Upravljanje održavanjem na bazi rizika u elektroenergetskim sistemima

Dr Velimir Strugar¹, MSc Edin Garaplija²

¹Elektroprivreda Crne Gore AD Nikšić, Crna Gora, velimir.strugar@epcg.com, EPCG ad Nikšić, Vuka Karadžića 2, Nikšić, Crna Gora

²INZA Beograd, Srbija, edin.garaplija@inzagroup.eu, INZA Beograd, Bul. Vojvode Mišića 43, Beograd, Srbija

Apstrakt: U ovom radu je predložena inovativna metoda upravljanja održavanjem elektroenergetskih sistema zasnovano na procjeni rizika od otkaza. Na konkretnom primjeru se posebno tretira elektrodistributivni sistem kao primjer vrlo složenog tehničkog sistema. Otkaz elektrodistributivnog sistema ili nekog njegovog dijela uvijek za posljedicu ima direktne i indirektne štete, koje posebnu dimenziju za operatora distributivnog sistema ili operatora mreže i operatora mjerenja (u zavisnosti od organizacije elektrodistributivne djelatnosti na specifičnoj teritoriji) ima u uslovima otvorenog tržišta električnom energijom. Ova okolnost ima posebnu težinu uvažavajući činjenicu da su mrežne usluge regulisana djelatnost.

Kvalitet isporučene električne energije uz obezbjeđenje potrebnog nivoa pouzdanosti isporuke je u direktnoj korelaciji sa odabirom kvalitetne i efikasne strategije upravljanja održavanjem elektrodistributivnog sistema u cjelini (sistema vodova, sistema transformatorskih stanica, sistema mjerenja električne energije kao i ostalih tehničkih sistema podrške – informaciono komunikacionih sistema, sistema daljinskog nadzora, sistema pomoćnog napona, sistema za proizvodnju vazduha pod pritiskom itd.). Adekvatan odabir strategije održavanja u redovnim i vanrednim okolnostima je od neprocjenjivog značaja za sigurnost obezbjeđivanja vršenja javne djelatnosti kakva je distribucija električne energije i javnog snabdjevača, ali i za obezbjeđivanje zaštite ljudi i imovine i zaštite ukupnog poslovnog interesa kompanija koje se ovom djelatnošću bave.

Inovativna metoda uključuje upotrebu i savremenih GIS rješenja koja operatoru sistema treba da pruže puni uvid u stanje tehničke opreme na terenu i obezbijedi pravovremenu i ispravnu odluku.

Ključne riječi: elektroenergetski sistem, procjena rizika, GIS, kritična infrastruktura, registar rizika

Management of risk-based maintenance in power systems

Abstract: In this paper an innovative method of managing the maintenance of electric power systems based on the assessment of the risk of failure is proposed. On the concrete example, the electrical distribution system is especially treated as an example of a very complex technical system. The failure of the power distribution system or part of it always results in direct and indirect damages, which in the open electricity market conditions have a special dimension for the distribution system operator or the network operator and the measuring operator (depending on the organization of the electricity distribution activity in the specific territory). This circumstance has special weight, taking into account the fact that network services are regulated business.

The quality of delivered electricity with the provision of the required level of delivery reliability is in direct correlation with the selection of a quality and efficient strategy for managing the maintenance of the power distribution system as a whole (line system, transformer station system, electrical energy measurement system as well as other technical support systems - information communication systems remote control, auxiliary voltage system, pressure air production system, etc.). Adequate selection of the maintenance strategy in regular and extraordinary circumstances is of paramount importance for the security of ensuring the performance of public activities such as the distribution of electricity and public supplies, but also for securing the protection of people and property and protecting the overall business interests of the companies engaged in this business.

An innovative method involves the use of modern GIS solutions that give the system operator full insight into the state of the technical equipment in the field and provide a timely and correct decision.

Key words: power system, risk assessment, GIS, critical infrastructure, risk register

1. Uvod

Savremeno upravljanje elektroenergetskim sistemima kao vrlo složenim tehničkim sistemima, zahtijeva posjedovanje relevantnog nivoa inženjerskog iskustva uz poznavanje potrebnih vještina upravljanja od kojih značajno mjesto zauzima poznavanje metoda procjene rizika i upravljanje zasnovano na riziku. Savremeni menadžment počiva na osnovnim pretpostavkama PDCA ciklusa (P-plan, D-do, C-control, A-act) [1], koji podrazumijeva planiranje, realizaciju planova, kompetentnu kontrolu i na kraju reagovanje u smislu popravke nepravilnosti uočenih tokom kontrole. Sve ove aktivnosti, a naročito planiranje, su direktno povezane sa procjenom rizika od pojave nepovoljnih radnih stanja koja stanja izazivaju veći ili manji nivo negativnih posljedica sa kojima kompanija treba da se suoči. Ponekad je i sam reputacioni rizik dovoljno negativan da o njemu jako treba brinuti unaprijed.

2. Analiza postojećeg stanja elektrodistributivnog sistema sa aspekta procjene rizika od otkaza

Održavanje tehničkih sistema ili sredstava za rad na bazi rizika podrazumijeva donošenje odluka o održavanju i inspekcijama na osnovu procjene nivoa rizika koji otkaz sistema ili dijela sistema sa sobom nosi. Da bi se objasnio koncept održavanja na bazi rizika nužno je definisati pojam ne samo održavanja nego i pojam rizika. Rizik je kvantitativni i kvalitativni opis opasnosti tj. mjera opasnosti ili nivo opasnosti. Pošto je otkaz neke komponente u suštini statistički proces (vjerovatnoća pojave), kvantifikovanje rizika je korisna veličina koja može da posluži kod odlučivanja u pogledu rangiranja prioriteta aktivnosti u sistemu održavanja. Upravljanje rizikom je stoga našlo svoje mjesto u održavanju tehničkih sistema [2].

Rizici poslovanja su prisutni u svakoj kompaniji i svakom tehnološkom procesu, pa tako i u procesu snabijevanja i distribucije električne energije. Neadekvatno sagledavanje rizika u elektroenergetskom sistemu uvijek rezultira neplaniranim troškovima za oporavak sistema, a često i nekontrolisanim izdacima za namirenje direktnih i indirektnih šteta koje operator distributivnog sistema mora alimentirati.

Rizik se definiše na sljedeći način:

$$\text{RIZIK} = \text{VJEROVATNOĆA (V)} \times \text{POSLJEDICA (P)}$$

Dakle, potrebno je izračunati vjerovatnoću neželjenog događaja i njegove posljedice. Nakon određivanja rizika pojedinih neželjenih događaja pažnja se usmjerava na pojačanje održavanja elemenata visokog i srednjeg rizika. U područjima niskog rizika redukuje se obim radova održavanja na strukturiran i opravdan način [3].

Jasno je da je za određivanje prioriteta održavanja pored posljedica bitna i vjerovatnoća pojave otkaza. Pojedini kvarovi u sistemu distribucije električne energije mogu rezultirati ekstremno velikim štetama kako za sistem u cjelini tako i za potrošače kao korisnike sistema. Postoji mnogo različitih uzroka koji mogu izazvati enormne štete zbog otkaza. Analiza zasnovana na utvrđivanju svih mogućih uzroka, njihovo rangiranje u smislu vjerovatnoće pojave i stavljanje u korelaciju sa mogućom štetom je aktivnost koja mora biti povjerena iskusnim ekspertima u elektrodistributivnim kompanijama.

Filozofija održavanja na bazi rizika jasno determiniše kriterijume za određivanje prioriteta : što je rizik veći to je i viši rang aktivnosti na listi prioriteta. Dakle, ukoliko je vjerovatnoća pojave nekog štetnog događaja ekstremno mala tada će najvjerovatnije biti prilično nizak i prioritet reagovanja u pogledu održavanja elementa opreme koji može biti uzrok štetnog događaja, čak iako je šteta koju otkaz tog elementa može izazvati prilično visoka.

Dilema u vezi gornjeg praga prihvatljivosti rizika je uvijek aktuelna. Posmatrano sa nivoa ukupnog elektroenergetskog sistema, radi dobijanja ukupnog rizika kompanije pukim sabiranjem svih rizika koji se mogu predviđeti, sigurno bi se došlo do ekstremno visokog troška koji bi za najveći broj kompanija bio apsolutno neprihvatljiv. Mudrim menadžerskim pristupom odlučivanja mora se na bazi poznavanja svakog dijela sistema ponaosob i sagledavanjem sistema u cjelini, prepoznati skup neuralgičnih tačaka i tu informaciju uzeti u obzir kod sastavljanja liste prioriteta odnosno registra rizika.

Dalje, održavanje sistema nije aktivnost koja se sprovodi samo radi eliminacije materijalnih šteta koje mogu nastati u sistemu. Bezbjednost je faktor koji se permanentno mora nadgledati i inkorporirati u funkciji minimizacije rizika. Stalni i organizovani monitoring u tom smislu se zahtijeva.

Održavanje na bazi rizika ima za cilj sprječavanje katastrofalnih otkaza. Da bi se ovaj cilj ostvario, moraju se identifikovati sastavni djelovi jednog postrojenja, čiji otkaz može dovesti do povrede ljudstva i velikih finansijskih gubitaka. U ovoj metodologiji se, kao kriterijum za ocjenjivanje, primjenjuju monetarne veličine kao i potencijalni uticaj na zdravlje ljudi (zaposlenih i drugih).

Kvalitetno sprovođenje održavanja na bazi rizika zahtijeva u prvom redu kvalitetne podatke o tehničkom sistemu. Troškovi prikupljanja i obrade podataka su uglavnom vrlo značajna kategorija, posebno u elektrodistributivnim kompanijama sa kompleksnom mrežom i velikim brojem korisnika sistema (velikim brojem čvornih mjesta). Relevantni tehnički podaci su uglavnom nesistematizovani i samo u rijetkim slučajevima podaci su dostupni u elektronskoj formi i organizovani u kvalitetne baze podataka. Aktivnost na digitalizaciji svih relevantnih tehničkih podataka o elektrodistributivnom sistemu (GIS podaci o elementima sistema i potrošačima, tehnički podaci o vodovima i transformatorskim stanicama, podaci o energiji i snazi u različitim tačkama sistema dobijeni mjerenjem, podaci o opterećenosti vodova i transformatora u različitim vremenskim uslovima i sezonama, itd.) su od vitalnog značaja za kvalitetnu analizu i potrebno je projekte posvećene organizovanju ovih podataka pokrenuti što prije. Ova aktivnost je kompleksna, zahtjevana i skupa, ali se sprovodi jednom u životnom vijeku sistema i nadalje se samo nadograđuje. Takođe, realizacija ove aktivnosti predstavlja prekretnicu u eksploataciji sistema i bitno doprinosi prirodnoj odbojnosti zaposlenih kad god su bilo kakve promjene aktuelne. O ovoj okolnosti se kroz upravljanje ljudskim resursima treba povesti posebna briga. U svakom slučaju, danas je na tržištu dostupno mnoštvo specijalizovanih računarskih aplikacija za upravljanje distributivnim sistemima (DMS – Distribution Management System) koje u sebe uključuju i GIS (geografski informacioni sistem) aplikacije koje su opremljene moćnim bazama podataka i kao takve mogu biti koristan alat za akviziciju svih relevantnih tehničkih podataka o sistemu.

Takođe, korišćenjem ovakvih alata moguće je predviđati moguća radna stanja sistema i sagledati moguće posljedice koje nastankom tih radnih stanja mogu da se dese. Naravno, ponekad ove aplikacije nisu u mogućnosti da analitički prikažu elemente podsistema (elemente transformatorske stanice npr.) od čije pouzdanosti zavisi rad podsistema kao cjeline. U takvim slučajevima je potrebno varijantnu analizu zasnovati prvo na svakom podsistemu pojedinačno, a kasnije te rezultate koristiti za globalnu analizu sistema kao cjeline.

Korišćenje generičkih mreža - modela je takođe dobar metod za predikciju rizičnih radnih stanja sistema. Ipak, izrada generičkih mreža mora biti povjerena odličnim poznavaoocima prirode elektrodistributivnog sistema i ekspertima sa relevantnim iskustvom u specifičnim oblastima (mjerenje, relejna zaštita, eksploatacija transformatorskih stanica i dalekovoda itd.).

Troškovi koje otkaz specifičnog dijela sistema može izazvati moraju biti kompetentno procijenjeni. U tom smislu je važno angažovanje eksperata iz oblasti finansija, nabavki i knjigovodstva. Ipak, dobra je okolnost da je često dostupnost ovih podataka veća od dostupnosti podataka o vrsti i obimu kvarova u sistemu.

Pri analizi je potrebno voditi računa da određeni dio sistema može da otkaze na različite načine. Posljedično troškovi održavanja koji su povezani sa njihovim otkazom moraju biti ocijenjeni sa uslovnom vjerovatnoćom određene vrste otkaza, odnosno treba da se uzmu u obzir prilikom određivanja rizika. Analiza ovog tipa i relevantni proračun se ne može ručno uraditi, pa čak i za elektrodistributivne sisteme sa minimalnim brojem čvorova i elemenata opreme. Za ove namjene treba koristiti raspoložive računarske alate dostupne na tržištu.

Nakon determinisanja veličina i obima posljedica i izračunavanja vjerovatnoća otkaza svake komponente sistema, izračunavaju se odgovarajući rizici. Konačno, ovom metodom će se dobiti jasna slika stanja sistema sa aspekta vjerovatnoće nastanka otkaza i obima štete koju će taj otkaz uzrokovati, odnosno moguće je sačiniti grafik rizika za cjelokupno postrojenje odnosno za cio sistem. Ovaj grafik prikazuje uređene parove tačaka određenih vrijednostima predpostavljenih posljedica i vjerovatnoća pojava otkaza. Analitička predstava ovog grafik je matrica rizika. Predikcija budućih stanja sistema se može dobiti korišćenjem modela matrica vjerovatnoće prelaza i lanaca Markova.

Ako stanje fizičkog sistema X u momentu n označimo sa X_n i ako u svakom momentu n ($n=0,1,2,3,\dots$) fizički sistem može da se nađe u jednom od stanja x_i ($i=1,2,\dots,k$), pri čemu broj stanja može da bude konačan ili prebrojivo beskonačan, dobijamo niz stanja fizičkog sistema $X_1, X_2, \dots$. Ovaj niz stanja formira lanac Markova ako vjerovatnoća da se sistem u trenutku $(n+1)$ nađe u jednom stanja stanja x_i ($i=1,2,\dots,k$) zavisi samo od stanja sistema u sadašnjem trenutku, a ne zavisi od ponašanja sistema u prošlosti (prije trenutka n). Dakle ako je sistem u momentu n bio u stanju $X_n=x_i$, onda je uslovna vjerovatnoća $p_{ij}^{n,n+1}$ da će sistem u momentu $n+1$ biti u stanju $X_{n+1}=x_j$ jednaka [3]:

$$p_{ij}^{n,n+1} = P(X_{n+1} = x_j / X_n = x_i) \quad (1)$$

Vjerovatnoća da se sistem u momentu $n+1$ naći u stanju x_j , ako se u prethodnom momentu n nalazio u stanju x_i , naziva se vjerovatnoća prelaza (za jedan korak).

Potpunu karakteristiku mogućih prelaza iz jednog stanja sistema u drugo neposredno nadolazeće stanje (prelaz za jedan korak) predstavlja matrica vjerovatnoće prelaza:

$$P = P(1) = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{k1} & \cdots & p_{kk} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Zasnovano na unaprijed definisanim kriterijumima, kroz postupak proračuna rizika može se utvrditi da li su u konkretnim slučajevima rizici prihvatljivi ili nijesu. Za mitigaciju rizika potrebno je definisati odgovarajuće korektivne mjere čijom primjenom će izračunati rizik biti moguće smanjiti na nivo niži od gornjeg limita prihvatljivog nivoa rizika. Naravno, u postupku determinacije korektivnih mjera se, pored tehničkog pristupa, mora konsultovati i finansijski aspekt. Ovaj postupak svakako mora rezultirati odabirom optimalnog broja i vrste tehno-ekonomski prihvatljivih radnji kojima će se stanje sistema sa aspekta rizika dovesti na unaprijed ustanovljen i standardizovan nivo.

U tom smislu se definiše i učinak primijenjenih mjera kroz Troškovno – Korisni faktor [3]:

$$TK = \text{Cijena rizik bez mjera} / (\text{Cijena remanentnog rizik nakon primjene mjera} + \text{Troškovi primjene mjera})$$

Bez sprovođenja definisanih korektivnih mjera ovaj faktor ima vrednost 1. Ali, ako se primijene efikasne mjere održavanja, dolazi do mitigacije rizika, odnosno TK faktor raste i dostiže svoj maksimum. Daljom primjenom mjera, odnosno daljim ulaganjem, TK faktor opada i korist od tog ulaganja je sve manja. Optimalni nivo ulaganja je zapravo mjera pametnog upravljanja kompanijom i cilj je svakog racionalnog menadžmenta. Dakle, potrebno je odabrati takve korektivne mjere i sprovesti takve postupke u održavanju koji će dovesti do najpovoljnijeg TK faktora.

U osnovi proračuna rizika je zapravo dobijanje što je moguće više na mjerenju zasnovanih dijagnostičkih informacija o realnom eksploatacionom stanju određenog elementa postojanja ili opreme.

Svaka dijagnostička inspekcija nam daje informacije o stepenu oštećenosti (npr. mjerenje dielektrične čvrstoće izolacije, mjerenje prelaznog otpora kontakata prekidača i spojeva uzemljivača, termografsko ispitivanje toplih mjesta itd.). Sačinjavanje adekvatnog plana dijagnostikovanja elemenata sistema i akvizicija tih podataka je od presudnog značaja za kvalitet primjene ove metode. Inspekcija je utoliko efikasnija ukoliko je dobijena informacija preciznija. Bez sprovođenja dijagnostičke kontrole pojava otkaza (kvantifikovana pomoću vjerovatnoće otkaza) zasnovana na proceni eksperata je krajnje

subjektivna i može biti vrlo nepouzdana. Dijagnostika je postupak koji treba da eliminiše nepouzdanost.

Ipak, ako je rizik izračunat primjenom podataka dobijenih dijagnostičkim mjerenjem i dalje neprihvatljiv može se pribjeći alternativnim mjerama zasnovanim na ekspertskim znanjima, pri čemu je primjena ovih mjera najčešće povezana sa povećanjem troškova (npr. ugradnja redundantnih sistema za obezbjeđivanje potpune pouzdanosti napajanja). Ponekad je ovakva investicija opravdana bez obzira na trošak, naročito kad su u pitanju specifični korisnički sistemi (bolnice gdje se traži stalno prisustvo napona, napajanje osjetljivih potrošača kojima je garantovana pouzdanost isporuke i kada prekid isporuke rezultira visokim penalima, što može biti slučaj kod zatvorenog distributivnog sistema).

Sa aspekta činjenice da je finansijski neopravdano i fizički nemoguće planirati kontrolu svakog elementa sistema u kontinuitetu jasno je da pristup zasnovan na riziku omogućava procjenu vjerovatnoće da će se kvar desiti na unaprijed prepoznatom dijelu sistema, pa sa tim u vezi moguće je kreirati i adekvatni akcioni plan održavanja. Visokorizične komponente sistema treba kontrolisati češće i na njima treba sprovoditi adekvatne aktivnosti koje će značajno smanjiti rizik od pojave kvara na njima. U tom smislu se izrađuje odgovarajući program kontrole zasnovan na unaprijed definisanim kriterijumima koji su u direktnoj korelaciji sa pragom prihvatljivog rizika od otkaza.

2.1. Pristup dijagnostičkom procesu

Za sagledavanje aktuelnog stanja opreme i postrojenja u pogledu moguće ranjivosti i podložnosti otkazu potrebno je sprovesti egzaktna mjerenja kvantifikatora stanja.

Dijagnostikovanje stanja sistema je aktivnost koja je planska i organizaciono je sprovode inženjeri koji su u dovoljnoj mjeri upoznati sa karakteristikama elektrodistributivnog sistema ili nekog njegovog dijela.

Aktuelna praksa i relevantni propisi na kojima se ta praksa zasniva nalažu odgovarajuće periodične preglede elemenata postrojenja i sa tim u vezi dokumentovanje zatečenog stanja, a naročito stanje slijedećih elemenata sistema:

- Stanje energetskih transformatora
- Stanje razvodnih postrojenja i komandi
- Stanje stanje relejne zaštite, elektroautomatike i telemehanike
- Stanje sistema pomoćnog napona i stanje akumulatorskih baterija
- Stanje stubova i ovjesne opreme nadzemnih vodova
- Stanje kablovskih vodova
- Stanje uređaja za zaštitu od prenapona

Ovi propisi [4] se ne ograničavaju samo na kontrolu stanja elektromehaničkog dijela postrojenja već zahtijevaju i periodičnu kontrolu građevinskog dijela postrojenja, kontrolu pristupa i kontrolu stanja okruženja koje može dovesti do prekida (vegetacija u okruženju postrojenja ili nadzemnog voda, radovi trećih lica u okruženju postrojenja u nedozvoljenim gabaritima u smislu sigurnosnih visina i udaljenosti). Takođe, kontrola ambijentalnih uslova, naročito sa aspekta vrijednosti temperatura, vlažnosti, prašine i vibracija je vrlo važna u pogledu dobijanja vjerodostojne slike o uslovima u kojima elementi elektrodistributivne opreme i postrojenja funkcionišu. Sa aspekta ukupne bezbjednosti funkcionisanja elektrodistributivnog sistema, a značajno sa aspekta predikcije kvarova, mjerenje prelaznih otpora uzemljivača i mjerenje vrijednosti kapacitivnih struja zemljospoja u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom daće kvalitetnu informaciju i definisati buduće kratkoročne i dugoročne mjere koje u sistemu trebaju biti preduzete.

Nažalost, dugotrajna opšta neregularnost, koje su svjedoci sve elektrodistribucije u okruženju, u pogledu poslovanja dovela je do značajnih odstupanja sa aspekta poštovanja propisanih rokova za periodičnu kontrolu. Nedozvoljena gradnja je ugrozila mnoge dalekovode, prekinula mnoge kablovske vodove i dovela do mnogo neregularnih stanja koja su se moguće odrazila na otkaz dijela sistema mnogo kasnije u odnosu na momenat nastanka neregularnog događaja. Sve ovo zahtijeva vrlo ozbiljnu, plansku i temeljnu rekonstrukciju u pogledu organizacije aktivnosti na sagledavanju aktuelnog stanja ukupne opreme elektrodistributivnog sistema.

Dalje, stanje elektrodistributivne opreme, kako kablovskih i nadzemnih vodova tako i opreme u transformatorskim stanicama, često je značajna prepreka uvođenju novih tehnologija i sistema za daljinsku komunikaciju i nadzor. Uspješna implementacija sistema brojila sa kojima se komunicira kroz niskonaponsku mrežu često je jako otežana zbog činjenice da su niskonaponski vodovi loš medijum za prenos kvalitetnog signala upravo zbog postojanja mnogo loših spojeva i velikog broja tačaka sa nedopustivo visokim nivoom prelaznog otpora. Ova situacija onemogućava kvalitetan prenos podataka od brojila do centralnog sistema i otežava urednu akviziju podataka i upravljanje brojilima. Ipak, saznanje o postojanju ovakvih tačaka, njihovo geografsko lociranje i identifikacija na terenu, bitno doprinosi kvalitetnijoj spoznaji o realnom stanju dijela sistema. Prelazni otpori na kontaktnim mjestima duž niskonaponske linije nijesu samo remetilački faktor za komunikacioni signal, već su direktno uzrok prekida na duži ili kraći rok, uzrok su ubrzanog slabljenja izolacije i svakako direktno utiču na kvalitet isporučene električne energije.

Dakle, pored koraka predviđenih aktuelnim pravilnicima i procedurama koji regulišu periodično održavanje u elektrodistributivnom sistemu, potrebno je vršiti stalna planska mjerenja odgovarajućih parametara koji će biti korišteni za kvantifikaciju stanja dijela sistema, a posljedično će dati i sliku o nivou vjerovatnoće pojave otkaza specifičnog dijela sistema. Upravljanje rizikom od pojave kvara, uvažavajući i projekciju šteta koje ti kvarovi mogu da izazovu, moguće je jedino na osnovu relevantnih kvantifikatora dobijenih mjerenjem. Zapravo, mjerenje je ključ za identifikaciju svih problema koji utiču na kvalitet isporučene električne energije i rizik da taj kvalitet bude narušen. Upravljanje rizikom je moguće jedino ako se rizik može izmjeriti. Propadi napona, pojava viših harmonika u mreži, kratkotrajni prekidi, disbalans struja i napona itd., često mogu biti posljedica stanja u mreži koje prethodi kvaru.

Uzimanjem u obzir svih parametara dobijenih mjerenjem i njihovim stavljanjem u korelaciju sa značajem konkretnog dijela postrojenja ili sistema u smislu obima štete koji ispad tog elementa može prouzrokovati, kao i definisanjem sljedećeg mogućeg neregularnog stanja u lancu događaja kao posljedice prethodnog stanja, moguće je kreirati matricu rizika kao alat kojim ćemo rangirati sve prepoznate rizike.

Procedura analize rizika zasniva se načelno na slijedećim koracima:

1. Sistematska procjena prijetnji za sistem ili dio sistema od značaja, urađena na jednom od dva raspoloživa principa
  - a. *Kvalitativnom*
  - b. *Kvantitativnom*
2. Procjena težine posljedica
3. Procjena vjerovatnoće otkaza
4. Formiranje matrice rizika

U najjednostavnijem obliku izrada matrice rizika se zasniva na dobro definisanom skupu prijetnji i korespondentnih posljedica u slučaju nastanka predefinisanih prijetnji, bilo da se radi o pojedinačnoj pojavi ili pojavi grupe prijetnji. Definisanje skupa prijetnji dakle zasniva se na ekspertskim znanjima i dobrom poznavanju fizikalnosti sistema čijim održavanjem se želi upravljati.

U smislu izrade matrice rizika, kao jednostavnog alata za rangiranje rizika, za svaki predviđeni kvar, potrebno je vjerovatnoću pojave kvara, na elementu sistema izraziti kroz [3]:

- Kvantitativno predviđanje prijetnji:
  - Matematička definicija vjerovatnoće – realni broj sa vrijednostima između 0 i 1, koji se pridružuje slučajnom događaju.
  - Može se odnositi na relativnu frekvenciju pojavljivanja nekog događaja ili na stepen izvjesnosti da će se događaj dogoditi.

ili

- Kvalitativno predviđanje prijetnji:
  - V (velik); S (srednji); M (mali), H (high); M (medium); L (low)
  - C (Critical); S (Serious); Mo (Moderate); Mi (Minor); N (Negligible)
  - Pridruživanje brojčane vrijednosti konkretnom uticaju u zavisnosti od ranga: 5; 4; 3; 2; 1

Tabela 1. Kvalitativni i kvantitativni opis izloženosti prijetnjama

Izloženost opasnostima / štetnostima u % tokom eksploatacionog perioda (nedjelje, mjeseca, godine)	Kvalitativni opis izloženosti opasnostima / štetnostima	Kvantitativno rangiranje izloženosti opasnostima/štetnostima
		Rang
0 – 20 %	vrlo rijetko	1
21 – 40 %	povremeno	2
41 – 60 %	često	3
61 – 80 %	veći dio vremena eksploatacije	4
81 – 100 %	stalno	5

Sličan postupak se sprovodi i za određivanje težine posljedice zbog nastanka specifičnog kvara.

Vrste kvarova, njihove vjerovatnoće pojave kao i vrste i ozbiljnost posljedica uzrokovanih pojavom tih kvarova, kvantifikovanih odgovarajućim težinskim faktorima, potrebno je organizovati u odgovarajuću matricu.

U tom smislu potrebno je prethodno izvršiti rangiranje izloženosti štetnostima ili opasnostima koje prijete sistemu ili njegovom dijelu u toku unaprijed definisanog eksploatacionog perioda.

Takođe je potrebno definisati odgovarajuću listu detalja (ček lista) koje je potrebno provjeriti, a koji rezultati bitno determinišu stanje opreme za koju se rizik od nastanka kvara procjenjuje.

Jedan primjer ove liste koji se odnosi na provjeru stanja stubnih mjesta dat je u Tabeli 2:

Tabela 2. Lista za prikupljanje podataka za dalekovodno stubno mjesto

Pregled na osnovu čl.26 Pravilnika o tehničkim normativima za pogon i održavanje elektroenergetskih postrojenja i vodova													
čl.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	POSEBNE NAPOMENE
Redni broj stuba	Oštećenje provodnika	Povećanje ugiba provodnika	Oštećenje Izolatora	Oštećenje ovjesne opreme	Korozija konstrukcije	Oštećenje stuba (drveni ili betonski)	Oštećenje konzola vijaka i zemljovoda	Oštećenje uzemljenih mjesta	Tablice za upozorenje i oznake	Izgradnja objekata ispod i u blizini	Nepropisna ukrštanja	Rastinje ispod i u blizini	

Stanje ispunjenosti tehničkih zahtjeva definisanih odgovarajućim pravilnikom o održavanju elektrodistributivnog sistema determiniše i kvantitativni rang koji se dalje može koristiti u proračunu rizika (Tabela 3):

Tabela 3. Tabela ispunjenosti tehničkih zahtjeva

Ispunjenost tehničkih zahtjeva u %	Kvalitativni opis ispunjenosti zahtjeva	Kvantitativno rangiranje ispunjenosti zahtjeva
		Rang
81 -100 %	Zadovoljavajuće – nastaviti sa radom	1
61 - 80 %	Preduzeti srednjoročne potrebne mjere	2
41 – 60 %	Preduzeti kratkoročne potrebne mjere	3
21 – 40 %	Trenutno potrebne mjere	4
0 - 20 %	Mjere za trenutni prekid rada	5

Na osnovu ovih kvantifikatora moguće je kreirati matricu vjerovatnoće nastanka neželjenog događaja kao proizvod odgovarajućih rangova za svako polje ponaosob (Tabela 4):

Tabela 4. Matrica vjerovatnoće nastanka neželjenog događaja

Izloženost opasnostima/štetnostima		Tehničko stanje sistema				
		Zadovoljavajuće – nastaviti sa radom	Srednjoročne potrebne mjere	Kratkoročne potrebne mjere	Trenutno potrebne mjere	Mjere za trenutni prekid rada
		1	2	3	4	5
vrlo rijetko	1	1	2	3	4	5
povremeno	2	2	4	6	8	10
često	3	3	6	9	12	15
veći dio vremena eksploatacije	4	4	8	12	16	20
stalno	5	5	10	15	20	25

Rangovi vjerovatnoće nastanka neželjenog događaja u posmatranom slučaju su iskazani u opsegu od 1 do 25, a kvalitativni opis vjerovatnoće i kvantitativni rang su prikazani u Tabeli 5.

Tabela 5. Rang matrica vjerovatnoće nastanka neželjenog događaja

Kvantifikator stanja sistema	Kvalitativni opis vjerovatnoće pojave kvara	Kvantitativni rang vjerovatnoće
1,2	Zanemarljiva (N)	1
3, 4, 5	Mala (Mi)	2
6, 8, 9	Srednja (Mo)	3
10, 12,15, 16	Ozbiljna (S)	4
20, 25	Kritična (C)	5

Značenje kvalitativnog opisa vjerovatnoće pojave kvara iz gornje tabele je kako slijedi:

- C (Critical): Ako se štetni događaj dogodi, sistem će obustaviti rad. Neće se ostvariti minimalni zahtjevi prihvatljivosti – funkcionisanje sistema je onemogućeno (minimum acceptable requirements).
- S (Serious): Ako se štetni događaj dogodi, sistem će imati veliko povećanje troška i/ili značajno kašnjenje u postizanju pune funkcionalnosti, ali ostvariće se minimalni zahtjevi prihvatljivosti (minimum acceptable requirements).
- Mo (Moderate): Ako se štetni događaj dogodi, sistem će imati umjereno povećanje troška i/ili kašnjenje u postizanju pune funkcionalnosti, ali minimalni zahtjevi prihvatljivosti (minimum acceptable requirements) biti ostvareni.
- Mi (Minor): Ako se štetni događaj dogodi, projekt sistem će imati malo povećanje troška i/ili kašnjenje u postizanju pune funkcionalnosti, ali će najveći broj funkcionalnih zahtjeva prihvatljivosti (minimum acceptable requirements) biti ostvaren.
- N (Negligible): Ako se štetni događaj dogodi, on neće imati uticaja na funkcionalnost sistema. Svi funkcionalni zahtjevi će se ostvariti.

Naredni korak u procjeni rizika obuhvata kvantifikaciju i kvalitativni opis posljedica koje štetni događaj (kvar) na specifičnom dijelu sistema može da uzrokuje (Tabela 6).

Krajnji rezultat postupka procjene rizika je kreiranje matrice rizika. Primjenom matrice rizike određuje se rang rizika kao proizvod nivoa rangiranja vjerovatnoće nastanka neželjenog događaja i nivoa

rangiranja težine mogućih posljedica. U matrici rizika prikazan je način ocjenjivanja rizika koji se sastoji od ova dva faktora.

Tabela 6. Rang težine posljedice izazvane neželjenim događajem

Opis posljedice	Kvalitativni opis težine posljedice	Kvantitativni rang težine posledice
Nema opasnosti za sistem niti za okruženje. Beznačajno oštećenje djelova sistema. Funkcija održana. Nema posljedica po korisnike sistema	mala	1
Nema opasnosti za sistem niti za okruženje. Lako oštećenje djelova sistema. Privremeno ograničenje funkcije sistema. Posljedice po korisnike kratkotrajne i popravljive	srednja	2
Potencijalna opasnost za život i zdravlje ljudi. Značajno oštećenje sistema. Privremena nefunkcionalnost sistema, kasnije funkcionalnost moguća uz bitna ograničenja	velika	3
Stvarna opasnost za život i zdravlje ljudi. Ogromno oštećenje ili uništenje djelova sistema ili sistema u cjelini. Dugotrajna nefunkcionalnost sistema.	teška	4
Potpuna havarija sistema. Trajna nefunkcionalnost.	katastrofalna	5

Korisno je definisati pet nivoa rangiranja za vjerovatnoću i za posljedice. Kvalitativan opis vjerovatnoće i posljedice prikazan je u Tabeli 7.

Tabela 7. Matrica rizika

		Težina moguće posljedice				
		mala	srednja	velika	teška	katastrofalna
		Rad se nastavlja bez ikakvih posljedica	Kratkotrajan zastoj u funkcionisanju, korisnik ima neprijatnost bez registrovanja materijalnih šteta	Značajan zastoj i ograničena funkcionalnost Korisnik trpi umjerene štete	Ogromna havarija, zastoj u funkcionisanju, velika ograničenja, velike štete kod korisnika	Potpuna havarija, apsolutna nefunkcionalnost, trajne štete kod korisnika
		1	2	3	4	5
Zanemarljiva	1	1	2	3	4	5
Mala	2	2	4	6	8	10
Srednja	3	3	6	9	12	15
Velika	4	4	8	12	16	20
Izrazito velika	5	5	10	15	20	25

Svaki rang vjerovatnoće i posljedice korespondira sa unaprijed dodijeljenom brojnom vrijednosti. Uočava se da jedan isti rang rizika korespondira sa više rangova vjerovatnoće pojave kvara, jer se kvantifikatori rizika dobijaju kao proizvodi ranga vjerovatnoće i ranga posljedice, a na osnovu definicije rizika.

U zavisnosti od kvantitativnog ranga rizika (od 1 do 5) treba odrediti i korpus aktivnosti koje je potrebno sprovesti za svaki rang posebno. U Tabeli 8 se nalazi jedan od predloga akcija.

Tabela 8. Rang matrica rizika

Brojčana vrijednost rizika	Kvalitativni opis rizika	Kvantitativni rang rizik	Način i mjere za otklanjanje, smanjenje ili sprječavanje rizika
1, 2	Beznačajan	1	Optimalni uslovi rada, rizik od nastanka kvara beznačajan. Nije potrebna nikakva specifična aktivnost
3, 4, 5	Mali	2	Zadovoljavajući uslovi rada. Postoje minorna odstupanja od tehničkih propisa bez nužnog ograničavanja funkcionalnosti sistema. Potrebno je izvršiti usklađivanja sa tehničkim propisima. Bezbjednost zaposlenih i okruženja nije ugrožena, funkcionalnost sistema je zadovoljavajuća.
6, 8, 9	Srednji	3	Sistem funkcioniše u stanju mogućeg rizika od nastanka kvara i ograničenja funkcionalnosti manjih razmjera. Potrebni su konkretni zahvati na usklađivanju performansi sistema sa tehničkim propisima.
10, 12, 15, 16	Visok	4	Rad sistema bitno odstupa od tehničkih normative i propisa uz visoko izraženu mogućnost od nastanka kvara i prekida funkcionisanja i nastanka povrede ili oštećenja zdravlja zaposlenih. Pristupiti hitnom remontu uz ograničenje funkcionalnosti.
20, 25	Ekstremni	5	Tehničko stanje sistema potpuno nezadovoljavajuće. Drastično narušena usklađenost sa propisima u pogledu tehničke ispravnosti i bezbjednosti. Sistem apsolutno nestabilan sa vrlo izvjesnom havarijskom situacijom. Ugrožena bezbjednost zaposlenih i okruženja. Neophodna zabrana rada i potpuna rekonstrukcija ili zamjena.

Važno je napomenuti da ne postoji linearna zavisnost između kvantitativnog ranga rizika i brojne vrijednosti rizika izračunatog iz definicije rizika. U tom smislu i jeste izvršeno grupisanje rizika u odgovarajuće razrede, za koje sve vrijednosti rizika važe iste korektivne mjere ukoliko se radi o istom rangju rizika. Istina, ovaj pristup može značajno ograničiti potpuno upravljanje rizikom ukoliko je stvarno stanje takvo da traži primjenu različitih korektivnih mjera za slučaj rizika iskazanih različitim brojnim vrijednostima ali koje se nalaze u istom rangju. Ipak, ovaj model je primjenljiv u uslovima gdje je ekspertsko znanje raspoloživo i gdje postoji kvalitetna iskustvena baza u ljudskim resursima.

Naravno, nakon ovog koraka se aktivnost na identifikaciji prijetnji i rangiranju rizika ne završava. Na Slici 1 se nalazi algoritam permanentnog funkcionisanja procesa procjene rizika od otkaza sistema [5].

Slika 1. Postupak određivanja nivoa rizika

Identifikacija mogućih kritičnih situacija, štetnosti i opasnosti koje prijetje sigurnosti u radu sistema i održavanju njegove pune funkcionalnosti su osnovno polazište ove metode. Upravo je tu, uz punu podršku saznanjima dobijenim iz dijagnostičkih izvještaja, ključna uloga visokostručnih i na iskustvu

izgrađenih kadrova u svakoj elektroenergetskoj kompaniji. Zaključuje se da je njegovanje ljudskih resursa u ovoj oblasti od vitalnog značaja za prosperitet svake kompanije.

3. Održavanje elektrodistributivnih sistema u svijetlu rizika od elementarnih nepogoda

Elementarne nepogode (poplave, suše, požari, oluje, enormne sniježne padavine itd.) su prirodne pojave na koje događaje svakako nije moguće uticati ali čiju pojavu je današnjim meteorološkim modelima moguće prilično dobro predvidjeti. Doduše, iako prognoza pojave ovih nepogoda može biti prilično dobra u pogledu predviđanja intenziteta, trajanja i lokacije, ta prognoza je pouzdana uglavnom za nedovoljno duga vremenska razdoblja, u kojima bi se mogla preduzeti značajna aktivnost ad hoc u smislu zaštite i umanjenja posljedica. U tom smislu planiranje razvoja mreže uz uvažavanje rizika od nastanka ovakvih poremećaja je vrlo važno.

Poučeni lošim iskustvom u vezi sa klimatskim promjenama i kako smo u regionu bili izloženi ekstremnim poplavama, požarima i sniježnim nepogodama u prilično dugom trajanju, sve države regiona su donijele odgovarajuće nacionalne programe i strategije kojima će obezbijediti dovoljan stepen spremnosti za eventualne nove slične događaje i pokušati da štete nastale u takvim situacijama svedu na minimum, a stanovništvo liše životne ugroženosti i obezbijede im minimum životnih potreba. Jedna od osnovnih životnih potreba danas je i upotreba električne energije. Nažalost, sve elementarne nepogode bitno uplivišu na stanje stabilnosti elektroenergetskog sistema kao sistema koji je prilično eksponiran u spoljašnjem ambijentu. Kad je o elektrodistributivnom sistemu riječ, dominantni su dalekovodni strubovi naponskih nivoa 110kV i 35kV kao i objekti transformatorskih stanica koji mogu biti izloženi uticajima stihije. S tim u vezi, sastavni dio dokumenata koji tretiraju stanje prije i tokom elementarnih nepogoda je i akt kojim se vrši procjena rizika od nastanka šteta zbog elementarnih nepogoda kao i obim i nivo šteta koje tom prilikom mogu nastati. Kao kritična infrastruktura sa stanovišta pojave elementarnih nepogoda i drugih nesreća svakako se prepoznaje i elektrodistributivni sistem.

Tradicionalan pristup zaštite imovine u slučaju elementarnih nepogoda je zaključivanje odgovarajućeg ugovora o osiguranju imovine u slučaju elementarnih nepogoda. Ova polisa osiguranja u osnovi treba da pokrije direktne štete pričinjene sistemu kao i štete koje su nefunkcionisanjem sistema nastale kod korisnika sistema.

U smislu zaključivanja što povoljnijeg ugovora sa osiguravačem kritično je poznavanje dijagnostičkog stanja elektrodistributivnog sistema i poznavanje frekvencije i dužine otkaza sistema u redovnom stanju kao i posljedica koje se ispadom nekog dijela sistema mogu pojaviti. Ova spoznaja će omogućiti i modelovanje hipotetičkih stanja kod elementarnih nepogoda i sticanje slike kroz različite scenarije o mogućim razmjerama havarija u specifičnim meteorološkim uslovima. Vrlo često zaključivanje polise osiguranja sa neprimjereno visokim nivoom učešća u šteti osiguranika dovodi do toga da se za najveći broj šteta koje se dešavaju u redovnom stanju ne može naplatiti nikakav iznos od osiguravača. U tom smislu je, naročito u neredovnom stanju izazvanom elementarnim nepogodama, potrebno pravilno odmjeriti nivo učešća u šteti i obezbijediti mogućnost naplate štete za optimalan nivo šteta koje se mogu desiti.

Sa druge strane, dio sistema koji nije postao nefunkcionalan, u stanju izazvanom elementarnim nepogodama je dodatno napregnut i od njega se zahtijeva više i više. Istovremeno, pažnja se usmjerava na povratak oštećenog dijela sistema u funkcionalno stanje i tada je potrebno učiniti sve da se sistem reaktivira u najkraćem mogućem roku. Neplansko ponašanje i nepripremljenost za ovakva stanja ima visoku cijenu. Svako iscrpljivanje sistema preko nazivnih vrijednosti u regularnom stanju znači nemogućnost dobijanja dodatnih kapaciteta u neredovnim okolnostima.

Dakle, u cilju što većeg nivoa spremnosti da se na adekvatan način odgovori mogućem poremećaju u radu sistema izazvanog elementarnim nepogodama ODS mora biti aktivno uključen u izradu svih strateških dokumenta iz ove oblasti. Pored toga, u postupku izgradnje dijelova sistema treba posebno voditi računa i o riziku od nastanka prirodnih poremećaja koji mogu izazvati bitan poremećaj u funkcionisanju ili kolaps sistema. Takođe, izrada odgovarajućih akcionih planova djelovanja za različite scenarije koji se mogu modelovati značajno će pomoći efikasnijoj pripremi i organizovanijoj

akciji koja treba da uslijedi nakon što se elementarna nepogoda desi i kad se uslovi za sprovođenje rekonstruktivnih aktivnosti na terenu obezbijede.

4. Zaključak

Elektroenergetski sistemi, distributivni ili prenosni, dio su kritične infrastrukture. Upravljanje ovakvim sistemima, planiranje njihove eksploatacije i održavanja, ne može se zamisliti bez adekvatne procjene rizika za sve događaje kojima sistem ili neki njegov dio može biti izložen, uz sagledavanje obima i vrste posljedice koja će nastati nakon izlaganja štetnom događaju. Pravovremena spoznaja i predikcija štetnih događaja ima neprocjenjiv značaja na brzinu odgovora i oporavak sistema. Pravilnim investiranjem u prevenciju smanjujemo direktne i indirektne štete prema algoritmu $1:7:40^3$ sa čime stvaramo preduslove za neometano funkcionisanje sistema kritične infrastrukture, a posebno kontinuiranog snabdjevanja stanovništva električnom energijom kao jednim od najpotrebnijih resursa čovječanstva.

Prikazana metodologija procjene rizika može pomoći ako se želi dati kvantitativan iskaz nivoa rizika koji sa sobom nosi otkaz dijela sistema ili sistema u cjelini. Tada će se menadžerska pažnja usmjeriti na akciju koja će prevencijom doprinijeti smanjenju na najmanju moguću mjeru mogućnosti pojave štetnog događaja koji je procijenjen kao rizičan.

Sličan algoritam može biti primijenjen i u slučaju analize potencijalne pojave prirodne nepogode. Analiza podataka mora sadržavati matrice rizika i obavezna najmanje dva scenarija, najvjerovatniji i najgori mogući scenario. Preporučuje se i izrada SWOT analize snaga, slabosti, prilika i prijetnji, kao podloge za donošenje zaključaka i preporuka. Takođe, radi lakšeg prepoznavanja međusobno zavisnih procjena, potrebno je uraditi i dodatke u kojima se prepoznaje relevantni zakonski okvir, te uticaj na životnu sredinu, kao i eventualni prekogranični uticaj na druga područja. Vrednovanje podataka je kruna integrisanog sistema upravljanja rizicima, a pravilno upravljanje vrednovanjem može donijeti niz primarnih i sekundarnih benefita korisnicima ali i širem lokalnom stanovništvu. Ovdje se prije svega misli na pravilnu klasifikaciju podataka pri čemu se mora uvažavati EUROSTAT klasifikacija i kategorizacija rizika po osnovu Smjernica EU i ISO 31000. Da bi lakše i pravilnije upravljali podacima, potrebno je izraditi odgovarajuće baze na AutoCad i AutoDesk (CAD), Building Information Management (BIM) i Geographical Information System (GIS) platformama [6].

5. Literatura

- [1] ISO - Quality management systems — Requirements . ISO 9001:2015. i ISO - Risk management — Principles and guidelines ISO 31000:2009.
- [2] Marvin Rausand, Risk Assessment: Theory, Methods, and Applications ISBN: 978-1-118-28110-9, June 2013
- [3] Prof. dr Živoslav Adamović, Mr Goran Nestorović, Mr Mileta Radojević, Mr Ljubivoje Paunović, *Menadžment industrijskog održavanja*, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički Fakultet "Mihajlo Pupin" Zrenjanin, 2008.
- [4] Savezni propisi, Zbirka propisa iz elektrotehnike, prva knjiga, Službeni list SRJ, Beograd, 1996.
- [5] Shinsuke Sakai, Risk-based Maintenance, JR EAST Technical Review – No. 17, http://www.jreast.co.jp/e/development/tech/pdf_17/Tec-17-01-04eng.pdf
- [6] Tomić D., Šećerov P., Garaplija E. *Menadžment kritične infrastrukture*. Beograd, 2018.

---

³Kelman, I. and C.M. Shreve (ed.). 2014. Disaster Mitigation Saves. Version 6, 13 November 2014 (Version 1 was 30 October 2002). <http://www.ilankelman.org/miscellany/MitigationSaves.doc>