

Damir Jakus  
FESB  
[damir.jakus@fesb.hr](mailto:damir.jakus@fesb.hr)

Josip Vasilj  
FESB  
[jvasilj@fesb.hr](mailto:jvasilj@fesb.hr)

Danijel Jolevski  
FESB  
[danijel.jolevski@fesb.hr](mailto:danijel.jolevski@fesb.hr)

## ALAT ZA OPTIMALNO VIŠEGODIŠNJE PLANIRANJE RAZVOJA DISTRIBUCIJSKE MREŽE

### SAŽETAK

U ovom radu predstavljen je alat za automatsku izradu optimalnog etapnog plana razvoja distribucijske mreže te odabira optimalne pogonske topologije po razvojnim razdobljima baziran na matematičkom programiranju. Optimalnim planom razvoja mreže moguće je identificirati iz skupa mogućih alternativnih pojačanja mreže upravo optimalne investicije (nove vodove, opcije koje uključuju zamjenu postojećih, pojačanja transformacija, nove pojne točke ) njihovu lokaciju kao i trenutak u kojem je najpovoljnije ili nužno realizirati određeno pojačanje u mreži. Pri tom se na razini svakog planskog razdoblja osigurava radijalan pogon mreže te povezanost kako postojećih tako i novih potrošačkih/proizvođačkih čvorišta koji se pojavljuju u mreži unutar planskog razdoblja. Optimalni plan razvoja mreže za višegodišnje plansko razdoblje određuje se s ciljem minimizacije neto sadašnje vrijednosti ukupnih operativnih i investicijskih troškova koji uključuje troškove vezane uz ulaganje u primarnu opremu, održavanje opreme, troškove nabavke energije uključujući i energiju za pokrivanje gubitaka u mreži te neisporučene električne energije na razini mreže.

**Ključne riječi:** dinamičko planiranje razvoja distribucijske mreže, matematičko programiranje, troškovi investicije, troškovi održavanja, troškovi gubitaka, troškovi neisporučene električne energije

## A TOOL FOR OPTIMUM MULTI-PERIOD DISTRIBUTION NETWORK EXPANSION PLANNING

### SUMMARY

This paper presents a tool for optimal dynamic planning of distribution networks as well as topological optimization based on mathematical programming. Using the method presented in the paper it is possible to identify from a set of possible alternative network reinforcements optimal investments (new lines, options that include replacement of existing ones, reinforcements of transformations, new connection points), their location, as well as the moment when it is optimal or necessary to realize a certain reinforcement in the network. At the same time, the presented method ensures the radial topology of the network as well as the connection of both existing and new consumers that appear in the network within the planning period. The optimal multi-year network development plan is determined with the goal of minimizing the net present value of the total investment and operation costs, which includes costs related to investment in primary equipment, maintenance costs of both existing and new primary equipment, costs of energy losses, and unserved energy.

**Key words:** distribution network dynamic planning, mathematical programming, investment costs, maintenance costs, costs of energy losses, costs of unserved energy

## 1 UVOD

Metode za planiranje razvoja distribucijske mreže mogu se podijeliti u dvije osnovne kategorije:

- **Statičko planiranje razvoja distribucijske mreže:** predstavlja tradicionalni pristup planiranja razvoja distribucijske mreže. U sklopu ovog pristupa vrši se procjena budućeg konzuma za jedno ciljano razdoblje te se određuju potrebna proširenja distribucijske mreže kako bi se zadovoljila očekivana potražnja. Prognoza potrošnje se obično temelji na povijesnim podacima i pretpostavlja se da će ostati konstantna tijekom razmatranog razdoblja planiranja. Predviđanje buduće potrošnje može se napraviti korištenjem relativno jednostavnih metoda, kao što je ekstrapolacija prošlih trendova ili korištenjem nešto preciznijih ali opet jednostavnih statističkih modela. U sklopu ovog pristupa, plan razvoja mreže definira se za određenu ciljanu godinu na način da buduća mreža zadovolji očekivanu potražnju pri čemu se plan ne prilagođava bilo kakvim promjenama koje se mogu dogoditi tijekom vremena. U sklopu ovog pristupa nije moguće odrediti optimalni redoslijed realizacije zahvata u mreži kao ni implementirati neke detaljnija ograničenja s kojima se ODS susreću u procesu definiranja plana razvoja mreže. Jedna od glavnih prednosti statičkog planiranja proširenja je njegova relativno jednostavna i izravna implementacija. Jedan od glavnih nedostataka statičkog planiranja razvoja distribucijske mreže odnosi se nemogućnost određivanja dinamike realizacije zahvata u mreži. Iako plan razvoja mreže određen statičkim planiranjem razvoja mreže osigurava normalne pogonske uvjete za razmatranu ciljanu godinu, primjenom ovog pristupa mogu se pojaviti određeni problemi u distribucijskoj mreži unutar razdoblja planiranja ukoliko se pojačanja u mreži na realiziraju pravilnim redoslijedom kojeg nije moguće odrediti u sklopu ovog pristupa. Također ovim pristupom nije moguće uvažiti neka naprednija ograničenja poput: iznosa raspoloživih sredstava za financiranje kapitalnih zahvata koji se mijenjaju tokom vremena i utječu na dinamiku realizacije zahvata u mreži, utjecaj određenih pojačanja na smanjenje operativnih troškova primarno troškova gubitaka električne energije i troškova neisporučene električne energije i sl.
- **Dinamičko/više-vremensko planiranje razvoja mreže:** predstavlja metodu planiranja razvoja mreže u sklopu koje se vrši procjenu potreba mreže u više vremenskih razdoblja, najčešće s istom duljinom koraka (npr. jedna godina), a ne samo za krajnju godinu na kraju cjelokupnog razdoblja planiranja kao što je slučaj sa statičkim planiranjem razvoja mreže. S obzirom na to, u sklopu ovog pristupa moguće je odrediti optimalni redoslijed zahvata u mreži te uvažiti pogonske uvjete i ograničenja u više različitih vremenskih razdoblja duž cjelokupnog razdoblja planiranja. U sklopu ovog pristupa, plan razvoja mreže definira se razmatrajući istovremeno sva podrazdoblja unutar cjelokupnog razdoblja planiranja te je moguće uvažiti utjecaj određenih zahvata na određene komponente funkcije cilja. S obzirom na to, primjenom ovog pristupa moguće je primjerice utvrditi plan razvoja mreže unutar kojeg se sugerira realizacija određenih zahvata u mreži prije nego što je to nužno primjerice s aspekta preopterećenja ili loših naponskih prilika ukoliko takvi zahvati smanjuju troškove gubitaka energije. Također prilikom određivanja plana razvoja mreže u sklopu viševremenskog pristupa, dinamiku razvoja mreže moguće je ograničiti/uvjetovati iznosom sredstava koja su dostupna za financiranje razvoja mreže na razini svakog podrazdoblja. S druge strane, dinamičko/viševremensko planiranje razvoja mreže predstavlja složeniji pristup jer uključuje razradu plana razvoja po fazama što zahtijeva sofisticiranije tehnike modeliranja. Plan razvoja mreže dobiven ovim pristupom može pružiti točniji i fleksibilniji pristup planiranju razvoja distribucijske mreže budući da bolje odražava promjenjive potrebe mreže tijekom vremena.

S obzirom na duljinu razdoblja za koje se vrši razrada plana razvoja mreže razlikujemo [1]:

- **Kratkoročno planiranje** obuhvaća razdoblje do tri godine. U pravilu se provodi svake godine s ciljem određivanja objekata čija izgradnja ili zamjena i rekonstrukcija treba odmah započeti;
- **Srednjeročno planiranje** obuhvaća razdoblje od tri do deset godina. Cilj je određivanje objekata za čiju je izgradnju ili zamjenu i rekonstrukciju potrebno trenutno započeti sve nužne početne aktivnosti poput pribavljanja dozvola, definiranja idejnih rješenja, izrade studija. Srednjeročnim planiranjem se definira željeni pravac razvoja mreže;

- **Dugoročno planiranje** obuhvaća razdoblje od 10 do 30 godina i bavi se prepoznavanjem i istraživanjem mogućih slabih točaka u elektroenergetskom sustavu odabirom tehničkih rješenja za njihovo otklanjanje te izradom dugoročnih predviđanja potrošnje električne energije i opterećenja. Ciljevi dugoročnog planiranja očituju se u postavljanju strateških smjernica razvoja mreže.

Neki od glavnih faktora koji se razmatraju prilikom planiranja razvoja distribucijske mreže su:

- **Rast opterećenja:** Potreba za proširenjem distribucijske mreže može proizaći iz povećanja potražnje za električnom energijom odnosno zbog porasta vršnog konzuma u određenom dijelu mreže. Na razini distribucijske mreže također mora postojati određena rezerva koja omogućava priključak novih korisnika mreže.
- **Razini napona:** Distribucijska mreža mora biti dizajnirana na način da osigurava normalne naponske prilike u mreži za cijeli raspon očekivanih pogonskih stanja. U Hrvatskom sustavu u postupku planiranja razvoja distribucijske mreže koriste se drugačija dopuštena odstupanja napona od onih definiranih normom HRN EN 50160:2012, tako je dopušteni pad napona u mreži 10(20) kV u postupku planiranja [2]:
  - $\pm 8\%$  u normalnim pogonskim prilikama
  - $\pm 12\%$  u izvanrednim pogonskim prilikama
- **Pouzdanost napajanja:** Distribucijska mreža mora biti dizajnirana tako da osigurava pouzdanu opskrbu električnom energijom za sve korisnike mreže. Ovo može uključivati izgradnju redundantnih komponenti, poput višestrukih izvoda odnosno rezervnih vodova koji služe kao uklopna rezerva, ali u određenim specifičnim situacijama i pomoćne izvore napajanja koji mogu osigurati otočni pogon mreže u slučaju ispada glavnog pravca napajanja .
- **Sigurnost:** Distribucijska mreža mora biti dizajnirana te održavana tako da osigurava sigurnost kako opreme i zaposlenika u elektroprivredi tako i opće populacije.
- **Troškovi razvoja:** Najveći udio u ukupnim troškovima nadogradnje elektroenergetske mreže su troškovi koji se odnose na razvoj distribucijske mreže, stoga je nužno uvažiti troškove u procesu planiranja razvoja mreže. U procesu definiranja plana razvoja mreže, ODS će obično pokušati pronaći najpovoljniji plan proširenja mreže koji zadovoljava budući konzum te razmatrane tehničke kriterije. Većina pristupa/alata za planiranje razvoja mreže dosta često u dijelu troškova razmatraju samo investicijske troškove često zanemarujući operativne troškove poput troškova održavanja mreže/gubitaka i neisporuke EE.
- **Utjecaj na okoliš:** ODS u proces planiranja razvoja mreže mogu razmotriti utjecaj proširivanja distribucijske mreže na okoliš, kao što je utjecaj na divlje životinje ili vizualni utjecaj na pejzaž.
- **Uporaba zemljišta:** Proširivanje distribucijske mreže može biti ograničeno uporabom zemljišta, dostupnošću zemljišta za izgradnju većih objekata te mogućnošću dobivanja prava služnosti.
- **Regulatorni zahtjevi:** ODS također mora razmotriti bilo koje regulatorne zahtjeve koji se mogu primijeniti na proširivanje distribucijske mreže.

S obzirom na način definiranja funkcije cilja, metode za planiranje razvoja distribucijske mreže dijelimo na one s jednom (eng. *single objective*) ili više funkcija cilja (eng. *multi-objective*). Funkcija cilja je matematički prikaz cilja optimizacijskog problema, a optimalno rješenje je ono koje minimizira ili maksimizira funkciju cilja. Linearni optimizacijski problemi s jednom funkcijom cilja mogu se lako riješiti korištenjem standardnih optimizacijskih algoritama, budući da postoji samo jedan optimizacijski cilj. S druge strane, optimizacijski problemi s više ciljeva uključuje pronalaženje optimalnog rješenja za problem s višestrukim, često međusobno sukobljenim funkcijama cilja koje su uz to definirane na različitim domenama. Optimalno rješenje u ovom slučaju je skup rješenja, poznat kao Pareto optimalni skup, u kojem se niti jedno rješenje ne može poboljšati bez pogoršanja barem jedne od drugih ciljnih funkcija. Drugim riječima, nije moguće pronaći jedno "najbolje" rješenje koje istovremeno optimizira sve ciljne funkcije. Umjesto toga, cilj optimizacije s više ciljeva je pronaći niz kompromisnih rješenja koja predstavljaju ravnotežu između sukobljenih ciljeva. Problemi optimizacije s više ciljeva složeniji su od problema optimizacije s jednim ciljem, budući da postoji više proturječnih ciljeva koje treba razmotriti.

Postoji nekoliko pristupa koji se mogu koristiti za rješavanje problema dinamičkog planiranja razvoja distribucijske mreže s više funkcija cilja [3]:

1. **Metoda težinskih koeficijenta / ponderiranog zbroja:** U ovom pristupu, različitim komponentama funkcije cilja dodjeljuju se odgovarajuće težine na temelju njihove relativne

važnosti, a jedinstvena funkcija cilja formira se zbrajanjem ponderiranih ciljeva. Ovime se problem svodi na standardnu formu s jednom funkcijom cilja koja se lako rješava.

2. **Pareto optimizacija:** U ovom pristupu identificira se skup nedominantnih rješenja, od kojih svako predstavlja kompromis između različitih ciljeva plana proširenja. Donositelj odluke tada može izabrati najpoželjnije rješenje iz tog skupa vodeći računa o značaju pojedine komponente funkcije cilja u planiranju razvoja mreže.
3. **Metoda  $\epsilon$ -ograničenja:** u sklopu ovog pristupa definira se iznos tolerancije ili praga za svaki od razmatranih ciljeva u obliku ograničenja te se iz skupa mogućih rješenja odabire ono koje ispunjava ta ograničenja. U kontekstu problema planiranja razvoja DM, ograničenja mogu predstavljati gornju i donju granicu troškova proširenja, iznosa gubitaka, pouzdanosti ili stupnja integracije DI. Problem ovog pristupa vezan je uz izbor prihvatljive gornje ili donje granice za pojedinu funkciju cilja, budući da neodgovarajući izbor može rezultirati problemom koji je nerješiv. Alternativa tomu je pristup baziran na ciljnom programiranju (eng. *goal programming*) u sklopu kojeg se minimizira odstupanje rješenja od ciljanog iznosa postavljenog za svaku pojedinu funkciju cilja.
4. **Više-kriterijska evolucijska optimizacija:** Kao što je ranije spomenuto, ovo je potklasa genetskih algoritama posebno dizajniranih za optimizaciju s više ciljeva. Uključuje formiranje populacije rješenja i njihovo iterativno poboljšavanje korištenjem evolucijskih tehnika. U kontekstu problema planiranja razvoja DM, rješenja mogu predstavljati različite planove proširenja, a evolucijski proces može uključivati simulaciju izvedbe svakog plana prema različitim scenarijima i odabir planova s najboljom izvedbom za formiranje sljedeće generacije.
5. **Različite metode donošenja odluka:** najčešće uključuju evaluaciju i usporedbu alternativnih rješenja problema na temelju skupa unaprijed određenih kriterija. Ovaj se pristup može koristiti za rješavanje problema dinamičkog planiranja razvoja DM s više ciljeva, uzimajući u obzir kompromise između različitih ciljeva i dopuštajući donositelju odluka da odaberu najpoželjnije rješenje na temelju tih kompromisa.
6. **Matematičko programiranje:** je metoda rješavanja optimizacijskih problema formuliranjem problema kroz skup matematičkih jednadžbi u smislu jednakosti ili nejednakosti. Može se koristiti za rješavanje problema dinamičkog planiranja razvoja DM s više ciljeva implementacijom pristupa baziranog na metodi težinskih koeficijenta ili primjenom metode  $\epsilon$ -ograničenja.

Najnoviji trendovi na području razvoja metoda za optimalno planiranje razvoja distribucijske mreže usmjereni su prema:

1. **Značajnijoj primjeni podatkovne znanosti i strojnog učenja:** integracija pametnih brojlara, automatizacija pogona te generalno veća osmotrivost DM omogućava primjenu podatkovne znanosti i metoda strojnog učenja za poboljšanje točnosti i učinkovitosti planiranja razvoja te pogona distribucijske mreže. Ove se tehnike mogu koristiti za analizu velikih količina podataka o mreži i njezinom radu, omogućujući točnija predviđanja buduće potrošnje i proizvodnje DI.
2. **Integraciji distribuiranih izvora i električnih vozila:** Sve veća upotreba distribuiranih izvora EE, kao što su manje sunčane elektrane, baterijska skladišta te elektrifikacija prometnog sektora zahtijeva razvoj novih pristupa u procesu planiranja razvoja DM koji uzimaju u obzir utjecaj ovih resursa na rad DM.
3. **Povećanju fokusa na održivost i efikasnost DM:** Postoji rastući trend prema razmatranju ciljeva održivosti i efikasnosti u planiranju razvoja distribucijske mreže. To uključuje stvaranje uvjeta za integraciju obnovljivih izvora energije u DM uz smanjenje utjecaja razvoja na okoliš te smanjenje gubitaka energije u DM.
4. **Implementaciji naprednih tehnika modeliranja:** Ovo podrazumijeva korištenje sofisticiranih tehnika modeliranja, kao što je probabilističko i stohastičko modeliranje, kako bi se bolje razumjeli i uvažili neizvjesnost i rizici povezani s razvojem distribucijske mreže.
5. **Većem uvažavanju potreba kupaca:** Ovo podrazumijeva promjenu u pristupu planiranja razvoja distribucijske mreže koji je više usmjeren na krajnjeg korisnika mreže, s fokusom na zadovoljavanje specifičnih potreba i preferencija kupaca. To najčešće uključuje razmatranje faktora kao što su pouzdanost i krajnji troškovi za korisnika.

U ovom radu dan je opis alata za optimalno dinamičko planiranje razvoja distribucijske mreže u sklopu kojeg se zajednički određuje dinamički plan razvoja DM te način i mjesto priključka DI koji se planiranju realizirati na razmatranom području DM u analizirano planskom razdoblju. Za modeliranje i rješavanje optimizacijskog problema koristi se pristup baziran na matematičkom programiranju uz zadržavanje problema u domeni mješovitog linearnog optimizacijskog problema koji je opisan u radu [4].

## 2 Dinamičko planiranje razvoja distribucijske mreže – matematička formulacija

Alat za optimalno dinamičko planiranje razvoja distribucijske mreže razvijen je u skladu s pristupom opisanom u radu [4] koji uključuje sljedeće pretpostavke:

- Metoda omogućava združeno dinamičko planiranje razvoja distribucijske mreže u kombinaciji s odabirom optimalnog načina priključka DI;
- Za potrebe modeliranja potrošnje koristi se pristup baziran na diskretizaciji krivulje trajanja potrošnje što omogućava realniji izračun gubitaka elek.energije te pripadajućih troškova nabavke energije za pokrivanje gubitaka;
- Uvjeti koji osiguravaju radijalan pogon mreže su eksplicitno zadani čime se održava radijalnost pogona u sklopu svake etape razvoja. Također, kroz modifikaciju uvjeta, onemogućena je mogućnost pojave otočnog pogona u dijelovima DM s aktivnim DI.
- Za potrebe proračuna prilika u mreži (tokova snaga, preopterećenja, naponskih prilika) koristi se aproksimativni pristup čime problem ostaje u domeni linearnog binarnog programiranja što rezultira značajno kraćim vremenom proračuna;
- Za svaki element mreže koji se razmatra u procesu planiranja razvoja mreže moguće je definirati nekoliko različitih varijanti realizacije (npr. distribucijski vod/transformator moguće je realizirati s više različitih prijenosnih moći/nazivnih snaga koje su prethodno definirane, priključak DI moguće je izvršiti na više alternativnih načina,...)

Funkcija cilja minimizira ukupnu neto sadašnju vrijednost troškova investicije te operativnih troškova DM:

$$c^{TPV} = \sum_{t \in T} \frac{(1+i)^{-t}}{i} c_t^I +$$

$$+ \sum_{t \in T} [(1+i)^{-t} (c_t^M + c_t^E + c_t^R + c_t^U)] +$$

$$+ \frac{(1+i)^{-n_T}}{i} (c_{n_T}^M + c_{n_T}^E + c_{n_T}^R + c_{n_T}^U)$$

Gdje su:  $c^{TPV}$  – ukupna neto sadašnja vrijednost troškova investicije i operativnih troškova DM,  $i$  – diskontna stopa,  $n_T$  – razdoblje planiranja,  $c_t^I$  – ukupni troškovi investicije u razdoblju  $t$ ,  $c_t^M$  – ukupni troškovi održavanja u razdoblju  $t$ ,  $c_t^E$  – ukupni troškovi nabavke električne energije u razdoblju  $t$  (iz DI i VN mreže),  $c_t^R$  – troškovi gubitaka električne energije u razdoblju  $t$ ,  $c_t^U$  – troškovi neisporučene električne energije u razdoblju  $t$ .

Kao što je vidljivo iz gornjeg izraza prvi dio predstavlja sadašnju vrijednost troškova investicije uz pretpostavku uzastopnog odnosno beskonačnog razdoblja planiranja. Drugim riječima, investicijski trošak u određeni element mreže se amortizira kroz jednake godišnje iznose duž životnog vijeka odgovarajuće opreme pri čemu se pretpostavlja da nakon isteka životnog vijeka opreme dolazi do zamjene opreme s jednakim iznosom investicije. Drugi član u izrazu predstavlja sadašnju vrijednost operativnih troškova mreže koji nastaju duž razdoblja planiranja, dok treći izraz predstavlja sadašnju vrijednost operativnih troškova koji nastaju nakon razdoblja za kojeg se izrađuje plan razvoja mreže.

Troškovi investicije, održavanja, nabavke električne energije, gubitaka te neisporučene električne energije u razdoblju planiranja  $t$  dani su sa sljedećim izrazima:

$$\begin{aligned}
c_t^l = & \sum_{l \in \{NRF, NAF\}} RR^l \sum_{k \in K^l} \sum_{(s,r) \in \gamma^l} C_k^{l,l} \ell_{sr} x_{srkt}^l \\
& + RR^{SS} \sum_{s \in \Omega^{SS}} C_s^{l,SS} x_{st}^{SS} \\
& + RR^{NT} \sum_{k \in K^{NT}} \sum_{s \in \Omega^{SS}} C_k^{l,NT} X_{skt}^{NT} \\
& + \sum_{p \in P} RR^p \sum_{k \in K^p} \sum_{s \in \Omega^p} C_k^{l,p} pf \bar{G}_k^p x_{skt}^p \quad \forall t \in T
\end{aligned}$$

Gdje je:  $K^l/K^{Tr}/K^p$  - skup mogućih izvedbi vodova/ transformatora / DI ,  $NRF/ NAF$  – indikator grana mreže za zamjenu ili izgradnju,  $\gamma^l$ -set grana mreže tipa  $l$ ,

$\Omega^{SS}$  – skup čvorova koji predstavljaju pojne točke mreže,

$K^{NT}$  – skup novih transformatora,

$\ell_{sr}$  – duljina grane koja povezuje čvorove  $s$  i  $r$ ,

$x_{srkt}^l$  – binarna varijabla koja naznačuje investiciju u vod između čvorova  $s$  i  $r$  tipa  $k$  u razdoblju  $t$ ,

$C_k^{l,l}$  – jedinični trošak investicije u vod za opciju realizacije  $k$

$C_s^{l,SS}$  - jedinični trošak investicije u pojnu točku  $s$ ,

$x_{st}^{SS}$  - binarna varijabla koja naznačava investiciju u novu pojnu točku na razini čvorišta  $s$  u razdoblju  $t$ ,

$C_k^{l,NT}$  - jedinični trošak investicije u novi transformator ,

$X_{skt}^{NT}$  - binarna varijabla koja naznačava investiciju u novi trafo na razini pojnog čvorišta  $s$  u razdoblju  $t$ ,

$C_k^{l,p}$  - jedinični trošak investicije u DI za tip  $p$ ,

$pf$  – relativni faktor snage,

$\bar{G}_k^p$  – nazivni kapacitet izgradnje DI,

$x_{skt}^p$  - binarna varijabla koja naznačava investiciju u DI tipa  $p$  priključen na čvor  $s$  u razdoblju  $t$ ,

$RR^l/RR^{SS}/RR^{NT}/RR^p$  - faktor povrata kapitala za investiciju u nove vodove, pojne točke, transformatore i DI koji je definiran izrazima  $(xy)-(xy)$

Trošak održavanja u razdoblju  $t$  dan je sljedećim izrazom:

$$\begin{aligned}
c_t^M = & \sum_{l \in L} \sum_{k \in K^l} \sum_{(s,r) \in \gamma^l} C_k^{M,l} (y_{srkt}^l + y_{rskt}^l) \\
& + \sum_{tr \in TR} \sum_{k \in K^{tr}} \sum_{s \in \Omega^{SS}} C_k^{M,tr} y_{skt}^{tr} \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K^p} \sum_{s \in \Omega^p} C_k^{M,p} y_{skt}^p \quad \forall t \in T
\end{aligned}$$

Gdje je:  $C_k^{M,l}/C_k^{M,tr}/C_k^{M,p}$  – jedinični trošak održavanja vodova/transformatora/DI,

$y_{srkt}^l/y_{skt}^{tr}/y_{skt}^p$  – binarna varijabla koja naznačuje status aktivacije vodova/transformatora/DI u razdoblju  $t$  za tip  $k$ .

Troškovi nabavke električne energije iz mreže VN i DI u razdoblju  $t$  definiran je sljedećim izrazom:

$$c_t^E = \sum_{b \in B} \Delta_b pf \left( \sum_{tr \in TR} \sum_{k \in K^{tr}} \sum_{s \in \Omega^{SS}} C_b^{SS} g_{sktb}^{tr} + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K^p} \sum_{s \in \Omega^p} C_k^{E,p} g_{sktb}^p \right) \quad \forall t \in T$$

Gdje je:  $B$  – skup segmenata s kojima je aproksimirana krivulja trajanja opterećenja;

$\Delta_b$  – trajanja segmenta,

$C_b^{SS}/C_k^{E,p}$  – jedinični troškovi nabavke EE iz mreže VN i DI

$g_{sktb}^{tr}/g_{sktb}^p$  – iznos struje injektirane u čvor s od strane transformatora odnosno DI u trenutku t

Trošak gubitaka električne energije u DM u razdoblju t definiran je sljedećim izrazom (nelinerani dio izraza može se nadalje aproksimirati linearizacijom po dijelovima (eng. *piecewise linear approximation*)):

$$c_t^R = \sum_{b \in B} \Delta_b C_b^{SS} pf \left[ \sum_{tr \in TR} \sum_{k \in K^{tr}} \sum_{s \in \Omega^{SS}} Z_k^{tr} (g_{sktb}^{tr})^2 + \sum_{l \in L} \sum_{k \in K^l} \sum_{(s,r) \in T^l} Z_k^l \ell_{sr} (f_{srktb}^l + f_{rsktb}^l)^2 \right] \quad \forall t \in T$$

Gdje je:

$Z_k^{tr}/Z_k^l$  - impedancija transformatora/voda za tip k

$f_{srktb}^l$  – iznos struje kroz vod tipa k koji povezuje čvorove s i r u razdoblju t za segment opterećenja b

Trošak neisporučene električne energije u DM u razdoblju t definiran je sljedećim izrazom:

$$c_t^U = \sum_{b \in B} \sum_{s \in \Omega_t^{LN}} \Delta_b C^U pf d_{stb}^U \quad \forall t \in T$$

Gdje je:

$C^U$  – jedinični trošak neisporučene energije

$d_{stb}^U$  – iznos neisporučene energije u razdoblju t na razini čvorišta s za segment opterećenja b

Faktor povrata kapitala za investiciju u nove vodove, pojne točke, transformatore i DI definiran je sljedećim izrazima:

$$RR^l = \frac{i(1+i)^{\eta^l}}{(1+i)^{\eta^l} - 1} \quad \forall l \in \{NRF, NAF\}$$

$$RR^{NT} = \frac{i(1+i)^{\eta^{NT}}}{(1+i)^{\eta^{NT}} - 1}$$

$$RR^p = \frac{i(1+i)^{\eta^p}}{(1+i)^{\eta^p} - 1} \quad \forall p \in P$$

$$RR^{SS} = \frac{i(1+i)^{\eta^{SS}}}{(1+i)^{\eta^{SS}} - 1}$$

Gdje je:  $\eta^l/\eta^{NT}/\eta^p/\eta^{SS}$  – procijenjeni životni vijek voda/transformatora/DI/pojne točke.

Za modeliranje pogonskih uvjeta u mreži koristi se linearizirani proračun tokova snaga koji između ostalog uvažava sljedeće pretpostavke:

- sve injekcije snaga odnosno struja u DM imaju isti faktor snage.
- pad napona duž nekog elementa DM jednak je razlici amplituda napona na krajnjim sabirnicama tog elementa mreže

$$\underline{V} \leq v_{stb} \leq \bar{V}$$

$$\forall s \in \Omega^N, \forall t \in T, \forall b \in B$$

$$0 \leq f_{srktb}^l \leq y_{srkt}^l \bar{F}_k^l$$

$$\forall l \in L, \forall s \in \Omega_r^l, \forall r \in \Omega^N, \forall k \in K^l, \forall t \in T, \forall b \in B$$

$$0 \leq g_{sktb}^{tr} \leq y_{skt}^{tr} \bar{G}_k^{tr}$$

$$\forall tr \in TR, \forall s \in \Omega^{SS}, \forall k \in K^{tr}, \forall t \in T, \forall b \in B$$

$$0 \leq d_{stb}^U \leq \mu_b D_{st}$$

$$\forall s \in \Omega_t^{LN}, \forall t \in T, \forall b \in B$$

$$0 \leq g_{sktb}^C \leq y_{skt}^C \bar{G}_k^C$$

$$\forall s \in \Omega^c, \forall k \in K^C, \forall t \in T, \forall b \in B$$

$$0 \leq g_{sktb}^W \leq y_{skt}^W \cdot \min \{ \bar{G}_k^W, \hat{G}_{sktb}^W \}$$

$$\forall s \in \Omega^W, \forall k \in K^W, \forall t \in T, \forall b \in B$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in K^p} \sum_{s \in \Omega^p} g_{sktb}^p \leq \xi \sum_{s \in \Omega_t^{LN}} \mu_b D_{st} \quad \forall t \in T, \forall b \in B$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{k \in K^l} \sum_{r \in \Omega_s^l} (f_{srktb}^l - f_{rsktb}^l) = \sum_{tr \in TR} \sum_{k \in K^{tr}} g_{sktb}^{tr} + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K^p} g_{sktb}^p - \mu_b D_{st} + d_{stb}^U$$

$$\forall s \in \Omega^N, \forall t \in T, \forall b \in B$$

$$y_{srkt}^l [Z_k^l \ell_{sr} f_{srktb}^l - (v_{stb} - v_{rtb})] = 0 \quad \forall l \in L, \forall s \in \Omega_r^l, \forall r \in \Omega^N, \forall k \in K^l, \forall t \in T, \forall b \in B$$

$$-M(1 - y_{srkt}^l) \leq Z_k^l \ell_{sr} f_{srktb}^l$$

$$-(v_{stb} - v_{rtb}) \leq M(1 - y_{srkt}^l)$$

Gdje je:

$\underline{V} / \bar{V}$  – maksimalno dozvoljeni gornji/donji iznos napona u mreži

$v_{stb}$  – amplituda napona na sabirnici s u razdoblju t za segment opterećenja b

$\bar{F}_k^l$  – dozvoljeni iznos strujnog opterećenja grane k tipa l

$\bar{G}_k^{tr}$  – dozvoljeni iznos strujnog opterećenja transformatora k tipa tr

$\mu_b$  – relativno opterećenje mreže za segment opterećenja b

$D_{st}$  – vršno opterećenje na razini čvora s u razdoblju t

$\bar{G}_k^w, \hat{G}_{sktb}^w$  – nazivni kapacitet DI k tipa w/ raspoloživi kapacitet DI k tipa w priključenog na sabirnice s u razdoblju t za segment opterećenja b

$\xi$  – dozvoljeni nivo integracije DI,

M – dovoljno veliki broj.

Uz prethodno navedene izraze kojima se modeliraju pogonski uvjeti i ograničenja u DM, u sklopu modela predloženog u [4] dodatno su definirani izrazi kojima se osiguravaju sljedeći uvjeti:

- u sklopu razmatranog planskog razdoblja, na razini svakog elementa/kandidata za zamjenu/nadogradnju, dozvoljena je maksimalno jedna zamjena/nadogradnja;
- u sklopu razmatranog planskog razdoblja moguće je realizirati priključak pojedinog DI birajući isključivo jednu od mogućih opcija priključka vodeći računa o maksimalnoj snazi izgradnje DI te dozvoljenom stupnju integracije DI u DM;
- na razini svakog planskog podrazdoblja ukupni troškovi investicija moraju biti unutar iznosa raspoloživih sredstava naznačenih za to podrazdoblje.

Dodatno, na razini svakog podrazdoblja potrebno je osigurati radijalan pogon mreže te izbjeći mogućnost pojave otočnog pogona u dijelovima mreže u kojima su prisutni DI, kojeg algoritam inače može predložiti ukoliko se koristi klasičan pristup kojim se osiguravaju uvjeti radijalnosti u DM. U tu svrhu autori u [4] predlažu formulaciju u kojoj se u modelu formiraju fiktivna čvorišta s fiktivnom potrošnjom koja se može napajati isključivo fiktivnom energijom koja dolazi iz fiktivnih pojnih točaka koje odgovaraju stvarnim pojnim točkama u mreži. Dakle u sklopu predloženog modela, autori uz stvarne tokove snaga modeliraju i fiktivne tokove snaga kako bi izbjegli pojavu izoliranih dijelova DM koji u normalnom pogonu nisu povezani s nekom od glavnih pojnih točaka i napaja ih isključivo DI. Detalji oko implementacije mogu se pronaći u radu [4].

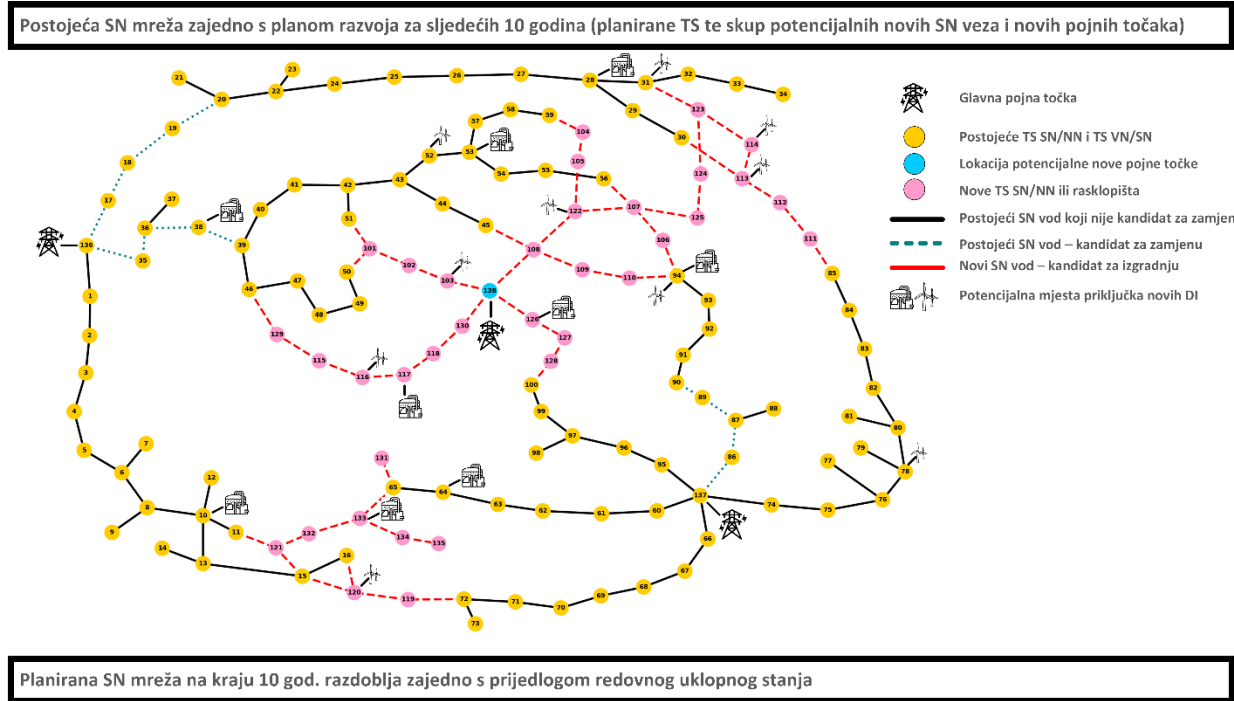
### 3 Primjer numeričkog proračuna

Prethodno opisana metoda za optimalno dinamičko planiranje razvoja distribucijske mreže testirana je na modelu mreže sa 138 sabirnice pri čemu je za razmatranu mrežu razrađen 10-godišnji plan razvoja mreže. Unutar 10 planskog razdoblja, svako podrazdoblje odnosi se na razdoblje od 1 godine. Na slici 1 prikazano je postojeće stanje mreže zajedno s mogućim opcijama razvoja mreže. Postojeća pasivna distribucijska mreža sastoji se od 100 trafostanica SN/NN, dvije pojne točke (sabirnice 136 i 137) te 110 grana koje predstavljaju SN vodove.

Na slici 2 prikazan je i plan proširenja postojeće mreže pri čemu je realizacija nekih zahvata u mreži zadana kao fiksna i nužna dok je realizacija nekih zahvata opcionalna. Nužni zahvati u mreži odnose se na



izgradnju novih TS SN/NN koje su nužne za napajanje novih/postojećih potrošača te je u ulaznim podacima definirana dinamika njihove realizacije (npr. izgradnja TS 101|102|103 -> u prvoj godini razvoja, TS 104|105|106|107-> u drugoj godini, itd...). Odluka o realizaciji opcionalnih zahvata, koji se odnose na zamjenu postojećih vodova ili izgradnju novih SN veza, izgradnju novih pojmih točaka VN/SN ili SN/SN (npr. TS 138) odnosno priključak DI, donosi se primjenom opisanog modela pri čemu model donosi odluku o tome koje zahvate realizirati i u kojem podrazdoblju.



**Slika 1 Postojeća SN mreža s naznačenim nužnim i opcionalnim pojačanjima / optimalno stanje mreže na kraju razmatranog planskog razdoblja**

Na slici 1 naznačeni su svi nužni zahvati (TS SN/NN čvorovi 101-135), opcionalni zahvati (postojeći vodovi koji se mogu zamijeniti, novi vodovi SN koje je moguće izgraditi, nove pojne točke VN/SN (čvor 138) te tip i moguća mjesta priključka DI. Dinamika realizacije novih TS SN/NN zadaje kao ulazni parametar s naznakom godine ulaska u pogon te definiranim krivuljama trajanja opterećenja za razdoblje od godine ulaska u pogon do kraja razdoblja za koji se razrađuje plan razvoja mreže. Odluka o realizaciji te dinamika realizacije opcionalnih zahvata donosi se uvažavanjem plan realizacije nužnih zahvata u mreži, uvažavajući

pogonska ograničenja u mreži za razmatrana karakteristična pogonska stanja kao i utjecaj realizacije zahvata na promjenu iznosa ukupnih neto sadašnjih troškova mreže (troškovi investicije/održavanja/gubitaka/neisporučene električne energije....). Detaljni ulazni podaci koji su korišteni u proračunu mogu se skinuti s poveznice [5].

Na slici 1 prikazano je konačno stanje u mreži dobiveno primjenom modela opisanog u ovom radu dok je dinamički plan razvoja po godinama prikazan u tablici 1. Operativni i investicijski troškovi razvoja mreže po etapama razvoja prikazani su u tablici 2. Troškovi investicije koji su prikazani u tablici 2 odnose se na ukupne troškove, a ne amortizirane troškove, te isti uključuju i troškove investicije u DI. Kao što je vidljivo u tablici 2, u godinama u kojima dolazi do izgradnje/priključka DI odnosno izgradnje nove pojne točke troškovi investicije su znatno veći u odnosu na druga razdoblja. Troškove izgradnje DI moguće je i izostaviti Jednostavnom modifikacijom funkcije cilja, te fiksirati planirane godine ulaska u pogon pojedinog DI kao i instaliranu snagu. U tom slučaju u postupku planiranja razvoja distribucijske mreže, u onom dijelu koji se odnosi na priključak DI na DM samo se određuje optimalno mjesto priključka kojim se minimiziraju ukupni troškovi razvoja mreže (investicijski + operativni).

**Tablica 1 Dinamički plan razvoja mreže**

Plan razvoja mreže	Godina										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Izgradnja novih SN vodova	50-101(V1) 59-104(V1) 102-103(V1) 106-107(V1) 138-103(V1)	51-101(V1) 101-102(V1) 105-122(V1) 107-122(V1)	94-106(V1) 30-113(V1) 85-111(V1) 108-122(V1) 111-112(V1) 112-113(V1) 138-108(V1)	56-107(V1) 108-109(V1) 109-110(V1)	113-114(V1)	115-116(V1) 116-117(V1)	15-120(V1) 15-121(V1) 72-119(V1)	31-123(V1) 123-124(V1) 124-125(V1)	100-128(V1) 127-128(V1) 138-126(V1)	146-129(V1) 165-131(V1)	65-133(V1) 132-133(V1) 133-134(V1) 134-135(V1)
Zamjena postojećih SN vodova	136-17(V1)									136-35(V1)	
Izgradnja novih pojnih točaka		PT + TR->Bus 138 (O1)									
Zamjena post. transformatora VN/SN											
Izgradnja i mjesto priključka DI	C2->Bus10 W2->(Bus52)	W2->Bus122	W2->Bus113			W2->Bus31				W2->Bus114	
Izgradnja TS SN/NN - nužni zahvati	T101,T102,T103	T104,T105, T106,T107	T108,T109,T110	T111,T112, T113,T114	T115,T116, T117,T118	T119,T120, T121	T122,T123, T124,T125	T126,T127, T128	T129,T130, T131	T132,T133,T134,T135	

**Tablica 2 Troškovi razvoja mreže po etapama**

mil. \$	Godina									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Troškovi investicije	4.406	4.088	3.548	0.021	0.107	3.419	0.023	0.037	0.035	3.487
Troškovi održavanja	0.264	0.437	0.609	0.610	0.612	0.783	0.785	0.786	0.787	0.959
Troškovi nabavke energije	8.480	9.127	9.150	9.715	10.604	10.777	11.385	12.015	12.833	13.391
Troškovi gubitaka	0.162	0.175	0.170	0.204	0.203	0.209	0.225	0.240	0.262	0.329
Troškovi neisporučene energij	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

#### 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisan je alat za izradu dinamičkog plana razvoja distribucijske mreže u svrhu minimizacije neto sadašnje vrijednosti ukupnih operativnih i investicijskih troškova DM koji uključuju troškove vezane uz ulaganja u primarnu opremu, održavanje opreme, troškove nabavke električne energije i energije za pokrivanje gubitaka u DM te neisporučene električne energije na razini razmatranog dijela mreže. Alat za izradu dinamičkog plana razvoja razvijen je na temelju metode opisane u [4]. Predloženim modelom omogućava se jednoznačno određivanje plana razvoja mreže po etapama razvoja unutar razmatranog planskog razdoblja na temelju objektivnih troškovnih kriterija uvažavajući pri tom pogonska ograničenja mreže. Daljnje unaprjeđenje alata za dinamičko planiranje razvoja DM biti će usmjereno na egzaktnije modeliranje prilika u mreži korištenjem preciznijih metoda za aproksimaciju jednadžbi tokova snaga. Također model će se dodatno proširiti na način da omogućava uvažavanje indikatora pouzdanosti napajanja potrošača u postupku automatske izrade plana razvoja mreže.

#### ZAHVALA

Rad je financirala Europska unija sredstvima Europskog fonda za regionalni razvoj kroz program Konkurentnost i kohezija 2014-2020 Republike Hrvatske kroz ugovor KK.01.2.1.02.0228. " Istraživanje i razvoj smart-grid punionice za električna vozila unutar konstrukcije rotacionog parking sustava".

## 5. LITERATURA

- [1] D. Bajs. Ekonomski-tehnički pristup planiranju razvoja prijenosne mreže, magistarski rad, Zagreb, 2000.
- [2] HEP- ODS d.o.o., Metodologija i kriteriji planiranja razvoja distribucijske mreže, 2013.
- [3] B. Matić, „Optimalno planiranje razvoja distribucijskih mreža“, diplomski rad, FESB, 2020.g.
- [4] Muñoz-Delgado G, Contreras J, Arroyo JM. Joint expansion planning of distributed generation and distribution networks. IEEE Trans. Power Syst. 2015
- [5] [https://drive.google.com/drive/folders/1NquEgy54S8IuWbVqHpi4HJKze-jvcV\\_1?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1NquEgy54S8IuWbVqHpi4HJKze-jvcV_1?usp=sharing)