

Analysis of Partial Discharge Activity for Evaluation of the State of High Power Electric Generators Stator Windings

Dumitrescu Sorin
INCDE ICEMENERG, Bucharest

Abstract. The paper shows the importance of trending of partial discharge activity in assessing the insulation condition. It is presented the principle of the measurement method and the quantities that characterize partial discharges and also the criteria utilized for the assesment of the insulation condition of the hydrogenerators. Results of the measurements made on several hydrogenerators are presented, like the variation with time of the two main quantities that characterize the partial discharges, maximum magnitude, Q_m and the normalized quantity, NQN over a period of about 10 years. Further, a classification of the insulation condition by 3 main and 2 intermediary categories and the definition of these categories are given. The criteria used for the assessment of the insulation condition are presented in the form of a table: quantitative criteria by the $\pm NQN$ and $\pm Q_m$ values and qualitative criteria for the analysis of the 2D and 3D diagrams. At the end of each set of measurements, an analyze of the insulation condition annual evaluation is made, also a verdict is put, and of course, the recommendations made relating to the maintenance and the decisions that have been taken. The paper ends with several considerations on the method of on-line partial discharges and especially, on the conditions for valid trending activity in time.

Keywords: partial discharges, measurement method, hydrogenerators, stator insulation, condition, evaluation, trending, maintenance.

Evoluția activității descărcărilor parțiale ca mijloc pentru evaluarea stării înfășurărilor statorice ale generatoarelor electrice de mare putere

Dumitrescu Sorin
INCDE ICEMENERG, București, România

Rezumat. Lucrarea prezintă importanța cunoașterii evoluției activității descărcărilor parțiale pentru evaluarea stării izolației. Este prezentat principiul metodei de măsurare și a mărimilor care caracterizează descărcările parțiale, precum și criteriile utilizate pentru evaluarea stării izolației generatoarelor hidro. Rezultatele măsurărilor efectuate pe mai multe hidrogeneratoare sunt prezentate, cum ar fi variația în timp a celor două mărimi principale ce caracterizează descărcările parțiale, amplitudinea maximă, Q_m și cantitatea normalizată, NQN pe o perioadă de aproximativ 10 ani. În plus, o clasificare a stării izolației în 3 categorii principale și 2 intermediare cu definirea acestor categorii, sunt date. Criteriile utilizate pentru evaluarea stării izolației sunt prezentate sub forma unui tabel: criterii cantitative de $\pm NQN$ și \pm valori Q_m și criterii calitative pentru analiza diagramelor 2D și 3D. La sfârșitul fiecărui set de măsurări, se face o analiză a stării izolației, o evaluarea anuală, de asemenea, un verdict este pus, și desigur, recomandările făcute cu privire la întreținere și deciziile care au fost luate. Lucrarea se încheie cu câteva considerații privind metoda descărcărilor parțiale on-line și, mai ales, condițiile de măsurare pentru care evoluția descărcărilor parțiale prezintă importanță și valoare.

Cuvinte-cheie: descărcări parțiale, hidrogeneratoare, starea izolației statorice, evaluare, trend, întreținere, activitate, evoluție.

Анализ процесса развития частичных разрядов как средства для оценки состояния статорных обмоток электрогенераторов большой мощности

Думитреску Сорин
Научно-исследовательский институт в области энергетики,
Бухарест, Румыния

Аннотация. В статье представлены важность деятельности в области развития знаний о частичных разрядах для оценки сопротивления изоляции. Представлен принцип методики измерения величин, характеризующих частичные разряды, а также и критерии, используемые для оценки состояния сопротивления изоляции гидрогенераторов. Представлены результаты измерений, выполненных на нескольких гидрогенераторах, например, изменение во времени двух основных величин, которые характеризуют частичные разряды, величина максимальной амплитуды Q_m и нормализованная величина NQN в течение, приблизительно, 10 лет. Кроме того, приведена классификация изоляции трех основных категорий и двух промежуточных. Критерии, используемые для измерения сопротивления изоляции представлены в виде таблицы: количественные критерии $\pm NQN$ и $\pm Q_m$ и качественные критерии для анализа 2D и 3D графики. В конце каждого набора измерений, проводится анализ состояния изоляции: годовая оценка и выносятся рекомендации и решения по техническому обслуживанию. В заключение в

работе делается вывод о методе частичных разрядов в on-line в Интернете и, в частности, условия измерения, для которых изменение частичных разрядов имеет значение.

Ключевые слова: частичные разряды, гидрогенераторы, состояние изоляции статора, оценка, тренд, поддержание состояния, действие, развитие.

I. INTRODUCERE

În anul 1999, în România au fost montați cupluri capacitivi de tip IRIS la 40 de hidrogenatoare cu puteri cuprinse între 27 MW și 165,5 MW. Începând cu anul 1999, măsurătorile au fost efectuate de către diferite firme și de către 2 centrale hidroelectrice. Nu există măsurători sistematice care să fi fost efectuate pentru toate cele 40 de hidrogenatoare. INCDE ICEMENERG a inițiat evaluarea periodică, în fiecare an sau o dată la doi ani, la 24 de hidrogenatoare. În același timp, a reușit să recupereze arhiva rapoartelor de măsurare a 13 hidrogenatoare. Dintre acestea 3 generatoare mai semnificative hidro sunt prezentate în acest articol. Astfel, pentru fiecare hidrogenator sunt date diagrame de variație a parametrilor descărcărilor parțiale (DP), anume $\pm NQN$ și $\pm Qm$, în timp, pe perioade de aproximativ 10 ani și sunt prezentate diagrame 2D și 3D. În plus, pentru fiecare hidro generator analizat sunt prezentate analiza rezultatelor măsurătorilor, clasificarea stării izolației; Sunt prezentate observații cu privire la corelația dintre rezultatele obținute și lucrările de întreținere și recomandările de întreținere și măsurări.

În lucrare sunt prezentate măsurătorile și analizele făcute pe 3 hidrogenatoare, anume:

- HG2 CHE Mărișelu, 75 MW, 15,75 kV (12 măsurători anuale), cat. II-III, propuneri de întreținere, continuarea măsurărilor PD, teste suplimentare;
- HG4 CHE Vidraru, 55 MW, 10,5 kV (11 măsurători anuale), cat. II, continuarea măsurărilor PD, teste suplimentare;
- HG2 CHE Remeți, 45 MW, 10,5 kV (9 măsurări anuale) cat. II-III, propunerile de întreținere, continuarea măsurării PD, teste suplimentare.

Izolația înfășurărilor statorice ale tuturor acestor generatoare este de tip mica-epoxi. Generatorul electric este o componentă esențială a unei centrale hidroelectrice. O defecțiune a statorului generatorului hidro poate duce la o întrerupere de funcționare extinsă și reparații extinse și costisitoare. Defectarea prematură a mașinilor electrice este în mare parte cauzată de deteriorare a sistemelor de izolație, datorită acțiunii permanente sau accidentale a solicitărilor

termice, electrice, mecanice, de mediu etc.[1] [2] [3] (tabelul I).

Tabel I.

Deteriorări la generatoare [1]

| Tipul deteriorării | Procentul |
|------------------------|-----------|
| Deteriorarea izolației | 56% |
| Deteriorare mecanică | 24% |
| Deteriorare termică | 17% |
| Deteriorarea lagărelor | 3% |

Evaluarea stării de izolație a hidrogenatoarelor este cheia pentru estimarea corectă a duratei de viață economică și riscul potențial de defect, precum și pentru a evalua beneficiile și costul generatorului pentru o eventuală modernizare[4]. Pentru orice generator hidro este necesar să se analizeze parametrii care ar trebui investigați pentru evaluarea stării cantitative și cele care sunt mai importante decât altele. Dintre toate componentele generatorului, statorul este partea cea mai critică din cauza nivelului ridicat al câmpului electric comparativ cu rotorul, dar și din pricina vibrațiilor și temperaturilor, deloc de neglijat.

II. DESCĂRCĂRILE PARTIALE

Descărcările parțiale (PD) sunt mici descărcări electrice nedisruptive, care au loc în microcavitățile existente în izolație. Descărcările sunt parțiale datorită faptului că, în serie cu cavitatea micro, unde au loc descărcări, există, de asemenea, o zonă cu izolație solidă.

Pulsurile descărcărilor parțiale sunt fenomene foarte rapide, care durează doar câteva nanosecunde. Izolațiile, în special cele stratificate, nu pot fi considerate ca fiind perfect omogene. Există întotdeauna dimensiuni mici, microcavități, umplute cu gaz rezultat din diferitele contracții ale constituenților izolației sau chiar din procesul tehnologic de execuție în sine. Apariția unor astfel de microcavități și fisuri este favorizată de acțiunea intermitentă a solicitărilor termice și mecanice la care izolația este supusă în timpul funcționării, precum și la acțiunea factorilor poluanți (umiditate, praf, ulei) din mediul înconjurător.

În condițiile existenței unui câmp electric, aceste microcavități se ionizează și, atunci când tensiunea între două suprafețe opuse se atinge un gradient disruptiv al gazelor conținute în

microcavitati, descărcările parțiale (ionizări) apar. Apariția și dezvoltarea de descărcări parțiale interne are un impact negativ asupra izolației, ceea ce duce la formarea de micro- cavități care cresc cu timpul, formând canale atunci când mai multe astfel de cavități se unesc, și în cele din urmă rezultând crater. Astfel, izolația este slăbită și se pot produce găuri care compromit izolația.

Descărcările parțiale sunt măsurate, detectate, ca pulsuri de tensiune, astfel în timpul alternanței pozitive a formei curbei tensiunii, se formează pulsuri orientate către în jos (Fig. 1). Aceste pulsuri sunt numite descărcări parțiale de polaritate negativă și au loc în primul sfert al perioadei formei de undă sinusoidale, în momentul creșterii amplitudinii alternanței pozitive a tensiunii aplicate cavității. Similar, în timpul celui de-al treilea sfert al perioadei, apar pulsuri pozitive, orientate către în sus. Aceste pulsuri sunt numite descărcări parțiale de polaritate pozitivă și apar în timpul creșterii alternanței negative.

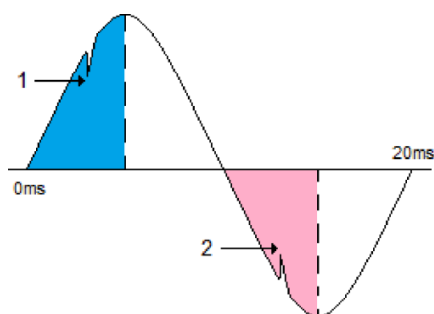


Fig. 1. Reprezentare pulsurilor negative și pozitive [11]: 1- puls negativ pe alternanță pozitivă a primului sfert al unei perioade de 20 ms; 2- puls pozitiv pe alternanță negativă al celui de-al treilea sfert al unei perioade de 20 ms.

Ori de câte ori are loc o degradare în sistemul de izolație, cauzată de condițiile termice, electrice, mecanice sau ambientale, aceasta este, în general, însoțită de generarea de descărcări parțiale PD [5]. Prezența lor poate indica nu doar stresul electric, dar, de asemenea, solicitările termice, mecanice sau ambientale. De exemplu, în sistemul de izolație a mașinilor rotative de înaltă tensiune, golurile sau exfolierile din interiorul izolației cu mică epoxidică poate să apară datorită temperaturii mai mari din timpul funcționării generatorului [6]. Forța mecanică poate cauza vibrația unei bare față de miezul statorului, ceea ce duce la apariția unor descărcări în creștătura, între izolația principală (groundwall) și miez [6]. Contaminarea

suprafeței izolației statorice (a înfășurărilor) conduce la apariția de descărcări de suprafață intense (tracking) [7].

Mai mult decât atât, atunci când se efectuează teste de descărcări parțiale, este important să se știe că un singur set de măsurări pe un generator/mașină oferă informații incomplete despre starea de îmbătrânire efectivă a sistemului de izolație. În consecință, cel mai eficient mod și totodată cel mai fiabil pentru evaluarea stării izolației este acela de a trasa tendința, evoluția activității descărcărilor parțiale de-a lungul timpului, cu măsurări regulate. Analiza evoluției descărcărilor de-a lungul timpului, pentru aceeași mașină electrică, în condiții similare, folosind același echipament de măsurare permite o evaluare clară și de încredere a stării. Este posibilă înregistrarea activității descărcărilor parțiale prin două metode. Cu toate că aceste două metode folosesc același echipament pentru a înregistra activitatea, ele au diferite avantaje. Avantajul măsurărilor on-line [10] este că activitatea este înregistrată cu mașina rotindu-se normal, iar aceasta se confruntă cu toate solicitările de operare: termice, electrice, de mediu și mecanice. În consecință, în cazul în care măsurătoarea este realizată în mod corespunzător, această metodă oferă cea mai mare probabilitate de estimarea corectă a rezultatelor. Metoda on-line de testare a descărcărilor PD oferă următoarele avantaje:

- distribuția tensiunii la bornele înfășurării este corectă;
- măsurările sunt efectuate la temperatura de funcționare și umiditate normale;
- forțele mecanice normale sunt prezente.

Deci, pentru a obține date valide, este important să se asigure că condițiile de funcționare ale mașinii rămân în mod aceleași atunci când testele sunt efectuate, pentru a obține evoluția activității descărcărilor.

Metoda off-line de detectare și măsurare a descărcărilor PD reprezintă un bun complement al celor on-line, chiar dacă are unele dezavantaje majore. De exemplu, este nevoie de o sursă de alimentare separată pentru a alimenta înfășurarea statorică; mașina trebuie să fie disponibilă pentru dezasblare; sau parțial demontată; condițiile de mediu, cum ar fi compoziția gazelor, presiunea și umiditatea sunt diferite de condițiile de funcționare; în particular, temperatura înfășurării este de obicei mai mică decât temperatura de lucru. În plus, aceasta nu poate detecta descărcarea în creștătură sau în bare, deoarece nu

există nici-o forță mecanică care să acționeze în interiorul mașinii.

În general, cele patru surse ale descărcărilor parțiale ale înfășurărilor statorice ale generatoarelor (Fig. 2) sunt [9]:

- descărcări parțiale interne în izolația principală (groundwall);

- descărcările de suprafață din interiorul creștăturilor, dintre bare și miez;
- descărcări parțiale la interfața dintre conductoarele din cupru și izolația conductoarelor elementare sau izolația principală;
- descărcările de suprafață la capetele înfășurărilor.

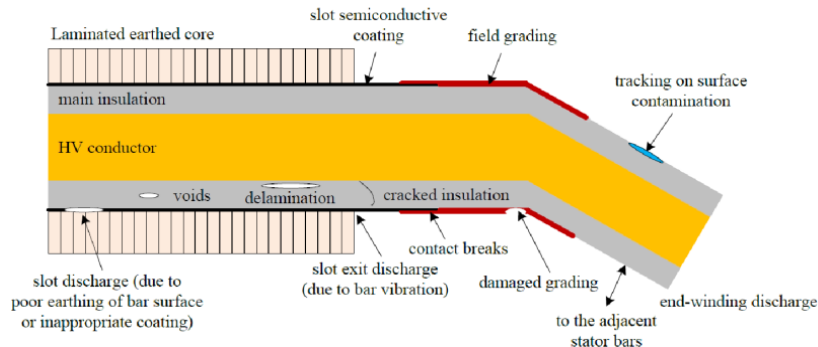


Fig. 2. Sursele descărcărilor parțiale PD din sistemul de izolație al hidrogenatoarelor [1].

III. METODA DE MĂSURARE

Măsurarea (detectarea) on-line a descărcărilor parțiale poate fi realizată numai pe generatoarele echipate anterior cu cupluri, de exemplu cupluri capacitivi. Metoda constă în montarea în prealabilă mai multor cupluri pe terminalele sau pe barele colectoare la ieșirea din statort, apoi scoaterea semnalelor la un bloc terminal, exterior, urmând măsurarea activității PD din timpul funcționării generatorului, cu ajutorul unui analizor conectat la bornele de conectare respective. Cuplurile sunt de obicei izolatoare de tip capacitiv, având o capacitate de aproximativ 80-100 pF cu o funcționare la tensiuni de 25-30 kV.

În funcție de tipul și dimensiunea generatorului și a înfășurării statorului, se folosesc două sisteme de montare a cuplurilor:

- Sistemul de montare diferențial (DIF-PDA) (Fig. 3), cu un cuplor pe fiecare cale de curent electric a fiecărei faze, la aproximativ 1 metru de la punctul de conectare a căilor de curent;
- Sistemul de montare direcțional (DIR-BUS) (Fig. 4 și Fig. 6) cu doi cupluri pe fiecare fază, la aproximativ 2 m unul față de celălalt și de 1 metru de ieșirea din generator.

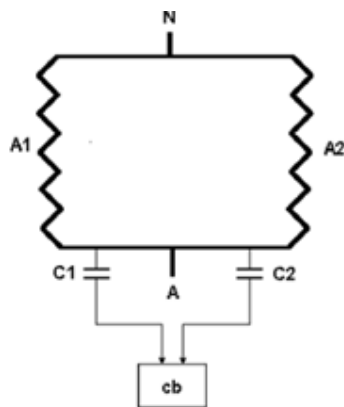


Fig.3. Sistem de montare diferențial DIF (PDA) - două căi de curent electric în paralel cu doi cupluri pentru o fază statorică
-cb = cutie de borne.

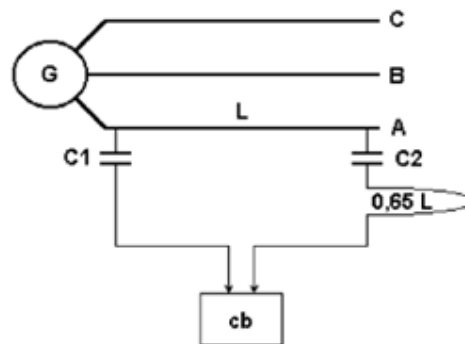


Fig.4. Sistem de montare direcțional DIR(BUS) o cale de curent cu doi cupluri per fază.

Aceste sisteme permit eliminarea zgomotului electric care apare în interiorul și în apropierea mașinii, care interferează cu semnalele utile ale activității descărcărilor parțiale. Este posibilă discriminarea descărcărilor parțiale prin compararea semnalelor de la cele doi cupluri asociați, situați pe două căi de curent electric ale unei faze (pentru sistemul diferențial), sau la ieșirea din aceeași fază (pentru sistemul



Figura 5 Echipament pentru măsurarea activității on-line (Analizor PD, cutie cu terminale, laptop cu software dedicat)

directional) și, ținând cont de diferența de timp de câteva nanosecunde cu care ajung semnalele la analizor, datorită distanței electrice dintre cuplorii asociați se poate obține o filtrare a semnalului util (cel provenit de la mașina de testat). Cuplorii sunt conectați la cutia de borne, la care este cuplat și sistemul de măsurare alcătuit dintr-un analizor de descărcări parțiale cu un laptop, cu software specializat (**Fig. 5**)



Fig. 6 Amplasarea cuplurilor la ieșirea din generator (montaj DIR, se observă pe interior doar un set de 3 cupluri) - CHE Mărișelu

Sistemul de măsură calculează următoarele cantități:

- cantitatea normalizată ("activitatea totală") a PD, notată cu $\pm NQN$, este o mărime relativă exprimată în unități relative (u.r.), corespunzătoare ariei de sub curba numărului de impulsuri funcție de amplitudine (din diagrama 2D) negativă și pozitivă;
- amplitudinea maximă (peak) a PD, notată cu simbolul $\pm Q_m$, care este mărimea corespunzătoare unei rate de 10 impulsuri pe secundă (negative și pozitive), exprimată în mV.

Sistemul de măsurare afișează următoarele diagrame:

- diagrame bidimensionale (2D): numărul de impulsuri pe secundă și fereastră (rata de impulsuri), față de mărimile care definesc ferestrele;
- diagrame tridimensionale (3D): rata impulsurilor pe secundă față de unghiul de fază al tensiunii sinusoidale la care acestea apar și dimensiunea ferestrei în care se măsoară.

Rata impulsurilor - pps (scala verticală în **Fig.7**) indică cât de răspândită este deteriorarea.

Amplitudinea impulsurilor (scala orizontală în **Fig. 7**) - indică cât de mari sunt impulsurile sau cât de aproape este izolația de un defect.

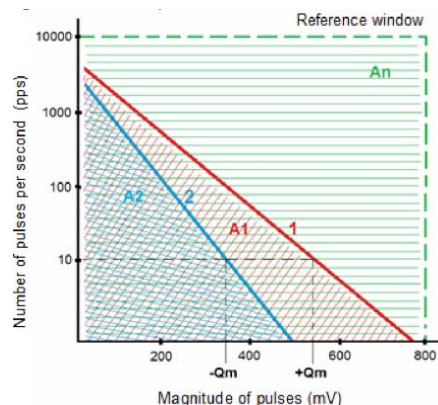


Fig. 7. Definirea principalilor parametri ai descărcărilor parțiale [12]: 1- curba impulsurilor pozitive; 2- curba impulsurilor negative; A1-aria corespunzătoare pulsurilor pozitive; A2-aria corespunzătoare pulsurilor negative; An-aria ferestrei de referință cu 10000 impulsuri pe secunda la 800 mV; + Q_m - amplitudinea maximă a impulsurilor pozitive; - Q_m - amplitudinea maximă a impulsurilor negative.

Pentru evaluarea stării izolației statorice a hidrogenatoarelor sunt folosite câteva reguli

prezentate în [12] și utilizate în cazul de față. (Tabel II)

Valorile limită a amplitudinii maxime Q_m și a cantității normalizate NQN sunt prezentate în

Tabelul III [12]. Acestea sunt stabilite în funcție de nivelul tensiunii nominale al generatoarelor și de starea izolației.

Tabel II

Categoriile ale stării izolației

| Categoria | Descrierea stării | Nivelul de risc |
|-----------|---|-----------------------------|
| I | Stare foarte buna, izolație | Funcționare fără riscuri |
| I - II | Stare acceptabilă, deteriorări | Funcționare fără riscuri |
| II | Deteriorări normale, lente | Risc de străpungere mediu |
| II - III | Deteriorări lente, normale, deteriorări de amploare medie | Risc de străpungere mediu |
| III | Deteriorări severe | Risc crescut de străpungere |

Tabel III

Criterii cantitative [12]

| Categoria | Starea izolației | ± NQN (u.r.) | | ± Q_m (mV) | | |
|-----------|----------------------------|--------------|---------|--------------|---------------------|---------|
| | | <15 kV | > 15 kV | < 7 kV | 10 ¹⁵ kV | > 15 kV |
| I | Bună | <100 | <200 | < 60 | < 170 | <300 |
| II | Deteriorări normale, lente | 100-250 | 200-400 | 60-140 | 170 - 400 | 300-600 |
| III | Deteriorari severe | >250 | >400 | >140 | >400 | >600 |

În tabelul IV sunt prezentate criteriile calitative ce stau la baza aprecierii stării izolației prin analiza diagramelor bi și tridimensionale. [12]

Conform cu [12], amplitudinea maxima Q_m reprezintă gradul de deteriorare al izolației, în cel mai afectat punct, iar cantitatea normalizata NQN este proporțională cu degradarea totală a izolației.

Tabel IV

| Parametrul evaluat | Valoarea evaluată | Starea izolației |
|--|---|--|
| 2. Aspectul curbelor în diagramele 2D | Preponderența polarității pozitive Raportul $R = +Q_{max} / -Q_{max} > 2$ Poziția curbelor + p/sf = f(mV) în conductor de acoperire, $R = 1-2$ cat. I, $R > 2$ cat. II, 2D (curbele + p/sf peste curbele -R >> 2 cat. III p/sf) | DP de suprafață, în zona creștăturii, între izolație și peretele creștăturii datorită deteriorării lacului |
| 3. Prezența DP în diagramele 3D pe sinusoidă | Prezența of pulsurilor negative PD la unghiuri electrice a între 0° și 90°, centrat la 45° | DP de volum din cauza dezlipirilor (goluri) între izolație și conductorul de cupru (efect ciclic) |
| | Prezența of pulsurilor pozitive PD la unghiuri α între 180° și 270°, centrat la 225° | DP de suprafața în zona creștăturilor între izolație și peretele creștăturii din cauza deteriorării lacului semiconductor |
| 4. Aspectul diagramelor 3D și 2D privind DP în zona frontală | În diag. 3D, prezența DP la $\alpha = 15^\circ, 75^\circ, 195^\circ, 255^\circ$ În diag. 2D, cocoase ale curbelor + p/sf = f(mV) la amplitudini înalte și frecvențe ale pulsurilor p/sf joase | DP de suprafața în zona capetelor frontale din cauza depunerilor de praf, ulei, reziduuri, poluanți și/sau din cauza slăbirii consolidării penelor și/sau din cauza deteriorării lacului conductor de la suprafața izolației |
| 5. Creșterea apariției DP în diagramele 3D (p/sf și mV) | 0-20 p/sf | Categoria I - Stare buna |
| | 20-50 p/sf | Categoria II - Deteriorări lente, normale |
| | >50 p/sf | Categoria III - Deteriorări severe |

IV. REZULTATE ȘI DISCUȚII

Cuplorii folosiți pentru măsurările de descărcări parțiale sunt de tip capacitiv, cu $C=80\text{pF}$, $U_{\text{max}}=25\text{kV}$ (IRIS), montate în sistem direcțional DIR [28]. Măsurările au fost efectuate pe trei hidrogenatoare de la diferite centrale electrice, în 3 regimuri de operare stabilizate (1-gol excitat, 2-jumatate din puterea nominala, 3-putere maxima).

1. HG 4, CHE Vidraru

În anii 2003 și 2010, au fost efectuate ample lucrări de întreținere pentru hidrogenatorul nr.4 de la CHE Vidraru: barele statorice au fost înlocuite în 2003 (izolația a fost de aproximativ 24 de ani vechime) și reîmpănate în 2010, fierul statorului a fost reparat iar capetele frontale ale înfășurărilor au fost relăcuite cu lac semiconductor. Măsurătorile de PD, după toate aceste lucrări, au arătat o îmbunătățire evidentă în valorile parametrilor PD: evoluția parametrilor PD a fost crescător monotonă (Fig. 8). Astfel, activitatea totală reprezentată de valorile +NQN, a crescut de la aproximativ 110-250 u.r. (Categorii I-II de severitate) la aproximativ 320 u.r. (Categorie III) iar valorile $\pm Q_m$ de aproximativ 120 mV (categoria I de severitate) la 270 mV (categoria II). După lucrările de întreținere, în 2010, valorile NQN+ scad până la aproximativ 200 u.r. (Categorie II), iar valorile $Q_{m\pm}$ scad înapoi la 120 mV (categoria I).

În Fig. 8 se poate observa că, pentru toate măsurătorile s-au obținut valori cvasi-egale, iar impulsurile pozitive și negative au raportul $+Q_m/-Q_m \approx 1$. Curbele impulsurilor negative și pozitive funcție de amplitudini au aspect de împletire în toate regimurile de funcționare și pentru toate fazele, sau acestea prezintă o ușoară preponderență a impulsurilor de polaritate negativă. Aceasta indică apariția PD de volum în zona dintre creștături din cauza delaminărilor dintre straturi și golurile din izolație, ca urmare a efectului termic, care corespunde categoriei a II-a de stare a izolației.

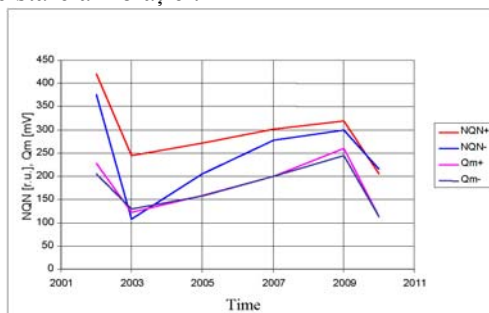


Fig. 8. Evoluția parametrilor DP, NQN și Q_m pentru HG4, faza C, CHE Vidraru.

Apariția unor impulsuri PD negative pe toate fazele în intervalul unghiului $\alpha = 0 - 90^\circ$ a fost observată cu o rată a pulsului (repetarea frecvenței) care variază între 40 și 100 p/sf (pulsuri per secundă și fereastra) (corespunzând categoriei III), dar de amplitudini scăzute. De asemenea, s-au observat pulsuri DP pozitive la $\alpha = 180 - 270^\circ$, cu rate ale pulsurilor de 80100 p/sf (de asemenea, corespunzătoare categoriei III), cu magnitudini reduse. În plus, au fost observate PD în zona frontală, respectiv, la unghiuri $\alpha = 15^\circ, 75^\circ, 195^\circ, 255^\circ$ cu rata pulsurilor de 30-100 p/sf și amplitudini scăzute (categoria III). În urma măsurătorilor efectuate în 2009 au fost recomandate lucrări de reîmpănare a întregii înfășurări statorice, de injectare de conductor în creștături și de relăcuire cu lac semiconductor a capetelor de bobină frontale.

Rezultatele măsurătorilor efectuate în 2010 sunt prezentate în Fig. 9 (diagrama 3D). Se poate observa o scădere a ratei pulsurilor la 10 -40 p/sf (corespunzând categoriei II de starea a izolației) pe faza C, precum și pe celelalte faze. Se observă impulsuri negative PD în intervalul unghiului $\alpha = 0 - 90^\circ$ de amplitudini mici la 5 p/sf. Persistența impulsurilor PD negative, indică apariția DP de volum, în special între izolație și conductorul din cupru [8] [12]. În același timp, se poate nota o scădere pe toate fazele a ratei pulsurilor de la 10 la 40 p/sf (categoria II) și pulsuri pozitive PD în intervalul unghiului $\alpha = 180^\circ - 270^\circ$. Persistența impulsurilor PD pozitive indică apariția PD de suprafață în creștături. Scăderea ratei pulsurilor la 10-40 p/sf (categoria II) a PD în zona frontală este observată, de asemenea, ceea ce indică o îmbunătățire a stării suprafeței la capetele bobinelor frontale [8] [12].

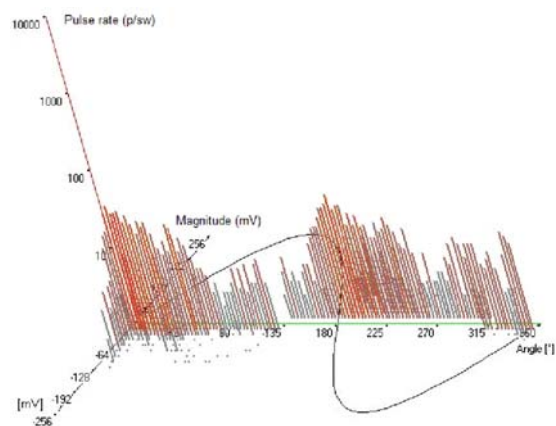


Fig. 9. (3D diagram) Variația ratei pulsurilor funcție de amplitudini pe perioada de 20 ms la HG4, faza C, CHE Vidraru.

Prin urmare, lucrările de întreținere efectuate în anul 2010 au dus la reducerea valorilor parametrilor PD, astfel încât starea generală a izolației a fost îmbunătățită. Astfel, starea izolației a trecut de la categoria III, în 2009, în categoria a II-a, în 2010. Au fost recomandate continuarea măsurătorilor PD periodice. De asemenea, s-a recomandat un set de măsurări suplimentare și teste ($\tan \delta$, tensiune mărită, măsurarea locală a PD cu sonda corona), pentru a confirma faptul că starea de izolare este în aceeași categorie de severitate.

2. HG 2, CHE Remeți

În perioada 2000 - 2010, parametrii DP, +NQN, de la HG2, Remeți, au crescut de la 150 u.r. la 450 u.r. (depășind limita maximă), ceea ce indică o creștere a deteriorării izolației (categoria III) (Fig. 10). Parametrii $\pm Q_m$ au crescut de la 50-100 mV până la 270-350 mV, rămânând totuși în intervalul de referință (170-400 mV), indicând astfel dezvoltarea deteriorărilor lente, normale (care corespund categoriei a II-a de stare a izolației). În perioada 2004-2005, au fost efectuate lucrări de întreținere (reîmpănare radială, relăcuire a părții frontale), care a condus la reducerea temporară în valorile +NQN și $\pm Q_m$ (Fig. 10).

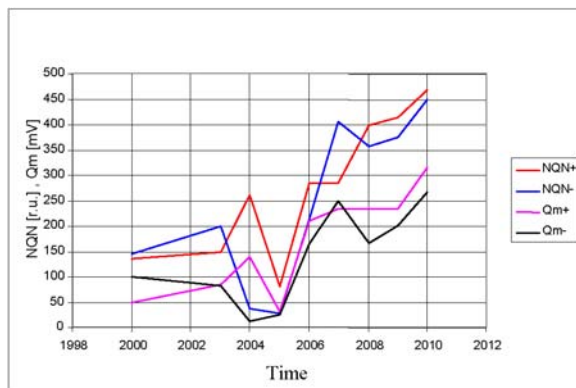


Fig. 10. Evoluția parametrilor NQN și Q_m , pentru HG2, faza B, CHE Remeți.

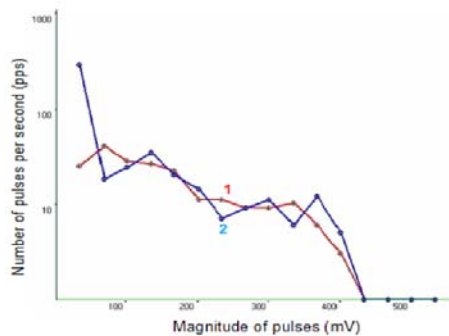


Fig. 11. Variația ratei pulsului funcție de amplitudină pentru HG2, faza B, CHE Remeți - pulsuri pozitive; 2 - pulsuri negative.

În diagrama 2D (Fig. 11), este prezentată variația ratei pulsului funcție de amplitudină pe faza B. Pentru toate măsurătorile, au fost obținute valori aproape egale ale pulsurilor pozitive și negative, iar raportul $+Q_m/-Q_m \approx 1$. Curbele ratei pulsului funcție de amplitudină au aspect de împletire, în toate regimurile de funcționare. Acest lucru a indicat apariția PD de volum în zona creștăturii datorită delaminărilor dintre straturi și golurile din izolație, ca urmare a efectului termic, (care corespunde categoriei a II-a de stare a izolației) [12].

În diagrama 3D (Fig. 12), apariția unor impulsuri PD pozitive la unghiuri $\alpha = 180 - 270^\circ$, care au evoluat în timp (de la rate de puls de aproximativ 10-20 p/sf, în 2007, la rate de puls de 30-50 p/sf în 2010), însă cu amplitudini scăzute. Aceste evoluții indică o creștere a PD din cauza cavităților existente (goluri) între izolație și conductorul din cupru (efect al sarcinii ciclice) [12], de amplitudine medie (categoria II-III), precum și dezvoltarea de DP de suprafață în zona creștăturii (între izolație și peretele creștăturii din cauza deteriorării lacului conductor). S-a observat, de asemenea, o creștere în timp a valorilor PD, la unghiuri $\alpha = 15^\circ$, $\alpha = 195^\circ$, și $\alpha = 255^\circ$, indicând apariția DP de suprafață în zona frontală (cu rate de până la 0-30 p/sf și amplitudini mici), care corespund categoriei a II-a de stare a izolației. După ce au fost efectuate lucrări de întreținere în perioada 2004-2005, apariția acestor descărcări PD s-a diminuat, însă în anul 2010 au reapărut.

Astfel, întreaga izolație, pe ansamblul ei, a fost inclusă în categoria II-III (tab. II), cu deteriorări normale, lente în întreaga izolație, care tinde să se extindă. Izolația a fost afectată în totalitatea sa pentru că au fost observate DP de volum în zona creștăturilor din cauza delaminărilor (dezlipirilor dintre straturi și goluri).

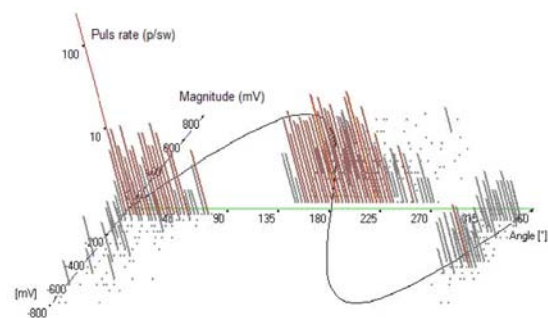


Fig. 12. Variația ratei pulsului funcție de amplitudină pe o perioadă de 20 ms pentru HG2, faza B, CHE Remeți.

3. HG 3, CHE Mărișelu

La CHE Mărișelu activitatea descărcărilor parțiale a fost înregistrată cu două analizoare diferite începând cu anul 2003 (Fig. 13). Acesta este motivul pentru care datele parametrilor între 2003 și 2007 nu sunt comparabile cu datele din perioada 2008-2015. Se observă că valorile parametrilor sunt de aproximativ patru ori mai mari decât valorile recent măsurate, cu toate că nu au fost efectuate rebobinări, sau lucrări de întreținere speciale sau alte modificări aduse izolației statorice, începând cu anul 2003. Deși condițiile de operare au fost aproximativ aceleași în timpul testelor PD on-line, este clar acum că trendul activității descărcărilor parțiale trebuie să fie realizat cu același echipament/analizor, în scopul obținerii unor rezultate comparabile pentru a fi credibile.



Fig. 13. Evoluția parametrilor NQN și Qm pentru HG3, faza C, CHE Mărișelu.

În perioada 2008-2014 valorile NQN și Qm sunt ridicate pe toate fazele ale HG3. Pe parcursul perioadei 2008-2014, valorile NQN au depășit valoarea maximă de referință de 400 u.r., variind în jurul valorii de 1100 u.r. pe toate fazele. Acest lucru a indicat o deteriorare în creștere care corespunde categoriei III de stare a izolației. Parametrii Qm variază în domeniul (400-800 mV), ceea ce indică o deteriorare severă a izolației (categoria a II-III). Aspectul de zig-zag al curbelor de variație a PD s-a datorat lucrărilor de întreținere simple efectuate. Efectul unor lucrări asupra statorului a dus la un anumit nivel de îmbunătățire a parametrilor PD, însă nu una majoră.

În anul 2012, în urma unui test de înaltă tensiune continuă de 31,2 kV, după aproximativ 30 de secunde de la aplicarea tensiunii, faza C, a străpuns. Bara străpunsă din planul 1 a fost înlocuită, și de asemenea, alte câteva bare din planul 2 au fost înlocuite cu bare noi din rezervă. Cu această ocazie au fost realizate lucrări de curățare și de lăcuire parțială și reîmpănare.

Măsurările de descărcări parțiale au fost efectuate în 2014. Acestea au relevat faptul că parametrii principali, NQN și Qm, au valori similare cu cele din 2011, chiar o ușoară îmbunătățire a fazei C, dar în 2015, se pare că descărcările parțiale au reapărut, aceasta confirmând starea de îmbătrânire a izolației.

În diagrama bi-dimensională (Fig.14) este prezentată variația ratei pulsurilor funcție de amplitudinile lor la generatorul HG3, Mărișelu. Se poate observa o cvasi-egalitate între impulsurile negative și cele pozitive, astfel că curbele lor au un aspect de suprapunere (ce indică apariția PD de volum în zona creștăturii și care corespunde categoriei III de stare a izolației).

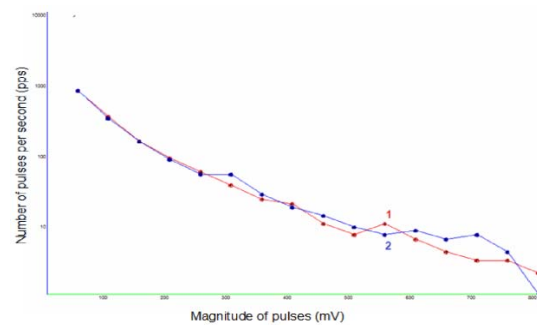


Fig. 14. Variația ratei pulsurilor funcție de amplitudinile lor la HG3, faza C, CHE Mărișelu: pulsuri pozitive; pulsuri negative.

Figura 15 prezintă apariția pulsurilor pozitive și negative la unghiurile electrice $\alpha = 0 - 90^\circ$ și $\alpha = 180 - 270^\circ$, indicând apariția prezenta DP de volum și de suprafață în zona creștăturii. În același timp, pentru toate fazele, se observă apariția de impulsuri pozitive și negative PD la $\alpha = 15^\circ, 75^\circ, 195^\circ, 255^\circ$ cu o rată a pulsului de aproximativ 40-50 p/sf pe fază A și B și peste 50 p/sf pe faza C și cu amplitudini relativ mari, indicând PD de suprafață în zona capetelor frontale [12].

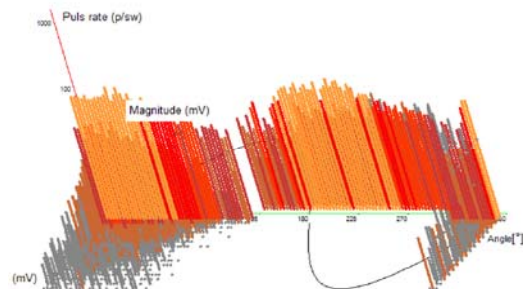


Fig. 15. Variația ratei pulsurilor funcție de amplitudini pe o perioada de 20 ms la HG3, faza C, CHE Mărișelu.

La o evaluare globală, ignorând măsurările ce nu pot fi comparate din 2003 până în 2007, rezultă că izolația de la HG3, CHE Mărișelu prezintă DP de volum în zona creștăturilor, din cauza delaminărilor și a golurilor (efectul termic), cât și între izolație și barele din cupru (efect al sarcinii ciclice). S-au mai detectat în urma măsurării și analizei și descărcări de suprafață în zona frontala din cauza consolidării slăbite sau a deteriorării lacului conductor. Au fost recomandate lucrările de întreținere (reîmpănare, relăcuirea în zona frontală) și continuarea măsurărilor PD periodice. În același timp, au fost recomandate un set suplimentar de măsurări și teste (tan δ , tensiune mărită, măsurarea PD locale cu sonda corona), pentru a confirma și pentru a verifica oportunitatea generatorului pentru rebobinare.

CONCLUZII

Pentru evaluarea în mod corect a stării izolației generatoarelor electrice este obligatoriu:

- măsurările să fie efectuate de către persoane cu experiență și cu pregătire în domeniul izolațiilor electrice;
- utilizarea unui singur analizor/echipament pe întreaga perioadă de monitorizare a activității descărcărilor, pentru rezultate valide în ceea ce privește trendul acestora;
- condițiile de operare ale generatorului (tensiune, sarcină, temperatura cuprului) să fie aceleași;
- efectuarea de măsurări periodice de descărcări parțiale (cel puțin de 2 ori pe an).

Criteriile folosite în lucrare pot fi îmbunătățite prin efectuarea a cât mai multe teste (monitorizarea activității și evoluției parametrilor descărcărilor parțiale, în timp, și corelarea acestora cu lucrările de mentenanță. Ideal ar fi efectuarea unui set de măsurări înainte și după astfel de reparații, lucrări.

Astfel, cea mai eficientă și credibilă soluție pentru evaluarea stării izolației este de a efectua testarea mașinii în condiții similare, cu același analizor, pentru respectivul generator. Doar atunci, trasarea evoluției activității parametrilor descărcărilor parțiale, NQN și

Qm reprezintă date valoroase pentru corecta evaluare a izolației statorice a generatoarelor.

BIBLIOGRAFIE

- [1] X. Wang, *Partial Discharge Analysis of Stator Insulation at Arbitrary Voltage Waveform Stimulus*, Thesis, KTH School of Electrical Engineering, Stockholm, Sweden, 2015.
- [2] G.Tanasescu, B. Gorgan, O. Dragomir, G. Constantinescu, P.V.Notingher, C.R. Parlog, „Online Monitoring and Diagnosis System for Hydrogenerator Condition Assessment”, *Proceedings of 8th International Symposium on ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING*, Bucharest, 2013, Paper ELMAD 16, pp. 1-6.
- [3] G.C. Stone, E.A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*, IEEE Press, John Wiley & Sons, Second Edition, 2014.
- [4] HAP Condition Assessment Manual, *Guide for Generator Condition Assessment*, 2011.
- [5] A. Haddad, D. Warne, *Advances in High Voltage Engineering*, The Institution of Engineering and Technology, London, UK, 2004.
- [6] R. Brüttsch, M. Tari, K. Fröhlich, T. Weiers, R. Vogelsang, "Insulation Failure Mechanisms of Power Generators", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 24, No. 4, 2008.
- [7] J. H. Dymond, N. Stranges, "Stator Winding Failures: Contamination, Surface Discharge, Tracking", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 38, No. 2, 2002.
- [8] D. Zlatanovici, S. Dumitrescu, "Assessment of the Electric Hydrogenerator Stator Insulation Condition by Means of Online Partial Discharge Measurement", *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, Vol. 75, No.3, 2013, pp. 199-210.
- [9] IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharge in Rotating Machinery", IEEE Std 1434-2000, 2000.
- [10] M. F. Cabanas, J. G. Norniella, M. G. Melero, C. H. Rojas, J. M. Cano, F. Pedrayes and G. A. Rocajo, "Detection of Stator Winding Insulation Failures: On-line and Off-line Tests", *2013 IEEE Workshop on Electrical Machines Design Control and Diagnosis*, Paris, France, 2013, pp. 210-219.
- [11] Energy Technical Standard on tests and measurements on equipment and electrical installations 01 116NTE, Bucharest, 2002.
- [12] SR 9385-1: 2008 Part 1: Synchronous Hydro Generators. Part 1: General Technical Conditions.

Despre autor



Dumitrescu Sorin Adrian este cercetător la Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare Energetică ICEMENERG București. A absolvit în anul 2006 Facultatea de Inginerie Electrică din cadrul Universității Politehnica din București, iar din anul 2014 este doctorand la aceeași facultate, la Departamentul de Mașini, Materiale și Acționări Electrice. A avut numeroase colaborări, lucrări și articole scrise, alături de prof.dr.ing. Dan Zlatanovici în domeniul generatoarelor electrice și a izolațiilor acestora, iar teza de doctorat face referire la estimarea duratelor de viață ale generatoarelor electrice de mare putere. E-mail: dsasorin@yahoo.com