

***F-T* дијаграм парцијалних пражњења код крупних генератора**

Ненад Карталовић¹, Александар Жигић¹, Благоје Бабић¹, Филип Зећ²,
Мирослав Радојчић²

¹Електротехнички институт Никола Тесла, Универзитет у Београду,
Косте Главинића 8а, 11000 Београд, Србија
nenad.kartalovic@ieent.org

²Електротехнички факултет Београд, Универзитет у Београду,
Булевар краља Александра 73

Апстракт – У раду се анализира *F-T* дијаграм парцијалних пражњења као савремени приступ анализи података парцијалних пражњења на високонапонским крупним генераторима. Ради потребног разумевања појава дата је дефиниција појединих типова парцијалних пражњења. Савремена *F-T* анализа импулса подразумева израчунавање његове ефективне фреквенције и времена трајања које су карактеристичне за поједини улазни импулс, односно тип пражњења. Допринос овој методи је дат преко нумеричке симулације и експерименталне потврде процеса парцијалних пражњења односно токова импулса наелектрисања и напона. Симулиран је високонапонски објекат са расподељеним параметрима при чему се пражњење дешава у првом случају непосредно код прикључака напајања и мерно-спрежне јединице а у другом удаљено 10% електрично гледано по дубини импедансе објекта. Електрични параметри објекта су узети према могућим параметрима електро-генератора. Резултати показују да је мерење протока импулса наелектрисања далеко поузданији начин од мерења напонских импулса парцијалних пражњења. Изведен је експеримент на крупном хидрогенератору који је потврдио резултате симулације. Са друге стране показани су разлози расипања вредности на *F-T* дијаграму. За рад је коришћен софтверски пакет Matlab (Simulink).

Кључне речи: парцијална пражњења, генератор, *F-T* дијаграм,

1. Увод

Парцијална пражњења (ПП) у изолационом систему високонапонске машине за последицу имају брзе напонске и струјне импулсе који се

простиру кроз објекат. За мерење је практично доступан одзив средине (електричне мреже објекта за високе фреквенције) на импулсну побуду.

Анализа импулса ПП је била различита током времена примене ове методе у дијагностици високонапонских машина. На почетку су анализиране спектралне снаге радио сметњи насталих од ПП импулса. Касније се прешло на анализу самог импулса преко протеклог наелектрисања и магнитуде. Од значаја су статистичка „магнитуда- фаза“ расподела импулса (мапе пражњења) и статистичке расподеле броја понављања, магнитуда, знака идр. На мапама пражњења се раде одређене анализе форми нагомилавања и њиховог међусобног односа (симетрија, почетак поља у односу на “zero crossing”, величина [1].

У новије време су актуелне анализе временског облика сигнала (вејвлет) анализа, FFT анализа, анализа спектралне снаге, израчунавање ефективне фреквенције сигнала и карактеристичног времена и др.) [2].

У анализи сигнала посебна пажња се поклања потреби издвајања шума и сметњи из корисног сигнала јер се мониторинг парцијалних пражњења одвија у окружењу са присуством бројних сметњи и шума (корона, на спољашњој површини изолатора, у високо напонским везама, ПП у другим системима у близини) [1].

Приступ издвајању сметњи је двојак: хардверски и софтверски. Практична решења увек садрже оба решења у разној сразмери која одговара техничком проблему.

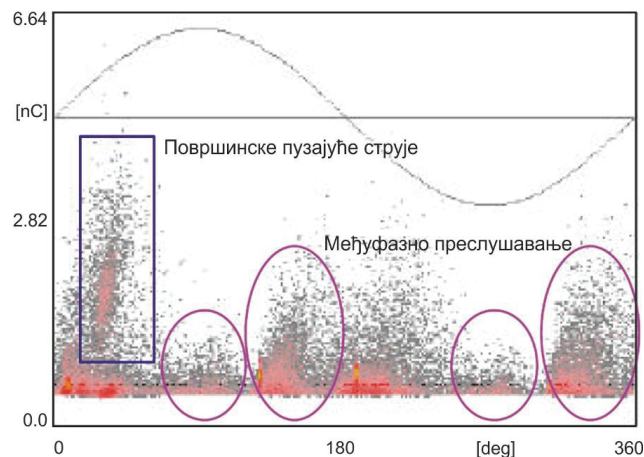
Након издвајања сметњи приступа се идентификацији типова пражњења што у основи подразумева све претходно набројане методе.

Након идентификације типова пражњења приступа се комплексној дијагностици стања изолационог система која поред испитивања парцијалних пражњења подразумева и друге дијагностичке методе. Дијагностика треба да на основу претходно поменутих анализа идентификује потенцијалне дефекте изолационог система, да процени ниво ризика за рад машине и да одреди одређене радње одржавања.

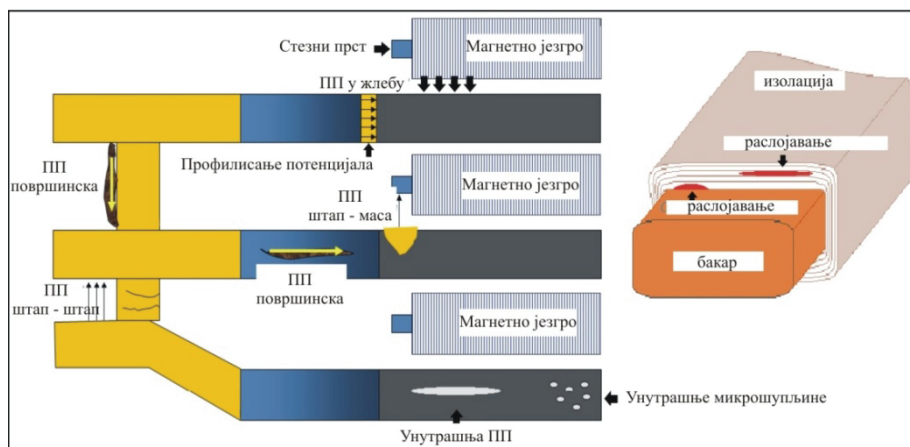
2. Мапе парцијалних пражњења

За анализу парцијалних пражњења користи се низ карактеристичних мапа типа $\varphi - q - n$ (фазна позиција-привидно наелектрисање-број пражњења) које се могу срести у случају пражњења код изолационих система намотаја статора, сл. 1. Треба напоменути да се могу појавити слични облици поља (кластера) за различита пражњења или потпуно различити облици поља за иста пражњења. Поред тога, појављују се разни додатни ефекти као што су интерференције, суперпозиције, преслушавања итд [3,4].

Ради потпунијег разумевања поменутих појава на сл. 2. дат је графички приказ основних типова пражњења код намотаја статора хидрогенератора [5,6]. Појмови су дати са нешто савременијим дефиницијама у односу на стандард IEC 60270 и неке друге [15,16].



Сл. 1. Интегрална мапа пражњења са површинским пузајућим пражњењима и преслушавањима са других фаза [1].



Сл. 2. Приказ основних типова пражњења код намотаја статора хидрогенератора [6].

Парцијална пражњења: према IEC 60270 стандардима, то је локализовани електрични пробој само једног мањег дела чврсте или течне електричне изолације под високим напонем, који не премошћава (не спаја) цео међуелектродни простор.

Наелектрисање парцијалних пражњења тј. наелектрисање које протекне кроз канал варнице је углавном недоступно за мерење јер се

одиграва кроз затворене струјне кругове унутар зоне пражњења (шупљине). Оно што је доступно на спољашњим прикључцима јесу струјни или напонски импулси као последица (одзив) стварног пражњења.

Привидно наелектрисање је наелектрисање протекло у мерном колу током импулса пражњења. Најчешће се претпоставља да је привидно наелектрисање у мерном колу у линеарној сразмери са стварним наелектрисањем кроз канал варнице. То није увек случај, како ће показати овај рад [5]. Привидно наелектрисање се дефинише преко калибрације (нормирања) мерног система. Ако позната количина наелектрисања, инјектована као брзи импулс у мерни систем на мерним прикључцима, изазива исте последице у мерном систему као и мерени импулс, онда су они исти по протоку наелектрисања.

Микрошупљине у изолацији: уграђени унутрашњи дефекти изолације, који се састоје од малих шупљина. Очекивано је да оваква врста дефекта буде присутна у било којој машини због неизбежних несавршености процеса импрегнације.

Раслојавање, унутар изолације: одвајање између слојева изолације својствено самој изолацији. То су равне шупљине унутар изолације код којих је електрично поље попречно у односу на пружање шупљине. Оваква врста дефекта је нарочито опасна.

Раслојавање, одвајање изолације од проводника: одвајање изолације од ВН електроде (бакарног дела). Ови дефекти се састоје од равних шупљина између ВН електроде и изолационог материјала.

Утор, жлеб: лежиште штапа намотаја у магнетном језгру статора генератора.

Глава штапа: део штапа који се налази изван магнетног језгра.

Слабо проводни слој (премаз): премаз високе електричне отпорности на делу штапа који је у лежишту штапа и служи да предупреди пражњења између штапа и језгра.

Слој за профилисање потенцијала (електричног поља): полупроводни слој у делу главе штапа или целој глави штапа који служи за профилисање расподеле електричног поља дуж главе штапа како локално електрично поље не би прешло дозвољене границе.

Преслушавање (интерференција): у електроници, преслушавање је било која појава при предаји сигнала једним каналом или колом преносног система који ствара нежељени ефекат у другом каналу или колу. Преслушавање је најчешће узроковано непожељним капацитивним, индуктивним или проводним спајањем једног кола, или дела кола, или канала, са другим.

Позадински шум: електромагнетски сигнали, који нису у спрези са примењеним напоном, који долазе из окружења, као што су радио фреквенцијски сигнали и остали.

Спољашње сметње: спољашњи сигнали који су у корелацији са примењеним напоном и спрегнути су са мерним колом.

Пражњења у жлебу: пражњења између штапа/намотаја и зида жлеба. Ова пражњења најпре оштећују слабо проводни заштитни слој на штапу, а затим и изолацију.

Пражњења на слоју за профилисање електричног поља: пражњења која се дешавају на споју слабо проводног и полупроводног слоја (премаза) на глави штапа због присуства загађења или деградације самих слојева.

Пражњење између штапова / штапа и земље: ова пражњења се дешавају у ваздушном простору између глава штапова на различитим фазама или између главе штапа и уземљених делова (нпр. између штапа и потисног прста).

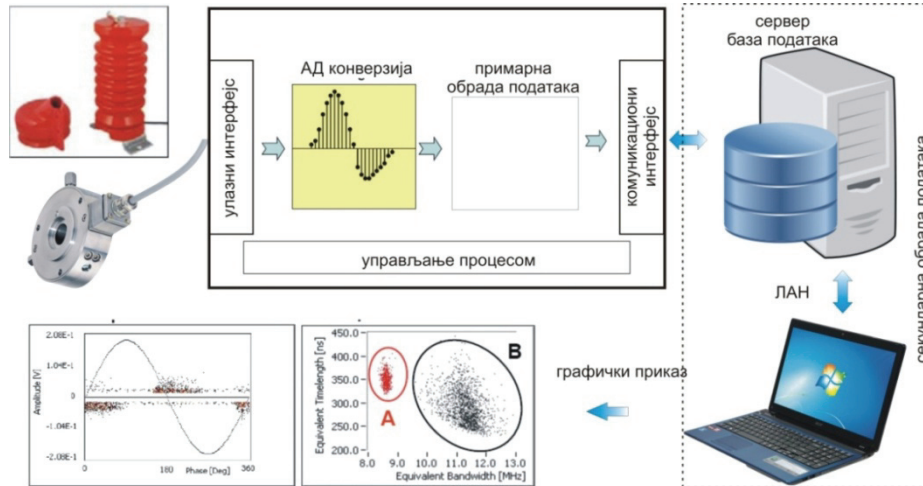
Пражњења у ваздушном зазору: ова пражњења се дешавају у ваздушном зазору између делова изолационог материјала, у зависности са променом оптерећења.

Сметње због побуде: импулси настали због комутације напојних електричних компоненти у побудном колу ротора генератора.

3. *F-T* дијаграм сигнала парцијалних пражњења

Шема аквизиције сигнала парцијалних пражњења приказана је на сл. 3. Сигнал пражњења се са високонапонских објеката издваја помоћу сензора (давача). Преко улазног интерфејса сигнал се уводи у мерни уређај. После филтрирања сигнала и A/D конверзије подаци се архивирају у базу података на серверу. Обрада података не врши се у реалном времену. Поједини типови парцијалних пражњења, односно сметњи се могу значајно разликовати по својој спектралној карактеристици и по времену трајања сигнала. На пример, комутациони сигнали настали од рада тиристорске побуде имају израженије ниже фреквенције у спектру и дуже трајање (звоњаву) импулса. Слично важи за спољашња варничења. Са друге стране, неки врло брзи импулси настали пробојем ваздушне шупљине у изолацији (без присуства електрода) морају имати високе фреквенције и врло кратко трајање.

Фреквентно-временске особине се преко дате *F-T* карактеристике импулса користе за издвајање импулса сметњи и класификацију појединих извора односно типова ПП. За формирање *F-T* (фреквентно - временског) дијаграма врши се нормирање улазних импулса и израчунавање ефективних (карактеристичних) времена *T* и ефективних фреквенција *F* [2,6].



Сл. 3. Аквиизиција и анализа парцијалних пражњења [6].

Полази се од израчунавања нормираног импулса $\bar{s}(t)$ према формули [6]:

$$\bar{s}(t) = \frac{s(t)}{\sqrt{\int_0^L s^2(\tau) d\tau}} \quad (1)$$

при чему је $s(t)$ функција импулса парцијалних пражњења у временском домену а L је стварно временско трајање импулса. Помоћу нормираног импулса израчунава се “тежишно” време енергије импулса током трајања, t_0 [6]:

$$t_0 = \int_0^L t \bar{s}^2(t) dt \quad (2).$$

На основу израчунаог тежишног времена израчунава се еквивалентно време сваког импулса T [6]:

$$T = \sqrt{\int_0^L (t - t_0)^2 \bar{s}^2(t) dt} \quad (3).$$

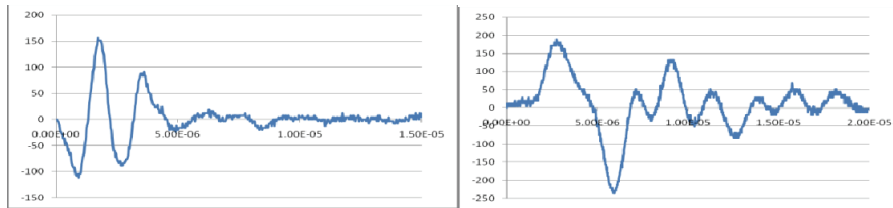
За израчунавање еквивалентног фреквентног спектра импулса користи се брза Фуријеова трансформација. Еквивалентна фреквенција се израчунава према [6]:

$$F = \sqrt{\int_0^\infty f^2 |\bar{S}(f)|^2 df} \quad (4).$$

при чему је $\bar{S}(f)$ Фуријеова трансформација од $\bar{s}(t)$.

На дијаграму F - T сметње ће се појавити груписане у виду грозда (кластера) у зони релативно ниских вредности $F(\text{MHz})$ и високих вредности $T(\text{ns})$ што их јасно разликује од појава ПП у намотају статора и стога могу да се идентификују и искључе из мапе пражњења.

Ради илустрације приказаног поступка израчунавања F - T дијаграма у раду су приказани резултати за два импулса, парцијалних пражњења и комутационог сигнала, чији су временски облици приказана на сл. 4.



Сл. 4. Временски облик: а) сигнала парцијалних пражњења, б) комутационог сигнала (тиристор) [6].

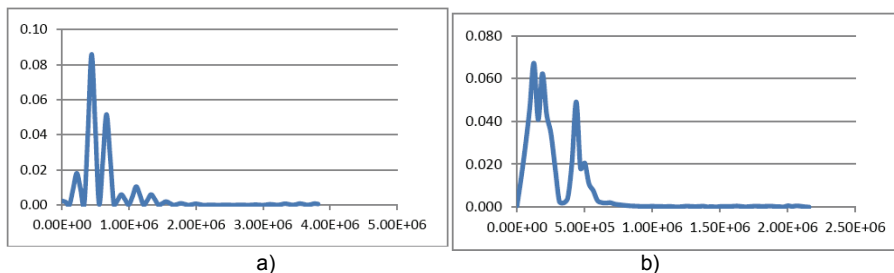
На временским функцијама приказаним на сл. 4 примењена су потребна израчунавања.

Спектри сигнала су нађени применом FFT (брзе Фуријеове трансформације) у софтверу за развој техничких апликација Matlab фирме Mathworks, користећи програмску библиотеку FFTW [5].

Брза Фуријеова трансформација, односно спектар сигнала, се израчунава у броју тачака који је 2^n где се n тако бира да је 2^n први већи број од броја тачака у временском домену (нпр. за број тачака од 1500, $n=11$ односно $2^n=2048$).

Фреквенција одмеравања је изабрана тако да је 2,5 пута већа од максималне фреквентне компоненте сигнала у временском домену како би се спречило преклапање спектра сигнала после одмеравања.

На сл. 5. дата је фреквентно - амплитудна карактеристика сигнала парцијалних пражњења 5(а) и комутационог сигнала који потиче од тиристора 5(б). Дијаграми приказују само магнитуде (апсолутне вредности) спектралних компоненти за позитивне фреквенције [5].



Сл.5. Фреквентно - амплитудна карактеристика: а) сигнала парцијалних пражњења, б) комутационог сигнала (тиристор) [6].

Подаци који се односе на дијаграме на сликама 4 и 5 се користе за израчунавање координата T и F на FT дијаграмима, табела 1.

Табела 1. Подаци за TF координате за два импулса [6].

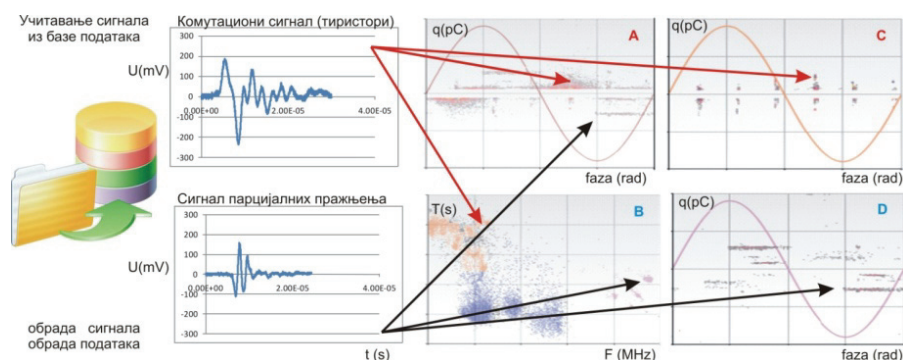
Тип импулса	F координата	T координата
1. Парцијална пражњења	12 869 160 Hz	1.37878E-06 s
2. Комутациони сигнал	745 174 Hz	3.34646E-06 s

На сл. 6 приказан је поступак обраде података система за мониторинг парцијалних пражњења који су били претходно смештени у базу података.

Након учитавања импулса из базе података одређује се привидно наелектрисање импулса $q(pC)$ или магнитуда $U(mV)$ (карактеристична или максимална). На основу свих обрађених података формира се интегрална мапа пражњења, сл. 1, односно сл. 6 дијаграм А. На тој мапи треба идентификовати сметње и ПП феномене, односно тип и карактеристике активности парцијалних пражњења односно кластера нагомилавања.

За конкретан комутациони импулс утврђено је да, према подацима из табеле 1, припада наранџастој зони обележеној стрелицом на дијаграму В, сл. 6. Када се формира редукована мапа пражњења за поменућу наранџасту зону, добија се дијаграм С, сл. 6, са које се јасно види карактер сметњи које стварају тиристори у побуди ротора генератора. Сличном анализом за сигнал парцијалних пражњења се закључује да он припада љубичастом кластеру на FT дијаграму, односно кластеру облика положене линије на интегралној А и редукованој D мапи парцијалних пражњења, сл. 6.

У табели 2 дат је преглед неких карактеристичних величина за сигнале парцијалних пражњења и сметњи за један конкретан хидрогенератор. На сликама 7 и 8 дате су експерименталне (реалне) мапе парцијалних пражњења за посматрани генератор.



Сл. 6. Анализа и дијагностика парцијалних пражњења [6].

Табела 2. Неке карактеристике парцијалних пражњења на хидрогенератору [6].

Ред. бр.	F (MHz)	T (ns)	Тип пражњења	Магнитуда (mV)	Напомена
1.	9.50 - 11.5	220 - 350		200	преслушавање
2.	11 - 13 08 - 15	125 - 250 150 - 300,400	штап-штап	(-) 500, 1000 (+) 50, несим.	фаза -30+ >, 90+ <
3.	11 - 13 10 - 15	125 - 250 150 - 300	жлеб	(-) 500, 1000 (+) 50, неси.	фаза -30+ >, 90+ <
5	1	300-600	Сметње	10-2000	Тиристори
6	2 - 4	200-500,600	Микро шупљине	50	фаза -10+ , 80+
7	7 - 12	100-300	површинско	(-) 500, 1000	глава

F (MHz) - Еквивалентни фреквентни опсег

T (ns) - Еквивалентно време

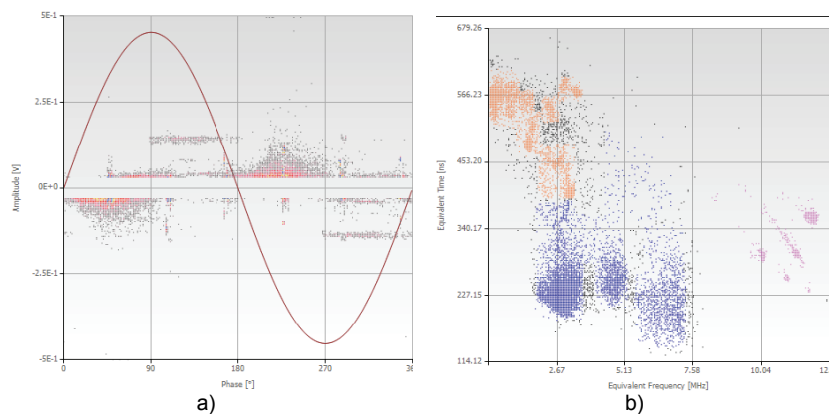
Тип пражњења - Према IEC 60034-27-2

На сл. 7. а) приказана је интегрална мапа парцијалних пражњења за један хидрогенератор, формирана након обраде свих импулса који се за дато мерење налазе у бази. Мапа се добија посебним софтвером који израчунава фазну позицију импулса и магнитуду. Може се уочити да је мапа врло комплексна, да садржи већи број кластера нагомилавања импулса који потичу од различитих пражњења и сметњи.

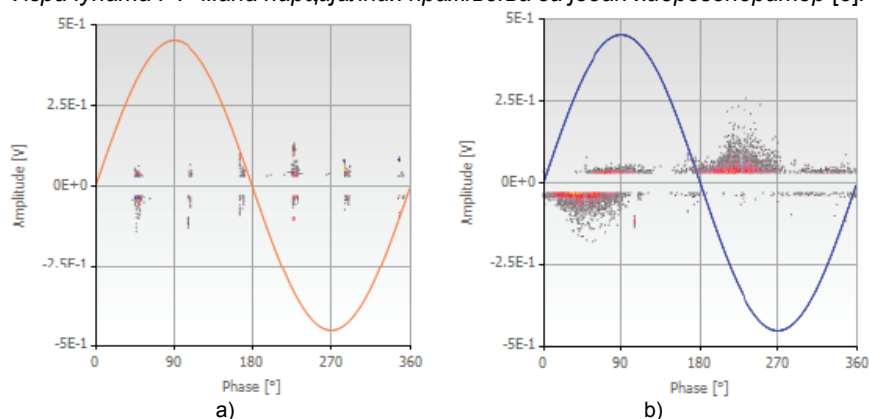
Истовремено се израчунава и FT мапа парцијалних пражњења, сл. 7.б). На њој су накнадно изабране групе кластера означене бојама (наранџастом, плавом, љубичастом) помоћу којих се затим формирају редуковане мапе.

На сл. 8.а) приказана је редукована мапа парцијалних пражњења која потиче од наранџастих кластера са сл. 7 б). Како се са сл. 8 а) може јасно уочити, импулси потичу од комутација односно тиристора побуде генератора.

На сл. 8 б) приказана је редукована мапа парцијалних пражњења која потиче од плавих кластера са сл. 7 б). Како се са сл. 8 б) може јасно уочити, импулси потичу од парцијалних пражњења у шупљинама изолације, највероватније насталих због раслојавања.



Сл. 7. а) Интегрална мапа парцијалних пражњења за један хидро генератор. б) Израчуната FT мапа парцијалних пражњења за један хидрогенератор [6].



Сл. 8. а) Редукована мапа парцијалних пражњења за један хидро генератор, комутациони импулси од тиристора; б) Редукована мапа парцијалних пражњења за један хидро генератор, унутрашња пражњења у изолацији [6].

4. Симулација импулса ПП

Често у пракси имамо случај да се испитивања објекта (на парцијална пражњења) под једним условима недовољно критички преносе на испитивања под другим условима тако да се појављују значајне грешке у интерпретацији резултата. Најчешће се занемарују особине извора за напајање (првенствено импеданса извора), затим односи појединих капацитивности и индуктивности унутар објекта, карактеристике транзијентних појава (преноса и слабљења импулса) и тд. [7,11,12,13].

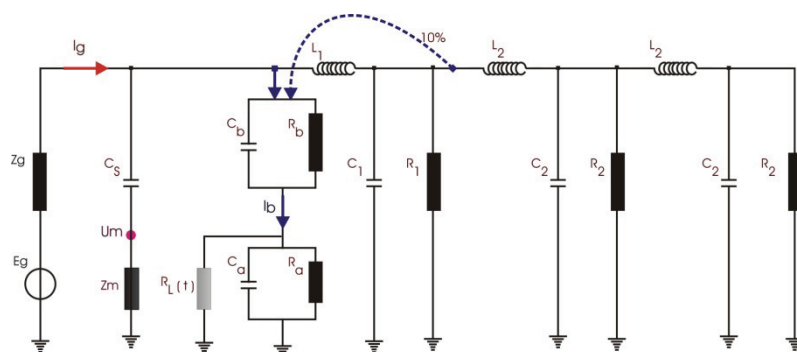
Упоређивање резултата мерења парцијалних пражњења вршених двома различитим опремама на истом испитном објекту, или истом опремом на различитим објектима повезано је са низом потешкоћа. Готово нерешив проблем имамо ако поредимо различите резултате са

различитих објеката добијених различитом опремом. Понављање услова испитивања никада није потпуно, испитни објекат и окружење се могу променити, објекти различитог дизајна могу имати врло различите карактеристике у односу на парцијална пражњења.

На сл.9. представљена је шема електричног кола која симулира простирање електричног импулса парцијалних пражњења. Све вредности параметара кола су изабране тако да се могу појавити на реалном објекту (генератору). Шупљина (несавршеност изоације) у којој се дешавају пражњења представљена је са елементима C_a, R_a односно са C_b, R_b према моделу представљеном у [7].

Табела 3. Параметри кола за симулацију ПП [7].

Импедансе кола	$R(\Omega)$	$L(\mu H)$	$C(\mu F)$
Импеданса ВН извора	1,00	0,01	0,00
Расподељени параметри	0,2 M	0,50	0,50
10% импедансе ВН објекта	1,0 M	0,10	0,10
Импеданса „изнад“ шупљине	100 M	0,00	0,01
Импеданса шупљине	1,0 M	0,00	1,00
Импеданса варнице	1,00	0	0



Сл.9. Електрични модел кола са парцијалним пражњењима у високо-напонском објекту/машини са расподељеним параметрима: $C_1, R_1, L_1; C_2, R_2, L_2$; Остали елементи: C_a, C_b, R_a, R_b - капацитивности односно отпорности изоације у зони шупљине, C_s - капацитивност спрежног кондензатора и Z_m - мерна импеданса спрежне јединице; $R_L(t)$ - временски контролисана импеданса канала варнице; Z_g - одговарајућа импеданса високонапонског извора. Мерене величине су: I_g - струја импулса ПП у колу од стране генератора, I_b - струја импулса (допуне) кондензатора C_b из окружења, U_m - мерни напон на спрежној јединици [7].

Електрични параметри објекта су представљени са $R_1 L_1, C_1$, R_2, L_2, C_2 , при чему је вредност дела „подужне“ импедансе представљене са R_1, L_1, C_1 са око 10% од укупне импедансе. То омогућује да се симулација импулса парцијалних пражњења позиционира 10% по „дубини“ намотаја. У табели 3 представљене су вредности појединих параметра (елемената) кола са слике 9.

Појава пражњења се симулира временски контролисаном импедансом варнице $R_L(t)$ која је за потребе овог модела константна током трајања импулса а бесконачна у остатку времена. У реалним условима та импеданса је врло нелинеарна и стохастична тако да су стварне појаве нешто сложеније од ове анализираних.

Међутим у реалним условима процеси одзива и самог пражњења (варнице) могу имати значајна одступања. Наиме, можемо да имамо случај када се пражњење у шупљини одвија врло брзо ($di/dt \rightarrow \infty$) и кратко (брзо гашење и брзо паљење) јер је енергија варнице врло мала и канал брзо прелази у високу отпорност. Тада је пражњење електрично одвојено од остатка кола импедансама $Z_b(C_b, R_b)$, $Z_2(R_2, L_2, C_2)$ и Z_g и протекла количина наелектрисања је минимална. Накнадна прерасподела наелектрисања између кондензатора C_1, C_2, C_s, C_b и C_a нема значаја за наелектрисање пражњења (јер је варница угашена) али има утицаја на понављање пражњења:

$$q_{pp}^{\min} = \Delta U_a C_a \quad (5)$$

где је ΔU_a промена напона на кондензатору C_a . У случају када количина прерасподеле наелектрисања $q_b(I_b)$ (сл. 9) протекне током трајања варнице (услов велике енергије пражњења), имамо максималну протеклу количину наелектрисања варнице и везу између стварног и привидног наелектрисања:

$$\frac{q_b}{q_{pp}^{\min}} = \Delta U_b \frac{C_b}{C_a + C_b}, \quad \Delta U_b = \Delta U_a \quad (6)$$

Конкретна вредност стварног и привидног наелектрисања ће зависити од конкретне динамике одвијања процеса пражњења, односно паљења и гашења варнице и прерасподеле напона и наелектрисања на комплексним импедансама кола.

Са друге стране поставља се питање колика је измерена количина протеклог наелектрисања на мерном месту које мери импулсну струју у грани генератора $q_g(I_g)$ у односу на место протицања струје кроз кондензатор C_b тј $q_b(I_b)$, сл. 9. Мерење се може вршити, на пример, уређајем за мерење високофреквенцијских струја као што је калем

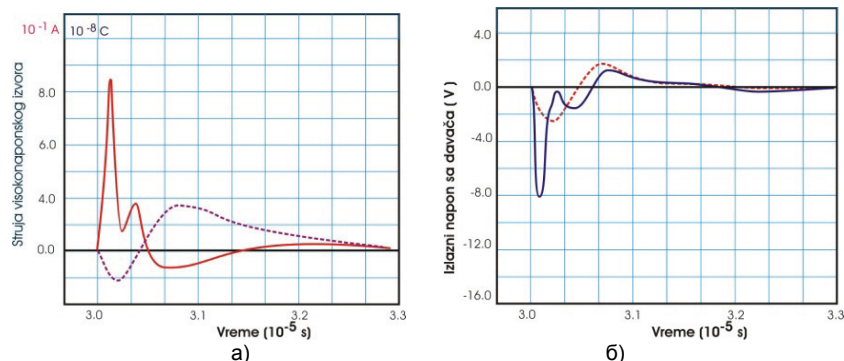
Роговског. Даље се поставља питање каква је веза наелектрисања $q_g(I_g)$ и мереног импулсног напона U_m , сл. 9. Има се у виду да на крају успостављања поновне равнотеже сви кондензатори задржавају исто наелектрисање (протоци $q_{1,2}, q_s \rightarrow 0$) јер им се напон није променио. Једино се разликује наелектрисање на кондензатору C_b због промене конфигурације дате гране и пада напона на C_c за ΔU_c . То наелектрисање долази из генератора путем струјног импулса тако да се, према очекивању, та два наелектрисања, $q_g(I_g)$ и $q_b(I_b)$ практично не разликују, табела 4.

Табела 4. Излазне величине симулације ПП [7].

Ситуација	I_b	$q_b(I_b)$	I_g	$q_g(I_g)$	U_m
импеданса извора $1\ \Omega$	8,52mA	7,50nC	8,32mA	7,42 nC	-8,0V
пражњења на 10% импед.	8,52mA	7,50 nC	-2,1mA	7,24 nC	-2,3V
импеданса извора 5Ω	8,52mA	7,50 nC	-	7,42 nC	-12,3V

У табели 4 су представљени: I_b - максимум (магнитуда) струје привидног наелектрисања, $q_b(I_b)$ - привидно наелектрисање, I_g - максимум струје извора, $q_g(I_g)$ -наелектрисање импулса извора, U_m - максимум мереног напона на спрежној-мерној јединици.

На сл. 10 а) приказан је импулс струје I_g високонапонског извора E_g . Примећујемо велику разлику у импулсима у случају када је парцијално пражњење у близини прикључака (пуна линија) и када је на растојању 10% електричне дужине (импулсне импедансе) од прикључака (испрекидана линија). Према очекивањима, импулс настао „у дубини“ намотаја је знатно „спорији“ и мање магнитуде јер га пригушују подужне импедансе објекта. Међутим, важан резултат симулације је да је количина протеклог наелектрисања иста, табела 4. Мала разлика се објашњава временским границама интеграла односно различитим временским константама. Из истог разлога се разликују наелектрисања $q_g(I_g)$ и $q_b(I_b)$, табела 4. На сл. 10 б) приказан је импулс излазног напона U_m са спрежно-мерне јединице $C_s Z_m$. Примећујемо велику разлику у импулсима у случају када је парцијално пражњење у близини прикључака (пуна линија) и када је на растојању 10% електричне дужине од прикључака (испрекидана линија). Иако су пражњења иста, није могуће наћи нумерички егзактну везу између протеклог наелектрисања $q_b(I_b)$ и напонског одзива.



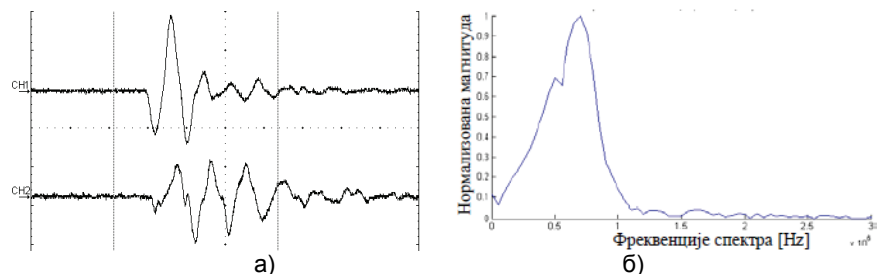
Сл.10. а) Струја I_g високонапонског извора E_g . У случају када је парцијално пражњење у близини прикључака (пуна линија) и када је на растојању 10% електричне дужине од прикључака (испрекидана линија); б) Излазни напон U_m са спрежне јединице $C_s Z_m$. У случају када је парцијално пражњење у близини прикључака (пуна линија) и када је на растојању 10% електричне дужине од прикључака (испрекидана линија) [7].

Симулација показује да је интеграл струјног импулса кроз мерну импедансу (односно протекло наелектрисање) једнак нули. Наиме, коначан напон на мерном кондензатору C_s после прелазног режима остаје исти као и на почетку импулса.

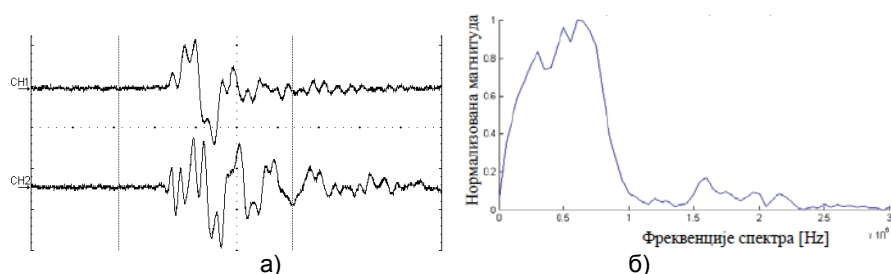
Међутим, посебно је занимљива комбинација мерења парцијалних пражњења преко наелектрисања струјног импулса генератора $q_g(I_g)$ и преко магнитуда напона са спрежне јединице U_m . Прва величина даје привидно наелектрисање у апсолутном износу а друга величина даје практично информацију о „дубини“ пражњења у односу на прикључке. Упоредном анализом можемо добити врло значајне резултате.

5. Експериментална анализа импулса ПП-а

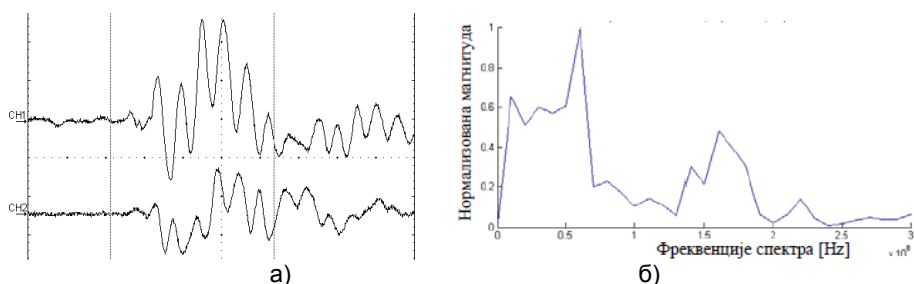
Вршена су експериментална истраживања на новом крупном хидро генератору снаге 211 MVA. Током ревитализације генератора су биле доступне кабловске главе дуж намотаја. Намотај се састоји од 9 грана смештених у 756 утора. Побуда импулсним генератором (20nC) је постављана "дуж" намотаја (једне гране), на самом ВН почетку намотаја, затим на око 10% од ВН почетка намотаја и на око 20% од ВН почетка намотаја, као и у звездишту намотаја. На сликама 11,12 и 13 дати су временски облици одзива на импулсну побуду на давачима парцијалних пражњења на ВН изводу гране и у звездишту, са повезаним звездиштем као и спектрална анализа датог импулса. Одзив је мерен помоћу Хамерг осцилоскопа са временском базом од 200 ns/div. Спектар импулса је добијан помоћу посебног алгорита [8].



Сл.11. а) мерење одзива на импулсну побуду на почетку ВН намотаја (са давача CH1-200mV/div, са звездишта CH2-100mV/div); б) спектар импулса на давачу.



Сл.12. а) мерење одзива на импулсну побуду на 10% од почетка ВН намотаја (са давача CH1-100mV/div, са звездишта CH2-50mV/div); б) спектар импулса на давачу.



Сл.13. а) мерење одзива на импулсну побуду на 20% од почетка ВН намотаја (са давача CH1-20mV/div, са звездишта CH2-50mV/div); б) спектар импулса на давачу.

Са слика 11,12 и 13 се види да се временски облик импулса парцијалних пражњења мења са дужином пута кроз намотај, тј поприма све више осцилаторни карактер са израженим слабљењем магнитуда. Такође се мења и магнитудно спектрална карактеристика сигнала са дужином пута тако што се спектар са високих фреквенција помера према ниским фреквенцијама. Померање фреквенција је једно од доприноса за расипање вредности на $F-T$ дијаграму, сл. 6, 7 и 8. Други допринос расипању је сама природа пражњења која је стохастична, [9, 14].

6. Закључак

У раду се анализира савремени приступ аквизицији и обради сигнала и података парцијалних пражњења на високонапонским крупним генераторима. Парцијална пражњења су изражено стохастичке природе. Стога је статистички приступ анализи сигнала и података неопходан. Анализа сигнала и података у првом реду треба да омогући издвајање односно класификацију појединих типова пражњења и посебно сигнала сметњи. У раду је приказана савремена *FT* анализа улазног сигнала, која подразумева израчунавање ефективне фреквенције и времена трајања импулса које су карактеристичне за поједини тип пражњења. Како се у раду показало, ова метода је супериорна у односу на досадашње класичне методе.

Рад се бави симулацијом парцијалних пражњења користећи један од стандардних модела за симулирање објекта у коме се дешавају парцијална пражњења. Анализирани су напонски и струјни импулси под дефинисаним условима. Симулација показује колико је велики значај места пражњења на пропагацију напонско-струјног импулса кроз преносну импедансу објекта. Са друге стране показује да је вредност протекле количине наелектрисања инваријантна у односу на место пражњења. Као резултат симулације се намеће закључак да привидно наелектрисање треба мерити преко интеграљења струјног импулса напојног генератора на неком од погодних места.

Са друге стране напонско мерење импулса парцијалних пражњења (као у осталом и струјно мерење) има својих предности јер садржи информације о месту пражњења („дубини пражњења“) у смислу његовог удаљења од мерних прикључака. Упоредном анализом можемо добити значајне информације.

Део резултата симулације је доказан експерименталним истраживањима на крупном хидрогенератору.

Наставак овог рада треба да буду даља експериментална и теренска испитивања утицаја појединих параметара објекта и испитне опреме на поједине резултате мерења, тј да се потврде резултати симулације. То би довело до унапређења опреме и мерења и анализе парцијалних пражњења.

7. Литература

- [1] Електропривреда Србије, Електротехнички институт Никола Тесла, “Формирање дијагностичког центра за реализацију мониторинга парцијалних пражњења у ис на генераторима у електранама ЕПС”, Београд 2013.
- [2] B. Boashash, *Time frequency signal analysis and processing*. Amsterdam: Elsevier, 2003.

- [3] R. Altenburger, C. Heitz and J. Timmer, "Analysis of phase-resolved partial discharge patterns of voids based on a stochastic process approach", *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 35, no. 11, pp. 1149-1163, 2002.
- [4] Y. S. Lim and J. Y. Koo, „Comparative Analysis of Partial Discharge Patterns from Different Artificial Defects by Means of Conventional Phase-Resolved Partial Discharge Analysis and a Novel Chaotic Analysis of Partial Discharge, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 42, No. 6, June 2003, pp. 755-764
- [5] *High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*, IEC 60270, 2000.
- [6] Н. Карталовић, И. Миљковић-Јевтић, Ф. Зеџ, А. Жигић, Б. Бабић, „Савремене методе мониторинга и анализе парцијалних пражњења код великих генератора“, 59. ЕТРАН, 8.-11. јуна 2015, Сребрно језеро, Србија, ЕЕ, ЕЕ2.3
- [7] Н. Карталовић, С. Милосављевић, И. Јевтић-Миљковић, „Нумеричка Анализа наелектрисања парцијалних пражњења“, *Зборник радова 54. Конференције за ЕТРАН*, Доњи Милановац, јун 2010.
- [8] M. Frigo, and S. G. Johnson, "FFTW: An Adaptive Software Architecture for the FFT," *Proc. of the Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 3, 1998, pp. 1381-1384.
- [9] Ненад Карталовић, „Стохастичност диелектричне чврстоће гасне изолације“, дисертација, ЕТФ Београд, 2000.
- [10] Adolf J. Schwab, *Hochspannungs Messtechnik: Messgerate und Messverfahren*, Springer-Verlag, Heidelberg, 1981.
- [11] M. Toader, D. Mariana, „Electrical insulation study using partial discharge model“, *Electrotechnical Conference, 2000. MELECON 2000. 10th Mediterranean*, Volume 3, Issue , 29-31 May 2000 Page(s): 1060 - 1063.
- [12] А. Милошевић, Н. Карталовић, Б. Гавриловић, М. С. Савић, „Нумеричко моделовање параметара парцијалних пражњења“, ЕТРАН 51 Херцег Нови 2007, НМ9.
- [13] N. Kartalović, D. Kovačević, S. Milosavljević. „An advanced model of partial discharge in electrical insulation“, *Facta Universitatis, Niš, Seria, Elec. Energy*, Vol 24, No1, 2011, pp 43-57.
- [14] P. Osmokrovic, N. Kartalovic, N. Atanackov, D. Ostojic, „Model Law for Gas Isolated Systems“, *IEEE Transactions on Plasma Science*, February 2000, Vol 28, 298-302.
- [15] C. Azuaje, A. Millan, "Stator Deformation of Large Hydrogenerators and Its Effects on the Machines", *Proc. Of Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2006. TDC '06. IEEE/PES, 15-18, Aug., 2006, pp.1-5
- [16] Peter H.F. Morshuis, „Degradation of Solid Dielectrics due to Internal Partial Discharge: Some thoughts on progress made and where to go now“, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 12, No. 5; October 2005

This paper analyses the use of equivalent frequency-equivalent time diagram (*FT* diagram) of partial discharge (PD) pulses, regarding voltage and charge pulses. The described approach is widely used for large generators insulation testing purposes. For sake of clarity the certain types of partial discharge phenomena in insulation of electric machines are described and explained. The contemporary *FT* analysis of PD pulses is based on equivalent frequency and equivalent pulse time width derived by signal processing techniques and calculations. The numerical simulation derived and experimentally derived results are compared and evaluated for each kind of PD pulses (voltage or charge pulses). Next, the high voltage (HV) device with distributed parameters connected to HV voltage source is simulated. The parameters used in the simulation correspond to one real large synchronous generator. The obtained results lead us to the conclusion that the processing of the strain of PD charge pulses gives much more accurate results than the processing of the strain of PD voltage pulses. The experiment conducted on a large hydro generator confirmed the previous conclusions. At a same time, the sources of recorded results dispersion are shown and explained.

Keywords: partial discharges, large generators, frequency-time diagram

Frequency-Time Diagram of Partial Discharge Pulses Recorded on Large Generators

Рад примљен у уредништво: 17.11.2015. године
Рад прихваћен: 12.12.2015. године