



Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Revize turboalternátorů s výkonem na 50 MW

Autor práce: Pavel Longin
Vedoucí práce: Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

Plzeň 2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel LONGIN**
Osobní číslo: **E11B0053P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Revize turboalternátorů s výkonem na 50 MW**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

Zpracujte provádění revizí turboalternátorů s výkonem na 50 MW.

1. Popište konstrukční vlastnosti turboalternátorů používaných v elektroenergetice.
2. Zdůvodněte nutnost a obsah pravidelných revizí turboalternátorů větších výkonů.
3. Detailně upřesněte metodický postup při provádění revizí turboalternátorů.
4. Proveďte měření a záznam získaných hodnot prováděných při revizi turboalternátoru.
5. Porovnejte ekonomicky náklady spojené s revizí turboalternátoru s cenou nového alternátoru.

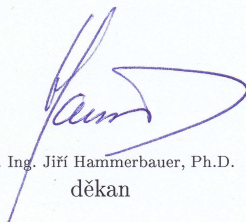


Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

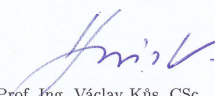
1. Bašta, Chládek, Mayer - Teorie elektrických strojů
2. Bartoš V. - Elektrické stroje
3. Beran M., Ibler Z. - Elektrárny II, skripta VŠSE

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předložená práce se zabývá problematikou revizních činností a údržby synchronních turboalternátorů nižších výkonů okolo 50 MW. Úvodní kapitoly vysvětlují základní konstrukční vlastnosti stroje. Následuje rozsáhlá a podrobná kapitola popisující podstatu a důležitost prováděných revizí a diagnostických měření. Výsledkem práce je demonstrace účinnosti prováděné revize na základě výsledků vlastního měření.

Klíčová slova

turbogenerátor, turboalternátor, revize, diagnostika, údržba

Abstract

Longin, Pavel. *Revision of turbine generators with an electrical power 50 MW* [*Revize turboalternátorů s výkonem na 50 MW*]. Plzeň, 2014. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electromechanics and Power Electronics. Supervisor: Karel Noháč

The thesis deals with the inspection and maintenance of synchronous turbo-generators with low output about 50 MW. The introductory chapters explain the basic structural features of an electrical machine. Next extensive and detailed chapter describes the principle and importance of performed inspections and diagnostic tests. Result of this work is demonstration the efficiency of an off-line diagnosis based on results of my own measurements.

Keywords

turbo-generator, revision, diagnosis, maintenance

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujícího autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 9. června 2014

Pavel Longin

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků	vi
Seznam symbolů a zkratk	viii
1 Úvod	1
2 Základní poznatky	2
2.1 Vývoj generátorů	2
2.2 Princip turbogenerátoru	3
3 Konstrukce	5
3.1 Stator	5
3.2 Rotor	7
3.3 Ložiska a ložiskové štíty	9
3.4 Budicí soustava	9
3.5 Chladicí systém	10
3.6 Pomocná hospodářství	11
4 Revize	12
4.1 Degradací vlivy na izolační materiály turbogenerátoru	13
4.1.1 Mechanické vlivy	13
4.1.2 Vliv vlhkosti a tepla	13
4.2 Práce při revizi	14
4.3 Měření prováděná při revizi	14
4.4 Podrobný popis základních měření prováděných při revizi	16
4.4.1 Vizuální kontrola statorového vinutí	16
4.4.2 Izolační odpor statorového vinutí	16
4.4.3 Izolační odpor rotorového vinutí	19
4.4.4 Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$, kapacita a časová konstanta statorového vinutí	20
4.4.5 Měření částečných výbojů statorového vinutí	22
4.4.6 Diagnostika jádra statoru metodou EL-CID	24
4.4.7 Silová magnetizační zkouška	26
4.4.8 Zkouška přiloženým napětím statorového vinutí	27

4.4.9	Zkouška přiloženým napětím rotorového vinutí	28
5	Výsledky vlastního měření	29
5.1	Vizuální kontrola a měření před odstavením	30
5.2	Měření statoru po odstavení před revizí	31
5.2.1	Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu	31
5.2.2	Měření kapacity a ztrátového činitele	32
5.2.3	Měření částečných výbojů	33
5.3	Měření statoru po revizi	35
5.3.1	Měření izolačního odporu	35
5.3.2	Měření kapacity a ztrátového činitele	36
5.3.3	Měření částečných výbojů	37
5.3.4	Zkouška elektrické pevnosti izolace vinutí statoru přiloženým napětím	37
6	Závěr	38
	Reference, použitá literatura	40
	Přílohy	43
A	Tabulky měření před revizí	43
A.1	Izolační odpor a výpočet polarizačního indexu	43
A.2	Ztrátový činitel a kapacita	44
A.3	Měření částečných výbojů	45
B	Tabulky měření po revizi	46
B.1	Izolační odpor a výpočet polarizačního indexu	46
B.2	Ztrátový činitel a kapacita	47
B.3	Měření částečných výbojů	48
B.4	Použité přístroje při jednotlivých měřeních	48

Seznam obrázků

2.1	Turbogenerátor firmy Alstom Převzato z [4] 	3
3.1	Stator turbogenerátoru při výrobě	7
3.2	Rotor turbogenerátoru	8
4.1	Časový průběh nabíjení a vybíjení dielektrika Převzato z [19] 	17
4.2	Rozdíl závislosti suché a vlhké izolace na čase po vložení do elektrického pole Převzato z [19] 	18
4.3	Schéma zapojení pro měření izolačního odporu statorového vinutí s rozpojeným uzlem Převzato z [15] 	19
4.4	justification=centerfirst	19
4.5	Schéma zapojení pro měření izolačního odporu rotorového vinutí Převzato z [15]	20
4.6	Fázorový diagram reálného dielektrika po přiložení napětí Převzato z [19] .	21
4.7	Schéma zapojení pro měření $tg\delta$ a kapacity Převzato z [15] 	22
4.8	Schéma zapojení pro měření částečných výbojů	24
4.9	EL-CID soustava Převzato z [25] 	25
4.10	Robotická sonda Převzato z [25] 	25
4.11	Graf z měření metodou EL-CID Převzato z [25] 	25
4.12	Zkouška magnetizace jádra statoru - silová Převzato z [28] 	26
4.13	Místo odhalené metodou EL-CID při silové zkoušce pod termokamerou Převzato z [26] 	27
5.1	Termovizní snímek celého generátoru	30
5.2	Termovizní snímek ložisek	30
5.3	Graf závislosti izolačního odporu na čase pro jednotlivé fáze před revizí	31
5.4	Graf polarizačního indexu před revizí	32
5.5	Graf ztrátového činitele před revizí	33
5.6	Graf napětí částečných výbojů a velikost zdánlivého náboje před revizí	34
5.7	Graf závislosti izolačního odporu na čase pro jednotlivé fáze po revizi .	35
5.8	Graf vypočteného polarizačního indexu po revizi	35
5.9	Graf ztrátového činitele po revizi	36
5.10	Graf napětí částečných výbojů a velikost zdánlivého náboje po revizi .	37

Seznam tabulek

5.1	Štítkové hodnoty synchronního turbogenerátoru v revizi	29
5.2	Provozní hodnoty stroje	30
A.1	Naměřené hodnoty izolačního odporu před revizí	43
A.2	Parametry prostředí při měření před revizí	44
A.3	Naměřené hodnoty kapacity a ztrátového činitele před revizí .	44
A.4	Vypočítané hodnoty změn ztrátového činitele v intervalech na- pětí a časová konstanta před revizí	44
A.5	Tabulka naměřených hodnot částečných výbojů před revizí . .	45
B.1	Naměřené hodnoty izolačního odporu po revizi	46
B.2	Parametry prostředí při měření po revizi	47
B.3	Naměřené hodnoty kapacity a ztrátového činitele po revizi . .	47
B.4	Vypočítané hodnoty změn ztrátového činitele v intervalech na- pětí a časová konstanta po revizi	47
B.5	Tabulka naměřených hodnot částečných výbojů po revizi . . .	48

Seznam symbolů a zkratek

ČV	Částečné výboje.
C_V	Bezeztrátový vazební kondenzátor [F].
C_Z	Měřený objekt.
d	Tloušťka dielektrika v místě průrazu [m].
E_p	Elektrická pevnost [V/m].
EL-CID	Electromagnetic Core Imperfection Detection. Detekce nedokonalosti elektromagnetického jádra.
f	Frekvence [Hz].
HA	Hydro alternátor.
I_N	Jmenovitý proud [A].
kV	Elektrostatický voltmetr.
l	Střední proud částečných výbojů [C/s].
n	Četnost částečných výbojů [$-$].
n_s	Otáčivá rychlost.
P_N	Jmenovitý výkon stroje [W].
p	Počet pól párů.
p_i	Polarizační index [$-$].
q	Zdánlivý náboj impulsu částečného výboje [C].
R_{iz}	Izolační odpor [Ω].
TG	Turbogenerátor.
T1	Transformátor.
T2	Transformátor 2.
t	Čas [s].
U_N	Jmenovité napětí [V].
U_i	Počáteční napětí částečných výbojů [V].
U_e	Zhášecí napětí částečných výbojů [V].
U_p	Průrazné napětí [V].
U_{zk}	Zkušební napětí [V].
Z	Impedance [Ω].
τ	Časová konstanta [s].
$tg\delta$	Ztrátový činitel [$-$].
$\cos\varphi$	Účinitel [$-$].

1

Úvod

Turboalternátor je elektrický točivý stroj, který přeměňuje mechanickou energii na elektrickou, a je základní částí procesu výroby elektrické energie v jaderných, plynových a uhelných elektrárnách, kde nese označení turbogenerátor. S dnešním rostoucím požadavkem na stabilitu dodávky energie rostou i požadavky na stabilní bezporuchový chod turbogenerátoru. Základem těchto požadavků je důkladná a profesionální péče o stroj zajišťována diagnostikou. Diagnostické měřicí metody zkoumají kvalitu technického stavu izolace a získávají cenná data o trendu degradace. Důležitou součástí celkové diagnostiky je provádění tzv. pravidelných revizí, při kterých je stroj odstaven, rozebrán, detailně prozkoumán, vyčištěn a proměřen. Na základě možnosti aktivně se podílet na revizi turbogenerátorů a aktuálnost tématu jsem se rozhodl zpracovat bakalářskou práci zaměřenou na revizi stroje a poukázat na její přínos. Jedná se o typ údržby, který je v odborné literatuře označován jako off-line, tj. kdy je údržba realizovaná v době plánované odstávky stroje.

Pokud se revize aplikují pravidelně a dlouhodobě ve stanovených intervalech, mohou výsledky zobrazené v časovém trendu předurčovat vývoj technického stavu. Je možné včas odhalit počínající závady, tomu podřídit plány údržby a zabránit nahodilým výpadkům provozuschopnosti technologie i ztrátám na výrobě. Odborně se tento postup označuje řízení životnosti nebo řízené stárnutí.

Základem práce je stručný popis konstrukce turbogenerátoru pro porozumění dalším kapitolám. Cílem je popsat použité metody technické diagnostiky, objasnit jejich fyzikální podstatu a analyzovat konkrétní výsledky a naměřené hodnoty měření a kontrol. Poté porovnat výsledky s kritérii uvedenými v předpisu výrobce nebo obecně platnými technickými normami a provést vyhodnocení technického stavu a na něm demonstrovat účinnost revize.

2

Základní poznatky

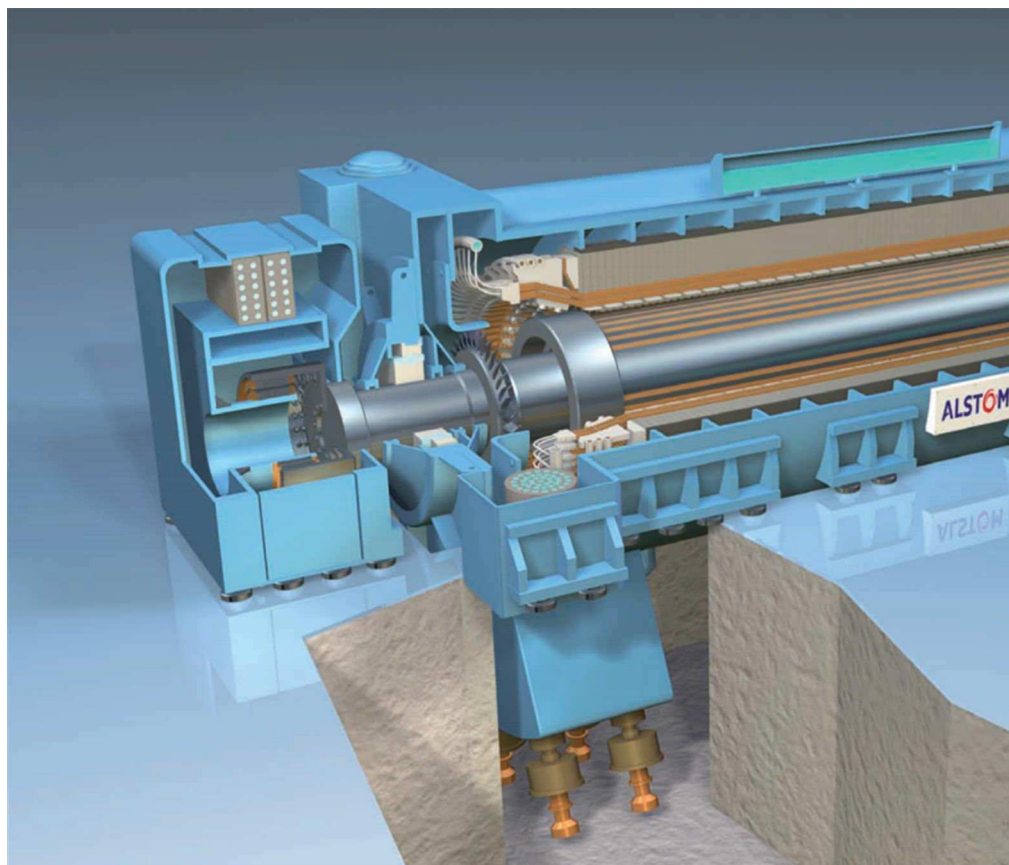
2.1 Vývoj generátorů

V roce 1834 Ruský fyzik Boris Semyonovich Jacobi postavil první stejnosměrný elektrický motor na světě, který mohl fungovat jako generátor. [1]

Jako první komerční použití synchronního generátoru se může označit den 24.8.1891. V tento den se uskutečnil první vysokonapěťový přenos střídavého proudu z města Lauffen do Frankfurtu, kde délka vedení měřila 200 km. Demonstrace proběhla při mezinárodní elektrické přehlídce ve Frankfurtu a byla tak přesvědčivá, že město Frankfurt ji použilo v jeho první elektrárně, zprovozněné roku 1894. V roce 1895 byla zprovozněna vodní elektrárna na Niagárských vodopádech, inspirována Lauffen-Frankfurtských přenosem střídavého napětí. V roce 1925 zprovozněním celkem 19 generátorů dosahovala výkonu 335 MW. [2]

Následoval koncept synchronního generátoru používaného jako motor, který byl následně v drtivé většině použití elektrických motorů nahrazen Teslovým indukčním motorem. Synchronní generátor ale zůstal univerzálním strojem pro výrobu elektrické energie. Základním parametrem vyrobené elektrické energie je frekvence. Dnes se nejčastěji používají dvě frekvence, v Americe převážně 60 Hz, a ve zbytku světa převážně 50 Hz. Ve vzácných případech se ještě můžeme setkat s frekvencí 25 Hz, která byla jako první použita právě v roce 1895 v elektrárně na Niagárských vodopádech. Postupem času rostla spotřeba elektrické energie, a tak rostla i velikost generátorů. Výstupní výkon stroje na jednotku váhy vzroste úměrně se zvýšením velikosti stroje, a to je ekonomicky velice výhodné. Proto se dnes můžeme běžně setkat se stroji dosahujícími výkonů více než 2 000 MVA. Nejvýkonnější generátory jsou používány v jaderných elektrárnách. Avšak z technologických důvodů je dnes velmi obtížné stavět větší generátory.[2]

Zatím největších výkonů dosahují čtyřpólové turbogenerátory dodávány firmou Alstom. Jsou chlazeny, stejně jako ostatní velké turbogenerátory, kombinací vodíku a vody. Výstupní mechanický výkon je v rozmezí 900 MW až 2 000 MW. [3]



Obr. 2.1: Turbogenerátor firmy Alstom |Převzato z [4]

2.2 Princip turbogenerátoru

Generátor je synchronní elektrický točivý stroj, který přeměňuje mechanickou energii na elektrickou. Generátory se dělí podle výkonů do tří kategorií[5]:

- malé do 75 MVA
- střední do 350 MVA
- velké nad 350 MVA

Magnetické pole rotoru a statoru se točí synchronně, tedy stejnou (úhlovou) rychlostí. Otáčivá rychlost závisí na počtu pólů, respektive na počtu pól párů a na frekvenci vztahem[6]:

$$n_s = \frac{60 * f}{p} \quad [ot/min] \quad (2.1)$$

kde

n_s - otáčivá rychlost v $[ot/min]$,

f - frekvence v $[Hz]$,

p - počet pól párů.

Točivý moment turbíny je přiváděn na rotor přes spojku, což je mechanické spojení rotoru generátoru a turbíny. Do vinutí rotoru je přes sběrací kroužky přiváděn stejnosměrný proud, tzv. budící napětí, čímž vzniká rotující (nestacionární) magnetické pole. Změnou toku magnetického pole (Faradayův indukční zákon) se přes vzduchovou mezeru mezi rotorem a státorem indukují do třífázového symetrického statorového vinutí střídavé napětí a proud. Výstupní třífázové napětí je symetrické a velmi podobné sinusovému průběhu.

Z konstrukčního hlediska známe dva druhy rotorů - rotor s vyniklými póly a rotor s hladkým rotorem (tvar válce). Generátory s hladkým rotorem se nazývají turbogenerátory a stroje s rotorem s vyniklými póly se nazývají hydroalternátory.

Turbogenerátory (dále jen TG) jsou rychloběžné stroje poháněné parními nebo plynovými turbínami. Rotor má tvar válce a budící vinutí je uloženo v drážkách rotoru. Jejich jmenovité otáčky jsou pro dvoupólové stroje 3000 ot/min pro frekvenci 50 Hz a 3600 ot/min pro frekvenci 60 Hz. Čtyřpólové TG mají rychlost 1500 ot/min pro frekvenci 50 Hz a 1800 ot/min pro frekvenci 60 Hz. TG se používají v tepelných, jaderných a paroplynových elektrárnách. [7] [8]

Hydroalternátory (dále jen HA) jsou pomaloběžné stroje poháněné vodními turbínami. Mají čtyři a více (např i 36) vyniklých pólů rotoru, na nichž mají navinuté budící vinutí. Většina hydro alternátorů má jmenovité otáčky v rozmezí 100 až 500 ot/min. Hydroalternátory se používají ve vodních a větrných elektrárnách. [8]

3

Konstrukce

Design musí být uzpůsoben tak, aby generátoru splňoval všechny nutné podmínky pro co nejlepší přeměnu energie s co nejmenšími ztrátami. Elektrické vodiče představující rotorové a statorové vinutí a jsou zpravidla měděné. Magnetický obvod je složen z vysoce permeabilního železa. Dále se ve stroji nachází izolační materiály, konstrukční prvky a chladicí prvky. Všechny tyto části se podílejí na správné funkci stroje.

TG s výkonem 50 MW jsou chlazeny vzduchem, proto se v mé práci omezím pouze na vzduchem chlazené TG. Základní části stroje jsou [6]:

1. Stator - kostra, jádro, vinutí
2. Rotor - tělo rotoru, budící vinutí
3. Ložiska a ložiskové štíty
4. Budící soustava
5. Chladicí systém
6. Pomocná hospodářství

3.1 Stator

Kostra

Kostra statoru se skládá z ocelových plechů, které jsou svařeny trámci. U větších TG bývá složena z vnitřní a vnější částí. Vnitřní kostra je vůči vnější kostře odpružená, pro zamezení přechodu vibrací ze stroje na vnější kostru. V nejhorším případě může jít o rezonanční kmitání. Uvnitř kostry jsou nasazeny plechy na pravítka, které dohromady tvoří jádro statoru. Nemagnetickými svorníky se stáhne magnetický obvod mezi dvě nemagnetické desky. Na stahovacích deskách jsou připevněny magnetické bočníky z orientovaných plechů, které stíní konce magnetického obvodu. [6] [8]

Jádro

Statorové jádro tvoří největší podíl na váze a protéká jím střídavý magnetický tok. Aby se snížily ztráty v železe (hysterezní a ztráty vířivými proudy), je jádro složeno ze vzájemně izolovaných elektrotechnických plechů. Plechy ražené na jednotlivé segmenty se skládají do vnitřní kostry tak, aby se částečně překrývaly a dohromady tvořily prstencové jádro statoru. Nástřík velmi slabé vrstvy organického nebo anorganického laku je vzájemně izoluje právě pro zmenšení ztrát vířivými proudy. Pro docílení potřebných parametrů jsou plechy legované křemíkem, nebo jsou válcované za studena. Legují se 3% až 4% Si, a to je řadí do skupiny vysoce legovaných plechů. S obsahem křemíku také klesá tepelná a elektrická vodivost, což zároveň vede k poklesu magnetické vodivosti, avšak pouze minimálně. Plechy válcované za studena získávají orientovanou strukturu, která přispívá k lepší permeabilitě ve směru válcování, a tedy i k nižším ztrátám. Válcované je provedeno zpravidla tak, že směr válcování je kolmý k zubům plechů a nejlepší magnetická vodivost je ve středu plechu a používají se pouze pro velké TG s vyššími ztrátami. Používané šířky plechů jsou 0,355 mm a 0,483 mm. Obvykle jsou měrné ztráty v jádře v rozmezí 1 až 1,7 W/kg. [9]

Vinutí

Vinutí statoru je uloženo v otevřených drážkách v jádře statoru. Používá se tyčové dvouvrstvé košové vinutí. Jednotlivé závitů vinutí se skládají z více vodičů obdélníkového průřezu, zohýbaných a složených takovým způsobem, aby každý vodič prošel všemi polohami v průřezu drážky tzv. Roeblova tyč. Pak indukovaná napětí v jednotlivých vodičích jsou stejně velká. Dílčí vodiče jsou na obou koncích tyče vzájemně spojeny. U velkých turbogenerátorů se konce tyčí nepájí dokrátka, ale pokračuje se v permutaci (střídání vodičů) i v čelech vinutí.

Dílčí vodiče jsou od sebe izolovány impregnovaným skelným opředěním o tloušťce 0,1 mm a v místech křížení vodičů se pro zesílení izolace vkládají slídové plátky. Celá tyč je následně zpevněna lepícím lakem (např. fenolovým) nebo tvrditelnou lepící syntetickou pryskyřicí. V nejužším místě, kde se vodiče kříží, vznikají mezery, které se vyplňují vhodným tmelem, aby se v tomto místě nevyskytovali žádné bublinky.

Tyč je olisována mikrofolií a ovinuta slídovou páskou, jejímž nosným materiálem je skelná tkanina. Ve snaze předejít koróně mezi mědí a izolací se používají ochrany proti vnitřní koróně. Funkce této ochrany je kontrolována měřením ztrátového činitele $tg\delta$. Dále se po celé délce tyče opatřuje odporovým povlakem pro zamezení koróny na povrchu. Mezi tyčemi v dvouvrstvě vinutí se používá jako izolace tvrzený papír a mezi tyčí a jádrem statoru se používá grafitový papír. [9]

Tyče se vyrábějí jako celek a čela vinutí jsou na obou koncích tvarovány do prostorově zakřivené evolventy. Evolventa je ideální křivka, protože právě evolventa má stejnou vzdálenost po celé délce oblouku (je ekvidistantní). V místě výstupu vinutí z drážek a přechod v evolventu je největší pravděpodobnost výskytu trsových výbojů

a korony. Vzdálenost dvou oblouků čel vinutí závisí na napětí, ventilaci a zapalovacím napětí korony. Při nejvyšším napětí, které se může v provozu vyskytnout nesmí docházet k trsovým výbojům, ty by značně poškodily izolaci.

Vinutí je do drážek vkládáno, a protože na vinutí působí velké magnetické síly, je v drážce zaklínováno. Klíny vsazeny do rybiny a tyče spolu musí tvořit pevný celek. Ve vzduchových mezerách by docházelo k výbojům narušujícím izolaci vinutí. Na tyče uložené v drážkách působí velké periodicky proměnné síly pulsují na dvojnásobné frekvenci proudu procházejícím tyčí. V každé půlčluně stlačují cívku na dno drážky. Při zkratu tedy dosahují značných hodnot, proto je důležité správné zaklínování tyčí v drážkách, aby byly proti těmto silám chráněny.[6]

Čela vinutí jsou nejvíce mechanicky namáhána při zkratovém proudu. Nejnamáhavější místa jsou na výstupu tyče z drážky a v místě, kde se kříží čelní spojky stejné fáze, proto je koš vinutí najednou upevněn více způsoby (distanční vložky, svorky, bandáže a svorníky). Celý svazek čel je v rovině kolmé k ose otáčení upevněn ke stahovacímu kruhu aktivních plechů svorníky a vyztužen opěrnými kruhy a konzolami. U velkých strojů musí být celá vyztužující konstrukce vyrobena z nekovových materiálů, aby se zabránilo nepřípustnému oteplení, způsobenému vířivými proudy. [6]



Obr. 3.1: Stator turbogenerátoru při výrobě

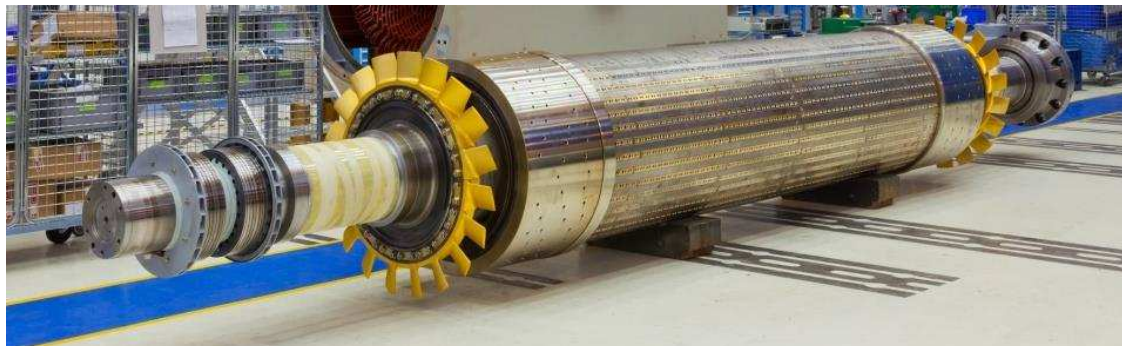
3.2 Rotor

Tělo rotoru

Rotor TG je hladký a otáčí se velkou rychlostí, která limituje jeho velikost. Při průměru rotoru 1 m je obvodová rychlost 157 m/s (565 km/h), na rotor tedy působí obrovské odstředivé síly. Z toho vyplývá omezení rozměrů stroje: průměr max 1,3 m a délka několik metrů. [8]

Protože rotorem neprochází střídavý magnetický tok, je hřídel vysoustružena z vykovaného válce z oceli. Na jednom konci má turbo rotor buď vykovanou přírubu, nebo nasazenou spojku pro spojení s turbínou a na druhé straně je nasazen rotor budiče.

Ventilátory pro chlazení mohou být na obou stranách nebo jen na straně budiče. TG s výkonem nad 5 MVA mají pružný hřídel, ten při spouštění prochází první kritickou otáčivou rychlostí, a proto by spouštění mělo být co nejrychlejší. [6] [9]



Obr. 3.2: Rotor turbogenerátoru

Vinutí rotoru

Budící vinutí je uloženo v radiálních drážkách rotoru. Je jednovrstvé a složeno z více vodičů. Vodiče se pro lepší mechanické vlastnosti vyrábí z mědi mírně legované stříbrem. Mohou mít různý tvar průřezu, ten závisí na druhu chlazení. Vodiče menších rotorů s povrchovým chlazením jsou obdélníkového průřezu. Při nutnosti lepšího odvodu tepla se do cívek vylisovávají kulaté nebo oválné otvory a chladicí médium (vzduch) se přivádí na dně drážek. Cívky mohou být rozděleny a odděleny izolačními vložkami a chladivo proudí mezerou mezi cívkami. Vodiče větších rotorů jsou duté nebo profilované. Jednotlivé vodiče cívky jsou od sebe izolovány. Závitová izolace musí být dimenzována na plné budící napětí a musí odolat zkušebnímu budícímu napětí proti zemi. Izolaci tvoří skelná tkanina se syntetickou pryskyřicí nebo s umělou pryskyřicí tzv. sklotextit. [9]

Do drážek se vinutí vkládá po závitech a při větších rozměrech se mohou závity vkládat po částech. Proti odstředivým silám je vinutí uloženo pod nemagnetickými bronzovými klíny různých tvarů - lichoběžníkový průřez, s hlavou tvaru T, půlkulový průřez atd. Drážky mají rovnoběžné boky, šikmé boky (kónické drážky) a odstupňované pro rotory největších výkonů. Drážky sousedící s pólem rotoru bývají méně hluboké než ostatní drážky z toho důvodu, aby nedocházelo k zúžení magnetického toku pólu. Počet drážek závisí na průměru rotoru a zpravidla jsou rozděleny po 2/3 obvodu rotoru. Čela vinutí mimo rotor jsou chráněny nemagnetickými obručemi. Protože síly působící na obruče jsou obrovské, podstatně ovlivňují maximální velikost průměru rotoru.[9] [6]

Při velkém nesouměrném zatížení začne rotor kývat. Kývání je periodické zrychlování a zpouzdňování okolo rovnovážné polohy způsobené periodicky se opakujícími rušivými elementy. Proto je v rotoru tlumící vinutí, které v případě kývání vrací rotor

do původní polohy a tlumí vyšší harmonické. Tlumící vinutí je v rotoru složeno z bronzových klínů a bandáží čel vinutí. Klíny jsou po celém obvodu rotoru spojeny bandážemi dokrátka a jejich spojení musí být kvalitně provedeno, aby nedocházelo k opalování konců klínů a dosedacích ploch obručí na těleso rotoru. [6] [9]

3.3 Ložiska a ložiskové štíty

Rotor je na obou koncích podepřen radiálními kluznými ložisky. Protože rotor může vážit i několik desítek tun, je důležité použít taková ložiska, ve kterých se rotor bude točit s minimálním třením a vibracemi. V některých případech je rotor na straně budiče velmi dlouhý, proto se za budič přidává stabilizační ložisko, které zabraňuje tvorbě vibrací na straně budiče a jejich šíření do rotoru.[10]

Pro nejmenší tření se používají olejová ložiska. Olej v ložisku je pod velkým tlakem a tvoří tenkou vrstvu filmu mezi třecími plochami. V ložisku nesmí dojít k porušení filmu a tření kovů. Větší stroje jsou na stojanech na společné základní desce se statorem. [10]

3.4 Budicí soustava

Její spolehlivost zásadně ovlivňuje spolehlivost elektrického bloku a tím i dodávku energie do sítě.

Budicí soustava zajišťuje kontakt mezi budícím vinutím rotoru a napájecím zdrojem stejnosměrného proudu a skládá se z budiče, odbuzovače, regulátoru buzení, ručního řízení a čidel. Další důležitou úlohou budicí soustavy je plynulou regulací budícího proudu ovlivňovat velikost svorkového napětí generátoru. Velikost výkonu TG závisí na výkonu turbíny a velikosti budícího proudu, proto regulace turbíny a budicí soustava spolu tvoří jeden celek. [5] [11]

Pro buzení TG menších a středních výkonů postačuje jeden budič nasazen letmo na hřídel rotoru. U větších TG je budič připojen pružnou spojkou (např. zubovou). Je-li spojka elektricky izolována, nejsou pro zamezení ložiskových proudů nutná další opatření.[6]

Větší stroje mohou mít dva budiče, jeden hlavní a druhý pomocný. Vzájemně jsou mechanicky spojené přes spojkou. Při výkonech řádově 100 MVA až 150 MVA se spojují přes převodovku na menší otáčivou rychlost. Pomocný budič může být proveden jako střídavý generátor nebo s permanentními magnety. Budicí proud je do budící vinutí dodáván ze svorek TG nebo z generátoru mechanicky spojeným s rotorem. [6]

Sběrací ústrojí se skládá z kroužků a kartáčů a je podepíráno vlastním ložiskem.[11] Kroužky pro přívod budícího vinutí jsou umístěny ve vzduchu mimo okruh chladícího média. Je-li je spojka nasazená, kroužky se umísťují symetricky na obou koncích rotoru, pokud je spojka vykovaná, jsou oba kroužky nasazené na straně volného konce.

Na obvodu mají zpravidla vytočenou drážku tvaru šroubovice, která zlepšuje chlazení a zároveň zabezpečuje rovnoměrné rozložení proudu mezi kartáčem a kroužkem. [6] Například na jednu polaritu jsou dva sběrací kroužky a 80 kartáčů. [11]

Z důvodu hluku nebo ochrany proti nebezpečnému dotyku mohou být kroužky schovány v krytu. Uvnitř krytu vzniká díky třením a průchodu proudu ztrátové teploty, které se musí odvádět. Teplota by měla být co nejnižší. [6]

Rozeznáváme 4 druhy kartáčů - tvrdé uhlíkové, z přírodního grafitu, kovové a elektrografitické kartáče. Jakost kartáčů určují jejich složení - velikost zrn jednotlivých surovin, impregnace mazadly, pojivy, prchavé složky a další přísady. Různé kartáče mají různé vlastnosti - elektrická vodivost, měrná hmotnost, pevnost v lomu, součinitel tření, závislost úbytku napětí na proudové hustotě a další. Důležitá vlastnost uhlíku je záporný tepelný součinitel odporu, proto se na stroji musí používat stejné kartáče, jinak by například jeden kartáč při stejné teplotě odebíral více proudu. [6] [12] [13]

Používají se statické nebo bezkartáčové soustavy, avšak dnes jsou stejnosměrné budící systémy nahrazovány výkonovými polovodičovými součástkami. [14]

3.5 Chladicí systém

TG jsou chlazeny vzduchem, vodíkem nebo kombinovaným chlazením. Protože vodíkové a vodní chlazení je velice nákladné a složité, dnešní tendence je vyrábět TG se vzduchovým chlazením i při vyšších výkonech. Pro vyšší výkony již nestačí vzduchové chlazení a zařazuje se pomocné chlazení vodou. Pro největší výkony (například v jaderných elektrárnách) se používá kombinace chlazení vodíkem a demineralizovanou vodou, kde voda proudí ve statorových cívkách a vodík chladí rotor. [6]

Vodík má oproti vzduchu hned několik výhod - lepší tepelnou vodivost (14x), nižší tření o rotor, zvyšuje průrazné napětí a potlačuje částečné výboje. Protože ale při použití vodíku jako chladicího média hrozí nebezpečí výbuchu, musí být vnější kryt TG navržen tak, aby odolal vnitřnímu výbuchu. [6]

Chlazení vzduchem

Stator je zapuštěn do základů a podsklepen chladičem. Chybí-li možnost podsklepení, jsou chladiče uloženy uvnitř turbogenerátoru jako při vodíkového chlazení. *”Chladiče musí být dimenzovány tak, aby TG mohl pracovat trvale alespoň na 2/3 jmenovitého výkonu, je-li část chladičů vyřazena z provozu (např. při čištění), aniž by při tom byly překročeny pro stroj dovolené hodnoty.”* [6] U oběhového chlazení TG se provádí tzv. uzemnění okruhu. Provádí se na sací straně ventilace, a jde o spojení vnější atmosféry s vnitřní atmosférou přes filtr. Je stanoven jednoznačný průběh tlaku a cílem uzemnění je vytvořit přetlak ve vnitřním prostoru. Netěsnostmi ve vnějším krytu tedy nemůže vnikat vzduch do vnitřní atmosféry, ale pouze unikat. Vzduch dovnitř TG se

dostává právě jedinou možnou cestou přes uzemnění, tedy vzduchovým filtrem.[6]

Vzduchem chlazené TG mají zpravidla vlastní chlazení realizováno větrákem upevněným na rotoru. Menší TG mají jeden větrák, větší TG mají 2 větráky na obou stranách rotoru. Používá se sacího i tlačného systému ventilace. [6]

V důsledku překrytí čel obručkami by docházelo ke špatnému odvádění tepla, proto jsou obruče opatřeny otvory pro vyfukování chladícího vzduchu. Ventilátory foukají vzduch do prostoru čel, odkud jde do celého prostoru TG. [9]

3.6 Pomocná hospodářství

TG vyžadují olejové ložiska, chlazení vodíkem, chlazení statorového vinutí demineralizovanou vodou, těsnící olej a budící proud. Zařazení jednotlivých systémů závisí na velikosti TG. Například při použití chlazení vzduchem namísto vodíkového není potřebný olej utěsňující vodík. Obecně TG s výkonem nad 400 MVA vyžadují všechny pomocné systémy. Základní pomocné systémy jsou [10]:

- **olejové hospodářství** - zajišťuje zahlcování radiálních ucpávek rotoru TG tlakovým olejem, který zabraňuje únik plynu do vnějšího prostředí
- **plynové hospodářství** - v případě chlazení vodíkem, zajišťuje vodík a CO_2
- **vodní hospodářství** - zajišťuje cirkulaci vody dutými vodiči statorového vinutí

Olejové hospodářství je společné pro generátor a turbínu. Každý systém má spoustu variant provedení ale v zásadě vždy plní stejnou funkci. [10]

4

Revize

S rostoucím věkem stroje roste pravděpodobnost poruch. Zvýšení spolehlivosti bezporuchového chodu generátoru se docílí pravidelnou kontrolou všech namáhaných součástí.[16]

Diagnostika je jednou z cest, jak zvýšit spolehlivost zařízení, a tím snížit nebezpečí vzniku poruch, neplánovaných odstávek či havárií. Základem je provádění a vyhodnocování systému zkoušek během celého života elektrického zařízení. Diagnostické měření za provozu jsou označovány jako on-line a po odstavení stroje se jedná o off-line diagnostiku. Z hlediska celého života stroje se zkoušky a měření provádějí při [15]:

- montáži nového stroje
- uvádění stroje do provozu
- sledování jednotlivých parametrů během provozu (za provozu i při odstávkách)
- opravách, revizích a modernizacích (vždy před a po)

Nejnamáhanější součástí stroje je jeho izolační soustava. Diagnostická měření umožňují sledovat stárnutí izolace a předcházet výraznému poškození stroje. Změna parametrů zařízení během provozu je určující pro korekci doby plánovaných odstávek pro běžné a generální opravy. Plány zkoušení se liší dle charakteru generátoru (turbogenerátory, hydroalternátory, chlazené vzduchem, vodíkem nebo kombinovaným chlazením). Díky pravidelným odstávkám lze na poruchy přijít již v zárodku, a tak předejít vážnějším poruchám a neplánovaným odstávkám stroje. Mechanické, technologické a tepelné vlastnosti izolace se zpravidla postupem času zhoršují. Tyto degradační procesy v izolaci jsou nevratné a izolace praská, láme se a křehne. Následkem degradace může docházet k elektrickému či tepelnému průrazu izolace.[16]

Elektrické zařízení lze opravit nebo nahradit vadné části a opět uvést do provozu. S rostoucím věkem stroje roste jeho poruchovost a revize jsou nákladnější. Technická smrt stroje je jeho vyřazení z provozu. To nastane za předpokladu, kdy jsou roční náklady na údržbu stroje již tak vysoké, že převyšují náklady spojené s instalací nového stroje.[16]

4.1 Degradální vlivy na izolační materiály turbo-generátoru

V TG jsou izolační materiály vystaveny kombinacím elektrického, mechanického, tepelného a chemického namáhání. Tyto vlivy způsobují postupnou degradaci izolačních materiálů v podobě opotřebení, únavy materiálu, koroze a jiné chemické a mechanické změny. Degradace může být tak vysoká, že dojde k poruše izolace a havárii stroje. Velice důležité je zde on-line měření umožňující nejen sledovat aktuální stav ale i možnost předpovídat chování zařízení. [15] [16]

4.1.1 Mechanické vlivy

Za provozu TG působí vzniklé točivé magnetické pole rotoru na elektrické a magnetické části statoru velkými mechanickými silami. V důsledku působení těchto sil může v nejhorším případě dojít k popraskání čel vinutí statoru, uvolnění tyče statorového vinutí v drážce nebo k poškození magnetického obvodu statoru. Při uvolnění stažení statorového jádra dochází k vzájemnému otírání plechů. Izolační nátěr plechů se naruší, dojde k nárůstu vířivých proudů a tedy i ztrát, to vede k lokálnímu zvýšení teploty, a dokonce i k možnému natavení magnetického obvodu. Tyč statorového vinutí je vlivem sil stlačována na dno drážky a přitahována k rotoru. Při tomto pohybu se ničí polovodičový nátěr tyče a zároveň vzniká vzduchová kapsa mezi tyčí a jádrem. Vzduchová kapsa se nabíjí když se tyč vzdaluje od jádra statoru a při přiblížení se vybíjí. Vlivem těchto procesů dojde k úplnému odstranění polovodičového nátěru a poté vznikají klasické částečné výboje, které dále zvyšují míru degradace izolačního materiálu. Z tohoto důvodu musí být vinutí v drážkách přesně uloženo a pevně zaklínováno. Na čela vinutí působí největší magnetické síly. Čela se mohou uvolnit a rozkmitat čímž dochází k odlupování izolace vinutí. Následkem vibrací může tyč prasknout a může dojít k úniku demineralizované vody do prostoru stroje(je-li součástí).[17]

4.1.2 Vliv vlhkosti a tepla

Degradace izolace vlivem zvýšeného teploty je patrná již při vizuální prohlídce stroje. Během tepelného stárnutí dochází k nevratným fyzikálně-chemickým procesům v dielektriku. Tyto degradační procesy probíhají za jakékoliv teploty, avšak platí, že s růstem teploty se zvyšuje počet a rychlost chemických reakcí. Vlivem tepelné roztažnosti se uvolní klíny fixující tyče statorového vinutí v drážkách. To umožní vznik částečných výbojů ve vzniklém prostoru. Dochází ke změnám elektrických vlastností izolačních materiálů, zhoršení mechanické pevnosti, zhoršení pružnosti a měknutí materiálu. Vlhkost je další velmi významný činitel zhoršující izolační vlastnosti dielektrika. [17][18]

4.2 Práce při revizi

V rámci revize se demontuje celý stroj na jednotlivé komponenty. Poté se provádí důsledné čištění, případné výměny poškozených částí, kontrola geometrických rozměrů a jejich porovnání s projektovou dokumentací. Následují diagnostická měření a ostatní nedestruktivní zkoušky. Po ověření kvality všech komponentů se provádí ve zpětném pořadí kompletace generátoru ve funkční celek.

Postup při demontáži:

1. demontáž protihlukového krytu
2. výchozí měření souososti soustrojí – generátor - turbína
3. rozspojování soustrojí – odpojení generátoru od turbíny a budiče
4. demontáž ucpávek a statorových čelních štítů
5. vertikální fixace rotoru – mírné nadzdvihnutí (odlehčení spodních ložiskových pánví) a zajištění polohy
6. demontáž ložiskových uzlů se současným spuštěním rotoru do dutiny statoru (místo kontaktu rotoru se státorem vyplněno tlumícím materiálem, např. tvrzeným papírem)
7. montáž speciální dráhy pro přípravek k vytažení rotoru
8. upevnění rotoru do přípravku a transport mimo dutinu statoru
9. odložení rotoru do speciálního přípravku (stojanu) pro realizaci revizních prací

Následuje vyčištění stroje (očištění zaneseného rotoru i statoru uhlíkovým prachem případně olejovými parami) a zpětná montáž v obráceném pořadí.

4.3 Měření prováděná při revizi

Základní měření prováděné při revizi jednou za 1 až 2 roky obsahuje:

Základní měření[15]:

1. vizuální kontrola stroje
2. měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu statorového a rotorového vinutí
3. měření napěťové závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí

4. měření kapacity, ztrátového činitele a výpočet časové konstanty statorového vinutí
5. měření částečných výbojů statorového vinutí galvanickou metodou
6. zkouška přiloženým napětím statorového vinutí střídavým napětím 50 Hz (nelze-li použít střídavým napětím, může se provést zkouška stejnosměrným napětím)
7. zkouška rotorového vinutí střídavým napětím 50 Hz

Doplňující měření[15]:

1. indikace ozónu v chladícím vzduchu
2. měření hluku
3. měření částečných výbojů statorového vinutí akustickou sondou
4. měření částečných výbojů statorového vinutí diferenciální elektromagnetickou sondou
5. zkouška statorového vinutí střídavým napětím 50 Hz
6. zkouška rotorového vinutí střídavým napětím 50 Hz
7. zkouška statorového vinutí stejnosměrným napětím
8. zkouška statorového vinutí napětím velmi nízkého kmitočtu
9. diferenční termická analýza
10. zkouška závitové izolace statorového vinutí prudkými pulzy

Provedené měření a zkoušky ale závisí především na provozovateli stroje popřípadě na doporučení firmy provádějící revizi. Nevyhoví-li stroj v některý z diagnostických měření požadovaným parametrům, zařazují se do revize **doplňující měření**.

4.4 Podrobný popis základních měření prováděných při revizi

V následujících podkapitolách jsou podrobně popsány základní měření prováděné při revizi. Na základě teoretických úvodů a předpokladů k jednotlivým měřením lze v další kapitole vyhodnocovat výsledky vlastního měření.

4.4.1 Vizualní kontrola statorového vinutí

Jedná se o první kontrolu stroje. Díky této jednoduché, avšak velmi důležité kontrole lze získat první údaje o stavu stroje. Nadměrné působení různých vlivů má různé následky a již při vizualní kontrole lze určit o jakou poruchu se jedná.

Kontroluje se především statorové vinutí, stav paketu, systém měření teplot, průchodky, stav teflonových hadic a průchodek vodního systému (je-li součástí). Dále se kontroluje tuhost klínů držících cívky statorového vinutí v drážkách. Po očištění povrchu čel vinutí se kontroluje tuhost rozpěrných palců na výstupu tyčí z drážky, tuhost rozpěrek hlav vinutí, tuhost rozpěrek evolventních částí vinutí, utažení šroubů upevňující koš vinutí ke statoru, tuhost bandáží přichycujících rozpěrky a vinutí, utažení šroubových svorek. Kontrola tuhosti klínů v drážkách statoru se provádí poklepáním měděným kladívkem nebo přístrojem pro měření tuhosti klínů. Podle akustické či elektrické odezvy lze rozpoznat utaženost klínu v drážce.[15]

4.4.2 Izolační odpor statorového vinutí

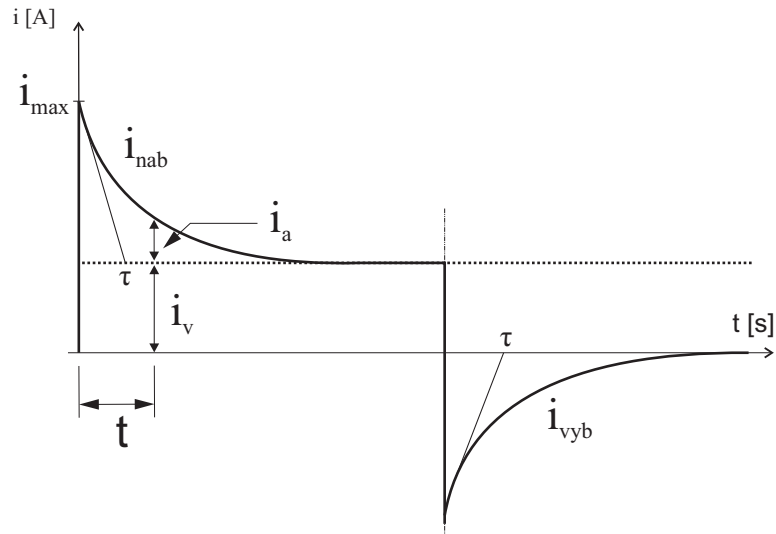
Izolační systém elektrického stroje je nehomogenní dielektrická soustava umístěná mezi dvěma elektrodami. První elektroda je tvořena vodičem vinutí dané fáze a druhá elektroda je stator se všemi uzemněnými částmi. [19]

Po vložení dielektrika do elektrického pole nejprve začne probíhat přechodový děj tzv. dielektrická absorpce. Je to složitý nestacionární děj, při němž dielektrikum není schopno okamžitě reagovat na skokovou změnu intenzity elektrického pole a dielektrikum se nabije s určitým zpožděním. Ten samý děj probíhá i při vybíjení dielektrika. Doba trvání přechodového děje závisí na stavu dielektrika. Čím kratší jsou přechodové děje, tím horší je stav dielektrika. [19]

Proud protékající izolačním systémem má tři hlavní složky [20]

- **kapacitní proud** (i_{nab}) neboli nabíjecí proud. Je dán vnitřním odporem zdroje, zaniká velice rychle v okamžiku, kdy je na zkoušeném předmětu plné napětí.
- **absorpční proud** (i_a) je způsoben polarizací dielektrika. Reprezentuje pohyb vázaných nosičů elektrického náboje v dielektriku.

- **vodivostní proud** (i_v) označovaný jako svodový. Je to proud protékající izolací a způsobuje činné ztráty v izolaci. Je vytvořen volnými nosiči elektrického náboje v dielektriku.



Obr. 4.1: Časový průběh nabíjení a vybíjení dielektrika [Převzato z [19]]

Podle obrázku 4.1 je zřejmé, že po přiložení napětí bude hodnota izolačního odporu nejnižší, ale postupně se bude zvyšovat, až se ustálí na maximální hodnotě. Hodnota naměřeného izolačního odporu je také závislá na velikosti měřícího napětí[20].

Při výpočtu vycházíme z Ohmova zákona:

$$R_{iz} = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad (4.1)$$

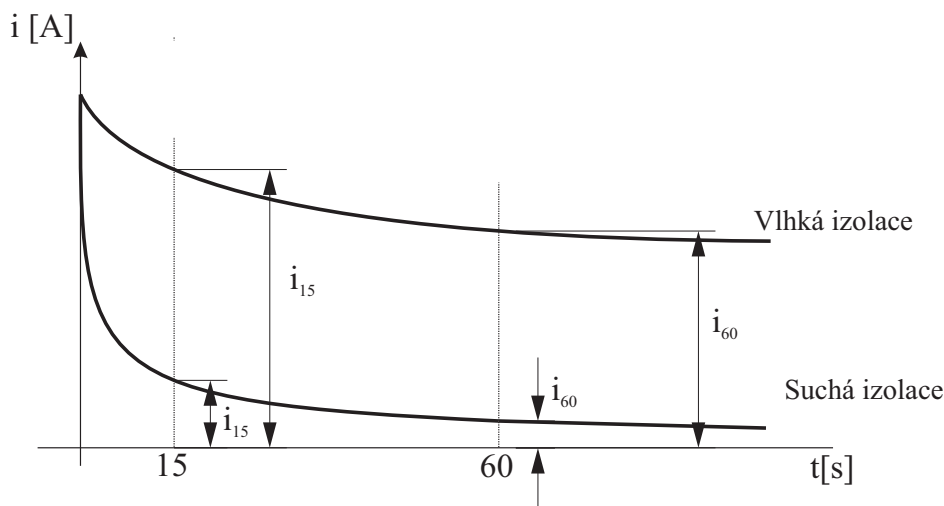
kde

R_{iz} je izolační odpor [Ω],

U je velikost stejnosměrného napětí [V],

I je velikost proudu protékajícím izolačním systémem [A].

Na obrázku 4.2 je znázorněn rozdíl mezi suchou a vlhkou, znečištěnou a degradovanou izolací. Křivka suché izolace zprvu strměji klesá a poté se začne ustalovat. Oproti tomu křivka vlhké izolace klesá mnohem pomaleji.



Obr. 4.2: Rozdíl závislosti suché a vlhké izolace na čase po vložení do elektrického pole
[Převzato z [19]]

Měření se provádí na stroji po odstavení a po vyčištění před opětovným uvedením do provozu. Rotor nemusí být vyjmut ze stroje a před začátkem měření se rozpojí uzel vinutí, je-li to technicky možné. Jednotlivé fáze se měří zvlášť, nejsou-li začátky jednotlivých vinutí vyvedeny zvlášť, pak se vinutí zkouší jako celek. Po přiložení stejnosměrného napětí se ve vinutí odehrávají přechodové děje, díky kterým se nabíjí kondenzátor tvořen dielektrickou soustavou mezi dvěma elektrodami. Izolační odpor je zpočátku malý ale postupně se ustálí na konstantní hodnotě. U izolace statorového vinutí se považuje ukončení absorpčních dějů doba řádově desítek minut. Hodnota izolačního odporu se odečítá po 15, 60, 120 až 600 s po připojení zdroje napětí. Z těchto hodnot se vypočítá polarizační index p_i [15]:

- minutový

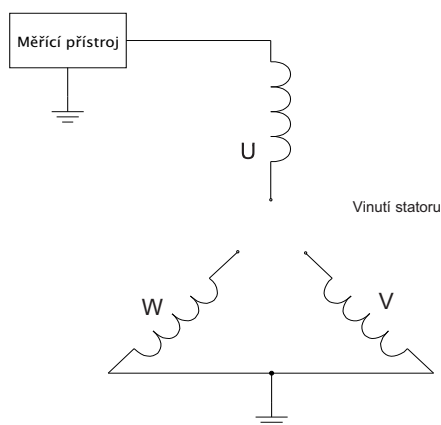
$$p_{i60} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}} \quad [-] \quad (4.2)$$

- desetiminutový

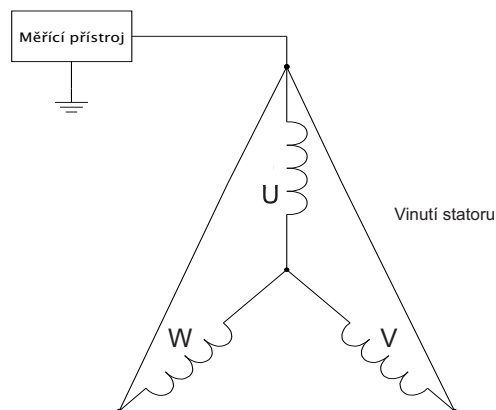
$$p_{i600} = \frac{R_{iz600}}{R_{iz60}} \quad [-] \quad (4.3)$$

Číslo ve spodním indexu izolačního odporu R_{iz} udává čas po zapojení měřícího napětí v sekundách.

Polarizační index je veličinou charakterizující skutečný technický stav izolace. Čím je hodnota polarizačního indexu větší, tím déle trvaly přechodové děje v izolaci statorového vinutí a izolace je v dobrém stavu. Trvají-li absorpční děje krátkou dobu, znamená to, že izolace je znečištěná, navlhla a degradovaná a odpovídá polarizačnímu indexu okolo čísla jedna. Hodnota polarizačního indexu je ovlivněna vlhkostí, znečištěním stroje, produkty degradace izolačního systému případně i konstrukcí stroje.[15]



Obr. 4.3: Schéma zapojení pro měření izolačního odporu statorového vinutí s rozpojeným uzlem
[Převzato z [15]]



Obr. 4.4: Schéma zapojení pro měření izolačního odporu statorového vinutí s nerozpojeným uzlem
[Převzato z [15]]

Podle literatury je nutné, aby stroj před uvedením do provozu vyhovoval podmínce $p_i \geq 1,3$ [16]. Pro hodnocení stavu izolace je průkaznější velikost desetiminutového činitele polarizace po ukončení přechodových dějů v izolaci.

Minimální velikost izolačního odporu je obvykle doporučena výrobcem stroje. Pokud tomu tak není, můžeme dle doporučení vycházet ze vztahu [21]:

$$R_{iz} = \frac{U_N}{\frac{P_N}{100} + 1000} [M\Omega] \quad (4.4)$$

kde

R_{iz} je izolační odpor v $[M\Omega]$,

U_N je jmenovité napájecí napětí $[V]$,

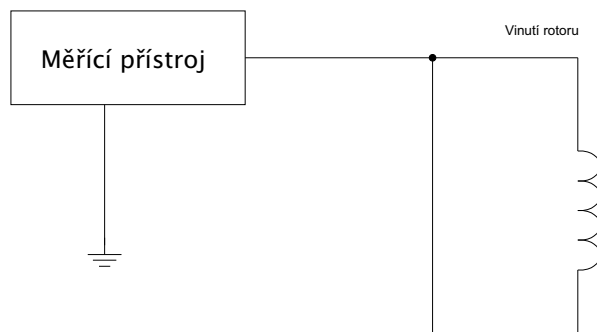
P_N je jmenovitý výkon stroje $[kW]$.

4.4.3 Izolační odpor rotorového vinutí

Jedná se o další velmi důležité diagnostické měření při revizi. Provedení je velmi podobné předchozímu měření z kapitoly 4.4.2. Rotor nemusí být vyjmut ze statoru, ale musí být zajištěn proti samovolnému spuštění. Dále musí být odpojena zemnicí ochrana rotoru a budící obvod.

Zaměřuje se na izolační odporu sběracích kroužků, magnetového kola a přívodních pásů. Měření se provádí přístrojem (měřičem izolace) s vlastním zdrojem stejnosměrného napětí přiloženým na vinutí a hmotu rotoru. Postup je stejný jako měření izolačního odporu statorového vinutí. Odečítají se hodnoty izolačního odporu, ze kterých

se poté vypočte polarizační index. Doporučená teplota měřeného stroje je v rozmezí 20 až 30 °C. Protože při přiložení napětí na dielektrikum stroje se nabije, je tedy při ukončení měření nutné izolace vybit po dobu pěti minut zkratováním vinutí na hmotu magnetizačního kola rotoru.[15]



Obr. 4.5: Schéma zapojení pro měření izolačního odporu rotorového vinutí |Převzato z [15]|

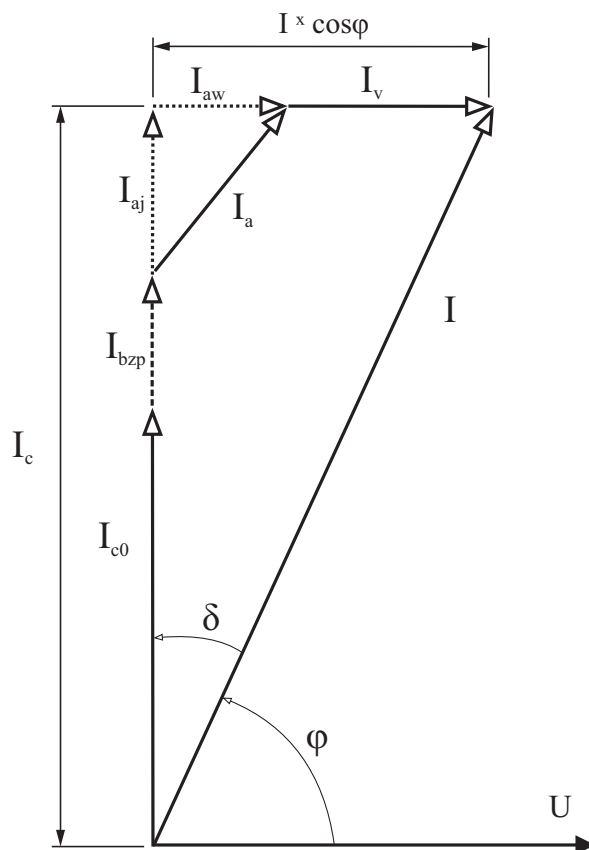
4.4.4 Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$, kapacita a časová konstanta stat rotorového vinutí

Izolace celého stroje představuje nehomogenní dielektrikum mezi dvěma elektrodami. Ideálním dielektrikem vloženým mezi dvě elektrody neprotéká žádný elektrický proud a nejsou v něm žádné dielektrické ztráty. V ideálním kondenzátoru je fázový úhel mezi napětím a proudem 90°. V reálném dielektriku díky polarizaci, nečistotám, vlhkosti, bublinkám, i když třeba jen mikroskopickým, vznikají dielektrické ztráty. Dielektrikem prochází proud, který zmenšuje úhel mezi výsledným proudem a napětím. Vlivem dielektrických ztrát a procházejícímu proudu se dielektrikum zahřívá. Ztráty závisí na charakteru přiloženého napětí, teplotě a frekvenci. Při střídavém napětí jsou ztráty v dielektriku větší než při stejnosměrném napětí. Při zvyšování frekvence rostou ztráty způsobené polarizací, avšak při překročení určité maximální frekvence ztráty prudce poklesnou, tento jev je dán tím, že dielektrikum se nestíhá polarizovat.[19]

Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ je bezrozměrné číslo charakterizující dielektrikum z hlediska jeho dielektrických ztrát. Vypočítá se z odečtených hodnot na měřicím přístroji. Měřením dostaneme další údaje o stavu izolace stroje. Čím větší je ztrátový činitel, tím více je izolace znečištěná, poškozená, navlhla či degradovaná.[19]

Na obrázku 4.6 je znázorněn vektorový diagram obecného dielektrika, na kterém vidíme poměry proudů v dielektriku po vložení do elektrického pole a zmenšení úhlu φ mezi výsledným proudem a napětím.

Teplota vinutí při měření musí být v rozmezí 5 až 30 stupňů. Měření se provádí pomocí Scheringova můstku. Zkušební napětí se připojí na vstup měřené fáze a zbylé fáze se na vstupu uzemní. Měří se napěťová závislost ztrátového činitele a kapacity v intervalu $\langle 0, 2; 1, 0 \rangle U_N$. [15]



Obr. 4.6: Fázorový diagram reálného dielektrika po přiložení napětí [Převzato z [19]]

- I_c kapacitní proud
- I_{c0} nabíjecí proud geometrické kapacity
- I_{bzp} proud bezeztrátových polarizací
- I_a absorpční proud
- I_{aj} jalová složka absorpčního proudu
- I_{aw} činná složka absorpčního proudu
- I_v vodivostní proud
- δ ztrátový úhel

Na závěr měření se provede výpočet desetiminutové časové konstanty podle vztahu[15]:

$$\tau_{600} = R_{iz600} * C_{0,2UN}[s] \quad (4.5)$$

kde

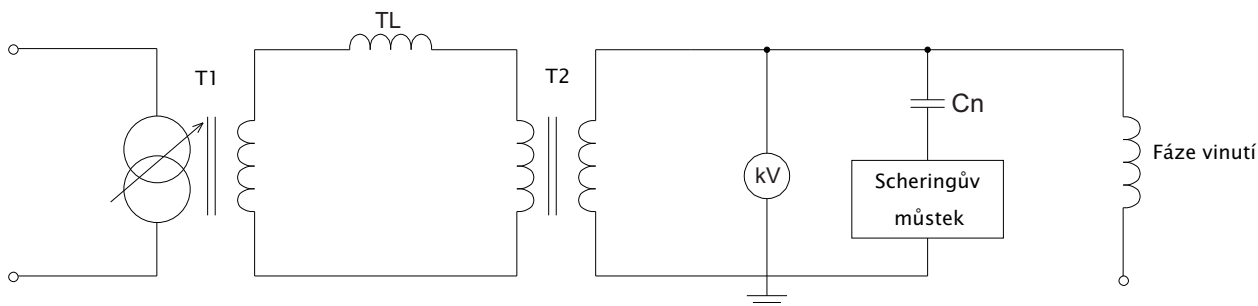
τ_{600} je desetiminutová časová konstanta [s],

R_{iz600} je desetiminutový izolační odpor [$M\Omega$],

$C_{0,2UN}$ je kapacita vinutí měřené fáze při $0,2 * U_N$ [μF],

U_N je jmenovitá hodnota napětí [V].

Tato konstanta není závislá na rozměrech stroje, a tedy umožňuje porovnávat vypočítané hodnoty izolačního systému s různými stroji.



Obr. 4.7: Schéma zapojení pro měření $tg\delta$ a kapacity |Převzato z [15]|

kde

T1 je transformátor,

T2 je vn transformátor,

TL je tlumivka,

kV je elektrostatický voltmetr,

Cn je kapacitní normál.

4.4.5 Měření částečných výbojů statorového vinutí

Částečné výboje jsou definovány jako místní jiskřivé elektrické výboje doprovázené zvukovým efektem. Při překročení elektrické pevnosti plynu mezi elektrodami dojde k zapálení výboje a prostor mezi elektrodami se vybije. Částečné výboje jsou pro izolaci velmi nepříznivé, protože vyvolávají postupné zhoršování kvality izolačního systému, a tím snižují jeho elektrickou pevnost. Právě proto se při revizi také měří jejich četnost. Částečné výboje mohou vznikat přímo v nedokonalé izolaci obsahující malé dutinky, mezi izolací a vodičem (prostor tzv. delaminace), mezi izolací a stěnami drážky statoru, a také na povrchu izolace mimo drážku statoru.[22]

Výbojovou činnost charakterizují kromě zdánlivého náboje tyto veličiny [23]:

- U_i – počáteční napětí částečných výbojů – nejnižší hodnota napětí, při které trvale vznikají částečné výboje
- U_e – zhasací napětí částečných výbojů – napětí, při kterém trvale ustávají částečné výboje
- n – četnost částečných výbojů – střední počet částečných výbojů za sekundu
- q – zdánlivý náboj impulsu částečného výboje – náboj měnicí napětí na svorkách vzorku o stejnou hodnotu jako skutečný částečný výboj, který nelze měřit přímo

- I – střední proud částečných výbojů – součet absolutních hodnot zdánlivých nábojů q procházejících svorkami zkoušeného předmětu při částečných výbojích za časový interval, jednotkou je [C/s]

Měřením částečných výbojů všech fází dostaneme jako výsledek porovnání výskytu částečných výbojů v jednotlivých fázích vůči sobě, z toho můžeme usoudit, která fáze je nejvíce degradována.[15]

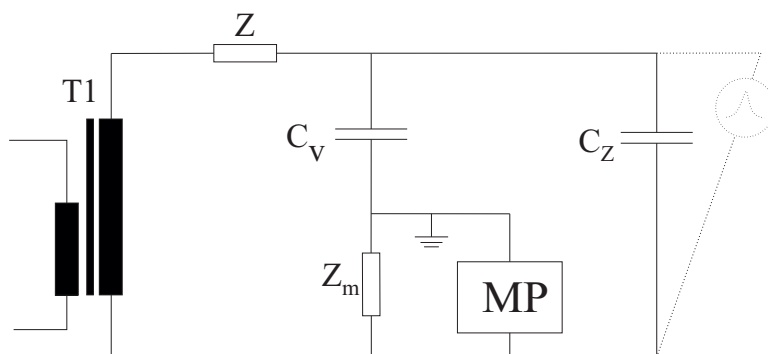
Hlavním měřeným parametrem je amplituda částečného výboje, ta může být měřena v několika jednotkách - pikokulomby [pC], milivolty [mV], miliampéry [mA] a decibely [dBm] - jednotky jsou charakteristické pro jednotlivé měřicí metody.

Existují různé druhy měřících metod pro měření částečných výbojů (dále jen ČV). Zástupci neelektrických metod jsou: akustické, optické, chemické a termoelektrické. Například měření akustickou sondou je vhodné především pro TG po vyjmutí rotoru. Pouze lokalizuje místo výskytu ČV a následně se musí místo podrobně vyšetřit některou z galvanických metod pro zjištění přesných hodnot výbojové činnosti. Proto se jedná pouze o prvotní lokalizaci místa vzniku ČV. Měření je založeno na přítomnosti akustického tlaku vyvolaného výbojem.[24]

Elektrické metody jsou pro svoji lepší kvantifikovatelnost a citlivost více rozšířeny v praxi nežli metody neelektrické. Elektrické metody pracují s proudovými pulsy vznikající při výbojové činnosti. Galvanická metoda je jednou z nich.

Pro měření **galvanickou** metodou se rozpojí uzel vinutí a měřená fáze se připojí na zdroj střídavého napětí 50 Hz. Ostatní fáze se zkratují a uzemní. Při tomto měření nemusí být rotor vyjmut ze stroje. Měření nelze provádět na vlhkém, dlouhodobě odstaveném stroji.[15] [20]

Na šetřené fázi se zvyšuje napětí až do jmenovité hodnoty. Objeví-li se v intervalu od nuly až do hodnoty U_N zvýšená četnost částečných výbojů, zaznamenaná se zapalovací napětí a pokračuje se se zvyšováním napětí až do U_N , které se nechá působit po dobu 30 minut. Tato doba působení výdržného napětí je velmi důležitá. Při připojení plného jmenovitého napětí mají částečné výboje nejvyšší amplitudu a četnost a postupem času tyto hodnoty klesají. Po ukončení samozhášecího jevu (30 min) se zkušební napětí snižuje po kroku $0,2U_N$. Na jednotlivých krocích se měří hodnoty zdánlivého náboje a případné další diagnostické parametry.[15] [22] [20]



Obr. 4.8: Schéma zapojení pro měření částečných výbojů

kde

T1 je transformátor,

Z je impedance,

C_V je bezztrátový vazební kondenzátor,

MP je měřicí přístroj (osciloskop),

C_Z je měřený objekt.

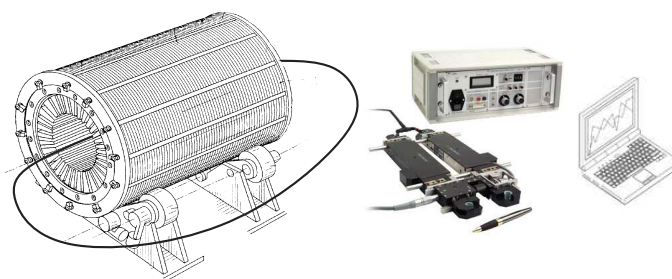
Přesnost měření je ovlivněno mnoha faktory, především velikostí vnitřní nehomogenity, kapacitou vinutí a indukčností mezi místem vzniku částečného výboje a měřícím přístrojem. Rušivé vlivy je doporučeno odfiltrovat filtrem či jinou odrušovací metodou.[15]

Velkou výhodou galvanické metody je možnost měřit při odstavení i za provozu stroje. Do popředí se v současné době dostávají právě metody, které dokážou měřit bez nutnosti odstávky stroje - on-line měření [24]. Díky vývoji a zdokonalování tohoto systému již existují schopnější detektory typu akustických kamer, které dokáží ČV detekovat, lokalizovat i kvantifikovat pomocí akustického tlaku. Dalším hlediskem použití těchto dokonalejších systémů je však také jejich cena a cena zkoušky.[24]

4.4.6 Diagnostika jádra statoru metodou EL-CID

Electromagnetic Core Imperfection Detection (EL-CID) je jedna z novějších metod používaných při inspekci statorové izolace magnetického obvodu. Na obrázku 4.9 je sestava potřebná k měření, skládá se ze smyčky procházející statorovým jádrem protékanou budícím proudem, detektoru ČV, měřicího přístroje a počítače. Princip měření spočívá v měření velikosti vířivých proudů, což značí porušení izolace mezi plechy jádra statoru. Čím větší je změřený proud, tím větší oteplení je v místě při provozu. Detektorem se přejíždí po celé délce statorové tyče a ten odesílá data do počítače, který je následně vyhodnocuje. V současnosti je možnost použít robotický detektor, který bez pomoci zvládne přejet a změřit celou drážku statoru.[27][26]

Výhodou této metody je především to, že pracuje s napájením 230 V, lépe detekuje poruchy, rychlost měření a možnost měřit statorové jádro s vinutím i bez.



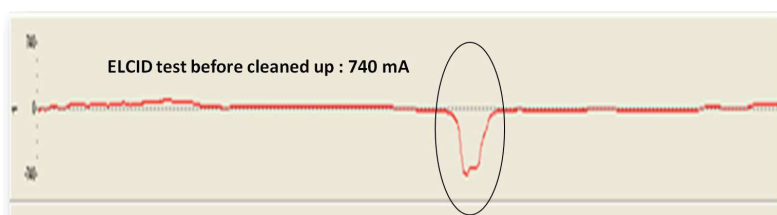
Obr. 4.9: EL-CID soustava [Převzato z [25]]

Oproti silové zkoušce magnetizace je zde použita pouze jedna smyčka a ta vytváří pouze 4% magnetického toku v magnetizačním obvodu statoru.[27]



Obr. 4.10: Robotická sonda [Převzato z [25]]

Výsledky jsou vyhodnocovány počítačovým programem a interpretovány grafem, na kterém je vidět velikost vířivých proudů v úseku statoru. Na obrázku 4.11 je vidět graf z měření jedné drážky na stroji před vyčištěním. Je zde patrné poškození izolace a hodnota vířivých proudů dosahuje 740 mA. V tomto místě tedy bude při provozu značné přehřátí.

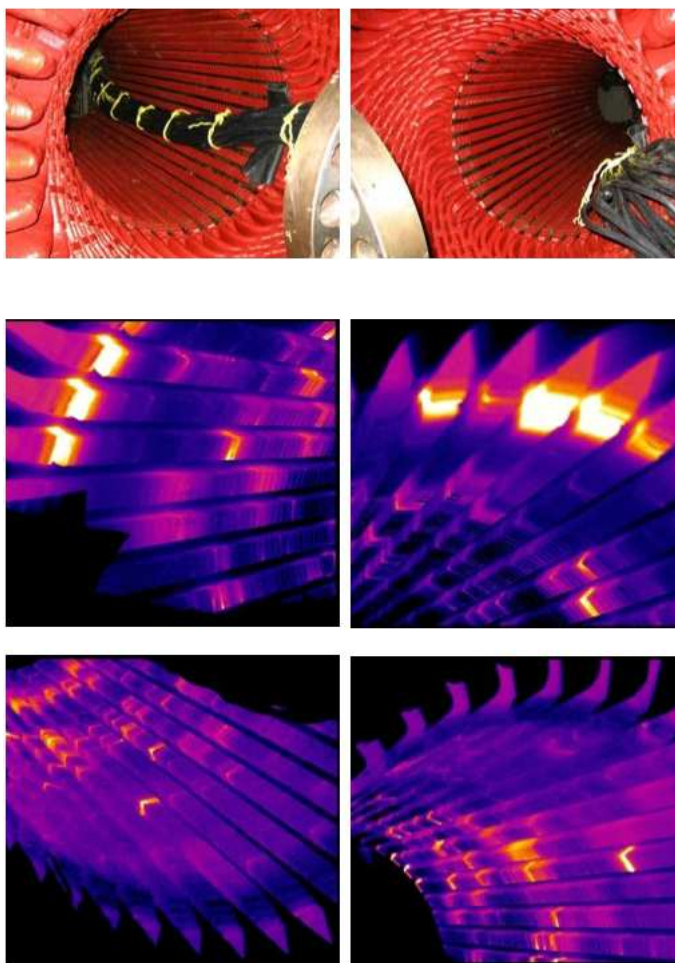


Obr. 4.11: Graf z měření metodou EL-CID [Převzato z [25]]

4.4.7 Silová magnetizační zkouška

Měření magnetizace jádra statoru odhalí skryté vady a poruchy. Měření se provádí na stroji s vyjmutým rotorem. Princip spočívá v navinutí několika závitů (jak je patrné na obrázku 4.12). Navinuté kabely tvořící smyčky se připojí na zdroj střídavého napětí a sytí magnetický obvod, který se zahřívá. Po stanovené době (obvykle se poruchová místa zahřejí do 30 minut) se pořídí snímky vrtání statoru termokamerou. Na snímcích jsou vidět poruchová místa s vyšší teplotou.

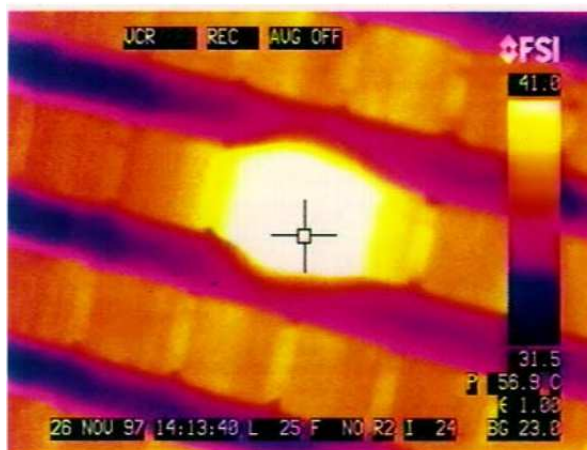
Nevýhodou této zkoušky je nutnost použití silných kabelů, výkonnějších a dražších přístrojů. Vzhledem k chybějícímu větrání je určitá možnost, že dojde k přehřátí statoru. Tento test se provádí pro potvrzení výsledků testu metodou EL-CID.



Obr. 4.12: Zkouška magnetizace jádra statoru - silová [Převzato z [28]]

Je-li stroj ve špatném stavu a nevyhověl předchozím zkouškám, a musí se převinout, pak se toto měření provádí po odstranění vinutí. V tomto případě měření odhalí poruchy ještě před vložením nového vinutí. Nepřevíjí-li se stroj, provádí se měření po metodě EL-CID a zaměřuje se především na již objevená poruchová místa.

Na následujícím obrázku 4.13 je vidět oteplené místo při silové zkoušce magnetizace pod termokamerou.



Obr. 4.13: Místo odhalené metodou EL-CID při silové zkoušce pod termokamerou
[Převzato z [26]]

4.4.8 Zkouška přiloženým napětím statorového vinutí

Při zvyšování přiloženého napětí na dielektriku a překonání hodnoty průrazného napětí U_p , nastane průraz dielektrika. V pevných materiálech je charakterizován vypálenou vodivou cestou, tím dojde k nevratnému poškození izolace. Průraz ovšem může být i tepelný či elektrochemický. Stěžejní vlastností každého izolačního materiálu je elektrická pevnost E_p . Může být popsána jako schopnost materiálu odolávat namáhání elektrickým polem. Elektrická pevnost je definována vztahem[19]:

$$E_p = \frac{U_p}{d} [kV/mm] \quad (4.6)$$

kde

E_p je elektrická pevnost v [kV/mm],

U_p je průrazné napětí v [kV],

d je tloušťka dielektrika v místě průrazu [mm].

Tato zkouška se provádí jako poslední ze všech diagnostických metod. Jedná se o potenciálně destruktivní zkoušku, protože závěr této zkoušky je konstatování, zda průraz izolace nastal či nenastal. Dojde-li k průrazu, pomocí speciálních technik je možné místo průrazu lokalizovat. Avšak oprava je prakticky vyloučená, lze provést pouze výměnou vadné části (převinutí statoru).

Měří se na vyčištěném stroji po revizi před uvedením do provozu. Rotor nemusí být vyjmut ze stroje a uzel vinutí se musí rozpojit, je-li to technicky možné.

Na prošetřovanou fázi se připojí napětí o frekvenci 50 Hz napětím vyšším než provozním po dobu 60 s. Velikost zkušebního napětí pro stroj v provozu je podle normy dána vztahem $1,5U_N$, není-li stanoveno jinak. Izolační systém stroje je značně předimenzován vůči jmenovitému napětí, ale postupem času dochází k jeho degradaci, proto zjišťování elektrické pevnosti je jednou ze základních zkoušek při revizích stroje. Napětí při zkoušce nového stroje je $100\%U_{zk}$ a u stroje v provozu $80\%U_{zk}$. [15]

4.4.9 Zkouška přiloženým napětím rotorového vinutí

Velmi podobná zkouška zkoušce prováděné na statoru. Opět se zkouší izolace vinutí zkušebním střídavým napětím o frekvenci 50 Hz po dobu 60 s. Měření se provádí na vyčištěném rotoru po zkoušce izolačního stavu rotoru. Zkušební napětí je přivedeno mezi spojené vývody rotorového vinutí a tělo rotoru. Výsledkem zkoušky je konstatování, zda nastal průraz izolace či nikoliv.[15]

Počet a typ zvolených zkoušek záleží na požadavku provozovatele, stáří a technickém stavu stroje. Mimo výše uvedený seznam zkoušek se mohou provádět ještě další dodatekové testy, jimiž se v mé práci zabývat nebudu.

5

Výsledky vlastního měření

Měření byla prováděna při pravidelné revizi stroje, která obsahuje základní měření uvedené v kapitole 4. Jestliže stroj nevyhoví požadavkům zkoušek, zahrnou se do revize další doplňující zkoušky. Štítkové hodnoty stroje:

Tab. 5.1: Štítkové hodnoty synchronního turbogenerátoru v revizi

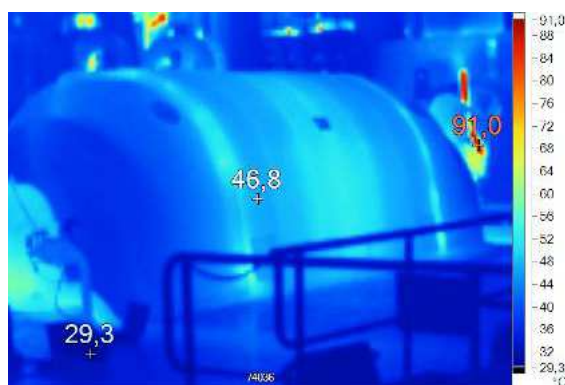
Provozní stav:	stroj v provozu
Typ:	6H6378/2
Provedení:	IP 44/00/f
Tvar:	M712KZ
Výrobní číslo:	5666
Rok výroby:	1958
Rok uvedení do provozu:	1959
Stroj převinut v roce:	1983
Napětí:	10,5 kV \pm 5%
Proud:	3918 A
Účíník:	0,8 [-]
Výkon:	57 000 kW
Frekvence:	50 Hz
Jmenovité otáčky:	3 000 ot/min
Buzení:	80 - 339 V
Budící soustava:	statická
Třída izolace:	F
Chlazení:	Vzduchové
Rotor:	21 500 kg
Stator:	65 500 kg

5.1 Vizuální kontrola a měření před odstavením

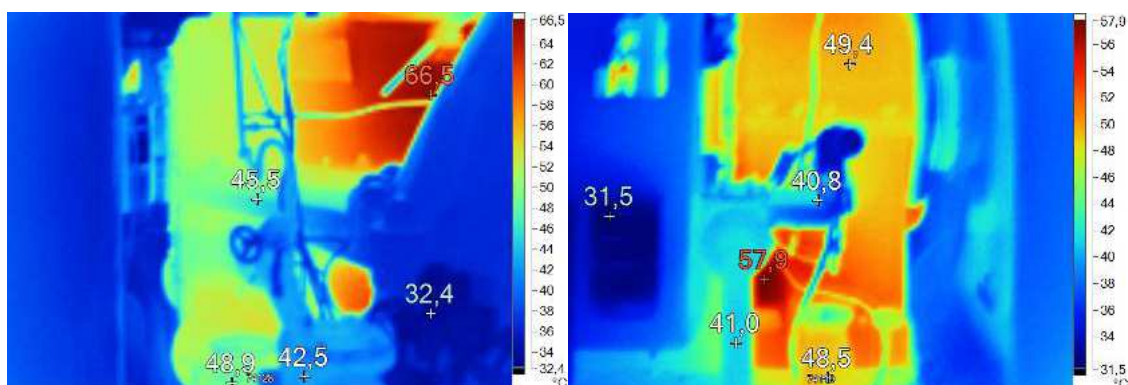
- pevnost základového rámu - bez závad
- netěsnosti vík a ložisek - bez závad
- znečištěná hřídel rotoru na straně turbíny v místě zemního kartáče
- teplota jednotlivých kartáčů nevybočuje z průměrné teploty (53 °C)
- teploty ložisek odpovídají běžně dosahovaným teplotám a maximální dosahovaná teplota je pod hranicí maximální přípustné teploty 85 °C.

Tab. 5.2: Provozní hodnoty stroje

$P = 47,5$ MW	$U_1 = 10,9$ kV	$I_1 = 2610$ A	$I_B = 459$ A
$Q = 15,5$ VAr	$U_2 = 10,9$ kV	$I_2 = 2630$ A	$U_B = 194$ V
	$U_3 = 10,9$ kV	$I_3 = 2650$ A	



Obr. 5.1: Termovizní snímek celého generátoru

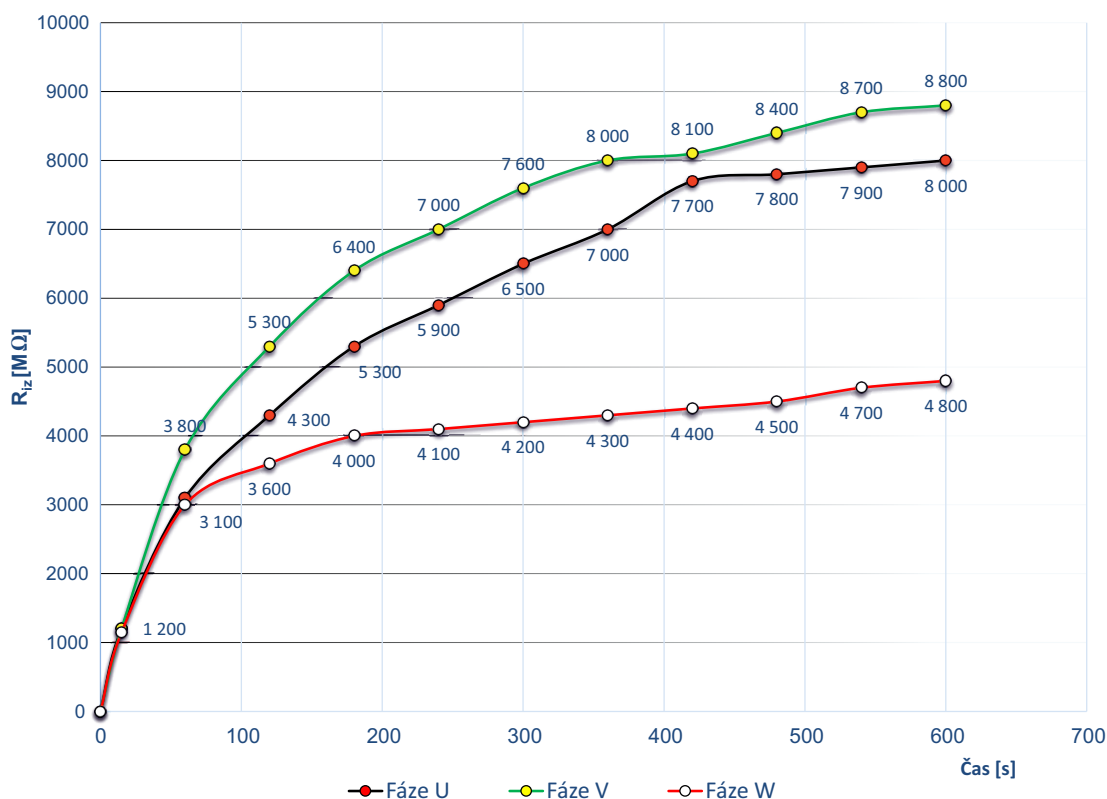


Obr. 5.2: Termovizní snímek ložisek

5.2 Měření statoru po odstavení před revizí

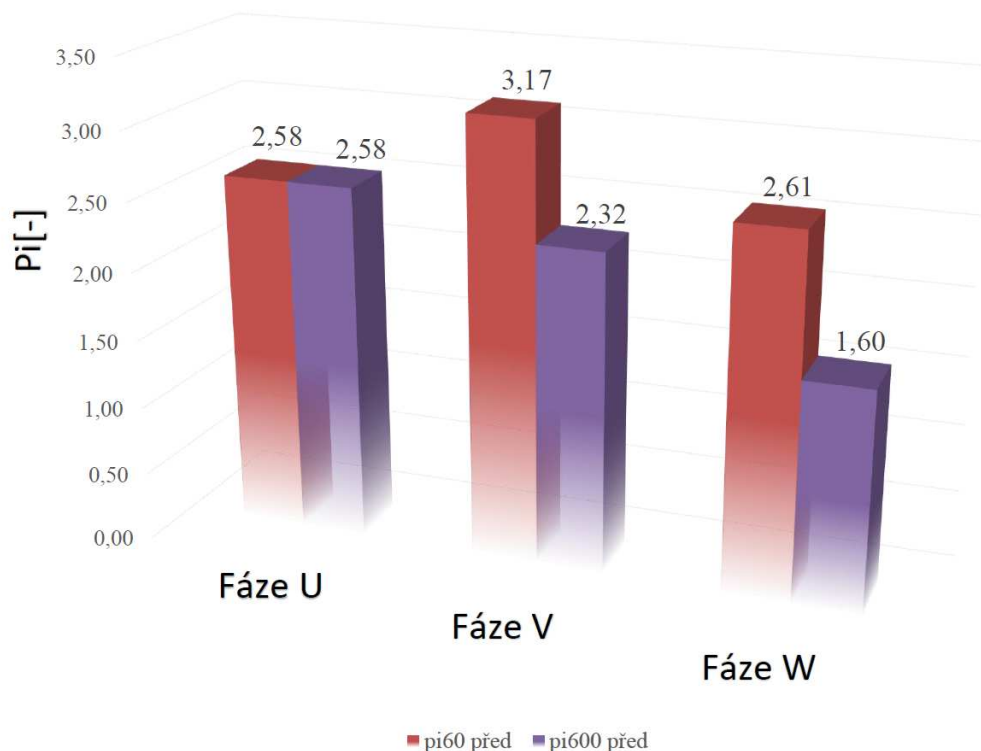
5.2.1 Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu

Měření probíhalo podle teoretického úvodu a podle interní normy provozovatele TG. Jsou předpokládány horší hodnoty izolačního odporu, a tedy i polarizační indexy z důvodu znečištění stroje. Měřicí napětí bylo zvoleno 5 kV (ss).



Obr. 5.3: Graf závislosti izolačního odporu na čase pro jednotlivé fáze před revizí

Naměřené hodnoty izolačního odporu splňují požadavky normy, podle které musí být hodnoty $R_{iz60} \geq 200M\Omega$ a $R_{iz600} \geq 800M\Omega$ (doporučená hodnota pro standardní technickou bezpečnost). Jak je vidět z grafu, izolační odpor s časem zvyšovat svou hodnotu ve všech fázích. Z toho můžeme usoudit, že v izolaci stroje nejprve dochází k přechodovým jevům (nízký izolační odpor). Tyto přechodové děje s časem zanikají a izolační odpor roste. Ukončení absorpčních (přechodových) jevů považujeme dobu desítek minut, proto je důležitější desetiminutový polarizační index p_{i600} . Nízký polarizační index poukazuje na větší znečištění případně navlhlost a degradovanou izolaci, obvykle se pohybuje v intervalu $\langle 1.5; 4 \rangle$. Polarizační index fáze U a fáze V je přijatelný. Fáze W má nejmenší hodnotu $p_{i600} = 1,6$. Z toho je patrné, že fáze W je degradovaná více než ostatní fáze.



Obr. 5.4: Graf polarizačního indexu před revizí

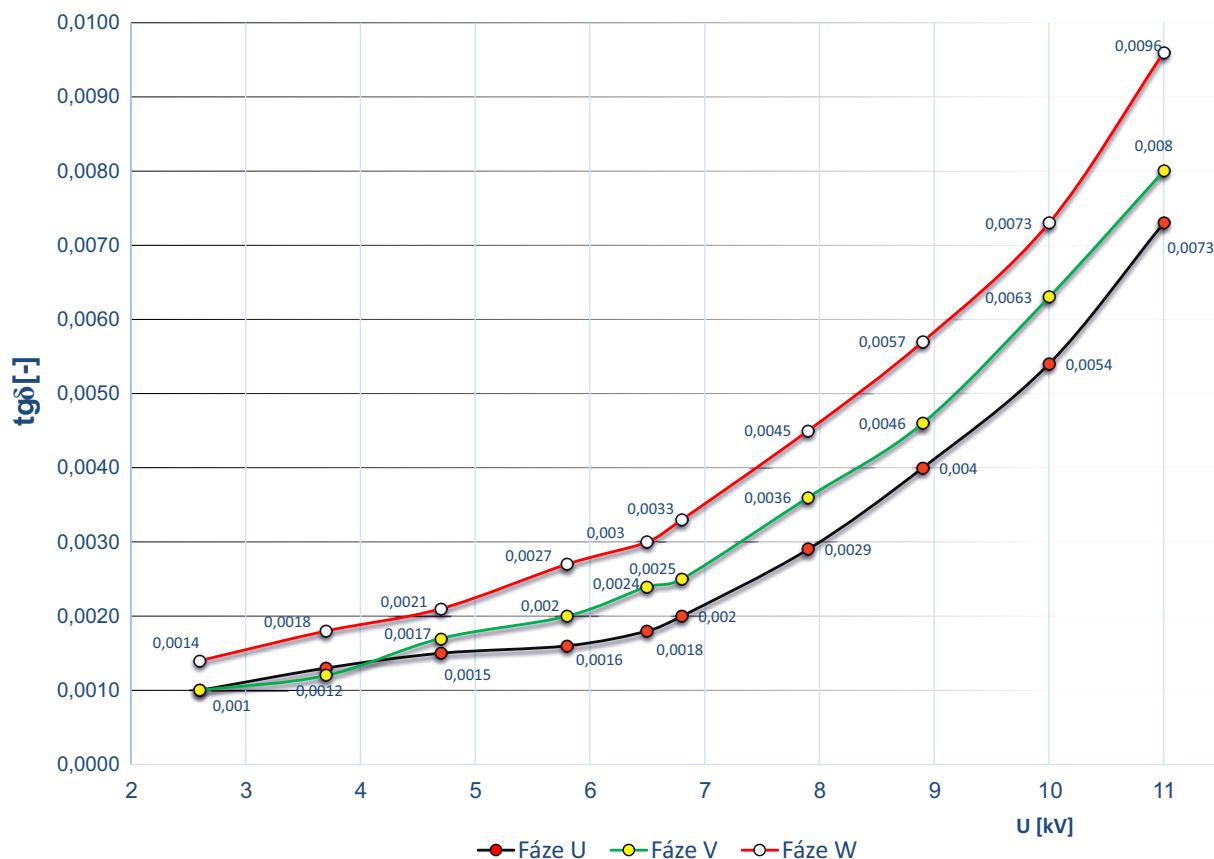
5.2.2 Měření kapacity a ztrátového činitele

Na obrázku 5.9 je závislost ztrátového činitele $\text{tg}\delta$ na přiloženém střídavém napětí společně pro všechny fáze vinutí statoru. Podle teoretických předpokladů je vidět, že se ztrátový činitel s rostoucím napětím zvětšuje. Na grafu je vidět trend růstu $\text{tg}\delta$ pro všechny fáze. Nejlepší fáze s nejmenšími ztrátami je tedy fáze U. Z grafu je zřejmé, že fáze W má největší ztráty, to potvrzuje výsledek předchozího měření v kapitole 5.2.1, kde jsme zjistili, že fáze W vykazuje nejhorší izolační odpor. Důležitým faktorem pro stanovení kvality dielektrického systému stroje je velikost změn (přírůstku) $\text{tg}\delta$ na napěťových hladinách.

Podle normy musí stroj splňovat následující požadavky ztrátového činitele a kapacity:

- ztrátový činitel při $0,2U_N \leq 0,035$
- ztrátový činitel při $U_N \leq 0,085$
- změna $0,6U_N - 0,2U_N \leq 0,01$

Časová konstanta vypočtená podle vzorce 4.5 z kapitoly 4.4.4 by nám posloužila v případě možnosti porovnání s jiným strojem. Při měření byla teplota stroje v předepsaném rozmezí 5 až 30 °C. Podle hodnot v tabulce B.4 na straně 47 tedy stroj s rezervou splňuje požadavky stanové normou.



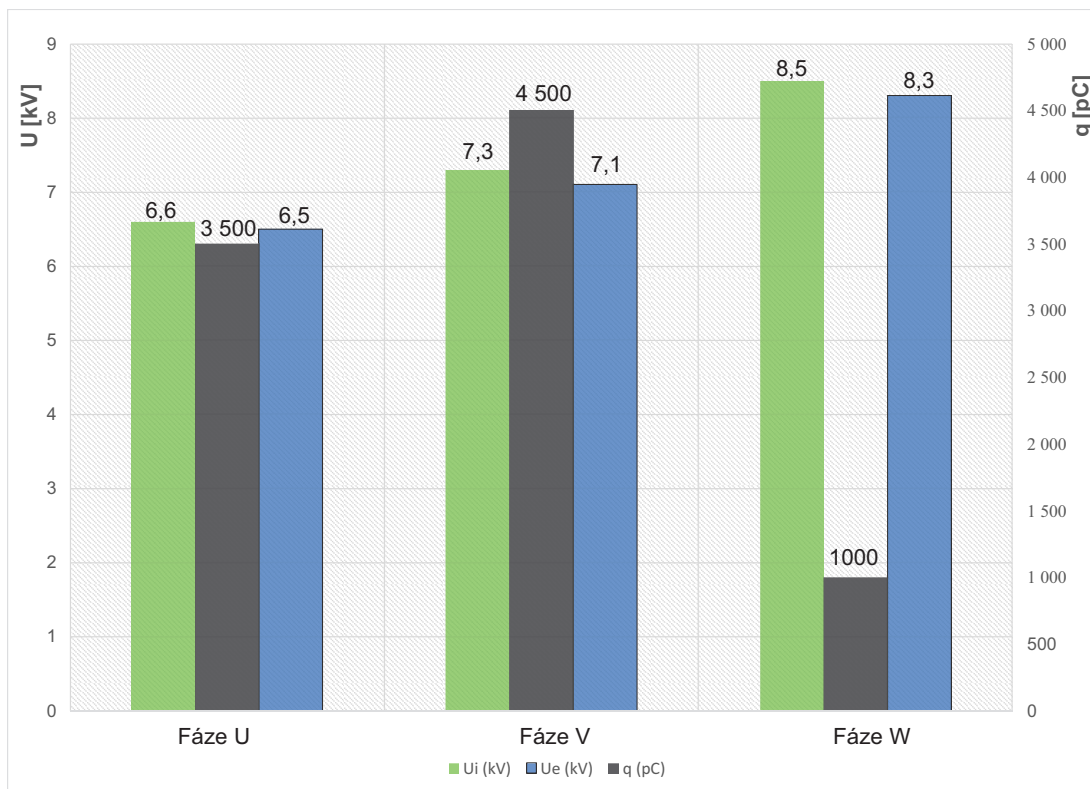
Obr. 5.5: Graf ztrátového činitele před revizí

5.2.3 Měření částečných výbojů

Velikost iniciačního napětí a zhášecího napětí jednotlivých fází je znázorněna na obrázku 5.6. Z výsledků je patrné, že nejvyšší hodnoty U_i a U_e má fáze W a naopak nejhorší je fáze U s nejnižšími hodnotami U_i a U_e . Z těchto výsledků můžeme vyvodit závěr, že k výbojové činnosti za provozu stroje dochází nejvíce ve fázi U, kde se dá do budoucna předpokládat nejrychlejší degradační proces a ztráta kvality izolace právě díky přítomným ČV.

V revizi je potřeba se zaměřit na upevnění (zaklínování) tyčí statorového vinutí v drážkách jádra statoru a celkové čistotě vinutí. Právě tyto dva faktory mohou přispívat k tvorbě částečných výbojů.

Zásadní informací této metody je trend ČV v průběhu života stroje, tj. srovnání hodnot s měřeními ČV provedených při minulých revizích. Teprve takto získané výsledky jsou použitelné při predikci o kvalitě zbývající technické životnosti a provozuschopnosti stroje.



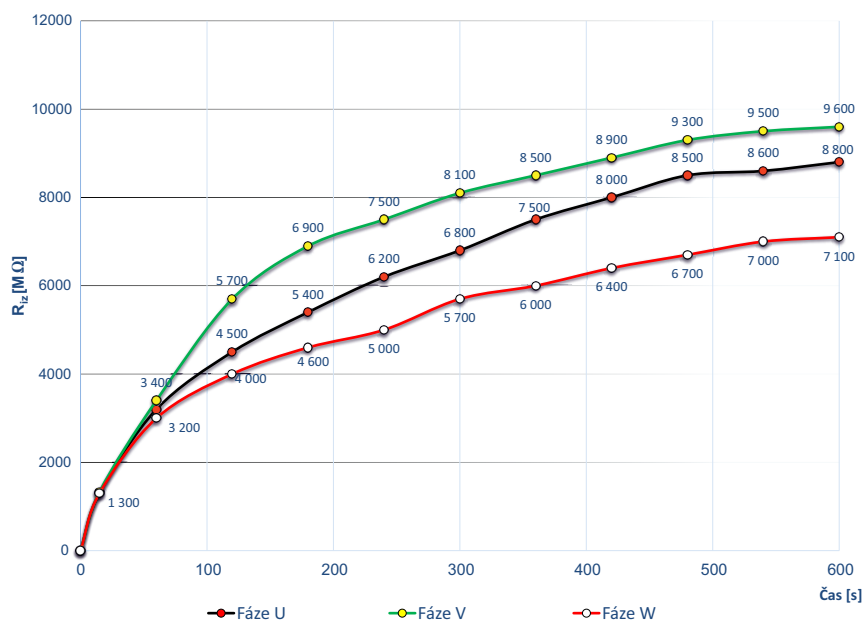
Obr. 5.6: Graf napětí částečných výbojů a velikost zdánlivého náboje před revizí

Výsledek měření svědčí o tom, že degradace izolace je ještě na přijatelné úrovni.

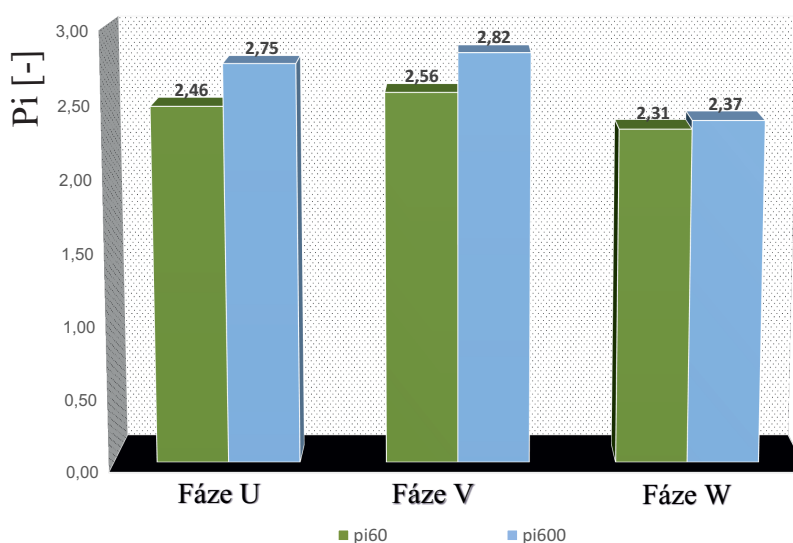
5.3 Měření statoru po revizi

5.3.1 Měření izolačního odporu

Na obrázku 5.7 a 5.8 je po revizi vidět zlepšení izolačního odporu ve všech fázích. Fáze W je stále nejhorší. Podle normy platí, že jestliže $p_{i60} > p_{i600}$, pak TG nevyhovuje, avšak z výsledků měření vyplývá, že $p_{i60} < p_{i600}$, a tedy stroj vyhovuje. Na základě těchto výsledků je TG schopen uvedení do provozu bez omezení.



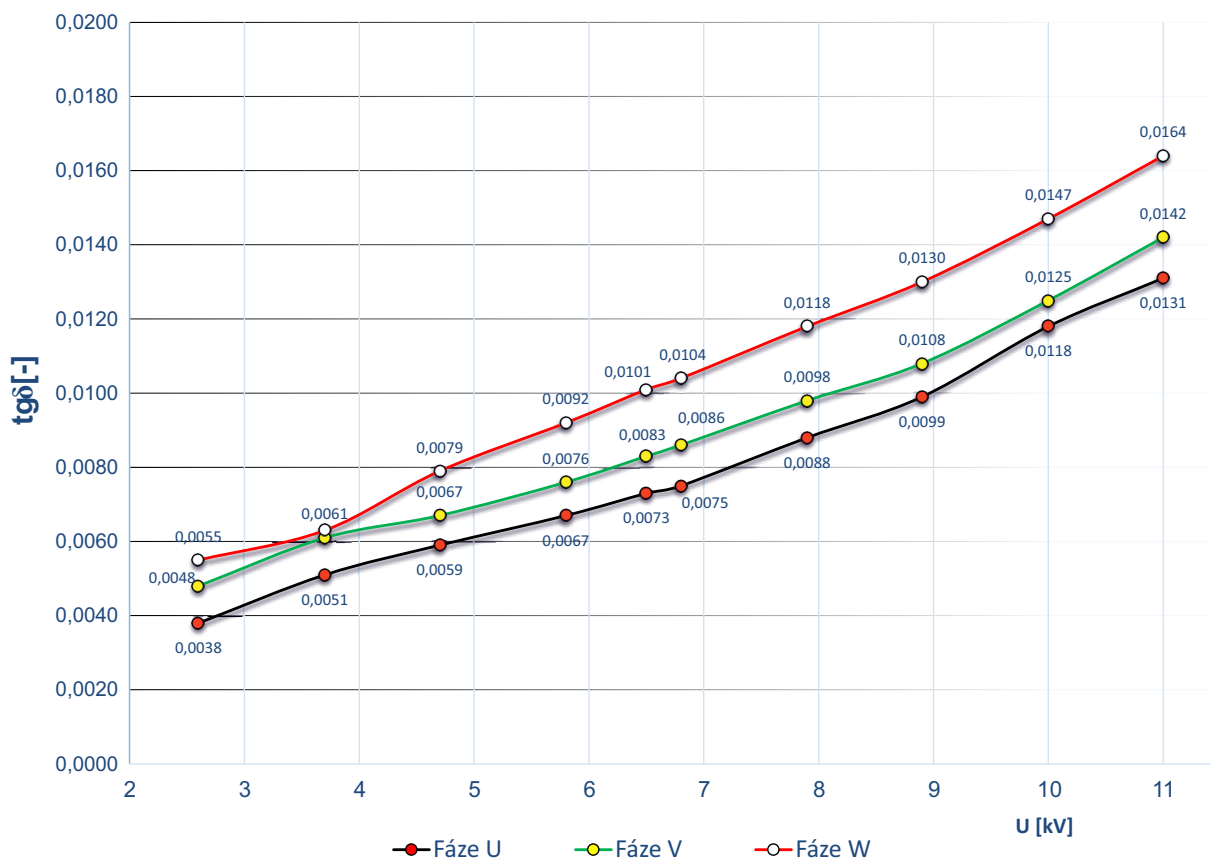
Obr. 5.7: Graf závislosti izolačního odporu na čase pro jednotlivé fáze po revizi



Obr. 5.8: Graf vypočteného polarizačního indexu po revizi

5.3.2 Měření kapacity a ztrátového činitele

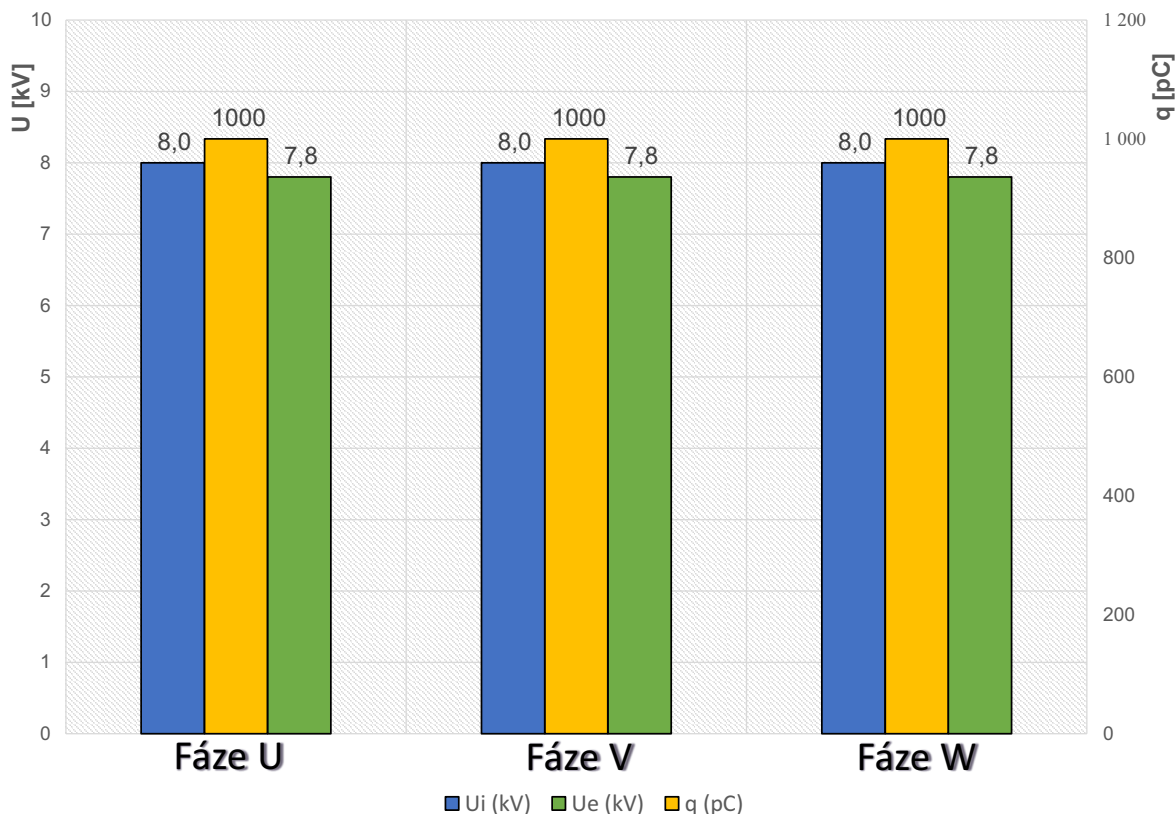
Výsledky ztrátového činitele po revizi jsou mírně vyšší než před revizí, avšak pohybují se stále hluboko pod hranicí normy.



Obr. 5.9: Graf ztrátového činitele po revizi

5.3.3 Měření částečných výbojů

Na obrázku 5.10 je vidět zvýšení U_i i U_e částečných výbojů. Zároveň došlo ke snížení zdánlivého náboje impulsu částečných výbojů ve fázích U a V.



Obr. 5.10: Graf napětí částečných výbojů a velikost zdánlivého náboje po revizi

5.3.4 Zkouška elektrické pevnosti izolace vinutí statoru přiloženým napětím

Jako poslední měření se provádí zkouška pevnosti izolace přiloženým napětím. Použité přiložené napětí při měření bylo 17,6 kV po dobu 60 s. Výsledkem testu je pouze konstatování, že k průrazu izolace nedošlo, a tedy všechny fáze statorového vinutí vyhovují.

Stroj splňuje kritéria norem provozovatele a nehrozí vážné poškození při provozu. Měření je doporučeno opakovat opět za rok.

6

Závěr

Celková diagnostika, skládající se z on-line a off-line metod, podává důležité informace o stroji v průběhu celého jeho života. Výsledky diagnostických měření elektroizolačních parametrů elektrických strojů, aplikovaných do trendů v čase, vedou ke správnému odhadu technické životnosti. Díky tomu je možné správné načasování nutných revizí, oprav, nebo generálních oprav, v přímé vazbě na finanční plány a časový harmonogram odstávek výrobních bloků. K tomu významně přispívají off-line diagnostické měření a údržba při pravidelných revizích. V turbogenerátoru čelí právě izolační systém velkému mechanickému namáhání a stárnutí, které významně ovlivňuje jeho životnost. Díky pečlivé údržbě a pravidelným revizím se prodlužuje životnost stroje. Jak je vidět například i v této práci, turbogenerátor uveden do provozu již v roce 1958 je díky profesionální údržbě ve velmi dobrém technickém stavu. Degradace izolace v průběhu provozu je samozřejmost, avšak některé části izolace stroje se mohou jednoduše vyměnit či nahradit v průběhu revize, a to i v případě velkých poruch. Ani tak velká oprava jako převinutí statoru není v průběhu života stroje nic neobvyklého. Každý turbogenerátor má také své náhradní díly dodávané výrobcem, které se při větší poruše dají vyměnit, a tak podstatně zkrátit dobu opravy.

Důležitost pravidelných revizí a monitorování by mohla být vyzdvížena při porovnání ekonomických nákladů diagnostiky a nákladů spojených s pořízením nového stroje v důsledku havárie. Cena nákladů na údržbu je mnohonásobně menší, než pořízení nového turbogenerátoru, jehož cena se pohybuje v řádech stovek miliónů korun. Aplikací moderních diagnostických a měřících metod v kombinaci s efektivním využitím periodické preventivní a prediktivní údržby stroje dochází k maximálnímu zajištění bezpečnosti a spolehlivosti provozu stroje na straně jedné a zároveň k efektivnímu hospodaření a vynakládání finančních prostředků na straně druhé.

Uvedený soubor diagnostických měření na konkrétním typu turbogenerátoru můžeme chápat jako část z mozaiky péče, která je technologii věnována. Slouží jako ukázkový a modelový příklad, protože stejný rozsah je věnován i ostatním vysokonapěťovým strojům. Veškeré zkušenosti z údržby, ať už negativní nebo pozitivní jsou průběžně zapracovávány do pracovních postupů, podle nichž se realizuje výkon údržby.

Hlavní myšlenka mé práce je nyní vyjádřena výsledky měření a možností porovnání výsledků před a po revizi. Vzhledem k příležitostem se vlastní měření týká pouze statoru. Z naměřených hodnot po revizi plyne mírné zlepšení izolačních vlastností takto starého stroje, které jsou stále dostatečně hluboko pod maximálními hodnotami udávanými normou.

Závěrem lze říci, že rozsah péče vycházející z preventivní periodické údržby je správně nastaven. Parametry opotřebení elektroizolačního systému turbogenerátoru jsou po uplynulé době provozu na uspokojivé úrovni. V příští plánované revizi je potřeba věnovat zvýšenou pozornost příčinám a s větším důrazem sledovat trend izolačního odporu, zejména ve fázi vinutí statoru W. Ovšem i tak se do budoucna může předpokládat bezpečný a spolehlivý provoz turbogenerátoru.

Literatura

- [1] ZAO NPP ENERGIA [online]. 2014 [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://www.npp-energy.ru/about/istoriya`razvitiya`elektricheskogo`transporta>
- [2] Wikipedia [online]. 2014 [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Robert`Moses`Niagara`Hydroelectric`Power`Station>
- [3] Alstom [online]. 2014 [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://www.alstom.com/power/nuclear/turbogenerators-for-nuclear-power-plants/gigatop-4-pole/> 15.3.2014
- [4] <http://ua.coolreferat.com/>. Coolreferat [online]. 2014 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: <http://coolreferat.com/>
- [5] MIKESKA, Jan. *Budící systémy synchronních alternátorů*. Západočeská univerzita v Plzni, 2012. 47106. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/3918>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Mühlbacher, Jan.
- [6] Wiedemann E., Kellenberger W. *Konstrukce elektrických strojů*. Berlín: Springer-Verlag , 1967.
- [7] ČSN 350211. *Točivé elektrické stroje - Část 3: Specifické požadavky na synchronní generátory poháněné parními turbínami nebo spalovacími plynovými turbínami*. Březen 2009. Česká Republika: Elnormservis, 2009.
- [8] ŘEZÁČEK, Petr. *Přednášky z předmětu PEZ*. 2013.
- [9] Cigánek L. *Stavba elektrických zařízení*. Praha: SNTL , 1958.
- [10] Geoff Klempner, Isidor Kerszenbaum *Operation and maintenance of large turbo-generators*. New York: The institute of electrical and Electronic Emgineers, Inc., 2004. ISBN 0-471-61447-5.
- [11] TICHÁ, Gabriela. *Elektrická část JE VVER 1000 I. část: Učební texty pro přípravu personálu JE*. Brno, 2012
- [12] ČSN 35 0821. *Elektrické stroje točivé - Kefy elektrických strojov. Rozměry*. 1982.

- [13] ČSN 35 0820. *Elektrické stroje točivé. Kefy elektrických strojov. Všeobecné technické požiadavky*. 1982.
- [14] CSN 35 0255. *Budící systém turboalternátorů, hydroalternátorů a synchronních kompenzátorů*. 1988.
- [15] Mentlík V, Pihera J., Polanský R., Prosr P., Trnka P. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN , 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [16] BARTÁK, Alexandr, Luděk MRAVINÁČ, Jacek NEUMAN a Jan VAŘÁK. *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*. Paha: SNTL, 1984.
- [17] DVOŘÁK, Martin. *Moderní metody sledování degradace izolačních systémů velkých elektrárenských točivých strojů*. 2010, České Budějovice. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Ing. Michal Šerý.
- [18] TRNKA, P., *Elektrické a kombinované stárnutí izolačních materiálů*: Katedra technologií a měření, ZČU v Plzni, Plzeň 2006
- [19] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1.vydání. Nakladatelství BEN – technická literatura, Praha 2006, 240 s, ISBN 80-7300-189-6
- [20] TSE'RIZ'02r03, Monitorování izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu statorového vinutí, Pracovní postup inspekčního orgánu č. 4026, ČEZ, a. s.
- [21] ČSN 35 0000-1-1 (350000) *Točivé elektrické stroje - Část 1-1: Doplňující požadavky*. 1997
- [22] ČSN EN 60270. *Technika zkoušek vysokým napětím: Měření částečných výbojů*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [23] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Academia, 2005. 139 s. ISBN 80-200-1358-X.
- [24] Ing. Tomáš Havlíček, Dizertační práce, *Částečné výboje v elektronických zařízeních pracujících na vyšších kmitočtech*, VUT Brno, 2009.
- [25] IRIS POWER 2010 [online]. 2014 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.irispower.com/hydro/offline/riv.aspx>
- [26] MCNAMARA. *ELectromagnetic Core Imperfection Detection (ELCID) A Collection of Case Studies*. [online]. 2000 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://powertestasia.com/Documents/Fivecases-ELCID.pdf>
- [27] IRIS POWER 2010 [online]. 2014 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://www.unitronics-electric.com/pdf/NUCLEO/EL-CID%20Evolution.pdf>

- [28] SONNY, James. *Getting to the "Core" of Your Generator Stator Problems. IRINFO.ORG: The Definitive Internet Resource for Infrared Thermography* [online]. 2011 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.irinfo.org/articles/10'01'2011'james.html>

Příloha A

Tabulky měření před revizí

A.1 Izolační odpor a výpočet polarizačního indexu

Tab. A.1: Naměřené hodnoty izolačního odporu před revizí

Čas [s]	$R_{iz} [M\Omega]$		
	Fáze U	Fáze V	Fáze W
15	1 200	1 200	1 150
30	—	—	—
45	—	—	—
60	3 100	3 800	3 000
90	—	—	—
120	4 300	5 300	3 600
180	5 300	6 400	4 000
240	5 900	7 000	4 100
300	6 500	7 600	4 200
360	7 000	8 000	4 300
420	7 700	8 100	4 400
480	7 800	8 400	4 500
540	7 900	8 700	4 700
600	8 000	8 800	4 800
p_{i60}	2,58	3,17	2,61
p_{i600}	2,58	2,32	1,60

Příklad výpočtu polarizačního indexu:

- minutový $p_{i60} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}} = \frac{3100}{1200} = 2,58[-]$

- desetiminutový $p_{i600} = \frac{R_{iz600}}{R_{iz60}} = \frac{8000}{3100} = 2,58[-]$

Tab. A.2: Parametry prostředí při měření před revizí

Teplota stroje:	28 °C
Teplota okolí:	25 °C
Relativní vlhkost okolí	55%

Při ostatních měřeních před revizí byly parametry prostředí stejné jako při tomto měření.

A.2 Ztrátový činitel a kapacita

Tab. A.3: Naměřené hodnoty kapacity a ztrátového činitele před revizí

$U_N(\%)$	$U(kV_{AC})$	Fáze U		Fáze V		Fáze W	
		$C(\mu F)$	$tg\delta(-)$	$C(\mu F)$	$tg\delta(-)$	$C(\mu F)$	$tg\delta(-)$
20	2,1	0,2738	0,0010	0,2757	0,0010	0,2736	0,0014
30	3,2	0,2739	0,0013	0,2758	0,0012	0,2737	0,0018
40	4,2	0,2739	0,0015	0,2759	0,0017	0,2737	0,0021
50	5,3	0,2741	0,0016	0,2760	0,0020	0,2739	0,0027
57,5	6,0	0,2743	0,0018	0,2761	0,0024	0,2740	0,0030
60	6,3	0,2744	0,0020	0,2762	0,0025	0,2741	0,0033
70	7,4	0,2747	0,0029	0,2765	0,0036	0,2744	0,0045
80	8,4	0,2751	0,0040	0,2768	0,0046	0,2748	0,0057
90	9,5	0,2756	0,0054	0,2773	0,0063	0,2753	0,0073
100	10,5	0,2763	0,0073	0,2780	0,0080	0,2761	0,0096

Tab. A.4: Vypočítané hodnoty změn ztrátového činitele v intervalech napětí a časová konstanta před revizí

	$\Delta tg\delta[-]$			$\tau_{600}[s]$
	$(0,6-0,2)U_N$	$(0,6-0,4)U_N$	$(0,4-0,2)U_N$	
Fáze U	0,001	0,0005	0,0005	2 194°
Fáze V	0,0015	0,0008	0,0007	2 429°
Fáze W	0,0019	0,0012	0,0007	1 315°

A.3 Měření částečných výbojů

Tab. A.5: Tabulka naměřených hodnot částečných výbojů před revizí

		Fáze U	Fáze V	Fáze W
U_N %	U (kVstř)	q (pC)	q (pC)	q (pC)
100	10,5	3500	4500	1000
U _i (kV)		6,6	7,3	8,5
U _e (kV)		6,5	7,1	8,3

Příloha B

Tabulky měření po revizi

B.1 Izolační odpor a výpočet polarizačního indexu

Tab. B.1: Naměřené hodnoty izolačního odporu po revizi

$R_{iz} [M\Omega]$			
Čas [s]	Fáze U	Fáze V	Fáze W
15	1 300	1 330	1 300
30	—	—	—
45	—	—	—
60	3 200	3 400	3 000
90	—	—	—
120	4 500	5 700	4 000
180	5 400	6 900	4 600
240	6 200	7 500	5 000
300	6 800	8 100	5 700
360	7 500	8 500	6 000
420	8 000	8 900	6 400
480	8 500	9 300	6 700
540	8 600	9 500	7 000
600	8 800	9 600	7 100
p_{i60}	2,46	2,56	2,31
p_{i600}	2,75	2,82	2,37

Příklad výpočtu polarizačního indexu:

- minutový $p_{i60} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}} = \frac{3200}{1300} = 2,46[-]$

- desetiminutový $p_{i600} = \frac{R_{iz600}}{R_{iz60}} = \frac{8000}{3200} = 2,75[-]$

Tab. B.2: Parametry prostředí při měření po revizi

Teplota stroje:	25 °C
Teplota okolí:	25 °C
Relativní vlhkost okolí	55%

Při ostatních měřeních po revizi byly parametry prostředí stejné jako při tomto měření.

B.2 Ztrátový činitel a kapacita

Tab. B.3: Naměřené hodnoty kapacity a ztrátového činitele po revizi

$U_N(\%)$	$U(kV_{AC})$	Fáze U		Fáze V		Fáze W	
		$C(\mu F)$	$tg\delta(-)$	$C(\mu F)$	$tg\delta(-)$	$C(\mu F)$	$tg\delta(-)$
20	2,1	0,2770	0,0038	0,2774	0,0048	0,2767	0,0055
30	3,2	0,2772	0,0051	0,2776	0,0061	0,2769	0,0063
40	4,2	0,2774	0,0059	0,2779	0,0067	0,2771	0,0079
50	5,3	0,2779	0,0068	0,2782	0,0076	0,2775	0,0092
57,5	6,0	0,2781	0,0073	0,2784	0,0083	0,2778	0,0101
60	6,3	0,2782	0,0075	0,2785	0,0086	0,2779	0,0104
70	7,4	0,2788	0,0088	0,2790	0,0098	0,2785	0,0118
80	8,4	0,2793	0,0099	0,2795	0,0108	0,2790	0,0130
90	9,5	0,2801	0,0118	0,2802	0,0125	0,2797	0,0147
100	10,5	0,2807	0,0131	0,2809	0,0142	0,2804	0,0164

Tab. B.4: Vypočítané hodnoty změn ztrátového činitele v intervalech napětí a časová konstanta po revizi

	$\Delta tg\delta[-]$			$\tau_{600}[s]$
	$(0,6-0,2)U_N$	$(0,6-0,4)U_N$	$(0,4-0,2)U_N$	
Fáze U	0,0037	0,0016	0,0021	1 315°
Fáze V	0,0038	0,0019	0,0019	1 230°
Fáze W	0,0049	0,0025	0,0024	1 113°

B.3 Měření částečných výbojů

Tab. B.5: Tabulka naměřených hodnot částečných výbojů po revizi

		Fáze U	Fáze V	Fáze W
UN %	U (kVstř)	q (pC)	q (pC)	q (pC)
100	10,5	1 000	1 000	1 000
Ui (kV)		8,0	8,0	8,0
Ue(kV)		7,8	7,8	7,8

B.4 Použité přístroje při jednotlivých měřeních

Měření izolačního odporu

- Měřič izolace, 500-1000-2500-5000 a 10000 V, v.č. 6411-033/030203/1140, typ MEG10-01, výrobce Megger Limited, r.v. 2003.

Rozšířená nejistota měření: napětí: $\pm 5,8\%$ z MH; izolační odpor: $\pm 5,8\%$ z MH; polarizační index: $\pm 8,2\%$ z MH (dle VN-721-1.001).

Měření kapacity a ztrátového činitele

- Regulační autotransformátor, 3x 0-250 V/38 A, v.č. 8721, typ DSS9380/D, výrobce Thalheimer Transformatorenwerke GmbH, r.v. 2007.
- VN transformátor, 0,4/31,25 kV, 10 kVA, v.č. 32531, typ 12JSS33/21, výrobce EXIMET TRAFO, s.r.o., r.v. 2008.
- Rezonanční tlumivka, 28 kV, 100 kVA, v.č. 2007/12, typ ZTCcLN50, výrobce EGE, r.v. 2007.
- Automatický vn můstek, v.č. 143476, typ 2818/5283, výrobce Tettex Instruments.
- Normálový kondenzátor, 1000 pF, 25 kV, v.č. 115441, typ 3360/1000/25, výrobce Tettex Instruments.

Rozšířená nejistota měření: napětí: $\pm 3,5\%$ z MH; kapacita: $\pm 1,7\%$ z MH; ztrátový činitel: $\pm 3,5\%$ z MH (dle VN-721-1.003).

Měření částečných výbojů

- Regulační autotransformátor, 3x 0-250 V/38 A, v.č. 8721, typ DSS9380/D, výrobce Thalheimer Transformatorenwerke GmbH, r.v. 2007.
- VN transformátor, 0,4/31,25 kV, 10 kVA, v.č. 32531, typ 12JSS33/21, výrobce EXIMET TRAF0, s.r.o., r.v. 2008.
- Rezonanční tlumivka, 28 kV, 100 kVA, v.č. 2007/12, typ ZTCcLN50, výrobce EGE, r.v. 2007.
- Automatický vn můstek, v.č. 143476, typ 2818/5283, výrobce Tettex Instruments.
- Měřič částečných výbojů, v.č. 133613, typ 9126 OX, výrobce Tettex Instruments.
- Normálový kondenzátor, 1000 pF, 25 kV, v.č. 115441, typ 3360/1000/25, výrobce Tettex Instruments.
- Univerzální měřicí impedance, v.č. 131991, typ 9223 OP, výrobce Tettex Instruments.
- Nízkonapěťový kalibrátor, v.č. 142645, typ 9218 W, výrobce Tettex Instruments.

Rozšířená nejistota měření: napětí: $\pm 3,5\%$ z MH; zdánlivý náboj: $\pm 16,6\%$ z MH; počáteční (U_i) a zhášecí napětí (U_e): $\pm 17,7\%$ z MH (dle VN-721-1.003, VN-721-1.005).

Zkouška přiloženým napětím

- Regulační autotransformátor, 3x 0-250 V/38 A, v.č. 8721, typ DSS9380/D, výrobce Thalheimer Transformatorenwerke GmbH, r.v. 2007.
- VN transformátor, 0,4/31,25 kV, 10 kVA, v.č. 32531, typ 12JSS33/21, výrobce EXIMET TRAF0, s.r.o., r.v. 2008.
- Rezonanční tlumivka, 28 kV, 100 kVA, v.č. 2007/12, typ ZTCcLN50, výrobce EGE, r.v. 2007.
- Automatický vn můstek, v.č. 143476, typ 2818/5283, výrobce Tettex Instruments.
- Normálový kondenzátor, 1000 pF, 25 kV, v.č. 115441, typ 3360/1000/25, výrobce Tettex Instruments.

Rozšířená nejistota měření: napětí: $\pm 3,5\%$ z MH (dle VN-721-1.003).

Pro stejné měření před revizí i po revizi byly použity stejné měřicí přístroje