

mag. ing. el. Borna Juriša
Inginspekt - Opatija d.o.o.
bornajurisa@gmail.com

NAPONSKI PROPADI U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU

SAŽETAK

Naponski propadi su privremena smanjenja efektivne vrijednosti napona nakon čega slijedi njen brz oporavak u kratkom vremenskom razdoblju, a danas predstavljaju najčešći problem kvalitete električne energije s mogućnošću utjecaja na velik broj kupaca. Njihove karakteristike su definirane važećim normama no one ne stavljaju ograničenja na njihov broj u elektroenergetskim sustavima. Povećani zahtjevi kupaca kojima naponski propadi mogu uzrokovati financijsku štetu i neugodnosti rezultirali su interesom operatora sustava za uvođenjem njihova reguliranja sa svrhom povećanja kvalitete električne energije, gdje neke države već aktivno prate i ograničavaju ove naponske događaje. Dugogodišnjim istraživanjima pokazano je da se broj i značajnost izmjerenih naponskih propada može uvelike razlikovati od sustava do sustava što je rezultiralo različitim pristupima i konačnim zaključcima po pitanju regulacije. Dosad utvrđene smjernice i postupci prilikom uvođenja regulacije naponskih propada u Europi biti će predmet ovog rada, uz postojeće primjere iz nekoliko država.

Ključne riječi: kvaliteta napona, naponski propad, mjerenje kvalitete električne energije, regulacija, krivulje otpornosti, krivulje podjele odgovornosti

VOLTAGE SAGS IN DISTRIBUTION SYSTEMS

SUMMARY

Voltage sags are temporary reductions in RMS voltage followed by its quick recovery within a short period of time, and today they represent the most common power quality problem with the ability to affect a large number of customers. Their characteristics are defined by current standards but they do not place limits on their number in power systems. Increased customer demands, to whom voltage sags can cause significant financial damage and inconvenience, have resulted in the interest of system operators in introducing regulation with the purpose of increasing power quality, where some states are already actively monitoring and limiting these voltage events. Over the years, research has shown that the number and significance of measured voltage sags can vary greatly from one power system to another, resulting in different approaches and final conclusions regarding regulation. The guidelines and procedures established so far in the introduction of voltage dip regulation in Europe will be the subject of this paper, along with existing examples from several countries.

Key words: voltage quality, voltage sag, power quality monitoring, regulation, voltage tolerance curves, voltage responsibility curves

1. UVOD

U posljednjih nekoliko godina pridaje se velika važnost kvaliteti električne energije, gdje je u razvijenim zemljama vidljivo povećanje obima provedenih mjerenja i monitoringa. Kvaliteta električne energije se zapravo svodi na kvalitetu napona, a njegovo praćenje može dati uvid u radne značajke pojedinih mjernih lokacija, ali i elektroenergetskog sustava kao cijelog. Danas razlikujemo više poremećaja kvalitete napona no naponski propadi ostaju predmet najviše istraživanja zbog svoje učestalosti, nepredvidive prirode i mogućnosti utjecaja na kupce gdje uzrokuju probleme u radu električnih uređaja i opreme što nerijetko rezultira neugodnostima i financijskim štetama ponajprije u industriji, ali i kućanstvima. Važeće norme koje se primjenjuju na području Europe poput HRN EN 50160:2012 [1] i IEC 61000-4-30 [2] definiraju naponske propade, ali ne stavljaju ograničenja na njihove karakteristike te frekventnost pojavljivanja u elektroenergetskim sustavima. Mjerenjem i praćenjem naponskih propada pokazalo se da se navedene značajke mogu uvelike razlikovati od sustava do sustava pa je u posljednjih nekoliko godina vidljiv trend uvođenja regulacije naponskih propada na nacionalnoj razini u europskim državama sa svrhom smanjenja njihova broja i povećanja kvalitete opskrbnog napona. Sve više operatora prijenosnih i distribucijskih sustava koristi uređaje za mjerenje kvalitete električne energije kako bi zajedno sa zainteresiranim kupcima došli do korisnih podataka koji mogu biti od velikog značaja pri suzbijanju postojećih negativnih utjecaja naponskih propada ili pak odabira optimalnog mjesta priključka potrošača na mrežu. Budući da naponski propadi još nisu limitirani ni po broju pojavljivanja niti po karakteristikama, danas se rezultati njihovog nadgledanja najviše koriste za analizu performansi i pouzdanosti energetske sustava. Kontinuirano praćenje također doprinosi razumijevanju njihova utjecaja na električne uređaje, a svi dobiveni podatci i saznanja omogućuju razvijanje i poboljšanje postojećih tehničkih standarda, te daljnje unaprjeđenje kvalitete električne energije. Uvođenjem regulacije postavljaju se jasni i određeni zahtjevi za ovaj najučestaliji problem, te će se u nastavku obraditi preporuke u vezi njihova monitoringa, te primjeri i metode uvedenih regulacija iz nekoliko država.

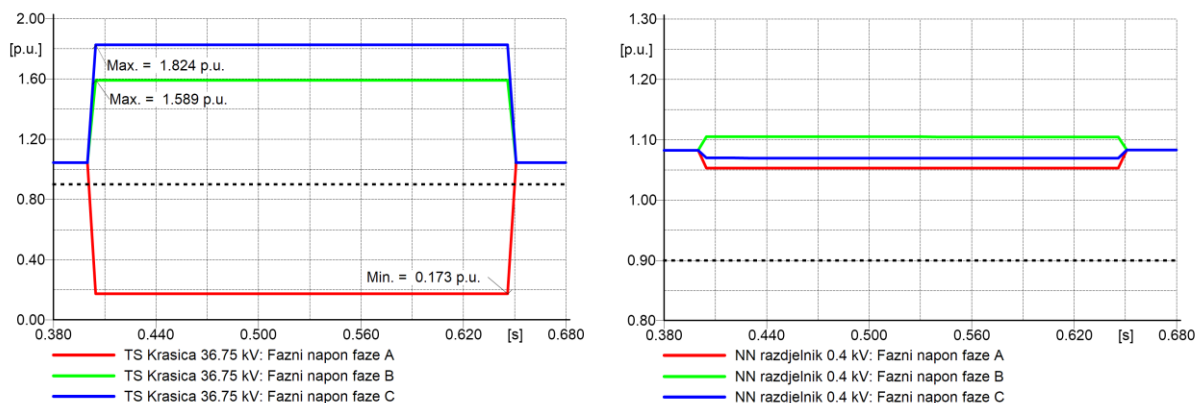
2. KARAKTERISTIKE I UTJECAJ NAPONSKIH PROPADA NA KUPCE

Naponski propad je naglo, privremeno smanjenje vrijednosti mrežnog napona nakon čega se ponovno uspostavlja prvobitna vrijednost. Opisuju ga dva parametra: magnituda odnosno preostali iznos napona (najčešće izražen u postocima ili p.u.) i trajanje. Norma HRN EN 50160:2012 za naponske propade definira gornji prag od 90 % U_n dok je donji prag 5 % U_n . Vrijeme trajanja naponskog propada je definirano od $\frac{1}{2}$ periode (10 ms) pa do 1 minute. Glavni uzroci su im kvarovi na strani potrošača ili u elektroenergetskoj mreži, ali također mogu nastati i kao posljedica uklapanja energetske transformatora ili velikih promjena opterećenja. Zapravo su povezani s protjecanjem jakih struja što onda dovodi do značajnih padova na impedancijama mreže. U većini slučajeva, naponski propadi su nepredvidivi događaji te su sastavni dio svakog elektroenergetskog sustava.

Naponski propadi uslijed kvarova u elektroenergetskom sustavu su najveći po dubini te mogu zahvatiti najviše potrošača. Magnituda naponskog propada ovisi o vrsti kratkog spoja te impedanciji mreže, odnosno udaljenosti od kvara (impedanciji vodova/kabela od kvara do točke promatranja), impedanciji kvara te vrsti uzemljenja. Njegovo trajanje se svodi na brzinu i uspješnost relejne zaštite pri otklanjanju kvarova, koji se mogu dogoditi na bilo kojoj naponskoj razini, no vjerojatnosti za to su puno veće u prijenosnim i srednjenaponskim distribucijskim mrežama zbog pretežitog nadzemne izvedbe. Kada se kvar dogodi na određenoj sabirnici ili vodu, doći će do naponskog propada na ostalim bliskim sabirnicama, a mogu se osjetiti i na sabirnicama smještenim mnogo niže od mjesta nastanka kvara. To svojstvo se naziva propagiranje, te se radi o širenju naponskih propada kroz elektroenergetske mreže preko transformatora i to uvijek u smjeru s viših naponskih razina na niže. Stoga krajnji potrošači priključeni na niski napon ($U_n \leq 1$ kV) će zbog propagiranja iskusiti naponske propade iz svih viših naponskih razina, od onih distribucijskih pa do prijenosnih. Propagiranje naponskih propada na naponske razine više od onih na kojoj su nastali je rijetka ili zanemariva pojava zbog prijenosnih omjera transformatora. S izvorom u visokonaponskim ili srednjenaponskim mrežama naponski propadi mogu dosegnuti najmnogobrojnije potrošače priključene na niski napon te također i one najosjetljivije s priključkom na mreže srednjega napona (npr. tvornice, industrije, tiskare i sl.). Propadi s izvorom u niskonaponskim mrežama su izrazito lokalne prirode zbog njihove ograničene mogućnosti uzlaznog propagiranja [3].

Karakteristike propagirajućih naponskih propada se u suštini ne mijenjaju bez obzira na prijedenu električnu udaljenost, osim u slučaju prolaska kroz energetske transformatore. Utjecaj spojeva faznih namota transformatora se može svesti na uklanjanje nulte simetrične komponente kod spojeva zvijezda –

zvijezda, gdje je bar jedno zvjezdište neuzemljeno, ili trokut - trokut (beskonačne impedancije u nultom nadomjesnom simetričnom sustavu), te zamjenu faznih naponskih propada u linijske (i obrnuto) kod nesimetričnih vrsta kvarova; spojevi zvijezda - trokut, trokut - zvijezda te zvijezda - cik-cak. Vrsta spoja transformatora može u nekim slučajevima ublažiti utjecaje naponskih propada na kupce, a utjecat će i na odabir lokacija postavljanja fiksnih mjernih instrumenata za analizu kvalitete električne energije (mrežnih analizatora) zbog čega je važno znati kako se kvarovi, te samim time i posljedični naponski propadi, šire kroz elektroenergetske mreže. Primjerice, za povezivanje srednjenaponskih (SN) i niskonaponskih (NN) mreža najčešće se koriste energetske transformatori spoja zvijezda - cik-cak (Yz) te trokut - zvijezda (Dy) koji će, povrh uklanjanja nulte simetrične komponente, promijeniti i tip nesimetričnog naponskog propada. Stoga će trolinjski kratki spojevi u SN mreži kao jedina simetrična vrsta kvara rezultirati trolinjskim naponskim propadima u NN mreži, dvopolni kratki spojevi će propagiranjem dovesti do jednofaznih propada dok se jednofazni kvarovi u većini slučajeva neće osjetiti u NN mreži. Na slici 2.1 je prikazan primjer pozitivnog utjecaja vrste spoja energetskog transformatora na propagirajući naponski propad [3].



Slika 2.1 Usporedba propagirajućeg naponskog propada u srednjenaponskoj (lijevo) i niskonaponskoj (desno) mreži [3]

Za jednofazni kvar koji je nastao u srednjenaponskoj mreži 35 kV došlo je do dubokog propada napona u zahvaćenoj fazi A i velikih nadvišenja u preostale dvije faze zbog uzemljenja zvjezdišta transformatora preko djelatnog otpora. Rezultat toga je da su linijske vrijednosti napona ostale gotovo nepromijenjene nakon nastanka kvara te ostaju blizu nazivnima. Propagiranjem kroz Dyn5 transformator koji pored uklanjanja nulte simetrične komponente uvodi i promjenu linijskih napona u faze, naponski propad se neće osjetiti na nižim naponskim razinama, gdje su na slici prikazane naponske prilike na sabirnici NN razdjelnika u 0.4 kV mreži. Više o samom principu propagiranja i utjecaju faznih spojeva transformatora može se naći u [3].

3. REGULACIJA NAPONSKIH PROPADA

Dopušteni broj naponskih propada u elektroenergetskim mrežama još nije striktno određen zbog njihove stohastičke prirode. Prema normi HRN EN 50160:2012 može ih se očekivati od nekoliko desetaka pa do jedne tisuće u periodu od godinu dana, jer je njihova frekventnost i vjerojatnost teška za odrediti, te će ovisiti o karakteristikama pojedinog energetskeg sustava i točki promatranja. Osim definiranja naponskog propada, spomenuta norma pruža i tablicu za njihovu klasifikaciju baziranu na najvećem propadu i ukupnom trajanju (tablica I). Ovakva klasifikacija je praktična pri određivanju učestalosti i ozbiljnosti propada napona tijekom određenog perioda, no nije dovoljno detaljno razrađena da daje podatke o očekivanom ili pak dopuštenom broju naponskih propada. Za današnje elektroenergetske sustave u Europi, uvjeti kvalitete električne energije prema normi HRN EN 50160:2012 su zastarjeli te ne pružaju dugoročnu inicijativu za poboljšanje istih.

Tablica I. Klasifikacija naponskih propada prema normi HRN EN 50160:2012 [1]

Preostali iznos napona [%]	Trajanje [s]				
	$0.01 \leq \Delta t \leq 0.2$	$0.2 < \Delta t \leq 0.5$	$0.5 < \Delta t \leq 1$	$1 < \Delta t \leq 5$	$5 < \Delta t \leq 60$
$80 \leq u < 90$	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
$70 \leq u < 80$	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
$40 \leq u < 70$	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
$5 \leq u < 40$	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
$u < 5$	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅

Ipak, tijekom proteklog desetljeća vidljivi su pokušaji od strane operatora sustava i znanstvene zajednice za uvođenjem regulacije ovih naponskih događaja te općenitim pooštavanjem važećih normi [4]. Države poput Francuske, Nizozemske, Norveške, Švedske i Irske već koriste nacionalne standarde koji su zahtjevniji po pitanju kvalitete napona [5], a neke od njih su svojevrijem uvele i regulaciju naponskih propada kao najučestalijeg problema kvalitete električne energije.

Prvi korak prema reguliranju i ograničavanju broja naponskih propada bilo bi jasno i dosljedno definiranje njihovih pokazatelja. Prikupljanje dovoljne količine obradivih podataka je imperativ za daljnje korake, gdje su trenutna frekventnost pojavljivanja naponskih propada u mrežama i njihovi izvori podaci koji se mogu dobiti jedino mjerenjima u elektroenergetskim mrežama. Određivanjem mjerodavnih karakteristika naponskih propada nadalje se mogu odrediti njihove značajke na pojedinim lokacijama, a uz dovoljan broj mjernih točaka omogućiti će se uvid u cijeli elektroenergetski sustav. Zatim se dobiveni rezultati moraju ocijeniti i prikazati na odgovarajući način, te naposljetku odrediti utjecaj naponskih propada na kupce električne energije.

3.1. Monitoring naponskih propada

Operatori sustava moraju imati uvid u stanje kvalitete električne energije u elektroenergetskim mrežama, a u današnje vrijeme uporaba modernih mjernih instrumenata za analizu kvalitete električne energije (mrežnih analizatora) dozvoljava prikupljanje velikog broja podataka o kvaliteti opskrbnog napona. Mjerenja kvalitete električne energije (PQ, engl. *power quality*) ovisno o zahtijevanim parametrima mogu različito trajati, pa sukladno tome postoji više načina postavljanja mrežnih analizatora, koji se danas u praksi koriste:

- Dugoročno, kontinuirano mjerenje kvalitete električne koristeći fiksne, trajno ugrađene mjerne instrumente
- Periodično PQ mjerenje s prijenosnim analizatorima koje se provodi po unaprijed utvrđenom rasporedu i lokacijama
- Privremeno mjerenje po potrebi koristeći prijenosne ili ručne mjerne instrumente za mjerenja po potrebi (npr. dijagnoza problema u radu pojedine opreme ili pritužbe kupaca)

Zajedničko istraživanje CIGRE/CIREC radne grupe [6] je anketom provedenom u 43 države iz cijeloga svijeta u 2012. godini pokazalo da operatori sustava najčešće koriste fiksne mrežne analizatore (82 % operatora sustava) gdje 55 % ispitanih operatora prijenosnog sustava (OPS) i 40 % operatora distribucijskog sustava (ODS) imaju uređaje postavljene na više od 10 % mjernih lokacija. Također se provode mjerenja koristeći prijenosne instrumente, gdje se na području Europe njima služi 72 % ispitanih operatora, kako bi se istražili problemi kvalitete električne energije, dok su glavni razlozi za mjerenja zahtjevi ili pritužbe kupaca (93 %) te usklađivanje sa standardima (66 %). Mjerenja se također nerijetko provode radi statistike i analize radnih karakteristika (performansi) sustava, općeg monitoringa (praćenja) te za istraživanje i daljnji razvoj mreže. Iako još nisu u potpunosti uređeni važećim normama, naponski propadi su najzastupljeniji problem kvalitete električne energije koji se mjeri kod 82 % ispitanih operatora. U Republici Hrvatskoj je prikupljanje podataka o kvaliteti električne energije pretežno usmjereno na prenosive mjerne uređaje s obzirom da oni trajno ugrađeni postoje u relativno malom broju [7].

Za podatke o naponskim propadima na razini cijele elektroenergetske mreže ili sustava potrebno je korištenje fiksnih mjernih instrumenata za analizu kvalitete električne energije (mrežni analizator) zbog njihove stohastičke prirode. Mjerna mjesta na koja se postavljaju mrežni analizatori mogu ovisiti o

mjerenom parametru, no to su najčešće izvodi na niženaponskoj strani transformatorskih stanica (ponajviše u SN mrežama) te mjesta priključenja potrošača na mrežu. Za kupce priključene na SN mreže mjerenja bi se trebala vršiti na mjestu priključenja ili na nekoj pogodnoj lokaciji blizu iste, dok se za transformatorske stanice odabiru sekundari transformatora. Sekundari transformatora koji povezuju VN i SN mreže su optimalna mjerna mjesta za postavljanje mrežnih analizatora budući da oni "vide" najviše naponskih propada zbog propagiranja [8] te su samim time idealne lokacije za započinjanje dugoročnih mjerenja i brzog prikupljanja većeg broja podataka.

Karakteristike naponskih propada se dobivaju iz zabilježenih naponskih oblika, a rezultati će uvelike ovisiti o odabiru linijskih ili faznih napona pri daljnjoj obradi podataka. Prema istraživanjima CIGRE/CIREC radne grupe [6] i CEER-a [9] te HRN EN 50160:2012 preporuča se korištenje sljedećih vrijednosti:

- U visokonaponskim (VN) i srednjenaponskim (SN) mrežama u obzir se uzimaju linijske vrijednosti napona
- U niskonaponskim (NN) mrežama s trofaznim četverožičnim sustavom u obzir se uzimaju fazne vrijednosti napona, dok se u trožičnom sustavu uzimaju linijske vrijednosti

Mjerenje linijskih vrijednosti napona u VN i SN mrežama daje najrelevantnije rezultate, jer zbog prethodno opisanog utjecaja transformatora na propagirajuće naponske propade na ovaj način dobivamo uvid u naponske propade, koje osjete krajnji kupci na svojim instalacijama. Fazne vrijednosti napona za daljnju obradu bi u ovom slučaju mogle precijeniti broj naponskih propada što ni u kom slučaju nije poželjno. Na taj način bi se ponajviše registrirali jednopolni naponski propadi s izvorom u VN i SN mrežama, koji se propagiranjem neće osjetiti na NN instalacijama, te će njihov utjecaj time biti vrlo ograničen.

3.2. Izbor mjerenih karakteristika

Budući da se karakteristike i količina naponskih propada mogu uvelike razlikovati od sustava do sustava, zadaća je svakog operatora sustava vršiti mjerenja kako bi se mogli prikupiti korisni i specifični podaci za daljnju obradu. Važeće norme poput HRN EN 50160:2012 i IEC 61000-4-30 definiraju dvije osnovne karakteristike, magnitudu i trajanje, dok postoji još karakteristika naponskih propada koje su otkrivane s vremenom, poput promjene faznog kuta i trenutka nastanka (engl. *point-on-wave*). One mogu imati utjecaja na rad električnih uređaja, ali se pokazao vrlo ograničen. Uvođenjem svake nove mjerljive karakteristike sukladno bi se povećao i obim mjerenja te daljnjeg klasificiranja podataka uz zanemarive prednosti, pa se prilikom određivanja utjecaja naponskih propada na električnu opremu korištenje magnitude i trajanja kao određujućih karakteristika smatra dovoljnim [10]. Dok je prema normi HRN EN 50160:2012 magnituda propada definirana između 5 % i 90 % nazivne vrijednosti napona za sve naponske razine, za mjerenja u mrežama s visokim i vrlo visokim naponima preporučljivo je umjesto nazivne vrijednosti koristiti onu netom prije nastanka propada. Za SN i NN mreže gdje su vrijednosti mrežnih napona češće bliže onim nazivnima pogodnije je koristiti fiksnu, nazivnu vrijednost prilikom definiranja magnitude odnosno preostalog iznosa napona. Osnovni parametri naponskih propada su poprilično jasni i jednostavni za odrediti, kada se odnose na jednu fazu sustava, no kod višefaznih događaja potrebno je odrediti metodu njihovog opisivanja, gdje se prema HRN EN 50160:2012 koristi „najmanja magnituda - ukupno trajanje“ (engl. *phase aggregation*). Stoga je u višefaznim sustavima magnituda propada najniža efektivna vrijednost napona u svim fazama, dok se trajanje mjeri od trenutka kada efektivna vrijednost napona u bilo kojoj fazi padne ispod gornjeg praga do onda kada se vrijednosti napona u svim fazama podignu iznad njega. Dakle sve vrste propada se klasificiraju jednako s dva osnovna parametra, bez obzira događa li se pad napona u jednoj, dvije ili sve tri faze.

3.3. Pokazatelji za elektroenergetske mreže i sustav

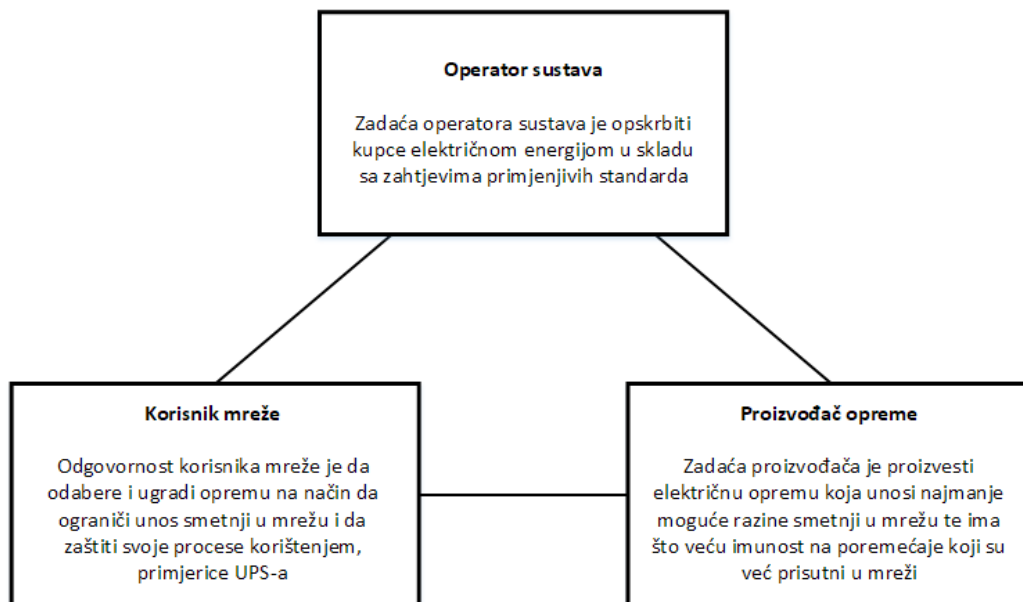
Nakon postavljanja mjernih uređaja i izbora mjerenih karakteristika počinju se prikupljati podatci o naponskim propadima. Mjerenja se provode relativno dugo, te se preporuča u trajanju ne kraćem od 3 godine [6] na odabranim lokacijama, kako bi se dobila ukupna slika o ovakvim poremećajima i omogućilo njihovo predviđanje. Preporuka se odnosi na monitoring s ciljem uvođenja regulacije, no inače se rezultati mjerenja prikupljaju na godišnjoj bazi ukoliko služe za primjerice pravljenje izvješća o naponskim propadima u mreži. Prikazivanje rezultata je bitan dio procesa mjerenja, te ono mora biti izvedeno koncizno, pregledno i na način da ne dođe do gubitka važnih informacija. Količina zabilježenih naponskih propada se najčešće prezentira koristeći prosječne vrijednosti ili češće, postotne vrijednosti. Postotna

vrijednost je mjera koja se koristi u statistici i koja pokazuje vrijednost ispod koje se određeni postotak izmjerenih podataka nalazi. Primjerice, 20 %-tna vrijednost je ona vrijednost ispod koje se nalazi 20 % zabilježenih vrijednosti. Za prikazivanje rezultata mjerenja naponskih propada koristi se više vrijednosti, 25 %-tna (donji kvartil), 50 %-tna (medijan), 75 %-tna (gornji kvartil) te 90 i 95 %-tne vrijednosti. U literaturi se postotne vrijednosti označavaju sa, npr. P95 ili CP95. Još jedna metoda je korištenje grafičkih prikaza rezultata u *magnituda-trajanje* ravnini uz neku od poznatih krivulja otpornosti odnosno tolerancije napona kao smjernicu, npr. CBEMA (engl. *Computer and Business Equipment Manufacturers Association*) ili ITIC (engl. *Information Technology Industry Council*) krivulje koje opisuju imunost osjetljivih elektroničkih uređaja na naponske poremećaje.

Kontinuiranim mjerenjem mogu se dobiti podatci o broju i karakteristikama naponskih propada na pojedinim mjernim lokacijama, a uz njihov dovoljan broj rezultati s pojedinih točaka se mogu objediniti kako bi se dobio uvid u performanse cijelog elektroenergetskog sustava. Prema [9] preporučeno je da se trajna mjerenja vrše na minimalno 20 mjernih točaka ukoliko se žele dobiti samo prosječne vrijednosti, 200 točaka za 95 %-tne vrijednosti te 1000 točaka ukoliko se žele dobiti 99 %-tne vrijednosti svih lokacija, neovisno o ukupnom broju mogućih mjernih točaka. Preporuke za dobivanje postotnih vrijednosti se baziraju na tome da treba biti bar 10 izmjerenih uzoraka iznad navedenih postotnih vrijednosti radi postizanja dovoljne točnosti prilikom procjenjivanja. U Francuskoj i Italiji mjere se prosječne i 95 %-tne vrijednosti dok se primjerice u Nizozemskoj i Mađarskoj mjere samo prosječne vrijednosti u cijelom sustavu.

3.4. Podjela odgovornosti

Poznavanje stanja i dosadašnje aktivnosti elektroenergetskog sustava je obavezno pri uvođenju bilo kakve regulacije, a prateći dosad navedene smjernice može se odrediti utjecaj naponskih propada na kvalitetu električne energije, što će nadalje utjecati na kontroliranje i ograničavanje njihova broja. Postoji više načina za regulaciju broja naponskih propada u elektroenergetskim sustavima te će preferirana metoda ponajprije ovisiti o njihovim karakteristikama i prethodnom učinku. Sastavni dio bilo kakve regulacije je određivanje odgovornosti između različitih stranki uključenih u opskrbu i potrošnju električne energije (slika 3.4.1).



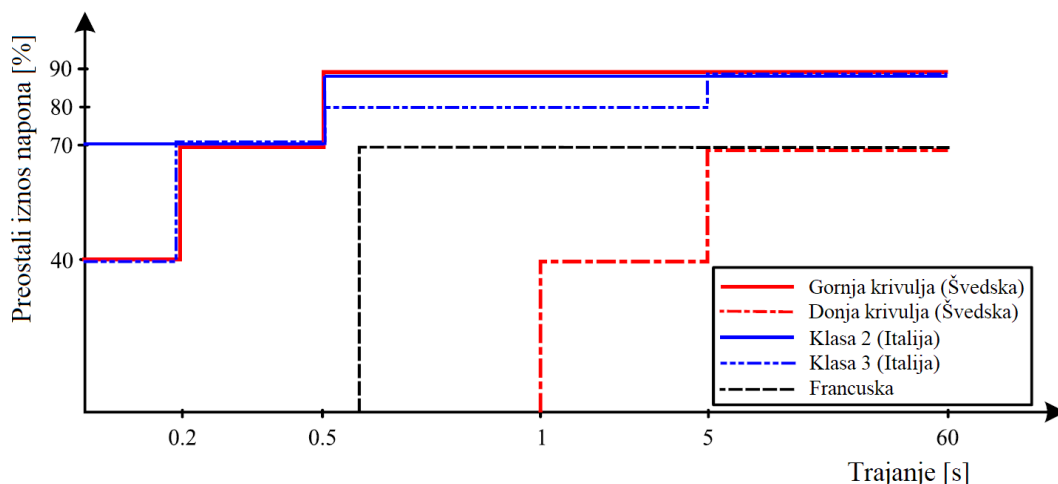
Slika 3.4.1 Podjela odgovornosti između stranki uključenih u opskrbu i potrošnju energije

Za to se koriste krivulje podjele odgovornosti (en. *responsibility-sharing curves*), koje definiraju granice između naponskih propada na koje bi potrošačka oprema ili instalacija trebala biti imuna, te propada koji bi trebali biti limitirani od strane operatora sustava. One se uglavnom temelje na ITIC i SEMI F47 (engl. *Semiconductor Equipment and Materials International*) krivuljama otpornosti ili krivuljama iz istoimenih međunarodnih standarda IEC 61000-4-11/34. Postojanje ovakvih krivulja u sklopu zajamčenih standarda kvalitete električne energije bio bi prvi korak prema regulaciji, a primjeri kakvi se koriste u

nekoliko europskih zemalja biti će opisani u nastavku te su zajedno prikazani na slici 3.5.1. Ovakve krivulje se mogu koristiti i bez podjele odgovornosti, primjerice za razlikovanje „blagih“ i „ozbiljnih“ naponskih propada.

3.5. Primjeri uvedenih regulacija

Primjerice, u Francuskoj su operatori sustava odgovorni za ograničavanje broja naponskih propada magnituda do 70 % U_n i dužih od 600 ms, dok se kupci moraju pobrinuti da su njihove električne instalacije i oprema imuni na propade s magnitudama iznad 70 % U_n u trajanju do 600 ms. Za kupce priključene na visoki napon ograničenje na broj naponskih propada se temelji na četverogodišnjim mjerenjima dok za sredjenaponske kupce ovisi o lokalnim okolnostima priključka.



Slika 3.5.1 Krivulje podjele odgovornosti iz nekoliko europskih država [11]

Švedska energetska regulatorna agencija je koristeći dvije krivulje podijelila tablicu naponskih propada na tri dijela s obzirom na preostali iznos napona i trajanje. Za propade u području iznad gornje krivulje očekuje se zanemariv utjecaj na potrošačke instalacije te je dužnost kupaca osigurati imunost njihove opreme na ovakve propade napona. Područjem između dviju krivulja su određeni naponski propadi koje operatori sustava moraju istražiti te po potrebi smanjiti njihov broj, dok su naponski propadi u području ispod donje krivulje neprihvatljivi, te naznačuju nedovoljnu kvalitetu napona. Dakle jedino propadi koji po karakteristikama spadaju u posljednje područje su brojevno ograničeni, dok regulacija za ostala dva područja navodi generalne preporuke. Za pojedinačne slučajeve mora se odrediti da li je broj naponskih propada prihvatljiv, a prilikom procjene odgovarajuće metode za smanjenje njihova broja, uzimati će se u obzir druge slične mreže sa sličnim okolnostima, kao i moguća tehnička rješenja te trošak provedbe takvih mjera. Prikazane krivulje na slici 3.5.1 vrijede za naponske razine do uključivo 45 kV, a definirane su i one za više naponske razine, te se temelje na preporukama CIGRE/CIRED/UIE radne grupe [10].

Pod regulacijom u Italiji vrše se mjerenja i javno objavljuju podatci o naponskim propadima u sredjenaponskim mrežama. Praćenje je još 2004. godine započelo u mrežama visokog i vrlo visokog napona, no ubrzo se naglasak stavio na sredjenaponske mreže zbog prijašnje objašnjenih razloga. Trenutno se koriste tri pokazatelja naponskih propada u distribucijskom sustavu: ukupan broj naponskih propada u periodu od godinu dana i broj naponskih propada ispod krivulja otpornosti definiranih Klasom 2, te Klasom 3 ispitnih razina u normama IEC 61000-4-11/34 (slika 3.5.1). Regulirani broj naponskih propada je prosječna vrijednost posljednjih dviju značajki. Rezultati mjerenja kroz periode od godinu dana su sumirani koristeći HRN EN 50160:2012 klasifikacijsku tablicu s prosječnim brojevima zabilježenih naponskih propada te postotne vrijednosti (CP5, CP25, CP50, CP75 i CP95) koje daju bolji uvid u raspodjelu naponskih propada po mjerenim lokacijama.

Nedavni prijedlog regulacije u Nizozemskoj [11] koristi težinske faktore pri određivanju ozbiljnosti opaženih naponskih propada. Na taj način se naponski propadi dijele u tri kategorije: „VELIKI“, „SREDNJI“ i „MALI“. Težinski faktori su određeni s obzirom na razliku između pružene električne snage prije nastanka naponskog propada i netom nakon kod zahvaćenih kupaca. Propadi s faktorom iznad 50 % (tj. koji rezultiraju gubitkom snage iznad 50 %) se smatraju da imaju VELIK utjecaj. SREDNJI utjecaj imaju naponski propadi koji uzrokuju gubitak snage od 30 - 50 %, dok se MALI propadi odnose na one s

težinskim faktorom ispod 30 %. Ovakvim grupiranjem se dobiju tri skupine naponskih propada koje se zatim najlakše prikazuju krivuljama tolerancije napona. Kontinuiranim mjerenjima i klasificiranjem naponskih propada na godišnjoj bazi ovom metodom dobiti će se broj naponskih propada u pojedinoj skupini što će s vremenom dati uvid u očekivane količine i karakteristike naponskih propada. Na temelju takvih prijašnjih mjerenja koristeći Poissonovu distribuciju određuje se limit na broj naponskih propada koji je potrebno periodično ažurirati (npr. svake 4 godine).

4. ZAKLJUČAK

U današnjim elektroenergetskim sustavima zahtjevi na kvalitetu električne energije postaju sve veći, prvenstveno na zahtjev kupaca, koji žele umanjiti mogućnosti utjecaja naponskih poremećaja na njihove instalacije ili procese. Učestali problemi tada zahtjevaju odgovor regulatornih agencija i operatora sustava na pronalaženju njihovog optimalnog rješenja, a uvođenje regulacije tada olakšava posao kod podjele odgovornosti i daljnjem provođenju mjera zaštite. Naponski propadi mogu prouzročiti financijske štete pa se posljednjih nekoliko godina u Europi vide pokušaji njihova ograničavanja po broju i karakteristikama, na obostrano zadovoljstvo kupaca i operatora sustava. U ovom radu su sumirane utvrđene smjernice za proces monitoringa naponskih propada u elektroenergetskim mrežama, a primjerima iz nekoliko država osvrnulo se na provedene metode reguliranja. Svi primjeri se međusobno razlikuju što potvrđuje nepredvidivu prirodu naponskih propada i razlog zbog čega u dogledno vrijeme nije za očekivati regulaciju naponskih propada u normama koje definiraju kvalitetu električne energije. Različiti faktori koji mogu utjecati na njihovu količinu i karakteristike poput udjela kablskih vodova, duljine vodova, vrste uzemljenja mreža, udjela distribuirane proizvodnje itd. su specifični za svaki elektroenergetski sustav pa se odgovornost reguliranja svodi na regulatorne agencije pojedinih država. Ista analogija se odnosi i na ostale naponske događaje, poput tranzijenata i prekida napajanja, zbog čega kontinuirana mjerenja na razini cijeloga sustava postaju aktualna potreba. Valja zapamtiti da spomenuti događaji predstavljaju problem jedino ako uzrokuju nepravilan rad uređaja i instalacija kupaca, dok su inače sastavni dio rada svakog elektroenergetskog sustava, pa će se važnost i hitnost uvođenja regulacije razlikovati među državama. Ipak, vidljiv je trend pomicanja granica po pitanju kvalitete električne energije pa je daljnji razvoj opisanih metoda i prijedloga očekivan i treba mu se prilagoditi.

5. LITERATURA

- [1] HRN EN 50160:2012 Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža, 2012.
- [2] IEC 61000-4-30 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods, 2008.
- [3] B. Juriša, "Analiza i karakterizacija naponskih propada u distribucijskom sustavu", Diplomski rad, Tehnički fakultet u Rijeci, 2019.
- [4] ERGEG, "Towards Voltage Quality Regulation in Europe - An ERGEG Conclusions Paper", 2007.
- [5] CEER, "6th CEER Benchmarking Report on the Quality of Electricity and Gas Supply", 2016.
- [6] CIGRE/CIREN Joint Working Group C4.112, "Guidelines for Power Quality Monitoring", 2014.
- [7] D. Hrkec, A. Pavić i dr., "Praćenje kvalitete napona u distribucijskoj mreži", HO CIREN 1. savjetovanje, 2008.
- [8] L. E. Weldemariam, V. Cuk i dr., "Measurement Approach for Monitoring Voltage Dips in HV and MV Network", 23rd International Conference on Electricity Distribution (CIREN), 2015.
- [9] CEER, ECRB, "Guidelines of Good Practice on the Implementation and Use of Voltage

Quality Monitoring Systems for Regulatory Purposes", 2012.

- [10] CIGRE/CIREN/UIE Joint Working Group C4.110, "Voltage Dip Immunity of Equipment and Installations", 2010.
- [11] L. E. Weldemariam, "Monitoring and Regulation of Voltage Dips in the Distribution Network", Eindhoven University of Technology, 2017.
- [12] L. E. Weldemariam, V. Cuk, J.F.G. Cobben, "A proposal on voltage dip regulation for the Dutch MV distribution networks", International Transactions on Electrical Energy Systems, Wiley, 2018.
- [13] S. Bhattacharyya, S. Cobben, W. Kling, "Proposal for defining voltage dip-related responsibility sharing at a point of connection", IET Generation, Transmission & Distribution, 2011.
- [14] CEER, "5th CEER Benchmarking Report on the Quality of Electricity Supply", 2011.