

*Ernst Mihalek*

## **Profesor Mladen Dokmanić i njegov doprinos izboru naponskih razina te razvitku hrvatskog elektroenergetskog sustava**

**Sažetak:** O profesoru Mladenu Dokmaniću malo se govori, a predavao je na ETF-u na katedri Prijenosne mreže i bio suradnik Instituta za elektroprivredu Zagreb. U okviru struke elektroenergetskih mreža ostao je poznat najviše po doprinosu izboru naponskih razina u elektroenergetskom sustavu te po izvornim studijama razvitka distribucijskih mreža i dimenzioniranja njihovih sastavnica. Poznata su i njegova skripta *Elektroenergetske mreže*.

**Ključne riječi:** profesor Mladen Dokmanić, standardizacija napona, razdjelne mreže

### **1. Kratka biografija i služba**

Profesor Mladen Dokmanić rođen je u Šćitarjevu kraj Velike Gorice 8. veljače 1908., a umro je u Zagrebu 12. prosinca 1980. godine. Gimnaziju je završio 1929. u Novoj Gradiški, a na Elektrostrojarskom odjelu Tehničkog fakulteta u Zagrebu diplomirao je 1937. godine. Akad. god. 1938./1939. bio je asistent dnevnika za predmet Hidraulički strojevi. Od 1937. godine kao inženjer radi u Banovinskom elektrotehničkom poduzeću (od 1941. Državno elektrotehničko poduzeće, danas Hrvatska elektroprivreda – HEP) do 1945. godine. Radio je na projektiranju i gradnji električnih razdjelnih mreža od 6 kV do 30 kV.



Sl. 1.: Profesor Mladen Dokmanić

Projektirao je i vodio gradnju voda Zagreb –Vinodol nazivnog napona 110 kV, prvog takvog dalekovoda u nas, a sudjelovao i u izgradnji voda Zagreb – Rajhenburg (Brestanica, Slovenija) od 110 kV. Od 1945. do 1952. radio je na projektiranju i gradnji električnih mreža i transformatorskih stanica u Električnom poduzeću Hrvatske kao šef odjela i tehnički upravitelj njegove zagrebačke podružnice, zatim kao šef odjela za gradnju termoelektrana i hidroelektrana u Hrvatskoj u ravnateljstvu zagrebačke Elektrane te na teorijskim poslovima u energetsom odjelu Glavne direkcije za elektroprivredu Hrvatske.

Zanimljivo je da je profesor Dokmanić, puno prije izgradnje dalekovoda najviših napona u Hrvatskoj, zagovarao izgradnju dalekovoda od 380 kV, ali ‘pobijedila’ je struja koja je zagovarala izgradnju dalekovoda od 220 kV. Zbog takvih je “vidovitih” ideja bio ozbiljno podcjenjivan. To je vidljivo i po tome što danas napon od 220 kV u odnosu na napon od 400 kV ima minorno značenje u prijenosu električne energije od elektrana do potrošačkih centara.

Od 1946. godine kao honorarni nastavnik na Tehničkom fakultetu u Zagrebu predavao je predmete Prijenos električne energije te Mreže i instalacije, a za docenta je izabran 1952. godine. Nakon habilitacije iz područja oblikovanja razdjelnih mreža, na Elektrotehničkom fakultetu u Zagrebu izabran je 1965. za izvanrednog profesora. Umirovljen je 1978. godine.

Kao suradnik Instituta za elektroprivredu Zagreb (IE) izradio je dvadesetak studija i projekata razdjelnih mreža za područja Slavonije, Baranje, Plitvičkih jezera, Zadra, Zagreba i Šibenika. U Jedinici za razdjelne mreže u Institutu za

elektroprivredu Zagreb posebno je bio spominjan njegov rad *Elektrifikacija Baranje* (pretpostavljam da se tako zvao), negdje oko 1960. godine ili nešto prije, koji je dugo vremena bio uzor za izradu planova razvitka razdjelnih mreža na mnogim distribucijskim područjima u Hrvatskoj (Istra, Primorje, Zagorje, Prigorje i sl.). U tim studijama i elaboratima uvijek se, kao osnovno, izrađivala prognoza potrošnje električne energije i snage. Zanimljivo je da je profesor Dokmanić upozoravao da su prognoze uglavnom “meteorologija” i da se planer razvitka mreže ne smije u njih jako pouzdavati, posebno kad je riječ o dugoročnim prognozama. Samo po sebi to mnogo govori o njegovu znanju, prije svega kad se zna da su se onda prognoze obavljale bez oslonca na statističke metode i modele – tako je bar bilo u grupi za razdjelne mreže u IE-u u vrijeme sve do kraja 1970-ih. S novim suradnicima to je potom polako ispravljeno jer se počelo u studijama i u razradama sve više razmatrati prijelaz na novi srednji napon od 20 kV (dotad je srednji napon bio 10 kV i 35(30) kV), pa je stručniji pristup bio nužan.

U studijskim je radovima profesor Dokmanić obradio izbor i standardizaciju napona, izbor presjeka vodiča, gustoću transformatorskih stanica i ekonomsko oblikovanje dalekovoda, problem optimalnog presjeka vodiča dalekovoda te ekonomsku gustoću struje, ekonomsku prijenosnu snagu i optimalni presjek vodiča. Stručne i znanstvene radove objavljivao je u časopisu *Elektroprivreda* (1950., 1956.), u *Elektrotehničkom vjesniku* (1950.), u *Biltenu Zajednice elektroprivrednih poduzeća Hrvatske* (1954.) i u zbornicima referata *Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques* (CIGRÉ).

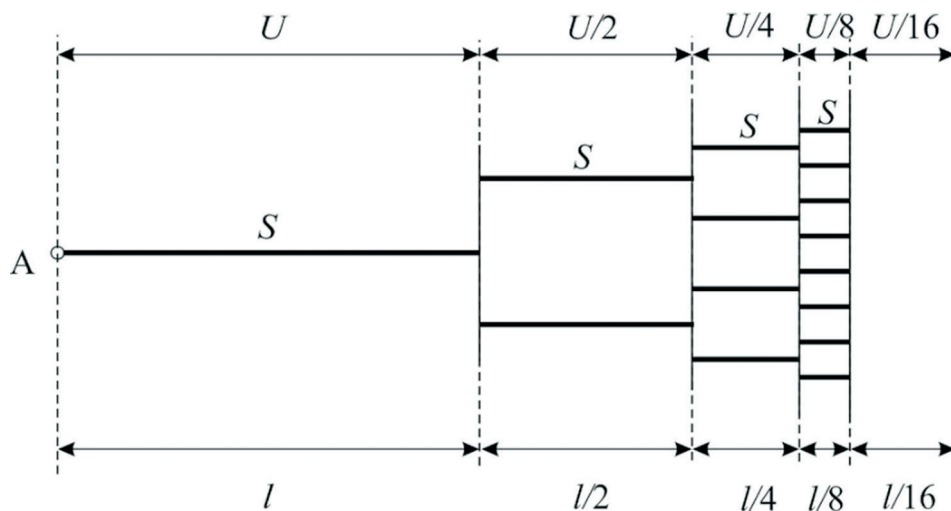
Napisao je opširna i uzorna skripta *Elektroenergetske mreže* (Zagreb, 1966.), za izdavanje kojih nije dobio financijsku potporu (!), pa smo kao studenti sami platili prijepis njegova rukopisa, po kojoj smo skripti u daljnjem učili za ispit.

## 2. Odabir niza naponskih razina

Svrha rada je dati osvrt i ukazati na rad profesora Dokmanića [2], u kojem je prvi pokazao da se hijerarhija nazivnih napona u distribucijskim mrežama odabire po ‘geometrijskom redu’ s obzirom na to kakav se doseg napajanja (opskrbe) želi postići. To je citirano i u studiji [3].

### 2.1. Razdjelni sustav s polovičnim naponskim koracima (naponski sustav 1)

Točka A na slici 2. (naponski sustav 1) predočuje izvor napajanja iz kojeg se napajanje nastavlja putem voda određenog presjeka vodiča  $S$  i nazivnog



Sl. 2.: Razdioba električne energije prema 'naponskom sustavu 1'

napona  $U$ . S pomoću tog napona može se prenijeti određena snaga  $P$  (kilovati ili megavati) na određenu udaljenost  $l$  (km) uz određeni gubitak napona. Na kraju tog voda je transformatorska stanica koja transformira napon na pola pa se jednaka snaga uz isti gubitak napona može prenijeti putem dvaju vodova od polovine duljine  $l/2$  prethodnog. Analogno se to događa i u idućem koraku, tj. kad se uz četvrtinu početnog napona ista snaga i uz isti gubitak napona prenosi putem četiriju vodova četvrtine duljine  $l/4$  itd. S obzirom na to da se s određene razine na dvostruko nižu naponsku razinu u takvom sustavu prenosi jednaka snaga  $P$ , onda se to razmatranje može predložiti matematički kao:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot g \cdot S \cdot \cos \varphi = 2 \cdot \frac{U}{2} \cdot g \cdot S \cdot \cos \varphi = 4 \cdot \frac{U}{4} \cdot g \cdot S \cdot \cos \varphi \dots$$

gdje je:

|                |                                               |
|----------------|-----------------------------------------------|
| $U$            | nazivni napon, kV                             |
| $g$            | gustoća struje u vodiču, A/mm <sup>2</sup>    |
| $I$            | struja, A                                     |
| $S$            | presjek vodiča <sup>1</sup> , mm <sup>2</sup> |
| $\cos \varphi$ | faktor snage                                  |

Iz slike 2. vidi se da za 'naponski sustav 1' postoji analogija nazivnog napona i duljine pojedinih vodova (izvoda) na pojedinoj naponskoj razini.

<sup>1</sup>Oznaka prof. Dokmanića, obično se sa  $S$  označava prividna snaga.

Naponi se prema kraju opskrbe smanjuju prema sljedećem redu:

$$U + \frac{U}{2} + \frac{U}{4} + \frac{U}{8} \dots$$

a jednako tako se smanjuju i duljine pojedinih vodova na sljedećoj nižoj naponskoj razini, tj.:

$$l + \frac{l}{2} + \frac{l}{4} + \frac{l}{8} \dots$$

U tom se smislu ukupan doseg napajanja  $L$  od točke A do kraja može izraziti kao:

$$L = l \cdot (1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} \dots), \text{ km}$$

Izraz u zagradi je geometrijski red:

$$1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{2^3} \dots + \frac{1}{2^k}$$

čija je suma, kad potencija  $k$  teži prema beskonačno, tj.  $k \rightarrow \infty$ :

$$\frac{1}{1 - \frac{1}{2}} = 2$$

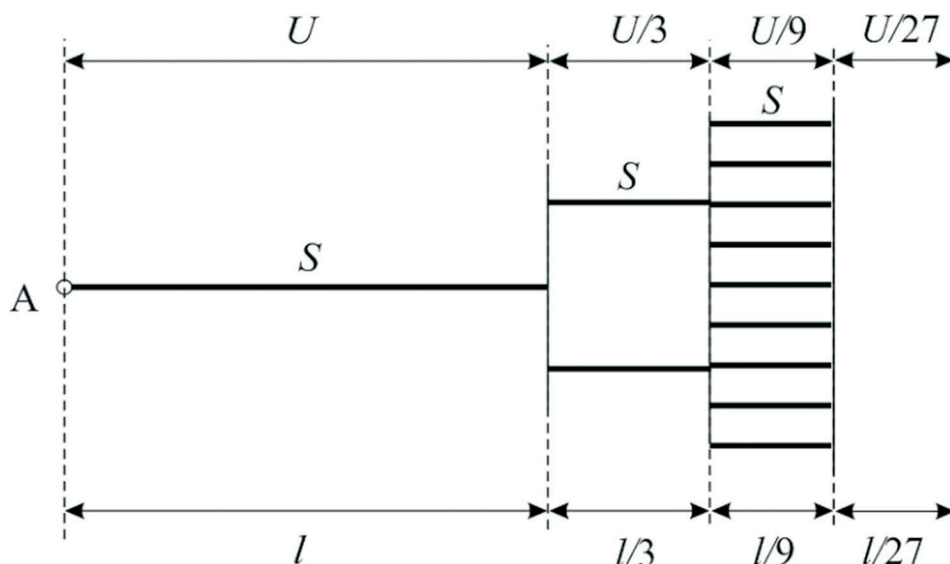
pa je ukupni doseg napajanja  $L$ , prema sustavu 1 jednak:

$$L = 2 \cdot l, \text{ km.}$$

## 2.2. Razdjelni sustav s trećinskim naponskim koracima (naponski sustav 2)

Analogno se stupnjevanje naponskih razina može ponoviti i hijerarhijskim smanjivanjem sljedećeg nižeg napona na trećinu prema ‘naponskom sustavu 2’, kao na slici 3.

Naponi se prema kraju opskrbe prema ‘naponskom sustavu 2’ smanjuju u nizu:



Sl. 3.: Razdioba električne energije prema 'naponskom sustavu 2'

$$U + \frac{U}{3} + \frac{U}{9} + \frac{U}{27} \dots,$$

a jednako tako smanjuje se i duljina pojedinog voda, počevši od točke A prema nižim naponskim razinama, tj.:

$$l + \frac{l}{3} + \frac{l}{9} + \frac{l}{27} \dots$$

U tom se smislu ukupan doseg napajanja može izraziti kao:

$$L = l \cdot \left(1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{9} + \frac{1}{27} \dots\right), \text{ km}$$

Izraz u zagradi je geometrijski red:

$$1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{3^3} \dots + \frac{1}{3^k}$$

čija je suma, kad potencija  $k$  teži prema beskonačnosti, tj.  $k \rightarrow \infty$ :

$$\frac{1}{1 - \frac{1}{3}} = 1,5$$

pa je ukupni doseg napajanja  $L$  od točke A do kraja, prema naponskom sustavu 2 jednak:

$$L = 1,5 \cdot l, \text{ km.}$$

### 2.3. Konačni prijedlog profesora Dokmanića

Naponske sustave 1 i 2 profesor Dokmanić smatrao je osnovnim. Prema svojoj intuiciji predložio je sustav s nizom napona, takav da ako je  $110^2 : 35 \approx \pi$ , onda je doseg napajanja jednak:

$$L = l \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{\pi}} \approx 1,47 \cdot l, \text{ km}$$

Analogijom s duljinom pojedinih izvoda i napona dolazi se približno, množeći napone redom faktorom  $\pi$ , počevši od niskog napona 0,38 kV (danas je to 0,4 kV) konačno do predloženog niza napona:

$$0,38 - (1) - (3) - 10 - 35 - 110 - 330 \text{ kV.}$$

Zanimljivo je da su takav niz naponskih razina prihvatile i neke druge zemlje, npr. nekadašnji Sovjetski Savez (naravno, najprije i u cijeloj bivšoj Jugoslaviji).

Napon 3 kV nije prihvaćen kao nazivni napon za javne mreže, međutim, nazivni napon od 1 kV moguće je koristiti jer to propisi načelno omogućuju. Tako je profesor Dokmanić za potrebe napajanja pojedinih zaselaka ili udaljenijih poljoprivrednih dobara predlagao napajanje naponom od 0,95 kV uz transformaciju od 0,95/0,38 kV (umjesto skupljih rješenja napajanja na niskom naponu od 0,38 kV ili vodom od 10 kV te transformatorskom stanicom 10/0,38 kV).

Osim toga, treba na kraju uvidjeti da se pojedini naponi između susjedne donje i gornje razine mogu približno izračunati prema Dokmanićevoj ideji kao 'geometrijska sredina' tih dvaju napona. Tako je, primjerice, napon između napona 3 kV i 35 kV:

$$U_{10} = \sqrt{3 \cdot 35} = \sqrt{105} = 10,25 \approx 10 \text{ kV,}$$

<sup>2</sup>Odnosi se na napon hijerarhijski nadređen srednjem naponu.

te analogno napon od 35 kV, koji se nalazi između napona 10 kV i 110 kV:

$$U_{35} = \sqrt{10 \cdot 110} = \sqrt{1100} = 33 \approx 35 \text{ kV}.$$

Pravilo porasta nazivnih napona prema geometrijskom nizu potvrđeno je i poslije, služeći se drukčijim pristupom, primjerice u studiji [4].

Pri odabiru naponskih razina svakako se uzima u obzir da pojedine naponske razine ne budu međusobno preblizu jedna drugoj, čime se omogućuje elektrifikacija s minimalnim troškovima investicija i održavanja uz kvalitetnu i pouzdanu opskrbu.

## Zaključak

Unatoč tomu što je razmjerno malo poznat u današnjim krugovima elektrotehničke struke, profesor Mladen Dokmanić svojim je idejama o stupnjevanju naponskih razina djelovao od samog početka (50-ih godina prošlog stoljeća), kad se naglo povećavala potrošnja električne energije i nastojalo osmisлити daljnji razvitak elektroenergetskih sustava. Shvaćalo se da pojedine naponske razine ne smiju biti preblizu jedna drugoj. Optimizacija pojedinog sustava ovisi o više parametara, kao što je planirana gustoća korisnika, njihov standard, poslovne i industrijske aktivnosti itd. Dokmanićeve zamisli o geometrijskom redu naponskih razina dobile su potvrdu u kasnijim studijama, a sustav s hijerarhijskim smanjivanjem napona na trećinu (ili na  $1/\pi$ ) postoji i danas, i to ne samo u Hrvatskoj nego i u zemljama u okruženju.

Zbog potrebe smanjivanja gubitaka naknadno su se (60-ih i 70-ih godina prošlog stoljeća), u planovima i izgradnji na područjima veće gustoće opterećenja ( $\text{MW/km}^2$ ), kao što su, primjerice, središta gradova, pojavile i tzv. izravne transformacije 110/10 kV (čime se “preskače” napon od 35 kV), što u vrijeme navedenog rada [2] profesora Dokmanića još nije bilo toliko aktualno. Također se zbog pitanja troškova gubitaka u srednjonaponskoj mreži u Hrvatskoj počelo uvoditi napon od 20 kV (a također i izravna transformacija 110/20 kV), koji nije u skladu s postojećim opadanjem napona na trećinu. Taj bi napon načelno trebao zamijeniti dva susjedna napona, i to 10 kV i 35 kV (npr. Istra, područje Primorja, Novi Zagreb, industrijska zona Zagreb-zapad i druga područja), pa bi se time prešlo na drukčiju hijerarhiju napona. Iako je tako narušen Dokmanićev niz, takav postupak dovodi do smanjenja gubitaka električne energije i održavanja. Za spomenuti je, usput, da se izravnom transformacijom 110/20 kV napaja i dio električne vuče vlakova u Hrvatskoj i to će se proširiti i na cijelu elektrovenu (ako već nije!).

Međutim, zbog mnogih razloga, kao što je pitanje investicija velikog dijela neamortiziranih, ali iskoristivih mreža (pogotovo kabelskih), postrojenja i transformatorskih stanica, zadržani su i danas naponi od 10 kV i 35(30) kV. Uz spomenuti dodatak napona od 20 kV, korišteni niz napona danas u javnim mrežama u Hrvatskoj, počevši o najnižeg niskog napona 0,4 kV je:

$$0,4 - 10 - 20 - 30(35) - 110 - 220 - 400 \text{ kV.}$$

## Izvori

- [1] – *Spomenica 1919. –1969., 50 godina studija elektrotehnike u Hrvatskoj*, Zagreb, 1969., (prilog Prof. Muljević), str. 119-120.
- [2] Dokmanić, M., O izboru napona, presjeka vodiča i gustoće transformatorskih stanica u jugo-slavenskim mrežnim sistemima, *Elektrotehniški vesnik*, Ljubljana, god. IV. (III), br. 9-10/1950.
- [3] Mihalek E., Moser J., Perspektivni naponski sustav u elektrodistributivnoj mreži SR Hrvatske, II i III dio, str. od 45 do 48. Institut za elektroprivredu Zagreb, Zagreb, 1982.
- [4] Pehani, A. i dr., Izbirana petostnih stepenja za razdaljevanje električne energije, ref. št. 354, Elektroinštitut, Ljubljana, 1967.

## **Professor MladenDokmanić and his contribution to the choice of voltage levels and the development of the Croatian power system**

*Ernst Mihalek*

**Abstract:** Professor Mladen Dokmanić (born 1908\_3\_08, died 1980\_12\_12) is a little talked about, lectured at the Faculty of Electrical Engineering at the Department of Transmission Networks and was an associate of the Electric Power Institute Zagreb. Within the profession of power grids, he remained famous for the contribution of the choice of voltage levels in the power system and in the original studies of the development of distribution networks and the dimensioning of the components of these networks. His script *Elektroenergetske mreže (Electroenergetic Networks)* was significant as well.

**Keywords:** distribution networks, Prof. Mladen Dokmanić, voltage levels standardization