



Милета Жарковић, Златан Стојковић

МОНИТОРИНГ И ДИЈАГНОСТИКА ВИСОКОНАПОНСКИХ ПОСТРОЈЕЊА

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
Академска мисао
Београд, 2026.

Милета Жарковић, Златан Стојковић

МОНИТОРИНГ И ДИЈАГНОСТИКА ВИСОКОНАПОНСКИХ ПОСТРОЈЕЊА

Рецензенти

др. Јован Нахман, ред. проф. у пензији, ред. члан АИНС

проф. др. Горан Добрић, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

Издавачи

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
Академска мисао, Београд

Дизајн корица
Борис Поповић

Штампа
Академска мисао, Београд

Тираж
300 примерака

ISBN 978-86-6200-088-0

Место и година издања: Београд, 2026

Садржај

1	Увод	1
2	Мониторинг и дијагностика	4
3	Енергетски трансформатор	6
4	Мерни трансформатор	36
5	Прекидач	45
6	Растављач	57
7	Гасом изоловано постројење	64
8	Каблови	75
9	Надземни водови	93
10	Батеријски системи	105
11	Соларне електране	111
12	Ветроелектране	137
13	Напредна дијагностика стања на бази фази логике	150
13.1	Увод	150
13.2	Фази логика	152
13.3	Поређење различитих дијагностичких метода на бази <i>Health Index</i> и тестирање фази логике	173
14	Напредна дијагностика стања на бази машинског учења	181
14.1	Увод	181
14.2	Вештачке неуралне мреже	182
14.3	ANFIS	197
14.4	Аутоенкодерске неуралне мреже	203
14.5	Кластер анализа	212
14.5.1	Нехијерархијски метод кластерованја	214
14.5.2	Хијерархијски метод кластерованја	216
15	Мапе ризика	222

1 Увод

Поуздан и сигуран пренос електричне енергије уз минимално време прекида рада и минималне губитке јесте циљ сваког електроенергетског система (ЕЕС). Испуњење овог циља подразумева минимизацију броја и времена трајања отказа елемената ЕЕС-а, као и минимизацију неиспоручене електричне енергије у случају да до отказа ипак дође. Да би ЕЕС адекватно функционисао и испуњавао основне задатке потребно је на правилан и правовремени начин одржавати елементе ЕЕС-а. Карактеристике елемената ЕЕС-а се током експлоатације неповратно мењају услед већег броја фактора. Различити стандарди и правилници електропривредних и електропреносних предузећа дефинишу различите мерне методе и показатеље којим се утврђују карактеристике елемената ЕЕС-а. Правилницима су утврђени интервали и периоди између међусобних испитивања елемената ЕЕС-а. Постоји велики број развијених метода које су базиране, како на мерењима у погону (*on-line* методе), тако и на мерењима у лабораторији (*off-line* методе). Различите методе генеришу специфичне податке који треба да укажу на поједине кварове делова елемената ЕЕС-а. На основу актуелних мерених података искуственим путем одређује се потреба за додатним испитивањем, ремонтом, ревитализацијом или заменом испитиваног елемента. Код искуственог доношења одлуке ретко се води рачуна о поузданости осталих елемената ЕЕС-а и економским импликацијама донете одлуке. Међутим дерегулација ЕЕС, динамичко тарифирање цене електричне енергије и надокнада пеналима за неиспоручену електричну енергију стварају притисак на електропреносна и електропривредна предузећа. Притисак се односи на смањење губитака електричне енергије и смањење ризика од прекида напајања и хаварије вредне електроенергетске опреме. Такође убрзан развој интелигентног ЕЕС-а олакшава прикупљање, складиштење и употребу података добијених великим бројем испитивања елемената ЕЕС-а. Развој рачунарске опреме омогућава да се велики број генерисаних података може адекватно тумачити уз примену различитих метода из домена вештачке интелигенције.

Делови ЕЕС-а који доста утичу на рад и поузданост комплетног ЕЕС-а су разводна постројења. Да би се донела правилна и правовремена одлука о одржавању разводног постројења, потребно је познавати стање и поузданост постројења и могуће економске ефекте које поједине одлуке могу да донесу. Посебно су важна високонапонска разводна постројења јер њихов квар, прекид рада, изазива веће губитке електричне енергије и могуће страдање вредне електроенергетске опреме. Поузданост високонапонског разводног постројења највише зависи од поузданости рада највећих и најоптерећенијих елемената ЕЕС-а. Елементи чија се поузданост најчешће разматра су високонапонски растављачи, прекидачи, енергетски и мерни трансформатори. Уређај који је у књижи изостављен и који је најмање вредан али је од велике важности за заштиту разводног постројења јесте одводник пренапона. Детаљни мониторинг и дијагностика стања одводника пренапона су представљени у монографији "Мониторинг и дијагностика металоксидних одводника пренапона", од аутора проф Златан Стојковић и проф Зоран Стојановић. Напредна дијагностика стања одводника пренапона је обрађена у дисертацији проф Горана Добрића "Мониторинг и дијагностика стања металоксидних одводника пренапона на бази анализе струје одвођења при радном напону мреже". Наравно, поузданост рада и сигурност

повезаности комплетног ЕЕС доминантно зависи од стања надземних водова и каблова чији се мониторинг обрађује у овој књизи. Поред ових у високонапонском ЕЕС-у у затвореним, мањим просторима карактеристична су гасом изолована постројења чији је мониторинг такође важан. Савремени ЕЕС-и садрже компоненте соларних електрана, ветроелектрана и батеријских система. Мониторинг и дијагностика стања ових компоненти се увелико развијају и представљени су у овој књизи. Поузданост елемената ЕЕС-а се односи на интензитет квара и време прекида рада на годишњем нивоу за посматране елементе. Прорачун поузданости пружа увид на број кварова на годишњем нивоу и не пружа могућност доношења одлуке на основу тренутног стања елемената ЕЕС-а. Поузданост и интензитет квара елемента ЕЕС-а је могуће одредити на основу битнијих испитивања елемената. На основу таквог прорачуна могуће је донети одлуку о одржавању појединачне опреме, целокупног разводног постројења и комплетног дела ЕЕС-а на основу тренутног стања високонапонске опреме.

Одржавање високонапонских постројења и ЕЕС-а се може поделити у три основна типа стратегије одржавања

- корективно одржавање,
- превентивно одржавање и
- одржавање на бази поузданости.

Корективно одржавање подразумева активности тек након што је дошло до квара, па као такво је техноекономски оправдано само за нисконапонска постројења мање погонске важности. Превентивно одржавање се може вршити:

- у временски дефинисаним интервалима (*Time Based Maintenance – TBM*) и
- према стању (*Condition Based Maintenance – CBM*).

Временски интервали периодичног одржавања (*TBM*) дефинисани су у интерним стандардима електропривредних и електропреносних предузећа на основу претходног искуства одржавања. Превентивно одржавање према стању (*CBM*) врши се онда када системи за континуални мониторинг погонског рада високонапонске опреме укажу на потребу за тиме. Одржавање на бази поузданости (*Reliability centered maintenance – RCM*) стратегија је која користи комбинацију тренутног стања опреме и њеног значаја у разводном постројењу.

Циљ оператора преносног и дистрибутивног система као и руководиоца сваке електране није да трошкове сведе на минимум, већ да их одржи на оптималном нивоу. То значи да мора да пронађе прави баланс између CAPEX-а (*Capital Expenditures* - капиталних трошкова) и OPEX-а (*Operating Expenses* - оперативних трошкова) како би укупни трошкови током животног века средства били најнижи могући, уз очување поузданости, безбедности и перформанси ЕЕС-а. CAPEX обухвата велика улагања у набавку, модернизацију или замену опреме и инфраструктуре ЕЕС-а. OPEX се односи на свакодневне трошкове рада, одржавања и поправке. Ако се CAPEX превише смањи (нпр. одлаже се замена застареле опреме), OPEX временом расте због чешћих кварова, већих трошкова одржавања и губитака у ефикасности. Због тога доношење одлуке на основу приступа трошкова током животног века (*Life Cycle Costing*), уместо на бази само тренутне уштеде, процењује се како ће данашња инвестиција утицати на будуће оперативне трошкове, ризик од отказа и укупну вредност ЕЕС-а. У том смислу неопходно је проценити, предвидети будуће стање елемената

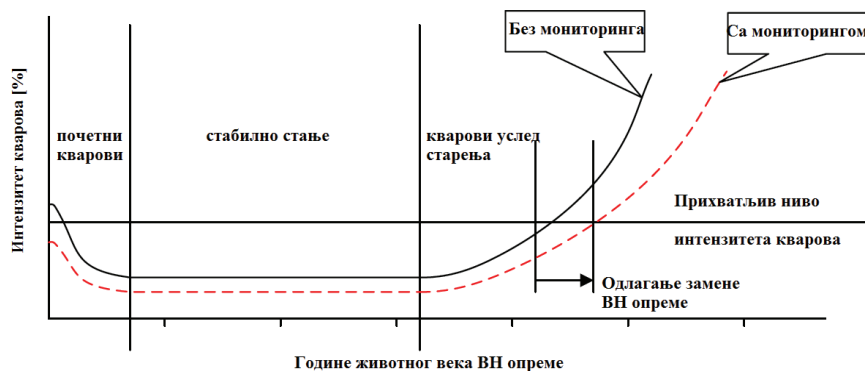
ЕЕС-а. Таква стратегија одржавања као резултат захтева предвиђање кварова и процену преосталог животног века елемената ЕЕС-а и назива се предиктивно одржавање (*Predictive Based Maintenance – PBM*).

Књига је базирана на вишегодишњем искуству аутора књиге и дисертацији аутора "Мониторинг и дијагностика разводног постројења на бази фази модела стања високонапонске опреме". Поглавља 1-12 урадио је др Милета Жарковић, а поглавља 13-15 су резултат рада др Милете Жарковића и др Златана Стојковића. У књизи су овим редоследом по поглављима представљени тренутно доступни и они који су у развоју мониторинзи елемената ЕЕС-а за: енергетски и мерни трансформатори, високонапонски прекидачи, растављачи, гасом изолована постројења, каблови, надземни водови, батеријски системи, соларне и ветроелектране. За сваки поменути елемент ЕЕС-а представљена је дијагностика стања употребом интерних стандарда и смерница националног ЕЕС-а, *IEEE* и *IEC* стандарда и искуства радних група *CIGRE* и *CIREN*. Стандардне методе дијагностике стања које креирају индексе здравља (*Health Index*) су представљене у књизи кроз примере. Стандардне методе не узимају у обзир мерну несигурност, неизвесност и повезаност података више мониторинга који фигуришу у методама. Поменуте недостатке постојећих дијагностичких метода могуће је превазићи применом метода фази логике и машинског учења. Следећа поглавља књиге се односе на напредну дијагностику стања елемената ЕЕС-а. У књизи је представљена примена фази логике кроз формирање експертских система на конкретном примеру где се као излаз система формира вероватноћа квара елемента ЕЕС-а. Вероватноћа квара је уједно интензитет квара па је у књизи описан комплетан алгоритам доношења одлуке о одржавању високонапонског постројења и високонапонске опреме на бази мониторинга и дијагностике тренутног стања високонапонске опреме. Напредна дијагностика у књизи је даље представљена применом метода машинског учења. Најпре је представљено надгледано машинско учење кроз примену: вештачких неуралних мрежа, адаптивних-неуро фази система и аутоенкодерских неуралних мрежа. Даље књига представља методе ненадгледаног машинског учења кроз примену нехијерархијских и хијерархијских метода кластеровања. Све методе и алгоритми су приказани кроз примере и програмски код, наредбе у програмском пакету *MATLAB*. Последње поглавље књиге описује примену мапе ризика, прорачун индекса перформанси и методе минималних пресека на примеру „Н“ шеме високонапонског разводног постројења.

2 Мониторинг и дијагностика

Појам дијагностике (од грчке речи *diagnosis* – закључивање или оцењивање) прво се појавио у медицинској науци, док у техничким наукама постоји тек неколико десетина година. Техничка дијагностика подразумева различите мерне методе и процедуре које се спроводе ради правовременог утврђивања тренутног стања техничких система и предвиђања њиховог будућег стања. Дијагностика проверава техничку исправност и функционалност система и, ако квар постоји, она истражује место, облик и узрок тог квара. Развој мерне и рачунарске опреме омогућио је увођење јединственог система за интегралну дијагностику комплетне високонапонске опреме у савременом разводном постројењу. Савремени систем надзора који истовремено прати вредности више параметара унутар постројења и пружа податке који су континуално доступни представља мониторинг разводног постројења. Мониторинг (од енглеске речи *monitoring* – надгледање, праћење) у контексту електроенергетске опреме у разводним постројењима представља систематско, континуално или периодично праћење техничких и експлоатационих параметара опреме у реалном времену, ради благовремене детекције одступања од нормалног режима рада. Мониторинг подразумева употребу мерних сензора, уређаја за аквизицију података и система за обраду сигнала, који омогућавају непрекидно прикупљање, анализу и архивирање података о стању опреме. На основу прикупљених информација могуће је благовремено упозорити на потенцијалне кварове, оптимизовати рад, повећати поузданост и сигурност разводних постројења у електроенергетским системима.

Мониторинг једног разводног постројења пружа увид у стотинак и више параметара, од којих се највећи број односи на најбитнију високонапонску опрему: прекидаче, растављаче, енергетске и мерне трансформаторе, док мониторинг ЕЕС-а узима у обзир и надземне водове, каблове и обртне машине у производним и потрошачким постројењима. У зависности од физичке природе посматраних параметара, дијагностика може бити хемијска, електрична, термичка, оптичка и механичка. Мониторингом се, дакле, прате параметри потребни за исправан рад високонапонске опреме, а дијагностиком се измерене вредности тих параметара упоређују са референтним вредностима. Дијагностичко упоређивање се врши у односу на вредности параметара добијених код пријемних испитивања при пуштању опреме у погон и вредности параметара у досадашњем животном веку опреме. На основу тог упоређивања и вредности истих параметара у прошлости могуће је закључити настанак или напредовање већ постојећег квара на опреми. Такође, дијагностика омогућава процену прогресије старења услед неповратне промене у физичким и хемијским карактеристикама материјала који чине изолацију високонапонске опреме. Правилним сагледавањем свих прикупљених података може се проценити преостали животни век високонапонске опреме и донети правовремена одлука о ревитализацији, ремонту или замени опреме. Одговарајућим мониторингом опреме и правилном дијагностиком врши се правовремено одржавање, чиме се продужава животни век високонапонске опреме (Сл 2.1). На тај начин мониторинг и дијагностика разводног постројења и високонапонске опреме у њему доводе до повећања поузданости и расположивости опреме и смањења трошкова одржавања и поправке опреме.



Сл. 2.1 Утицај одржавања високонапонске опреме са и без мониторинга на интензитет кварова

Различити елементи ЕЕС-а имају различите специфичне методе испитивања и показатеље који могу бити искоришћени за доношење одлуке о хитности интервенције на тим уређајима. Мониторинг и дијагностика у електроенергетици заједно подразумевају аутоматизовано и континуално одређивање стања целокупног разводног постројења и високонапонске опреме у њему. Ако се дијагностикује стање надземних водова и каблова који повезују више разводних постројења могуће је одредити стање дела ЕЕС. У наредним поглављима књиге представљена је статистика кварова, најбитнији мониторинзи и методе испитивања наведених елемената ЕЕС-а као и њихова дијагностика везана за релевантне стандарде и прописе.

3 Енергетски трансформатор

Енергетски трансформатор (ЕТ) је статички уређај који трансформише енергију из једног магнетног кола у друго, при чему увећава или смањује напон у зависности од своје улоге. ЕТ је од виталног значаја за пренос и дистрибуцију електричне енергије. Као такав појављује се у електранама као блок трансформатор и трансформатор сопствене потрошње и у високонапонским и средњенапонским постројењима. Поред генератора као обртне машине, ЕТ је уједно и најскупљи елемент у сваком делу и на сваком напонском нивоу ЕЕС-а. Са друге стране, ЕТ је уједно и најкомплекснији електроенергетски елемент, на чији рад имају утицај термички, механички, електрични и хемијски процеси. И поред своје комплексности, ЕТ-и се пројектују тако да могу безбедно да раде 25–40 година, а уз правилно одржавање и преко 60 година. Поред генератора ЕТ је посвећено највише метода дијагностике и мониторинга. Цена дијагностике и мониторинга ЕТ-а је неупоредива са ценом самог уређаја као и са ценом штете која може да настане у ЕЕС-у након квара ЕТ-а. Из тог разлога велики напори се улажу да се правилним мониторингом и дијагностиком врши правовремено и правилно одржавање које ће смањити број и трајање кварова на ЕТ-а и продужити животни век ЕТ-а. Кључни делови трансформатора који су од велике важности за његов поуздан рад су:

- магнетно коло,
- намотаји (стање геометрије и стање електричних спојева),
- чврста изолација намотаја,
- пролазни изолатори,
- регулациона преклопка,
- активни део (стање намотаја, контаката и магнетног кола на бази гаснохроматографске анализе *dissolved gases analysis* – DGA),
- трансформаторско уље,
- трансформаторски суд, расхладни систем и дилатациони суд.

Анализа кварова на енергетским трансформаторима показује да су одређене компоненте подложније отказима од других. Према студији која је обухватила више од 425.000 трансформаторских година рада и 1.159 великих отказа, расподела кварова по деловима је приказана на Сл. 3.1. Да би се набројани делови ЕТ-а испитали, постоје електричне и хемијске методе. Електричне устаљене методе које се користе су [2]:

- мерење отпорности изолације намотаја и проводних изолатора и одређивање индекса поларизације за намотаје,
- мерење фактора диелектричних губитака ($\text{tg}\delta$) и капацитивности изолације намотаја и изолације пролазних изолатора,
- мерење струја и снага празног хода при сниженом напону, тј. мерење струје магнећења,
- мерење импедансе кратког споја, тј. индуктивности услед расипања,