ELEKTROTEHNIŠKI VESTNIK 81(4): 179-186, 2014
IZVIRNI ZNANSTVENI ČLANEK

Ugotavljanje stanja izolacije statorskega navitja generatorja na podlagi meritev delnih razelektritev

Matic Obid[1], Boštjan Blažič[1]

[1] *Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija*
E-pošta: matic.obid@gmail.com

Povzetek. Članek obravnava problem pojava delnih razelektritev v izolaciji statorskega navitja generatorja in možnosti ugotavljanja stanja izolacije na podlagi meritev delnih razelektritev med normalnim obratovanjem stroja. Bistvene prednosti opisanega pristopa v nasprotju s klasičnimi metodami so, da lahko okvaro oziroma mesto nastanka delnih razelektritev v navitju lociramo na podlagi rezultatov meritev in da so meritve opravljene med samim obratovanjem generatorja. To prinese tudi natančnejše rezultate, saj na delne razelektritve močno vplivajo obratovalni pogoji, kot so temperatura, vibracije in obremenitev generatorja. Predstavljen je tudi primer takšnih meritev, ki so bile izvedene na generatorju 3 v HE Solkan.

Ključne besede: delne razelektritve, statorsko navitje, električna izolacija, metode merjenja »on-line«

Assessment of the stator-winding insulation state based on partial-discharge measurements

The paper proposes solving the issue of partial discharges occurring in the stator-winding insulation and possibilities for determination of the stator-winding state based on on-line partial-discharge measurements. The main advantage of the presented approach is, in contrast to the traditional methods, the possibility to locate the insulation damages based on the measurement results obtained during the machine on-duty state. Also, the results are more accurate, as the partial-discharge rate very much depends on the machine status (e.g. temperature, vibrations, load, etc.). A paper presents a measurement case carried on generator no. 3 of the Solkan hydropower plant.

1 UVOD

Izkušnje kažejo, da imajo precejšen delež pri okvarah generatorjev okvare statorskega navitja oziroma preboj statorske izolacije [1]. Takšna okvara pomeni velik strošek za lastnika in potencialno tudi za elektroenergetski sistem, zato so zelo dobrodošle merilne metode, s katerimi lahko odkrijemo vzroke težav, še preden nastane večja okvara. Učinkovita metoda za zgodnje odkrivanje težav je tudi spremljanje delnih razelektritev med obratovanjem stroja (ang. »on-line«).

Klasične metode ugotavljanja stanja izolacije, kakršni sta tudi meritev indeksa polarizacije in meritev kota dielektričnih izgub, dajejo vpogled v stanje izolacije kot celote. Indeks polarizacije je na splošno določen z razmerjem vsot tokov, ki tečejo prek izolacije po eni minuti in po desetih minutah, potem ko nanjo priključimo preizkusno napetost. Ti tokovi so vsota konduktivnega toka, toka kot posledice onesnažene površine in polarizacijskega toka. Prva dva ostajata konstantna, medtem ko polarizacijski tok upade na nič po približno 10 minutah, ko se molekule polarizirajo. Kapacitivni tok pri izračunu indeksa polarizacije nima vpliva, saj izzveni že prej kot v eni minuti. Standardi narekujejo, da mora indeks polarizacije pri zdravem izolacijskem materialu znašati vsaj 2.

Druga klasična metoda ugotavljanja stanja izolacije je meritev kota dielektričnih izgub δ, ki se po navadi izraža z vrednostjo $tg\delta$. Meritev se opravi pri različnih napetostih od nič do nazivne napetosti generatorja z vsakokratnim 20-odstotnim povečanjem napetosti. Prirastek faktorja $tg\delta$ z napetostjo je sorazmeren intenziteti delnih razelektritev. Koliko lahko ta faktor naraste pri določenem stroju, pa najdemo v standardih.

»On-line« spremljanje delnih razelektritev v nasprotju z zgoraj opisanimi metodami omogoča lociranje šibkih mest izolacije že na podlagi merilnih rezultatov. Klasični testi se izvajajo, ko generator ne obratuje, kar pomeni, da ne dobimo realne slike, saj so delne razelektritve precej odvisne od obratovalnih vplivov, kot so temperatura stroja, vlažnost okolice in obremenitev. Poleg tega so med »on-line« spremljanjem delnih razelektritev prisotne še običajne mehanske in električne sile na navitje ter tresljaji.

2 ISKRENJA V STATORSKI IZOLACIJI

Na splošno razlikujemo dve vrsti iskrenj v statorski izolaciji, ki imata različno naravo nastanka, a tako rekoč enako učinkujeta na kakovost izolacije in ju lahko zaznavamo z isto merilno opremo. Ena vrsta iskrenj so

Prejet 6. maj, 2014
Odobren 27. maj, 2014

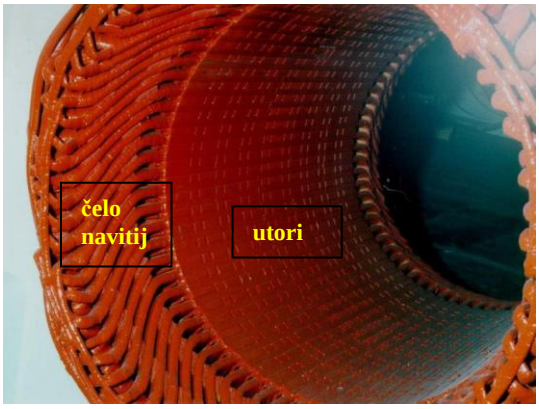
delne razelektritve, ki nastanejo, kadar električna poljska jakost na določenem mestu preseže prebojno trdnost medija, drugo so pa iskrenja, ki nastanejo kot posledica prekinitve toka.

Iskrenja sama po sebi ne vodijo do hitrega poškodovanja izolacije, temveč povzročajo njeno progresivno slabšanje. Sčasoma povzročajo mehanske poškodbe izolacije in spremembo v njeni kemični strukturi, kar se izraža tudi kot povečanje električne prevodnosti samega izolacijskega materiala. Vse to sčasoma lahko privede do popolnega preboja izolacije.

2.1 Delne razelektritve

Delna razelektritev je na splošno preskok oziroma premostitev dela poti med dvema elektrodama, če je presežena prebojna trdnost medija. V statorski izolaciji lahko nastanejo v delu navitja, ki se nahaja v utorih, ali pa v izolaciji čela navitja (slika 1).

Ker so delne razelektritve odvisne od dovolj visoke električne poljske jakosti, lahko nastajajo le v bližini visokonapetostnih priključkov in ne v celotnem statorskem navitju.



Slika 1: Statorsko navitje [2]

V izolaciji dela navitja, ki se nahaja v utorih, lahko pride do delnih razelektritev na naslednjih mestih:

- na mestu zračnih mehurčkov, ki nastanejo v notranjosti izolacije že med njeno proizvodnjo, in se jim ne moremo izogniti;
- v zračnih žepih v notranjosti izolacije, ki so posledica nepopolnega strjevanja izolacijskega materiala in toplotnih ter mehanskih preobremenitev;
- v zračnih žepih na stiku tokovodnika in izolacije, ki so posledica temperaturno pogojenih raztezkov zaradi večkratnega zaganjanja in ustavljanja stroja;
- na stiku površine izolacije in statorskega jedra, če je poškodovana zaščitna polprevodna plast na površini izolacije. Ta se poškoduje, če statorske palice med obratovanjem vibrirajo zaradi nezadostne zatesnjenosti.

V čelu navitij lahko delne razelektritve nastajajo zaradi:

- onesnaženosti površine izolacije;
- nepravilno izvedenih zaščitnih površinskih nanosov;
- nezadostnega razmika med posameznimi fazami ali fazo in ozemljenim delom.

2.2 Iskrenja kot posledica prekinitve toka

Preprost primer iskrenja je na primer iskrenje na mestu poškodovanega tokovodnika. Drug primer je nekoliko bolj zapleten. Zanj morata biti izpolnjena dva pogoja. Statorske palice morajo med obratovanjem vibrirati zaradi nezadostne zatesnjenosti in zaščitna plast na površini izolacije mora biti preveč prevodna, kar je lahko posledica napake v proizvodnji. V tem primeru se bo tvorila nova tokovna zanka, kjer se bodo vrtinčni tokovi v statorskem jedru, ki so posledica magnetnega pretoka, zaključevali prek statorskega jedra in te preveč prevodne zaščitne plasti na površini izolacije. Zaradi prej omenjenih vibracij pa bo tokovna zanka prekinjena vedno, ko se bo statorska palica odmaknila od jedra. V tem trenutku bo nastal oblok – iskra. Tok bo ponovno stekel, ko se palica spet dotakne jedra. Tovrstno iskrenje, v kombinaciji z mehanskimi poškodbami zaradi vibracij, tudi vodi do najhitrejšega slabšanja kakovosti izolacije.

Oba primera iskrenja, ki nastaneta kot posledica prekinitve toka, sta neodvisna od same napetosti in zato lahko v nasprotju s prej opisanimi delnimi razelektritvami nastaneta kjerkoli v statorskem navitju.

3 MERJENJE DELNIH RAZELEKTRITEV

Merjenje delnih razelektritev temelji na zaznavanju energije, ki se ob njih sprošča. Ta nastopa v obliki zvoka, svetlobe, kemičnih reakcij in elektromagnetnega valovanja. Medtem ko prve tri oblike energije lahko zaznavamo le pri testiranjih »off-line«, je zaznavanje elektromagnetnega valovanja edina možnost za »on-line« spremljanje delnih razelektritev. Ob vsakokratni razelektritvi se sprosti visokofrekvenčen impulz z dvižnim časom le nekaj nanosekund, ki nato potuje po tokovodnikih in tako nastane tudi na priključnih sponkah generatorja. Cilj merilne opreme za zaznavanje delnih razelektritev pa je prav »lovljenje« teh visokofrekvenčnih impulzov.

Merilni sistemi za tovrstne meritve so na splošno sestavljeni iz senzorjev in merilnega instrumenta. Za spremljanje delnih razelektritev v izolaciji rotirajočih se strojev se največkrat uporabljajo sklopni kondenzatorji, ki se priključijo na vsako fazo čim bliže navitju.

Za senzorje se lahko uporabijo tudi posebne visokofrekvenčne antene, ki se namestijo v same utore tik pod zagozde. Takšni senzorji se največkrat uporabljajo le pri velikih turbogeneratorjih.

Tretja možnost so tudi visokofrekvenčni tokovni transformatorji, vendar se ti senzorji večkrat uporabljajo

za spremljanje delnih razelektritev v izolaciji kablovodov.

Merilni sistemi se precej razlikujejo med različnimi izdelovalci tovrstne opreme. Razlike so predvsem v frekvenčnem območju beleženja impulzov in v načinih izločanja šuma in motenj, ki so prisotni pri meritvah »on-line«.

3.1 Frekvenčno območje merilnega sistema

Nekateri merilni sistemi temeljijo na nižjem frekvenčnem območju zajemanja impulzov (npr. do 30 MHz), medtem ko drugi uporabljajo višjefrekvenčno območje (npr. od 50 MHz do 350 MHz). Vsaka izbira ima svoje prednosti in slabosti.

Če impulz delne razelektritve predstavimo v frekvenčnem prostoru, vidimo, da vsebuje frekvence tako rekoč od nič do nekaj 100 MHz. Frekvence zunanjega šuma pa segajo le do nekaj MHz. Tako je prednost višjega frekvenčnega območja v tem, da bo manj dovzetno na šum, saj bodo sklopni kondenzatorji za te nizkofrekvenčne impulze šuma pomenili previsoko impedanco. Merilni sistem, ki temelji na nizkofrekvenčnem območju, pa bo za razliko zabeležil vse signale motenj, ki jih bo moral izločiti na drugačen način.

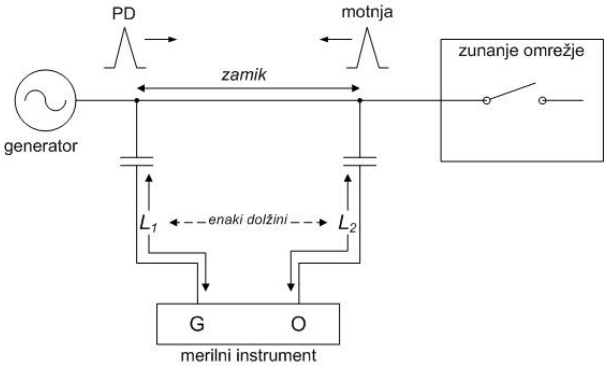
Kot je bilo že rečeno, ima vsak način določene prednosti. Prednost nizkofrekvenčnega območja je v tem, da daje globlji vpogled na dogajanje v navitju. Visokofrekvenčno območje opazuje dogajanje le v bližini visokonapetostnih priključkov. S stališča delnih razelektritev je to sicer dovolj, saj le-te nastajajo samo v delu navitja z dovolj visoko napetostjo. Ne omogočajo pa dobrega zaznavanja tistih iskrenj, ki so posledica prekinitve toka in lahko nastajajo kjerkoli v navitju.

3.2 Izločanje šuma in motenj

V nasprotju z meritvami »off-line« imajo pri »on-line« spremljanju delnih razelektritev motnje in šum, ki prihajajo tako iz elektroenergetskega omrežja, kot tudi iz notranjosti generatorja (npr. iz vzbujalnega sistema rotorja), velik vpliv. Pomembno je, da znamo ločiti, kateri impulz je posledica delne razelektritve v navitju statorja in kateri je le posledica motnje ali šuma.

Šum razumemo kot dalj časa trajajoč pojav, ki je lahko posledica raznih elektronskih naprav, mobilnih naprav, prenosnih vodov itd. Motnje pa so časovno gledano krajši impulzi s podobnimi lastnostmi, kot jih imajo impulzi delnih razelektritev. Vzroki za takšne motnje so lahko iskrenje na komutatorju, iskrenje zaradi slabih električnih povezav, delne razelektritve na drugih napravah (npr. na transformatorju) itd.

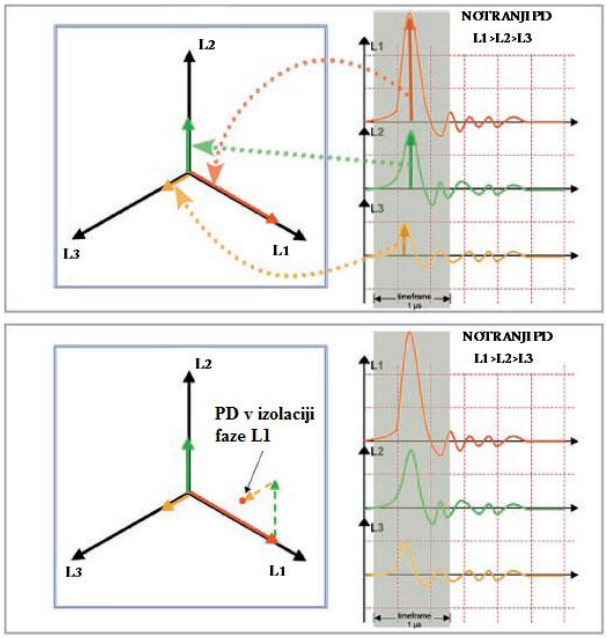
Načinov izločanja šuma in motenj je več in se med izdelovalci razlikujejo. Merilni sistem, ki temelji na visokofrekvenčnem območju zajemanja impulzov, že sam po sebi ne beleži signalov šuma, ki imajo nižje frekvence. Ti sistemi po navadi nadaljnjo separacijo izvedejo na podlagi časovne zakasnitve prihoda signala na merilni instrument z dvema vhodoma. Postopek je prikazan na sliki 2.



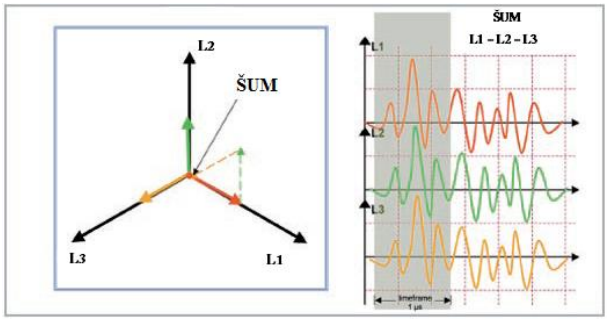
Slika 2: Izločanje motenj na podlagi časovne zakasnitve [5]

Če bo impulz prišel iz generatorja, bo ta najprej zaznan na vhodu »G« in šele čez določen čas na vhodu »O«, saj mora prepotovati dodatno razdaljo med obema kondenzatorjema. V nasprotnem primeru bo impulz, ki pride iz omrežja, zaznan najprej na vhodu »O«. Tako lahko izločimo le tiste impulze, ki pridejo iz generatorja. A tudi med temi so lahko takšni, kakršni nas ne zanimajo in jih je treba izločiti. To so na primer impulzi, ki nastanejo kot posledica iskrenja na komutatorju. Te pa lahko prepoznamo s primerjavo dvižnih časov, saj so ti časi pri delnih razelektritvah v izolaciji krajši. Takšen pristop zahteva dva sklopna kondenzatorja na vsaki fazi, torej skupaj šest, kar je nekakšna slabost. Nizkofrekvenčen sistem, ki je opisan v nadaljevanju, na primer potrebuje le po en kondenzator za vsako fazo.

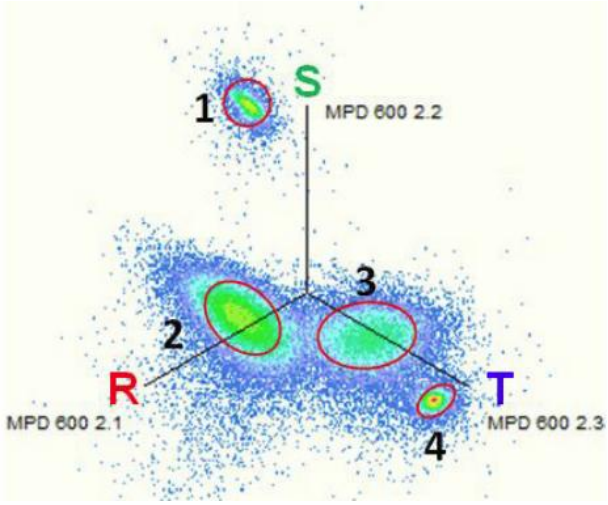
Sistem, ki temelji na nizkofrekvenčnem območju, bo beležil poleg impulzov delnih razelektritev tudi kompleten šum in motnje. Ti sistemi vse zabeležene analogne signale najprej digitalizirajo v njihove časovno diskretne vrednosti in jih nato digitalno obdelujejo. Omogočajo tudi natančnejšo nastavitev samega frekvenčnega območja z različno pasovno širino, z namenom, da dosežemo čim boljše S/N (ang. signal/noise) razmerje. Sistem deluje tako, da opazuje vse tri faze hkrati. V primeru delne razelektritve v eni izmed faz bo ta isti impulz zaznan v vseh treh fazah, le da bo v preostalih dveh njegova amplituda manjša. Sistem izmeri vse tri amplitude tega impulza in ga predstavi kot točko na diagramu 3PARD – to je diagramu odnosa amplitude posameznega impulza v eni fazi z njeno preslikavo v drugih dveh fazah (ang. 3-phase amplitude relation diagram), kjer vsaka os pomeni eno fazo. Takšen impulz bo zamaknjen v smeri faze, v kateri se je zgodil. Če bo impulz prišel iz zunanjega omrežja, bo v vseh treh fazah zaznan približno enako, zato bo na diagramu 3PARD zabeležen bliže centru. Opisani postopek shematsko prikazujeta sliki 3 in 4.



Slika 3: Impulz delne razelektritve na diagramu 3PARD [3]



Slika 4: Impulz šuma na diagramu 3PARD [3]



Slika 5: Diagram 3PARD [3]

Ker gre za veliko impulzov, bodo ti v končni obliki združeni v nekakšne oblake, kjer bo vsak oblak pomenil svoj vzrok delnih razelektritev oziroma motnje. Primer končnega diagrama 3PARD prikazuje slika 5.

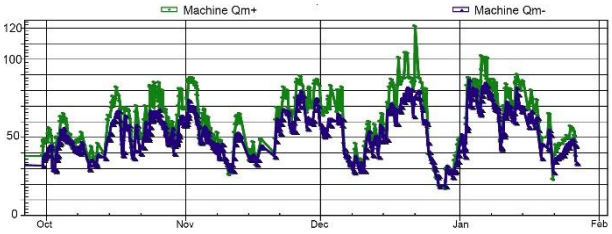
Z izbiro enega izmed oblakov nam sistem s povratno transformacijo izriše graf PRPD – graf delnih razelektritev v odvisnosti od fazne napetosti (ang. phase resolved partial discharge), ki se nanaša le na izbran oblak. Kaj nam takšen graf PRPD pove, bomo zapisali v nadaljevanju.

4 PRIKAZ IN ANALIZA REZULTATOV

Rezultate po navadi prikazujemo v obliki trenda amplitude delnih razelektritev za določeno časovno obdobje ali pa v obliki že prej omenjenih grafov PRPD.

4.1 Trend amplitude delnih razelektritev

Primer takšnega trenda je prikazan na sliki 6. Prikazujemo lahko potek amplitude delnih razelektritev za vsako fazo ali pa ločena trenda negativno polariziranih impulzov in pozitivno polariziranih impulzov.



Slika 6: Trend negativno in pozitivno polariziranih impulzov delnih razelektritev [6]

Iz zgornje slike vidimo, da imamo kratkoročen in dolgoročen trend. Ker so delne razelektritve močno odvisne od obratovalnih pogojev generatorja, pride kratkoročno do precejšnega nihanja v amplitudi delnih razelektritev. Pomemben je dolgoročen trend, ki nam pove, ali ostaja intenziteta delnih razelektritev konstantna ali se veča. Standardi narekujejo, da je dvakratno povečanje amplitude v šestih mesecih signal za skrb in zahteva pravočasno ukrepanje.

Pri novem stroju oziroma novi izolaciji nam meritve lahko pokažejo nekoliko povišane vrednosti delnih razelektritev, ki po 5000 do 10.000 obratovalnih urah navadno upadejo in se ustalijo na nižji vrednosti. Glavni razlog za to je, da je izolacijski material novega stroja še neustaljen in ima kot tak nekoliko večjo prebojno trdnost. To pa pomeni, da bodo morebitni zračni mehurčki v izolaciji toliko bolj izpostavljeni delnim razelektritvam.

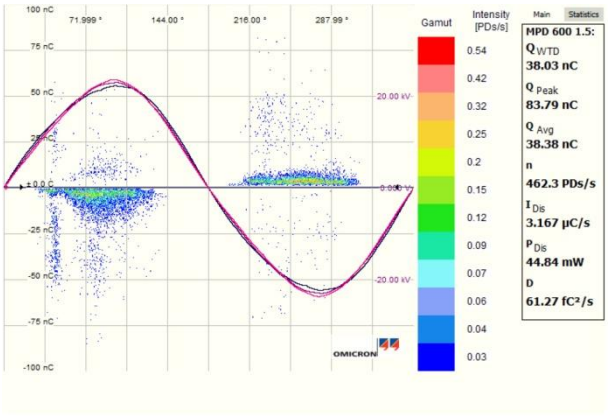
Pri starih strojih se lahko zgodi tudi, da trend delnih razelektritev začne drastično upadati. Načeloma bi to pomenilo, da se kakovost izolacije izboljšuje, a ni tako. Zgodi se namreč, da se zaradi delnih razelektritev skozi vsa leta obratovanja organski material izolacije razgradi do te mere, da se tvori karbonska vez, ki premosti zračne mehurčke v notranjosti izolacije in s tem izniči

delne razelektritve. Kakovost izolacije je pa še vedno slaba. V praksi se je že večkrat izkazalo, da je pri starem stroju, kateremu so izmerili izjemno nizko intenziteto delnih razelektritev, kmalu zatem prišlo do popolnega preboja izolacije.

Pri ugotavljanju stanja izolacije na podlagi analize trenda smo nekoliko omejeni, saj nam ta način ne pove veliko o tem, v katerem delu navitja nastajajo delne razelektritve. To pa lahko določimo s pomočjo grafov PRPD.

4.2 Analiza grafa PRPD

Graf PRPD je na splošno prikaz amplitude delnih razelektritev v odvisnosti od poteka fazne napetosti, kot to prikazuje primer na sliki 7. Barvna koda označuje število impulzov. Vsaka pika na grafu prikazuje svoj impulz in ker je teh veliko, so impulzi združeni v oblake.



Slika 7: Graf PRPD [3]

Za vsako vrsto delnih razelektritev je značilna svoja oblika takšnega oblaka. Tako lahko na podlagi grafov PRPD izkušen uporabnik ugotovi na primer, ali delne razelektritve nastajajo na stiku med tokovodnikom in izolacijo ali pa na primer na površini čela navitja. Če bodo delne razelektritve nastajale zaradi vibriranja statorskih palic, bo ta oblika zopet drugačna. To je tudi ena glavnih prednosti »on-line« spremljanja delnih razelektritev.

Določene zaključke lahko delamo tudi glede na to, ali po amplitudi prevladujejo negativno polarizirani impulzi nad pozitivnimi ali nasprotno. To je odvisno od »simetrije« mesta nastanka delne razelektritve. Če je na obeh straneh tega mesta enak material (npr. pri mehurčku v notranjosti je to izolacija), bosta amplitudi negativnih in pozitivnih impulzov približno enaki. Če je mesto nastanka »nesimetrično« (npr. baker-izolacija ali izolacija-statorsko jedro), bodo eni impulzi po amplitudi prevladovali nad drugimi. Na primer, pri delnih razelektritvah na stiku tokovodnika in izolacije bodo prevladovali negativno polarizirani impulzi. Medtem pa bodo ob delnih razelektritvah na stiku med izolacijo in statorskim jedrom, ali pa na površini čela navitij, prevladovali pozitivni nad negativnimi. To je mogoče razbrati tudi iz trenda delnih razelektritev, če je ta prikazan za negativno in pozitivno polarizirane impulze (primer s slike 6).

4.3 Analiza rezultatov, pridobljenih v različnih obratovalnih razmerah generatorja

Do določenih ugotovitev lahko pridemo tudi tedaj, ko se intenziteta delnih razelektritev spremeni ob spremembi le enega izmed obratovalnih parametrov:

- Če se to zgodi ob spremembi obremenitve generatorja, lahko sklepamo, da delne razelektritve nastajajo na stiku površine izolacije in statorskega jedra zaradi vibriranja palic.
- Če se to zgodi ob spremembi temperature navitja, lahko sklepamo, da delne razelektritve nastajajo v notranjosti izolacije na mestu zračnih mehurčkov.
- Če se to zgodi ob spremembi vlažnosti okolice, lahko sklepamo, da delne razelektritve nastajajo na površini čela navitij.
- Če je stroj (turbogenerator) hlajen z vodikom, so od tlaka hladilnega medija odvisne predvsem delne razelektritve na površini čela navitja.

4.4 Primerjava rezultatov

Absolutna vrednost amplitude delnih razelektritev nam na splošno ne pove veliko. Zaključke vedno delamo na podlagi primerjav različnih rezultatov. Tako lahko primerjamo rezultate:

- časovno različnih meritev, opravljenih na istem stroju;
- med posameznimi fazami istega stroja;
- za meritve na podobnih strojih;
- za meritve, opravljene v različnih obratovalnih razmerah.

Pri interpretaciji rezultatov je zelo pomembno tudi, da poleg nazivnih podatkov merjenca poznamo tudi tip izolacije in starost stroja.

5 MOŽNOSTI IZVAJANJA MERITEV

Na splošno lahko meritve »on-line« izvajamo na periodičen ali trajen način. Ne glede na način izvajanja meritev je priporočljiva izvedba baznih meritev, ki so referenca za primerjavo rezultatov, dobljenih pri nadaljnjih meritvah.

5.1 Periodično izvajanje meritev

Za izvedbo takšnih meritev se uporablja prenosna merilna naprava, ki se priključi na sklopne kondenzatorje le za čas meritev. Če stroj izkazuje stabilno stanje glede intenzitete delnih razelektritev, je

dovolj, če te meritve opravimo dvakrat na leto. V nasprotnem primeru se priporočajo pogostejše meritve. Meritve je priporočljivo izvesti tudi tik pred načrtovanimi vzdrževalnimi deli na stroju, tako da lahko potencialna šibka mesta, ki jih zaznamo z meritvijo, med vzdrževalnimi deli pregledamo.

Glavna prednost periodičnega načina izvajanja meritev je v tem, da lahko z isto merilno napravo spremljamo delne razelektritve na več generatorjih. To pride še posebej prav podjetjem, ki imajo več enot. Prav tako lahko z isto merilno napravo spremljamo delne razelektritve, na primer v izolaciji transformatorjev, kablovodov ali naprav GIS. Le senzorji morajo biti za vsak primer ustrezni.

5.2 Trajno izvajanje meritev

V nasprotju s periodičnim načinom merjenja je tu celoten merilni sistem vgrajen trajno in je namenjen le dotičnemu stroju. Prednost takšnega načina izvajanja meritev je v tem, da imamo vedno vpogled v spreminjanje intenzitete delnih razelektritev v realnem času. S tem minimiziramo možnost, da povečana aktivnost delnih razelektritev ne bi bila zaznana. Ker je merilni sistem takšnega načina merjenja vgrajen trajno, je mogoče tudi daljinsko vodenje meritev in analiziranje rezultatov iz oddaljenega centra vodenja.

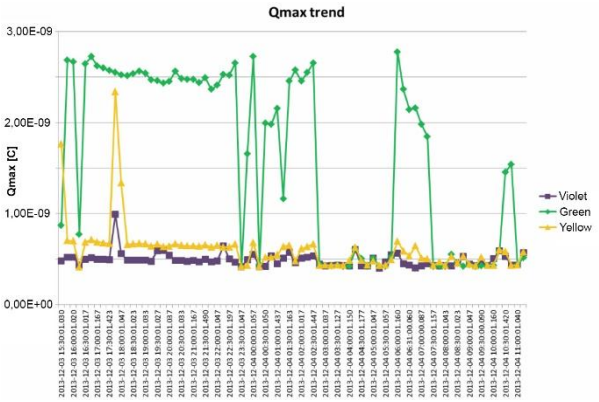
6 IZVEDBA MERITEV NA GENERATORJU HE SOLKAN

Meritve »on-line« delnih razelektritev so bile izvedene med 3. decembrom 2013, 15:30, in 4. decembrom 2013, 11:00 na generatorju 3 v HE Solkan s prenosno merilno napravo podjetja Omicron. Merilni sistem temelji na nižjem frekvenčnem območju zajemanja meritev, ki je bil že opisan. Tabela 1 prikazuje podatke generatorja.

Tabela 1: Podatki generatorja

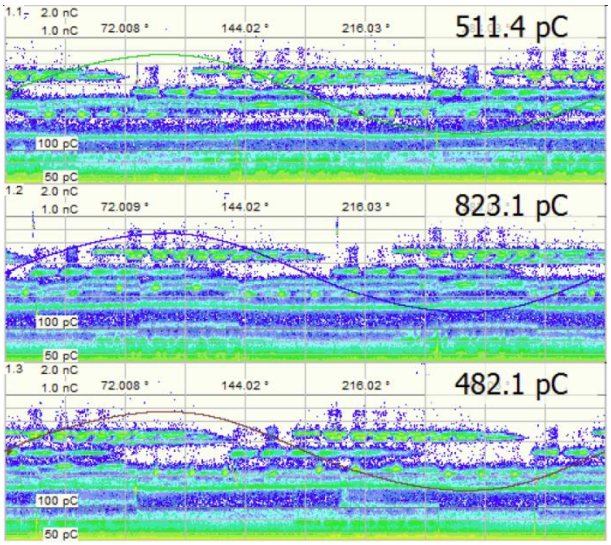
Podatki	
Vrsta stroja	hidro generator
Proizvajalec	Končar
Serijska št.	13919 – GEN3
Leto proizvodnje	1984
Nazivna napetost [V]	6300 ± 10 %
Frekvenca [Hz]	50
Število polovih parov	14
Nazivni vrtljaji [vrt/min]	214
Nazivna moč [kVA]	13000
Nazivni faktor moči	0,8
Vezava	Y
Razred izolacije	B

Na sliki 8 je prikazan trend delnih razelektritev za vsako fazo med trajanjem meritev. Faze so prikazane z zeleno, rumeno in vijoličasto barvo. Opazimo, da intenziteta delnih razelektritev v eni fazi močno odstopa, kar lahko kaže na slabo stanje izolacije.

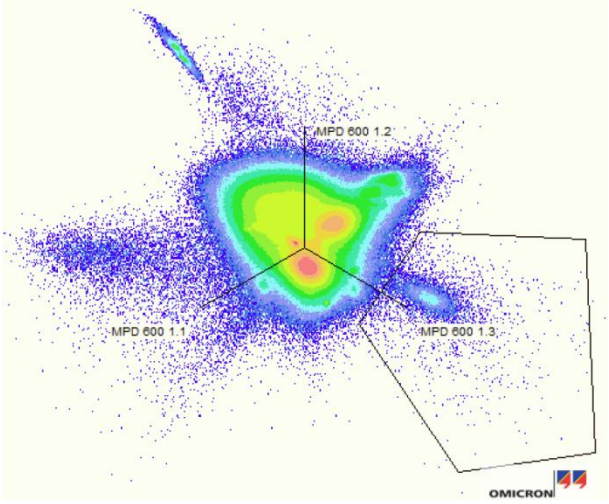


Slika 8: Trend delnih razelektritev za vsako fazo v času meritev

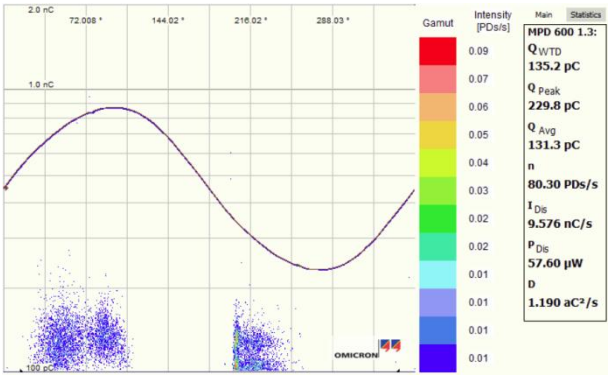
V nadaljevanju je bila opravljena podrobnejša analiza začetnih rezultatov prvega dne in končnih rezultatov drugega dne. V obeh primerih se graf PRPD, ki zajema tako impulze delnih razelektritev, kot tudi motnje in šum, najprej prevede v diagram 3PARD. Nato pa v tem diagramu z izbiro posameznega oblaka dobimo graf PRPD, ki se nanaša le na ta izbrani oblak. V takšni obliki nato poskušamo prepoznati, kaj obkroženi del pomeni. Ali gre za oblak impulzov, ki so posledica delnih razelektritev na določenem mestu, ali pa za oblak impulzov motnje. Postopek je dolgotrajen, predvsem pa zahteva od uporabnika veliko izkušenj, da prepozna oblike grafov PRPD. Na sliki 9 je prikazan oblak razelektritev za vse tri faze, na slikah 10 in 11 pa je prikazan postopek analize za oblak, ki je bil značilen za rumeno fazo. Ta oblak kaže na aktivnost v tej fazi, saj je na diagramu 3PARD zamaknjen v njeni smeri. Na slikah 12 in 13 pa je prikazan postopek analize za oblak, ki je bil značilen za zeleno fazo.



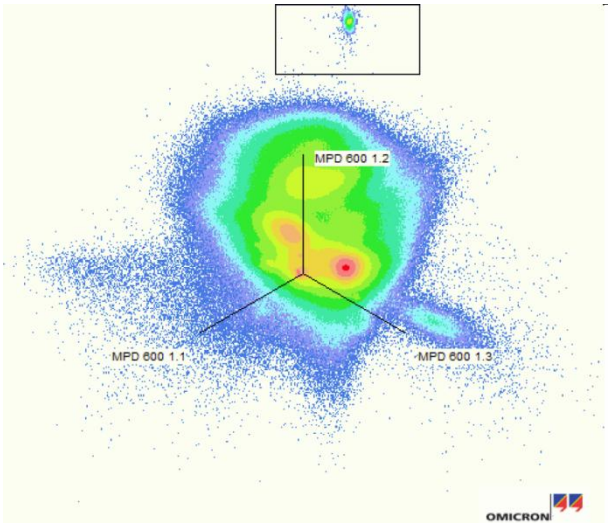
Slika 9: Celoten graf PRPD vsake faze za meritve prvega dne



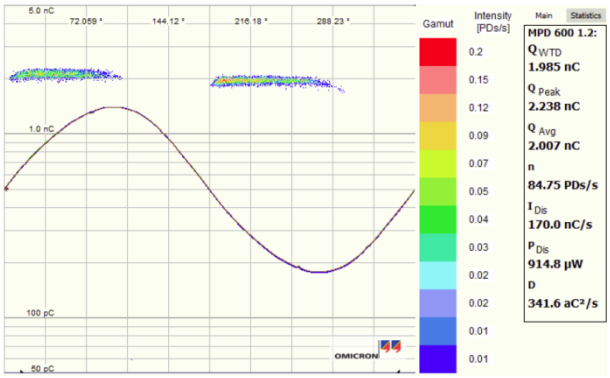
Slika 10: Oblika grafa 3PARD iz slike 9 in označba oblaka, značilnega za rumeno fazo



Slika 11: Graf PRPD predhodno označenega oblaka iz slike 10



Slika 12: Diagram 3PARD in označba oblaka, značilnega za zeleno fazo



Slika 13: Graf PRPD predhodno označenega oblaka iz slike 12

Na enak način so bili analizirani vsi oblaki, ki so bili izmerjeni v posameznih fazah. Prav tako tudi velik centralni oblak, ki večinoma pomeni zunanji šum, ki je bil v času meritev prisoten v veliki meri. To je tudi nekoliko otežilo končno interpretacijo.

6.1 Ugotovitve

Na podlagi oblike grafa PRPD, ki se nanaša na delne razelektritve v rumeni fazi (slika 11), lahko sklepamo, da te nastajajo v notranjosti izolacije na mestu zračnih mehurčkov in zračnih žepov. Je pa ta intenziteta izjemno nizka. To lahko opazimo že iz slike 8. Pri analizi vijoličaste faze se je izkazalo tako rekoč enako. Tudi v tej fazi je bila intenziteta delnih razelektritev izjemno nizka in prav tako je to vidno tudi na sliki 8. Če bi bil stroj nov oziroma z novo izolacijo, bi bila takšna vrednost povsem normalna. Za 30 let star stroj pa ni najbolj običajna, saj se kakovost izolacije z leti slabša, kar pomeni, da bi pričakovali višjo vrednost. Kot je bilo omenjeno že v odseku *4.1*, lahko pri starem stroju zelo nizka intenziteta delnih razelektritev pomeni izjemno slabo kakovost izolacije, ki je tik pred prebojem. Zaradi te bojazni je bil pozneje na stroju izmerjen še indeks polarizacije, izmerjena vrednost je znašala 2,91, kar pa nakazuje na dobro ohranjenost izolacijskega materiala. Tudi meritev kota dielektričnih izgub oziroma prirastek faktorja *tgδ* v odvisnosti od napetosti iz leta 2007 nakazuje na dovolj homogeno izolacijo. Glede na oba dobra rezultata lahko sklepamo, da je vzrok za tako nizko intenziteto delnih razelektritev v omenjenih dveh fazah v nekoliko predimenzionirani izolaciji za ta stroj. Slednje pa je, v nasprotju z današnjimi stroji, ki so grajeni z namenom minimizacije stroškov, povsem mogoče.

V tretji (zeleni fazi) je bilo z analizo oblaka impulzov, ki je značilen za to fazo (slika 12), mogoče zaznati nekoliko večjo intenziteto delnih razelektritev, ki glede na obliko grafa PRPD (slika 13) nastajajo na stiku površine izolacije in statorskega jedra. Vendar pa v tem trenutku ta intenziteta še ni bila tako visoka, da bi zbujala skrb. Delne razelektritve na tem mestu nastajajo predvsem zaradi vibriranja statorskih palic, če te niso dovolj zatesnjene.

6.2 Morebitni nadaljnji ukrepi

Poudariti je treba, da tako kratke enkratne meritve ne zadoščajo za zanesljivo diagnostiko izolacije. Še posebej to velja tedaj, ko je veliko šuma in motenj, kar še oteži delo. V prihodnje bi bilo za merjeni generator priporočljivo izvesti enake meritve še večkrat, v določenih časovnih intervalih, z namenom spremljanja trenda naraščanja intenzitete delnih razelektritev. To bi bilo priporočljivo predvsem zaradi faze, v kateri je bilo zaznati večjo aktivnost (zelena faza) zaradi vibriranja statorskih palic. Kot je bilo rečeno, izmerjena vrednost delnih razelektritev v tem trenutku še ni skrb zbujajoča. Če pa bi zaznali rast te vrednosti med posameznimi meritvami, bi bilo vsekakor treba stroj razdreti in učvrstiti statorske palice ter preveriti samo površino izolacije. Zelo priporočljivo bi bilo tudi opravljanje meritev na podobnih strojih. To sta enoti 1 in 2 v HE Solkan. Ker gre za tako rekoč enake generatorje, bi bili rezultati med seboj primerljivi.

7 SKLEP

»On-line« spremljanje delnih razelektritev je zagotovo najbolj dovršen način ugotavljanja stanja statorske izolacije. Sami rezultati so natančnejši zaradi prisotnosti vseh obratovalnih dejavnikov, ki zelo vplivajo na intenziteto delnih razelektritev. Meritve so opravljene med obratovanjem stroja, kar je prednost tako z ekonomskega stališča, kot tudi s praktičnega, saj vemo, da generatorja v neki termoelektrarni ali nuklearki ne moremo kar ustaviti za izvedbo določenih meritev. Bistvena prednost pa je tudi ta, da metoda omogoča ugotoviti, kje v navitju prihaja do težav oziroma kaj bi lahko bilo vzrok nastanka delnih razelektritev. Še vedno pa velja, da s pomočjo več različnih testiranj dobimo natančnejši vpogled v stanje izolacije oziroma njeno kakovost.

Zadnje se je izkazalo tudi na primeru generatorja v HE Solkan. Izključno na podlagi dejstva, da je generator star 30 let, in na podlagi rezultatov »on-line« meritev delnih razelektritev bi lahko sklepali, da je stanje izolacije v rumeni in vijoličasti fazi izjemno slabo. V ta namen so bila opravljena naknadna testiranja »off-line«, ki pa so ta dvom ovrgla. Sklepamo, da je izolacija kljub starosti dobro ohranjena, to pa lahko pripišemo predimenzioniranju izolacije za ta generator.

»On-line« meritve delnih razelektritev so svojo pravo vrednost pokazale pri zeleni fazi. Na podlagi meritev smo zanjo ugotovili, da vsebuje večjo aktivnost delnih razelektritev, ki nastajajo na stiku površine izolacije in statorskega jedra zaradi nezadostne zatesnjenosti palic. Kot je bilo že rečeno, bi bilo treba ta pojav v prihodnje spremljati.

Povečano aktivnost delnih razelektritev sicer lahko zaznamo tudi s klasičnimi testiranji »off-line«. Z opisano tehnologijo pa smo lahko natančneje definirali vzrok nastanka delnih razelektritev in locirali mesto okvare. In kar je najpomembnejše, smo vse te ugotovitve lahko pridobili, ne da bi bilo treba zaustaviti stroj.

LITERATURA

[1] Allianz Insurance, Nemčija (1996-1999), VDE Colloquium, 28. junij 2001.

[2] M. Sasic: »Diagnosis of rotating machines« (seminar, Ljubljana, februar 2013), Iris Power.

[3] A. Piccolo: »Continuous PD Monitoring of AC Rotating Machines«, Omicron Energy Solutions GmbH, 2013.

[4] Z. Matič: »Spremljanje delnih razelektritev v statorskem navitju generatorjev«, članek iz revije ER priročnik, januar 2012.

[5] IEC 60034-27-2 TS Ed.1, Rotating electrical machines – Part 27-2: »On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines«.

[6] V. Warren: »Partial discharge testing: A progress report, Rapid deterioration – PD trends«, Qualitrol - Iris Power, 2013.

[7] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani: »Electrical insulation for rotating machines«, Canada, 2004.

[8] C. V. Maughan: »Maintenance of turbine-driven generators«, Maughan Engineering Consultants, maj 2008.

[9] IEC 60270:2000: »High-voltage test techniques – Partial discharge measurements«.

[10] L.V. Badicu, W. Koltunowicz, M. Koch, A. Piccolo: »Return of experience from continuous PD monitoring of rotating machines«, OMICRON Energy Solutions GmbH, 2013.

[11] V. Warren: »How much PD is too much PD?«, Iris Power Engineering, marec 1998.

[12] C. Stone, M. Sasic, D. Dunn, I. Culbert: »Recent problem experienced with motor and generator windings«, IEEE Paper No. PCIC-2009-6, junij 2009.

Matic Obid je diplomiral leta 2014 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani.

Boštjan Blažič je diplomiral leta 2000, magistriral leta 2003 in doktoriral leta 2005 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je od leta 2007 zaposlen kot asistent. Poleg poučevanja njegovo delo zajema še raziskave na področju kakovosti električne energije, sodobnih kompenzacijskih naprav in razpršenih virov električne energije.