

Prof.dr Saša Đekić

**TEHNIKA  
VISOKONAPONSKE  
IZOLACIJE**

AKADEMSKA MISAO  
Dgqi tcf." 2019.

Prof. dr Saša Đekić

## TEHNIKA VISOKONAPONSKE IZOLACIJE

### *Recenzenti*

Prof. dr Predrag Osmokrović

Dr Dragan Kovačević

Dr Nenad Kartalović

### *Izdavač*

AKADEMSKA MISAO

Beograd

### *Štampa*

Akademski misao, Beograd

### *Tiraž*

300 primeraka-

ISBN 978-86-7466-806-1

---

NAPOMENA: Fotokopiranje ili umnožavanje na bilo koji način ili ponovno objavljivanje ove knjige u celini ili u delovima - nije dozvoljeno bez saglasnosti i pismenog odobrenja izdavača.

---

**Knjigu posvećujem mojim studentima.**

**Doprijeti do vašeg uma i prenijeti vam znanja i saznanja *divova* su moja vječna inspiracija.**



# Predgovor

Od samog uspostavljanja prvobitnih ljudskih zajednica čovjek je koristio dostupne izvore energije kako bi omogućio i olakšao preživljavanje i zadovoljenje osnovnih životnih potreba. Cjelokupan dalji razvoj ljudskog društva bio je uslovljen povećanjem dostupnosti energetske resursa i usavršavanjem načina njihovog korištenja. Gotovo četverostruko povećanje broja svjetskog stanovništva u XX vijeku, industrijska revolucija i razvoj gradova, nastali na bezrezervnoj eksploataciji fosilnih goriva, doveli su do nastanka društava zavisnih od velike potrošnje energije. Veliki problem pri tome predstavlja potreba za prenosom energije od izvora, prirodni izvori fosilnih goriva, vodotoci i sl., do mjesta upotrebe, industrijski kompleksi i veliki gradovi, ponekad i preko cijelih kontinenata ili preko mora, za šta je neprikosnovena primjena električne energije. Potreba za sve većim razdaljinama na kojima se ostvaruje prenos električne energije uslovlila je podizanje naponskog nivoa prenosa do granice ponajviše uslovljene razvojem visokonaponske izolacije. Viši potencijal zahtjeva savršeniji izolacioni sistem sa višim nivoom podnošenja naponskih napreznja. Dakle, izolacioni sistem je osnova funkcionisanja i daljeg razvoja elektroenergetskog sistema, te mu se na takav način mora i pristupati.

Osnove razumijevanja visokonaponskog inženjeringa leže u poznavanju fundamentalnih principa ponašanja dielektrika, odnosno električne izolacije, izložene visokim potencijalima i poznavanju same strukture dielektrične materije, što sam imao priliku uvidjeti tokom izrade magistarske teze i doktorske disertacije. Pri tome sam ostao beskrajno zahvalan svom mentoru uvaženom Prof.dr Predragu Osmokroviću na svim prenesenim znanjima. U naučnom smislu, osnovna znanja i pojmovi razvijaju se kontinuiranim akademskim naporima podržanim predanim istraživačkim radom decenijama, u nekim slučajevima čak i vijekovima. Predmetna knjiga predstavlja skromni pokušaj autora da čitaocima prenese znanja koja su se formirala oslanjajući se na „pleća divova“ od samih početaka razvoja elektrotehnike do savremenog visokonaponskog inženjeringa. Knjiga je namjenjena prije svega studentima elektrotehnike, elektroenergetskog smijera, ali i inženjerima i istraživačima na predmetnom polju u regionu, pošto ista obiluje tablično i grafički prikazanim sistematizovanim podacima. Baveći se probom gasne izolacije i koordinacije izolacije duži niz godina, zapazio sam da je proučavanje ponašanja izolacije izložene visokim naponima i probom izolacije uopšte otežano na našim prostorima prije svega zbog malog broja instituta opremljenih potrebnom opremom kao i zbog nedostatka potrebne literature na lokalnim jezicima.

Nedostatak potrebne literature na lokalnim jezicima posebno otežava proučavanje predmetne materije studentima u regionu. Upravo to bilo mi je pokretačka snaga duži niz godina na prikupljanju i sistematizovanju postojećeg kvantuma znanja iz oblasti proučavanja visokonaponske izolacije u svjetskoj opšteprihvaćenoj literaturi i segmentima domaće literature koji se prožimaju sa ovom oblašću. Predmetna knjiga predstavlja pokušaj da se sistematično i na najprihvatljiviji način predstavi navedeno, prije svega studentima ali i inženjerima praktičarima i istraživačima na ovom polju, postepeno ih vodeći segment po segment od opštih fundamentalnih znanja do modernog pristupa proučavanju visokonaponske izolacije. Pored toga, u knjizi su dati bitni aspekti strukture dielektričnih materijala, sa njihovim fizičkim karakteristikama, relevantnim za primjenu u elektroenergetici.

Prilikom pisanja ove knjige načinjen je napor da se gradivo iz predmetne materije izloži na jasan, razumljiv i slikovit način, primjeren predznanju čitalaca kojima je namjenjen. Kao autor ove knjige svjestan sam da je željene i opisane ciljeve teško dostići u prvom izdanju zbog čega su dobrodošle sve sugestije i prijedlozi kojima bi se dodatno unaprijedila buduća izdanja.

Autor

# SADRŽAJ

## POGLAVLJE 1

### PONAŠANJE DIELEKTRIKA U ELEKTRIČNOM POLJU 1

#### 1.1 Indukovana naelektrisanja i indukovani dipoli 3

## POGLAVLJE 2

### ELEKTRIČNE OSOBINE DIELEKTRIKA 13

#### 2.1 Susceptibilnost i permitivnost dielektrika 13

#### 2.2 Kompleksna dielektrična konstanta 21

#### 2.3 Polarizacija dielektrika 25

#### 2.4 Faktor dielektričnih gubitaka 33

#### 2.5 Specifična električna otpornost 43

#### 2.6 Dielektrična čvrstoća 45

#### 2.7 Nelinearni dielektrici 46

## POGLAVLJE 3

### GASNI DIELEKTRICI 59

#### 3.1 Sumpor-heksafluorid ( $\text{SF}_6$ ) 64

#### 3.2 Mehanizam električnog pražnjenja u gasovima 77

#### 3.3 Mehanizam električnog provođenja u gasovima 98

#### 3.4 Korona 127

## POGLAVLJE 4

### TEČNI DIELEKTRICI 153

#### 4.1 Uvod 153

4.2 Karakteristike izolacionih ulja	155
4.3 Klasifikacija tečnih dielektrika	179
4.4 Proboj tečnih dielektrika	189

## **POGLAVLJE 5**

<b>ČVRSTI DIELEKTRICI</b>	<b>203</b>
5.1 Klasifikacija i osobine čvrstih izolacionih materijala	205
5.2 Starenje čvrstih dielektrika	235
5.3 Proboj čvrstih dielektrika	240
5.4 Dimenzionisanje izolatora	243
5.5 Dizajn i testiranje izolatora za spoljašnju montažu	266
5.6 Ispitivanje karakteristika izolatora	275

## **6. DODATAK - ZAKON POVEĆANJA**

<b>MATEMATIČKO STATISTIČKI ALAT ZA PREDIKCIJU PONAŠANJA IZOLACIONIH STRUKTURA VELIKIH DIMENZIJA</b>	<b>307</b>
6.1 Uvod	307
6.2 Statističke osnove zakona povećanja	309
6.3 Primjena teoretskih funkcija raspodjele	315
6.4 Pojedinačne tačke proboja	320
6.5 Površinski efekat	328
6.6 Zapreminski efekat	342
6.7 Vremenski efekat	347
<b>LITERATURA</b>	<b>361</b>