

Снимање фреквентног одзива намотаја методом SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) – примери након кварова на енергетским трансформаторима и утицаји на снимљене одзиве

Момчило Милић¹, Ђорђе Јовановић¹, Марко Димитријевић¹

¹

Универзитет у Београду, Електротехнички институт Никола Тесла, Косте Главинића 8а, 11000 Београд, Србија

momcilo.milic@ieent.org

Кратак садржај: Метода снимања фреквентног одзива намотаја трансформатора *SFRA (Sweep Frequency Response Analysis)* представља неконвенционалну методу која је нашла примену у анализи геометрије намотаја енергетских трансформатора. У новије време ова метода постаје готово неизоставан део фабричких испитивања трансформатора, при чему се тада снимљени фреквентни одзиви сматрају референтним за сва будућа поређења. Метода се примењује на теренским испитивањима када се сумња на механичке кварове услед деловања динамичких сила током погона, као и приликом транспорта трансформатора. Поред тога може указивати и на одређене електричне кварове. У раду ће бити приказани примери снимљених фреквентних одзива на трансформаторима који су испали из погона деловањем одговарајуће заштите. Такође, дати су примери различитих утицаја на саме фреквентне одзиве који могу бити погрешно протумачени и навести на грешку у самој процени стања геометрије намотаја.

Кључне речи: SFRA метода - Фреквентни одзив намотаја – Електрични и механички кварови енергетских трансформатора - Геометрија намотаја.

1 Увод

SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) је метода за анализу фреквенцијског одзива енергетских трансформатора којом може да се

процени да ли је дошло до деформација и/или померања језгра и намотаја трансформатора, без отварања трансформатора.

SFRA метода је у стању да открије бројне врсте кварова на трансформатору, механичке и електричне кварове. Главна примена ове методе је за откривање механичких кварова, јер се неки од њих могу детектовати само са SFRA методом. Електрични кварови се лако могу открити помоћу SFRA методе, али се такође могу детектовати и са другим методама, тако да се неке методе често раде у комбинацији са SFRA методом, ради веће сигурности када се посумња у квар. Кварови који се могу детектовати SFRA методом су:

Електрични кварови:

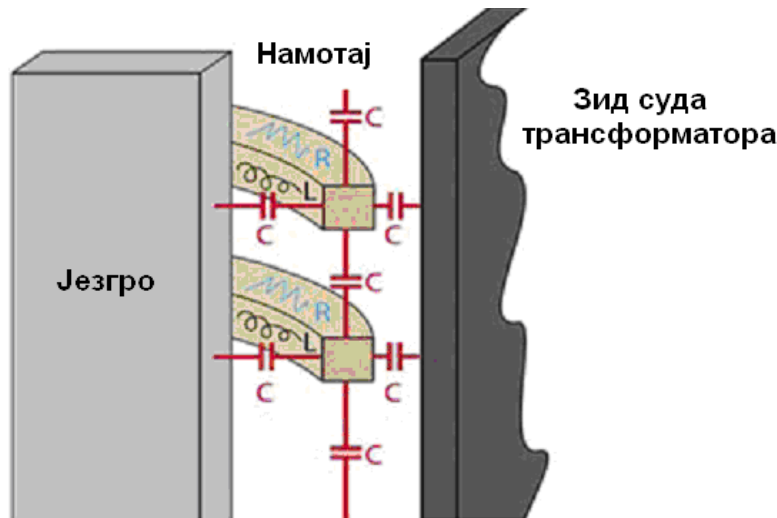
1. Кратко спојен навојак или отворен намотај
2. Лоше уземљење суда трансформатора

Механички кварови:

1. Деформације намотаја - аксијалне и радијалне деформације
2. Померање намотаја високог напона у односу на намотај ниског напона
3. Делимично рушење намотаја
4. Померање језгра
5. Олабављеност намотаја или стезне структуре

2 Теоријски основи и мерна метода

Трансформатор може да се посматра као комплексна електрична мрежа расподељених RLC елемената (слика 1), састављена од отпорности бабра R , индуктивности намотаја L , капацитета C између суседних навојака, сваког намотаја према другом намотају, као и капацитета навојака и намотаја према маси, коју представљају језгро и суд трансформатора. Ипак, поједностављено еквивалентно коло са скупом RLC компоненти може да се користи да се објасни принцип фреквенцијског одзива. RLC елементи трансформатора формирају бројна редна и паралелна резонантна кола која су зависна од фреквенције и која у суштини одређују јединствени фреквенцијски одзив трансформатора.

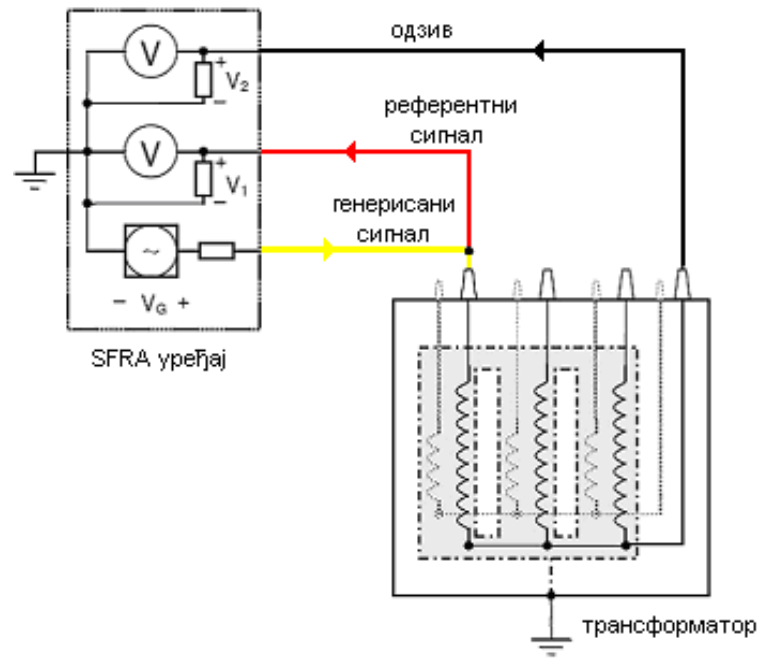


Слика 1: RLC компоненте трансформатора

Било који облик физичког оштећења трансформатора доводи до промене његове RLC мреже. Промене могу да се детектују методом фреквенцијског одзива. Мерење фреквенцијског одзива се врши пропуштањем простопериодичног сигнала променљиве фреквенције кроз намотаје трансформатора и мерењем улазних и излазних сигнала. Однос ова два сигнала (излаз/улаз) даје потребан одзив трансформатора. Овај однос се назива функција преноса трансформатора која је зависна од фреквенције. Функција преноса на свакој фреквенцији је мера импедансе RLC мреже трансформатора. Геометријске деформације унутар трансформатора мењају RLC мрежу, мења се функција преноса и долази до промене фреквенцијског одзива (промена резонантних фреквенција), што указује на могућност постојања квара [1,2].

SFRA метода се заснива на снимању одзива на простопериодичан (синусоидалан) сигнал променљиве учестаности у опсегу од 20 Hz до 2 MHz. За сваку фреквенцију посебно се мери улазни сигнал (референтни) V_1 на једном крају намотаја и излазни сигнал (одзив) V_2 на другом крају намотаја (Слика 2). Однос ова два сигнала даје функцију преноса трансформатора $H(j\omega)$ која је представљена једначином 1.

$$H(j\omega) = \frac{V_1(j\omega)}{V_2(j\omega)} \quad (1)$$



Слика 2: Шема веза уређаја и објекта испитивања при SFRA мерењу

Из одзива који представља однос сигнала V_1 и V_2 , пошто су у питању простопериодичне величине, могу се извући две информације: амплитуда и фазни став. За анализу фреквенцијског одзива углавном се користи амплитудска карактеристика.

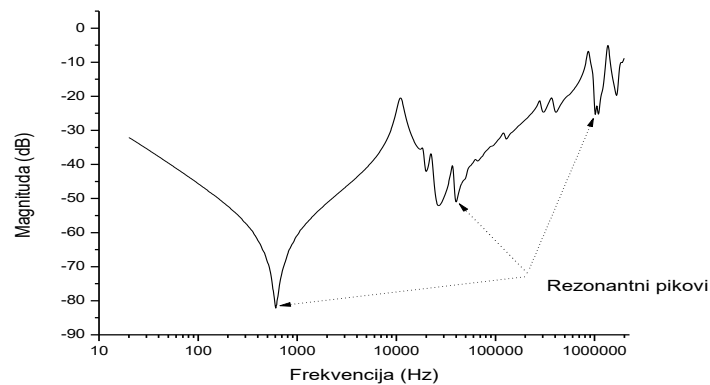
Амплитуда је представљена једначином:

$$A(\text{dB}) = 20 \cdot \log_{10}(H(j\omega)) \quad (2)$$

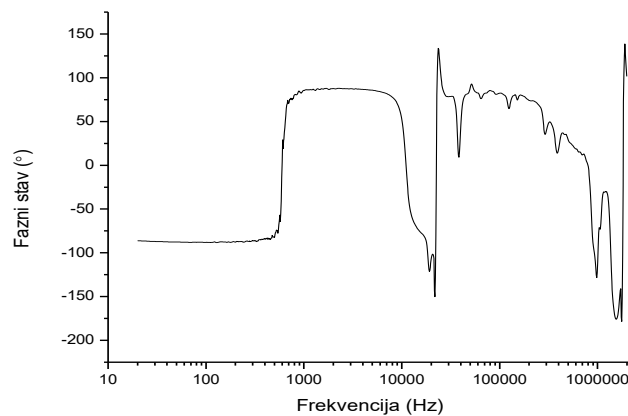
Фазни став је представљен једначином:

$$\phi = \tan^{-1}(H(j\omega)) \quad (3)$$

Резултати фреквенцијског одзива се приказују са две криве, једна представља амплитуду (dB/Hz), а друга фазни став (степен/Hz) одзива. Криве могу бити у логаритамском или линеарном формату. Типичан фреквенцијски опсег за SFRA одзив је од 20 Hz до 2 MHz, са 200 узорака по декади (логаритамској) [1]. На сликама 3 и 4 дати су примери изгледа амплитудске и фазне карактеристике фреквентног одзива једне фазе примарног намотаја трансформатора спреге YNd [3].



Слика 3: Пример амплитудске карактеристике фреквентног одзива једне фазе намотаја примара трансформатора спреге YNd



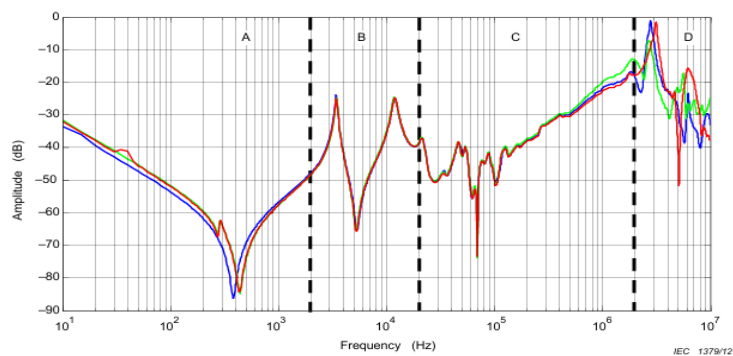
Слика 4: Пример фазне карактеристике фреквентног одзива једне фазе намотаја примара трансформатора спреге YNd

Различите врсте мерних шема се користе при мерењу фреквенцијског одзива на енергетским трансформаторима, које су дефинисане у референтним документима [4] који се односе на SFRA мерну методу. Основна мерења која се изводе приликом снимања фреквенцијског одзива су по шеми празног хода и по шеми кратког споја, а испитивања могу да се изврше и по шемама при којима се испитује капацитивност и индуктивност између намотаја. На слици 5 приказане су мерне шеме, V_s је генерисани сигнал, а V_r одзив [1].



Слика 5: Мерне шеме при СФРА мерењу

Приликом анализе добијене амплитудске карактеристике, односно снимљеног фреквентног одзива намотаја углавном се разматрају 4 фреквентна опсега према стандарду IEC 60076-18:2012 [5] (слика 6).



Слика 6: Приказ утицаја на фреквентни одзив намотаја трансформатора према одређеним фреквентним опсезима

То су следећи фреквентни опсези:

Опсег А. до 2 kHz, област утицаја магнетног језгра,

Опсег В. опсег између 2 kHz–20 kHz, област утицаја веза између намотаја;

Опсег С. опсег између 20 kHz–2 MHz, област утицаја везана највише за геометрију намотаја;

Опсег D. опсег између 2 MHz– 10 MHz, утицај положаја мерних каблова, самог начина мерења и уземљења.

У данашње време на тржишту постоји неколико произвођача инструмената за мерење фреквентног одзива намотаја методом SFRA. У наредним примерима коришћени су мерни инструменти *Doble M5200* [6] и *DVPower FRA 500* [7]

3 Примери фреквентних одзива намотаја трансформатора након квара и различити утицаји на изглед снимљених кривих

Приликом мерења фреквентних одзива вероватноћа да трансформатор има проблем је значајно мања од вероватноће да сам испитивач, односно особље које врши мерење направи грешку. Постоје разни фактори који потенцијално могу да утичу на фреквентни одзив и специфични су у зависности од саме јединице која се испитује. Генерално тежња је да се ти фактори елиминишу или се изврши њихова идентификација како би сав фокус могао да буде усмерен на сам трансформатор [8].

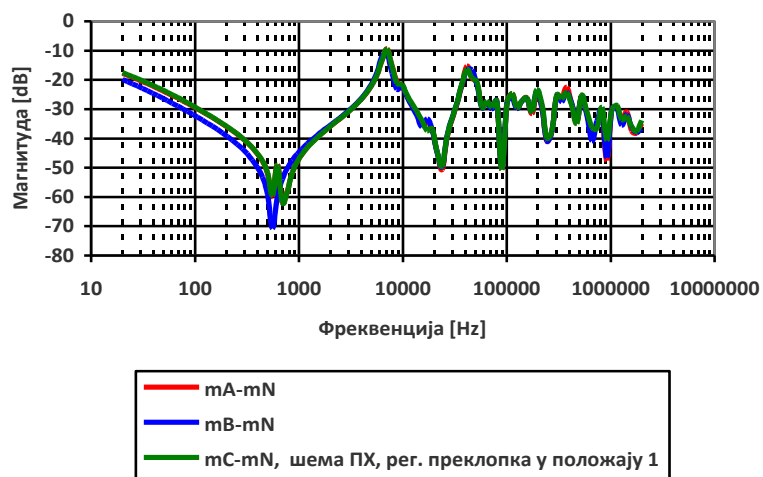
Кроз наредних неколико примера биће приказани резултати снимања фреквентног одзива намотаја на трансформаторима који су испали из редовног погона да би се накнадним електричним испитивањима утврдило постојање квара, односно немогућност поновног пуштања трансформатора у нормалан рад. Такође, биће дат осврт на случајеве када се може десити да дође до погрешног тумачења снимљених фреквентних одзива, као на пример код трансформатора који имају регулатор напона или код тронамотајних трансформатора са терцијарним намотајем који је спрегнут у троугао.

3.1 Пример 1

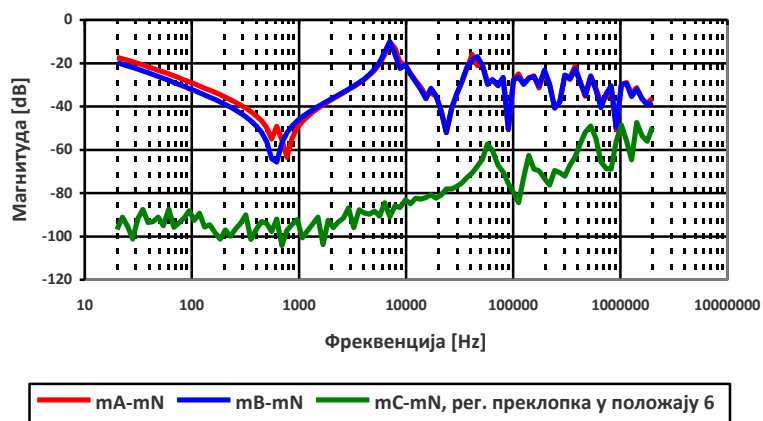
У овом примеру реч је о трансформатору ознаке *T-1* напонског нивоа 110(VН)/36.75(СН)/10.5 kV(НН), снаге 20 MVA чија је спрега YNyn0d5. Наиме, у току нормалног рада трансформатора дошло је до његовог испада из погона деловањем диференцијалне заштите. Након хитних електричних испитивања најпре је на основу испитивања електричног изолационог система намотаја трансформатора измерена абнормална вредност фактора диелектричних губитака у мерном споју СН:НН, док вредност капацитивности није могла да буде измерена. Та чињеница, као и измерена већа вредност $\tan\delta$ и капацитивности (преко 6 пута већа вредност у односу на претходно редовно испитивање) у мерном споју СН:М, указала је одмах на сумњу на груби дефект намотаја СН. Поред тога, мерењем струја и снага губитака са 36.75 kV стране утврђено је да се у фази mC не успоставља струја што наводи на закључак да је намотај ове фазе у прекиду.

На сликама 7 и 8 приказани су фреквентни одзиви намотаја СН приликом редовних испитивања током 2022. и ванредних 2023. године, док је на слици 9 дат упоредан графички приказ по фазама како би се јасно видела разлика у снимљеним одзивима по фазама пре и након квара. Сва мерења су вршена у шеми празног хода при напајању са СН. На сликама 8 и 9 се види одступање фазе mC у односу на преостале две фазе дуж читавог фреквентног опсега, при чему се не може јасно

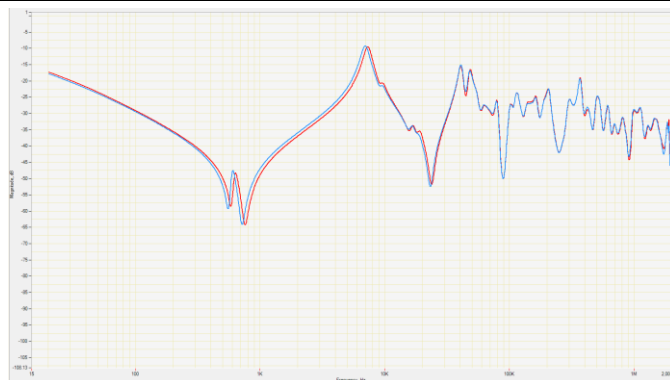
прецизирати квар, али је извесно да је у питању груб дефект самог намотаја у тој фази.



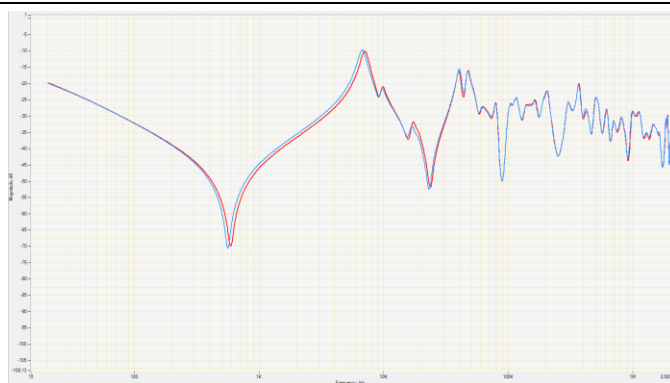
Слика 7: Трансформатор Т-1; Напајање на СН док су ВН и НН отворени, теме троугла НН затворено – испитивање из 2022. године



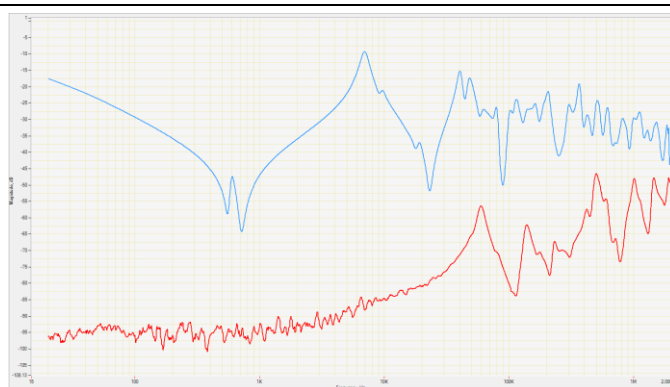
Слика 8: Трансформатор Т-1; Напајање на СН док су ВН и НН отворени, теме троугла НН затворено - испитивање из 2023. године



а) фаза mA (2023. година, 2022. година)



б) фаза mV (2023. година, 2022. година)



в) фаза mS (2023. година, 2022. година)

Слика 9: Упоредни приказ фреквентних одзива намотаја СН трансформатора Т-1 по фазама за 2023. и 2022. годину (након и пре квара) а) mА, б) mВ, в) mС

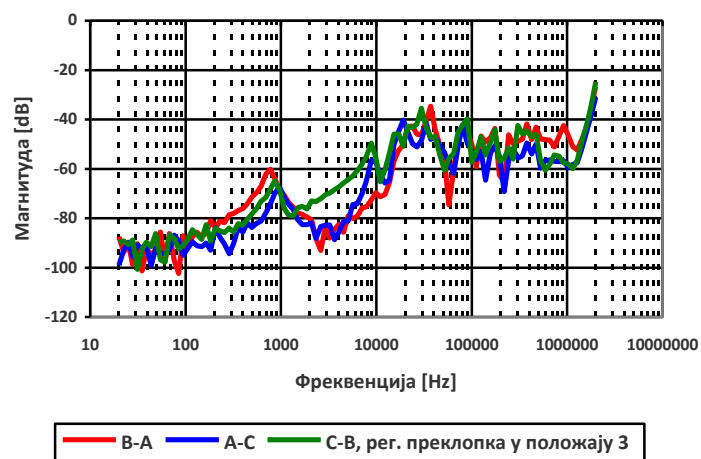
3.2 Пример 2

Кроз пример 2 приказан је случај трансформатора ознаке T-2, напонског нивоа 35(BH)/10.5 kV(HH), снаге 4 MVA, спреге Dy5 који је испао из погона деловањем Бухолц релеја, а на основу резултата хемијске анализе узорка уља затражено је да се изврше електрична испитивања како би се утврдила способност трансформатора за даљи погон.

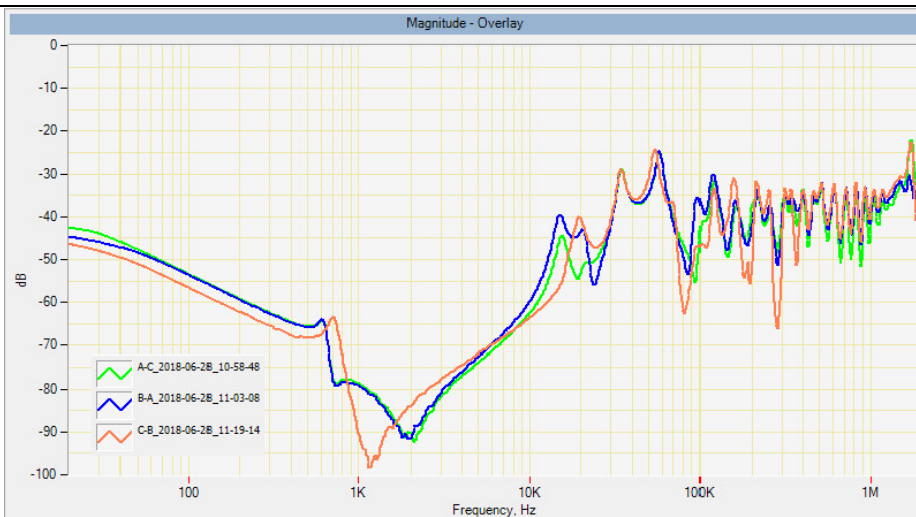
Мерење отпора изолације на почетку испитивања указивало је на проблем на намотају ВН јер су добијене ниске и незадовољавајуће вредности. Одмах затим мерењем струја магнећења установљено је да не може да се успостави струја у споју „C-AB“ што је навело на сумњу да постоји проблем у фази „C“ намотаја 35 kV. Ту сумњу потврдило је мерење електричних отпорности намотаја на ВН страни, при чему је измерена вредност у споју „A-B“ износила 2902 mΩ, док у спојевима „B-C“ и „C-A“ није могла да се успостави струја, на основу чега се дошло до закључка да негде у фази „C“ постоји прекид. Мерења су вршена у позицији бр. 3 бестеретне регулационе преклопке (БРП). Затим је извршено померање БРП кроз све позиције и мерењем омских отпора је утврђено да бирачки део БРП није у споју са фазом „C“ намотаја 35 kV.

Том приликом експериментално је извршено и снимање фреквентних одзива намотаја предметног трансформатора. Имајући у виду да се ради о трансформатору не тако велике снаге, испитивање методом SFRA на оваквим трансформаторима није пракса изузев када дође до сумње на деформацију намотаја или могуће електричне или механичке кварове.

У ситуацијама када не постоје референтни снимци, односно када никада пре нису вршена испитивања методом SFRA или нема доступних података, поређења снимљених фреквентних одзива могуће је извршити са такозваним „сестринским“ трансформаторима (под термином „сестрински“ мисли се на трансформаторе исте номиналне снаге, напона, струје, спреге итд.). У том случају важно је да трансформатори чији се одзиви пореде буду истих карактеристика. У нашем примеру није било могуће пронаћи „сестрински“ трансформатор истих карактеристика, али је за поређење узет трансформатор другог произвођача и дупло веће снаге док су напонски нивои и спрега трансформатора исти. Оно што је евидентно, без обзира на разлике у конструкцији трансформатора, је то да одзиви на трансформатору који има квар нетипични, тј. неочекивани, а на исправном трансформатору имају правилне и очекиване облике уз врло добро међуфазно поклапање што је приказано на сликама 10 и 11.

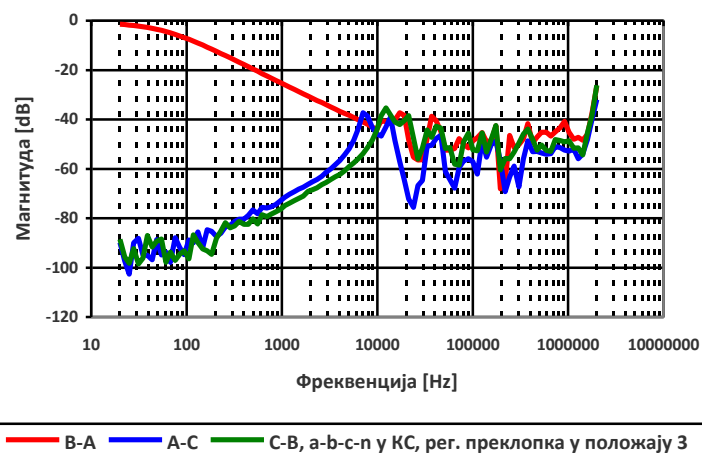


а) Одзиви трансформатора *T-2* који је претрпео квар; Шема празног хода, напајање на ВН, НН отворен

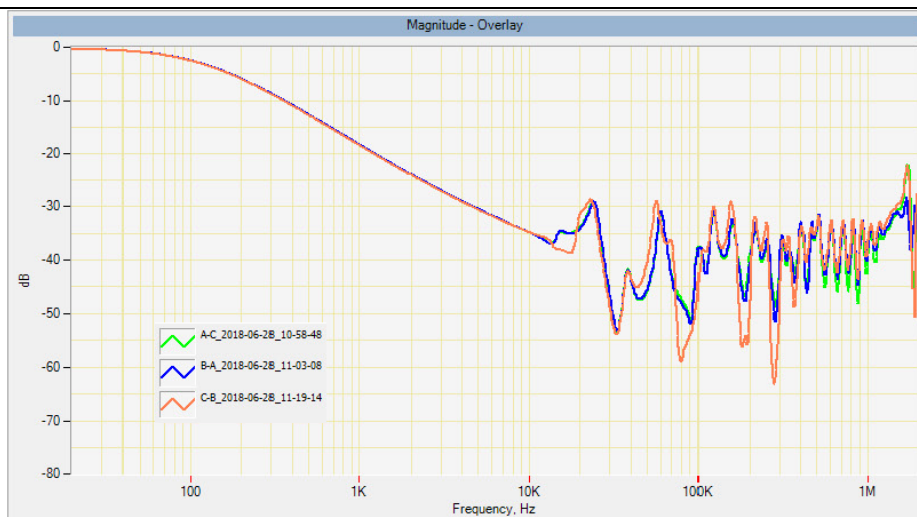


б) Одзиви трансформатора *T-2* без квара; Шема празног хода, напајање на ВН, НН отворен

Слика 10: Приказ фреквентних одзива намотаја ВН по фазама за трансформатор *T-2* са кваром а) и без квара б) у шеми празног хода



а) Одзиви трансформатора који је претрпео квар; Шема кратког споја, напајање на ВН, НН кратко спојен



б) Одзиви трансформатора без квара; Шема кратког споја, напајање на ВН, НН кратко спојен

Слика 11: Приказ фреквентних одзива намотаја ВН по фазама за трансформатор Т-2 са кваром а) и без квара б) у шема кратког споја

На слици 10а) уочљиво је да постоје евидентне разлике и неправилности у снимљеним одзивима, при чему да готово нема никаквог поклапања дуж читавог фреквентног опсега, док на слици 10б) постоји не идеално, али веома добро поклапање фреквентних одзива уз

правилне облике и очекиване међуфазне разлике по одређеним мерним спојевима карактеристичне за испитивани трансформатор.

На слици 11а) се види да одзив у мерном споју „В-А“ има очекиван облик, док се то не може рећи за одзиве у мерним спојевима „А-С“ и „С-В“, док на слици 11б) снимљени фреквентни одзиви намотаја имају веома добро међуфазно поклапање уз незнатне разлике.

3.3 Пример 3

Овај пример илуструје утицај отвореног, односно затвореног темена троугла терцијара (ТН) на фреквентни одзив намотаја. Наиме током 2018. године у склопу редовних профилактичких испитивања трансформатора на терену, извршено је снимање фреквентних одзива намотаја трансформатора Т-3 110/36.75/10.5 kV, 31.5 MVA, Yy0d5, при чему је у шеми празног хода при напајању са стране примара уз отворен секундарни намотај било уочљиво јасно неподударање снимљених кривих у фреквентном опсегу 2-20 kHz у односу на референтне снимке из 2013. године. На слици 12 приказан је снимак одзива фазе „В“ из 2018. године и то црвеном бојом за случај отвореног темена троугла, док је плавом бојом снимљен одзив при затвореном темени троугла намотаја ТН.



Слика 12: Фреквентни одзиви намотаја Т-3 у фази „В“ за случај *отвореног* и *затвореног* темена троугла намотаја терцијара – 2018. година

На слици 12 се јасно, зеленом бојом уоквирено, види разлика у снимљеним одзивима за одређени опсег фреквенција, док слика 13 даје приказ снимљених кривих из 2018. (црвена боја) и 2013. године (плава боја) за случај отвореног темена троугла намотаја ТН као потврду на сумњу у разликама фреквентних одзива.



Слика 13: Фреквентни одзиви намотаја Т-3 у фази „В“ за случај отвореног темена троугла намотаја терцијара – 2018. година и 2013. година

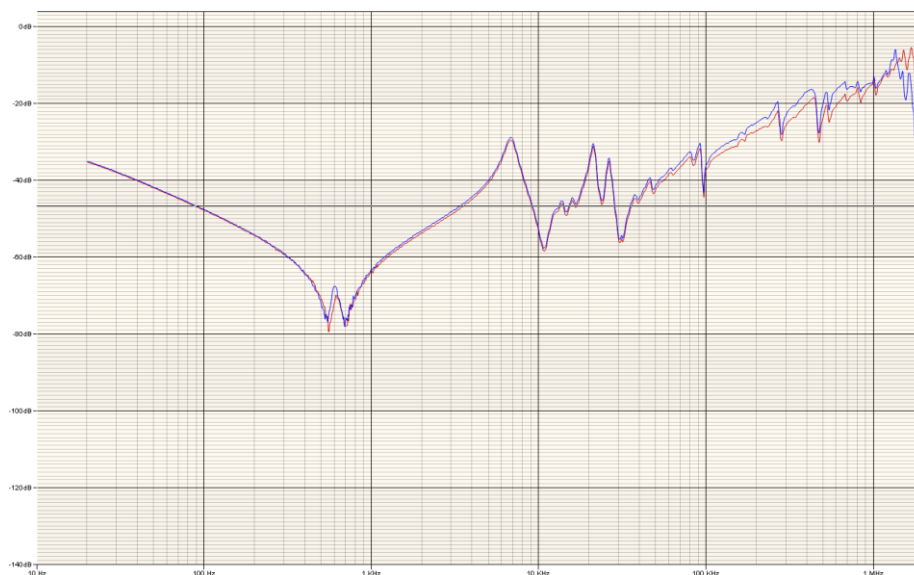
3.4 Пример 4

Код трансформатора који имају регулатор напона фреквентни одзиви намотаја зависе од позиције у којој се регулатор налази приликом вршења мерења, односно снимања кривих. Између осталог утицај има начин уласка у номиналну позицију, односно да ли се у номинални положај ушло у смеру спуштања или подизања напона на самом регулатору при чему би према стандарду [5] требало да смер буде тако да се креће од већих вредности напона ка мањим ако другачије није специфицирано. Примери са објашњењима везаним за зависност изгледа фреквентних одзива од положаја регулатора напона, како теретног, тако и бестеретног могу се наћи у брошури „CIGRE TB 812 Advances in the interpretation of transformer Frequency Response Analysis (FRA) A2-53 – Transformer FRA Interpretation“ [8].

Овај пример је показатељ искуства са терена управо везаних за позицију регулатора напона, у овом случају првенствено везано за начин уласка у номинални положај. На трансформатору Т-4 110/36.75/10.5 kV, 31.5 MVA, спреге $Ynyn0d5$ референтно тј. прво мерење, методом SFRA извршено је током 2014. године. Након тога, мерења су вршена 2019. и 2024. године. Приликом снимања фреквентних одзива 2024. године у номинални положај бр. 12 ушло се из смера од мање вредности напона ка већој вредности, односно из позиције 13 у 12, док је супротно урађено 2014. и 2019. године када је улазак у номинални положај регулатора напона извршен из позиције 11 у 12. Поређењем снимљених одзива

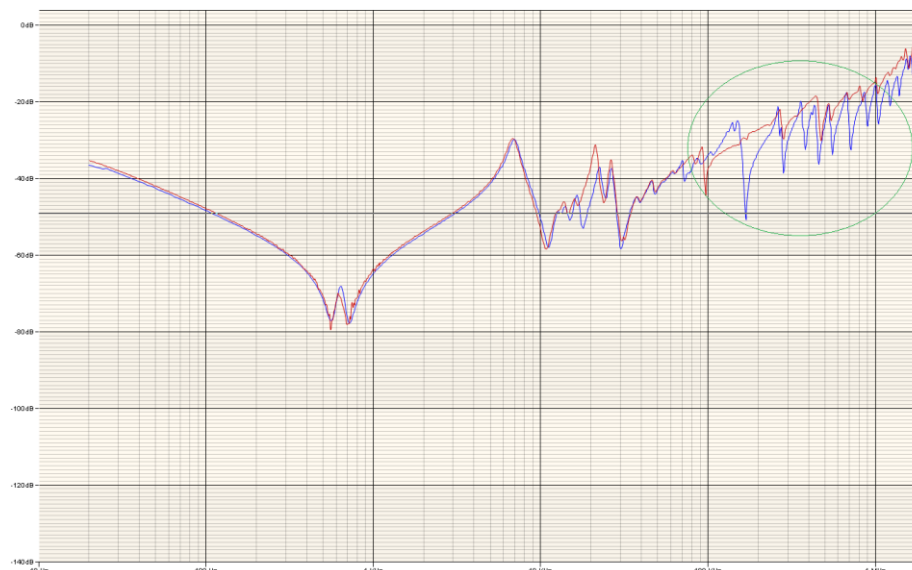
након извршеног мерења 2024. године дошло се до закључка да разлика у снимљеним одзивима потиче управо из претходно поменутог разлога.

На слици 14 дат је приказ одзива снимљених 2014. (црвена боја) и 2019. године (плава боја) где постоји релативно добро поклапање снимљених одзива у читавом фреквентном опсегу уз незнатне разлике, при чему је приказана само фаза „А“. Одзиви су снимљени у шеми празног хода, при напајању са 110 kV стране док су секундар и терцијар били отворени.



Слика 14: Фреквентни одзиви трансформатора Т-4 за фазу „А“ снимљени 2014. и 2019. године

На слици 15 јасно се види разлика у одзивима из 2014. (црвена боја) и 2024. године (плава боја) из претходно наведеног разлога уз исту шему и напајање. Такође је приказана само фаза А како би се што боље уочиле разлике у снимљеним одзивима и тиме показао утицај уласка у номинални положај регулатора напона трансформатора на изглед фреквентно зависних кривих. Зеленом бојом приказана је зона фреквентног опсега у коме су разлике најизраженије.



Слика 15: Фреквентни одзиви трансформатора T-4 за фазу „А“ снимљени 2014. и 2024. године

4 Закључак

Идеја рада је пре свега да се кроз практичне примере и искуства прикаже метода снимања фреквентних одзива намотаја трансформатора, при чему је фокус на снимању одзива на трансформаторима који су услед квара испали из погона. Поред тога у раду су приказани поједини фактори који могу утицати на фреквентне одзиве. Такође експериментални одзиви показују да постоје и случајеви када може доћи до грешака у интерпретацији резултата услед људског фактора, односно неконзистентности приликом вршења мерења, а све у циљу спречавања лошег тумачења и доношења погрешних одлука о стању трансформатора у појединим ситуацијама. Сама метода је широко распрострањена у новије време у склопу фабричких, пријемних, као и редовних периодичних испитивања на терену. Недеструктивна је и даје веома добру слику о стању трансформатора са аспекта потенцијалних електричних и механичких кварова.

Захвалница

Овај рад је подржало Министарство науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије кроз Уговор о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2025. години (број уговора 451-03-136/2025-03).

Литература

- [1] Студија: Савремене методе и уређаји за испитивање, мониторинг и дијагностику стања енергетских и мерних трансформатора, група сарадника Електротехничког института „Никола Тесла“, Београд, Електропривреда Србије, 2010.
- [2] *IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers IEEE Std C57.149-2012.*
- [3] Denis Ilić, Saša Milić, Đorđe Jovanović „Primena SFRA metode za analizu geometrije aktivnog dela transformatora“, *Zbornik radova, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“*, Beograd. 2014. <https://doi.org/10.5937/zeint24-6419>
- [4] *Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA)*, Cigre Work. Group A2.26, TB342, CIGRE, Paris, France, Apr. 2008.
- [5] *Power transformers – Part 18: Measurement of frequency response*, IEC 60076-18:2012.
- [6] Instruction Manual, "Doble SFRA User Guide" Copyright, 2011, Doble Engineering Company
- [7] Manual, "DV Power FRA 500 Sweep Frequency Response Analyzer" Copyright, 2023, DV Power
- [8] *Advances in the interpretation of transformer Frequency Response Analysis (FRA)*, CIGRE TB 812, A2-53 - Transformer FRA Interpretation, Copyright, 2020.

Abstract: Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) represents an unconventional method used in case of recording the frequency response of transformer windings. The method has found application in the analysis of geometry of power transformer windings in order to determine integrity of the core and winding geometry. Recently, this method has become an almost indispensable part of factory acceptance tests of transformers. Frequency responses recorded in factory or first time in transformer life are used as „fingerprint“ for all future comparisons. The method is applied in on-site tests when mechanical failures are suspected due to the action of dynamic forces during operation, as well as during the transport of transformers. In addition, it can also indicate certain electrical failures. The paper will present examples of recorded frequency responses on transformers that had some failures during their operation. Also it will be shown some examples of various influences on the frequency responses which can be misinterpreted and lead to an error in the assessment of the state of the winding geometry.

Keywords: SFRA Method - Winding Frequency Response – Electrical and Mechanical Failures of Power Transformers –Winding Geometry.

Measurements of Power Transformers Winding Frequency Response Using the SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) Method - examples after failures in power transformers and factors that have influence on the recorded frequency responses

Momčilo Milić¹, Đorđe Jovanović¹, Marko Dimitrijević¹

Рад примљен у уредништво: 19.11.2025. године.

Рад прихваћен: 26.12.2025. године.