|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | UNIVERZITET U NIŠU ELEKTRONSKI FAKULTET |  |  |

**Сајбер безбедност соларних инвертера**

Дипломски рад

Студијски програ: Електротехника и рачунарство

Модул рачунарство и информатика

|  |  |
| --- | --- |
| Студент: | Ментор: |
| Вукашин Поповић, бр. инд. 17359 | Проф. др Леонид Стоименов |

Ниш, јул 2024. година

Univerzitet u Nišu Elektronski Fakultet

#### Сајбер беѕбедност соларних инвертера

**Solar inverter cyber security**

Дипломски рад

Студијски програ: Електротехника и рачунарство

Модул рачунарство и информатика

Студент: Вукшин Поповић, бр. инд. 17359

Ментор: Проф. др Леонид Стоименов

Задатак: *Представљање ризика при нападу на соларне инвертера, кроз анализа рањивости топ 10 произвоћача у последњих 5 година, протокола за комуникацију који су имплементирани OSGP, zibbee, modbus Omer TCP…, RS485, анализа контрола безбедности,* *анализа напада на број клонираних уређаја.*

Датум пријаве: 19.07.2024

Датум предаје рада:

Датум предаје рада:

|  |
| --- |
| Комисија за оцену и обраду: |
| 1. Председник Комисије |
| 2. Члан |
| 3. Члан |

Садржај

[1. Увод 5](#_Toc176392817)

[2. Соларни инвертери 7](#_Toc176392818)

[2.1. Зашто соларни инвертери представљају ризик сајбер безбедности 7](#_Toc176392819)

[2.2. Произвођачи соларних инвертера 8](#_Toc176392823)

[3. Анализа тржишта производње соларних инвертера 9](#_Toc176392824)

[3.1. Топ 10 произвођача соларних инвертера 2023. година 9](#_Toc176392828)

[3.2. Да ли кинески производи предстаљају проблем 9](#_Toc176392833)

[3. Инвертерска комуникација 10](#_Toc176392834)

[3.1. Типови инвертерске комуникације 10](#_Toc176392838)

[3.2. Комуникациони протоколи 13](#_Toc176392843)

[3.3. Интерфејси за комуникацију 15](#_Toc176392844)

[3.4. Примене инвертерске комуникације 17](#_Toc176392845)

[3.5. Предности и мане инвертерске комуникације 19](#_Toc176392846)

[4. Сајбер безбедност контроле соларних инвертера 20](#_Toc176392847)

[4.1. Заштита на нивоу инвертера 20](#_Toc176392852)

[4.1.1. Сигурно покретање (Secure Boot) 20](#_Toc176392853)

[4.2.1. Енкрипција фирмвера 21](#_Toc176392860)

[4.2.2. Аутентификација корисника 21](#_Toc176392861)

[4.2.3. Заштита од физичког напада 21](#_Toc176392862)

[4.2.4. Правила за лозинке 21](#_Toc176392863)

[4.2.5. Даљинско ажурирање фирмвера (Firmware over-the-air) 22](#_Toc176392864)

[4.2.6. Мониторинг и логовање 22](#_Toc176392865)

[4.3. Заштита на мрежном нивоу 22](#_Toc176392866)

[4.3.1. Енкрипција комуникације (TLS/SSL) 22](#_Toc176392867)

[4.3.2. ВПН (VPN) тунел 23](#_Toc176392868)

[4.3.3. Фајервал (Firewall) 23](#_Toc176392869)

[4.3.4. ИДС (Intrusion Detection Systems) / ИПС (Intrusion Prevention Systems) 23](#_Toc176392870)

[4.3.5. Сегментација мреже 23](#_Toc176392871)

[4.3.6. Редовно ажурирање софтвера и фирмвера 24](#_Toc176392872)

[4.3.7. Мониторинг и логовање мрежног саобраћаја 24](#_Toc176392873)

[4.3.8. Сигурно управљање приступом (ИАМ - Identity and Access Management) 24](#_Toc176392874)

[5. Рањивости соларних система 25](#_Toc176392875)

[5.1. Рањивости Солармен (Solarman) соларне опреме 27](#_Toc176392877)

[5.1.1. Преуизимање контроле налога манипулациојом ауторизационих токена 28](#_Toc176392878)

[5.1.2. Поновна употреба Деј Клауд токена 29](#_Toc176392879)

[5.1.3. Прикупљање података кроз /group-s/acc/orgs АПИ ендпоинт 29](#_Toc176392880)

[5.1.4. Анализа утицаја рањивости 31](#_Toc176392881)

[5.1.5. Процедура обавештења и поправљања рањивости 31](#_Toc176392882)

[5.2. Рањивости Деј (Deye) соларне опреме 31](#_Toc176392883)

[5.2.1. Хардкодирани профили 31](#_Toc176392884)

[5.2.2. Прибављање података кроз /user-s/acc/orgs АПИ ендпоинт 33](#_Toc176392885)

[5.2.3. Генерисање недозвољених токена ауторизације 34](#_Toc176392886)

[5.2.4. Анализа утицаја рањивости 34](#_Toc176392887)

[5.2.5. Процедура обавештења и поправљања рањивости 35](#_Toc176392888)

[6. Закључак 36](#_Toc176392889)

[7. Литература 36](#_Toc176392890)

# Увод

Са порастом популарности ИоТ (интернет ствари) технологија модерни свет се све више ослања на повезаност и дигиталне мреже. Преко 15 милијарди активних уређаја широм света, око 2 по особи, очекивано је повећање на 30 милијарди до 2030. године.

Термин интернет ствари описује уређаје који прикупљају податке из света, обрађују након чега су прослеђени даље у систем. Уређаји са сензорима, способношћу обраде података (софтвером), и другим технологијама које повезују и размењују податке са другим уређајима и системима преко интернета или других комуникационих мрежа. Интернет ствари уређаји не морају бити повезани са јавним интернетом, они само треба да буду повезани на мрежу и да буду појединачно адресабилни. Термин је додељен због конвергенције више технологија, укључујући свеприсутно рачунарство, робне сензоре и све моћније уграђене системе, као и машинско учење. Старија поља уграђених система, бежичне сензорске мреже, системи управљања, аутоматизација, самостално и колективно омогућавају Интернет ствари.

Интернет ствари уређаји доносе повезаност и велика побољшања у ефикасности свакодневног живота. Скоро све модерне популарне технологије као што су преносиви уређаји (паметни телефони, сатови...), уређаји унутар домаћинства као што су паметни фрижидери итд. такође спадају у ИоТ, ширина технологије је толика да чак има имплементације и у енергетским системима како у домацинству тако и у дистрибуираним системима што је конкретан фокус овог дипломског рада.

Током последње деценије електрични системи (ЕПС) су претрпели значајне иновације (децентрализација производње, дигитализација корисничких сервиса, паметне мреже, итд.) како би испунили повећану потрошњу електричне енергије, економичност и екологију. Обновљиви извори енергије (РЕС) искоришћење ветра, соларна и топлотна енергија се користе како би се повећала енергетска ефикасност као и испуњење строгих емисија гасова угљеника и других гасова са ефектом стаклене баште. Прелаз на све већу употребу обновљивих извора енергије такође утиче на развој и примену технологија за дистрибуиране изворе (електричне) енергије (ДЕР).

Практична интеграција ДЕР-а је доказ значења за ЕПС, не само у обнобљивим изворима енергије већ и у необновљивим изворима. ДЕР уређаји се категоришу у односу на основу операционих принципа, као што су производња, складиптење, или комбинација претходна два или чак контролна оптерећења. На пример фотонапонски панели и ветрогенератори спадају у генерациону категорију, батерије и електрична возила у категорију складиштења, а грејачи или клима уређаји у категорију подесивих оптерећења. Могућност генерисања електричне енергије јако близу до потрошача смањује губитке и оптерећење на мрежу. Флексибилност, скалабилност, аутономност су особине од јако великог значаја за критичну инфраструктуру ЕПС-а. Као најчешћи и најзасупљенији облик ДЕР-а су соларне електране, више домаћинстава са фото-напонским панелима (електрана) може чинити један систем. У соларним електранама најкритичнијеместо заузимају соларни инвертери, који претварају електричну енергију из панела у одговарајући облик потребан мрежи било то АЦ или ДЦ.

Међутим и з све предности интеграције ИоТ у ЕПС-у или конкретније ДЕР-у, ИоТ технологије доносе нови ниво претњи, отварају система предходно невиљиве сајбер нападима. Да би у будућности и била остварена комплетна итеграција у ЕПС и ипуњено постављање ДЕР-а као ослонца комплетног електричног снабдевања неопходно је дефинисати могуће претње, рањивости, у супротном би сваки отказ могао бити катастрофалан.

Пошто као што је већ наведено од свих ДЕР имплемтација соларних електрана има највећи број оне истовремено представљају и највећу рањивост за мрежу. Анализа могућих претњи и стандарда сигурности соларних инвертера ће и бити тема овог дипломског рада.

# Соларни инвертери

Соларни инвертери претварају енергију добијену из панема у прави облик потребан за употребу (АЦ/ДЦ). Повезани су у соларни енергетски систем, који интегрише паметну комуникацију и надгледање, ради лаког сагледавање производње и потрошње електричне енергије. Вишак електричне енергије је могуће преусмерити у батерије.



На основу глобалног истрживања, Аустралија тренутно има највећи проценат употребе соларне енергије, где је око 30% домаћинстава опремљено фотонапонским (ПВ) системима. Од Јануара 2022. године висе од 3 милиона домаћинстава користи ПВ системе, соларна енергија је тип обновљивих извора енегије са најбжим усвајањем и развијањем. Што се и огледа на примеру Аустралије где 10% укупног електроснабдевања долази из соларних панела.

### Зашто соларни инвертери представљају ризик сајбер безбедности

Традиционално ризик сајбер безбедности асоциран са соларним инвертерима је био јако мали највише из разлога што су то били уређаји који се уопште не повезују на интернет мрежу. Међутим, како је послење време са повећањем популарности ИоТ уређаја за надгледање и контролу, дошло је до интеграције интернета у контролерима (инвертерима), што је знатно повећало ризик, на велики опсег сајбер напада вируси, хаковање. Собзиром да се још увек повећава број корисника, тако се и повећава површина и ризик система.

САД владина канцеларија за енергетску ефикасност и обновљиве енергије (ОЕЕРЕ) истиче потенцијал сајбер ризика у соларним инвертерима. ОЕЕРЕ износи неколико круцијалних претњи које би биле последица неисправног софтвера, што значи да је могуће пресрести податке или манипулисати њима и потенцијал за уградњу малициозног кода у систем као и његово извршавање, што би такође могло утицати на његово пропагирање даље у систем. Штавише САД национална лабараторија за обновљиве енергије (НРЕЛ) открива да ДЕР уређаји шаљу своје податке нејчешће без икакве енкрипције или заштите, усуштини недостају им најосновнији сигурносни системи.

НРЕЛ напомиње да је "повећана сајбер-физичка зависност између електричне мреже и ДЕР-а омогућава нападачима више начина да се окрећу између дистрибутивних ресурса и пропагирања критичним ресурсима, што би могло довести до губитка података или потпуног отказа у раду. Ако рањивости на уређај, мрежи и нивоу примене ДЕР-а нису адресирани, ДЕР-ови би потенцијално могли служе као правци напада на дистрибутивну мрежу". Осим тога, "могуће је онемогућити и/или оштетити локалне мрежне променом фреквенције и/или дозвољеног напона мрежне онемогућавањем подфреквентног оптерећења или добијањем неовлашћеног приступа контролама регулатора помоћу прислушкивања, манипулације интерфејс човек-машина, анализа саобраћаја или других метода упада''.



### Произвођачи соларних инвертера

У последњој деценији идустрија производње ПВ опреме је прошло кроз знатне измене, са изменом центра производње са Европе, Јапана, САД доминантног тржишта на Кинеску монополизацију. Као велика инвестиција Кинеске владе у домаћу индутрију тј. произбођаче, еквиваленто отприлике 50 милијарди долара. Интернационална Енергетска Агенција (ИЕА) доноси у извештају чињеницу да 80% светксе произвозводње долази из Кине као и да свих топ 10 произвођача долази из Кине.

Што се тиче конкретно инвертера, тај број је тек нешто мањи, 76% укупне произво-дње чини Кина. Само инвертери прва два Кинеска произвођача Хуавеи и Сунгров укупно произведу више гигавати електричне енергије него сви остали европски заједно. ИЕА тврди да ће се комплетна светска производња ПВ опреме заснивати на Кини до 2025. године. Што још више ствара разлога за анализу рањивости и претњи.



Производња ПВ опреме по држави и региону, 2021. година

Извор: ИЕА

# Анализа тржишта производње соларних инвертера



### Топ 10 произвођача соларних инвертера 2023. година

Кина је постала гигант на тржишту соларне опреме, са великим бројем фирми које су специјализоване само за то, како је порасла популарност обновљивих извора енергије, тако је дошло до повећаних захтева за ефикасност и поузданост. Као последица тих захтева и њиховог испуњења дошло је до распоперада следећих произдођача на следећој светској листи тржишта.

1. Huawei Technologies Co. Ltd.
2. Sungrow Power Supply Co. Ltd.
3. SMA Solar Technology AG
4. Ginlong Technologies Co. Ltd.
5. TBEA Co. Ltd.
6. Omnik New Energy Co. Ltd.
7. Sineng Electric Co., Ltd.
8. Chint Group Corporation
9. Growatt New Energy Technology Co. Ltd.
10. Shenzhen KSTAR Science and Technology Co. Ltd.

### Да ли кинески производи предстаљају проблем

# Инвертерска комуникација

Инвертерска комуникације се односе на размену података (везу) између самог претварача (инвертера) и осталих система за надзор, контролу итд. како би омогућили лакше прикупљање података инвертерских система. Ово омогућава оператерима система оптимизацију, побљшање ефикасности, безбедности, као и решавање проблема у систему у реалном времену.



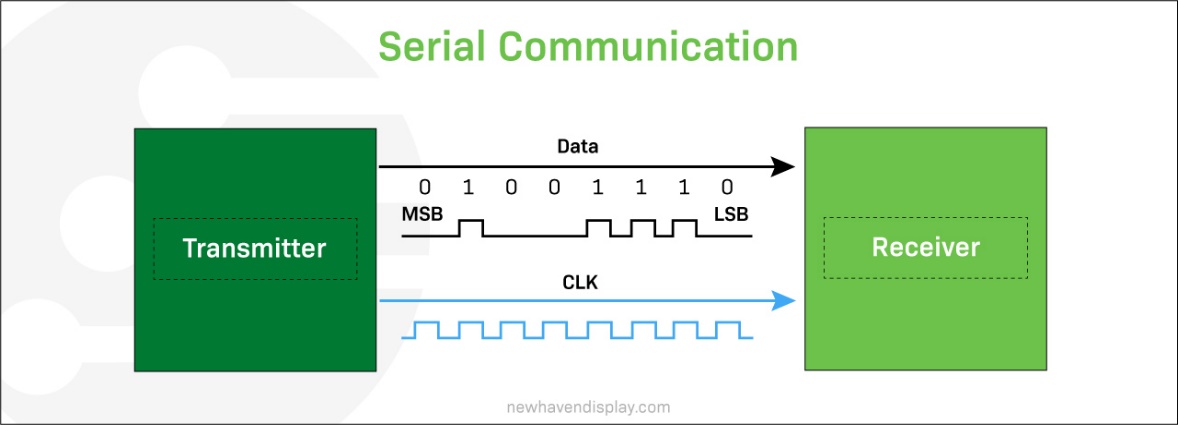
### Типови инвертерске комуникације

Инвертерска комуникација је начин комуникације између претварача и неког другог уређаја унутар систему, као што је систем за надгледање или контролу. Постоји их неколико сваки са својим предностима и недостацима у зависности од намене.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Тип комуникације | Пример | Предности | Мане |
| Серијска комуникација | РС-232,  РС-485 | Поузданост и једноставност имплементације | Може бити спор и ограничена брзина преноса |
| Пралалена комуникација | Центроникс (Centronics), СЦСИ (SCSI) | Велика брзина и проток | Захтева велики број каблова и пинова, тешка синхронизација |
| Етернет  (Ethernet)  комуникација | Етернет  (Ethernet),  ТЦП(TCP) | Велика брзина и проток, велика дужина кабла | Захтева додатну опрему, свич, ру-тер. Подлежан мре-жним проблемима |
| Блутут  (Bluetooth)  комуникација | Блутут(Bluetooth Classic), (Bluetooth Low Energy) | Мали утрошак енергија и једноставна имплементација | Ограничен домат, може вити подле-жан сметњама од других бежизних уређаја |
| Зигби  (Zigbee)  комуникација | Зигби(Zigbee),  Тред(Thread) | Мала потрошња енергије, сигурност, (mesh networking) | Ограничен проток, домет, и број уређаја који могу бити на једној мрежи |
| Вај-фај  (Wi-Fi)  комуникација | Вај-фај  (Wi-Fi), ТЦП/ИП (TCP/IP) | Велика брзина, велики проток, велики домет и лакоћа употребе | Захтева додатну опрему, подлежан интерфернецији |

#### Серијска комуникација

Серијска комуникација је витална форма инвертерске комуникације са широком употребом у индустрији. Ова техника могућава пренос података узастопно бит по бит у један комуникациони канал. Популарни пример серијске комуникације укључује РС-232 интерфејс, примарно коршћен за рачунар-уређај комуникациу, и РС-485 интерфејс ког одликује већа издржљивост, најчешче коришћен у индустријској контроли и аутоматизационим системима.

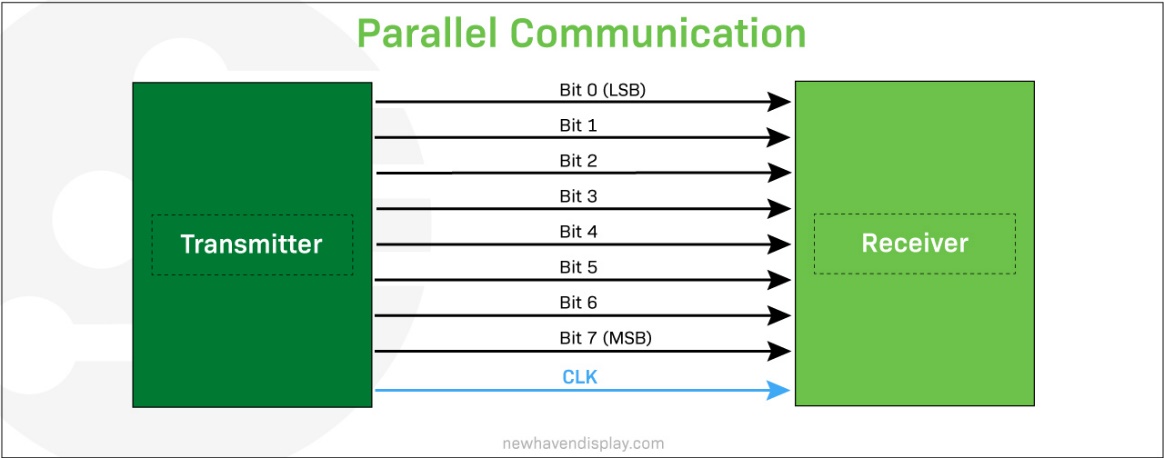


Док серијска комуникација нуди разне бенефите као што су поузданост лакоћа имплементације, важно је имати на уму да ова метода може имати спорији пренос података када се упореди са другим техникама/технологијама.

Такође могуће је да постоје ограничења у количини податак који могу бити посла-ти одједном.

#### Паралелна комуникација

Пралелна комуникација, у поређењу са серијском комуникацију омогућава истовремени пренос података кроз већи број канала истовремено.



Овај приступ се често користи за велику брзину преноса података као што су апликације за обраду слиак и видео снимака.

Иако омогућава велику брзину преноса у односу на серијску комуникацију паралелна комуникација захтева вечи број ресурса као и компликованију поставку и имплементацију.

Самим тим, неопходно је сагледати ове елементе приликом избора технологије за комуникациију, треба изабрати прикладну за ту ситуацију.

#### Етернет (Ethernet) комуникација

Етернет комуникација има широку примену због своје лаке имплементације и велике брзине трансфера и комуникације између повезаних уређаја.

Видео надзор и идустријске контролне мреже су неки од примена ове технологије баш због брзог трансфера и велике поузданости.

#### Блутут (Bluetooth) комуникација

Блутут је бежична технологија којом се успоставља веза између два уређаја. Данас велики број преносивих уређаја има у себи блуту. Присутан је и у инвертерима (претварачима) како би се убрзао пренос података.

Једноставност блутута је једна од највећих предности које носи са собом, не захтева пуно техничког предзнања. Недостатак је што није могућ пренос података на великим даљинама.

#### Зигби (Zigbee) комуникација

Зигби комуникација је тип меш мрежног протокола који омогућава ниско енергетску комуникацију измећу уређаја у малој мрежи.

Једна од честих примена је у паметним кучним уређајима за аутоматизацију и управљање који захтевау поуздану комуникацију.

Ниска потрошња енергије и исплативост су две највеће предности Зигби протокола, није прикладан за преносе који захтевају брз пренос података.

#### Вај-фај (Wi-Fi) комуникација

Вај-фај је бежична технологија преноса података и умрежавања на брз и ефикасан начин.

Један од најкоришћенијих протокола у модерно вре, рачунари, паметни телефони .итд због сигурности које пружа део је и соларних инвертера.

Поставка је лака и интуитивна без захтева за специјалним вештинама или алатима. За све предности које доноси, један од највећих недостатака вај-фај технологије је ограничен домет.



### Комуникациони протоколи

Поред предходно наведених типова инвертерске везе у употреби су и разни протоколи зе успостављање комуникације између уређаја. Следе примери протокола који су употреби у индустрији данас.

#### Модбас (Modbus) протокол

Модбас је критичан протокол у омогућавању инвертерске комуникације, омогућава да више различитих уређаја размењује податке међусобно.

То укључује али не ограничава се на, сензорима, актуаторима, контролерима (PLC) и другим уређајима који имају улогу у индустријксој аутоматизацији.

Одликује га једноставност, добра поузданост, ефикасна комуникација пто га чини популарним избором за имплементирање инвертерске комуникације.

#### Кен (CAN) протокол

Кен магистрални (Controller Area Network) протокол игра суштинску улогу у инвертерској комуникацији.

То је комуникацијони систем који може да повеже раличите уређаје и сензоре омогућавајућ неспетану размену података између њих. Инвертери се посебно ослањају на овај протокол за размену критичних информација са другим уређајима као што су системи за праћење батерија, соларни пуњачи и друге опреме.

Са Кен магитралом инвертери могу брзо и ефикасно да преносе виталне податке, што је од критичног значаја обезбеђивању префроманси и стабилности електричне мреже.

Омогућавајући беспрекорну комуникацију између више система, Кен систем побољшава укупну ефикасност комуникационог система инвертера побољшавајући поузданост мреже и толеранцију грешака.

#### ОПЦ (OPC) протокол

ОПЦ (Object Linking and Embedding for Process Control) протокол има јако широку примену у индустриским контролиним системима, што укључује комуникацију соларних претварача.

Омогућава размену података између различитих уређаја, укључујући уређаје од различитих произвођача који нису направљени да буду међусобно компатибилни по хардверу или софтверу. ОПЦ протокол ради као гејтвеј (gateway) или интерфјес (interface), чиме омогућава мапирање података између уређаја и ИВР протокола.

Конкретно ОПЦ омогућава соларним претварачима да размењују податке у реалном времену са системима за надзор и прикупљање података (СЦАДА). Омпогућавањем једноставне комуникације између претварача и СЦАДА, ОПЦ протокол помаже побољшању перформанса и ефикасности индустријких система.

#### ДНП3 (DNP3) проткол

ДНП3 протокол је кључан за остваривање паметне електричне мреже јер олакшава комуникацију између инвертерских система и других уређаја у мрежи. Како је све випе дистрибуиранх енергетских ресурса интегрисано, тако је све важније да ови системи могу лако делити податке ради одржања стабилности и откривање грешака на мрежи односно спречавања хаварије.

Са ДНП3 протоколом претварач и контролни систем могу да деле податке у реалном времену, укључујући податке о призводњи енергије и потрошњи. Ово је неопходно за осигурање одређеног нивоас поузданости мреже.

Штавише ДНП3 протокол омогућава напредне мпрежне услуке као што су регулација напона и одзив на потражњу обезбеђујући стабилност и ефикасност чак и променљивом окружењу.

### Интерфејси за комуникацију

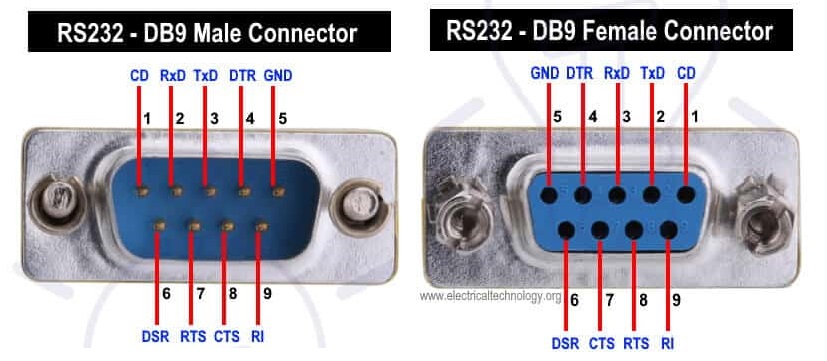
Постоји више интерфејса којис су у уотреби за остваривање инвертерске комуникације.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Интерфејс | РС-232 | РС-485 | Етернет  (Ethernet) |
| Тип кабла | Серијски | Серијски | Упредене  парице |
| Максимална дистанца | 15м | 1219м | 100м |
| Максимална брзина | 115.2 kbps | 10 Mbps | 1 Gbps |
| Топологија | Поинт-то-поинт  (Point-to-point) | Мулти-дроп  (Multi-drop) | Поинт-то-поинт  или мрежа |
| Колуникација | Халф дуплекс  (Half duplex) | Халф дуплекс  (Half duplex) | Фул дуплекс  (Full duplex) |
| Детектовање грешке | Нема | ЦРЦ  (CRC) | Чексум  (Checksum) |
| Примена | Мала брзина,  мале дистанце | Средња брзина,  средње дистанце | Велика брзина,  велике дистанце  мрежни систем |
| Предности | Једностваност,  јефтино | Велике дистанце | Велика брзина,  упрежавање |
| Мане | Мале дистанце,  спор пренос | Подлежан интерференцији | Захтева додатну опрему, већа цена |

Битно је имати науму да специфичне предности и мане, ограничења сваког од типова интерфејса зависи од његове конкретне имлентације, конфигурације и цлучаја примене.

#### РС-232 интерфејс

РС-232 је серијски комуникациони протокол који се користи за повезивање уређаја, модема, индустријских контролних система, рачунарских периферија итд.



Протокол користи ДБ9 конектор и дозвољава један канал података са асинхроним слањем. Слање података се врши релативно споро до 19.2 kbps. Иако већина нових уређаја користи УСБ (USB) и друге протоколе, РС-232 и даље има велику употребу.

Све у свему, РС-232 је имао јако важну улогу у развоју модерних комуникацинох протокола, поред чега се и данас користи.

#### РС-485 интерфејс

РС-485 је серијски комуникациони протокол за велике дистанце. Могуће је повезивање више уређаја на једну магистралу и послати податке на раздаљине до 1219 метара.

РС-485 користи две жице са различитим сигналима због смањења интерференције за раслику од РС-232 који то нема. Индустријски контролни системи, аутмобили итд. користе овај протокол.

РС-485 је јако моћан протокол баш зато што омогућава повезивање више уређаја на једној магистрали и поузани трансфер података на великим дистанцама. Као и РС-485 служиао је као основа за развијање многих модерних протокола, а и данас има примена.

#### Етернет (Ethernet) интерфејс

Широко употребљиван комуникациони протокол за преношење података између претварача и других мпрежних уређаја.

Велика поутданост и ефикасност, омогућава достављање статистике у реалном времену о производњи и потрошњи електрилне енергије контролном систему и смарт мерачима.

Коришћење Етернета као комуникационог интерфејса омогућава интертерима слање великих података на великим дистанцама са најмањим губицима, што је и кључно за ефикасну комуникацију у памтеном систему.

### Примене инвертерске комуникације

#### Обновљиви извори енергије

Мониторинг и котрола система обновљивих извора енергије су критични за обезбеђивање њихових оптималних перформанси и поузданости.



Инвертери играју кључну улогу у томе тако што претварају једносмерну струју (ДЦ) коју добијају из фотонапонских панела, ветрогенератора или других извора енергије у употребљиву наизменичну струју (АЦ).

Инвертерске комуникације су такође битне јер омогућавају праћење, контролу, дијагностику у реалном времено што може помоћи у идентификовању проблема и побољшању перформанси.

Инвертерске комуникације могу помоћи у оптимизацији енергетске ефикасности система обновљивих извора енергије, обезбеђивањем тачних и благовремених података, смањење отпада и повећањем укупних перформанси.

#### Индустријска аутатизација

Инвертерски комуникациони системи су критични у разним индустријским применама као штоо су контрола мотора, транспортни системи и роботика.

Они омогућавају праћење и контрол у реалном времену омогућавају брзо откривање и решавање проблема и кваров, смањујући време застоја и повећавају укупну ефикасност система.

Инвертерски комуникацино системи могу побољшати продуктивност и безбедност омогућавајући размену података у реалном времену и пружају бољи увид у перформансе система.

Ово може помоћи у идентификацији потенцијалних проблема пре него постану критични, обезбеђујући максимално време рада и ефикасност система.

#### ХВАК (HVAC) системи

ХВАК (HVAC) системи дају најбоље перформансе и чувају највише енергије када претварачии и друге компоненте комуницирају добро. Претварачи се користе у ХВАК системима за контролу електромотора, компресора, итд. што је кључно за ефикасну контролу температуре.

Инвертерске комуникације омогућавају праћење и контролу ХВАК система у реалном времену смањујући потрошњу енергије и трошкове. Конкретније оптимизација система се постиже усклађивањем рада компоненти условима у реалном времен

#### Медицинска опрема

Ефикасна комуникација између претварача и медицинских уређаја је од суштинсок значаја како би се обезбедила прецизна контрола и надгледање опреме што на крају повољшава негу пацијената.

Инвертери се користе у низу медицинске опреме као што су рендгенске машине. МРИ машине итд. и играју виталну улогу у обезбеђивању најбољег рада ових уређаја.

Инвертерске комуникације су кључне за постизање надзора и контроле медицинске опреме у реалном времену, омогућавајући здравственим радницима надгледање перформансама и откривање грешака.

Ово помаже да се максимално смањи време прекида рада и обезбеди непрекидна нега пацијента.

### Предности и мане инвертерске комуникације

Следећа табела представља поређење предности и мана инвертерске кому-никације.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Предности и мане инвертерске комуникације | Предности | Мане |
| 1.Повећана ефикасност | Праћење система и контрола у реалном времену доносе оптимизацију перформанси ситема и уштеде енергије. | Комплексност: Интеграција инвертерских комуникационих система може бити комплексно, захтева посебно знање. |
| 2.Даљинска контрола и надгледање система | Инвертерски комуникациони системи омогућавају даљински приступ, управљање и смањују захтеве за одржавање на локацији. | Компатибилност: Нису сви уређаји компатибилни са одређеним комуникационим протоколом или интерфејсом. |
| 3.Смањењење потребних каблова | Бежична комникација смањује потребе за физичким повезивањем и смањује цену инсталације. | Безбедносни ризик: Бежична комуникација је подлежна хаковању и уноси рањивости у систем |

# Сајбер безбедност контроле соларних инвертера

Пошто је број претварача који су на мрежи све већи а самин тим и ослањање електроиндустрије на обновљиве изворе енергије као што је соларна постаје неопходна имплементација контрола сајбер безбедности. Постоје два генерална типа контрола (заштита), а то је контрола безбедности на самом претварачу (контрола на нивоу уређаја) и контрола безбедности на мрежном нивоу:



## Заштита на нивоу инвертера

Заштита на самом уређају има за задатак одржање неколико важних аспеката сигурности и поузданости:

* + 1. Спречавање неовлашћеног приступа – аутентификација корисника, правила за лозинке и сигурно покретање.
    2. Одржање интегритета уређаја – енкрипција фирмвера, сигурно покретање и редовно ажурирање софтвера.
    3. Спречавање физичког напада – физичке заштите као што је кућиште отпорно на природне појаве влагу, сунце, сензори за детекцију неовлашћеног приступа.
    4. Осигурање поузданости рада – логовање активности уређаја, као и сигурносни протоколи за ажурирање софтвера.
    5. Заштита података – енкрипција комуникације и фирмвера.
    6. Превенција ширења напада – сигурно покретање, ИДС/ИПС (IDS/IPS) инте-грација и мрежне контроле.

Комбинацијом техника у циљу испуњавања претходних циљева постиже се већи ниво отпорности претварача (инвертера) на напад самим тим и целокупног соларног система. Приликом избора инвертера неопходна је анализа контрола безбедности који тај произвођач нуди.

### Сигурно покретање (Secure Boot)

Технологија која осигурава приликом покретања учитавање само одобреног, валидног и потписаног софтвера. Ово спречава покретање маициозног, неовлашћеног софтвера.

Приликом покретања софтвера, систем проверава дигиталне потписе софтвера након чега се он покреће, уколико софтвере не испуњава услове тј. нема дигитални потвип који се тражи учитавање се обуставља или се покреће безбедни основни софтвер.

Пример: СМА (SMA) солар, један од водећих произвођача соларних претварача имплементира ову технологију како би се само проверени и овлашћени софтвер користио у њиховим уређајима, популаран модел са овом технологијом је Сани Бој (Sunny Boy).



### Енкрипција фирмвера

Фирмвер је основни софтвер који контролише хардвер, енкрипцијом фирмвера се он закључава за прегледавање и измену од стране неовлашћених лица.

Фирмвер је енкриптован тако да је једини начин за његово прегледавање потрбан декрипциони кључ, чак и у случају да нападач добије физички приступ уређају без кључа је безбедност одржана.

Пример: Fronius International, познат по својим хибридним ивертерима Fronius Symo Hybrid, користи енкрипцију фирмвера како би заштитио софтвер својих уређаја.

### Аутентификација корисника

Аутентификација осигурава да само овлашћени корисници могу приступити и извршавати операције на уређају, било то удаљено или локално.

Корисници морају унети валидне податке корисничко име, лозинка, биометријски подаци или други облици аутентификације, такође могуће је додатно осигурати овај процес коришћењем на пример двоструке аутентификације.

Пример: SolarEdge инвертори, користе јаку аутентификацију за приступ уређају, омогућавају оператерима креирање јединсветног налога за заштиту поставки уређаја. Један од популарних серија са овом технологијом су SolarEdge HD-Wave Inverters.

### Заштита од физичког напада

Заштита од физичког напада захтева физичке и електронске мере које спречавају неовлашћени приступ компонентама система.

Претварачи морају имати заштите кућишта, сензоре, браве који детектују отварање и аларме који покушају неовлашћеног приступа. Ту је могћа и употреба тембер-евидент технологија која детектује библо какво физичко нарушавање интегритета система.

Пример: Huawei у својој SUN2000 серији инвертера имплементира физичку заштиту, кућишта са сензорима који детектују покушаје отварања или манипулације.

### Правила за лозинке

Лозинке су најосновнија али и најважнија мера одбране. Правилна процедура управљања лозинкама може знатно смањити ризик од неовшћеног приступа.

Инвертери могу захтевати комплексне лозинке које су дуге и садрже комбинацију слоба бројева и специјалних знакова. Такође урећаји могу бити конфигурисани да редовно захтевају мењање лозинке и се заључавају у потпуности након неколико погрешних лозинки.

Пример: АББ инвертери, као што је UNO-DM-PLUS серија омогућавају имплементацију сложених правила за лозинке, све преткодно наведено.

### Даљинско ажурирање фирмвера (Firmware over-the-air)

Ова технологија омогућава ажурирање фирмвера без потребе за физичким приступом уређају.

Ажурирања се шаљу енкриптована преко мреже и примењују на уређају, процес ажурирања је вишеструко осигуран како би се спречило покретање невалидног кода.

Пример: Enphase у својој IQ Series микоинвертерима користи ФОТА (Firmware over-the-air) технологију сигурног, даљинског ажурирања фирмвера, што олакшава одржавање и побољшава сигнурност.

### Мониторинг и логовање

Праћење активности уређаја и логовање помаже детекцији и анализи потенцијалних сигурностних инцидената.

Уређаји могу имати уграђене функције за логовање, бележење активности и критичних активности као што су покушаји логовања, неовлашћеног приступа у реалном времену.

Пример: Schneider Electric у својој серији Conext инвертера нуди напредне опције мониторинга и логовања догађаја, што омогућава праћење у реалном времену.

## Заштита на мрежном нивоу

Заштита на мрежном нивоу је скуп мера, технологија за осигуравање комуникације, одржање интегритета података између инвертера и других мрежних система.Ово укључује заштитуподатака док су упреносу, контролу приступа мрежи, детекцију напда, обезбеђивање континуалног надзора над мрежним активностима.

### Енкрипција комуникације (TLS/SSL)

ТЛС (TLS - Transport Layer Security) и ССЛ (SSL - Secure Sockets Layer) су протоколи енкрипције између инвертера и других мрежних уређаја, као што су контролни центри или сервери мониторинга.

Кад претварач комуницира са удаљеним сервером, подаци који се преносе су енкриптовани помоћу ТЛС/ССЛ протока чиме се осигурава интегритет података, спречава прислушкивање и манипулација над подацима у транспорту.

Примвер: SolarEdge инвертери користе ТЛС/ССЛ протоколе за енкрипцију података између претварача и назорних система.

### ВПН (VPN) тунел

ВПН (Virtual Private Network) тунели се користе за безбедан даљински приступ инвертерима преко интернета.



Кроз ВПН тунел комуникација између користника и инвертера иде прего сигурне, енкриптоване везе чиме се штити од пресретања и неовлашћеног приступа.

Пример:СМА инвертери, као што је Сани Бој серија омогућава безбедан даљински приступ путем ВПН тунела.

### Фајервал (Firewall)

Мпрежна заштита која контролише улазни и излазни саобраћај измећ инвертера и мпреже, омогућавајући (филтрирањем) само дозвољени саобраћај.

Фајервал може бити имплементиран као део инвертера или на мрежном нивоу како би се филтрирао саобраћај ка инветеру, како би се спречили напади као што су ДДоС (DDoS (Distributed Denial of Service)) или неовлашћени приступ. Конфигурациом фајервала може се блокирати непознати ИП или приступ преко одређеног порта.

Пример: Фрониус Симо серија долази са уграђеним фајервалом који филтрира улазни и излазни саобраћај.

### ИДС (Intrusion Detection Systems) / ИПС (Intrusion Prevention Systems)

ИДС/ИПС су системи мрежне заштите који детектују покушаје напада на мрежу у којој се налази инвертер.

ИДС прати мрежни саобраћај и детектује сумњиве активности попут неовлашћеног приступа или злонамерног кода. ИПС мож аутоматски предусзеи мере кео што је блокирање саобраћаја са сумњиве адресе или спречавање специфичних напада.

Пример: Хаувеи СУН2000 инвертери подржавају инвеграцију са ИДС/ИПС системима.

### Сегментација мреже

Сегментација мреже подразумева одвајање мреже на мање, сегменте, како би се ограничио приступ.

Инвертери могу бити постављени на засебне мрежне сегменте одвојени од других критичних система, што помаже у случају ширења напада између сегмената, напад остаје изолован.

Пример: АББ Уно-Дм-Плус инвертери могу бити у сегментисаним мрежама, што омогућава изолацију уређаја од остатка система.

### Редовно ажурирање софтвера и фирмвера

Редовно ажурирање софтвера и фирмвера је кључно за смањење рањивости уређаја и одржавање његове сигурности на дуже време.

Произвођач редовно шаље ажурирања која у себи имају сигурносне закрпе, она се могу радити аутоматски преко мреже или ручно на физичкој локацији.

Пример:Енфејз, IQ серија миктоинвертера подржава редовно ажурирање на

даљину (over-the-air), омогућавајући корисницима да инсталирају најновије сигурностне закрпе.

### Мониторинг и логовање мрежног саобраћаја

Праћење и логовање мрежног саобраћаја помаже у детекцији абнормалних активности и потенцијалних напада.

Инвертери могу бележити саобраћај усмерен њима или слати обавештења о потенцијалним нападима, приступима са недозвољених адреса на централизован систем у реалном времену.

Пример: Шнајдер Електриј Контекст серија нуди напреднде опције за мониторинг и логовање мрежног саобраћаја.

### Сигурно управљање приступом (ИАМ - Identity and Access Management)

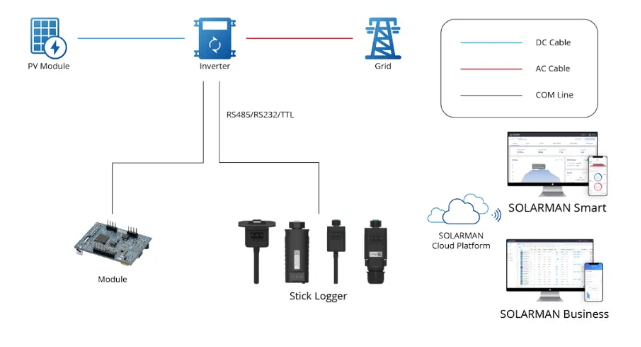
Управљање приступом кориснка и уређаја мрежним ресурсима осигурава да само овлашћени ентитети могу имати одговарајући ниво приступа.

Уређаји користе ИАМ системе за контролу ко може приступити мрежи на којем новоу, ово укључује улоге, дозволе за различите кориснике и аутентификацију и ауторизацију.

Пример: Сунгров (Sungrow) СГ серија инвертера користи ситеме за управљање приступом и идентитетима.

# Рањивости соларних система

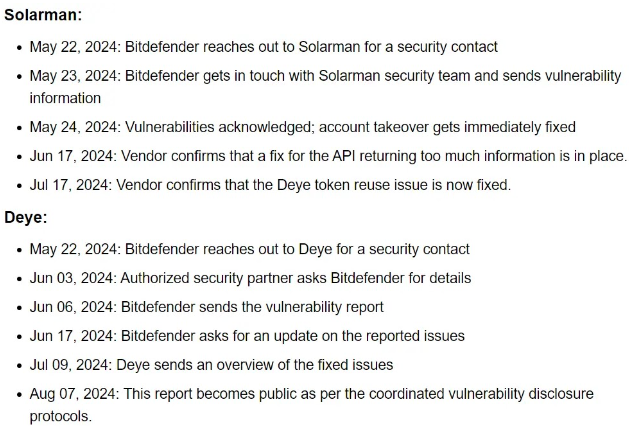
Серија рањивости соларних система утиче на милионе соларних система широм света, велике глобалне електричне мреже прожете брзо растућом соларном инфраструктуром и све заступљенијим Интернетом Ствари (Internet of Things) , чини комплексан спој енерги-је и података.



Произведена електрична енергија из инвертера ових произвођача (Солармен и Деј (Solarman and Deye)) чини око 195 гигавати (gw) на глобалном нивоу што је око 20% укупне соларне енергије света, са серијом рањивости чини отворено малициозним нападима.

Електрична мрежа је сложен систем који чини производња енергије, пренос на даљину и локална дистрибуција. Традиционалне електране испоручују константу количину електричне енергије, након повећаног укључења соларне енергије то више није случај. Децентрализована природа соларних система ојачава стабилност система али истовремено уноси и нове проблеме и потешкоће у управљању мрежом, што повећава зависност соларне енергије од паметних, мрежних технологија, па самим тим и повећава захтеве сајбер сигурности.

Као најрањивија тачка а и најбитнија у овим системима су соларни инвертери, према најновијим анализама из БитДефендер-а (BitDefender) запажено је да низ рањивости у инвертерима произвођача Солармен и Деј (Solarman and Deye) може да утиче на милионе уређаја. Ово укључује компромитовање целих налога, дупликација токена на низу платформи, непотребно дељења података и интегрисане шифре у фирмвер инвертера.

У комбинацији са временом потребним са отклањање ових грешака, рањивости ово угрожава енергетске системе нападима, дестабилизацији електричне мреже и недозвољеном прикупљању података.

Слика приказује време потребно произвођачима Солармен и Деј да исправе проблеме на које им је указано из БитДефендера.

Истраживање је генерално обављено на Солармен опреми (даталогерима) који су популаран избор за употребу са Деј(Deye) инвертерима, такође је познато да је Деј користио основни систем Солармен инвертера и пратећих уређаја све до почетка 2024 године када је урађена имлементација за њихове инвертере и датацентре. Солармен као један од највећих произвођача не само да производи опрему под својим именом, већ и опрему коју лиценцирају другим произвођачима који се тренутно налазе међу најпопуларнијим, што значи да и сами имају исте рањивости, ту спадају: Деј(Deye), Афор(Afore), Канадиан Солар(Canadian Solar), Софар(Sofar), Интелбрас(Intelbras), Хавелс(Havells),Анфоуте(Anfuote), Бејндсун(Beyondsun), Фксповер(Fxpower) итд.

Солармен АПИ за дата логере представља приступну тачку за многим рањивостима које могу бити искорошћене за узнемиравање или комплетно обустављање рада фотонапонске опреме.

Дата логер (data logger) – уређај (може бити засебан или уграђен у претварач) који бележи и преноси податке о перформансама фотонапоснког система, омогућава праћење у реалном времену, логовање (бележење историје), даљинско управљање, омогућавајући да систем функционисе ефикасно и без проблема. Прикупљање метрике као што су излазна снага, напон, струка, даталогер помаже у оптимизацији производње и коришћење енергије, олакшавајући одржавање путем нотификација и упозорења, интеграцију са рачунарством у облаку за даљинско управљање .



Солармен платформа подржава креирање два типа налога, један је обичан кориснички налог који кориснику даје увид у доступне информације у реалном времену, а други је бизнис, сервисерски који има ауторизације за подешавање уређаја приликом инсталације, као што су напон, фреквенција итд.



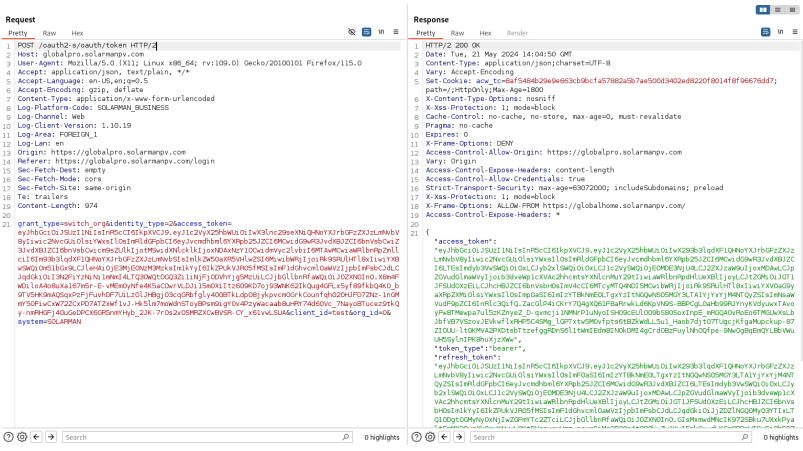
## Рањивости Солармен (Solarman) соларне опреме

Пронађен је низ критичних безбедносних рањивости у Солармен платфори. Рањивости које обухватајо потпуно преузимање налога, преузимање Деј клауд токена и прикупљање података организације или корисника, што представља велики ризик за сигурност платформе и приватност корисника.

### Преуизимање контроле налога манипулациојом ауторизационих токена

**Опис:** АПИ ендпоинт /oauth2-s/oauth/token се користи за прибављање ауторизаци-оног токена приликом промене орагнизације за управљање, сервер не успева да вери-фикује ЈВТ(JWT) потпис, допуштајући нападачима да добију валидациони токен за било који налог модификовањем ЈВТ(JWT) дела.

**Утицај:** Нападач може модификовати ЈВТ(JWT) тако да садржи кориснички Ид (userId) произвољног корисника, што за резулат има недозвољени приступ и комплетну контролу над налогом.



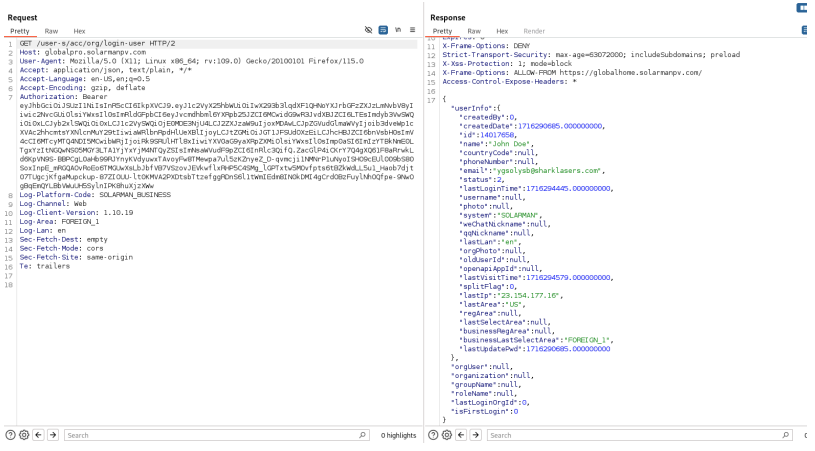
Слика приказује прибављање ЈВТ(JWT) токена.

**Техничка спецификација**:

**Ендпоинт(Endpoint):** /oauth2-s/oauth/token

**Рањивост:** Недостатак верификације ЈВТ(JWT) потписа.

**Експлоит:** Модификација ЈВТ(JWT) токена да садржи кориснички Ид (userId) и имејл.

Након прибављања ЈВТ(JWT) токена циљаног налога, добија се потпуна контрола над њим. Следећа слика приказује захтев и повратне информације о дему корисничком налогу.

### Поновна употреба Деј Клауд токена

**Опис:** ЈВТ(JWT) токен издат од стране Деј Клауд платформе има валидност у примени и на Солармен платформи, дозвољавајући потпун приступ налогу са специфичнм корисничким Ид-јем, иако овај Ид не одговара истом корстику на Солармен платформи, на пример корисник са Ид-јем 100 може бити на Деј платформи корисник А док на Солармен платформи може бити корисник Б.

**Утицај:** Рањивост дозвољава нападачима да прибаве ЈВТ(JWT) токен са Деј Клауда и добију ауторизацију за приступ Солармен налозима.

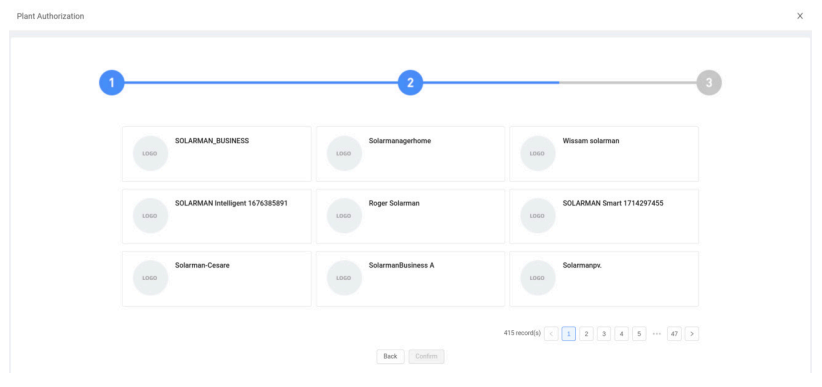
**Техничка спецификација**:

**Рањивост:** Међу платформни ЈВТ(JWT) токени.

**Експлоит:** Коришћење Деј Клауд ЈВТ(JWT) токена за приступ Солармен налозима.

### Прикупљање података кроз /group-s/acc/orgs АПИ ендпоинт

**Опис:** АПИ ендпоинт /group-s/acc/orgs враћа непотребне податкке о кориснику, организацију за приликом претраживања. Одговор укључује осетљиве податке као што је имејл, имена, бројеви телефона, државе и корисничке Ид-је.

Пример листе организација којој нападач може да добије приступ

**Утицај:** Нападач добија приватне информације свих регистрованих организација прављењем више АПИ позива.

**Техничка спецификација**:

**Ендпоинт:** /group-s/acc/orgs

**Рањивост:** Непотребно дељење приватних информација.

**Експлоит:** Добијање приватних информација АПИ позивима.



Пример одговора са осетљивим информацијама.

### Анализа утицаја рањивости

Установљења рањивост представља велике ризике који укључује:

* Недозвољен приступ корисничким налозима и осетљивим подацима.
* Малициозна употреба приватних информација.
* Нарушавање интегритета појединачних корисника и организација.

### Процедура обавештења и поправљања рањивости

## Рањивости Деј (Deye) соларне опреме

Деј(Deye) платформа нуди решење за управљање системима и уређајима у електричној мрежи, приликом провере сигурности пронађене су рањивости у систему које могу угрозити систем и или податке уређаја и корисника.

Уочено је неколико критичних рањивости у Деј(Deye) систему. Ове рањивости укључују хардкодиране налоге са неограниченим приступом уређају, непотребно дељење података кроз АПИ ендпоинте и генерисање недозвољених ауторизационих токена.

### Хардкодирани профили

**Опис:** Деј(Deye) апликација користи хардкодиране профиле, на пример SmartConfigurator@solarmanpv.com са шифром 123456 за приступљање АПИ-ју у клауду и добијање ауторизационог токена са api4pro.solarmanpv.com АПИ сервера.

**Утицај:** Нападач може да искористи добијени токен за прибављње информација о било ком уређају, укључујући софтверске или хардверсе верзије, имена, ВајФај ССИД, шифре, безобзира на бласништво уређаја.

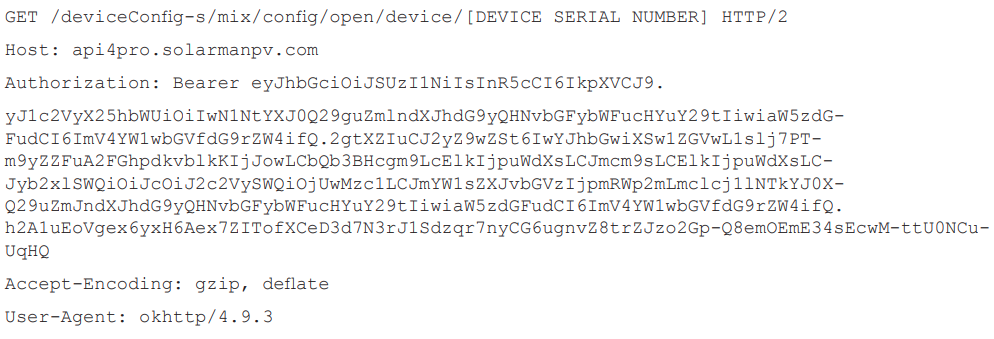
**Техничка спецификација**:

**Налог** SmartConfigurator@solarmanpv.com

**Шифра:** 123456

**Рањивост:** Хардкодирани подаци са неограниченим приступом.

**Експлоит:** Употреба хардкодираног профила за приступ било ком уређају.

Пример захтева за универзални токен:

Пример одговора:

### Прибављање података кроз /user-s/acc/orgs АПИ ендпоинт

**Опис:** АПИ ендпоинт /user-s/acc/orgs на eu1.deyecloud.com враћа сувишне информације о кориснику током провере ауторизације. Одговор укључује битне информације као што су име, имејл, број телефона, државу, и корисничке Ид-јеве.

**Контекст:** Корисник може дозволити другим корисницима пристум његовом систему, Тако што се користи претраживање корисника, по именну, а претрага враћа број телефона или имејл адресу. Док АПИ позив враћа чак и приватне податке о корисницима.



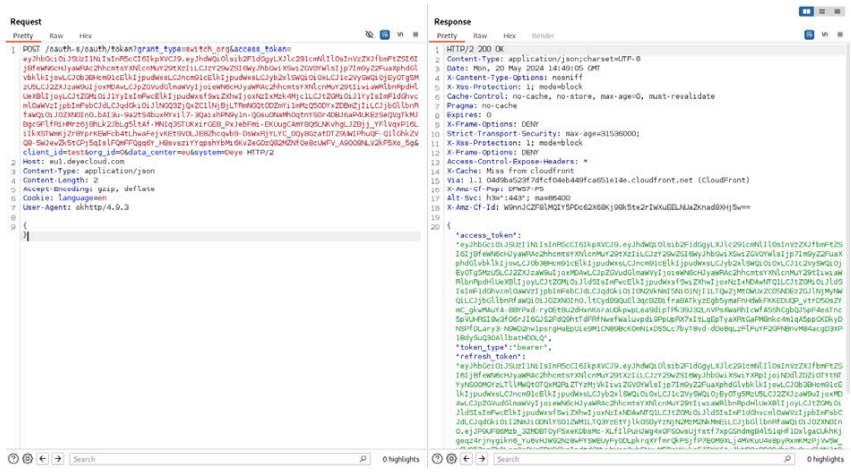
Пример одговора кроз АПИ позив

**Последице:** Нападач овим путем долази до приватних информација.

### Генерисање недозвољених токена ауторизације

**Опис:** АПИ ендпоинт /oauth-s/oauth/token употребљава се за добијање ауторизацион токена у тренутку промене организација којим се управља. Сервер не успева да ферификује ЈВТ(JWT) токен, дозвољавајући нападачима да генеришу валидациони токен.

**Последице:** Иако сервер враћа токен он поставља параметар верзије на нал(null) уместо на 1000, због тога сервер одбија овај токен као невалидан. Уколико је 1000 могуће је генерисање токена за било ког корисника на платформи

****

**Техничка спецификација:**

**Ендпоинт:** /oauth-s/oauth/token

**Рањивост:** Непостојаност ЈВТ(JWT) верификације потписа.

**Експоит:** Модификација ЈВТ(JWT) токена да садржи кориснички Ид и имејл и постављање верзије.

### Анализа утицаја рањивости

Идентификоване рањивости представљају велике ризике, који укључују:

* Недозвољен приступ урећајима и подацима
* Могућа злоупотреба података
* Компромитовање поверења корисника и интегритета платформе.

### Процедура обавештења и поправљања рањивости

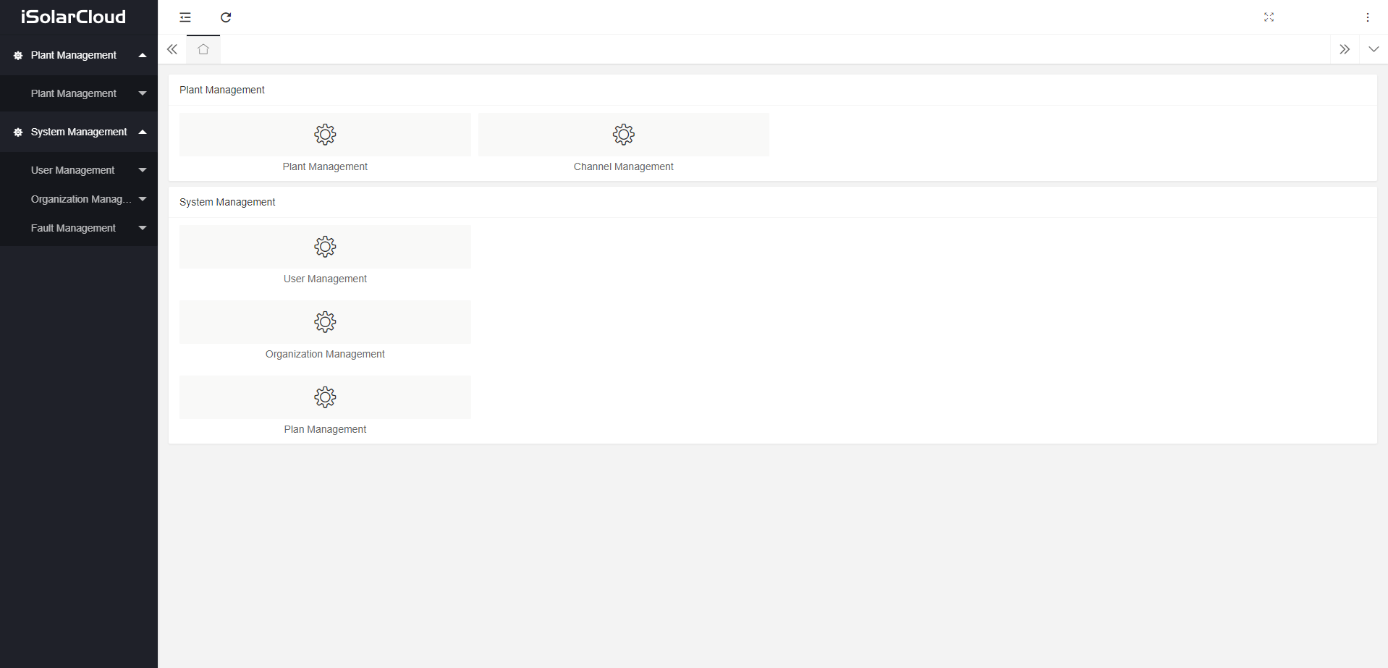
## Рањивости Сангроу (Sungrow) соларне опреме

Истраживањем анонимног избора пронађене су рањивости и у Сунгроу систему, конкретно ајСоларКлауд (iSolarcloud (iSC)) систему за мониторинг и контролу свих фотонапонских претварача (инвертера) и решења за складиштење електричне енергије произвођача Сангроу (Sungrow). иСЦ омогућава контролу: конфигурацију уређаја на даљину, управљање конекцијама електране, ЛАН конфигурацију, аларме кроз нотификације, управљање гешкама, мониторинг. Логовање у систем корисник врши кроз веб интерфејс или мобилну апликацију.

Овај систем нуди више типова корисничких профила који су уређени у хијерархију од три нивоа:

* Супер администратор (SuperAdministrator)
* Администратор (Administrator)
* Корисник (User)

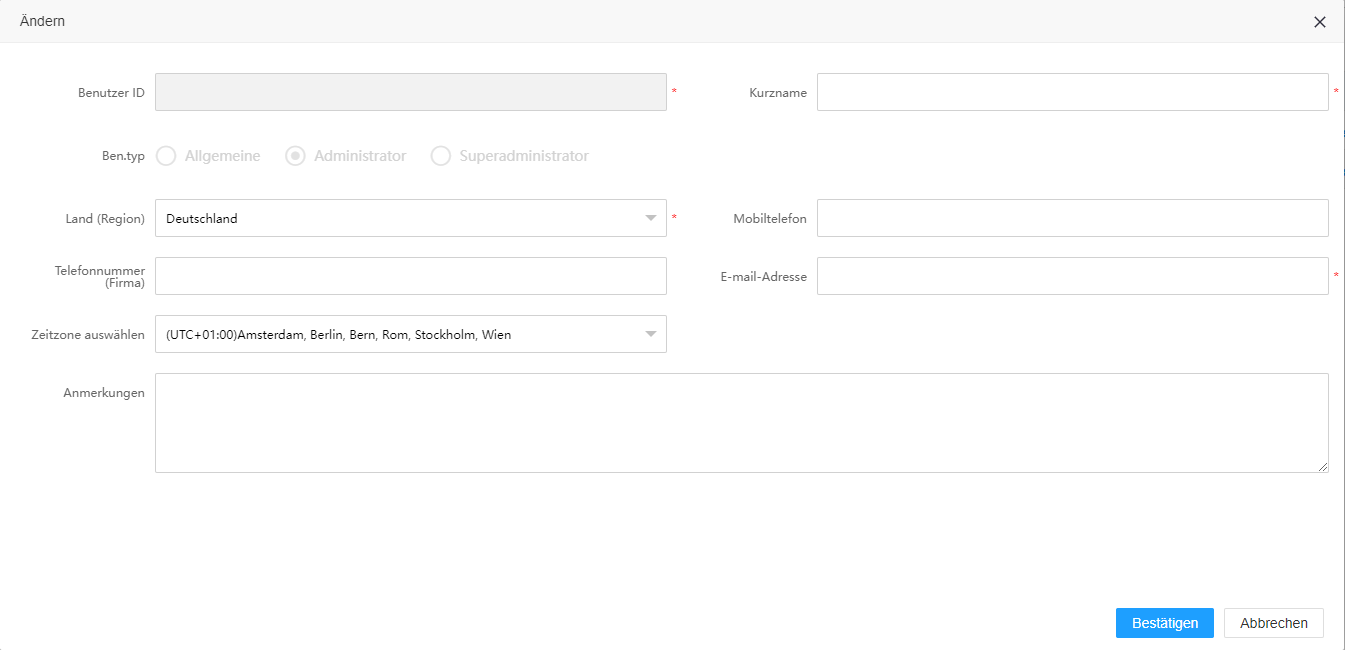
Администратор има могућност управљања позадином (backend) системима на највисем нивоу и управљање информацијама на том нивоу, управљање чворовима што укључује креирање нових региона и креирање чворова у тим регионима, креирање нових корисничких налога у управљање електранама.



Тип профила који има крајњи корисник се налази на најнижој позицији у хијерархији система, он нема увид у функционисање и управљање позадином система, већ може да користи крајње сервисе платформе. Такође функционалност сваког корисничког профила је ограничена додатно регионом у којем се налази Кина, Европа, Аустралија итд.

### Рањивост

Систем за управљање омогућава додавање нових и уређивање постојећих кориснилких налога. У оквиру дијалога за подешавање профила могуће је променити детаље профила, имејл, временску зону, улоге. Баш у том дијалогу откривена је искључена радио контрола за уређивање нивоа корисника.



Кроз ХТМЛ код веб сајта могуће је омогћити ту контролу и на овај начин нападач може да измени ниво било ког профила све до супер администратора. Клауд сервер не врши никакву проверу да ли је то дозвољено или не. У случају да нападач постави ниво свог профила на супер администратора он добија комплетно управљање свим системиа. Што представља велики ризик, собзиром да има контролу над свиме.

Привилегије супер администратора дозвољавају приступ свим ресурсима унутар региона налога, што укључује:

* Читање, брисање или модификацију било ког корисничког профила унутар иСЦ система



* Читање, брисање или модификација било које електране унутар иСЦ система



Овај тип привилегија ради у свим регионима иСЦ-еа. Нападач чак не мора да посадује Сангроу хардвер или да се налази у истом региону као циљ напада, пошто нови корисници могу бити креирани произвољно.

# Закључак

# Литература

<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2024/NIST.IR.8498.ipd.pdf>

<https://solartechadvisor.com/inverter-communications/>

<https://www.hisenpower.com/Blogs/top-15-best-inverter-companies-in-china>

<https://eepower.com/tech-insights/defending-the-smart-grid-against-inverter-attacks/>

<https://solar2power.pt/powering-up-risk-inverters-vulnerable-to-cybersecurity-threats-through-software/>

https://www.bitdefender.com/blog/labs/60-hurts-per-second-how-we-got-access-to-enough-solar-power-to-run-the-united-states/