Предговор

Уџбеник за предмет Техника високог напона 2 је намијењен студентима четврте године основних студија на студијском програму Електроенергетика, на Електротехничком факултету Универзитета у Источном Сарајеву (ЕТФ). Уџбеник може да се користи и на другим сродним факултетима на којима се овај предмет изучава.

Електротехнички факултет Универзитета у Источном Сарајеву има дугу и богату традицију у области технике високог напона, а која је уско повезана са радом фирме Енергоинвест. Енергоинвест је био једна од водећих фирми за производњу високонапонске опреме у бившој Југославији. Један од стубова таквог успјеха су биле модерне и моћне високонапонске лабораторије, као и напредна знања из области технике високог напона, која су се у великој мјери базирала на лабораторијским испитивањима. Научно-истраживачка испитивања су вршена у лабораторијском комплексу Истраживачко развојни центар електроенергетике (ИРЦЕ), док су едукативна испитивања вршена у факултетској лабораторији за високи напон, а фабричка испитивања у лабораторији за високи напон која је радила у склопу производне фабрике Енергоинвеста.

Лабораторијски комплекс ЗД ИРЦЕ а.д. Источно Сарајево данас послује у саставу Мјешовитог холдинга „Електропривреда Републике Српске“ Требиње. У перспективи, ИРЦЕ би могао бити темељ за будући развој електроенергетике у Источном Сарајеву, ако за то буду обезбијеђени потребни услови. Један од битнијих услова јесте да се на Електротехничком факултету у Источном Сарајеву школују инжењери који ће имати знање, интересовање и жељу да се баве облашћу технике високог напона. То је био један од важнијих разлога за писање овог уџбеника.

Област технике високог напона се на Електротехничком факултета Универзитета у Источном Сарајеву изучава кроз два предмета: Техника високог напона 1 и Техника високог напона 2. Циљ предмета Техника високог напона 2 је да студенти стекну основна знања о диелектрицима, као основним градивним материјалима изолационих система високонапонске опреме, као и основна знања о високонапонским и другим врстама лабораторијских испитивања и мјерења, без којих није могуће утврдити квалитет изолације опреме.

Овај уџбеник у потпуности покрива материју која се изучава на предмету Техника високог напона 2, али анализира и додатне проблеме који су од великог значаја у овој области. Редослијед излагања материје у књизи одговара редослиједу излагања материје на предмету. Поред значаја за квалитетно образовање студената, уџбеник може бити од користи и инжењерима који су свој професионални ангажман пронашли у областима које се у уџбенику анализирају.

Аутор се захваљује рецензентима на корисним сугестијама, као и свима који су помогли штампање овог уџбеника.

Садржај

1. УВОД 6

2. ДИЕЛЕКТРИЦИ И ВИСОКОНАПОНСКА ИЗОЛАЦИЈА 9
2.1. Уопштено о гасовитим, течним и чврстим диелектрицима 10
2.2. Диелектрична константа 16
2.3. Диелектрични губици - tg(*δ*) 24
2.4. Специфична електрична отпорност 33
2.4.1. Отпорност изолације 35
2.5. Диелектрична чврстоћа 48
2.5.1. Електрични пробој гасовитих диелектрика 50
2.5.1.1. Развој пражњења у гасовитим диелектрицима 50
2.5.1.2. Случајна природа прескока 64
2.5.1.3. Утицај атмосферских параметара на развој пражњења у ваздуху 67
2.5.1.4. Утицај облика електрода на развој пражњења 74
2.5.2. Електрични пробој течних и чврстих диелектрика 75
2.5.3. Термички пробој течних и чврстих диелектрика 82
2.5.4. Електрохемијски пробој чврстих диелектрика 89
2.5.5. Електромеханички пробој чврстих диелектрика 96
2.5.6. Прескоци по површини запрљане чврсте изолације 101
2.5.7. Појава примјеса у диелектрицима у току експлоатације 111
2.5.7.1. Примјесе у гасу SF_6 111
2.5.7.2. Примјесе у трансформаторском уљу 113

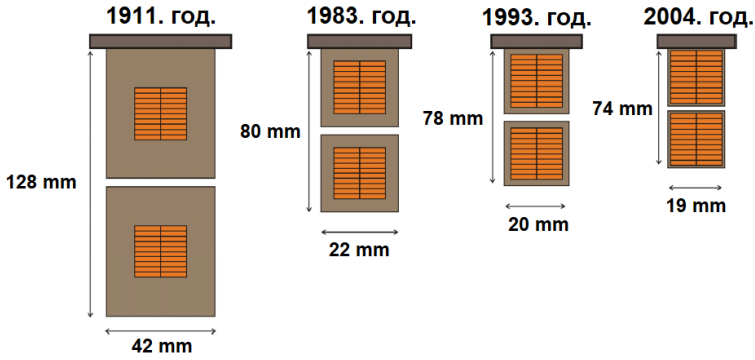
3. ЕЛЕКТРИЧНА И ТЕРМИЧКА ИСПИТИВАЊА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКЕ ОПРЕМЕ . 119
3.1. Лабораторијска испитивања електроенергетске опреме 119
3.1.1. Диелектрична испитивања електроенергетске опреме 121
3.1.1.1. Испитивање опреме високим напоном индустријске учестаности 127
3.1.1.2. Испитивање опреме ударним напонима 140
3.1.1.3. Испитивање опреме високим једносмјерним напоном 162
3.1.1.4. Испитивање опреме на парцијална пражњења 168
3.1.1.5. Испитивање опреме високим напоном високе учестаности 179
3.1.1.6. Испитивање опреме сложеним и комбинованим напонима 183
3.1.2. Термичка и електродинамичка испитивања електроенергетске опреме 186
3.1.2.1. Испитивање опреме ударном струјом 186
3.1.2.2. Испитивање опреме трајном радном струјом 197
3.1.2.3. Испитивање опреме струјом кратког споја 202
3.1.3. Испитивање електроенергетске опреме у лабораторијама велике снаге 208
3.1.4. Механичка, хемијска и термичка испитивања електроенергетске опреме .. 218
3.1.5. Теренска испитивања електроенергетске опреме 221

4. МЈЕРЕЊЕ ВИСОКИХ НАПОНА И ЈАКИХ СТРУЈА 225
4.1. Мјерење простопериодичних и периодичних сигнала 225
4.2. Мјерење високих напона 229
4.2.1. Напонски мјерни трансформатори 229
4.2.2. Електростатички волтметар 234
4.2.3. Амперметар у серији са отпорником или кондензатором 236
4.2.4. Сферна искришта 237
4.2.5. Дјелила напона 242
4.2.6. Уређаји за мјерење максималне вриједности напона 253
4.2.7. Осцилоскопи, високонапонске сонде и дигитални мјерни системи 255
4.3. Мјерење јаких струја 262
4.3.1. Струјни мјерни трансформатори 262
4.3.2. Калем Роговског 268
4.3.3. Струјни шент 272
4.3.4. Уређаји на бази Холовог ефекта 275

ЛИТЕРАТУРА 278

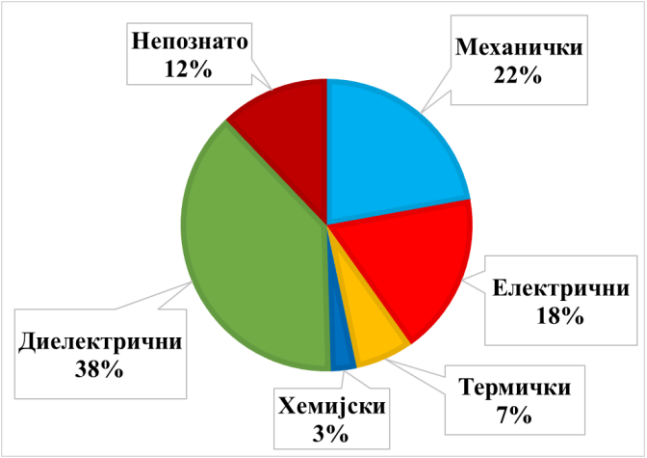
1. Увод

У свим областима технике, па тако и у електротехници и електроенергетици, изражен је тренд оптимизације димензија и радних карактеристика уређаја. Првенствени циљ тих оптимизација јесте смањење утрошка материјала приликом израде уређаја, а самим тим и смањење димензија уређаја и смањење његове цијене, уз задржавање постојећег или постизање вишег степена поузданости и квалитета. Када је у питању високонапонска опрема, највеће уштеде се постижу оптимизацијом изолационих система, док су могућности оптимизације проводних дијелова ограничене и у већини случајева су већ урађене. Из тог разлога се непрекидно врши развијање нових и усавршавање постојећих диелектрика и изолационих система опреме. На слици 1.1 је илустровано смањење димензија изолационог система високонапонских мотора и генератора у периоду од 1911. до 2004. године [1]. Може се уочити да су димензије изолационог система значајно смањене, поготово у периоду до 80-тих година 20. вијека, али се тренд смањења димензија наставио до данас.



Слика 1.1 – Смањење димензија изолационог система високонапонских мотора и генератора у периоду од 1911. до 2004. године [1]

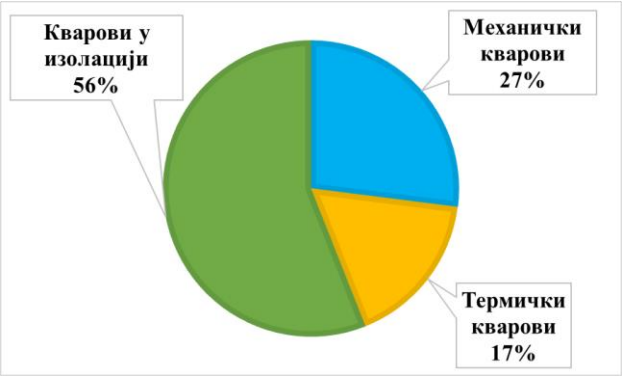
Изражено смањење димензија изолационих система високонапонске опреме оставља посљедице по робусност и поузданост уређаја, упркос примјени квалитетнијих диелектрика. Због тога су проблеми повезани са изолацијом високонапонске опреме, генерално посматрано, најчешћи узрочници кварова опреме у експлоатацији. На слици 1.2 је приказана статистика кварова енергетских трансформатора која је базирана на узорку од 799 детектованих кварова [2].



Слика 1.2 – Узрочници кварова енергетских трансформатора

Статистички подаци, аналогни онима који су приказани на слици 1.2, варирају у зависности од произвођача опреме, модела уређаја, квалитета одржавања уређаја, услова експлоатације и слично. Ипак, одступања најчешће нису таква да мијењају генералне закључке. У механичке кварове на трансформаторима се сврставају кварови на регулационој преклопци, вентилаторима за хлађење, кварови узроковани дјеловањем ваљске механичке силе и слично. У електричне кварове спадају проблеми са намотајима, магнетним колом и слично, а који су узроковани атмосферским пражњењима, струјама кратког споја, склопним и привременим пренапонима итд. Термички кварови су узроковани прегријавањем трансформатора, које може бити узроковано преоптерећењем, струјама кратког споја, кваровима на систему за хлађење итд. Хемијски узрочници кварова могу бити гасови и друге примјесе растворене у уљу трансформатора, или спољашњи хемијски узрочници у виду запрљања и слично. Диелектрични кварови представљају кварове који су настали у изолационом систему уређаја, а усљед дјеловања пренапона и њима узрокованих јаких електричних поља. Јасно је да између различитих врста кварова постоји веза, тако да је често тешко направити границу и дефинисати шта је примарни узрок квара. Ипак, највећи број кварова су кварови диелектричне природе. Ови кварови су узроковани слабљењем карактеристика и уништењем дијелова изолационог система. Узрочници диелектричних кварова су различити: пренапони који постепено или тренутно деградирају карактеристике изолације, преоптерећења, хемијски фактори, грешке у производњи уређаја, лоше особине примијењених изолационих материјала, неадекватно одржавање уређаја у току експлоатације и слично.

На слици 1.3 је приказана статистика кварова хидрогенератора која је базирана на 69 детектованих кварова који су се догодили на неком од 1200 посматраних генератора у периоду од 10 година [1]. Кварови на лежајевима генератора су сврстани у механичке кварове, иако могу бити узроковани термичким ефектима.



Слика 1.3 – Узрочници кварова хидрогенератора у електранама

На основу слика 1.2 и 1.3 јасно је да диелектрични кварови, тј. кварови у изолационом систему уређаја, представљају највећи удио у укупном броју кварова многих високонапонских уређаја. Сваки квар на уређајима у постројењима, поготово оним важнијим као што су генератори и трансформатори, узрокује велике новчане губитке. Стога је број таквих кварова неопходно свести на најмању могућу мјеру. Значајни кораци у том процесу јесу унапређење материјала који се користе за израду изолационих система уређаја, унапређење технолошког процеса израде уређаја, унапређење високонапонских испитних процедура како би се потенцијални проблеми детектовали у фабрици у фази производње уређаја, усавршавање процеса мониторинга и дијагностике стања уређаја те његовог одржавања у току експлоатације, а са циљем да се потенцијални кварови открију у раној фази настанка када их је знатно лакше и јефтиније отклонити.

2. Диелектрици и високонапонска изолација

Диелектрици су материјали кроз које пролази спољашње електрично поље и који под дејством тог поља проводе занемариво малу електричну струју. У инжењерској пракси се често називају изолациони материјали. Теоријски посматрано диелектрици не садрже слободна електрична оптерећења (слободне електроне и јоне) који би се кретали под дејством спољашњег електричног поља, тако да теоријски они имају бесконачно велику специфичну електричну отпорност. У реалности не постоје идеални диелектрици јер сви они, због примјеса и других фактора, садрже одређени мали број слободних електрона и јона. Због тога њихова специфична електрична отпорност нема бесконачну, него коначну али веома велику вриједност.

Електрична оптерећења која се налазе у диелектрицима (електрони и јони) су везана унутрашњим еластичним атомским и молекуларним силама. Под дејством спољашњег електромагнетног поља ова оптерећења се могу помјерати на микроскопски малим растојањима, што се назива поларизацијом диелектрика.

Електрони и јони у нормалним условима не могу напуштати атоме и молекуле диелектрика којима припадају. У случају када је диелектрик изложен дјеловању јаког вањског извора енергије (извор топлотне енергије, зрачења или електромагнетног поља) може се догодити да електрони добију довољно велику енергију да дође до кидања њихових веза са атомима и молекулима којима припадају и да постану слободни носиоци наелектрисања. У том случају се у диелектрику почиње дешавати пробој, који се назива термички пробој ако је његов узрок загријавање диелектрика, односно електрични пробој ако је његов узрок јако вањско електрично поље.

Занимљива појава везана за диелектрике јесте да се капацитивност кондензатора мијења када се између његових електрода уносе различите врсте диелектрика. Коефицијент сразмјере, којим се дефинише пораст капацитивности кондензатора у зависности од врсте диелектрика између његових електрода, се назива релативном диелектричном константом диелектрика.

Диелектрици могу бити у чврстом, течном или гасовитом агрегатном стању. За све три врсте диелектрика постоје одређене заједничке особине, али постоје и особине које праве разлику између њих. Основне заједничке особине свих врста диелектрика су: специфична електрична отпорност, диелектрична чврстоћа, диелектрични губици и диелектрична константа.

Специфична електрична отпорност диелектрика дефинише колику отпорност протицању електричне струје посједује одређени диелектрик. Идеалан диелектрик има бесконачну, а реалан диелектрик веома велику специфичну електричну отпорност.

Диелектрична чврстоћа диелектрика дефинише максималну вриједност јачине електричног поља коју диелектрик може да поднесе, а да не дође до његовог

диелектричног пробоја. Идеалан диелектрик има бесконачну, а реалан диелектрик веома велику диелектричну чврстоћу.

Диелектрични губици представљају губитке активне снаге у диелектрику. Ови губици су узроковани протицањем слабе активне струје кроз диелектрик (Џулови губици) и диполном поларизацијом диелектрика. Идеалан диелектрик нема диелектричне губитке, а реалан диелектрик има мале диелектричне губитке.

Релативна диелектрична константа диелектрика показује колико пута се капацитивност кондензатора повећа када се између његових електрода умјесто вакуума (ваздуха) постави тај диелектрик.

Претходно наведена четири карактеристична параметра диелектрика су веома значајни јер представљају основу за избор одговарајућих диелектрика за реализацију изолационог система високонапонског уређаја. Такође, праћење промјена ових карактеристичних параметара омогућава да се правовремено детектује деградација диелектрика, као и деградација изолационог система уређаја који је у фази производње или је у експлоатацији.

Прије него се ова четири карактеристична параметра диелектрика детаљно анализирају, потребно је дефинисати основне особине гасовитих, течних и чврстих диелектрика.

2.1. Уопштено о гасовитим, течним и чврстим диелектрицима

Гасовити диелектрици се од све три врсте диелектрика највише користе. Од свих гасовитих диелектрика ваздух је најраспрострањенији. Основни разлог за то је што је ваздух бесплатан, свуда присутан и има добре диелектричне карактеристике. Основне особине, које сваки гасовити диелектрик треба да посједује, су: незапаљивост, да није штетан по околину, да посједује хемијску и термичку стабилност, да се производи на једноставан и јефтин начин итд. Јасно је да ваздух задовољава све ове особине, те из тог разлога представља веома добар диелектрик. Ваздух се користи на надземним водовима да изолује проводник од других проводника, од заштитних ужади, од тла, од далеководног стуба, од сусједних објеката и слично, користи се у нисконапонским прекидачима до 1000 V називног напона, високонапонским растављачима и у свој другој опреми која се под напоном налази у ваздуху, као што су енергетски и мјерни трансформатори итд. Поред тога, ваздух и остали гасовити диелектрици имају улогу расхладног средства јер хладе елементе чија температура превазиђе температуру диелектрика. Ипак, ваздух посједује и одређена ограничења као што су изражен утицај атмосферских фактора (влажност, температура, притисак) на његове диелектричне карактеристике, релативно високу температуру кондензације воде од 0^0C (боље би било да је знатно нижа, нпр. -40^0C), релативно малу диелектричну чврстоћу, оксидационо дејство на жељезо и друге материјале (изазива хемијску деградацију материјала у виду рђе) итд. Стога се, у одређеним случајевима, користе и друге врсте гасовитих диелектрика, као што су: ваздух под