

Ivan Krajnović
Končar Digital d.o.o.
ivan.krajnovic@koncar.hr

Josipa Stegić
Končar Digital d.o.o.
josipa.stegic@koncar.hr

Leila Luttenberger Marić
Končar Digital d.o.o.
leila.luttenberger@koncar.hr

Domagoj Peharda
Končar Digital d.o.o.
domagoj.peharda@koncar.hr

Lenart Ribnikar
Elektro Gorenjska, d.d.
lenart.ribnikar@elektro-gorenjska.si

RJEŠAVANJE BARIJERA U RAZMJENI PODATKOVNIH SILOSA U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU KORIŠTENJEM POWERCIM-A U OKVIRU HEDGE-IOT PROJEKTA

SAŽETAK

HEDGE IoT projekt razvija digitalni okvir za implementaciju IoT rješenja na različitim razinama, od edge-a do prijenosne mreže, primjenjujući AI/ML algoritme za povećanje otpornosti mreže.

Tema rada obuhvaća objedinjavanje podataka iz različitih podsustava Operatera distribucijskog sustava (ODS) što će se realizirati u Slovenskom pilotu. Implementacijom modela trafostanice, koji uključuje vremenske i DTR podatke, olakšava se upravljanje mrežom, izvještavanje te se podržava razvoj naprednih algoritama. Ovim pristupom osigurava se interoperabilnost, konzistentnost podataka i podrška za donošenje informiranih odluka u operativnim i planskim zadacima.

Ključne riječi: CIM, distribucijske mreže, interoperabilnost, podatkovni modeli, DTR

OVERCOMING BARRIERS TO DATA EXCHANGE IN THE POWER SYSTEM USING POWERCIM WITHIN THE HEDGE-IOT PROJECT

The HEDGE IoT project develops a digital framework for implementing IoT solutions at various levels, from edge to transmission networks, applying AI/ML algorithms to enhance grid resilience.

This paper focuses on integrating data from different subsystems of the Distribution System Operator (DSO), which will be implemented in the Slovenian pilot. By implementing a substation model that includes weather and DTR data, grid management and reporting are facilitated, supporting the development of advanced algorithms. This approach ensures interoperability, data consistency, and support for informed decision-making in operational and planning tasks.

Key words: CIM, distribution networks, interoperability, data models, DTR

1. UVOD

HEDGE-IoT projekt, financiran kroz Horizon Europe program, usmjeren je na digitalizaciju europskih energetske sustava putem IoT tehnologija, povezivanjem „edge“ i „cloud“ slojeva uz primjenu AI/ML alata. Bitne aktivnosti projekta uključuju povećanje otpornosti mreže, optimizacija integracije obnovljivih izvora i stvaranje interoperabilnog te standardiziranog digitalnog okvira.

Slovenski pilot usmjeren je na razvoj inovativnog sustava upravljanja infrastrukturu na distribucijskoj razini, s posebnim naglaskom na trafostanice i optimizaciju rada elektroenergetske mreže. Končar Digital u projektu sudjeluje kao tehnološki partner, zajedno s ključnim dionicima: operatorima prijenosnog sustava (ELES) i distribucijskog sustava (Elektro Gorenjska), tehnološkim partnerima poput Operata te istraživačkim institucijama Fakultet elektrotehnike i računarstva te Jožef Stefan Institut, koji razvijaju napredne algoritme za potrebe projekta.

Cilj ovog pilota je implementacija tehnologija u varijantama „Dynamic Transformer Rating“ (DTR) i „Dynamic Line Rating“ (DLR) na rubnim („edge“) IoT uređajima, čime se želi omogućiti dinamičko upravljanje kapacitetima i poboljšati učinkovitost mreže. Integracija ovih rješenja u rubne slojeve elektroenergetske infrastrukture omogućit će optimalno korištenje resursa i povećanje prijenosnog kapaciteta i pouzdanosti sustava, istovremeno podržavajući energetske prijelaz prema pametnijoj i održivijoj mreži s velikim udjelom obnovljivih izvora na distribucijskoj razini.

Ključnu ulogu u standardizaciji razmjene podataka ima PowerCIM sustav u ulozi tzv. „model managera“, tj. CIM baziranog repozitorija statičkih modela mreže i trafostanica. Sam PowerCIM sustav ovdje osigurava standardiziranu razmjenu statičkih podataka između različitih sustava, dok dodatna baza osigurava unificiranu razmjenu telemetrijskih podataka. U sklopu pilota razvija se jedinstveni model trafostanice temeljen na CIM standardu koji integrira DTR podatke, kao i podatke o vremenskoj prognozi.

2. FUNKCIONALNA ARHITEKTURA SLOVENSKOG PILOTA NA HEDGE-IOT PROJEKTU

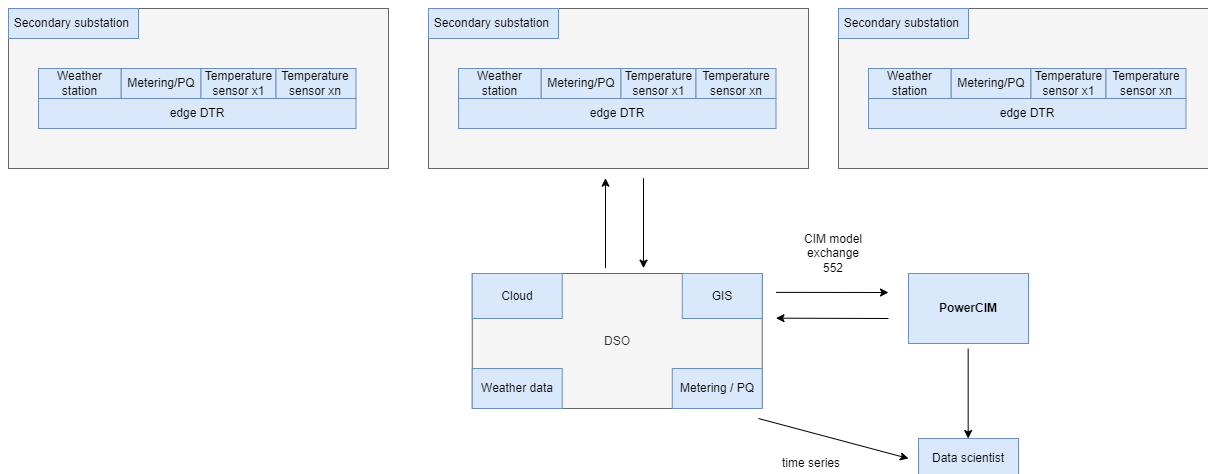
Funkcionalna arhitektura Slovenskog pilota, kao glavni rezultat predstavljen u ovom članku, prikazuje inovativan pristup digitalizaciji elektroenergetske infrastrukture temeljen na integraciji IoT tehnologija i CIM standarda.

Rješenje prikazano na slici 1 biti će implementirano na mreži Elektro Gorenjske uključuje specijalizirani IoT (Internet of Things) hardver i senzore smještene u trafostanicama na tzv. „rubu mreže“ (en. edge), dodatne servise poput GIS-a i sustava za mjerenje i kontrolu kvalitete energije (metering/PQ), vanjske sustave za vremenske prognoze, centralni DTR servis te centralizirani PowerCIM sustav s bazom podataka za unificirane telemetrijske podatke.

Unutar GIS sustava statički modeli trafostanica i mreža biti će preneseni u PowerCIM pomoću standardiziranih IEC 61970-552 CIM/XML datoteka. Središnji DTR servis omogućit će uvoz svih relevantnih telemetrijskih podataka – uključujući temperature, podatke s meteoroloških stanica, mjerni, PQ i SCADA podatke – u unificiranu bazu telemetrijskih podataka. Ti će se podaci standardizirati u skladu s CIM modelom, pridružujući mjernim mjestima definiranim u statičkom modelu.

Predložena arhitektura omogućuje objedinjeno upravljanje podacima te njihovu dostupnost na standardiziran način, što je ključna premisa HEDGE-IoT projekta i njegovog pristupa prema „podatkovnim prostorima“ (en. data spaces). Time se olakšava integracija i analiza podataka u cilju unaprjeđenja mrežne infrastrukture te povećanja njezine učinkovitosti.

Sučelja razvijena u sklopu ovog rješenja biti će iskorištena od strane akademskih partnera za dohvat podataka, razvoj inovativnih algoritama te provedbu naprednih analitičkih izračuna. Takav pristup dodatno potiče suradnju između industrije i akademske zajednice, što je ključno za inovacije u energetskom sektoru.



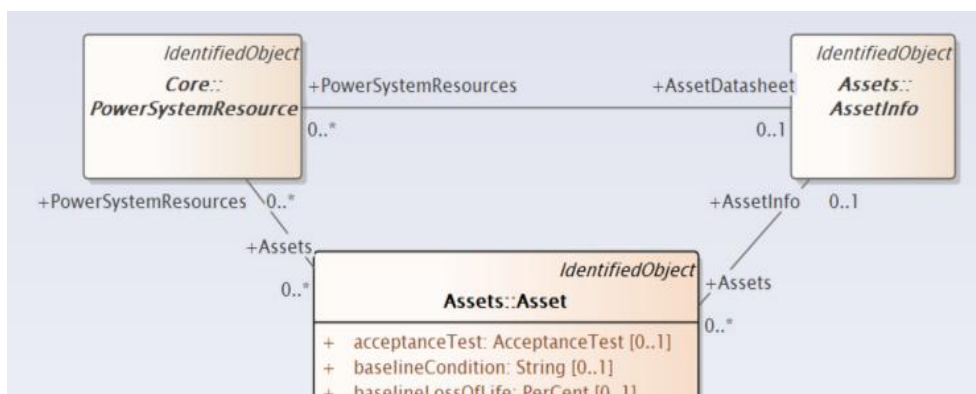
Slika 1. Arhitektura slovenskog pilota

3. SEMANTIČKI MODEL TRAFOSTANICE

3.1. CIM model trafostanice

Trafostanica i njezini dijelovi opisani su u CIM modelu trafostanice kroz dva pogleda – funkcionalni i imovinski. To omogućuje jasno definiranje odnosa između klasa *PowerSystemResource* i *Asset*, čime se postiže da sve ostale klase koje opisuju trafostanicu nasljeđuju ove osnovne strukture, osiguravajući dosljednost i interoperabilnost modela.

Klasa *PowerSystemResource* obuhvaća klase koje definiraju funkcijsko ili električno mjesto opreme u mreži, poput transformatora koji povezuje različite naponske razine (Slika 2). Kao rezultat toga, klasa *Asset* sadrži informacije o fizičkim elementima (inventaru) koji mogu, ali ne moraju, biti smješteni na određeno funkcijsko mjesto u mreži. Klase *AssetInfo*, pak, predstavljaju katalogske podatke koji opisuju grupe istovjetnih fizičkih elemenata, poput tipova transformatora ili vodiča.



Slika 2 Odnos između funkcijskog modela i modela fizičke imovine

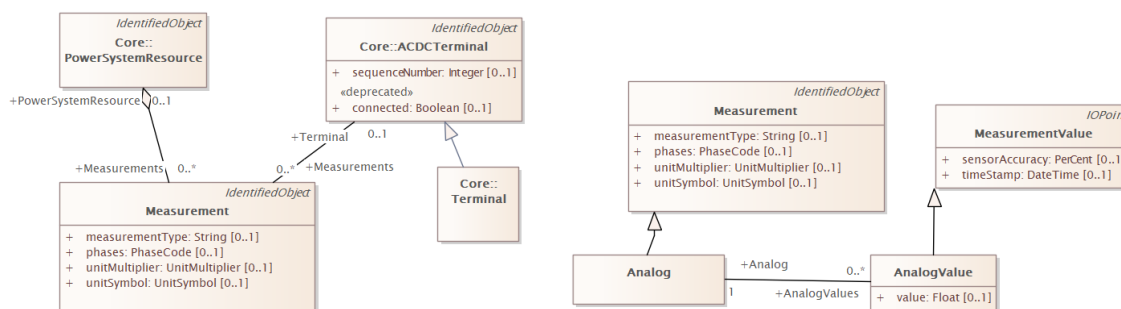
Kako bi se DTR uspješno integrirao u zajednički informacijski model (en. CIM) trafostanice, transformator mora biti modeliran kroz oba pogleda – funkcionalni i imovinski – čime bi se obuhvatile različite vrste podataka specifične za svaki od tih modela. U funkcijskom modelu, transformator se opisuje električnim parametrima, poput napona kratkog spoja i struje koja prolazi kroz njega, te topološkim parametrima, poput priključnica i spojeva s ostalim električnim elementima u trafostanici. Kao posljedica toga, u imovinskom modelu transformator nosi knjigovodstvene podatke, poput serijskog broja, proizvođača

i godine proizvodnje, te fizičke parametre, kao što su ispitni listovi. Na istoj funkcijskom mjestu mogu se izmijeniti različiti fizički transformatori (npr. zbog kvara) te je važno razlikovati funkciju koju obavlja transformator i sam fizički transformator.

Budući da toplinski model transformatora nije obuhvaćen CIM standardom, model je proširen za podatke vezane uz dinamički toplinski model, što je detaljno opisano u poglavlju 4.1. Ova proširenja omogućuju integraciju termalnih podataka unutar DTR sustava, čime se dodatno povećava preciznost i funkcionalnost modela.

3.2. CIM model mjerenja i vrijednosti

CIM standard uvodi razliku između mjesta mjerenja povezanog s mrežnim elementom i njegovim priključkom (Slika 3., lijevo) te mjernog uređaja koji bilježi podatke na tom mjernom mjestu (Slika 3, desno). Podaci definirani unutar objekta *Measurement* odnose se na mjesto mjerenja, što predstavlja prvenstveno topološki podatak. S druge strane, podaci klase *MeasurementValue* predstavljaju jedan ili više mjernih uređaja na istom mjernom mjestu, gdje se mogu razmjenjivati i iznosi mjerenja.



Slika 3 CIM model mjerenja

Standardni CIM profil za razmjenu iznosa mjerenja ne postoji, budući da CIM standard nije izvorno razvijen za tu svrhu. Za razmjenu ovakvih podataka koriste se drugi standardi, poput TASE.2. Međutim, unutar CIM-a postoje profili za razmjenu stanja mreže, gdje se za određeni vremenski trenutak bilježi jedno stanje mreže, kao što je definirano u standardu IEC 61970-456 – *SteadyStateHypothesis* [1].

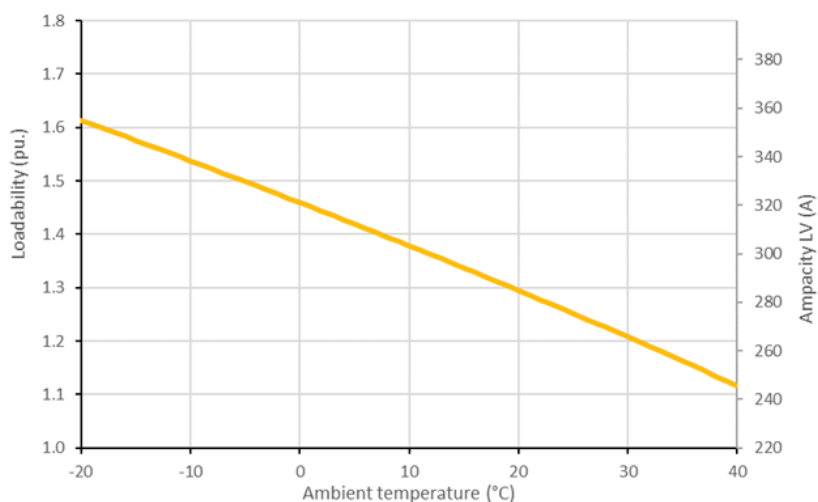
Za potrebe HEDGE-IoT projekta, kako bi se omogućio pristup podacima ostalim sudionicima, primijenjen je sličan pristup i na mjerenja. Mjerenja su grupirana prema vremenskim instancama, a koriste se samo dvije klase – *AnalogValue* i *DiscreteValue* – od kojih svaka sadrži samo jedan atribut: *value*. Ovim modelom omogućeno je standardizirano prikazivanje mjerenja struje, temperature opreme, meteoroloških podataka i prognoza, čime se dodatno pojednostavljuje razmjena i interpretacija podataka.

4. PRORAČUN TOPLINSKOG OPTEREĆENJA

Povećanom elektrifikacijom grijanja, integracijom infrastrukture za punjenje električnih vozila te implementacijom distribuiranih izvora energije (DER), kao što su fotonaponski sustavi (PV), niskonaponske distribucijske mreže suočavaju se s naglim porastom vršnog opterećenja. Operatori slovenskih distribucijskih sustava nisu iznimka, što znači da problem preopterećenja mreže premašuje mogućnosti ODS-a za ojačanjem mreže. Zbog toga je ključno maksimalno iskorištavanje kapaciteta postojeće infrastrukture distribucijskog elektroenergetskog sustava.

Proračun „Dinamičkog toplinskog opterećenja“ (DTR) je tehnologija koja nudi rješenje pomicanjem granice opterećenja bez ugrožavanja sigurnosti rada opreme i sustava. DTR je operativni koncept osmišljen za optimizaciju korištenja imovine kao što su transformatori i dalekovodi. U povoljnim vremenskim uvjetima, opterećenje se može povećati, dok se održava siguran rad te izbjegavaju negativni utjecaji na vijek trajanja opreme.

Oprema u sustavu, poput transformatora, dizajnirani su za rad u predefiniranim uvjetima okoline, kako je specificirano međunarodnim standardima [2-7]. Ukoliko transformatori rade izvan predefiniranih uvjeta, njihov kapacitet opterećenja („loadability“) se mijenja, kao što je vidljivo na primjeru (Slika 4.).



Slika 4 Ovisnost kapaciteta opterećenja o ambijentalnoj temperaturi (160 kVA, 21/0.42 kV)

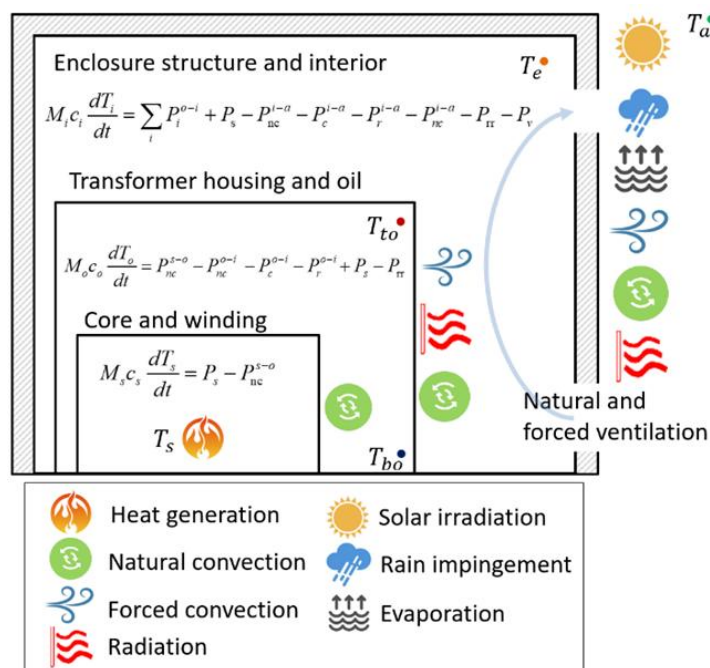
Primjer sigurnog opterećenja distribucijskog transformatora pri različitim temperaturama okoline je prikazan na Slici 4. Na temelju grafa može se zaključiti da u povoljnim uvjetima okoline, ako se transformator hladi, transformator se može sigurno preopteretiti. S druge strane, ako uvjeti okoline negativno utječu na transformator, sigurna opterećenost transformatora mogla bi biti manja od nazivnog kapaciteta.

4.1. DINAMIČKI TOPLINSKI MODEL

Dinamički toplinski model za izračunavanje DTR-a izrađen je u sklopu projekta „TrafoFlex“ pomoću „multi-mass“ modela koji omogućuje simulaciju prijenosa topline između „N“ uzastopnih tijela koristeći 7 različitih mehanizama generiranja/prijenosa topline. Model je prikazan na Slici 5. Sastoji se od dva unutarnja tijela za transformator i vanjskog tijela za kućište. Vanjsko tijelo za kućište se ne uključuje prilikom simulacije transformatora montiranih na stup.

U sklopu projekta HEDGE-IoT, DTR rješenje će se testirati na rubu distribucijske mreže. Ovaj pristup omogućit će stvaranje robusnijeg sustava koji ne ovisi o izračunima u oblaku ili vanjskim podacima o vremenskim uvjetima. Umjesto toga, vremenski uvjeti će se lokalno izračunavati pomoću naprednih algoritama strojnog učenja.

Rješenje na rubu mreže predstavlja značajan napredak u automatizaciji distribucijskih transformatora. U budućnosti će „edge“ podaci o DTR-u služiti kao bitan ulazni parametar za podešavanje dinamičke zaštite transformatora. Točnije, ako su DTR uvjeti povoljni, postavke zaštite transformatora mogu se prilagoditi kako bi se omogućili viši pragovi snage i struje.



Slika 5 Shematski prikaz "multi-mass" modela korištenog u DTR proračunima

5. ZAKLJUČAK

HEDGE-IoT projekt predstavlja značajan korak prema digitalizaciji i modernizaciji europskih energetskih sustava, integrirajući napredne IoT tehnologije i AI/ML alate. Slovenski pilot, kao konkretna primjena ovih inovacija, demonstrira kako standardizirani modeli poput CIM-a i napredna rješenja poput DTR-a mogu doprinijeti optimizaciji rada distribucijskih mreža i učinkovitijem korištenju postojećih resursa.

Razvijena arhitektura omogućuje objedinjenu razmjenu i analizu podataka, stvarajući interoperabilan okvir za suradnju različitih dionika. Primjena dinamičkog toplinskog modela na razini "edge" uređaja osigurava lokalno upravljanje kapacitetima, povećava otpornost mreže te podržava prijelaz na održiviji i fleksibilniji energetski sustav s većim udjelom obnovljivih izvora energije.

Sučelja razvijena u sklopu ovog rješenja biti će iskorištena od strane akademskih partnera za dohvat podataka, razvoj inovativnih algoritama te provedbu naprednih analitičkih izračuna. Takav pristup dodatno potiče suradnju između industrije i akademske zajednice, što je ključno za inovacije u energetskom sektoru.

Ovaj koncept usklađen je s inicijativama na europskoj razini koje ističu potrebu za jedinstvenim okvirima i interoperabilnim standardima, omogućujući operatorima distribucijskih sustava učinkovitu razmjenu i korištenje podataka. Ključna komponenta ovog pristupa je razbijanje podatkovnih silosa, koji tradicionalno ograničavaju dijeljenje informacija između različitih sustava, odjela i organizacija.

Kroz implementaciju interoperabilnih standarda i stvaranje „podatkovnih prostora“ (en. data spaces), omogućuje se horizontalna i vertikalna integracija podataka, čime se smanjuju redundancija i fragmentacija informacija. Ovakav pristup ne samo da olakšava tehničku suradnju između različitih dionika u energetskom sektoru, već i stvara temelje za inovativne usluge, bolje donošenje odluka i učinkovitije upravljanje resursima [8].

Razbijanjem podatkovnih silosa, operatori distribucijskih sustava mogu bolje odgovoriti na izazove modernizacije mreže, uključujući integraciju obnovljivih izvora energije, infrastrukturnu podršku za električna vozila i povećanje otpornosti na klimatske promjene.

6. ZAKLJUČAK

- [1] IEC 61970-456 Energy management system application program interface (EMS-API) - Part 456: Solved power system state profiles, prosinac 2021.
- [2] IEC, 60076-2:2011 - Power transformers - Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers, 2011.
- [3] IEC, IEC 60076-14 Ed.2 Part 14 Design and application of liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials 14_569_CD.pdf, 2018.
- [4] IEEE Standards Association, IEEE Std C57.12.00-2015: Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, 2015
- [5] IEC, IEC 60076-7:2018 - Power transformers - Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers.
- [6] IEEE Standards Association, C57.91-2011 - IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators
- [7] TrafoFlex – Advanced concept of efficient use of transformers leveraging the DTR technology. Project overview, May 2023
- [8] O. Gailis, 'EU DSO Entity's Technical Vision'.