

Информационна Система за Управление и Мониторинг на Енергия от Възобновяеми Източници.

Фокусирано Върху Фотоволтаици

Нерджан Имам¹, Месру Фикрет², Деян Събев³

*Електротехника, Електроника и Автоматика, Русенски университет “Ангел Кънчев”
Русе, България*

¹s223074@stud.uni-ruse.bg

²s223075@stud.uni-ruse.bg

³s223072@stud.uni-ruse.bg

Abstract – This paper aims to show the importance of a photovoltaic information system and the management of photovoltaic devices. The paper covers trends in the development of the Bulgarian photovoltaic market over the past few years and prospects for future growth.

Keywords – Information system, Photovoltaics, potential development, renewable energy sources, PV in Bulgaria

I. ВЪВЕДЕНИЕ

В момента в България основният енергиен източник за производство на електроенергия е чрез изгаряне на невъзобновяеми изкопаеми горива. [1] За да се противодейства на вредните ефекти от настоящите начини за производство на електрическа енергия, правителството на България се фокусира върху внедряването на решения за възобновяема енергия.

PV системите имат ключова роля като чист и гъвкав източник на енергия. Те привличат инвеститори със своята опростена инсталация, ниски експлоатационни разходи и нулеви емисии по време на работа.

През последните няколко години в България се наблюдава нарастващо търсене на използване на възобновяеми енергийни източници, особено слънчева енергия. [2] В резултат на това все повече жилища и офис сгради се строят с опция за използване на фотоволтаични системи. Това изисква намиране на начин за наблюдение и анализ на фотоволтаичните системи, един от които е

проектиране, разработване и внедряване на информационна система.

II. РАЗВИТИЕ НА ПАЗАРА

A. СВЕТОВЕН МАЩАБ

Периодът 2020-2025 г. бележи историческа промяна в енергетиката, като слънчевата енергия се превръща в най-бързо развиващия се източник на електричество в човешката история.

В края на 2020 г. глобалният инсталиран капацитет бе около 710 GW. До края на 2024 г. той надхвърля 2.2 TW. Това е утрояване на мощностите за по-малко от 5 години. [3]

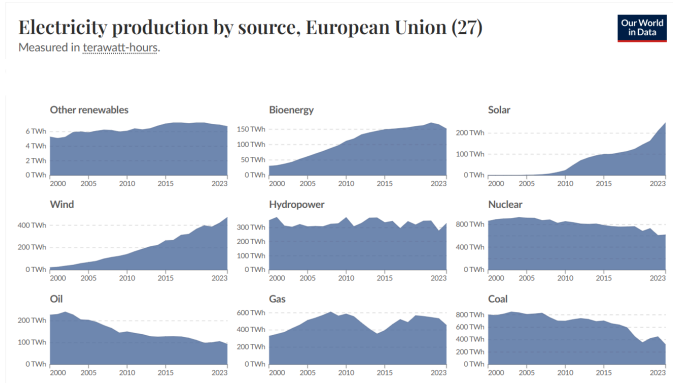
До края на 2030 се очаква глобалният капацитет да се удвои отново и да достигне над 5 TW.

Сред причините за този повишен интерес е ниската цена (Соларната енергия е най-евтиният източник на електричество) и климатичните цели заложи в Парижкото споразумение (Net Zero 2050).

Ролята на мониторинга и управлението на подобни системи е голям фактор в ефективното използване на този тип източник. Нашата цел е осигуряване точно тази нужна висока ефективност.

В. ЕВРОПЕЙСКИ СЪЮЗ (ЕС)

В ЕС растежът на фотоволтаици (ФЕЦ) през периода 2020-2025, не е просто пазарен процес, а стратегия за оцеляване и независимост. Планът REPowerEU има за цел да сложи край на зависимостта на ЕС от руските изкопаеми горива и да стимулира възобновяемите енергийни източници. [4] Бъдещето на ЕС се крие във възобновяеми източници.



Фиг. 1 Производство на електроенергия разделено на източници в ЕС в периода 2000-2023г. [5]

Тук системите за управление са жизнено важни, защото те не само следят работата на панела, но и автоматично трябва да пренасочват енергията към батерии. Без интелигентни софтуери, централите в Европа губят пари в часовете на пиково производство. [6]

С. БЪЛГАРИЯ

В България кривата на растежа е много по-рязка. След известен застой, страната преживява истински инвестиционен бум след 2021 г.

Очакванията са били България да достигне до 4,6 TWh през 2030 г. [7]. Обаче реалността надминава тези очаквания, като показателите за производство са отчели 5,34 TWh за 2024 г. [8]. Това е в пъти повече от предвиденото и се дължи на бизнеса, който ускорява тези процеси за собствени нужди.



Фиг. 2 Разлика между производството от слънчева енергия в България в периода 2020-2024 г. [8]

В България системите за управление и мониторинг са от много високо значение. Всяка централа трябва да предава данни директно към ЕСО (Енергиен Системен Оператор) или рискува огромни неустойки на ЕСО за всеки мегаватчас разлика между прогноза и реално производство. Също така от 2023/2024 ЕСО налага изискването за телемеханика - операторът трябва да може да вижда и спира централата дистанционно. Това налага внедряването на сложни SCADA системи дори в средно големи паркове. [9][10]

III. ФОТОВОЛТАИЧНИ СИСТЕМИ

Фотоволтаичните системи преобразуват слънчевата светлина директно в електрическа енергия. Основната съставна единица е PV клетката - съвкупност от полупроводникови елементи, които при поглъщане на фотони освобождават електрони и създава електрически потенциал между предната и задната си повърхност. Свързването на клетките в електрическа верига позволява генерирането на ток. PV системите обикновено генерират постоянен ток (DC); за преобразуване в променлив ток (AC) се използват инвертори. За пълно функциониране на системата са необходими и допълнителни компоненти - заряден контролер, акумулаторни батерии (при автономни системи), кабели за окабеляване и други. [11]

Фотоволтаичната информационна система (англ. Photovoltaic Information System) е система, чиято цел е събиране, трансфер, съхранение, обработка и визуализация на данни, свързани с работата и експлоатация на фотоволтаици (PV). Такава система обхваща "string" от панели, инвертори, измервателни уреди и метеорологични сензори; интерфейси за предаване и получаване на данни; средства за

анализ на ефективността и отчети; контролни/алармени модули за поддръжка и оптимизация. [12] Съвременните PV инсталации са оборудвани с информационни системи за мониторинг и управление. Използването на интегрирани информационни системи носи множество ползи за PV като: по-висока ефективност на производство; непрекъснат мониторинг и бърза реакция при неизправности водят до по-голям добив на енергия и намаляване на загубите. Анализът на данните позволява оптимално опериране на системата при променливи условия. Дистанционният контрол и поддръжката и намаляват нуждата от скъпи аварийни ремонти. Системите осигуряват постоянна диагностика и предупреждение при отклонения от правилната работа на PV. По-точните прогнози на производство позволяват по-добро планиране на зареждането на батерии и използването на допълнителни енергийни източници. [13]

IV. УПРАВЛЕНИЕ

Разработването и управлението на Информационна Система за Управление и Мониторинг (ИСУМ) за фотоволтаични централи е ключов компонент за гарантиране на възвръщаемостта на инвестицията. При днешните мащаби на соларния сектор, единствено наблюдение не е достатъчно, а е необходимо активно управление на данните. [14]

A. АРХИТЕКТУРА НА СИСТЕМАТА

За да бъде управлението ефективно, системата трябва да следва многослойна структура (IoT модел): [15]

1) *Физическо оборудване:*

- Фотоволтаични панели
- Инвертори (Основен източник на данни).
- Метеорологични станции (Сензори за слънчева радиация/пиранометри, температура на панела, вятър).
- Смарт метри (Електромери) на точката на присъединяване.

2) *Събиране на данни (Data Acquisition):*

Събирането на данни се осъществява от така наречения концентратор, който събира всички данни от устройствата и ги изпраща към сървър, където последващо се обработват.

3) *Обработка и Съхранение (Cloud/Server):*

В основата на системата стои сървър. Той е отговорен за приемането на данните, тяхната валидация и съхранението им в базата данни.

Тъй като в базата данни ще се добавят многократно записи за малък период от време е препоръчително да се използват бази данни от типа *“time-series”*. Тези бази данни са оптимизирани за записване двойка стойност и време и за обработване на милиони записи едновременно. [16]

4) *Приложно ниво (Dashboard & Management):*

На това ниво стои интерфейса между потребителите и информацията система. Интерфейсът може да бъде реализиран, като уеб сайт, мобилно приложение или настолно приложение за РС.

Важно е да се отбележи, че интерфейсът трябва да бъде интерактивен, надежден и практичен. Също е важна и неговата визия. Добрия дизайн винаги увеличава ефективността на информационната система и работата с нея.

B. КЛЮЧОВИ ФУНКЦИОНАЛНИ МОДУЛИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ

Една модерна ИСУМ трябва да разполага със следните модули, за да управлява ефективно централата:

1) *Мониторинг в реално време (Real-time Monitoring):*

Модулът за мониторинг в реално време е един от основните части на системата, който трябва да съдържа следните елементи:[17]

- Визуализация:

Модулът за мониторинг трябва да представя графично промените в основните стойности от инверторите и сензорите спрямо времето, като бъде дадена възможност на потребителя да определя периода и различните допълнителни стойности, които той иска да бъдат визуализирани.

Визуалните елементи като диаграми и графи трябва да са добре построени, за да не създават двусмислие и заплитане при тяхното анализиране.

Друга основна част от визуализацията е навигацията. Интерфейсът трябва да следва принципите на Cognitive Load Theory. По този начин се предоставя лесен достъп и бърза навигация до основните операции свързани с информационната система.

Добре изградения HMI (Human-Machine Interface) трябва да извежда на преден план основните операции, като останалите са подредени по йерархичен модел. По този начин се избягва натрупването на излишни елементи, което позволява на оператора да реагира бързо, като това подобрява производителност на системата.

- Следене на статуса:

Системата трябва да следи и докладва състоянието на всеки инвертор, за да се поддържа правилното функциониране на системата.

Реализирането на отделна секция за визуализиране на инверторите, като отделни графични елементи с техния статус, ще подобри практичността и надеждността на системата.

- PR (Performance Ratio):

Автоматично изчисляване на коефициента на производителност PR. Това е най-важният показател, който отразява ефективността на фотоволтаичните системи.

Изчисляването на PR се извършва в строго съответствие със стандарта IEC 61724-1, като се вземат предвид температурните корекции на фотоволтаичните панели. [18]

2) Управление на поддръжката и аларми:

- FDD (Fault Detection and Diagnosis):

Системата трябва да уведомява определените хора при неизправности свързани със стойности извън границите, неочаквано състояние на устройствата и инверторите и др.

Системата също трябва да бъде и интелигентна при изпращане на

предупреждения, като анализира състоянието на отделните компоненти и филтрира промените.

Например аларма за “Нисък ток на стринга” (Low String Current) може да е настъпила от изгорял предпазител или неизправност на панелите. В този случай модулът за управление на поддръжката и алармите трябва да анализира ситуацията и да изпрати правилното предупреждение.

За постигането на тази цел системата трябва да използва метода на *Machine Learning* (*Машинно самообучение*), който позволява изпълнението на процеса *Root Cause Analysis* (анализ на първопричината). [19]

По този начин се увеличава надеждността и поддръжката на системата.

- Автоматично създаване на задача за техниците при критична грешка:

Освен изпращането на предупредителни съобщения и аларми е също добра идея едновременно с това да се създават и точно определени задачи (протоколи) за действие на определените техники при различни аварии във фотоволтаичната система, сървърната част, електроразпределението и др.

Така ще се повиши бързодействието при отстраняването на проблеми в критични ситуации, което ще подобри надеждността на системата.

3) *Анализи и Прогнозиране:*

- Сравнителен анализ:

Информационната система трябва да предоставя сравнителен анализ за сравняване на производството с предходни периоди или с теоретични модели и поставени цели.

Това е един от най-важните и мощни характеристики на системата, която позволява за точното прогнозиране и правилното предприемане на решение в бъдещ план.

- Прогнозиране:

Освен използване на локално инсталираните метеорологични станции, употребата на външни метеорологични API-та е критично.

Те дават възможност за прогнозиране на производството за следващите 24-48 часа. Това подпомага за използването на оптималната конфигурация на системата спрямо външните условия, които играят основен фактор за ефективостта на фотоволтаиците. [20]

4) *Финансов модул:*

Финансовия модул представлява инструмент за изчисляване на моментните приходи и загуби при промяна на производителността на системата.

Модулът позволява да се оцени правилно мястото на системата спрямо външния пазар и да се предприемат съответните действия.

5) *Модул за киберсигурност и защита на данните (Cybersecurity and Data Integrity):*

Тъй като фотоволтаичните централи са част от критичната енергийна инфраструктура, информационната система трябва да гарантира защитата срещу кибератаки, неототоризиран достъп и манипулация на данните. Този модул следва принципите на Defense-in-Depth (защита в дълбочина) и се основава на стандарта IEC 62443 за сигурност на индустриални системи за автоматизация и контрол. [21]

- Криптиране на комуникацията (End-to-End Encryption)

Сигурността на данните при предаване между крайните устройства (инвертори, сензори, dataloggers) и сървърната част се осигурява чрез използването на индустриални криптографски протоколи.

Всички комуникационни канали използват TLS 1.2 или TLS 1.3 (Transport Layer Security) криптиране, което предотвратява прихващането (eavesdropping) и модификацията на данни по време на транзит (Man-in-the-Middle атаки).

Чувствителните данни в базата данни, като потребителски пароли и конфигурационни файлове на устройствата, се съхраняват в хеширан вид или чрез използване на алгоритми като AES-256. [22]

- Управление на достъпа и идентичността

За да се минимизира рискът от вътрешни заплахи или човешка грешка, системата имплементира строг модел за контрол на достъпа:

Role-Based Access Control (RBAC): Системата дефинира йерархични роли (напр. Администратор, Техник, Наблюдател). Всеки потребител има достъп само до функционалностите, необходими за неговата работа. Например, "Наблюдателят" може само да вижда графиките, докато "Техникът" може да потвърждава аларми, но не може да променя финансовите настройки.

Многофакторна аутентикация (MFA): За критични операции и административен достъп се изисква двуфакторна защита.

- Мрежова сегментация и VPN

За отдалечен достъп и управление на централата, системата не трябва да излага контролните интерфейси директно в публичния интернет, затова се използват следните елементи: [23]

Използване на VPN (Virtual Private Network) тунели за връзка между отдалечените обекти и централния сървър.

Мрежова сегментация, която отделя операционната мрежа (ОТ – където са инверторите) от информационната мрежа (ИТ – където е офисът), за да се предотврати разпространението на зловреден софтуер.

- Интегритет на данните и одит

Системата поддържа пълен одитен журнал (Audit Logs), който записва всяко действие в системата (кой, кога и какво е променил). Това е ключово за проследяване на инциденти и съответствие с регулаторните изисквания.

V. МОНИТОРИНГ

Мониторингът на фотоволтаичните системи осигурява непрекъснато наблюдение на тяхното състояние и производителност в реално време. Това е особено важно, тъй като много PV системи са разположени в отдалечени райони, където операторите нямат директен достъп до тях. Системите за мониторинг събират данни от

всички ключови компоненти (панели, инвертори, трансформатори и други) и предоставят информация за работните им характеристики. Чрез уеб-портали и мобилни/настолни приложения операторите могат да преглеждат исторически данни, графики за генерирана енергия и статут на оборудването. По този начин мониторингът позволява бързо откриване на отклонения от очаквания добив и своевременни действия при неизправности, подобрявайки цялостната ефективност и надеждност на системата. [24]

За оценка на работата на PV системите се следят множество електрически, метеорологични и експлоатационни параметри. Често измерените стойности включват:

- Постоян ток и напрежение - напрежения и токове на отделни "string"-ове слънчеви панели;
- Изходно напрежение, ток и мощност на инверторите (преобразуватели), съответно и генерираната енергия (kWh) за деня/месеца;
- Температура на панелите и инверторите (клетъчна, корпусна и околна), тъй като температурните условия влияят на ефективността на модулите.
- Соларна радиация (irradiance);
- Показатели за ефективност - например реално съотношение между получената енергия и очакваната при идеални условия;

След като данните бъдат предадени и съхранени (на сървър или облачна платформа), се извършват анализи. Софтуерът изчислява изходна мощност, акумулирана енергия, коефициент на представяне и други индикатори, които се визуализират под формата на таблици и графики. Комуникацията между устройствата и централата обикновено използва стандартни индустриални протоколи: "Modbus", "RS-485/RS-232", "CANbus" и др. за жична връзка, както и "GPRS/4G", "Wi-Fi", "LPWAN" (напр. "NB-IoT", "LoRaWAN") за безжичен пренос при необходимост. Например много системи ползват "GSM/GPRS" модеми за

архивиране и изпращане на данни дори при временно прекъсване на интернет връзката.

Чрез аларми и уведомления ("SMS", имейл, "push" известия) потребителите получават сигнал при отклонения от нормата (например спад на напрежение или ток). [25]

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бързото развитие на фотоволтаичните системи в световен мащаб, в ЕС и особено в България налага използването на съвременни информационни системи за мониторинг и управление. Те са ключов фактор за ефективната експлоатация, надеждността и финансовата устойчивост на соларните централи. Чрез събиране, анализ и визуализация на данни в реално време, тези системи позволяват навременно откриване на неизправности, оптимизация на производството и спазване на регулаторните изисквания.

България ускорено преминава към възобновяема енергетика, където фотоволтаичните (PV) системи играят важна роля като чист, икономичен и лесен за внедряване източник на енергия, но това налага модерни решения за мониторинг и управление. Важно е и да се отбележи, че европейската политика подкрепя масовото разширяване на възобновяемите източници като стратегическа цел за енергийна независимост. [26]

В условията на нарастващ дял на възобновяемата енергия, интелигентното управление и мониторингът се превръщат не просто в предимство, а в необходимост за устойчивото развитие на енергийния сектор. Това улеснява интеграцията на PV системите в интелигентни енергийни мрежи и баланс на предлагането и търсенето.

REFERENCES

- [1] <https://www.nsi.bg/statistical-data/77/280>
- [2] <https://www.climateka.bg/solarna-revoliuciya-bulgaria/>
- [3] <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked?time=earliest..2024>
- [4] <https://www.consilium.europa.eu/bg/infographics/fit-for-55-how-the-eu-plans-to-boost-renewable-energy/>
- [5] <https://www.solarpowereurope.org/insights/thematic-reports/o-and-m-best-practice-guidelines-version-5-0>

- [6] https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked?facet=metric&country=~OWID_EU27&tableSearch=europea
- [7] Toby D. Couture, Toma Pavlov, Teodora Stoyanova, "Scaling-up Distributed Solar PV in Bulgaria," Berlin, Germany, June 2021, страница 14
- [8] <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked?time=earliest..2024&country=~BGR>
- [9] Решение на КЕБР № Ц-11 от 01.05.2024 г.
- [10] Правила за търговия с електрическа енергия (ПТЕЕ)
- [11] Photovoltaic cells convert sunlight into electricity - <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php>
- [12] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/photovoltaic-system-monitoring>
- [13] A Study on an IoT-Based SCADA System for Photovoltaic Utility Plants - <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/11/2065>
- [14] Operation&Maintenance Best Practice Guidelines Version 5.0 by SolarPower Europe
- [15] <https://ieeexplore.ieee.org/document/10125779>
- [16] Performance Analysis of Time Series Databases for IoT Applications by Loran Daqouri
- [17] https://www.researchgate.net/publication/295611696_An_IoT_Based_Smart_Solar_Photovoltaic_Remote_Monitoring_and_Control_unit
- [18] IEC 61724-1:2017 "Photovoltaic system performance - Part 1: Monitoring"
- [19] Zhao, Y., et al. "Graph-based semi-supervised learning for fault detection and classification in solar photovoltaic arrays." IEEE Transactions on Power Electronics 30.5 (2014): 2848-2858.
- [20] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X1630250X>
- [21] International Electrotechnical Commission, "Industrial communication networks – Network and system security – Part 3-3: System security requirements and security levels," IEC 62443-3-3:2013.
- [22] M. Pilz and L. Mulligan, "On the Security of Solar Photovoltaic Systems," in IEEE Access, vol. 8, pp. 222926-222938, 2020.
- [23] K. Stouffer, V. Pillitteri, S. Lightman, M. Abrams, and A. Hahn, "Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security," National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, NIST Spec. Publ. 800-82 Rev. 2, 2015.
- [24] Smart monitoring of photovoltaic energy systems: An IoT-based prototype approach - <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468227625004430>
- [25] IoT технологии за мониторинг на фотоволтаични инсталации - <https://www.energy-review.bg/bg/iot-tehnologii-za-monitoring-na-fotovoltaichni-instalacii/2/897>
- [26] https://commission.europa.eu/topics/energy/repowereu_en