ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Profylaktika izolačního systému točivých strojů, především turbogenerátorů a vn motorů

Pavel Doležal **2013**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2012/2013**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Pavel DOLEŽAL**
Osobní číslo:	**E11B0123K**
Studijní program:	**B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor:	**Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu:	**Profylaktika izolačního systému točivých strojů, především turbogenerátorů a vn motorů**
Zadávající katedra:	**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

Zabývejte se problematikou diagnostiky turbogenerátorů a vn motorů s izolačním systémem v provedení termoplast, reaktoplast.

1. Popište princip metod pro diagnostiku turbogenerátorů a vn motorů (měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu statorového a rotorového vinutí, měření napěťové závislosti izolačního odporu vinutí na ss napětí, měření ztrátového činitele, měření částečných výbojů statorového vinutí galvanickou metodou a akustickou sondou).

2. Uveďte další prováděné zkoušky na TG (zkouška vinutí střídavým napětím 50 Hz, ss napětím, napětím o nízkém kmitočtu, diferenční termická analýza, indikace ozónu v chladícím vzduchu, frekvenční analýza proudu a rozptylového magnetického pole, měření hluku).

3. Rekapitulujte vliv diagnostiky na životnost točivých strojů a efektivitu nalezení a odstranění potenciálních závad.

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

Seznam odborné literatury:

1. **PN ČEZ 0006 Profylaktika izolačního systému strojů točivých - turbogenerátory, hydrogenerátory a vn motory**
2. **Příslušné normy ČSN (ČSN 35 00010, ČSN 345641, ČSN 345642)**

Vedoucí bakalářské práce:	**Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.** Katedra elektroenergetiky a ekologie
Konzultant bakalářské práce:	**Doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.** Katedra elektroenergetiky a ekologie
Datum zadání bakalářské práce:	**15. října 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce:	**7. června 2013**

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

L.S.

Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předmětem bakalářské práce je seznámení s diagnostickými metodami pováděnými u velkých točivých strojů. Práce je rozdělena do tří částí. V první a druhé části popisuji metody Malé a Velké diagnostiky. To zahrnuje princip a postup při samotném provádění měření. Třetí část se zabývá diagnostikou prováděnou na generátoru TG2 v elektrárně Tisová.

Klíčová slova

Malá diagnostika, Velká diagnostika, měřicí metody, rotorové vinutí, statorové vinutí, izolační odpor, polarizační index, ztrátový činitel, částečné výboje, frekvenční analýza.

Abstract

The subject of bachelor thesis is focused on the introduction of diagnostic methodes which are used to large rotating machines. The bachelor thesis is divided into three parts. In the first and second part I describe the methods of Small and Large diagnostics. It includes the principles and procedures in the actual measurements. The third part deals with the diagnostics performed on the generator TG2 in the power station Tisova.

Key words

Small diagnostic, Large diagnostic, measurement methods, rotor winding, stator winding, insulation resistance, polarization index, loss factor, partial discharges, frequency analysis.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 20.5.2013 Pavel Doležal

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Karlovi Noháčovi, Ph.D. a konzultantce doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH **8**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **10**

ÚVOD **12**

1 PŘEHLED METOD PRO DIAGNOSTIKU TURBOGENERÁTORŮ A VN MOTORŮ **13**

1.1 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU STATOROVÉHO VINUTÍ A VÝPOČET POLARIZAČNÍHO INDEXU 13
1.1.1 Princip metody *13*
1.1.2 Podmínky měření *14*
1.1.3 Doporučené přístroje *15*
1.1.4 Postup měření *16*
1.1.5 Výpočet polarizačního indexu *17*
1.2 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU ROTOROVÉHO VINUTÍ A VÝPOČET POLARIZAČNÍHO INDEXU 17
1.2.1 Princip měření *17*
1.2.2 Podmínky měření *18*
1.2.3 Doporučené přístroje *18*
1.2.4 Postup měření *18*
1.2.5 Výpočet polarizačního indexu *19*
1.3 MĚŘENÍ NAPĚŤOVÉ ZÁVISLOSTI IZOLAČNÍHO ODPORU VINUTÍ NA SS NAPĚTÍ 19
1.3.1 Princip metody *19*
1.3.2 Podmínky k měření *20*
1.3.3 Doporučené přístroje *20*
1.3.4 Postup měření *21*
1.4 MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE TGΔ 22
1.4.1 Princip metody *22*
1.4.2 Podmínky měření *23*
1.4.3 Doporučené přístroje *23*
1.4.4 Postup měření *23*
1.5 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ STATOROVÉHO VINUTÍ GALVANICKOU METODOU 24
1.5.1 Princip metody *24*
1.5.2 Podmínky měření *25*
1.5.3 Doporučené přístroje *26*
1.5.4 Postup měření *26*
1.6 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ STATOROVÉHO VINUTÍ AKUSTICKOU SONDOU 28
1.6.1 Princip metody *28*
1.6.2 Podmínky měření *28*
1.6.3 Doporučené přístroje *28*
1.6.4 Postup měření *28*

2 PŘEHLED DALŠÍCH ZKOUŠEK PROVÁDĚNÝCH NA TG **29**

2.1 ZKOUŠKA STATOROVÉHO VINUTÍ STŘÍDAVÝM NAPĚTÍM 50HZ 29
2.1.1 Princip metody *29*
2.1.2 Podmínky měření *30*
2.1.3 Doporučené přístroje *30*
2.1.4 Postup měření *30*
2.2 ZKOUŠKA STATOROVÉHO VINUTÍ STEJNOSMĚRNÝM NAPĚTÍM 31
2.2.1 Princip metody *31*
2.2.2 Podmínky měření *31*
2.2.3 Doporučené přístroje *31*
2.2.4 Postup měření *31*
2.3 ZKOUŠKA STATOROVÉHO VINUTÍ NAPĚTÍM VELMI NÍZKÉHO KMITOČTU 32
2.3.1 Princip metody *32*
2.3.2 Podmínky měření *32*

2.3.3 Doporučené přístroje ... 32
2.3.4 Postup měření ... 33
2.4 DIFERENČNÍ TERMICKÁ ANALÝZA (DTA) ... 33
2.4.1 Princip metody ... 33
2.4.2 Podmínky měření ... 34
2.4.3 Postup měření ... 34
2.5 INDIKACE OZÓNU V CHLADÍCÍM VZDUCHU ... 35
2.5.1 Princip metody ... 35
2.5.2 Podmínky měření ... 35
2.5.3 Doporučené přístroje ... 35
2.5.4 Postup měření ... 36
2.6 FREKVENČNÍ ANALÝZA PROUDU A ROZPTYLOVÉHO MAGNETICKÉHO POLE ... 37
2.6.1 Princip metody ... 37
2.6.2 Podmínky měření ... 37
2.6.3 Doporučené přístroje ... 37
2.6.4 Postup měření ... 37
2.7 MĚŘENÍ HLUKU ... 39
2.7.1 Princip metody ... 39
2.7.2 Podmínky měření ... 39
2.7.3 Doporučené přístroje ... 39
2.7.4 Postup měření ... 39

3 VLIV DIAGNOSTIKY NA ŽIVOTNOST TOČIVÝCH STROJŮ, NALEZENÍ A ODSTRANĚNÍ POTENCIÁLNÍCH ZÁVAD ... 40

3.1 DIAGNOSTIKA GENERÁTORU TG 2 V ETI ... 40
3.2 POPIS MĚŘENÍ HLUKU ... 40
3.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ HLUKU ... 42
3.4 ODSTÁVKA STROJE DO GO ... 42
3.5 VYHODNOCENÍ PROHLÍDKY ... 44
3.6 OPRAVA ... 44

ZÁVĚR ... 45

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ ... 46

Seznam symbolů a zkratek

f ..... Frekvence [Hz]

I ..... Elektrický proud [A]

i_a ..... Absorpční proud [A]

i_b ..... Nabíjecí proud [A]

i_c ..... Kapacitní proud [A]

i_v .....Vodivostní proud [A]

I_b ..... Rotorový proud [A]

I_1 ..... Jmenovitý proud rotoru [A]

P ..... Elektrický výkon [W]

p_{i60} ..... Jednominutový polarizační index [−]

p_{i600} ..... Desetiminutový polarizační index [−]

P_c ..... Četnost pulzů [−]

$P_č$ ..... Jmenovitý činný výkon [W]

Pj ..... Jmenovitý zdánlivý výkon [VA]

R ..... Elektrický odpor [Ω]

R_{iz15} ..... Hodnota izolačního odporu 15 s po zapojení měřicího napětí [MΩ]

R_{iz60} ..... Hodnota izolačního odporu 60 s po zapojení měřicího napětí [MΩ]

R_{iz600} ..... Hodnota izolačního odporu 600 s po zapojení měřicího napětí [MΩ]

q..... Náboj [C]

Q ..... Jalový výkon [VAr]

S ..... Zdánlivý výkon [VA]

t ..... Čas [s]

tgδ ..... Ztrátový činitel [−]

U ..... Elektrické napětí [V]

U_n ..... Jmenovité napětí [V]

U_{fn} ..... Fázové napětí [V]

U_1 ..... Jmenovité napětí statoru [V]

U_b ..... Rotorové napětí [V]

V_{ss} ..... Stejnosměrné napětí [V]

DTA ..... Diferenční termická analýza

GO ..... Generální oprava

KG ..... Kalibrační generátor

PI .... Polarizační index

TG ..... Turbogenerátor

vn ..... Vysoké napětí

τ_{600} ..... Desetiminutová časová konstanta izolace [−]

Úvod

Na strojích v provozu se provádí tzv. Malá diagnostika, která obsahuje tyto zkoušky:

- Vizuální kontrola statorového vinutí
- Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu statorového vinutí
- Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu rotorového vinutí
- Měření napěťové závislosti izolačního odporu vinutí na ss napětí
- Měření ztrátového činitele tgδ, kapacity a výpočet časové konstanty stator. vinutí
- Měření částečných výbojů statorového vinutí galvanickou metodou
- Indikace ozónu v chladícím vzduchu
- Frekvenční analýza proudu a rozptylového magnetického pole
- Měření hluku

V případě, že nevyhoví nějaký parametr daným kritériím, provádí se Velká diagnostika, která se skládá ze zkoušek uvedených v Malé diagnostice a ještě navíc z doplňkových měření a zkoušek. Mezi tato měření patří :

- Měření částečných výbojů statorového vinutí akustickou sondou
- Měření částečných výbojů stator. vinutí diferenciální elektromagnetickou sondou
- Zkouška statorového vinutí střídavým napětím 50 Hz
- Zkouška rotorového vinutí střídavým napětím 50Hz
- Zkouška statorového rotorového vinutí stejnosměrným napětím
- Zkouška statorového vinutí napětím velmi nízkého kmitočtu
- Diferenční termická analýza
- Analýza rozběhového proudu
- Zkouška závitové izolace statorového vinutí proudovými impulzy
- Zkouška závitové izolace rotorového vinutí s vyniklými póly

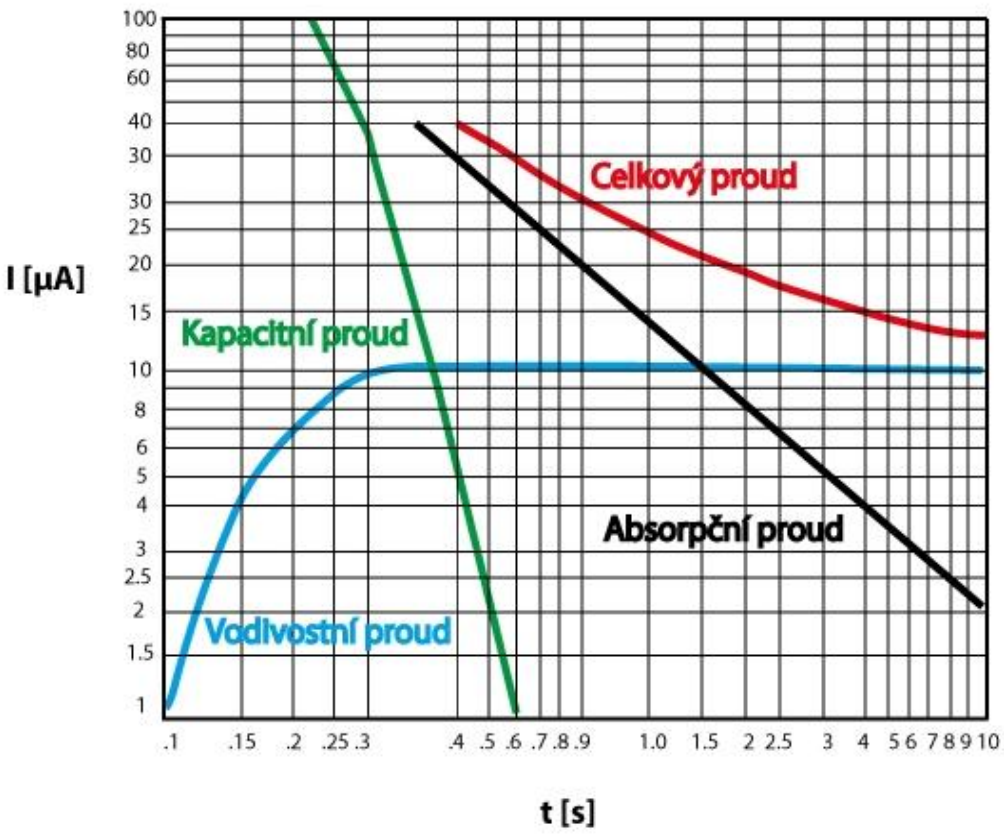
Ve své práci blíže popisuji měřící metody, jejich princip a vlastní postup při měření.

1 Přehled metod pro diagnostiku turbogenerátorů a vn motorů

1.1 Měření izolačního odporu statorového vinutí a výpočet polarizačního indexu

1.1.1 Princip metody

Měření izolačního odporu statorové izolace patří mezi základní diagnostické metody. Izolační systém elektrického stroje je složitá dielektrická soustava mezi dvěma elektrodami, lze si jí představit jako dielektrikum kondenzátoru, jehož jednu elektrodu tvoří vinutí měřené fáze a druhou elektrodu tvoří železo statoru se všemi dalšími uzemněnými částmi stroje. Po přiložení zkušebního stejnosměrného napětí se v měřeném obvodu odehrávají přechodové děje spojené s nabíjením kapacity. Proud protékající izolačním systémem se skládá z proudu kapacitního, absorpčního a vodivostního [1, 2].



Obr. 1.1 *Proudy protékající dielektrikem po připojení stejnosměrného napětí, překresleno [3,4,5]*

Průběh nabíjecího proudu $\mathbf{i_b}$, lze vyjádřit vzorcem:

$$i_b(t) = i_c(t) + i_a(t) + i_v \qquad (1.1)$$

i_b - nabíjecí proud

i_c - kapacitní proud, je vyvolán vnitřním odporem zdroje, zaniká velice rychle v okamžiku, kdy je na zkoušeném předmětu plné napětí

i_a - absorpční proud, který vyvolává polarizace dielektrika a který zaniká řádově v minutách

i_v - vodivostní proud, nazývaný též izolační, popř. svodový, je proud protékající izolací (způsobuje činné ztráty v izolaci)a je převažující nad složkami kapacitního a absorpčního proudu

t - čas

[4]

Je-li známa velikost přiloženého napětí a změří-li se průběh nabíjecího proudu, je možné vypočítat průběh závislosti U/I na čase. Charakteristika je ovlivněna permitivitou, měrným odporem izolace, geometrickými rozměry izolace a teplotou vinutí. Opakuje-li se měření při přibližně stejné teplotě vinutí, lze vliv geometrických rozměrů a teploty zanedbat [1].

1.1.2 Podmínky měření

Relativní vlhkost okolí musí být menší než 90 % (měření nelze provádět na vlhkém dlouhodobě odstaveném stroji). Před uvedením stroje do provozu se měří na vyčištěném stroji. Před samotným měřením se rozpojí uzel vinutí, je-li to technicky možné. Při tomto měření nemusí být rotor vyjmutý. Je-li vinutí chlazeno vodou, musí se voda před měřením vypustit a vnitřek vodičů a spojovacích hadic se musí vysušit. Vysušení se provede podle předpisu výrobce stroje nebo jiným odpovídajícím řešením po dohodě s výrobcem. Teplota měřeného vinutí alternátoru musí být v rozsahu 5 až 30 °C. Hydrogenerátory se měří při chladnutí stroje z provozní teploty a měřené vinutí musí mít teplotu 20 až 30 °C. Po ukončení měření je nutné jednotlivé fáze vybít a poté viditelně zkratovat [2,4].

1.1.3 Doporučené přístroje

- Měřič izolace (zdroj měřicího napětí 1 až 5 kV_{ss}, třída přesnosti alespoň 2,5 % z délky stupnice nebo 5 % z měřené hodnoty, rozsah minimálně 20 000 MΩ, jmenovitý zkratový proud alespoň 1 mA na rozsahu 5 kV_{ss})
- Stopky, třída přesnosti do 1,5
- Teploměr

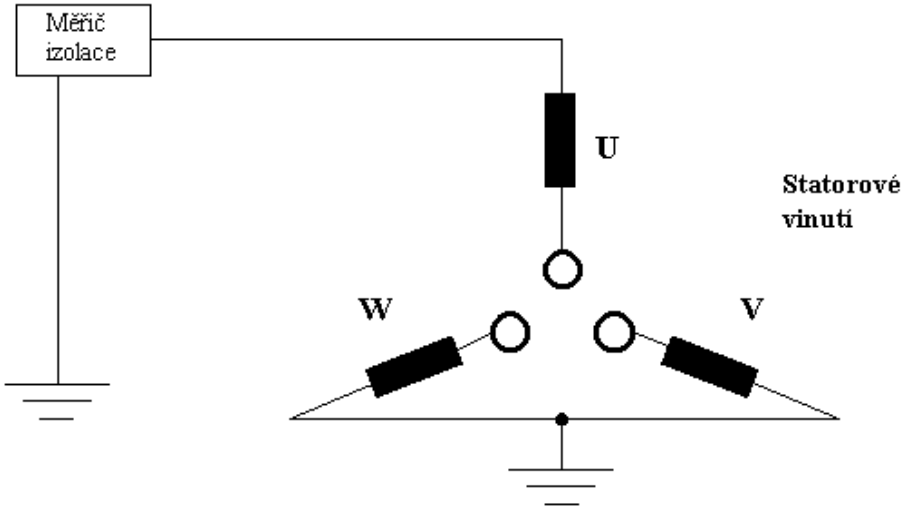
  [4]

V současné době je na trhu více výrobců měřičů izolačních odporů. Mezi špičku v oboru patří společnost Megger s jejich plně automatickými diagnostickými zařízení, které jsou známy svým jednoduchým ovládáním a spouštěním měření jediným zkušebním tlačítkem. Běžná měření izolačního odporu zahrnují s11ardně zavedenou funkci měření izolačního odporu, nebo svodového proudu, diagnostické testy zahrnují metodu PI testu – měření polarizačního indexu v časech 1 a 10 minutě např. u točivých strojů, měření poměru izolačního odporu v jiných časech než u PI (flexibilita), zde je možné nastavit běžně zavedený koeficient měření v 15 s a 60 s, dále měření izolace zvyšujícím se napětím v čase (napomáhá při určování mechanických poškození izolačního materiálu), měření koeficientu vybíjení dielektrika – zotavení izolace (znečištění/vlhkost/dutinky/poškození vrstvy u vícevrstevné izolaci). Nepřekonatelnou výhodou, kterou Megger modely nabízí ve své třídě jako jediný výrobce měřičů izolačních odporů, je uvedení a garantování parametrů měření při použití třetí měřicí svorky, tzv. stínící GUARD svorky [6].

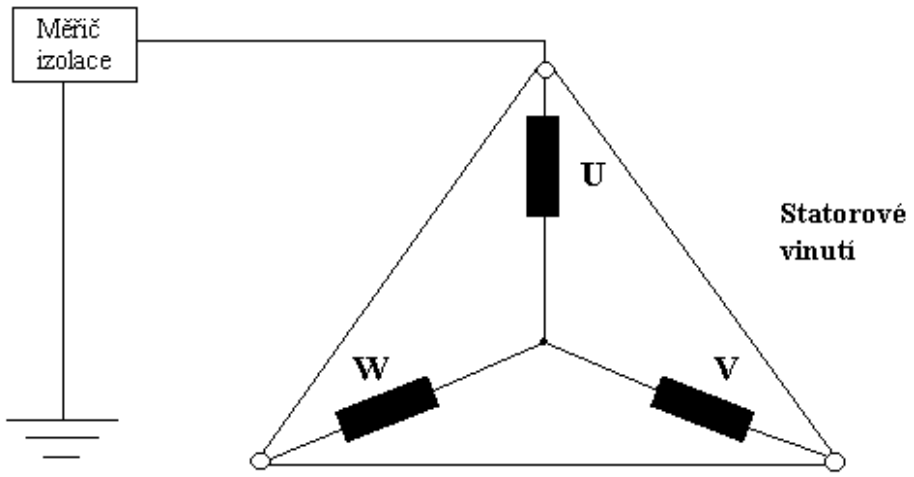
Obr. 1.4 *Měřicí přístroj MEGGERS1-1052/2, převzato z [7]*

1.1.4 Postup měření

Pro měření izolačního odporu se obvykle používají přístroje, které mají vlastní zdroj stejnosměrného vysokého napětí. Měřicí napětí 1 až 5 kV se přiloží na vstup měřené fáze, která byla z důvodu odvedení elektrického náboje zkratována po dobu minimálně 30 minut. Neměřené fáze se na vstupu uzemní a druhý konec každé fáze je odpojen. Měření se provádí samostatně na každé ze tří fází. U vinutí, jehož začátky a konce jednotlivých fází nejsou vyvedeny na zvláštní svorky, se zkouší jako celek s navzájem spojenými vývody. Měřené vinutí je připojeno na záporný pól zdroje napětí. Na kladný pól zkušebního zdroje se připojí kostra stroje vodivě spojená se zemí a s ostatními vinutími *(Obr. 1.2, Obr 1.3)* [2, 4].



Obr. 1.2 *Schéma zapojení pro měření izolačního odporu statorového vinutí s rozpojeným uzlem, převzato z [4]*



Obr. 1.3 *Schéma zapojení pro měření izolačního odporu statorového vinutí s nerozpojeným uzlem, převzato z [4]*

1.1.5 Výpočet polarizačního indexu

Polarizační index (PI) je jedním z hlavních parametrů používaných pro hodnocení stavu izolace. Tento diagnostický test je založen na faktu, že dobrá izolace se po přiložení měřicího napětí projevuje růstem izolačního odporu v čase. Při testu PI se měří izolační odpor ve dvou po sobě jdoucích časových intervalech, obvykle po jedné minutě od okamžiku přiložení měřicího napětí a po deseti minutách. Polarizační index PI je dán podílem obou změřených izolačních odporů. Pro výpočet jednominutového a desetiminutového polarizačního indexu se měřená veličina odečítá v časech 15, 60, 120 až 600 s po připojení měřicího napětí. p_{i60} a p_{i600} vypočítáme podle vztahu [4, 8]:

$$p_{i60} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}} \; [-] \qquad (1.2)$$

$$p_{i600} = \frac{R_{iz600}}{R_{iz60}} \; [-] \qquad (1.3)$$

R_{iz15}- hodnota izolačního odporu v MΩ odečtená v čase 15 s po zapojení měřicího napětí

R_{iz60}- hodnota izolačního odporu v MΩ odečtená v čase 60 s po zapojení měřicího napětí

R_{iz600}- hodnota izolačního odporu v MΩ odečtená v čase 600 s po zapojení

Hodnota izolačního odporu a polarizačního indexu je ovlivněna zejména absorbovanou vlhkostí, degradací izolace, znečištěním stroje, případně konstrukcí stroje. Je-li hodnota PI větší než 2 indikuje to dobrou, nenavlhlou a nedegradovanou izolaci, špatný stav značí, blíží-li se hodnota PI k jedné [2].

1.2 Měření izolačního odporu rotorového vinutí a výpočet polarizačního indexu

1.2.1 Princip měření

Stejně jako v případě izolačního odporu statorového vinutí je izolační odpor rotorového vinutí důležitým parametrem elektrických točivých strojů. Je to jedna z úvodních zkoušek nového stroje, která se častokrát opakuje při provozním, servisním i diagnostickém měření a prakticky hodnota izolačního odporu provází točivý stroj po dobu technického života.

Zmenšení izolačního odporu může být způsobeno znečištěním zejména povrchových cest (zaprášením, orosením), mechanické poškození (nalomení, naříznutí izolace) se u čistého stroje na izolačním odporu ve většině případů neprojeví [2, 9].

1.2.2 Podmínky měření

Relativní vlhkost okolí musí být menší než 90 % (měření nelze provádět na vlhkém dlouhodobě odstaveném stroji). Měřit je možné na rotoru vyjmutém ze stroje nebo ve smontovaném stavu. Pokud se měří ve smontovaném stavu, stroj musí být v klidu a zajištěn proti samovolnému spuštění. Před měřením se musí odpojit zemní ochrana rotoru, odpojit budící obvod vyjmutím kartáčů sběracích kroužků. Měří se vinutí magnetového kola, přívodní pasy a sběrací kruhy. Izolace sběracího ústrojí se měří zvlášť. Teplota měřeného vinutí je doporučená v rozmezí 20 až 30 °C, u rotorů s vyniklými póly se měří při chladnutí stroje z provozní teploty. Po ukončení měření je nutné vybití vinutí po dobu 5 minut zkratováním vinutí na hmotu magnetového kola (rotoru) [2, 9].

1.2.3 Doporučené přístroje

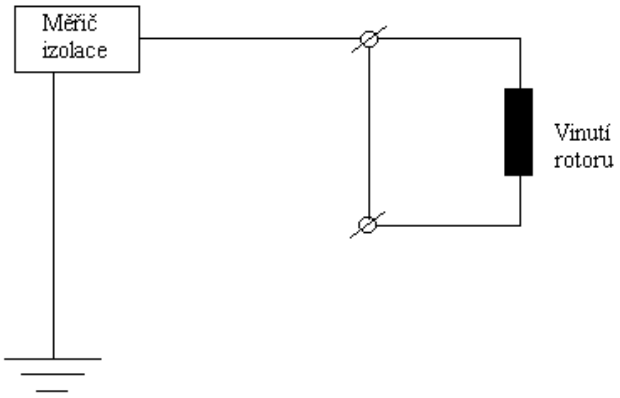
- Měřič izolace (zdroj měřicího napětí 0,5 až 1 kVss, třída přesnosti alespoň 2,5 % z délky stupnice nebo 5 % z měřené hodnoty, rozsah minimálně 100 MΩ, jmenovitý zkratový proud alespoň 1 mA na rozsahu 1 kVss)
- Stopky, třída přesnosti do 1,5
- Teploměr

  [9]

Pro měření je možné využít stejný přístroj jako u měření izolačního odporu statorového vinutí s přihlédnutím na maximální velikost měřicího napětí.

1.2.4 Postup měření

Měření izolačního odporu se provádí měřičem izolace se stejnosměrným napětím 0,5 až 1,5 kV přiloženém mezi konec vinutí a těleso rotoru. Měřicí napětí nesmí přesáhnout 50 % zkušebního napětí efektivního pro nový stroj a stroj v provozu nevyčištěný. Pro napětí rotorového obvodu do 500 V je doporučená hodnota měřicího napětí 500 V a nad 500 V je měřicí napětí 1 000 V [2, 9].



Obr. 1.4 *Schéma zapojení pro měření izolačního odporu rotorového vinutí, převzato z [9]*

1.2.5 Výpočet polarizačního indexu

Pro rotorové vinutí se stanovuje jednominutový polarizační index. Měřené vinutí je připojeno na záporný pól zdroje měřicího napětí. Měřená odpor se odečítá v čase 15 a 60 s po připojení měřicího napětí. Z hodnot se následně vypočítá jednominutový polarizační index p_i podle vztahu [2, 9]

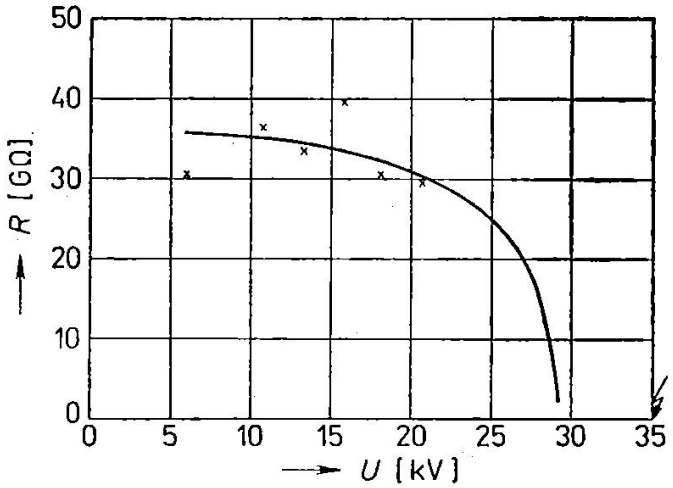
$$p_{i60} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}} \; [-] \qquad (1.4)$$

1.3 Měření napěťové závislosti izolačního odporu vinutí na ss napětí

1.3.1 Princip metody

Při měření závislosti izolačního odporu na čase při konstantním stejnosměrném napětí roste velikost tohoto odporu až na jistu ustálenou mez, která je dána vodivostním proudem dielektrika. Se zvyšujícím se napětí je odpor téměř konstantní až do určité velikosti napětí, poté začne klesat. Zvyšuje-li se napětí i nadále, izolační odpor se zmenšuje až na hodnotu blízkou nule, při které dojde k průrazu izolace. Na základě pokusů vyslovil Cameron [CAM] předpoklad, že lze odhadnout stejnosměrnou elektrickou pevnost izolace nedestruktivní cestou. Pokusy však prokázaly, že Cameronův předpoklad nemá obecnou platnost, jelikož v některých případech došlo k naprosto nečekaným k průrazům. Přes uvedené nedostatky vypovídají výsledky o stavu izolační soustavy. U dobré izolace se snižování odporu projeví až při mnohem vyšším napětí, než je jmenovité napětí stroje. Naopak špatná izolace se projeví

zmenšením odporu již při podstatně nižším napětí a následně vysokou strmostí snižování odporu [1, 2].



Obr. 1.5 *Závislost ustáleného izolačního odporu na napětí naměřená na vinutí generátoru 50 MW, 10 500 V, převzato z [1]*

1.3.2 Podmínky k měření

Relativní vlhkost okolí musí být menší než 90 % (měření nelze provádět na vlhkém dlouhodobě odstaveném stroji). Před uvedením stroje do provozu se měří na vyčištěném stroji. Před samotným měřením se rozpojí uzel vinutí, je-li to technicky možné. Při tomto měření nemusí být rotor vyjmutý. Je-li vinutí chlazeno vodou, musí se voda před měřením vypustit a vnitřek vodičů a spojovacích hadic se musí vysušit. Vysušení se provede podle předpisu výrobce stroje nebo jiným odpovídajícím řešením po dohodě s výrobcem. Teplota měřeného vinutí alternátoru musí být v rozsahu 5 až 30 °C. Hydrogenerátory se měří při chladnutí stroje z provozní teploty a měřené vinutí musí mít teplotu 20 až 30 °C. Po ukončení měření je nutné jednotlivé fáze vybít a poté viditelně zkratovat [2,10].

1.3.3 Doporučené přístroje

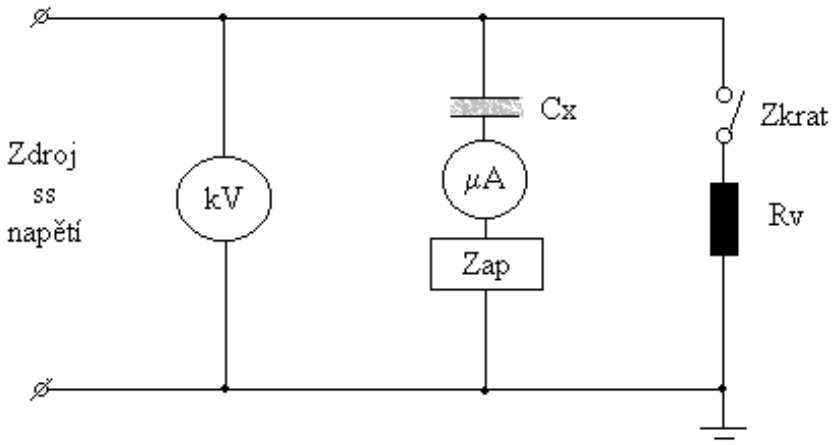
- Stabilizovaný stejnosměrný zdroj
- Elektrostatický kilovoltmetr, třída přesnosti 1,5
- Mikroampérmetr, třída přesnosti 1,5
- Zapisovač, třída přesnosti 1,5
- Stopky, třída přesnost 1,5

- Vybíjecí zařízení

  [10]

1.3.4 Postup měření

Měřicí napětí se přiloží na vstup fáze. Ostatní fáze se na vstupu uzemní. Druhý konec každé fáze zůstane nezapojen. Měření se provede ve všech třech fázích samostatně. Několikafázové vinutí, u kterého nejsou začátky a konce jednotlivých fází vyvedeny na zvláštní svorky, se zkouší jako celek, jehož vývody jsou navzájem vodivě spojeny. Stejnosměrné napětí se ze zvyšuje po stupních a měří se čas s protékajícím proudem izolačním systémem po dobu kdy, dosáhne své ustálené hodnoty. V praxi max. 10 minut. Postup se opakuje pro napěťové hladiny až do napětí, při němž se projeví prokazatelné zmenšení izolačního odporu. Měřicí napětí však nesmí překročit hodnotu zkušebního napětí zkoumané izolace. Po celou dobu měření se graficky zaznamenává protékající nabíjecí proud I_b. Izolační odpor je následně vypočítán jako poměr napětí a ustáleného proudu izolačním systémem, v praxi hodnota proudu po 10 minutách [2,10].



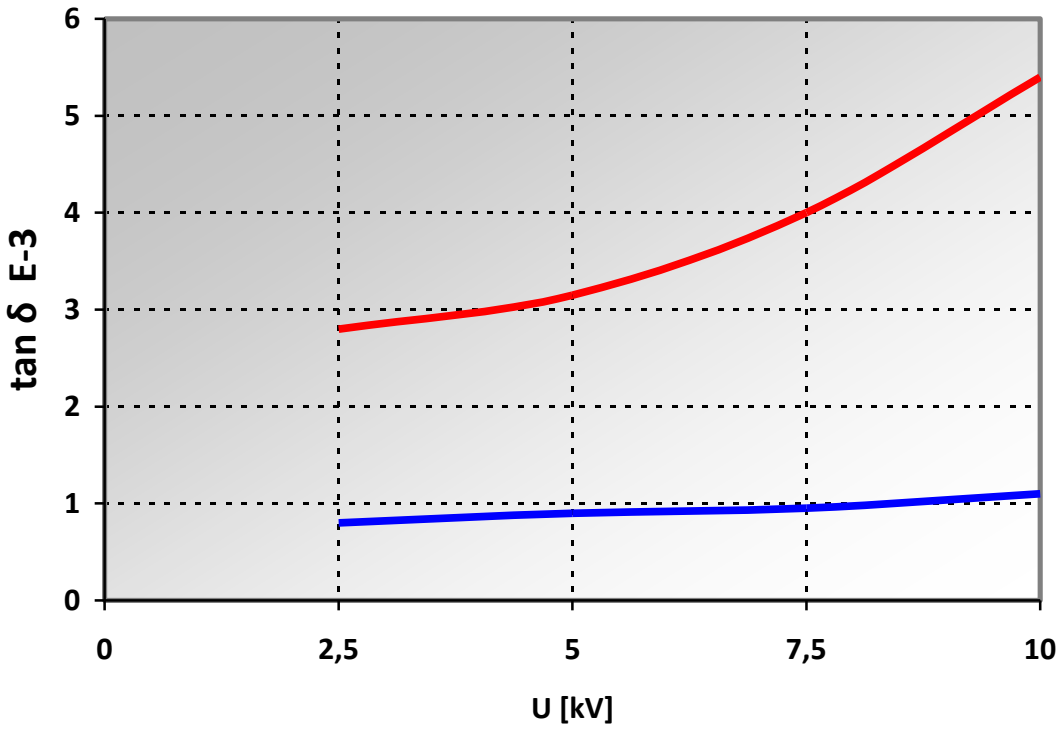
Obr. 1.6 *Schéma zapojení pro měření napěťové závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí, převzato z [10]*

kV	- elektrostatický kilovoltmetr	C_X	- měřená izolace,
μA	- mikroampérmetr	Zap	- grafický zapisovač
Zkrat	- zkratovací zařízení	R_V	- vybíjecí odpor

1.4 Měření ztrátového činitele tgδ

1.4.1 Princip metody

Ztrátový činitel tg δ je definován jako tangens úhlu, o který se liší fázový posun proudu zkoušeného izolantu od fázového posunu proudu ideálního bezeztrátového dielektrika. Ztrátový činitel dává obraz o celkovém stavu izolace a z jeho velikosti lze indikovat , zda je izolační soustava provozně zestárlá nebo navlhlá. V praxi používá pro rychlé posouzení kvality daného izolantu. Materiál s dobrými elektroizolačními vlastnostmi má tgδ menší než $10^{-3,}$ špatný materiál tgδ větší než 10^{-2}. Závislost ztrátového činitele na střídavém napětí má téměř vodorovný nebo mírně stoupající průběh. Pokud se při určitém napětí ohýbá k vyšším hodnotám, jsou příčinou tohoto nárůstu částečné výboje vznikající v nehomogenitách materiálu nad určitou úrovní napětí. Na Obr *1.7* je znázorněn průběh tgδ na dobrém elektroizolačním materiálu (novém) a materiálu starším se zhoršenými vlastnostmi [1, 2, 3, 11].



Obr. 1.7 *Závislost ztrátového činitele tgδ na napětí, překresleno z [2, 12]*

1.4.2 Podmínky měření

Relativní vlhkost okolí musí být menší než 90 % (měření nelze provádět na vlhkém dlouhodobě odstaveném stroji). Před uvedením stroje do provozu se měří na vyčištěném stroji. Před samotným měřením se rozpojí uzel vinutí, je-li to technicky možné. Při tomto měření nemusí být rotor vyjmutý. Je-li vinutí chlazeno vodou, musí se voda před měřením vypustit a vnitřek vodičů a spojovacích hadic se musí vysušit. Vysušení se provede podle předpisu výrobce stroje nebo jiným odpovídajícím řešením po dohodě s výrobcem. Teplota měřeného vinutí alternátoru musí být v rozsahu 5 až 30 °C. Hydrogenerátory se měří při chladnutí stroje z provozní teploty a měřené vinutí musí mít teplotu 20 až 30 °C [2,11].

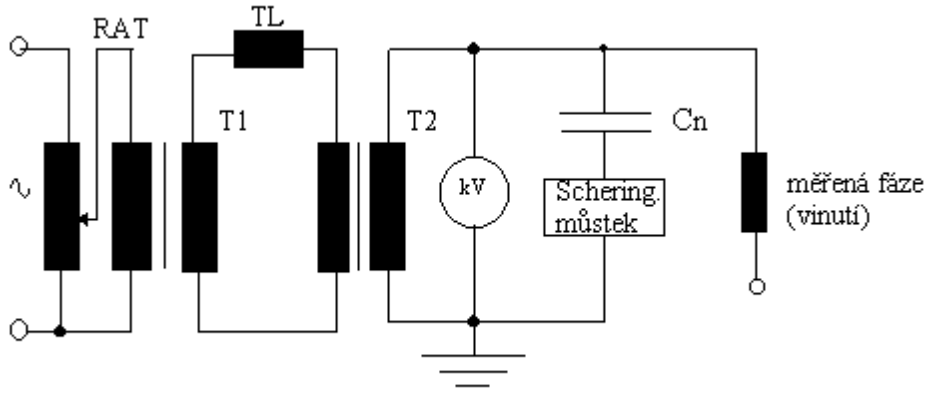
1.4.3 Doporučené přístroje

- Scheringův můstek, přesnost měření C <0,2 % ; tgδ< 2 %
- Nulový indikátor, citlivost 5.10^{-10}A
- Kapacitní normál
- Regulační autotransformátor
- Napájecí transformátor
- Tlumivka
- Oddělovací transformátor
- Elektrostatický kilovoltmetr
- Teploměr ve stroji
- Vlhkoměr

[11]

1.4.4 Postup měření

Zkušební napětí se přiloží na vstup měřené fáze. Ostatní fáze se na vstupu uzemní. Druhý konec každé fáze zůstane nezapojen. Měření se provádí ve všech třech fázích samostatně. Několikafázové vinutí, u kterého nejsou začátky a konce jednotlivých fází vyvedeny na zvláštní svorky, se zkouší jako celek, jehož vývody jsou navzájem vodivě spojeny a uzel vinutí odzemněn. Schéma zapojení je znázorněno na *Obr 1.8.* Při této zkoušce se měří napěťová závislost ztrátového činitele a kapacity v intervalu $(0,2 - 1,0)U_n$, přiložené napětí je zvyšováno po krocích $0,2U_n$ [2,11].



Obr. 1.8 *Schéma zapojení pro měření ztrátového činitele tg δ a kapacity statorového vinutí, převzato z [11]*

RAT - regulační autotransformátor	T1 - oddělovací transformátor
TL - tlumivka	T2 - vn transformátor
kV - elektrostatický kilovoltmetr	C_n - kapacitní normál

Výpočet časové konstanty je důležitým ukazatelem a je prováděn zejména pro odstranění vlivu typu stroje, jeho napětí a výkonu na naměřené veličiny. Velikost časové konstanty τ není totiž závislá na geometrických rozměrech vinutí alternátoru, což tedy v praxi umožňuje možnost porovnávat vlastnosti izolačních systémů u typově rozdílných strojů. Výpočet desetiminutové časové konstanty izolace τ_{600}se provede podle vztahu:

$$\tau_{600} = R_{iz\,600} \times C \; [-] \qquad (1.5)$$

R_{iz600} - izolační odpor v MΩ odečtený v čase 600 s po připojení měřicího napětí

C - kapacita vinutí měřené fáze generátoru v μF při U_{fn}

U_{fn} - jmenovitá hodnota fázového napětí

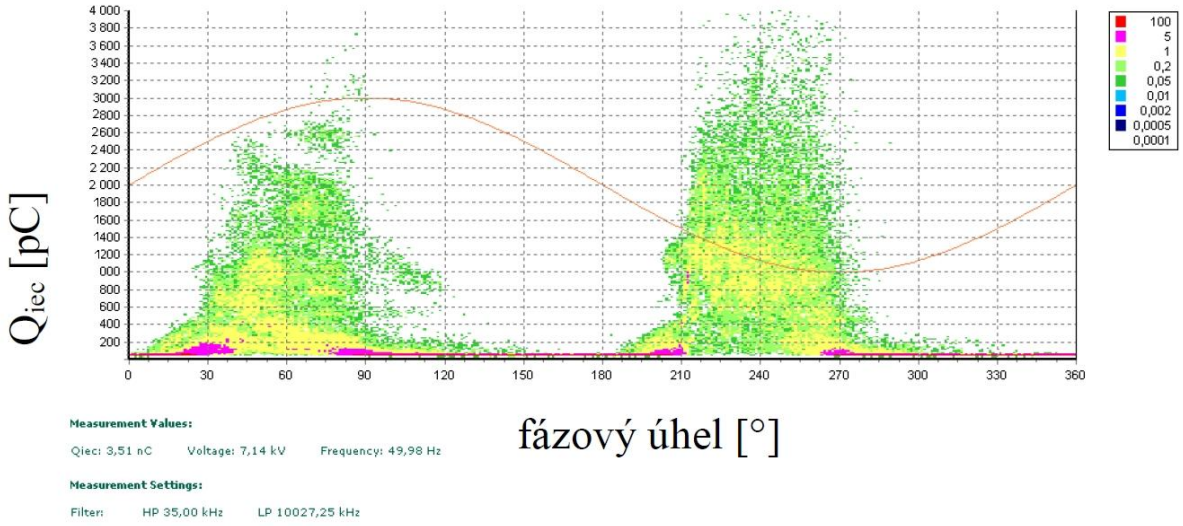
[11]

1.5 Měření částečných výbojů statorového vinutí galvanickou metodou

1.5.1 Princip metody

Částečné výboje jsou definovány jako místní elektrické výboje, které pouze částečně zkratují izolační systém mezi elektrodami o určitém potenciálu. Částečné výboje v točivých strojích mohou vznikat buď přímo v izolaci vodičů (částečné výboje v izolaci), mezi izolací

a vodičem (prostor mezi vodičem a izolací, tzv. "delaminace"), mezi izolací a dnem drážky statoru (drážkové výboje) nebo na povrchu izolace mimo drážku statoru (klouzavé výboje po povrchu izolace při výstupu vinutí z drážky statoru, povrchové výboje na čelech vinutí, koróna apod.).Každý impulz částečného výboje vzniká ve specifickém místě vinutí. Proudový impulz se šíří od místa vzniku a jistá míra těchto pulzů dosáhne také přípojnice stroje, kde může být detekovány off-line měřicí metodou. Částečné výboje vyvolávají postupné zhoršování kvality izolačního systému a tím snižují jeho elektrickou pevnost. Měřením výbojové činnosti lze odhadnout celkový stupeň znehodnocení izolace izolačního systému, zaznamenat vznik lokálních vad, příp. určit druh výbojové činnosti. Měření lze provádět při odstávce stroje (měření off-line) nebo při provozu stroje (měření on-line, monitorování). Rozvoj digitální techniky přinesl větší možnosti, největší výhodou je měřená data ukládat a následně je pak vyhodnocovat. Tato zařízení též umožňují měřit četnost pulzů. To přineslo nový pohled na problematiku částečných výbojů. Taktéž bylo nově možné vyhodnocovat 3D diagramy částečných výbojů – například zdánlivý náboj *q[pC]*v závislosti na fázi *(°)* a četnosti pulzů P_c*[-]* viz *Obr. 1.9* [2, 13, 14].



Obr. 1.9 *Izolační tyč generátoru, diagram četnosti pulzů v závislosti na amplitudě zdánlivého náboje a ve frekvenčním rozsahu 35 kHz – 10 MHz, 7 kV, 3,51 nC, převzato z [14]*

1.5.2 Podmínky měření

Relativní vlhkost okolí musí být menší než 90 % (měření nelze provádět na vlhkém dlouhodobě odstaveném stroji). Pro měření na odstaveném stroji se před měřením musí rozpojit uzel vinutí. Měřená fáze se připojí na zdroj regulovatelného střídavého napětí 50 Hz, neměřené fáze se zkratují a uzemní, viz Obr.1.10. Při tomto měření nemusí být rotor vyjmutý.

Měření za provozu stroje se provádí podle schématu zapojení na Obr. 1.11 (pro jednu fázi statoru) [2, 13].

1.5.3 Doporučené přístroje

Měření se provádí buď na odstaveném stroji nebo za provozu. Za provozu je zapotřebí těchto přístrojů:

- Širokopásmový měřič částečných výbojů, rozsah do 1 000 000 pC (1 μC).
- Bezkorónový vazební kondenzátor (doporučená hodnota 100 pF až 1 000 pF).
- Měřicí impedance (kombinace odporu, kapacity a indukčnosti s malou impedancí při síťovém kmitočtu a velkou impedancí pro vysokofrekvenční impulsy).
- Kalibrační generátor 1 000 pC a 10 000 pC.

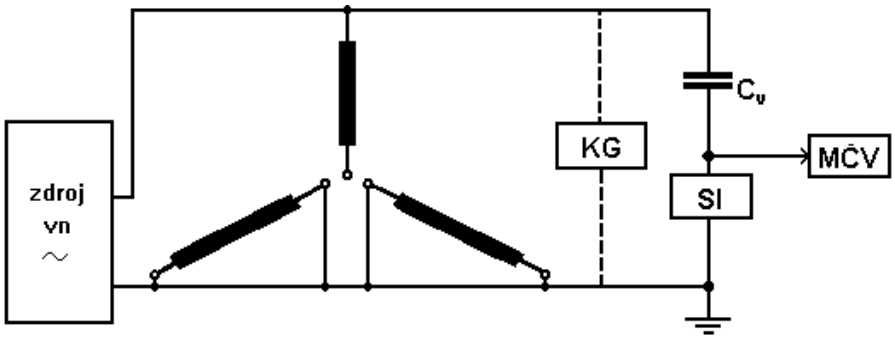
Při odstaveném stroji výše uvedené přístroje a ještě navíc

- Bezkorónový regulovatelný zdroj 50 Hz, 0 – U_{fn}.
- Kilovoltmetr.

[13]

1.5.4 Postup měření

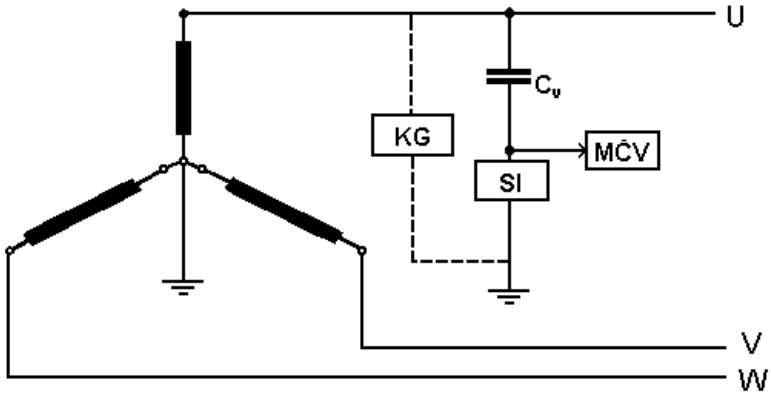
Na měřené fázi, která je odzemněná a odpojená od sítě, se postupně zvyšuje zkušební napětí až do jmenovitého napětí U_n. Při výskytu výbojové činnosti nad limitní mez (obvykle q = 1 000 pC) se odečte hodnota zapalovacího napětí částečných výbojů U_i (efektivní hodnota napájecího napětí v okamžiku výskytu nadlimitní hodnoty výbojové činnosti). Po dosažení jmenovité hodnoty napětí Un se toto napětí nechá působit po dobu 30 min. Poté se zkušební napětí snižuje po 0,2 Un a na těchto hladinách napětí se měří hodnoty zdánlivého náboje *q [pC]* případně další diagnostické parametry. Hodnoty *q*, případně další diagnostické parametry se zjišťují v obou půlperiodách napájecího napětí, pro vyhodnocení se uvažuje vyšší z nich. Kalibrační generátor KG pro kalibraci měřicího obvodu se použije jednorázově, obvykle před vlastním měřením, na obvodu bez napětí. Zapojuje se mezi vysokonapěťovou elektrodu a uzemnění, na *Obr 1.10* znázorněno čárkovaně. Měření se provádí postupně na všech fázích statorového vinutí [2, 13, 15].



Obr. 1.10 *Schéma zapojení pro měření částečných výbojů statorového vinutí před uvedením stroje do provozu, převzato z [13]*

KG - kalibrační generátor Cv - vazební kondenzátor
SI - snímací impedance MČV - měřič částečných výbojů

Při měření za provozu se sledují základní parametry částečných výbojů a jejich změny v čase. Vzhledem k velkému rušení za provozu stroje se pro vyhodnocování uvažují pouze ustálené hodnoty diagnostických parametrů. Nelze-li ustálené hodnoty získat jinak (filtrací, odrušením apod.), považují se za ustálené hodnoty ty hodnoty diagnostických parametrů, které se podstatně nemění po dobu 10 minut. Kalibrační generátor KG pro kalibraci měřicího obvodu se použije jednorázově, obvykle před vlastním měřením, na obvodu bez napětí. Zapojuje se mezi vysokonapěťovou elektrodu a uzemnění, na *Obr 1.11* znázorněno čárkovaně. Projevují-li se při měření rušivé vlivy, doporučuje se připojit do obvodu odrušovací filtr nebo použít jiné odrušovací prostředky (snímání impulsů částečných výbojů z více míst a jejich vzájemné porovnávání, softwarová filtrace, apod.) [2, 13].



Obr. 1.11 *Schéma zapojení pro měření částečných výbojů statorového vinutí za provozu, převzato z [13]*

KG - kalibrační generátor Cv - vazební kondenzátor
SI - snímací impedance MČV- měřič částečných výbojů

1.6 Měření částečných výbojů statorového vinutí akustickou sondou

1.6.1 Princip metody

Akustická detekce s využitím akustické sondy slouží k přímé lokalizaci zřídla částečných výbojů a zdrojových lokalit. Je vhodná zejména pro alternátory a vn motory po demontáži rotoru, rovněž pro měření čelních partií vinutí. Metoda je aplikovatelná pro stroje od 1 kV výše. Této metody se rovněž využívá při kontrole navinuté a vytvrzené izolace tyčí cívek vinutí na zkušebně, dříve než budou založeny do drážek stroje. V případě výskytu výbojové činnosti je k její kvantifikaci nutné použít některou z galvanických metod měření částečných výbojů [2, 16, 17].

1.6.2 Podmínky měření

Relativní vlhkost okolí musí být menší než 90 % (měření nelze provádět na vlhkém dlouhodobě odstaveném stroji). Generátor je nutno odpojit od rozvodné sítě a zdemontovat spojky na vývodu. Ze stroje se vyjme rotor. Teplota měřeného vinutí musí být rozmezí 20 až 30 °C [2, 16].

1.6.3 Doporučené přístroje

- Bezkorónový regulovatelný zdroj potřebného výkonu, 0-Un kV
- Akustická sonda s příslušenstvím, frekvenční rozsah 40 kHz
- Kilovoltmetr do 15 kV

1.6.4 Postup měření

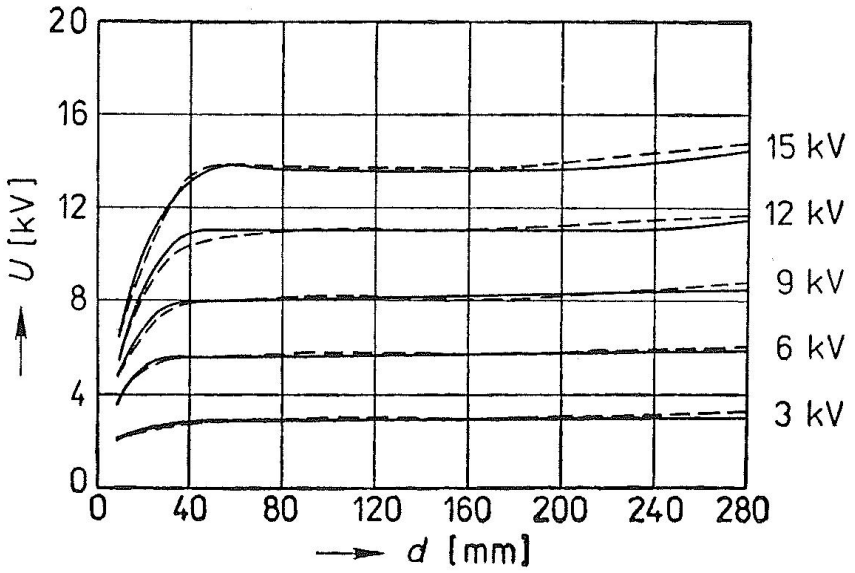
Zkušební napětí se připojí na vinutí statoru a plynule se zvyšuje až do jmenovitého napětí stroje. Směrový mikrofon akustické sondy se namíří ve směru předpokládaného místa výbojové činnosti. Měřit je možné okamžitě po dosažení předepsaného zkušebního napětí. Při měření je nutné zachovat všechna pravidla pro práci na vn, sonda je přímo přibližována k částem (i když izolovaným) pod vysokým napětím. Výskyt výboje v izolačním systému je indikován výchylkou indikátoru na měřicím přístroji a vždy i akusticky ve slyšitelném spektru (ve sluchátkách). Při výskytu výboje je nutné vyhodnotit i napětí, při kterém se výboj objeví. Akustická sonda je pouze první rychlý detekční test. Detekovat, lokalizovat i kvantifikovat úroveň akustického tlaku vyvolaného částečnými výboji dokáží i moderní akustické kamery, otázkou však zůstává jejich velká pořizovací cena [2, 16].

2 Přehled dalších zkoušek prováděných na TG

2.1 Zkouška statorového vinutí střídavým napětím 50Hz

2.1.1 Princip metody

Zkouška střídavým napětím 50 Hz statorového vinutí je jedním ze zástupců zkoušek zvýšeným napětím. Mezi nejdůležitější vlastnosti izolačního systému, na které přímo závisí provozuschopnost stroje, je průrazné napětí, resp. elektrická pevnost izolačního systému. Vlivem degradace izolačního systému, který bývá zpravidla předimenzován, dochází ke snížení elektrické pevnosti. Pokud dojde ke snížení elektrické pevnosti pod kritickou mez, dojde k průrazu dielektrika a k následné havárii stroje. Zkoušky se zvýšeným napětím dokáží odhalit nejslabší místo stroje v době, kdy není provozován. Jelikož se v podstatě jedná o destruktivní zkoušku, je nepřípustné zvyšovat napětí až do průrazu izolace. Z toho důvodu je izolační systém šetřené fáze namáhán elektrickým napětím po dobu 60s.Při zkoušce je rozloženo napětí na vinutí v poměru kapacit, což věrohodně představuje provozní namáhání. Velikost napětí je dána stářím a stavem stroje [1, 2, 18, 19].



Obr. 2.1 *Rozložení napětí u výstupu z drážek na polovodičovém povlaku vinutí jako funkce vzdálenosti od uzemněných částí(přerušované křivky – ustálené napětí s kmitočtem 50 Hz; plné křivky- půlvlna sinusového napětí), převzato z [2]*

2.1.2 Podmínky měření

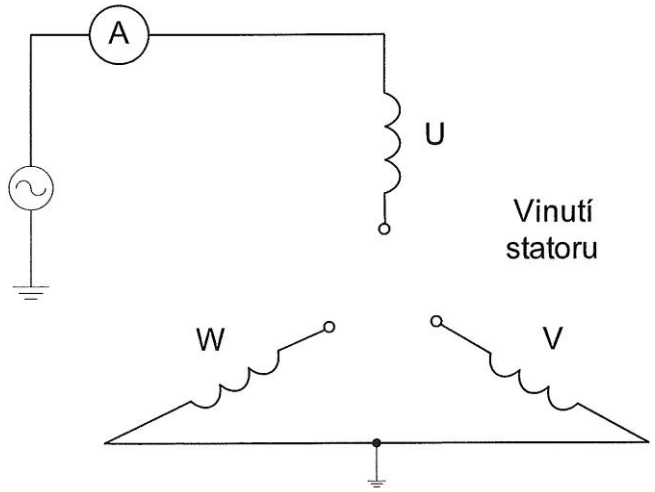
Relativní vlhkost okolí musí být menší než 90 % (měření nelze provádět na vlhkém dlouhodobě odstaveném stroji). Před uvedením stroje do provozu se měří na vyčištěném stroji. Před samotným měřením se rozpojí uzel vinutí, je-li to technicky možné. Při tomto měření nemusí být rotor vyjmutý. Je-li vinutí chlazeno vodou, musí vyhovět hodnoty izolačního odporu. Teplota měřeného vinutí alternátoru musí být v rozsahu 5 až 30 °C. Hydrogenerátory se měří při chladnutí stroje z provozní teploty a měřené vinutí musí mít teplotu 20 až 30 °C [2, 18].

2.1.3 Doporučené přístroje

- Střídavý vn zdroj potřebného výkonu s kmitočtem od 40 Hz do 60 Hz
- Přístroje pro měření proudu a napětí s třídou přesnosti min. 0,5

2.1.4 Postup měření

Při zkoušce střídavým napětím se jeden pól zkušebního napětí připojí mezi konce zkoušeného vinutí a druhý pól se připojí na kostru stroje vodivě spojenou se zemí a s ostatními vinutími *Obr. 2.2*.Veškeré konstrukční části stroje, které nejsou připojeny na zkušební potenciál, se spojí s kostrou stroje (např. teploměry, termočlánky, vibrační čidla, apod.) Zkouší se každé elektricky nezávislé vinutí. Vinutí, která jsou v provozu spojena, avšak mají vyvedeny oba konce vinutí, se považují za elektricky nezávislá. Několikafázové vinutí, u kterého nejsou začátky a konce jednotlivých fází vyvedeny na zvláštní svorky, se zkouší jako celek, jehož vývody jsou navzájem vodivě spojeny [2, 18].



Obr. 2.2*Zapojení při zkoušce statorového vinutí napětím 50 Hz, převzato z [2]*

2.2 Zkouška statorového vinutí stejnosměrným napětím

2.2.1 Princip metody

Vývoj této zkoušky zapříčinily obavy z přílišné degradace izolačního systému při zkoušce zvýšeným napětím, kdy je zapotřebí zdroj s velkým výkonem. I tato metoda je založena na zvýšeném elektrickém namáhání izolačního systému, ale stejnosměrný zdroj má relativně malý výkon, řádově stovky VA. Zkouškou zvýšeným přiloženým napětím se provádí kontrola elektrické pevnosti izolace vinutí. Tato zkouška se provádí v případě, že technické nebo organizační podmínky neumožňují provést zkoušku střídavým napětím. Její hodnota je dána velikostí zkušebního napětí v době zkoušky. Při zkoušce je rozloženo napětí na vinutí v poměru odporů vinutí a neodpovídá tak zcela provoznímu namáhání izolačního systému [1, 2, 20].

2.2.2 Podmínky měření

Relativní vlhkost okolí musí být menší než 90 % (měření nelze provádět na vlhkém dlouhodobě odstaveném stroji). Před uvedením stroje do provozu se měří na vyčištěném stroji. Před samotným měřením se rozpojí uzel vinutí, je-li to technicky možné. Při tomto měření nemusí být rotor vyjmutý. Je-li vinutí chlazeno vodou, musí vyhovět hodnoty izolačního odporu. Teplota měřeného vinutí alternátoru musí být v rozsahu 5 až 30 °C. Hydrogenerátory se měří při chladnutí stroje z provozní teploty a měřené vinutí musí mít teplotu 20 až 30 °C. Po ukončení měření je nutno jednotlivé fáze vybít a poté viditelně zkratovat [2, 20].

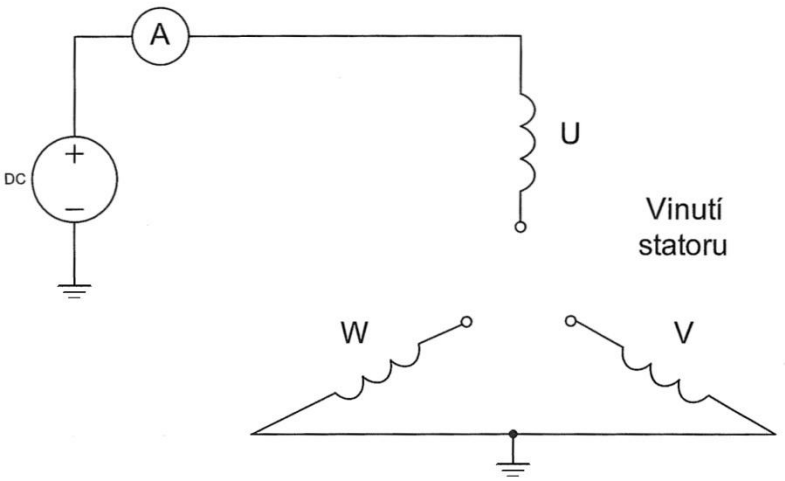
2.2.3 Doporučené přístroje

- Zdroj stejnosměrného napětí plynule regulovatelný
- Přístroje pro měření proudu a napětí s třídou přesnosti min. 0,5
  [20]

2.2.4 Postup měření

Při zkoušce se jeden pól zkušebního napětí připojí na vývody zkoušeného vinutí a druhý pól se připojí na kostru stroje vodivě spojenou se zemí a s ostatními vinutími *Obr. 2.3*. Zkouší se každé elektricky nezávislé vinutí. Vinutí, která jsou v provozu spojena, avšak mají vyvedeny oba konce vinutí, se považují za elektricky nezávislá. Několikafázové vinutí,

u kterého nejsou začátky a konce jednotlivých fází vyvedeny na zvláštní svorky, se zkouší jako celek, jehož vývody jsou navzájem vodivě spojeny [2, 17, 20].



Obr. 2.3 *Zapojení při zkoušce statorového vinutí stejnosměrným napětím, převzato z [2]*

2.3 Zkouška statorového vinutí napětím velmi nízkého kmitočtu

2.3.1 Princip metody

Zkouška napětím velmi nízkého kmitočtu se svým charakterem blíží zkoušce napětím průmyslového kmitočtu, ale má jisté odlišnosti. Při napěťové zkoušce s kmitočtem 0,1 Hz nedochází k zjistitelné degradaci dielektrika ani při častém opakování zkoušky. Příkon zkušebního zdroje se zmenšuje s kmitočtem lineárně, ale zdroj s kmitočtem 0,1 Hz je technicky značně náročný. Rozložení napětí na jednotlivých vrstvách izolace je obvykle shodné jako při provozním namáhání (je-li odpor jednotlivých vrstev dostatečně velký), avšak rozložení napětí na polovodivých nátěrech u výstupu tyčí z drážek je zcela odlišné. Tyto důvody způsobují, že zkoušky napětím s kmitočtem 0,1 Hz se téměř nevyužívají [1, 2, 21].

2.3.2 Podmínky měření

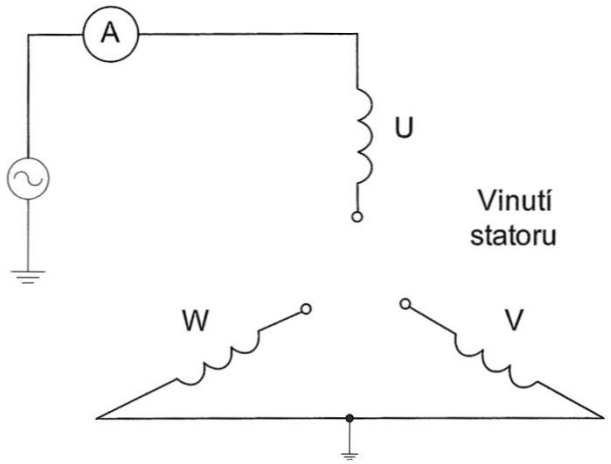
Podmínky měření jsou shodné jako u zkoušky se stejnosměrným napětím uvedené výše v kapitole **2.2.3**

2.3.3 Doporučené přístroje

- Střídavý vn zdroj potřebného výkonu s kmitočtem 0,1 Hz
- Přístroje pro měření proudu a napětí s třídou přesnosti min. 0,5

2.3.4 Postup měření

Zkouška se provádí na každé fázi samostatně. Jeden vývod vinutí se připojí na vývod zkušebního vn zdroje. U zbývajících fází se oba konce vodivě spojí s kostrou stroje a se zemí Obr. 2.4. Několikafázové vinutí, u kterého nejsou začátky a konce jednotlivých fází vyvedeny na zvláštní svorky, se zkouší jako celek, jehož vývody jsou navzájem vodivě spojeny. Zdroj vn připojíme na měřenou fázi společně s voltmetrem. Napětí se plynule zvyšuje konstantní rychlostí do požadované hodnoty zkušebního napětí. Na této napěťové hladině se setrvá 10 minut a poté se napětí pozvolna snižuje na nulu. Vrcholová hodnota zkušebního napětí o kmitočtu 0,1 Hz je 1,63 nebo 1,15x$\sqrt{2}$ násobkem efektivní hodnoty zkušebního napětí o kmitočtu 50 Hz [2, 17, 21].



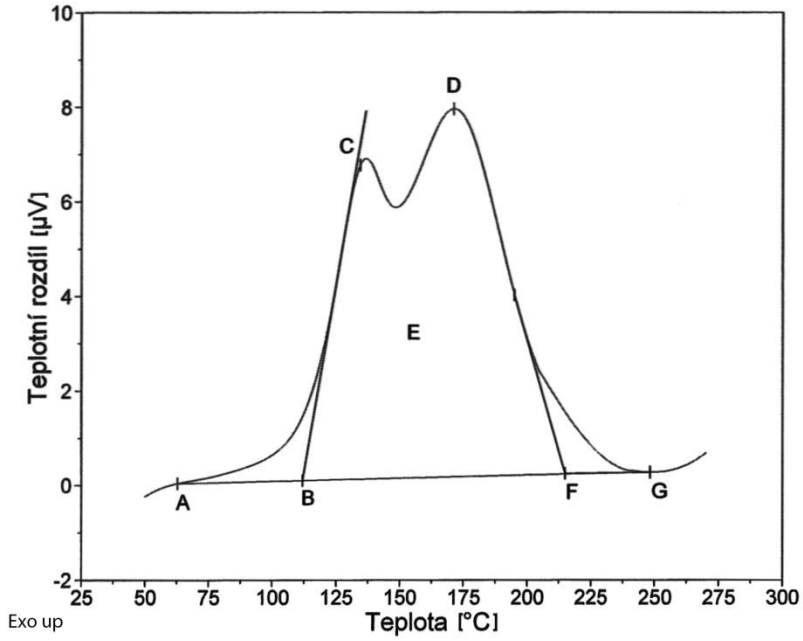
Obr. 2.4 *Zapojení při zkoušce statorového vinutí napětím velmi nízkého kmitočtu, převzato z [2]*

2.4 Diferenční termická analýza (DTA)

2.4.1 Princip metody

Diferenční termická analýza (*Differential Thermal Analysis*) je technika, která měří teplotní rozdíl mezi látkou a tzv. teplotně inertním s11ardem (většinou oxid hlinitý) jako funkci teploty, přičemž zkoumaná látka i inertní s11ard jsou podrobeny řízenému teplotnímu programu. DTA patří mezi nejstarší metody termické analýzy, umožňuje zjišťovat entalpické změny, jimiž se projevují reakce probíhající při zkoušce ve zkoumaném materiálu. Děje se tak průběžným záznamem teploty, která je pří zkoušce měněna ve zvoleném režimu a diferencí teplot na teplotně inertním s11ardu a zkoumaném vzorku. Získaný termogram – závislost rozdílu termonapětí [μV] vzorku a s11ardu na čase zkoušky vykazuje lokální

extrémy (píky), odpovídající probíhajícím reakcím. O mohutnosti reakce vypovídá plocha píku. Lokální maxima termogramu odpovídají exotermním (uvolnění tepla) a minima endotermním (dodání tepla) reakcím. Příklad termogramu na *Obr. 2.5.* Teplota odklonu termogramu od nulové linie (A), teplota počátku reakce (B), dvě maxima reakce (C) a (D). plocha píku (E), teplota ukončení reakce (F) [2, 21].



Obr. 2.5 Ukázka vyhodnocení píku vytvrzovací reakce reaktoplastické pryskyřice, převzato z [2]

2.4.2 Podmínky měření

Jelikož se z hlediska odběru vzorků jedná o destruktivní metodu, lze DTA aplikovat jen v případě, že můžeme ze stroje odebrat experimentální materiál, např. podklínové podložky nebo izolaci z vyměňované tyče, ze vzorků můžeme posuzovat stav zbývajícího izolačního systému. Získané informace jsou důležité pro možnost posouzení daného ale i jiných strojů včetně jejich prognózy [21].

2.4.3 Postup měření

Vzhledem k tomu, že malé částice reagují ochotněji než velké, upravuje se vzorek rozpráškováním na maximální zrnění 0,114 mm. Udusání vzorku a s11ardu v měrných celách je nutno provádět shodným způsobem. Doporučená rychlost ohřevu je 5 ºC/min. Pro zvýraznění dominantních reakcí lze doporučit provádění DTA v dynamické kyslíkové atmosféře s průtočným množstvím 50 ml/min. Jako inertní s11ard lze použít oxid hlinitý

vyžíhaný při teplotě 1000 ºC. Výsledkem DTA je záznam s charakteristickými lokálními extrémy, které odpovídají reakcím probíhajícím při analýze [21].

2.5 Indikace ozónu v chladícím vzduchu

2.5.1 Princip metody

Ozón (O_3) vzniká jako produkt reakce vzdušného kyslíku s kyslíkovým radikálem ve vysokoenergetických dějích (ionizačních procesech). Jeho přítomnost v chladícím vzduchu indikuje existenci částečných výbojů nebo jiné místní teplotní namáhání izolace, při které dochází k ionizaci vzduchu. Diagnostický význam má hlavně kvalitativní důkaz přítomnosti ozónu. Význam kvantitativního stanovení je ovlivněn průtočným chlazením, kdy chladící vzduch snižuje koncentraci ozónu, takže jeho množství za provozu kolísá. Při zachování stejných odběrových podmínek, shodného místa a dostatečné množství odebraného vzduchu lez toto dostatečně eliminovat a získat tak reprodukovatelné naměřené hodnoty. Velké výhody tohoto měření spočívají v jednoduchosti, měřit lze za normálního provozu stroje spojených s nízkými náklady. Při pravidelném sledování koncentrace ozónu je možno detekovat výbojovou činnost již v počátečních stádiích, kdy ještě nedochází k většímu poškození izolace [2, 21].

2.5.2 Podmínky měření

Ozón je nestabilní, silně agresivní plyn, který ochotně reaguje prakticky se všemi dostupnými materiály. Pro odběrovou část je nejvhodnější použít sklo a co nejvíce zkrátit vzdálenost místa odběru vzduchu k místu detekce ozónu v měřicím zařízení. Doporučuje se měřit na stroji, který je v provozu nejméně 24 hod na jmenovitém výkonu [21].

2.5.3 Doporučené přístroje

Existuje několik způsobů měření koncentrace ozónu ve vzduchu. Liší se způsobem detekce, citlivostí měření a možností aplikace. Nejčastěji využívané metody jsou:

a) Kolorimetrická – metoda založená na absorpci a reakci ozónu v chloroformovém indikačním roztoku, kdy dochází k odbarvování modrého roztoku indiga *(Obr. 2.6.)*.

- Odběrová skleněná trubička
- Promývačka s fritou
- Indikační roztok na bázi indiga
- Teploměr

- Plynoměr
- Vzduchové čerpadlo
- Laboratorní kolorimetr

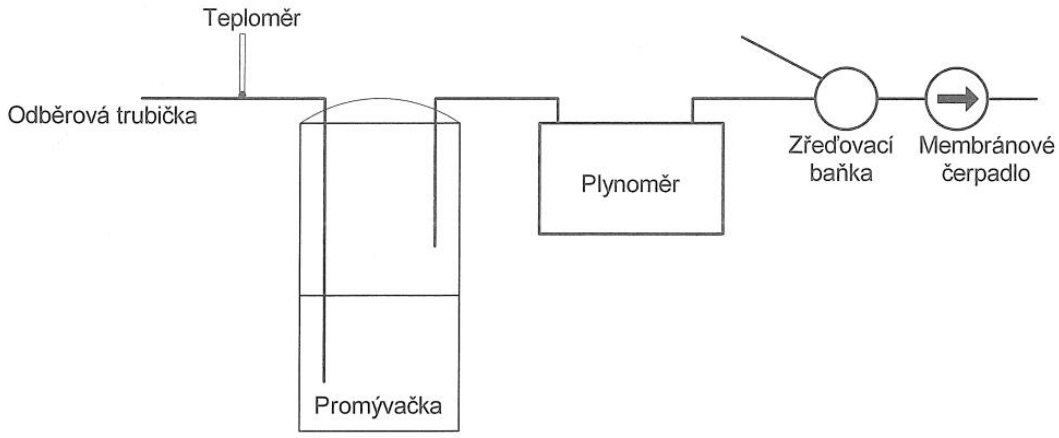
b) Fotometrická – metoda založená na schopnosti ozónu absorbovat UV záření.
- Ultrafialový absorpční analyzátor

c) Elektrochemická - Metoda je založena na reakci ozónu s roztokem alkalického jodidu, při které se z jodidu vyloučí jod. Vyloučený jod zbarví roztok žlutě až hnědě.
- Měřicí přístroj ozónu

[2, 21 , 22]

2.5.4 Postup měření

Vlastní měření probíhá na běžícím stroji. Odběr vzorku chladícího vzduchu se provádí z prostoru statorového vinutí. Nejvhodnější je místo které je co nejblíže vzniku výbojové činnosti. Během měření se odebírá chladící vzduch, který prochází před detekční zařízení, které detekuje celkové množství ozónu, ne jeho koncentraci. Při měření je třeba přesně měřit množství vzduchu, které prošlo přes detekční zařízení. Doporučuje se 100 až 200 l. Výsledky měření jsou udávány jako koncentrace ozónu vyjádřená v ppm, přepočtená na normálové podmínky. Z toho důvodu je třeba měřit teplotu měřeného vzduchu a tlak v okolí. Nedílnou součástí měření je kalibrace měřicí aparatury [21].



Obr. 2.6 Měřicí kolona, převzato z [2]

2.6 Frekvenční analýza proudu a rozptylového magnetického pole

2.6.1 Princip metody

Tato metoda je určena pro diagnostiku asynchronních a synchronních strojů s asynchronním rozběhem. Jakákoliv porucha nebo nesymetrie v elektrickém či magnetickém obvodu asynchronního stroje způsobí vznik přídavných magnetických polí ve vzduchové mezeře. Rychlost otáčení těchto polí je odlišná od synchronní rychlosti. Vzniká tím nerovnovážný systém, který lze rozložit na symetrický systém sousledný, zpětný a nulový. Rozborem lze zjistit, že se v statorovém proudu a rozptylovém magnetickém poli objeví přídavné frekvenční složky v okolí první harmonické a otáčkových frekvencí – postranní frekvenční pásma. Velikost amplitudy těchto frekvencí je přímo úměrná míře nesymetrie a jejich charakter závisí na příčině poruchy (mechanické závady, špatné ustavení, elektrická závada rotoru) [2, 21].

2.6.2 Podmínky měření

Měření se provádí za chodu stroje při zatížení bez zásahu do obvodu. U vn strojů se měření provádí v sekundárních obvodech měřicích transformátorů proudu. Při měření je nutno odstranit přídavné kryty stroje [2, 21].

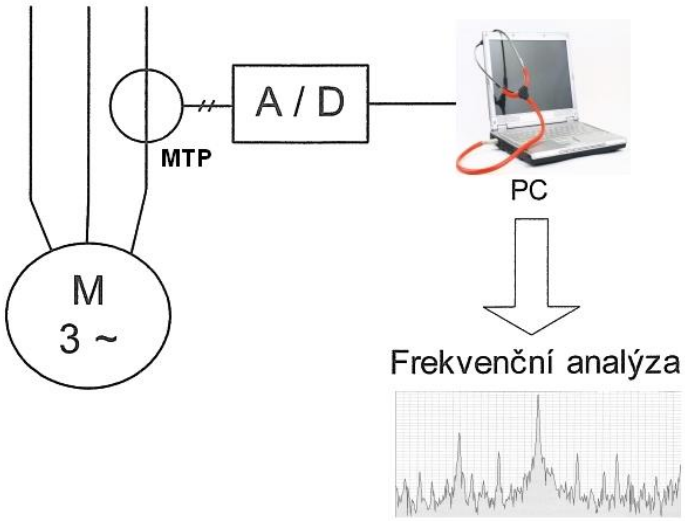
2.6.3 Doporučené přístroje

- Proudové čidlo s napěťovým výstupem, např. klešťový ampérmetr s výstupem a snímacím odporem nebo proudová sonda k osciloskopu
- Snímací cívka pro měření rozptylového pole
- Frekvenční analyzátor nebo A/D převodník vybavený softwarem umožňující záznam a frekvenční analýzu průběhu proudu

[21]

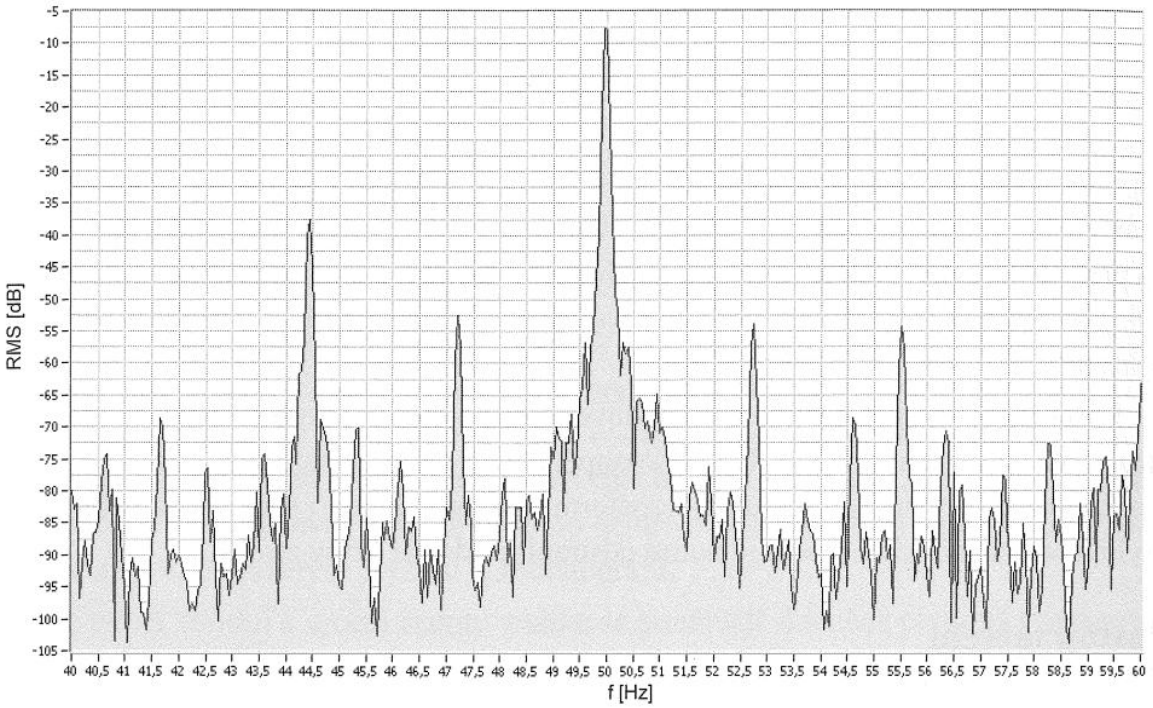
2.6.4 Postup měření

Za chodu stroje při zatížení se provede záznam a analýza průběhu napájecího proudu připojením měřicího transformátoru proudu na zkoumanou fázi stroje podle schématu na *Obr. 2.7* [2, 21].



Obr. 2.7 Schéma zapojení pro frekvenční analýzu proudu, překresleno z [2]

MTP - měřicí transformátor proudu
A/D - analogově číslicový převodník
PC - počítač vybavený softwarem pro frekvenční analýzu



Obr. 2.8 Spektrum rozptylového magnetického pole rotoru s vadným vinutím, převzato z [2]

2.7 Měření hluku.

2.7.1 Princip metody

Provoz elektrických strojů je doprovázen hlukem způsobeným různými částmi a systémy stroje. U točivých elektrických strojů jsou dominantní tři skupiny hluku. Hluk elektromagnetického původu, hluk mechanického původu a hluk ventilačního původu. Příčinou elektromagnetického hluku je chvění kostry, popř. jiných částí stroje způsobené elektromagnetickými silami nebo magnetostrikce (změna rozměrů tělesa z feromagnetického materiálu při zmagnetování) magnetického obvodu. Hluk mechanického původu má smíšený charakter. Jedná se o hluk způsobený ložisky nebo nevyvážení, rotujících částí stroje, Hluk ventilační způsobuje především ventilátor a jeho nejbližší okolí. Úkolem diagnostického měření hluku elektrických strojů je stanovit změny mechanického stavu jádra stroje, popř. jeho části. Měření je možné použít i pro diagnostiku stavu valivých ložisek všech točivých strojů [2, 21].

2.7.2 Podmínky měření

Měření se provádí na trvale instalovaném stroji při chodu s jmenovitým zatížením a jmenovitých otáčkách. Při opakovaném měření musí být kromě zatížení stejná i teplota stroje [21].

2.7.3 Doporučené přístroje

- Zvukoměr třídy 1
- Záznamové zařízení
- Frekvenční analyzátor
- Teploměr pro měření teploty ve stroji

[21]

2.7.4 Postup měření

V blízkosti stroje se zvolí síť měřicích bodů, kde se umístí mikrofon a zaznamenává se celková hladina akustického tlaku a časový průběh akustického tlaku. Vhodné je provádět měření na stejných místech, tak jak bylo prováděno měření předchozí, při stejném zatížení stroje. Z naměřených hodnot se sestaví spektogramy. Ty se analyzují a porovnávají s předchozím měřením [21].

3 Vliv diagnostiky na životnost točivých strojů, nalezení a odstranění potenciálních závad

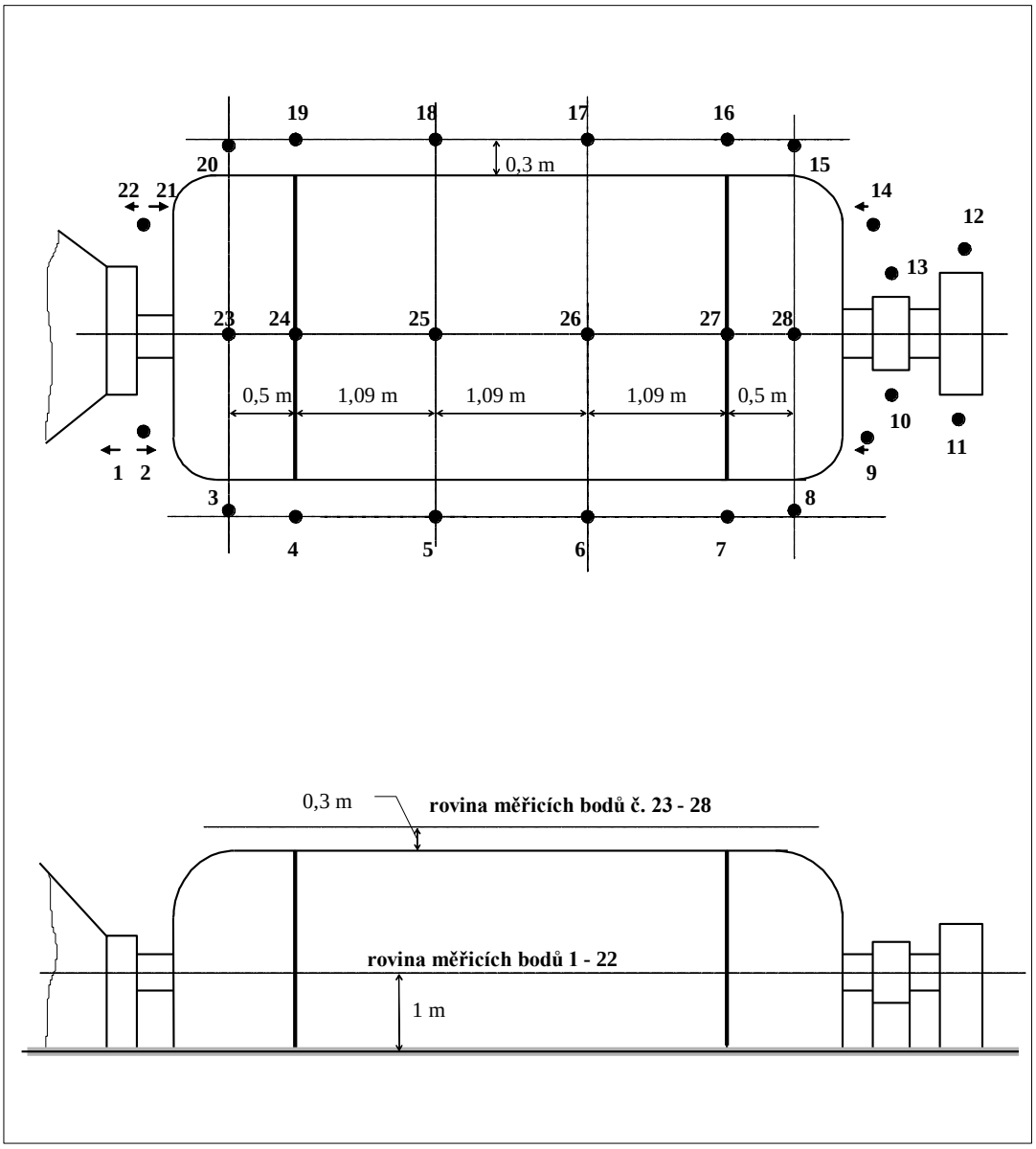
Hlavní úlohou diagnostiky je včasné odhalení potenciální závady a tím i zajištění dlouhodobého bezporuchového provozu stroje. Další využití diagnostiky spočívá ve stanovení prognózy životnosti daného zařízení, která umožní nalezení způsobů či potřebných investic do zařízení, které je na hranici životnosti s dostatečným časovým předstihem. Pro skutečné využití diagnostického měření uvádím zajímavý příklad z místa mého pracoviště, elektrárně Tisová.

3.1 Diagnostika generátoru TG 2 v ETI

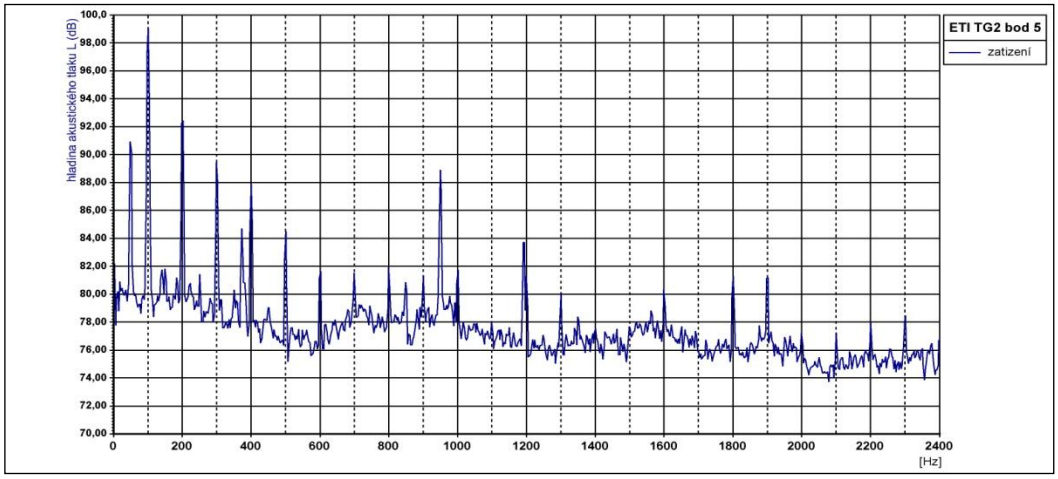
U TG provozovaných v ETI se provádí pravidelná diagnostika v intervalech cca 2 – 3 roky. Dne 28.6.2005 bylo v elektrárně Tisová uskutečněno opětovné měření hluku generátoru TG2 s parametry: $P_č$ = 57 MW, P_j = 71,25 MVA, U_1 = 10,5 kV, I_1 = 3918 A, U_b = 80 - 339 V, I_b = 225 - 695 A. Otáčky stroje n = 3000 ot./ min. Toto diagnostické měření hluku navazovalo na měření konané dne 28.6. 2002, kdy z výsledků měření bylo podezření na uvolněné jádro statoru, popřípadě čelní partie vinutí. Úkolem měření bylo posoudit mechanický stav konstrukce magnetického jádra generátoru v době měření.

3.2 Popis měření hluku

Cíl byl stejný jako při minulých měřeních, t.j. ve zvolených měřicích bodech určit velikost hladin akustického tlaku hluku stroje a jeho frekvenční analýzu. Měřicí byly v tomto a ve všech následných měřeních vždy stejné. Z eventuálně vzniklých změn hladin akustického tlaku a jejich frekvenčních složek, vyskytujících se ve spektrogramech zjištěných v dalších měřeních, lze usuzovat na změnu mechanického stavu magnetického jádra statoru (uvolnění plechů magnetického jádra statoru, porucha stahovací kostry a pod.). Zvolená síť měřicích bodů měla 28 měřicích bodů a jejich rozmístění je znázorněno na Obr. 3.1. Celé měření mohlo být uskutečněno pouze za chodu generátoru při zatížení. Parametry v době měření byly následující: P = 40,0 MW, Q = 8,9 MVAr, U1 = 10,8 kV, I1 = 2,2 kA, n = 3000 ot./ min. Výkon generátoru byl o 10 MW nižší než při minulém měření (požadavek na toto diagnostické měření je stejný výkon při všech měřeních). Ukázka frekvenčního spektra získaného z měřicího bodu č. 5 je na Obr. 3.2 [23].



Obr. 3.1 *Rozmístění měřicích bodu, převzato z [23]*



Obr. 3.2 Frekvenční spektrum , bod č.5, převzato z [23]

3.3 Zhodnocení výsledků měření hluku

Naměřené hodnoty střední hladiny akustického tlaku byly nižší než při minulém měření, ale vzhledem k tomu, že při tomto měření pracoval generátor pouze na výkonu 40 MW a při minulém měření na výkonu P = 50 MW bylo možné považovat hodnoty středních hladin akustického tlaku za odpovídající minulému měření. Také při tomto měření vykazovala střední hladina akustického tlaku na straně měřicích bodů č.3 – 8 větší hodnoty než na straně měřicích bodů č.15 – 20. Na rozdíl od minulého měření bylo možno předpokládat poněkud větší uvolnění čel vinutí statoru, zvláště pak na straně turbíny. Tento jev však nešlo posoudit v plné míře, protože při tomto měření pracoval stroj při výrazně nižším výkonu a bylo doporučeno opakování měření vždy se stejným výkonem [23].

3.4 Odstávka stroje do GO

Po více jak 3 letech provozu byl generátor TG2 5.8.2008 odstaven do generální opravy. Jelikož výsledky z minulých měření vedly k po2ření na uvolněné jádro statoru nebo čela vinutí, byl ze stroje vyjmut rotor z důvodu konání vizuální kontroly a provedení dalších diagnostik. Při vizuální kontrole generátoru TG2 konané 11.8.2008 bylo zjištěno vážné poškození magnetického obvodu statoru. Uvolněné zuby železa od středu vývrtu a vlivem vzniklých vibrací postupné ubroušení klínů ventilačních kanálů vyvolávající následné poškození (uvolnění dalších paketů železa) viz *Obr. 3.3.*

Obr. 3.3 TG2 - chybějící boční klíny, převzato z [24]

Dále bylo zjištěno, že na některých místech statoru jsou vypadané drážkové klíny. V těchto místech je v drážkách vidět boční klínovaní *Obr. 3.4* a *Obr. 3.5*.

Obr. 3.4 TG2 – vypadané drážkové klíny, převzato z [24]

Obr. 3.5 TG2 – vypadané drážkové klíny, převzato z [24]

3.5 Vyhodnocení prohlídky

Stator generátoru TG2 je v havarijním stavu a pro další provoz by bylo nutné kompletní překlínování, oprava bočního klínování, kontrola stavu statorového vinutí v drážce (boční klínování). Jelikož je magnetický obvod zcela uvolněn, oprava by byla velmi náročná. Znamenala by minimálně vyklínování vinutí, odfrézování stahovacích desek a přeložení magnetického obvodu [24].

3.6 Oprava

Jelikož oprava stávajícího statoru by byla finančně velmi náročná, byla zvolena jiná varianta opravy. Z důvodu útlumu výroby na ETI byl před 10 lety z provozu vyřazen generátor TG4 se shodnými parametry. Diagnostické měření na něm prováděné v roce 2004 vykázalo vyhovující stav pro provoz. Před uvedením do provozu se na náhradním statoru provedlo vyčištění statoru a oprava klínování v rozsahu cca 10%. Po opravě byla provedena napěťová a magnetizační zkouška. Obě měření nevykázaly závady a TG2 byl uveden do provozu, ve kterém je i v současnosti, v r. 2013.

Závěr

V bakalářské práci jsou blíže popsány základní měřicí metody používané pro Malou a Velkou diagnostiku velkých točivých strojů. Zásadní význam pro provoz mají elektroizolační materiály, kdy jejich degradace může vést od k poškození stroje až po jeho havárii a s tím spojené náklady jak na opravu, tak i na prostoji zařízení.Vzhledem k složité konstrukci strojů a množství používaných materiálů je výhodné provést více druhů měření, které nám blíže specifikují stav zařízení. Jelikož jsou tato zařízení jsou velmi nákladná a včasné odhalení případné závady již v jejím zárodku může znamenat velký přínos pro provozovatele je výhodné dlouhodobě monitorovat stav zařízení, kdy vybočení naměřených hodnot z normálu nebo předpokládaných hodnot může předznamenávat blížící se problém. Velký přínos v diagnostice přináší nasazení moderních technologií, kdy je možné sledovat stav „online“a ktuální hodnoty mohou být archivovány a následně použity pro analýzu případné poruchy. Jako příklad využití diagnostiky jsem si zvolil událost z elektrárny Tisová, kdy původní odhad lehké závady na statoru se projevil jako havarijní a vedl až k jeho výměně.

Seznam literatury a informačních zdrojů

[1] BARTÁK, A., MRAVINÁČ, L., NEUMANN, J., VAŘÁK, J., *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*.1. vyd. Praha.SNTL, 1984. 256 s.

[2] MENTLÍK, V., PIHERA, J., POLANSKÝ, J., PROSR, P., TRNKA, P., *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha. BEN – technická literatura, 2008. 439 stran. ISBN 978-80-7300-232-9.

[3] MENTLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha. BEN – technická literatura, 2006, 240 stran. ISBN 80-7300-189-6.

[4] *Monitorování izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu statorového vinutí*, ČEZ,TP, 2013

[5] Měření izolačních odporů. Dostupné 1.2.2013 z WWW: http://www.megohmmeterstore.com/content/aemc-unders11ing-insulation-resistance-testing.html

[6] Měření izolačních odporů. Dostupné 1.2.2013z WWW: http://WWW.PROREVIZE.CZ/MERENI-IZOLACNICH-PRECHODOVYCH-ZEMNICH-ODPORU/35-MEGGER-5-A-10-KV-MODELY-MI-IZOLANICH-ODPOR

[7] Měřiče izolačních odporů. Dostupné 1.2.2013z WWW: http://www.encentrum.cz/produkty/energetika-elektrotechnika-elektrostatika/megger/megger-renomovane-merice-izolacnich-odporu/

[8] ELEKTRO, odborný časopis pro elektrotechniku. Dostupné1.4.2013 z WWW: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=39496

[9] *Monitorování izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu rotorového vinutí,* ČEZ,TP, 2013

[10] *Monitorování napěťové závislosti izolačního odporu na DC,* ČEZ,TP, 2013

[11] *Monitorování ztrátového činitele tg δ, kapacity a výpočet časové konstanty* ČEZ,TP, 2013

[12] Měření ztrátového činitele. Dostupné 1.3.2013 z WWW: http://www.hvinc.com/

[13] *Monitorování částečných výbojů statorového vinutí galvanicky vázanou metodou*, ČEZ,TP, 2013

[14] TRNKA, P., SVOBODA, M,., *Diagnostika výbojové činnosti v širším frekvenčním spektru,* Elektroscope, 2011, Plzeň. Dostupné z WWW: https://OTIK.UK.ZCU.CZ/BITSTREAM/11025/594/1/R5C1C3.PDF

[15] ČSN EN 15 (345641), Technika zkoušek vysokým napětím - měření částečných výbojů, ČSNI, 2001

[16] *Monitorování částečných výbojů statorového vinutí akustickou sondou*, ČEZ,TP, 2013

[17] *Diagnostika izolačních systémů elektrických strojů točivých*, Orgrez a.s., Praha 1996

[18] *Monitorování statorového vinutí střídavým napětím*, ČEZ,TP, 2013

[19] ČSN EN 60060-1, Technika zkoušek vysokým napětím - Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky, ČSNI 1.8.2011

[20] *Monitorování statorového vinutí stejnosměrným napětím*, ČEZ, TP, 2013

[21] *Profylaktika izolačního systému strojů točivých turbogenerátory, hydrogenerátory a vn motory,* ČEZ, PN, 2006

[22] HORVÁTH, M.; BILITZKY, L.; HÜTTNER, J. Ozone. Budapest : Akadémiai Kiadó, 1985. ISBN 9630533588.

[23] MONHART František, Diagnostické měření hluku TG2 v elektrárně Tisová, Protokol o měření č. 40/ 2005 ze dne 10.6. 2005
[24] ŠMRHA, D., Protokol o zkoušce TG2 ze dne 11.8.2005, 1.Servis ENERGO