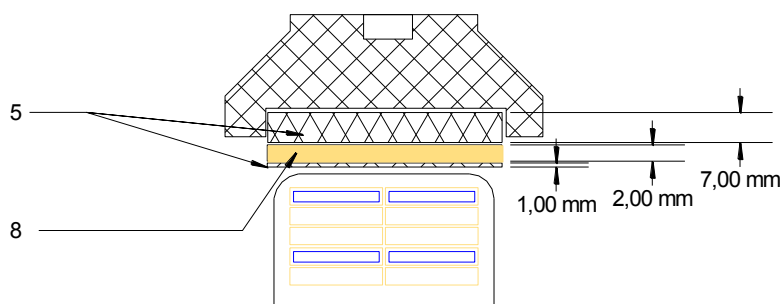
Obsah základní dodávky SSC sond:

- 6ks sondy SSC
- rozvodná skříňka
- koaxiální kabely
- těsnění pro vyvedení kabeláže ze stroje chlazeného vodíkem



- 1 – trojice vodičů, dva plné + jeden dutý, kterým protéká chladící voda
- 2 – horní tyč vinutí
- 3 – boční izolační vložky, vymežující boční vůli tyče v drážce
- 4 – klín vinutí
- 5 – podklínové podložky
- 6 – izolační vložka mezi horní a spodní tyčí vinutí
- 7 - spodní tyč vinutí
- 8 – SSC sonda

Obr. č.13 Uložení vinutí v drážce



Obr. č. 14 Uložení vinutí v drážce stroje a náhrada 3mm podložky SSC sondou

Technická data SSC sond:

- Vyrobeno ze sklolaminátu, NEMAG10 (třída F)
- Šířka pásma 100-1000 MHz
- Impedance 50 Ω
- Délka 780 mm, upravitelná
- Šířka upravitelná dle šířky drážky
- Tloušťka 2 mm
- Senzory (SSC) se vyrábějí v podobě směrové antény, která umožňuje rozlišovat mezi ČV do drážek přicházejících z přední části vinutí generátoru

4.4. Vyhodnocení naměřených údajů

4.4.1 Měřicí aparatura

Firma IRIS vyvinula několik systémů pod společným názvem Guard. Pro monitorování ČV u motorů a menších TBG je určen typ Bus Track nebo složitější BusGuard, oba používají ke snímání ČV vazební kondenzátory. Pro monitorování ČV u velkých TBG vybavených SSC sondami se používá systém TurboGuard pro kontinuální měření aktivity ČV. Jeho přenosnou alternativou je přístroj TGA-S .

Systém umožňuje:

- Spolehlivé monitorování strojů na dálku
- Nepřetržité monitorování a automatický záznam stavu izolace statorového vinutí během provozu
- Automatické předávání informací do kontrolního systému elektrárny – v našem případě do systému UIS a NEMES
- Nezávislé monitorování jednotlivých TBG za přesně definovaných provozních podmínek ze vzdálené kanceláře
- Zjištění rychle se vyvíjející poruchy izolace jako je uvolnění vinutí nebo znečištění čel vinutí
- Lepší interpretaci výsledků zkoušky a sledování trendů dat za podobných provozních podmínek

Systém je citlivý na běžné důvody poškození vinutí, jako je přehřátí, znečištění a uvolnění vinutí. To nám v situaci, kdy systém TurboGuard signalizuje problém, umožňuje plánovat nápravná opatření v dostatečném předstihu.



Obr. č.15 TurboGuard

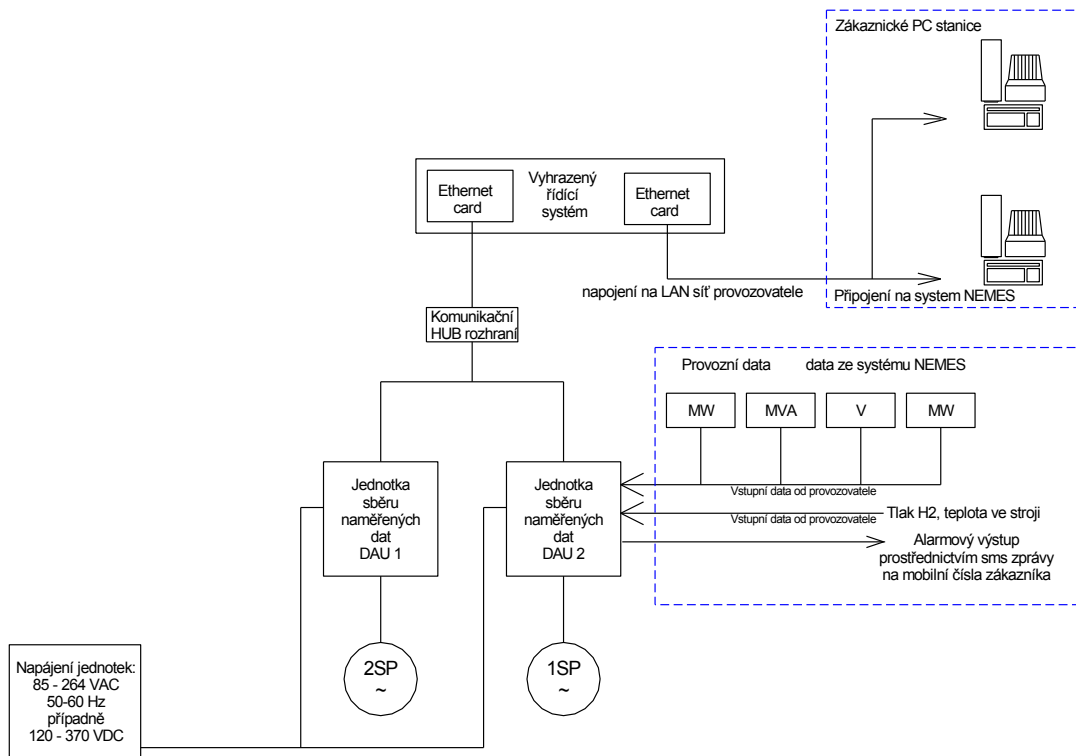
Systém TurboGard nám umožňuje využití následujících možností:

- Nepřetržité a automatické měření ČV s možností trvalého přístupu ze vzdáleného místa
- K zajištění spolehlivého trendu mohou být data sbírána za určitých provozních podmínek TBG definovaných provozovatelem
- Oddělení rušení k omezení rizika falešné indikace problémů se statorem

Systém Turbo Guard předpokládá nainstalované SSC sondy na TBG. Každý monitorovaný TBG bude vybaven jednotkou sběru dat (DAU) nainstalovanou blízko stroje, spojenou s SSC koaxiálním kabelem. Vhodné místo pro umístění vyhodnocovací jednotky je ocelová konstrukce na podlaží +15 m vedle skříně systému IRIS pro monitorování proudového zatížení jednotlivých uhlíků sběracího zařízení generátoru. Toto umístění vyhovuje požadavku na malou vzdálenost od svorkovnicové skříně na plášti generátoru, přes kterou budou připojeny SSC sondy a zároveň je mimo pružně uloženou stolicí stroje. Pro přivedení napájecí silové kabeláže a odvedení naměřených dat je možné využít stávající kabelové trasy, které byly vyprojektovány pro připojení diagnostiky sběracího zařízení s dostatečnou rezervou.

Jeden kontrolní systém může kontrolovat řadu DAU, obvykle přes LAN. Spolupracuje se softwarem PD Guard Pro, který předává každému DAU informace o podmínkách měření a ukládání informací o aktivitě ČV. Prostřednictvím řídicího systému definuje uživatel podmínky provozu TBG a frekvenci spouštění každého DAU, kdy má být provedeno měření ČV. DAU mohou být nakonfigurovány na kontinuální měření aktivity ČV za účelem spouštění alarmu v případě překročení nastavené prahové hodnoty nebo na periodické spouštění se zvoleným intervalem. Systémové rozhraní používá i SW PD View pro zobrazení nebo zápis trendu všech uložených dat ČV. Řídicí systém může být dálkově přístupný ze vzdálených PC připojených k síti nebo přes modem. To umožňuje personálu ve vzdálené kanceláři nastavit změnu podmínek

spouštění včetně nastavení spouštěcí alarmové úrovně. Výsledky měření je možné stáhnout pro zobrazení na sekundární PC.



Obr. č.16 Systém Turbo Guard – blokové schéma zapojení

4.4.2 Vyhodnocení dat

Nejpoužívanějším způsobem záznamu výsledků monitorování je forma obrazce fázového rozložení jednotlivých pulsů ČV. Amplitudy a počty pulsů jsou zakresleny v závislosti na poloze pulsu k sinusovce fázového napětí 50 Hz ve 2D nebo 3D diagramech. Tyto průběhy jsou vhodné k identifikaci nejdůležitějších závad ve satorovém vinutí. Systém Guard snímá kontinuálně data ČV (Qm, NQN pro 2D a 3D zobrazení), která se použijí k trendům a případnému srovnání s podobnými stroji. Data jsou zobrazována SW Iris PD Guard Pro na bázi Windows.

Systém Guard obsahuje speciálně vyvinuté metody k odstranění rušení, typického pro prostředí většiny elektráren. To umožňuje spolehlivé a opakovatelné měření s malou pravděpodobností falešného poruchového hlášení. Shromážděná data mohou být jednoduše vyhodnocena pracovníky elektrárny. Firma IRIS nabízí partnerům dvoudenní tréninkové semináře, po jejich absolvování budou pracovníci elektrárny schopni samostatně obsluhovat instalované zařízení a vyhodnocovat naměřené údaje.

Určení stavu izolačního systému pracovníky elektrárny je instalací monitorovacího systému výrazně ulehčen přístupem do databáze IRIS, ve které jsou shromážděny údaje z provozovaných diagnostických systémů na strojích celého světa. Firma IRIS uvádí, že databáze obsahuje více než 85 000 výsledků měření. Tyto výsledky měření od všech zákazníků jsou každý rok aktualizovány do přehledných sestav podle parametrů diagnostikovaných generátorů. Tyto sestavy jsou přístupné pro všechny uživatele provozující systém monitoringu částečných výbojů IRIS. Pracovníkům elektrárny tyto údaje umožňují snadnější, přesnější a objektivní vyhodnocení stavu vinutí.

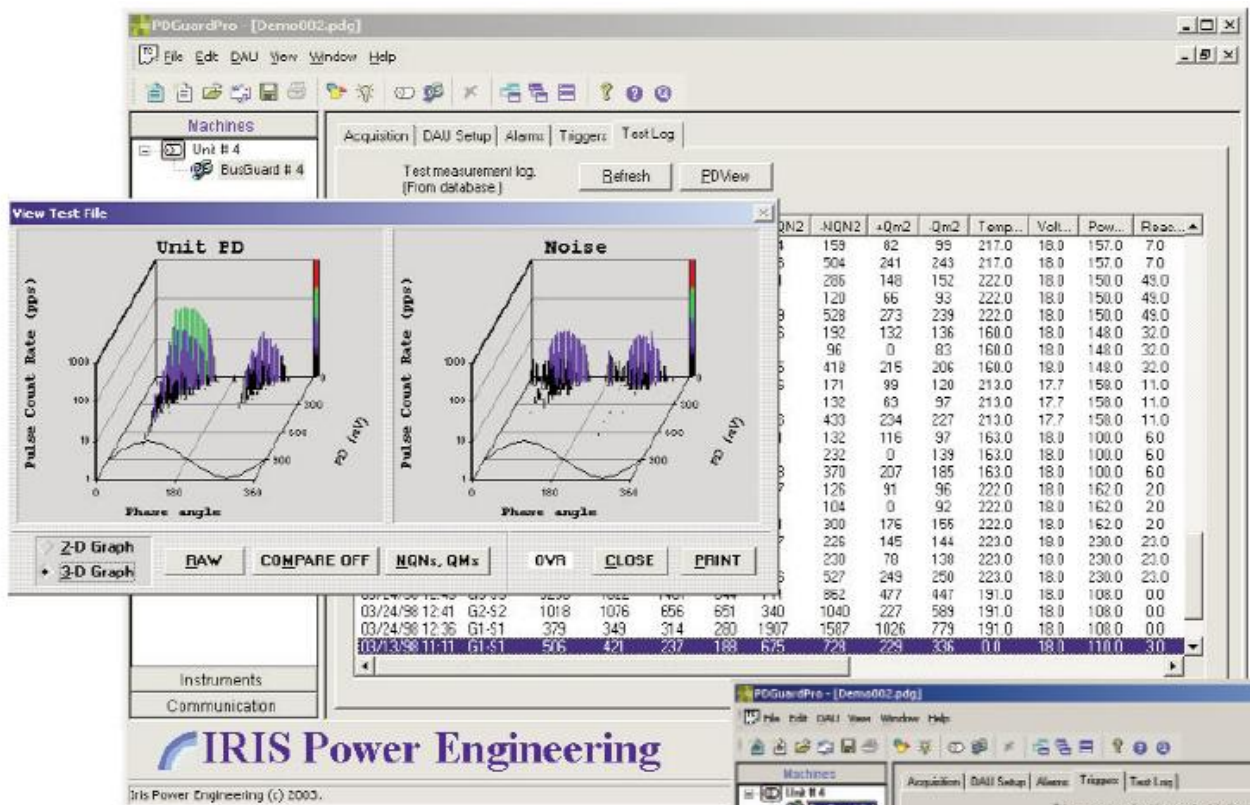
Vlastnosti použité technologie:

- Kvalitní technologie oddělení rušení na základě vf filtru 40 MHz, posouzení času průchodu pulsů a charakteru pulsů
- Sběr dat je kompatibilní s patentovanou technologií TGA/PDA
- Dálkový sběr dat, 2D a 3D zobrazení a sumární veličiny
- Dálkové módy komunikace umožňují diagnostiku, řízení a konfigurace na dálku
- Guard systémy provádí kontinuální měření ČV s vyspělou charakteristikou poruchového hlášení vyžadující minimální zásahy pracovníků elektrárny.
- Úrovně poruchových hlášení jsou přednastavena výrobcem na základě dat databáze IRIS.

Vyhodnocení naměřených dat je prováděno v závislosti na okamžitých provozních podmínkách diagnostikovaného stroje, jako jsou:

- statorové napětí
- činný výkon
- jalový výkon
- teplota vinutí
- tlak H₂

Prostředí a grafické provedení programu je patrné z obrázku č. 17.



Obr. č. 17 Prostředí SW Iris PD Guard Pro

4.5 Příklady z praxe

4.5.1 Závislost intenzity ČV na tlaku H₂

Na obrázku č. 18 je patrný vliv tlaku chladicího média H₂ na utlumení částečných výbojů. Tento pokus byl proveden na turbogenerátoru 626 MW o svorkovém napětí 18 kV. Na tomto stroji se projevilo zvýšení úrovně částečných výbojů uprostřed provozní doby mezi odstávkami. Po porovnání údajů z databáze IRIS a na základě faktu, že stroj byl testován na provozní tlak 413 kPa (60 PSI), ale provozován byl při tlaku 227 kPa (33 PSI) chladicího média, bylo přijato rozhodnutí o zvýšení tlaku H₂ na hodnotu 386 kPa (56 PSI). Toto zvýšení tlaku vedlo k utlumení výbojové činnosti a tím výraznému zpomalení degradačního procesu.

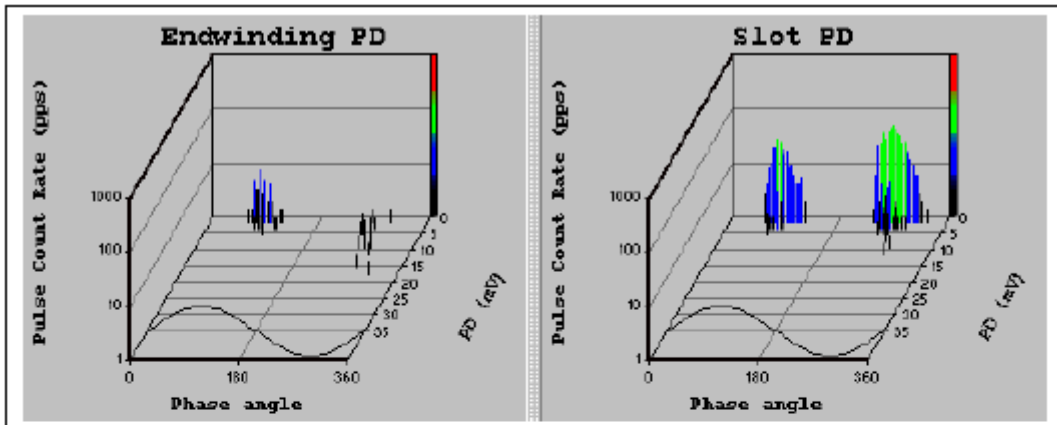


Figure 1 February test – H₂ at 33 PSI

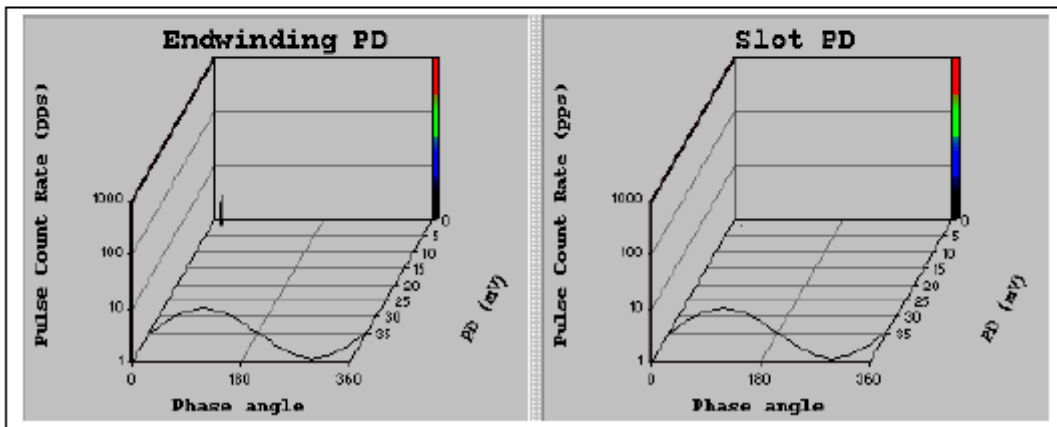


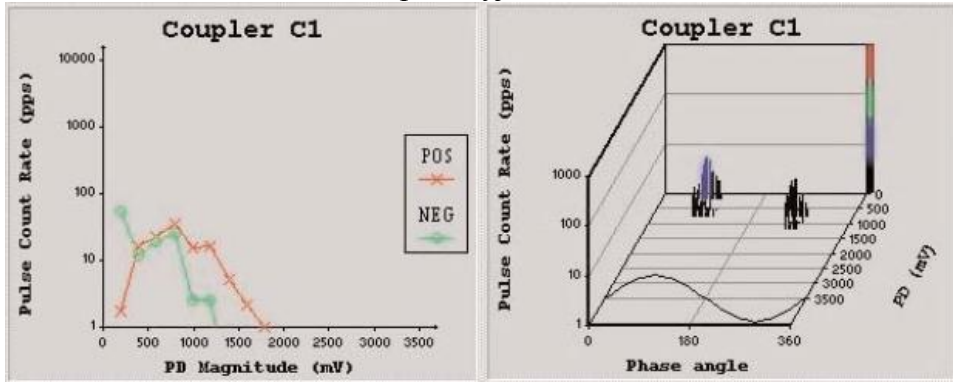
Figure 2 June test – H₂ at 56 PSI

Obr. č. 18 Vliv chladícího média na ČV

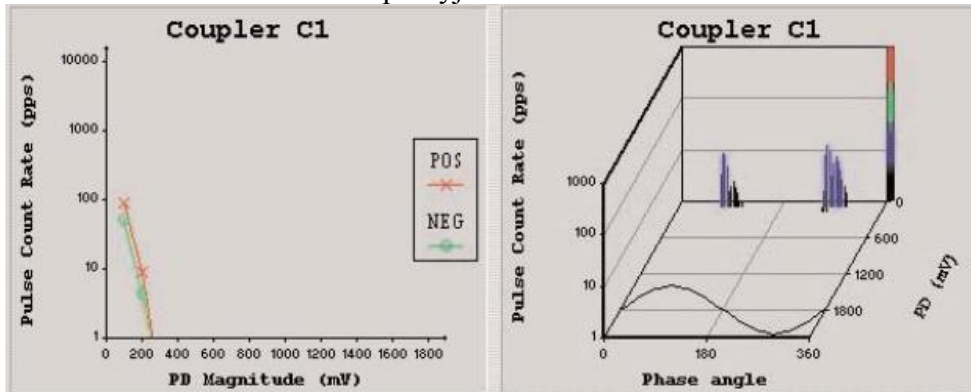
4.5.2 Indikace cizího předmětu ve vinutí ze zvýšení ČV

V roce 2000 byl na stroj Kanadské západní společnosti instalován systém IRIS pro monitoring částečných výbojů. Na začátku roku 2002 bylo na hydrogenerátoru Kanadské západní společnosti provedeno během odstávky soustrojí jednoduché čištění čel a konců vinutí generátoru. Ačkoliv před odstavením stroje nebylo indikováno žádné zvýšení výbojové činnosti, došlo po připojení stroje k síti k výraznému zvýšení výbojové činnosti naměřené ve fázích L₂ a L₃ stroje (obrázek č. 19 a 20). Po vyhodnocení naměřených dat byla naplánována krátká odstávka stroje. Při pečlivé vizuální kontrole byl nalezen mezi konci vinutí zapomenutý hadr z nedávného čištění stroje při odstávce. Po jeho odstranění uvedl provozovatel stroj do provozu. Z grafu na obrázku č. 19 je patrné výrazné snížení celkové výbojové činnosti v důsledku vyčištění vinutí a odstranění cizího předmětu – hadru.

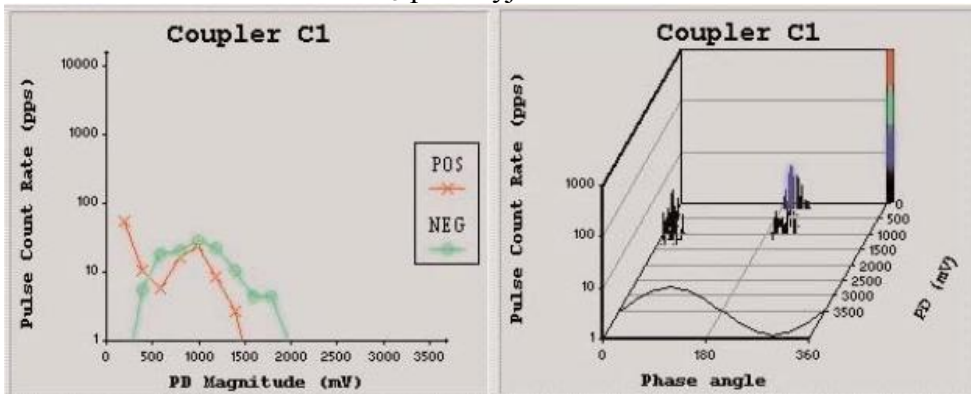
Fáze L₂ před vyjmutím hadru



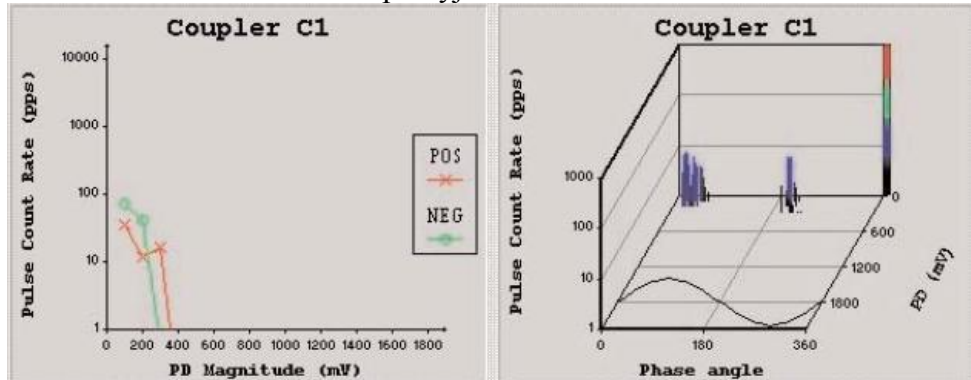
po vyjmutí hadru



Fáze L₃ před vyjmutím hadru



po vyjmutí hadru



Obr. č. 19 Cizí předmět ve vinutí

5 Core monitoring

Tepelný rozklad organických epoxidových pryskyřic nebo impregnačních materiálů, používaných jako základní izolační materiál při konstrukci generátorů, má za následek vznik velkého množství velmi malých částic. Tyto částice začínají vznikat, když je izolační materiál uvnitř stroje vystaven teplotě vyšší než je pro teplotní třídu dle ČSN EN 60085 do které je zařazen, dovoleno. Zjištění těchto částic v chladícím okruhu generátoru nám indikuje „horké“ místo ve stroji. Včasná detekce výskytu těchto částic ve stroji nám pomůže zareagovat dříve, než vlivem tohoto přehřátí dojde k vážnému poškození vinutí nebo magnetického obvodu. Způsob, jak sledovat vnitřní stav turbogenerátoru, je instalace zařízení, které je v zahraničí nabízeno pod názvem „Generator Condition Monitor“ nebo „Generator Core Monitor“ zkratka GCM. Jedná se o výrobek firmy E/ONE - Environment One Utility Systems z USA. Zastoupení pro Evropu je prostřednictvím firmy Transalpina GmbH se sídlem ve Vídni.

5.1 Princip core monitoringu

Core monitoring nebyl dosud u strojů ŠKODA provozovaných v ČR aplikován. Jeho použití lze zatím najít zejména u velkých strojů v zámoří. Umožňuje detekovat problém tepelné degradace izolace vinutí nebo magnetického jádra, na principu detekce zplodin uvolňovaných při tepelném namáhání izolačního systému stroje. Tyto zplodiny se uvolňují při teplotním namáhání z izolace tyčí statorového vinutí nebo z izolace mezi plechy magnetického obvodu. Dojde-li k překročení teploty pro izolační třídu F, tedy nad 150 °C, ve které je navržen izolační systém generátoru, začne docházet k jeho tepelnému rozkladu a k uvolňování produktů prolýzy do prostoru generátoru. Když nastane tepelný rozklad izolace, v chladícím vodíku se objeví vysoká koncentrace submikronových částic produktů prolýzy. Produkty prolýzy jsou např. organické molekuly, uhlovodíky.

Chladící médium H₂ je přiváděno z prostoru turbogenerátoru do zařízení GCM. Tam projde přes ionizační a detekční komoru a je vráceno zpět do turbogenerátoru. Při zjištění produktů prolýzy v chladícím vodíku je spuštěn ověřovací proces, který potvrdí výsledky měření. Následně je v zařízení GCM vygenerován alarm, na jehož základě pracovníci provozu odeberou vzorek plynu a předají ho na chemické oddělení elektrárny k podrobné analýze.

Celý systém je doplněn o nástřik jednotlivých vnitřních částí generátoru šesti druhů laku vyvinutého firmou E/ONE. Každý z laků je charakteristický určitým prvkem uvolňovaným při prolýze v horkém místě. Tyto laky jsou dodávány v programu firmy pod názvem Gen-Tags.

Hlavními konstrukčními částmi zařízení pro core monitoring jsou:

- agregát pro sledování chlazení generátorů GCM-X výrobce Environment One Corporation
- spojovací potrubí pro přívod H_2 k agregátu a jeho navrácení do generátoru
- Gen-Tags
- kabelové vedení v silové a sdělovací části

5.2 Hlavní komponenty

5.2.1 GCM-X

5.2.2 Funkce GCM-X

Zařízení GCM je citlivý přístroj pro detekci příměsí ve vodíku, který slouží jako



Obr. č. 22 GCM-X

chladicí médium turbogenerátorů. K detekci dochází v komoře, která je rozdělena do dvou sekcí. První sekci tvoří vlastní ionizační komora, ve které je procházející vodík vystaven slabému zdroji záření alfa. Jako zářič je použito Thorium 232. Vzniklé ionty jsou unášeny společně se zbylým vodíkem do druhé sekce komory, kde se nachází sběrná komora. V této komoře se nachází elektroda připojená na napětí -10Vss. Ionty vodíku jsou mimořádně malé a vyznačují se velkým poměrem náboje ke své hmotnosti. Ocitnou-li se ionty vodíku v elektrickém

poli vytvořeném v druhé sekci ionizační komory, jsou přitaženy na elektrodu a v obvodu detektoru začne procházet proud. Elektrické pole vytvořené potenciálem -10 Vss je dostatečně velké na to, aby došlo k zachycení většiny vzniklých iontů. Jestliže dojde vlivem poruchy ke zvýšení teploty izolačního materiálu v turbogenerátoru nad 150 °C, začne jeho tepelný rozklad. Produkty prolýzy jsou unášeny chladicím

médiiem a jejich část se dostane do zařízení GCM-X. Po průchodu ionizační sekci komory dojde ke spojení některých iontů vodíku s těmito produkty prolýzy. Vznikem takovéto částice dojde k velmi výraznému snížení poměru náboje ke hmotnosti částice – přibližně 1000x. Při průchodu ionizační komorou není elektrické pole kolem elektrody dostatečně silné, aby přitáhlo částici na elektrodu a tím došlo k průtoku elektrického proudu. Prudké snížení elektrického proudu tedy detekuje přítomnost částic prolýzy v chladícím vodíku a mikroprocesorová jednotka GCM spustí ověřovací sekvenci pro potvrzení naměřených hodnot.

Ověřovací sekvence spočívá v přestavení solenoidového ventilu na vstup plynu do jednotky GCM-X. Plyn je v normálním režimu přiváděn přímo na vstup ionizační komory. V případě spuštění ověřovací sekvence, je solenoidový ventil přestaven tak, aby přicházející plyn proudil přes filtr, ve kterém jsou částice prolýzy zachyceny. Do ionizační komory pak proudí pouze čistý H₂. Pokud se po spuštění ověřovací sekvence a zařazení filtru do cesty protékajícímu plynu proud detektoru ve sběrné části ionizační komory vrátí na normální úroveň, znamená to potvrzení přítomnosti produktů prolýzy v chladícím médiu a přehřívání některé části izolačního systému uvnitř turbogenerátoru.

Výstupní proud ionizační komory je zesilován elektrometricky. Zesílený proud a průtok ionizační komorou se zobrazují pomocí sloupcových diagramů na grafickém displeji umístěném na dveřích GCM-X. Běžný postup při zprovoznění vyžaduje nastavení průtoku vzhledem k dané tlakové diferencii vstup/výstup a kalibraci elektrometru tak, aby výstupní proud dosahoval 80 % rozsahu.

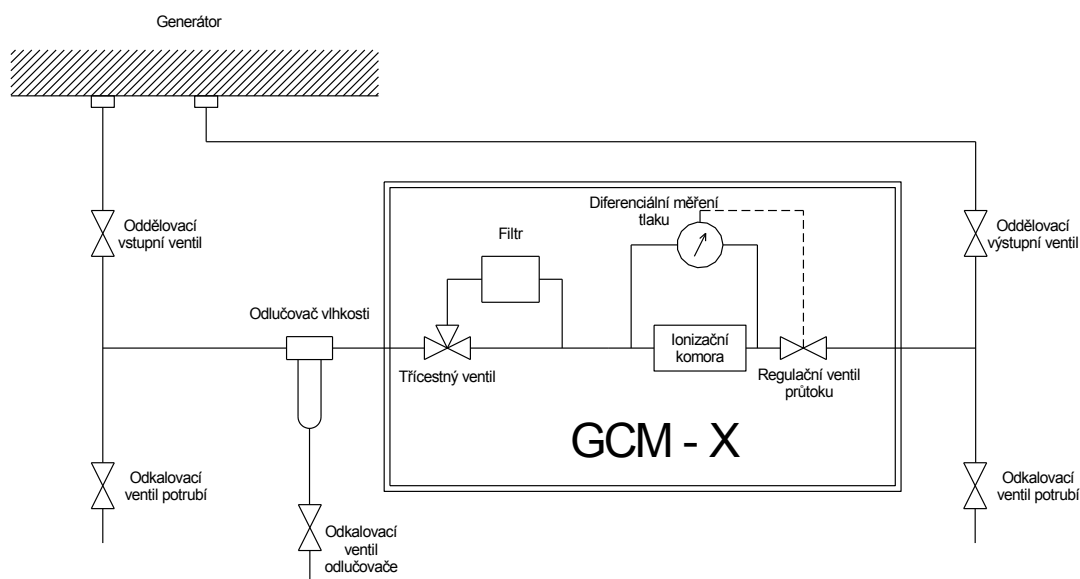
Technická data GCM-X:

Princip detekce částic prolýzy	Ionizační komora
Průtok vodíku	Nastaven interním ventilem v závislosti na tlakové diferencii vstup/výstup
Diferenciální tlak	4“ ÷ 5“ 102 mm ÷ 127 mm vodního sloupce
Odečet výstupního diagramu	
Normální provoz	80 % stupnice
Výstraha	70 % stupnice
Alarm	50 % stupnice

Elektrické charakteristiky

Vstupní napětí	100 V ÷ 250 V AC
Vstupní frekvence	47 Hz ÷ 67 Hz
Příkon	100 W
Jmenovitý spínací proud výstupních relé	3 A / 240 V AC
	3 A / 30 V DC
	alarm, výstraha, závada

Výstup – proud ionizační komorou	4 ÷ 20 mA (vysílač)
	4 ÷ 20 mA = 0 ÷ 100 %
Výstup – průtok plynu ionizační komorou	4 ÷ 20 mA (vysílač)
	4 ÷ 20 mA = 0 ÷ 3“ vodního sloupce
Rozměry	782 x 553 x 600 mm (V x Š x H)
Provozní teplota	0 °C ÷ 52 °C
Klasifikace dle Nař. vl. č. 406/2004 Sb.	Zóna 2
Maximální tlak H ₂	100 psi
Příruby pro připojení potrubí	½“



Obr. č. 21 Schéma připojení a hlavní části GCM-X

5.2.3 Princip ionizační komory

Princip ionizační komory je založen na ionizačních účincích záření v plynech. Plyny se po průchodu ionizačním zářením stávají vodivými. Letící ionizační částice vytváří kolem své dráhy kladné i záporné ionty. Tyto ionty jsou poté v elektrickém poli vytvořeném mezi deskami kondenzátoru přitahovány podle své polaritě na tyto desky a obvodem začíná protékat elektrický proud. Velikost proudu závisí na intenzitě ionizujícího záření, velikosti napětí přiloženého na desky kondenzátoru, na složení ionizovaného plynu a na energii ionizujících částic.

V zařízení GCM-X je použit jako zdroj ionizujícího záření alfa prvek Thorium 232. Alfa částice generované Thoriem 232 ionizují atomy vodíku procházející ionizační komorou. K vlastní ionizaci dochází uvolněním elektronu z elektronového obalu atomu. Volný elektron se stává záporným nábojem a atom,

o elektron ochuzený, se stává nábojem kladným. Elektron je přitažen na kladnou elektrodu, kladný iont vodíku na zápornou. Obvodem tedy prochází slabý elektrický proud.

Thorium jako zdroj alfa částic je velmi slabě radioaktivní prvek s poločasem rozpadu 14 900 000 000 let. Je to stříbřitě bílý kov, který se na vzduchu pomalu pokrývá vrstvou našedlého oxidu. Alfa částice emitovaná Thoriem 232, obecně ale jakýmkoliv alfa zářičem, je tvořena dvěma protony a dvěma neutrony. Jedná se tedy o jádro atomu helia letící velkou rychlostí s kinetickou energií mezi 2 až 8 MeV. Alfa částice označujeme symbolem α nebo značkou He^{2+} . Alfa částice se vyznačují vysokým ionizačním účinkem, ale dají se velice snadno odstínit. K odstínění alfa záření postačí list papíru nebo několika centimetrová vrstva vzduchu. Při srážce alfa částice s H_2 dojde k vytržení valenčního elektronu z atomu vodíku a molekula se ionizuje. K vytržení elektronu je spotřebována energie v řádu desítek elektronvoltů z celkové energie alfa částice. Jedna alfa částice nám tedy dokáže ionizovat řádově 10^5 molekul H_2 .

5.2.4 Spojovací potrubí

Pro správnou funkci GCM-X je zapotřebí zajistit kontinuální průtok monitorovaného chladicího média ionizační komorou, minimální hodnota difference tlaku je 1000 Pa. Toto se dá zabezpečit buď plynovým čerpadlem nebo vhodným umístěním přírub odebíraného a vraceného plynu na místa, kde je uvnitř generátoru tlaková difference způsobená nuceným oběhem chladicího média poháněného kompresorovým kolem na hřídeli stroje. Maximální délka přívodního potrubí je 30 metrů a agregát GCM-X musí být namontován v prostředí s okolní teplotou maximálně 52 °C. Odběry z generátoru musí být umístěny mimo prostor, kde lze předpokládat olejové páry z ložisek a ucpávek generátoru. Aby se případná zkondenzovaná vlhkost a olejové páry nehromadili v potrubí, je potřeba dodržet při montáži spád potrubí ve směru průtoku média a na nejnižších částech instalovat odkalovací ventily.

Vhodným místem pro odběrové příruby je místo vedle současných přírub pro vysoušeč vodíku. Vysoušeč (vymrazovač) slouží k odstranění vlhkosti obsažené v chladicím vodíku. Pro vysoušení vodíku se musí ve vysoušeči při rotujícím stroji střídavě opakovat vysoušecí a rozmrazovací fáze. Ve vysoušecí (vymrazovací) fázi namrzá vlhkost obsažená ve vodíku, na výparníku. V rozmrazovací fázi se namrzlá

vlhkost rozpouští proudem teplého vodíku a stéká na dno vysoušecí nádoby, odkud je krátkým otevřením solenoidového ventilu vypuštěna. Použití přímé odbočky z trasy ST01Z008 pro vysoušeč není vhodným řešením pro nestálé tlakové poměry v potrubí, při manipulacích s armaturami během nastavování režimů vysoušeče - GCM-X vyžaduje kontinuální průtok vodíku komorou ve stanovené hodnotě. Řešením je tedy zhotovení 2 ks nových přírub pro GCM-X vedle přírub pro vysoušeč a tyto příruby uvnitř krytu napojit na shodné prostory odkud je odebírán plyn pro vysoušení. Připojení monitoringu ke stroji tedy vyžaduje svářečské práce na spodním plášti stroje na straně turbíny. Tyto svářečské práce lze provést pouze při odstávce celého soustrojí a převedení generátoru na vzduchovou náplň.

Nejvhodnějším umístěním vlastní skříně GCM-X je prostor na podlaží +6,5 m pod turbogenerátorem, vedle armatur doplňování vodíku do stroje. Vzhledem k tomu, že zařízení je při provozu pod tlakem H_2 , vyžadovalo by jeho umístění do jiné části strojovny vytyčení nové „Zóny 2“ s nebezpečím výbuchu dle „Nařízení vlády č. 406/2004 Sb. o bližších požadavcích na zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při práci v prostředí s nebezpečím výbuchu“ a ČSN 65 4435 pro plyn vodík. Prostor na podlaží strojovny +6,5 m, v okolí armatur pro doplňování vodíku do stroje byl v tomto smyslu projektován a tyto požadavky splňuje ve všech směrech.

Třetí potrubí, které je nutné instalovat, je potrubí odvádějící plyn z GCM-X při odběru vzorků. Tento plyn musí být odváděn výfukem mimo prostor strojovny, to znamená zhotovení nové trasy a tu napojit na stávající výfuk z rozvodu plynů - trasu ST01Z031, která slouží jako centrální odvod plynu do atmosféry.

5.2.5 Gen-Tags

Systém Gen-Tags je logickým doplňkem a umožňuje v kombinaci s Core-monitoringem přibližnou lokalizaci horkých míst v generátoru ještě před jeho odstavením a rozebráním. Jedná se o speciální chemicky a tepelně stabilní sloučeniny, které se ve formě nástřiku aplikují na kritická místa uvnitř generátoru. Toto „značkování“ je možno provést pouze při odstávce stroje spojené s vysunutím rotoru. Výrobce doporučuje po aplikaci systému Gen-Tags odebrat vzorek H_2 a podrobit ho analýze. Tento vzorek bude následně sloužit jako porovnávací pro další rozbor. Značkovacích směsí se vyrábí šest druhů. Jejich složení a rozdělení je patrné z tabulky č.4 a 5 a obrázku č.22.

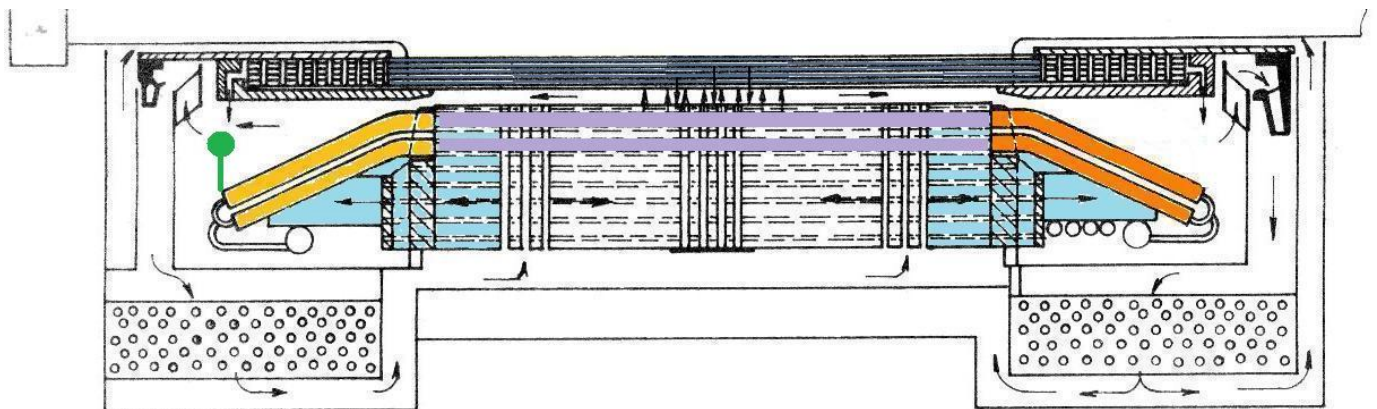
Každá z těchto barev je určena k natření jedné z vnitřních částí generátoru. Je-li systémem GCM-X spuštěn alarm a ověřovacím procesem potvrzen výskyt produktů prolýzy, je obsluhou odebrán vzorek. Tento vzorek chladicího média je podroben analýze v plynovém chromatografu. Protože každá z barev uvolňuje charakteristickou sloučeninu, je možné na základě analýzy vzorku určit, která z hlavních částí generátoru je postižena a zavést potřebná opatření.

Tabulka č.4 Aplikace nástřiku na jednotlivé části stroje

Složka č. GA027X-PXX	Složení	Nátěrová hmota	Barva směsi	Oblast aplikace
273	N-Dodecyl imide	Epoxidová	Žlutá	Čela vinutí strana budiče
274	Cyclo-Dodecyl imide	Epoxidová	Oranžová	Čela vinutí strana turbíny
275	Cyclo-Octyl imide	Epoxidová	Šedá	Střední část vinutí
276	Dihexyl Amid Acid	Alkydová	Modrá tmavá	Povrch rotoru bez stahovacích obručí
277	Adamantyl Imide	Epoxidová	Zelená	Vedení k průchodkám
278	Cyclo-Heptal Imide	Epoxidová	Modrá světlá	Vybrané části magnetického obvodu

Tabulka č.5 Chemické složení barev

Složka č. GA027X-PXX	Složení	Racionální vzorec	Sumární vzorec
273	N-Dodecyl imide	$H-N=CH-(CH_2)_{10}-CH_3$	$C_{12}H_{24}NH$
274	Cyclo-Dodecyl imide	$H-N=(CH_2)_{12}$	$C_{12}H_{24}NH$
275	Cyclo-Octyl imide	$H-N=(CH_2)_8$	$C_8H_{16}NH$
276	Dihexyl Amid Acid	$(C_6H_{13})_2-CH_2CONH_2$	$C_{14}H_{31}NO$
277	Adamantyl Imide	Tricyklo dekan = N-H	$C_{10}H_{15}NH$
278	Cyclo-Heptal Imide	$H-N=(CH_2)_7$	$C_7H_{14}NH$

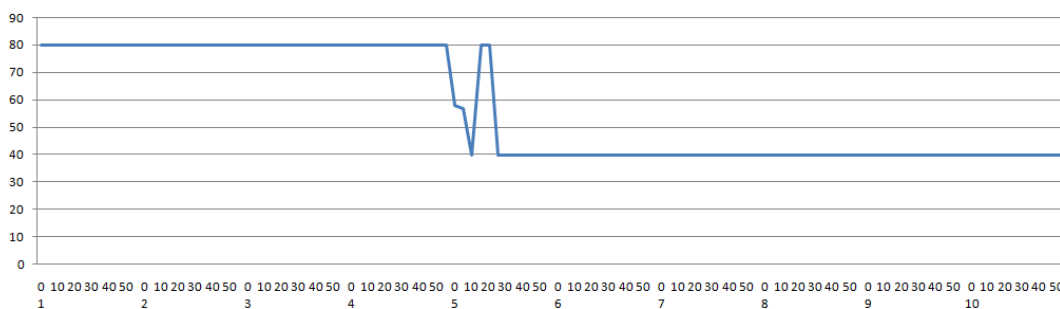


Obr. č. 22 Aplikace nástřiku - řez generátorem v horizontální rovině

5.2.6 Vyhodnocení alarmů a odebraných vzorků

Reakce na rozvíjející se poruchy ve stroji se skládá ze dvou částí. V první fázi získáváme alarm ze systému GCM-X o výskytu produktů prolyzy. Po ověření alarmu ve druhé fázi provádíme analýzu odebraného vzorku plynu.

Při poklesu proudu ionizační komorou na 70 % dojde k aktivaci signálu výstraha. Při dalším poklesu proudu na 50 % dojde k ověřovací sekvenci. Ověření spočívá v přestavení třicestného ventilu a zařazení filtru zachycujícího produkty prolyzy do trasy vzorku. Pokud se hodnota proudu vrátí na normální úroveň, znamená to potvrzení výskytu produktů prolyzy a mikroprocesorová řídicí jednotka generuje signál alarm. Obsluha následně odebere vzorek plynu a předá ho k provedení analýzy. Na výstupním grafu je přehledně znázorněn normální provoz GCM-X s výstupním proudem na 80 % rozsahu. V 5:00 hod. poklesl výstup GCM-X na přibližně 58 % a pak na 40 %. V okamžiku, kdy výstup dosáhl 70 %, byl GCM-X generován signál „Výstraha“. Jakmile signál dosáhl 50 %, byla spuštěna automatická ověřovací sekvence přestavením třicestného ventilu a vřazením filtru. Se zařazeným filtrem se výstup GCM-X vrátil na 80 % a GCM-X byl vydán „Ověřený alarm“. Po opětovném vyřazení filtru se hodnota ustálila na 40 %.



Obr. č. 23 Indikace produktů pyrolýzy systémem GCM-X

Pro vyhodnocení vzorků plynu je nutno v druhé fázi zajistit rozbor vzorku plynu pomocí plynového chromatografu s plamenovým ionizačním detektorem FID (Flame Ionization Detektor) nebo s detektorem elektronového záchytu ECD (Elektron Capture Detektor) na přítomnost produktů prolyzy. Typickým představitelem uvolňujícím se z epoxidů je např. bisfenol-A.

Přítomnost tohoto přístroje na elektrárně je nutnou podmínkou pro detailní rozbor plynu po příchodu alarmové hlášky od tohoto diagnostického testu za provozu

stroje a to v rozmezí několika hodin. Validace signálu slouží pro další adekvátní zásah. Při potvrzení signálu plynovým chromatografem je nutné přijmout okamžitá opatření:

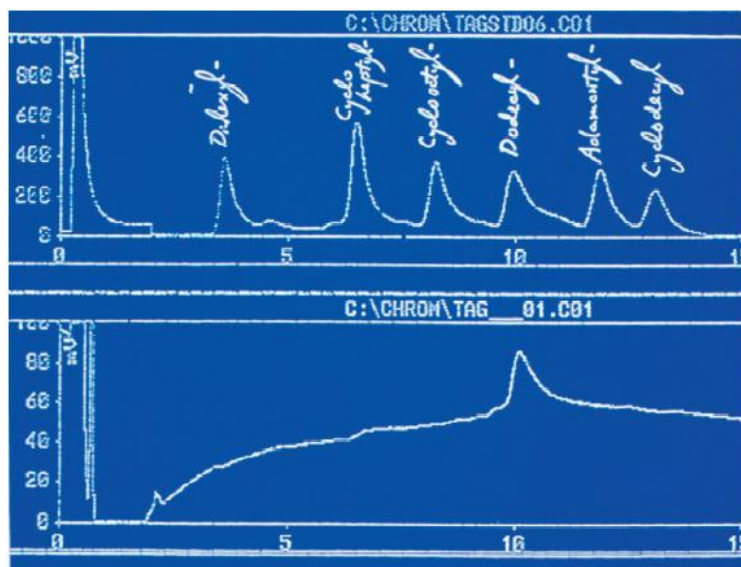
- omezit provoz v podbuzeném stavu zátěžové charakteristiky
- snížit výkon stroje
- upravit tlak H₂ ve stroji atp.

Nevyhnutelná reakce je snížení výkonu generátoru a tím snížení ohřevu postižené části. Po snížení výkonu bude nutné opět resetovat měření ionizační komoru a následně znovu provést validaci signálu chemickým rozбором vzorku. Výsledky rozboru vzorku plynu mohou být posílány v případě nejasnosti v interpretaci analyzovaných vzorků specializované firmě (výrobci diagnostického testu) k odborné konzultaci. Výrobce garantuje provedení rozboru do 24 hodin od doručení.

Tento proces validace signálu je nutný pro rozhodnutí o dalším provozu generátoru. Po odstavení a přechodu na vzduchovou náplň uvnitř v generátoru bude nutné naplánovat ve spolupráci s výrobcem generátorů další profylaktické testy elektro, které budou blíže specifikovat místo poškození generátoru.

Základem dlouhodobého sledování je pravidelné odebírání vzorků v intervalu 6 měsíců a provádění jejich analýzy.

Ukázka výstupu rozboru H₂ pomocí chromatografie je na obrázku č.24.



Obr. č. 24 Výstup chromatografie

6 Příklady havárií izolačních systému u velkých generátorů, rozbor dopadu havárie modernizovaného stroje

6.1 2006 V1 Jaslovské Bohunice – blok č.2 (Slovensko)

Dne 10.10.2006 v 07:48 hod. došlo během provozu na 100% nominálního výkonu bloku k odpojení generátoru od sítě v důsledku zapůsobení koncových členů zemní satorové ochrany, rozdílové ochrany a impedanční ochrany generátoru. Automatiky regulace výkonu reaktoru a turbíny následně odstavili blok.

Během doběhu generátoru při 1500 ot./min zapracovala signalizace zvýšeného tlaku H_2 ve vyrovnávací nádrži chladící satorové vody generátoru, po odtlakování zapůsobila signalizace po cca 30 minutách znovu. Současné působení celé skupiny elektrických ochran generátoru společně se zvýšeným tlakem H_2 ve vyrovnávací nádrži naznačovalo na vážný zkrat satorového vinutí s poškozením některé z tyčí natolik, že byla porušena těsnost chladících kanálků se satorovou vodou uvnitř tyče.

Po rozebrání stroje se ukázalo, že v důsledku porušení izolace mezi satorovými plechy došlo k vytavení části magnetického obvodu. Takto vzniklá tavenina poškodila izolaci vinutí ve fázích L_1 a L_2 , čímž došlo k mezifázovému zkratu, na který správně zareagoval soubor elektrických ochran. Jako izolace plechů, ze kterých je složen magnetický obvod, byl použitý nástřik elektroizolačním lakem S1924 o síle cca 0,018 mm. Rozbor stavu stroje ukázal, že tento lak vlivem stáří popraskal, následně vlivem vibrací a teplotních dilatací magnetického obvodu došlo k jeho vypadání. V místě vypadání laku došlo ke změně homogenity magnetického obvodu satoru, zvýšení ztrát vlivem vířivých proudů a lokálnímu ohřevu postiženého místa. Tento proces měl za následek zrychlení degenerace dosud nepoškozeného laku, jeho vypadání a neustálé zvětšování plochy plechů bez izolace. Tímto procesem došlo postupně ke zvýšení teploty magnetického obvodu až k bodu tavení. Objem vytaveného magnetického obvodu byl 13 dm^3 , což odpovídá 104 kg železa.

Na generátoru nebyla instalována žádná z on-line metod popisovaných v této práci a poruchu tohoto typu nebylo možno předpovědět. Pokud by na tomto stroji byl instalován on-line systém core monitoring, bylo by s vysokou pravděpodobností možno předvídat tuto závadu, včas odstavit stroj a provést opravu izolace poškozeného

místa. Vzhledem k tomu, že elektrárna vlastnila jako jeden z náhradních dílů statoru generátoru, mohla provést opravu výměnným způsobem a ta trvala „jen“ 54 dní.



Obr. č. 25 Vytavení magnetického obvodu



Obr. č. 26 Vytažení poškozené tyče



Obr. č. 27 Zkratem poškozená tyč vinutí

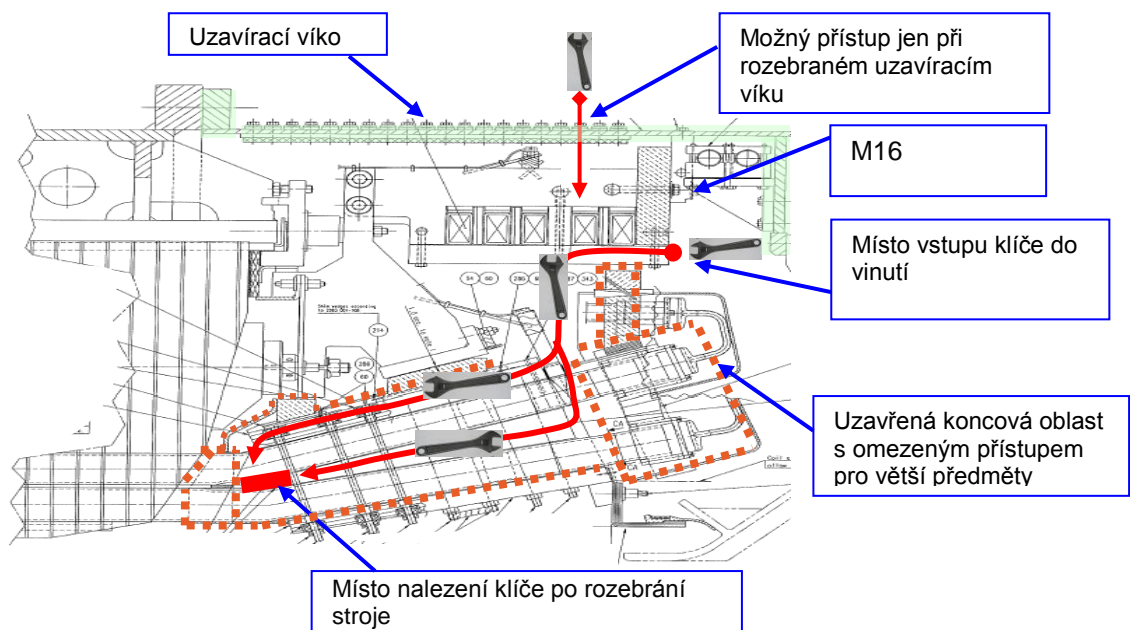
6.2 2007 Ringhals (Švédsko)

Dne 20.7.2007 došlo na Švédské elektrárně Ringhals k poruše generátoru č. 2. K poruše došlo v důsledku zapomenutého francouzského klíče uvnitř generátoru montérem provádějícím údržbu. Klíč, který po přifázování stroje hnán chladícím

médium, postupně putoval chladicími kanály v čele vinutí, až poškodil pracovní izolaci natolik, že došlo k vážné havárii stroje a následně k několikaměsíčnímu odstavení stroje pro výměnu části vinutí.



Obr. č.28 Cizí předmět ve vinutí



Obr. č. 29 Cesta klíče strojem

6.3 2005 Leibstadt (Švýcarsko)

Dne 28. března 2005 došlo na této JE (BWR, 1165 MWe) k mimořádně závažné poruše, která vyřadila z činnosti hlavní generátor. Generátor byl odstaven působením zemní ochrany statoru. Následnou demontáží byly zjištěny následující skutečnosti:

- V generátoru došlo k roztavení stahovací desky generátoru.

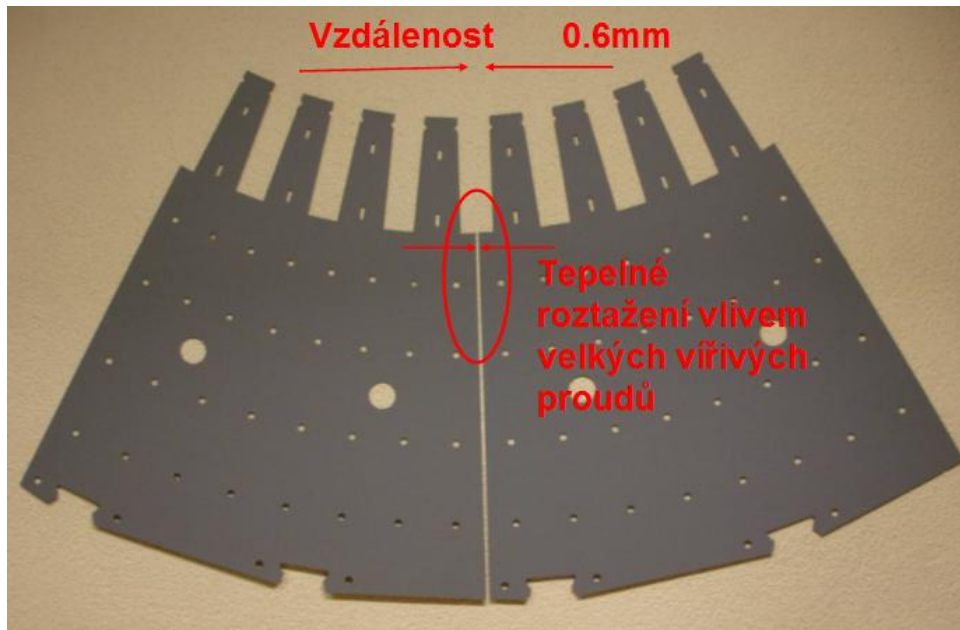
- Tavenina stahovací desky propálila izolaci statorového vinutí a způsobila zemní zkrat statorového vinutí generátoru.
- V důsledku intenzivního chlazení generátoru vodíkem byly kuličky roztaveného železa zaneseny do všech ventilačních kanálů a statorového vinutí.

Z těchto důvodů bylo celé statorové vinutí vyjmuto, generátor byl vyčištěn a poté opětovně převinut. Havárie si vyžádala odstávku v celkové době trvání 155 dnů. V KKL Leibstadt došlo v minulých letech k postupnému inovování technologie elektrárny s cílem zvýšit výkon elektrárny až na výkon 1318 MW. V generátoru se během úprav technologie zvýšil pouze tlak vodíku z 6 na 6,5 baru. Vyšší výkon bloku zvýšil tepelné zatížení stahovací desky generátoru, které se projevilo zejména v podbuzeném stavu provozního diagramu generátoru. Toto tepelné zatížení se projevilo nejvíce během velikonočních svátků, kdy bylo nízké zatížení elektrické sítě a generátor byl nucen pracovat v podbuzené oblasti provozního diagramu.

Zvýšením teploty došlo vlivem teplotní dilatace segmentů, ze kterých je stahovací deska složena, ke galvanickému kontaktu sousedních segmentů a k magnetickému zkratu, který způsobil roztavení části stahovací desky.



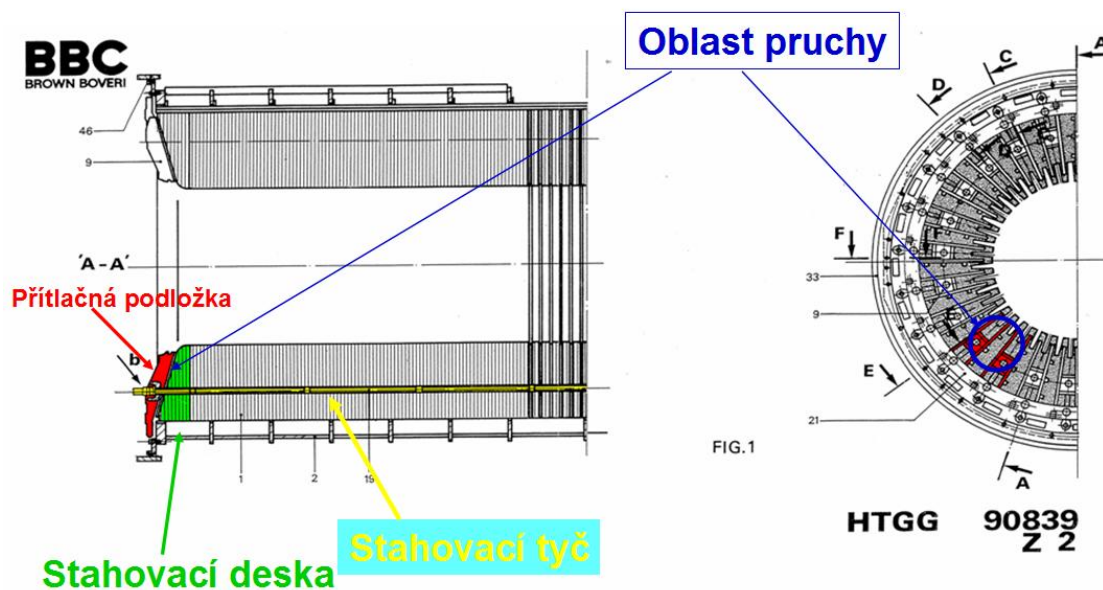
Obr. č.30 Místo poruchy



Obr. č.31 Segmenty stahovací desky

Po opravě generátoru byla přijata následující opatření pro zabránění opakování poruchy:

- Instalace teplotních čidel pro monitoring teploty stahovací desky generátoru.
- Úprava P-Q diagramu generátoru s vazbou na omezení teploty stahovací desky generátoru na max. 150 °C.
- Instalace core-monitoring diagnostiky generátoru. Včasným odstavením po indikaci je možné zabránit rozsáhlému poškození.
- Instalace a vyhodnocování on-line částečných výbojů v generátoru se sledováním trendu vývoje.
- Konstrukční úprava rotoru s cílem eliminovat vazbu reakce kotvy na ohřev stahovací desky.
- Návrh na pořízení náhradního statoru generátoru.



Obr. č.32 Segmenty stahovací desky KKL Leibstadt

6.4 Vybrané poruchy TBG 1000 MW (ČR) včetně nároků na opravu

Havárie TBG 1000 MW, kterým můžeme předejít nebo jejich důsledky minimalizovat instalací popisovanéh monitoringu, můžou nastat z těchto hlavních příčin:

- Elektrická porucha statorového vinutí, (s příčinou ve stárnutí izolačního systému nebo v uvolnění upevňovacích prvků s následným mechanickým poškozením vedoucím ke zkratu).
- Elektrická porucha rotorového vinutí.
- Roztavení magnetického obvodu působením vířivých proudů v důsledku zkratu mezi plechy magnetického obvodu.

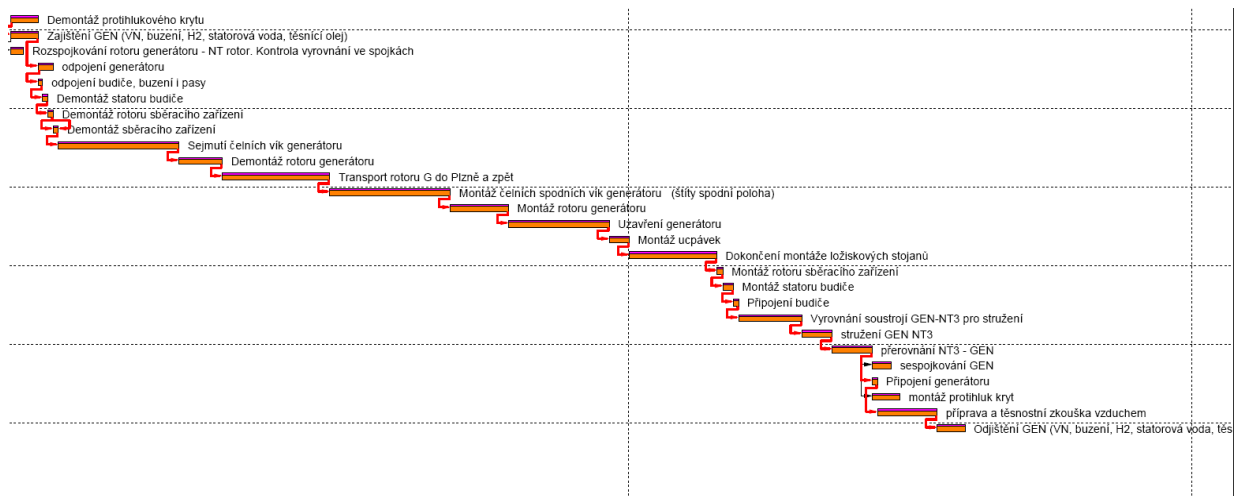
Odstranění následků všech těchto předpokládaných havárií znamená dlouhou dobu nevýroby. Během opravy je nutné vždy vysunout rotor generátoru ze stroje a pokud je porucha ve statorovém vinutí nebo magnetickém obvodu, vyžaduje si oprava odvezení celého generátoru a opravu ve výrobním závodě. Pro odhad ztrát z nevýroby je zásadní časový plán opravy rozpracovaný v následujících rozborech.

6.4.1 Průběh opravy rotoru generátoru 1000 MW

V tabulce č.3 a na obrázku č.33 je časové ocenění nosných činností při opravě „jednoduché“ elektrické závady rotoru generátoru ve výrobním závodě. Podrobný harmonogram prací je přílohou č.1 této práce.

Oprava rotorového vinutí je nepoměrně jednodušší záležitost proti opravě statorového vinutí nebo magnetického obvodu. Doba trvání opravy je 1140 hodin prací. Do celkové doby musíme započítat alespoň 12 hodin na vyhodnocení poruchy a organizaci zahájení prací na opravě. Po ukončení opravy a odjištění generátoru musíme započítat 28 hodin na náhřev turbosoustrojí, vyjetí na otáčky, přifázování k síti a dosažení nominálního výkonu 1000 MW. Celková doba trvání odstávky je tedy minimálně 49 dní a 4 hodiny. Pro výpočet ztráty z nevýroby jsem použil průměrnou cenu elektřiny na pražské energetické burze Power Exchange [2]

Výkupní cena elektřiny pro rok 2010 (Kč/MWh) * výkon (MWh) * doba odstávky (h)
 $1300 \times 1000 \times 1180 = \underline{1\,534\,000\,000 \text{ Kč}}$ (délka opravy 49 dnů 4 hodin)



Obrázek č.33 Grantův graf průběhu opravy rotoru generátoru

Tabulka č.3

Demontáž protihlukového krytu	01-01-11 06:00*	02-01-11 15:00	33,0h
Zajištění GEN (VN, buzení, H2, statorová voda, těsnící olej)	01-01-11 06:00	02-01-11 15:00	33,0h
Rozspojkování rotoru generátoru - NT rotor. Kontrola vyrovnář	01-01-11 06:00	01-01-11 22:00	16,0h
odpojení generátoru	02-01-11 15:00	03-01-11 09:00	18,0h
odpojení budiče, buzení i pasy	02-01-11 15:00	02-01-11 21:00	6,0h
Demontáž statoru budiče	02-01-11 21:00	03-01-11 03:00	6,0h
Demontáž rotoru sběracího zařízení	03-01-11 03:00	03-01-11 09:00	6,0h
Demontáž sběracího zařízení	03-01-11 09:00	03-01-11 15:00	6,0h
Sejmutí čelních vík generátoru	03-01-11 15:00	09-01-11 15:00	144,0h
Demontáž rotoru generátoru	09-01-11 15:00	11-01-11 19:00	52,0h
Transport rotoru G do Plzně a zpět	11-01-11 19:00	17-01-11 03:00	128,0h
Montáž čelních spodních vík generátoru (štitý spodní poloha)	17-01-11 03:00	23-01-11 03:00	144,0h
Montáž rotoru generátoru	23-01-11 03:00	26-01-11 01:00	70,0h
Uzavření generátoru	26-01-11 01:00	31-01-11 01:00	120,0h
Montáž ucpávek	31-01-11 01:00	01-02-11 01:00	24,0h
Dokončení montáže ložiskových stojanů	01-02-11 01:00	05-02-11 09:00	104,0h
Montáž rotoru sběracího zařízení	05-02-11 09:00	05-02-11 17:00	8,0h
Montáž statoru budiče	05-02-11 17:00	06-02-11 05:00	12,0h
Připojení budiče	06-02-11 05:00	06-02-11 11:00	6,0h
Vyrovnání soustrojí GEN-NT3 pro stružení	06-02-11 11:00	09-02-11 15:00	76,0h
stružení GEN NT3	09-02-11 15:00	11-02-11 03:00	36,0h
přerovnání NT3 - GEN	11-02-11 03:00	13-02-11 03:00	48,0h
sespojování GEN	13-02-11 03:00	14-02-11 02:00	23,0h
Připojení generátoru	13-02-11 03:00	13-02-11 09:00	6,0h
montáž protihluk kryt	13-02-11 03:00	14-02-11 12:00	33,0h
příprava a těsnostní zkouška vzduchem	13-02-11 09:00	16-02-11 09:00	72,0h
Odjištění GEN (VN, buzení, H2, statorová voda, těsnící olej)	16-02-11 09:00	17-02-11 18:00	33,0h

6.4.2 Průběh opravy statorového vinutí generátoru 1000 MW

V tabulce č.4 je ocenění časové náročnosti nosných činností při opravě magnetického obvodu stroje a s ním související převinutí statorového vinutí. Porucha tohoto typu vyžaduje vyjmutí magnetického obvodu se založeným statorovým vinutím z pláště generátoru a jeho transport do výrobního závodu. Zjednodušeně lze říci, že do fáze vyjmutí rotoru jsou činnosti a jejich časový průběh stejný. Poté následuje rozebrání nulové spojky vinutí, odpájení statorového vinutí od průchodek, sejmutí vrchního pláště generátoru a vyjmutí vnitřní kostry s magnetickým obvodem. Opravu takového rozsahu není operativně připraven provést žádný výrobce generátorů. Nastříhání plechů, složení magnetického obvodu a výroba nových tyčí vinutí statoru je práce na několik měsíců a nelze ji přesně odhadnout. Na dotaz k výrobcí generátoru jsem obdržel následující hrubé odhady, které se mohou lišit od skutečnosti podle rozsahu poškození:

- Výroba nového rotoru 4 měsíce
- Převinutí statoru 6 měsíců
- Převinutí statoru a výroba nového magnetického obvodu 8 měsíců

Vyjmutí magnetického obvodu je spojeno s instalací speciálního zdvihacího zařízení pro vyzdvižení statoru s nosností 400 tun, které významně ovlivní délku odstávky.

Výkupní cena elektřiny pro rok 2010 (Kč/MWh) * výkon (MWh) * doba odstávky (h)
1 300 x 1 000 x 8 640 = 11 232 000 000 Kč (délka opravy 12 měsíců) rotor
1 300 x 1 000 x 10 080 = 13 104 200 000 Kč (délka opravy 14 měsíců) stat. vinutí
1 300 x 1 000 x 11 520 = 14 976 000 000 Kč (délka opravy 16 měsíců) magnetický obv.

7 Závěr

Současný stav provozovaných generátorů se po cca 8 letech provozu jeví jako uspokojivý. Do tohoto stavu byly generátory postupně dovedeny po předchozích poruchách na satorovém vinutí a konstrukčních úpravách v minulých letech. Docházelo zejména k uvolňování výztuží koše satorového vinutí, k praskání stříbrem pájených spojů vlivem vibrací, k uvolňování výztuží v nulové spojce vinutí a následným netěsnostem, atp. Tyto poruchy a jejich nápravná opatření ve smyslu konstrukčních úprav vedly k celkovému zodolnění jednotlivých částí vůči známým příčinám, které se v průběhu provozu na generátorech vyskytly. S dlouhodobým provozem generátorů bez možnosti detailních kontrol však vyvstává riziko rozvoje poruchy v důsledku uvolnění bandáží čel vinutí, uvolnění vinutí v drážkách. Tyto vady jsou zcela běžné a odpovídají procesu stárnutí izolačních systémů, kdy v průběhu provozu dochází vlivem stárnutí k úbytku tloušťky izolace a k uvolnění systému vinutí. Ten je pak vlivem provozních vibrací vystaven mikropohybům (tzv. fretting) s projevy mechanického obroušování izolace a jejího zeslabení. Projevy těchto příčin ve satorovém vinutí je možné vidět ve změně úrovně částečných výbojů a případně změně teplot u vad v magnetickém obvodu.

Instalování výše popsaných diagnostických testů částečných výbojů a core-monitoringu je pro tento typ generátoru vhodným doplňkem. Některým rizikům lze účinně předcházet kontrolou v odstávkách, některá lze kontrolovat diagnostikou a sledováním za provozu a předejít tak dlouhodobému odstavení s časově a finančně náročnou opravou.

Základní podmínkou pro vypracování podrobného projektu modernizace zařízení instalací diagnostického testu částečných výbojů a core-monitoringu je, aby montážní zásahy a vlastní činnost nového zařízení nezhoršila technickou bezpečnost a provozní spolehlivost provozovaných generátorů. Instalace zařízení SSC sond i připojení odběrů plynu pro GCM-X si vyžádá vnitřní konstrukční úpravy generátoru.

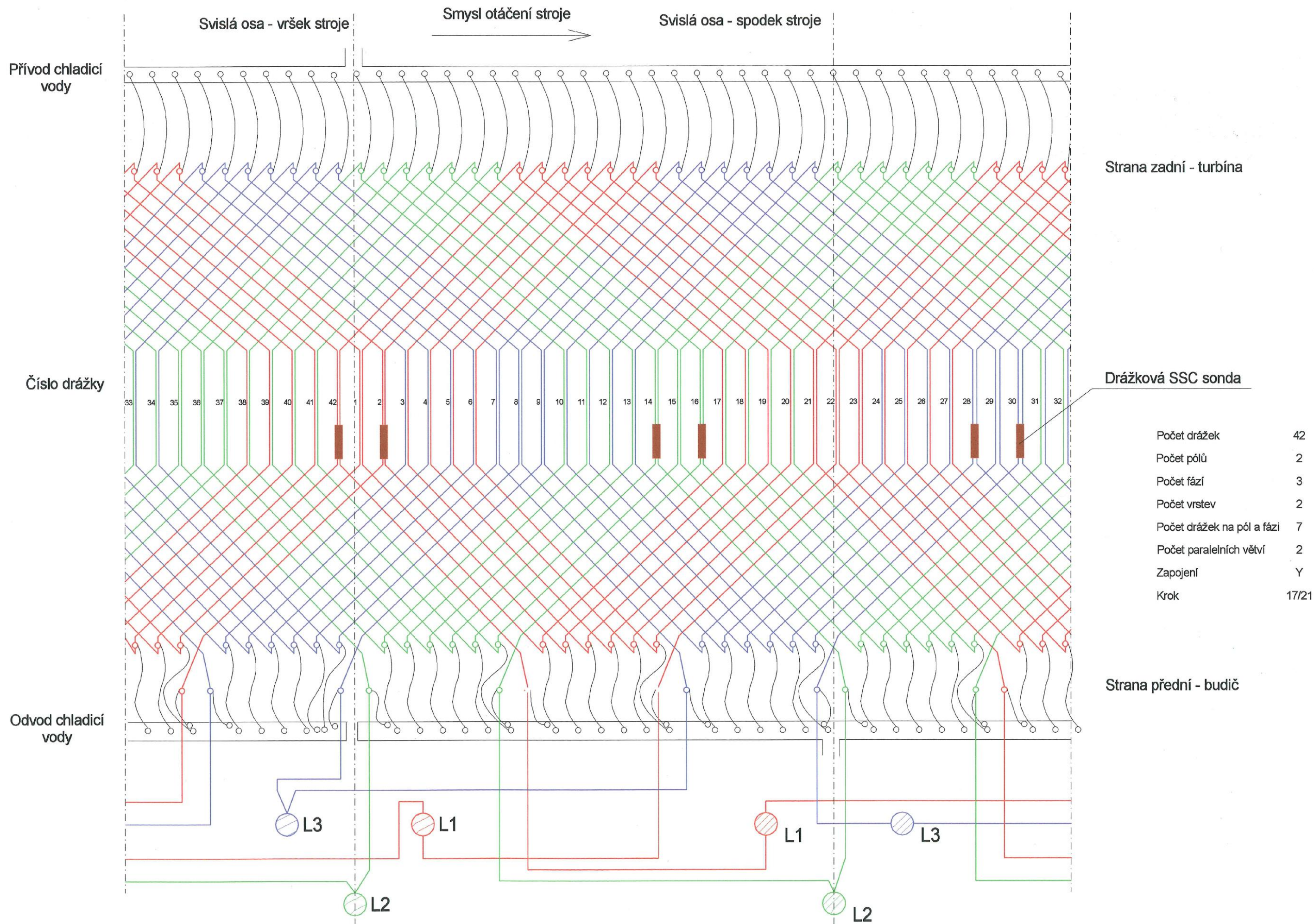
Tyto úpravy je možné provádět po důkladném rozboru se specialisty z výrobního závodu BRUSH.

Literatura:

- [1] WIKIPEDIA. Reaktoplast [online]. 2001, 7. 2. 2010 v 08:39 [cit. 2010-02-07].
Čeština. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Reaktoplast>>.
- [2] Power Exchange Central Europe, a. s.. Power Exchange Central Europe:
Energetická burza Praha [online]. 2007-2009 , každých 15 minut [cit. 2010-02-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.pxe.cz/> >.
- [3] MENTLÍK, Václav, et al. Diagnostika elektrických zařízení . BEN technická literatura. 1. vyd. [s.l.]: [s.n.], 2007. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [4] MENTLÍK, Václav. Diagnostika izolantů. [s.l.]: [s.n.], 1986. 62 s.
- [5] Technika zkoušek vysokým napětím - obecné definice a požadavky na zkoušky, ČSN IEC 60-1, ČSNI, Duben 1994, Praha
- [6] ZÁLIŠ, Karel. Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů. 1. vyd. Praha: Academia, 2005. 139 s. ISBN 80-200-1358-X.
- [7] E/One Utility Systems : Environment One Corporation [online]. 2000 [cit. 2009-11-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.eone.com>>.
- [8] Vyhodnocení programu měření částečných výbojů na transformátorech 2. bloku ETE.
- [9] VŮJTA, Josef, Torzní kmity velkých elektrárenských strojů. Diplomová práce, ČVUT 2008.

Seznam příloh

1. Podrobný harmonogram průběhu odstávky pro opravu rotoru generátoru
2. Rozložené vinutí generátoru 1000 MW s rozmístěním sond



Strana zadní - turbína

Drážková SSC sonda

Počet drážek	42
Počet pólů	2
Počet fází	3
Počet vrstev	2
Počet drážek na pól a fázi	7
Počet paralelních větví	2
Zapojení	Y
Krok	17/21

Strana přední - budič