



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

## **Διπλωματική Εργασία**

**Συστηματική ανασκόπηση και συγκριτική ανάλυση και αξιολόγηση του πρωτοκόλλου SunSpec: Προκλήσεις, εφαρμογές και μελλοντική εξέλιξη**



**Φοιτητής: Κοτσιφάκος Θεόδωρος  
ΑΜ: 48346737**

**Επιβλέπων Καθηγητής**

**Καμινάρης Σταύρος  
Καθηγητής**

**ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, Οκτώβριος, 2024**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**FACULTY OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

## **Diploma Thesis**

### **Literature Review, comparative analysis and evaluation of SunSpec protocol: Challenges, applications and future work**



**Student: Kotsifakos Theodoros**  
**Registration Number: 48346737**

**Supervisor**

**Kaminaris D. Stavros**  
**Professor**

**ATHENS-EGALEO, October, 2024**

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Καμινάρης Σταύρος, Καθηγητής	Ιωαννίδης Γεώργιος, Καθηγητής	Πυρομάλης Δημήτριος, Α. Καθηγητής
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

**Copyright ©** Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Κοτσιφάκος Θεόδωρος,**

**Σεπτέμβριος, 2024**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η ΚΟΤΣΙΦΑΚΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ του ΝΙΚΟΛΑΟΥ, με αριθμό μητρώου 48346737 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

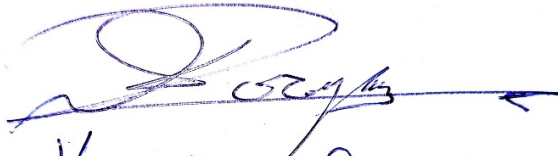
### δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 18/10/2024 και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο/Η Δηλών/ούσα



ΚΟΤΣΙΦΑΚΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ.

Στον πατέρα μου, Νικόλαο Κοτσιφάκο.

{Σελίδα αφιέρωσης (προαιρετικά)}

Θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου σε όλους όσους με στήριξαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας. Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον πατέρα, την μητέρα και την αδερφή μου για την αμέριστη υποστήριξή τους, τόσο σε συναισθηματικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο, σε κάθε βήμα της ακαδημαϊκής μου πορείας. Χωρίς την ενθάρρυνσή τους, τίποτα δεν θα ήταν δυνατό. Επίσης, ευχαριστώ την σύντροφό μου για την υπομονή και την κατανόηση της, καθώς και για τη συνεχή ψυχολογική στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου. Η παρουσία της δίπλα μου ήταν πολύτιμη. Βασικός παράγοντας για την υλοποίηση της εργασίας αυτής ήταν, ο κύριος Ορφανός Βασίλειος από τον οποίο έλαβα αμέριστη βοήθεια, για σημαντικές για την εργασία αποφάσεις.

## Περίληψη

Αυτή η εργασία διερευνά τον ρόλο του Πρωτοκόλλου SunSpec στην τυποποίηση της επικοινωνίας εντός των κατανεμημένων ενεργειακών πόρων (DER) και των φωτοβολταϊκών (PV) συστημάτων. Σκοπός είναι η συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση των εφαρμογών, των προκλήσεων και των μελλοντικών προοπτικών του. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει μια ολοκληρωμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση μελετών από το 2014 έως το 2024, εστιάζοντας σε άρθρα από το IEEE Xplore, το Google Scholar, το ScienceDirect και το SpringerLink, χρησιμοποιώντας λέξεις-κλειδιά όπως "Πρωτόκολλο SunSpec", "κατανεμημένοι ενεργειακοί πόροι" και "έξυπνα δίκτυα". Τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν διάφορες εφαρμογές του πρωτοκόλλου SunSpec, συμπεριλαμβανομένης της ενίσχυσης της διαλειτουργικότητας, των οικονομικών λύσεων παρακολούθησης, της προηγμένης λειτουργικότητας του δικτύου και της ασφάλειας στον κυβερνοχώρο. Οι περιπτώσιολογικές μελέτες καταδεικνύουν τον αντίκτυπό της στις υπηρεσίες υποστήριξης δικτύου, στις λειτουργίες ηλιακής χρηματοδότησης και στην ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων. Επιπλέον, οι προκλήσεις περιλαμβάνουν τους τεχνικούς περιορισμούς, τους κινδύνους κυβερνοασφάλειας, το κόστος και την πολυπλοκότητα υλοποίησης καθώς και την ανάγκη για τυποποίηση. Συμπερασματικά, το Πρωτόκολλο SunSpec προάγει σημαντικά τη λειτουργικότητα και την αποτελεσματικότητα των συστημάτων DER, αλλά αντιμετωπίζει προκλήσεις που απαιτούν συνεχή βελτίωση και ισχυρές δοκιμές. Οι μελλοντικές ευκαιρίες έγκεινται στην ενσωμάτωση αναδυόμενων τεχνολογιών όπως το IoT, το blockchain και η AI για τη βελτίωση της διαλειτουργικότητας, της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητας των συστημάτων DER.

## Λέξεις – κλειδιά

Sunspec Protocol, φωτοβολταϊκά συστήματα, DER's, AI.



## **Abstract**

This thesis explores the role of the SunSpec Protocol in standardizing communication within Distributed Energy Resources (DER) and PhotoVoltaic (PV) systems. The purpose is the systematic review and analysis of its applications, challenges and future prospects. The methodology includes a comprehensive literature review of studies from 2014 to 2024, focusing on articles from IEEE Xplore, Google Scholar, ScienceDirect, and SpringerLink, using keywords such as "SunSpec Protocol," "distributed energy resources," and "smart grids". The results highlight several applications of the SunSpec protocol, including enhancing interoperability, cost-effective monitoring solutions, advanced network functionality, and cyber security. Case studies demonstrate its impact on grid support services, solar financing operations and electric vehicle integration. Additionally, challenges include technical limitations, cybersecurity risks, cost and implementation complexity, and the need for standardization. In conclusion, the SunSpec Protocol greatly advances the functionality and efficiency of DER systems, but faces challenges that require continued improvement and robust testing. Future opportunities lie in the integration of emerging technologies such as IoT, blockchain and AI to improve the interoperability, safety and efficiency of DER systems.

## **Keywords**

Sunspec Protocol, PV systems, DER's, AI.

## Περιεχόμενα

<b>Κατάλογος Εικόνων .....</b>	<b>12</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>13</b>
Επισκόπηση του πρωτοκόλλου SunSpec.....	14
Εξέλιξη και Σκοπός .....	15
Οφέλη και Πλεονεκτήματα.....	16
Μελέτες περιπτώσεων και εφαρμογές πραγματικού κόσμου .....	16
Σκοπός και εύρος της εργασίας .....	17
<b>1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Επικοινωνιακές Υποδομές Συνεργατικής Λειτουργίας Έξυπνων Μετατροπέων .....</b>	<b>19</b>
1.1 Στρατηγικές Συνεταιρισμού Ελέγχου και Χρήση Συνδέσμων Διαβίβασης Δεδομένων .....	20
1.2 Επικοινωνιακές Υποδομές και Πρωτόκολλα Συνεταιρισμού Έξυπνου Inverter .....	23
1.3 Πρωτόκολλο SunSpec Modbus .....	26
1.4 Το πρωτόκολλο DNP3.....	28
1.5 Προκλήσεις και Λύσεις στην Επικοινωνία των Έξυπνων Μετατροπέων .....	32
<b>2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Σημασία της διαλειτουργικότητας σε συστήματα ηλιακής ενέργειας .....</b>	<b>35</b>
2.1 Σημασία της Διαλειτουργικότητας.....	35
2.2 Τεχνικά θεμέλια .....	36
2.3 Οφέλη από τη διαλειτουργικότητα .....	36
2.4 Πολυπλοκότητα ολοκλήρωσης.....	37
2.5 Μελλοντικές κατευθύνσεις.....	37
<b>3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Εξέλιξη συστημάτων ηλιακής ενέργειας.....</b>	<b>38</b>
3.1 Τεχνολογικές εξελίξεις στα Φωτοβολταϊκά .....	38
3.2 Ανάγκη τυποποίησης στην επικοινωνία ηλιακής ενέργειας.....	40
3.3 Ενσωμάτωση και Διαχείριση Ενέργειας σε Υβριδικά Συστήματα Φωτοβολταϊκών .....	42
<b>4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Εισαγωγή στη SunSpec Alliance και ο ρόλος της .....</b>	<b>48</b>
4.1 Αποστολή και Στόχοι .....	48
4.2 Ο ρόλος της SunSpec Alliance .....	49
4.3 Αρχιτεκτονικές και σχεδιαστικές αρχές του πρωτοκόλλου SunSpec .....	50
4.4 Επεκτασιμότητα και Ευελιξία .....	52
4.5 Θέματα ασφαλείας .....	52
4.6 Εφαρμογή σε Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....	53
4.7 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Καινοτομίες .....	53
4.8 Βασικά στοιχεία και οι λειτουργίες τους (π.χ. μοντέλα δεδομένων, καταχωρητές) .....	54
4.8.1 Μοντέλα Δεδομένων .....	54
4.8.2 Μητρώα .....	55
4.8.3 Διεπαφές και Επικοινωνία .....	56
4.8.4 Πρωτόκολλο Modbus.....	56
4.8.5 IEEE 1547.1 και IEEE 2030.5.....	57
4.9 Εφαρμογές σε Ηλιακά Φ/Β Συστήματα .....	57
4.10 Σύγκριση με άλλα πρωτόκολλα επικοινωνίας στην Βιομηχανία Ηλιακής Ενέργειας.....	58
<b>5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : Μεθοδολογία.....</b>	<b>64</b>
5.1 Τα κριτήρια ένταξης .....	64
5.2 Κριτήρια εξαίρεσης .....	64
5.3 Μεθοδολογία αναζήτησης .....	65
5.4 Σκοπός και Ερευνητικά Ερωτήματα .....	65
<b>6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> : Αποτελέσματα.....</b>	<b>67</b>
<b>7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup> : Συζήτηση.....</b>	<b>80</b>
7.1 Εφαρμογές του Πρωτοκόλλου SunSpec.....	80
7.2 Προκλήσεις στην εφαρμογή του πρωτοκόλλου SunSpec .....	85
7.3 Μελλοντικές ευκαιρίες για το πρωτόκολλο SunSpec .....	88

<b>7.4</b>	<b>Σύνοψη απαντήσεων στα ερευνητικά ερωτήματα.....</b>	<b>91</b>
7.4.1	Εφαρμογές .....	91
7.4.2	Προκλήσεις .....	92
7.4.3	Μελλοντικές κατευθύνσεις.....	93
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>		<b>94</b>
<b>Μελλοντικές κατευθύνσεις .....</b>		<b>96</b>
<b>Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές .....</b>		<b>100</b>

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Διάγραμμα Επικοινωνίας και Ενσωμάτωσης DER Συστήματος με Εφαρμογές Cloud μέσω Πρωτοκόλλων SunSpec και IEEE (SunSpec.org) (Marzal et al., 2017) .....	15
Εικόνα 2 Δομή πρωτοκόλλου SunSpec (SunSpec, 2019).....	26
Εικόνα 3 Αρχιτεκτονική συστήματος (SunSpec Alliance., 2019).....	27
Εικόνα 4 Διάγραμμα Αρχιτεκτονικής SCADA και Επικοινωνίας με Απομακρυσμένους Υποσταθμούς μέσω Εξωτερικών Συνδέσμων και Τηλεμετρικών Μονάδων (Abdi et al., 2016) .....	28
Εικόνα 5 Αρχιτεκτονική SCADA (Abdi et al., 2016) .....	29
Εικόνα 6 Φωτοβολταϊκή συστοιχία (Wikimedia contributors., 2024).....	39
Εικόνα 7 Υβριδικά Συστήματα Φωτοβολταϊκών (Wikimedia, 2024) .....	43
Εικόνα 8 Στοιβά επικοινωνίας MODBUS (Banik et al., 2023) .....	59

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το πρωτόκολλο SunSpec είναι ένα βασικό πρότυπο στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, σχεδιασμένο να βελτιώνει την ενοποίηση και τη διαλειτουργικότητα των καταναμημένων ενεργειακών πόρων (DER). Εξασφαλίζει την απρόσκοπτη επικοινωνία μεταξύ διαφόρων εξαρτημάτων σε ένα έξυπνο δίκτυο, προωθώντας έτσι την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα στη διαχείριση ενέργειας. Επιπλέον, η ανάγκη για τυποποιημένα μοντέλα δεδομένων και μεθόδους επικοινωνίας για μετατροπείς ισχύος σε συστήματα DER θεωρείται κρίσιμη. Στο πλαίσιο αυτό, οι Bründlinger et al. (2015) υπογραμμίζουν τη σημασία της επαλήθευσης της «ευφυΐας» των μετατροπέων ισχύος έξυπνου δικτύου για να διασφαλιστεί η αποτελεσματική λειτουργία τους εντός του δικτύου. Αυτό το πρωτόκολλο υποστηρίζει προηγμένες λειτουργίες όπως ο έλεγχος συχνότητας-βατ, απαραίτητος για τη διατήρηση της σταθερότητας του δικτύου με προσαρμογή της ισχύος εξόδου με βάση τη συχνότητα του δικτύου, όπως καταδεικνύεται από τους Johnson et al. (2016). Η ανάπτυξη του πρωτοκόλλου SunSpec ευθυγραμμίζεται με τις διεθνείς προσπάθειες για τη δημιουργία πρωτοκόλλων δοκιμών διαλειτουργικότητας για την ενοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Παράλληλα, οι Rosewater et al. (2015) συζητούν την παγκόσμια συνεργασία με στόχο την τυποποίηση των τεχνολογιών αποθήκευσης και διανομής ενέργειας, τονίζοντας τη σημασία του πρωτοκόλλου σ' αυτό το πλαίσιο. Ο ρόλος της SunSpec στη βιομηχανία ενισχύεται περαιτέρω με εργαλεία όπως η πλατφόρμα επικύρωσης συστήματος SunSpec (SVP), η οποία αυτοματοποιεί τις διαδικασίες δοκιμών και πιστοποίησης για συστήματα DER, διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με αυστηρά πρότυπα που είναι απαραίτητα για την ενοποίηση στο δίκτυο. Αυτό περιγράφεται λεπτομερώς στην τεκμηρίωση της SunSpec Alliance για το λογισμικό SVP. Οι Τεχνικές Εκθέσεις IEC IEC 61850-90-7 και IEC 61850-7-420 παρέχουν ολοκληρωμένα μοντέλα για μετατροπείς ισχύος και δίκτυα επικοινωνίας σε συστήματα αυτοματισμού κοινής ωφέλειας, τα οποία είναι ενσωματωμένα στο πρωτόκολλο SunSpec. Αυτές οι εκθέσεις υπογραμμίζουν το ρόλο του πρωτοκόλλου στη διευκόλυνση της υψηλής διείδυσης των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) συστημάτων στο δίκτυο διανομής, όπως συζητήθηκε από τους Seguin et al. (2016). Το πρωτόκολλο SunSpec καλύπτει επίσης τις προηγμένες απαιτήσεις λειτουργίας έξυπνου μετατροπέα και DER, όπως σημειώθηκε από τον Bründlinger (2015). Αυτό περιλαμβάνει την εφαρμογή χαρακτηριστικών που επιβάλλονται από τους ευρωπαϊκούς κώδικες δικτύου και την πρόβλεψη μελλοντικών τάσεων στη διαχείριση του δικτύου. Επιπλέον, η συνάφεια του πρωτοκόλλου υπογραμμίζεται από την ευθυγράμμιση του με τα πρότυπα IEEE, όπως το IEEE Standard 1547-2003 και το IEEE Standard 1547.1-2005, τα οποία περιγράφουν τις απαιτήσεις για τη διασύνδεση των καταναμημένων πόρων με τα συστήματα

ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά τα πρότυπα είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση ότι τα συστήματα DER μπορούν να διασυνδεθούν αξιόπιστα με το δίκτυο. Η συλλογική ανάπτυξη προηγμένων πρωτοκόλλων δοκιμών πιστοποίησης διαλειτουργικότητας για την ενσωμάτωση έξυπνου δικτύου Φ/Β, όπως περιγράφεται από τους Johnson et al. (2014), απεικονίζει περαιτέρω τη συνολική προσέγγιση που υιοθετήθηκε για να διασφαλιστεί η ευρωστία και η αξιοπιστία του πρωτοκόλλου. Επιπλέον, το έργο των Palmintier et al. (2016) σχετικά με τα αναδυόμενα ζητήματα και τις προκλήσεις στην ενσωμάτωση της ηλιακής ενέργειας στο σύστημα διανομής υπογραμμίζει τις συνεχείς προσπάθειες για την αντιμετώπιση τεχνικών εμποδίων, ενισχύοντας την ανάγκη για πρωτόκολλα όπως το SunSpec.

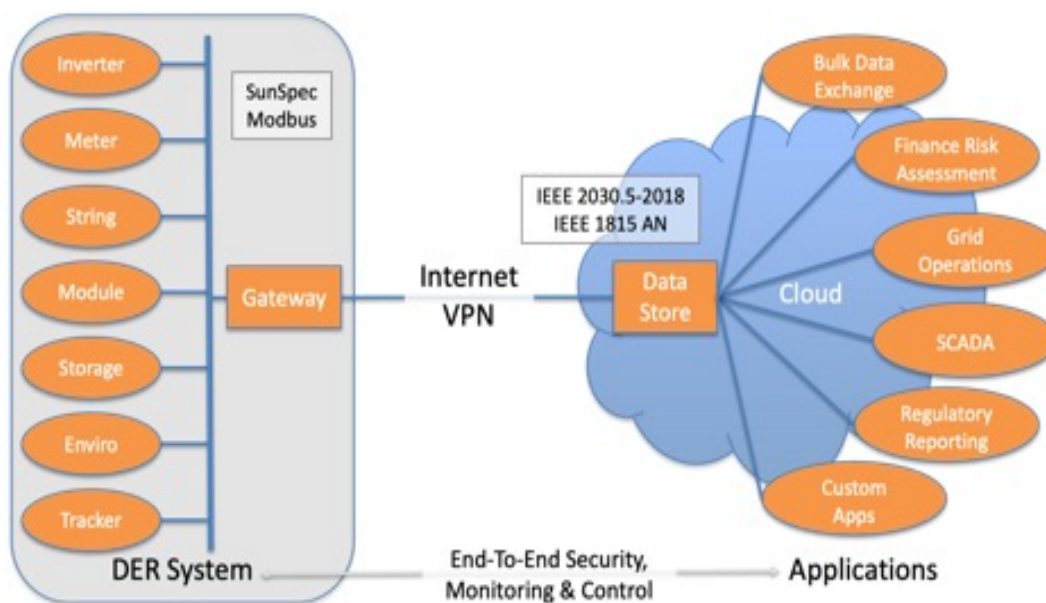
Τέλος, η βάση του πρωτοκόλλου SunSpec βασίζεται σε εκτεταμένες προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης, συμπεριλαμβανομένων των συνεισφορών από διάφορους ενδιαφερόμενους στον κλάδο. Ο Seal (2014) συζητά κοινές λειτουργίες για έξυπνους μετατροπείς, οι οποίες είναι κρίσιμες για την εφαρμογή του πρωτοκόλλου. Επιπλέον, το Underwriters Laboratories 1741 Ed. 2 (2010) παρέχει πρότυπα για μετατροπείς, ελεγκτές και εξοπλισμό συστημάτων διασύνδεσης, διασφαλίζοντας ότι όλα τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται στα συστήματα DER πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια ασφάλειας και απόδοσης.

Το πρωτόκολλο SunSpec αντιπροσωπεύει μια ολοκληρωμένη και συνεργατική προσέγγιση για την τυποποίηση της επικοινωνίας και της διαλειτουργικότητας σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Υποστηρίζεται από εκτεταμένη έρευνα, διεθνή συνεργασία και τήρηση καθιερωμένων προτύπων, καθιστώντας το ακρογωνιαίο λίθο στην εξέλιξη των έξυπνων δικτύων και την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

### **Επισκόπηση του πρωτοκόλλου SunSpec**

Το πρωτόκολλο SunSpec, που αναπτύχθηκε από την SunSpec Alliance, αντιπροσωπεύει μια κρίσιμη πρόοδο στην τυποποίηση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στοχεύοντας συγκεκριμένα τα ηλιακά φωτοβολταϊκά (PV) συστήματα. Η SunSpec Alliance, η οποία ιδρύθηκε το 2009, περιλαμβάνει μια κοινοπραξία μετόχων της βιομηχανίας που είναι αφιερωμένη στη θέσπιση ανοιχτών προτύπων που προωθούν τη διαλειτουργικότητα και εξορθολογίζουν την ενοποίηση συσκευών ηλιακής ενέργειας και εφαρμογών λογισμικού (SunSpec Alliance, nd). Η SunSpec Alliance δημιουργήθηκε ως απάντηση στο κατακεραματισμένο τοπίο των προτύπων επικοινωνίας στον κλάδο της ηλιακής ενέργειας. Πριν από την έναρξή του, η διαλειτουργικότητα μεταξύ εξοπλισμού διαφορετικών κατασκευαστών αποτελούσε σημαντική πρόκληση για τους κατασκευαστές συστημάτων και τους χειριστές. Σύμφωνα με την SunSpec

Alliance (nd), η κύρια αποστολή της συμμαχίας είναι να αναπτύξει και να προωθήσει προδιαγραφές που επιτρέπουν την απρόσκοπτη επικοινωνία μεταξύ των εξαρτημάτων όπως μετατροπείς, μετρητές και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε εγκαταστάσεις ηλιακών φωτοβολταϊκών. Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται ένα Διάγραμμα Επικοινωνίας και Ενσωμάτωσης DER Συστήματος με Εφαρμογές Cloud μέσω Πρωτοκόλλων SunSpec και IEEE.



Εικόνα 1. Διάγραμμα Επικοινωνίας και Ενσωμάτωσης DER Συστήματος με Εφαρμογές Cloud μέσω Πρωτοκόλλων SunSpec και IEEE (Sunspec.org) (Marzal et al., 2017)

## Εξέλιξη και Σκοπός

Η εξέλιξη του Πρωτοκόλλου SunSpec μπορεί να εντοπιστεί στις αρχικές του εκδόσεις που στοχεύουν στην αντιμετώπιση συγκεκριμένων σημείων συμφόρησης επικοινωνίας που παρατηρούνται στο πεδίο. Με την πάροδο του χρόνου, το πρωτόκολλο έχει υποστεί επαναλαμβανόμενες βελτιώσεις για να καλύψει τις νέες τεχνολογικές εξελίξεις και τις απαιτήσεις της βιομηχανίας. Η SunSpec Alliance (nd) τονίζει ότι ο θεμελιώδης σκοπός του πρωτοκόλλου είναι να διευκολύνει τυποποιημένα πρωτόκολλα ανταλλαγής δεδομένων και εντολών, ενισχύοντας έτσι την αξιοπιστία, τη διαλειτουργικότητα και τη συνολική απόδοση των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Επιπροσθέτως, το πρωτόκολλο SunSpec είναι δομημένο γύρω από μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική σχεδιασμένη για να ικανοποιεί τις διαφορετικές απαιτήσεις των συστημάτων ηλιακής ενέργειας (SunSpec Alliance, nd). Αυτή η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει τυποποιημένα μοντέλα δεδομένων που καθορίζουν τον τρόπο οργάνωσης και επικοινωνίας των πληροφοριών μεταξύ των συσκευών. Αυτά τα μοντέλα είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της συνέπειας και της συμβατότητας σε

διαφορετικές πλατφόρμες υλικού και λογισμικού, επιτρέποντας την απρόσκοπτη ενσωμάτωση και λειτουργία σε εγκαταστάσεις ηλιακών φωτοβολταϊκών.

Κεντρικό στοιχείο του πρωτοκόλλου SunSpec είναι τα προκαθορισμένα μοντέλα δεδομένων και τα μητρώα, τα οποία χρησιμεύουν ως δομικά στοιχεία για την επικοινωνία μεταξύ των συσκευών. Σύμφωνα με τη SunSpec Alliance (nd), αυτά τα μοντέλα δεδομένων καθορίζουν τη δομή και τη σημασιολογία των δεδομένων που σχετίζονται με παραμέτρους όπως η τάση, το ρεύμα, η ισχύς εξόδου και η κατάσταση λειτουργίας των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων. Με την τυποποίηση αυτών των μοντέλων, το πρωτόκολλο απλοποιεί την υλοποίηση των λειτουργιών παρακολούθησης, ελέγχου και διαχείρισης σε ετερογενή συστήματα.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου SunSpec είναι η ενσωμάτωσή του με το πρωτόκολλο επικοινωνίας Modbus, ένα ευρέως διαδεδομένο βιομηχανικό πρότυπο για συστήματα βιομηχανικού αυτοματισμού και ελέγχου (Modbus-IDA, 2004). Το Modbus διευκολύνει την απρόσκοπτη διαλειτουργικότητα, ορίζοντας μια κοινή γλώσσα επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών, επιτρέποντας έτσι την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, την καταγραφή δεδομένων και την απομακρυσμένη διαμόρφωση των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αυτή η ενοποίηση διασφαλίζει ότι οι συσκευές που είναι συμβατές με το SunSpec μπορούν εύκολα να επικοινωνούν και να ανταλλάσσουν δεδομένα με εξοπλισμό συμβατό με Modbus, ενισχύοντας την ευελιξία και την επεκτασιμότητα των εγκαταστάσεων ηλιακής ενέργειας (Modbus-IDA, 2004).

### **Οφέλη και Πλεονεκτήματα**

Είναι αλήθεια ότι η υιοθέτηση του Πρωτοκόλλου SunSpec προσφέρει πολυάριθμα οφέλη στους ενδιαφερόμενους σε όλο το οικοσύστημα ηλιακής ενέργειας. Η έμφαση του πρωτοκόλλου στη διαλειτουργικότητα διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στον μετριασμό των προκλήσεων ολοκλήρωσης που αντιμετωπίζονται συνήθως σε περιβάλλοντα πολλών προμηθευτών. Με την τυποποίηση των διεπαφών επικοινωνίας και των μορφών των δεδομένων, η SunSpec Alliance (nd) βεβαιώνει ότι το πρωτόκολλο μειώνει την πολυπλοκότητα της ανάπτυξης και τους λειτουργικούς κινδύνους που σχετίζονται με ιδιόκτητες λύσεις. Αυτή η τυποποίηση όχι μόνο ενισχύει την αξιοπιστία και την απόδοση του συστήματος, αλλά προάγει επίσης την καινοτομία και τον ανταγωνισμό μεταξύ των κατασκευαστών, μειώνοντας το κόστος και επιταχύνοντας την υιοθέτηση τεχνολογιών ηλιακών φωτοβολταϊκών.

### **Μελέτες περιπτώσεων και εφαρμογές πραγματικού κόσμου**

Οι πραγματικές εφαρμογές του Πρωτοκόλλου SunSpec καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητά του στη βελτίωση της λειτουργικής απόδοσης και αξιοπιστίας των ηλιακών φωτοβολταϊκών



εγκαταστάσεων. Για παράδειγμα, εταιρείες όπως η Sunlabob Renewable Energy έχουν εφαρμόσει με επιτυχία λύσεις συμβατές με το SunSpec για την παρακολούθηση και τη διαχείριση των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων στον τελευταίο όροφο σε διάφορες ρυθμίσεις, συμπεριλαμβανομένων των εμπορικών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων (Sunlabob, 2017). Αξιοποιώντας τυποποιημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας, αυτές οι εγκαταστάσεις επιτυγχάνουν απρόσκοπτη ενοποίηση με την υπάρχουσα υποδομή, βελτιστοποιούν την παραγωγή ενέργειας και διευκολύνουν την προληπτική συντήρηση και την αντιμετώπιση προβλημάτων.

Στο πλαίσιο των έργων ηλιακής ενέργειας σε κλίμακα χρησιμότητας, το Πρωτόκολλο SunSpec επιτρέπει επίσης εξελιγμένες δυνατότητες παρακολούθησης και ελέγχου που είναι απαραίτητες για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης ενέργειας και τη διασφάλιση της σταθερότητας του δικτύου. Σύμφωνα με τους Moreno-Garcia et al. (2016), τα συστήματα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο που βασίζονται στο Πρωτόκολλο SunSpec έχουν αναπτυχθεί σε φωτοβολταϊκούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής σε κλίμακα κοινής ωφέλειας για την παρακολούθηση μετρήσεων απόδοσης όπως τα επίπεδα ακτινοβολίας, η ισχύς εξόδου και η υγεία του εξοπλισμού. Αυτά τα συστήματα διευκολύνουν τη λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων, την προγνωστική συντήρηση και τη συμμόρφωση με τις κανονιστικές απαιτήσεις, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική λειτουργική απόδοση και την οικονομική βιωσιμότητα των έργων ηλιακής ενέργειας.

Αναμφίβολα, οι μελλοντικές προοπτικές για το πρωτόκολλο SunSpec είναι ελπιδοφόρες, με τις συνεχείς προσπάθειες να επικεντρώνονται στην επέκταση των δυνατοτήτων του και στην αντιμετώπιση των αναδυόμενων προκλήσεων στον τομέα της ηλιακής ενέργειας. Καθώς η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συνεχίζει να αυξάνεται παγκοσμίως, δίνεται αυξανόμενη έμφαση στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων στον κυβερνοχώρο (Onunkwo et al., 2019). Οι μελλοντικές επαναλήψεις του Πρωτοκόλλου SunSpec αναμένεται να ενσωματώσουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας και ισχυρούς μηχανισμούς ελέγχου ταυτότητας για την προστασία από απειλές στον κυβερνοχώρο και τη διασφάλιση της ακεραιότητας των δεδομένων που μεταδίδονται σε δίκτυα ηλιακής ενέργειας.

### **Σκοπός και εύρος της εργασίας**

Ο πρωταρχικός στόχος αυτής της εργασίας είναι η διεξαγωγή μιας ολοκληρωμένης βιβλιογραφικής ανασκόπησης, συγκριτικής ανάλυσης και αξιολόγησης του πρωτοκόλλου SunSpec στο πλαίσιο των συστημάτων ηλιακής ενέργειας. Το πρωτόκολλο SunSpec, που αναγνωρίζεται ως βασικό πρότυπο για την επικοινωνία και τη διαλειτουργικότητα στη βιομηχανία φωτοβολταϊκών (ΦΒ), θα

αναθεωρηθεί συστηματικά για να αποσαφηνιστούν οι προκλήσεις, οι εφαρμογές και οι μελλοντικές προοπτικές του.

Επιπροσθέτως, ο σκοπός αυτής της μελέτης είναι τριπλός:

- **Συστηματική Ανασκόπηση του Πρωτοκόλλου SunSpec**

Πρώτος στόχος αποτελεί μια εις βάθος εξέταση του πρωτοκόλλου SunSpec, ξεκινώντας από την ιστορική του εξέλιξη. Αυτό περιλαμβάνει τη διερεύνηση των τεχνικών προδιαγραφών και λειτουργιών που ορίζουν το πρωτόκολλο, όπως τα μοντέλα δεδομένων, τα πρότυπα επικοινωνίας και τη συμβατότητα με άλλα πρωτόκολλα του κλάδου.

- **Συγκριτική Ανάλυση με Άλλα Πρωτόκολλα**

Ένας άλλος βασικός στόχος είναι η σύγκριση του πρωτοκόλλου SunSpec με άλλα σχετικά πρότυπα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται σε συστήματα ηλιακής ενέργειας, όπως το Modbus και το IEEE 1547.1. Αυτή η συγκριτική ανάλυση θα επισημάνει τις τεχνικές διαφορές, τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς κάθε πρωτοκόλλου, εστιάζοντας στη διαλειτουργικότητα και τις δυνατότητες ολοκλήρωσής τους.

- **Αξιολόγηση Προκλήσεων, Εφαρμογών και Μελλοντικών Εξελίξεων**

Θα αξιολογηθούν κριτικά οι προκλήσεις που σχετίζονται με την εφαρμογή του πρωτοκόλλου SunSpec σε εφαρμογές πραγματικού κόσμου. Αυτό περιλαμβάνει τεχνικές προκλήσεις που σχετίζονται με τη συμβατότητα, την επεκτασιμότητα και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης, καθώς και ρυθμιστικά εμπόδια και εμπόδια που σχετίζονται με την υιοθέτηση. Επιπλέον, η μελέτη θα διερευνήσει διάφορες εφαρμογές του πρωτοκόλλου SunSpec σε διαφορετικούς τομείς της βιομηχανίας ηλιακών φωτοβολταϊκών, συμπεριλαμβανομένων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής σε κλίμακα κοινής ωφέλειας, εμπορικών εγκαταστάσεων και οικιακών συστημάτων. Θα αντληθούν πληροφορίες από περιπτώσιολογικές μελέτες και εμπειρικά δεδομένα για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του πρωτοκόλλου στη βελτίωση της λειτουργικής αποτελεσματικότητας, στη μείωση του κόστους και στη βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος. Τέλος, η εργασία θα συζητήσει μελλοντικές ευκαιρίες και κατευθύνσεις για το πρωτόκολλο SunSpec. Αυτό περιλαμβάνει τον εντοπισμό των αναδυόμενων τάσεων στην τεχνολογία ηλιακής ενέργειας και την πρόταση περιοχών για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη για την ενίσχυση των δυνατοτήτων του πρωτοκόλλου και την αντιμετώπιση των εξελισσόμενων αναγκών της βιομηχανίας.

## **1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Επικοινωνιακές Υποδομές Συνεργατικής Λειτουργίας Έξυπνων Μετατροπέων**

Τις τελευταίες δεκαετίες, ο αυξημένος αριθμός κατανεμημένων πηγών ενέργειας (DER) σε συστήματα διανομής χαμηλής τάσης ήταν ζωτικής σημασίας για την αποκέντρωση της παραγωγής ενέργειας. Αυτό επέτρεψε την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα εκσυγχρονισμένα ηλεκτρικά δίκτυα, κάνοντας έτσι την ιδέα του Smart Grid (SG) πραγματικότητα (Fang et al., 2012). Με την εισαγωγή των Smart Grids (SG), είναι αναπόφευκτο να υιοθετηθούν έξυπνες διαδικασίες και τα ηλεκτρονικά gadget να γίνουν πιο διαδραστικά (Legenthiran et al., 2015). Ως εκ τούτου, η χρήση τεχνολογιών επικοινωνίας σε ηλεκτρικά δίκτυα, ιδιαίτερα σε δυναμικά και διαδραστικά συστήματα όπως τα μικροδίκτυα (MGs), είναι απαραίτητη για πολλές σχετικές εφαρμογές (Ahmed et al., 2014; Marzal et al., 2017).

Ένας συγκεκριμένος τομέας εστίασης στη βιβλιογραφία είναι η χρήση επικοινωνιών για τη διευκόλυνση της συντονισμένης λειτουργίας ηλεκτρονικών διεπαφών ισχύος σε Κατανεμημένους Ενεργειακούς Πόρους (DER). Με την εφαρμογή έξυπνων μετατροπέων σε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο, είναι δυνατός ο συντονισμός της παροχής βοηθητικών υπηρεσιών. Αυτός ο συντονισμός ενισχύει τη συνολική απόδοση των μικροδικτύων, επιτρέποντας την κατανομή ισχύος και ρεύματος και αντισταθμίζοντας προβλήματα άεργου ισχύος και ανισορροπίας (Han et al., 2016). Ως εκ τούτου, προτείνονται διάφορες τεχνικές για τη συλλογική λειτουργία των μετατροπέων, που βασίζονται συνήθως σε κεντρικές ή αποκεντρωμένες μεθόδους ελέγχου (Cheng et al., 2018), για να διευκολυνθεί η ενσωμάτωση των Κατανεμημένων Πόρων Ενέργειας (DERs) (Han et al., 2017; Tayab et al., 2017).

Ανεξάρτητα από την αρχιτεκτονική ελέγχου τους, η πλειονότητα των τεχνικών που χρησιμοποιούνται για τον συντονισμό των έξυπνων μετατροπέων εξαρτώνται από κανάλια μετάδοσης δεδομένων χαμηλού εύρους ζώνης για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των ελεγκτών. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η επικοινωνία μπορεί να μην είναι απαραίτητη για τη γενική λειτουργία και σταθερότητα του MG. Μέσω της χρήσης συναινετικών τεχνικών, οι τοπικές πληροφορίες μπορούν να κοινοποιηθούν σε γειτονικές οντότητες ή σε ένα κεντρικό σύστημα διαχείρισης/ελεγκτή, όπως φαίνεται από τους Brandao et al. (2017) και τους Guo et al. (2015). Έτσι, με τη χρήση μεθόδων επικοινωνίας, μπορεί να επιτευχθεί η συνεργασία των ελεγκτών σε MG, λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση αρκετών κόμβων και στοχεύοντας στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του ηλεκτρικού συστήματος.

Ωστόσο, παρά την εκτεταμένη έρευνα για τις συνεργατικές μεθόδους ελέγχου που χρησιμοποιούν συνδέσμους μετάδοσης δεδομένων χαμηλού εύρους ζώνης, υπάρχει έλλειψη βιβλιογραφίας που να

περιγράφει την επικοινωνιακή υποδομή και τα πρωτόκολλα που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για το σκοπό αυτό. Με βάση την κατανόηση των συγγραφέων, η προηγούμενη έρευνα για τα έξυπνα δίκτυα επικεντρώθηκε κυρίως στις τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών (ΤΠΕ) που απαιτούνται για εφαρμογές μέτρησης (AMI) (Kabalcı, 2016) και την ανταλλαγή δεδομένων σε επίπεδο χρησιμότητας (Gungor et al., 2011). Ωστόσο, η εφαρμογή έξυπνων μετατροπέων δεν λαμβάνει ιδιαίτερη προσοχή όταν συζητείται η επικοινωνία στα MG (Ahmed et al., 2014; Marzal et al., 2017). Ως αποτέλεσμα, η βιβλιογραφία δεν καλύπτει εκτενώς τις έρευνες γύρω από τις υποδομές επικοινωνίας και τα πρωτόκολλα που περιλαμβάνονται σε έξυπνους μετατροπείς για συνεργατική λειτουργία. Δεδομένων των πρόσφατων ενημερώσεων για το πρότυπο IEEE 1547 – 2018, είναι σημαντικό να αντιμετωπιστούν οι απαιτήσεις των πρωτοκόλλων διαλειτουργικότητας για συνεργατική λειτουργία και δικτυακό έλεγχο. Αυτή η συζήτηση είναι απαραίτητη για τη δημιουργία της βάσης αυτής της μελέτης, όπως τονίστηκε από τους Zhang και Ma (2012). Ως εκ τούτου, η παρούσα εργασία στοχεύει να διερευνήσει τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που τονίζονται στο IEEE 1547 - 2018, καθώς αποτελούν τις πιθανές επιλογές για εφαρμογή σε πρακτικά σενάρια που περιλαμβάνουν συνεργασία μεταξύ μετατροπέων.

## **1.1 Στρατηγικές Συνεταιρισμού Ελέγχου και Χρήση Συνδέσμων Διαβίβασης Δεδομένων**

Η έννοια της συντονισμένης λειτουργίας των έξυπνων μετατροπέων περιλαμβάνει την κατεύθυνσή τους προς έναν κοινό στόχο, ο οποίος συχνά περιλαμβάνει τη μεγιστοποίηση της εξαγωγής ισχύος από το MG. Επιπλέον, αυτή η συντονισμένη λειτουργία παρέχει βοήθεια στο δίκτυο σε μη κανονικές καταστάσεις και βελτιώνει την ποιότητα ισχύος. Συγχρόνως, απαιτούνται διάφορες τεχνικές ελέγχου ανάλογα με τη μέθοδο οδήγησης των μετατροπέων (Han et al., 2016).

Παράλληλα, η συνεργατική λειτουργία αυτών των μετατροπέων συχνά προορίζεται να τηρεί μια κεντρική, καταμεμημένη ή αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική. Επιπλέον, η συνεργασία μεταξύ των μετατροπέων εδραιώνεται με την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των παραγόντων, όπως τα σημεία ρύθμισης τάσης, ρεύματος, ισχύος και ελέγχου.

Σε σχέση με την αρχιτεκτονική επικοινωνίας, η συνεργατική λειτουργία μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο κύριες μεθόδους που δίνουν έμφαση είτε στον συγκεντρωτισμό είτε στην αποκέντρωση της σχετικής επεξεργασίας δεδομένων και, στη συνέχεια, στους εποπτευόμενους αλγόριθμους ελέγχου (Cheng et al., 2018; Han et al., 2017). Σ' αυτήν την αρχική ταξινόμηση, η επικοινωνία είναι απαραίτητη για τους τοπικούς μετατροπείς να επικοινωνούν με έναν κεντρικό ελεγκτή (CC, Central

Controller). Ο σκοπός αυτής της επικοινωνίας είναι να ζητήσει σημεία ρύθμισης ελέγχου και να λάβει ανατροφοδότηση για να καθοδηγήσει τις λειτουργίες τους. Αυτή η αλληλεπίδραση έχει συζητηθεί σε μελέτες των Brandao et al. (2017), Guo et al. (2015) και Zhang & Ma (2012). Επιπλέον, ο CC θεωρείται ως η κύρια μονάδα, ενώ οι μετατροπείς λειτουργούν ως δευτερεύοντες ελεγκτές επικοινωνίας (Brandao et al., 2017). Αυτό το φαινόμενο προκύπτει από τη χρήση της μετάδοσης δεδομένων από σημείο σε σημείο (P2P, Point to Point) με περιορισμένο εύρος ζώνης (Held, 2000).

Το P2P είναι μια θεμελιώδης τεχνική επικοινωνίας που περιλαμβάνει άμεσες επαφές μεταξύ του κεντρικού ελεγκτή (αναφέρεται ως διακομιστής) και κάθε μεμονωμένου καταναμημένου μετατροπέα (αναφέρεται ως πελάτης). Η επικοινωνία P2P διαφέρει από τη δικτύωση peer-to-peer, καθώς η τελευταία, όπως περιγράφεται από τον Held (2000), δεν χρειάζεται κεντρικό διακομιστή για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ των ελεγκτών. Αυτό επιτρέπει σε κάθε μονάδα επικοινωνίας να λειτουργεί τόσο ως πελάτης όσο και ως διακομιστής. Τα εναλλακτικά συνεργατικά συστήματα ελέγχου στοχεύουν στη μείωση της καθυστέρησης, ελαχιστοποιώντας την εξάρτηση από την επικοινωνία μεταξύ ομότιμων. Αυτό συμβαίνει επειδή χρησιμοποιείται σημαντικός χρόνος ώστε ένας μεγάλος αριθμός μετατροπέων να αλληλεπιδράσει με τον κεντρικό ελεγκτή με διαδοχικό τρόπο. Επομένως, ορισμένα συστήματα προτείνουν επιλογές επικοινωνίας, όπως η δυνατότητα στο CC να εκπέμπει γενικές λειτουργικές αναφορές ως ανατροφοδότηση ελέγχου σε όλους τους μετατροπείς (Brandao et al., 2017; Caldognetto et al., 2015).

Εναλλακτικά, μια άλλη μέθοδος επικοινωνίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η τεχνολογία Point-to-MultiPoint (PMP) (Held, 1999). Αυτή η τεχνολογία περιλαμβάνει τη συγκέντρωση της επεξεργασίας δεδομένων στο CC μέσω ενός κοινού δικτύου. Όλοι οι μετατροπείς έχουν ταυτόχρονη πρόσβαση στο ίδιο κανάλι επικοινωνίας που φέρει τις αναφορές λειτουργικού ελέγχου. Ουσιαστικά, η μέθοδος μπορεί να ταξινομηθεί ως κεντρική, καθώς βασίζεται στην επικοινωνία με έναν κεντρικό αντιπρόσωπο ως κρίσιμο στοιχείο της συντονισμένης λειτουργίας των μετατροπέων.

Η δεύτερη στρατηγική, γνωστή ως αποκεντρωμένες μέθοδοι, βασίζεται κυρίως στον έλεγχο της πτώσης. Αυτή η μέθοδος ελέγχου, όπως περιγράφεται από τους Han et al. (2017), Tayab et al. (2017) και Busarello et al. (2018), δίνει τη δυνατότητα στους μετατροπείς να λειτουργούν παράλληλα χωρίς την ανάγκη συνεχούς επικοινωνίας. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη για στιγμιαία σύνδεση επικοινωνίας για τη συνολική λειτουργία του μικροδικτύου (MG). Ωστόσο, αρκετές τεχνικές που βασίζονται στο droop έχουν κάποια μειονεκτήματα όσον αφορά την αποτελεσματική διαχείριση της αντιστάθμισης μεταξύ της ακριβούς κατανομής ισχύος και των διακυμάνσεων στα επίπεδα συχνότητας ή/και τάσης (Guerrero et al., 2011). Έτσι, άλλες τεχνικές που βασίζονται στο droop χρησιμοποιούν συνδέσεις επικοινωνίας για να δημιουργήσουν βρόχους ελέγχου στα δευτερεύοντα ή/και τριτοβάθμια ιεραρχικά

επίπεδα προκειμένου να παρακάμψουν αυτούς τους περιορισμούς (Zhang & Ma, 2012; Han et al., 2018). Σε αυτή τη μελέτη, μια στρατηγική αποκεντρωμένου ελέγχου ορίζεται ως μια μέθοδος όπου τα κανάλια επικοινωνίας είναι ανεξάρτητα και χρησιμοποιούνται για θεμελιώδεις συνεργατικές εργασίες ελέγχου, όπως η κατανομή ενεργού και αντιδραστικής ισχύος. Για να βελτιωθούν οι αποκεντρωμένες τεχνικές που περιγράφονται παραπάνω, είναι ίσως απαραίτητη η εμπλοκή με έναν κεντρικό ελεγκτή, όπως υποστηρίζεται από τους Han et al. (2018). Επιπλέον, ενδέχεται να απαιτείται επικοινωνία για τους μετατροπείς για κοινή χρήση δεδομένων μεταξύ τους, με στόχο τη βελτίωση της συνολικής λειτουργίας του μικροδικτύου. Ως εκ τούτου, σε τέτοιες περιπτώσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια υποδομή που βασίζεται είτε σε Peer-to-Peer (P2P) είτε σε επικοινωνία Point-to-MultiPoint (PMP).

Επίσης, οι μετατροπείς μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα μέσω καινοτόμων μεθόδων έμμεσης αλληλεπίδρασης μεταξύ ελεγκτών, όπως η προσέγγιση του Διαδικτύου των πραγμάτων (IoT). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της πρόσβασης σε διακομιστές cloud ή με τη χρήση της έννοιας του Energy Internet (Harmon et al., 2018; Sun et al., 2015). Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτές οι έμμεσες ιδέες μπορεί να ταξινομηθούν ως κεντρικές, κατακεντρωμένες ή αποκεντρωμένες ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο οι μετατροπείς συνδέονται με τους διακομιστές cloud του διαδικτύου. Οι προσεγγίσεις ελέγχου που βασίζονται σε συμφωνία, όπως περιγράφεται από τους Qin et al. (2017), καταλαμβάνουν μια μέση λύση μεταξύ της κεντρικής και της αποκεντρωμένης λειτουργίας. Αυτό συμβαίνει επειδή αυτά τα συστήματα χρειάζονται οι μετατροπείς για να καταλήξουν σε συμφωνία μέσω μιας διαδικασίας συναινετικής σύγκλισης. Αυτές οι τεχνικές είναι αποκεντρωμένες, καθώς δεν απαιτούν έναν κεντρικό ελεγκτή για την τοπική ρύθμιση των μετατροπέων. Ωστόσο, εξαρτώνται από συνδέσμους επικοινωνίας χαμηλής καθυστέρησης για την επίτευξη του συνεργατικού ελέγχου. Τυπικά, η επικοινωνία για τον μηχανισμό συναίνεσης δημιουργείται, επιτρέποντας στους διασκορπισμένους ελεγκτές επικοινωνίας να συνδέονται με περιορισμένο αριθμό γειτονικών τους, χρησιμοποιώντας γραμμές δεδομένων P2P, PMP ή Peer-to-Peer. Από όλες τις τεχνικές συνεργατικού ελέγχου που περιγράφηκαν, υπάρχει ομόφωνη συναίνεση σχετικά με την ανάγκη και τη χρήση της υποδομής ΤΠΕ. Δεδομένου ότι οι μετατροπείς εντός των MG βρίσκονται μακριά ο ένας από τον άλλο ή από τον κεντρικό ελεγκτή (CC), η προσέγγιση ελέγχου θα πρέπει να μπορεί να λειτουργεί αποτελεσματικά, χρησιμοποιώντας κανάλια επικοινωνίας χαμηλού εύρους ζώνης.

Η επικοινωνία χαμηλού εύρους ζώνης αναφέρεται σε μια μέθοδο μετάδοσης δεδομένων με αργή ταχύτητα μεταφοράς, συνήθως έως μερικές εκατοντάδες kilobits ανά δευτερόλεπτο, μεταξύ των οργανισμών που εμπλέκονται στην επικοινωνία (Held, 2000). Αυτό ισχύει ανεξάρτητα από το συγκεκριμένο φυσικό επίπεδο που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ ελεγκτών,

όπως ασύρματη, οπτική ίνα ή χαλκού (Ethernet). Εάν μια τεχνική, είτε είναι κεντρική είτε αποκεντρωμένη, απαιτεί την αποστολή σημαντικού όγκου δεδομένων σε ελεγκτές επικοινωνίας, μπορεί να καταστεί μη πρακτική για υλοποιήσεις στον πραγματικό κόσμο. Η έλλειψη πρακτικότητας μπορεί να προκύψει ειδικά λόγω των εγγενών καθυστερήσεων και της καθυστέρησης μετάδοσης δεδομένων που υπάρχουν για όλα τα αναφερόμενα συστήματα επικοινωνίας (Held, 1999). Επιπλέον, αν και η ερευνητική βιβλιογραφία παρέχει μόνο μια συνοπτική περιγραφή, είναι απαραίτητο η διεπαφή επικοινωνίας χαμηλού ρυθμού bit που καθορίζεται στους μετατροπείς να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις διαλειτουργικότητας που έχουν συμπεριληφθεί πρόσφατα σε πρότυπα, όπως το IEEE 1547-2018 (IEEE, 2018). Συμπερασματικά, οι προηγούμενες μελέτες (Han et al., 2016; Cheng et al., 2018; Han et al., 2017; Tayab et al., 2017; Brandao et al., 2017; Guo et al., 2015; Zhang & Ma, 2012; Fang et al., 2012) παρέχουν μια επιφανειακή περιγραφή της σύνδεσης επικοινωνίας ως καναλιού χαμηλού εύρους ζώνης. Δεν προσδιορίζουν ποιο από τα τρία πρωτόκολλα που προτείνονται στο IEEE 1547-2018 (SunSpec, DNP3, SEP2) θα πρέπει να χρησιμοποιείται με βάση τις ειδικές απαιτήσεις επικοινωνίας κάθε επιπέδου ελέγχου στη μέθοδο. Επομένως, το επόμενο μέρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά καθενός απ' αυτά τα τρία πρωτόκολλα και εισάγει μια συζήτηση σχετικά με τη χρήση τους σε διάφορα επίπεδα εφαρμογής, με ιδιαίτερη έμφαση στη συνεργατική λειτουργία των μετατροπέων.

## **1.2 Επικοινωνιακές Υποδομές και Πρωτόκολλα Συνεταιρισμού Έξυπνου Inverter**

Οι νέες αναθεωρήσεις που περιγράφονται στο πρότυπο IEEE 1547-2018 αφορούν συγκεκριμένα τη συνδεσιμότητα και τη διαλειτουργικότητα των συνδεδεμένων στο δίκτυο μετατροπέων. Αυτές οι βελτιώσεις δίνουν έμφαση στην αλληλεπίδραση μεταξύ των ίδιων των μετατροπέων και με άλλες συσκευές. Οι κύριες τροποποιήσεις σ' αυτόν τον κανονισμό εισάγουν την εφαρμογή έξυπνων μετατροπέων. Αυτό επιτυγχάνεται, απαιτώντας από αυτούς τους μετατροπείς να παρέχουν βοηθητικές υπηρεσίες, όπως η ικανότητα να αντέχουν σε μη φυσιολογικές συνθήκες τάσης/συχνότητας και να ρυθμίζουν ενεργά την τάση μέσω προσαρμογών άεργου ισχύος (IEEE, 2018). Επιπλέον, οι μετατροπείς πρέπει να παρέχουν μια διεπαφή επικοινωνίας. Σύμφωνα με τη σύσταση IEEE 1547-2018, οι καταναμημένοι ενεργειακοί πόροι (DER) απαιτούνται για την εκτέλεση λειτουργιών υποστήριξης δικτύου, χρησιμοποιώντας τοπικές μετρήσεις και πρέπει να διαθέτουν διεπαφές διαλειτουργικότητας. Ως αποτέλεσμα, ο τομέας της καταναμημένης παραγωγής είναι πιθανό να δώσει προτεραιότητα στις υπηρεσίες που βασίζονται στην επικοινωνία (Hoke et al., 2018). Για την ακρίβεια, οι λειτουργίες που βασίζονται στην επικοινωνία σε μικροδίκτυα (MGs) παρέχουν

ακριβή και διαχειρίσιμη διαχείριση ενέργειας, οδηγώντας σε αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος (Hoke et al., 2018).

Προκειμένου να επικοινωνούν αποτελεσματικά, οι μετατροπείς πρέπει να διαθέτουν την ικανότητα να αλληλεπιδρούν με εξωτερικές οντότητες όπως άλλους μετατροπείς, τον CC ή συσκευές μέτρησης. Αυτή η επικοινωνία διευκολύνεται μέσω της ανταλλαγής πληροφοριών, χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο πακέτων δεδομένων. Αυτή η απαίτηση ισχύει και για τα τρία πρωτόκολλα, δηλαδή το SunSpec, το DNP3 και το SEP2, με ιδιαίτερη έμφαση στα χαρακτηριστικά επικοινωνίας τους.

Είναι επίσης σημαντικό να κατανοήσουμε ότι η δομή που περιγράφεται παρακάτω δεν επηρεάζεται από τη συγκεκριμένη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων σε επίπεδο πρωτοκόλλου. Η επικοινωνία θα πρέπει να περιλαμβάνει δεδομένα που εμπίπτουν σε μία από τις τέσσερις κατηγορίες: ετικέτα της συσκευής, δεδομένα διαμόρφωσης, μέτρηση παρακολούθησης και πληροφορίες διαχείρισης. Κατά την έναρξη μιας νέας επαφής επικοινωνίας μεταξύ δύο ελεγκτών, κάθε μετατροπέας πρέπει να συλλέξει ένα πακέτο δεδομένων που είναι οργανωμένο ανάλογα με τις ακόλουθες πληροφορίες:

**A) Πληροφορίες που εμφανίζονται σε μια ετικέτα της συσκευής:** Αυτά τα δεδομένα χαρακτηρίζονται από τη φύση τους μόνο για ανάγνωση και περιλαμβάνουν τα εγγενή στοιχεία της συσκευής πληροφορίες. Οι εμπορικές πληροφορίες του μετατροπέα περιλαμβάνουν λεπτομέρειες όπως το μοντέλο, τον κατασκευαστή, τον σειριακό αριθμό, καθώς και τεχνικά δεδομένα που σχετίζονται με την ονομαστική και μέγιστη ενεργή, άεργη και φαινομενική ισχύ του και τις ονομασίες τάσης AC. Αυτές οι προδιαγραφές περιγράφονται στα πρότυπα IEEE (2018). Αυτή η κατηγορία περιέχει δεδομένα που μπορούν μόνο να διαβαστούν και όχι να τροποποιηθούν. Προορίζεται να χρησιμοποιηθεί από έναν κεντρικό ελεγκτή για τον υπολογισμό των λειτουργικών σημείων ρύθμισης, όπως φαίνεται στις μελέτες των Brandao et al. (2017) και Caldognetto et al. (2015). Ωστόσο, το εν λόγω πεδίο του πακέτου δεδομένων δεν είναι κατάλληλο για εγγραφή. Αυτό το τμήμα της επικοινωνιακής υποδομής επιτρέπει την ερμηνεία διαφόρων συσκευών που ανταλλάσσουν δεδομένα. Για παράδειγμα, οι κεφαλίδες δεδομένων μπορούν να προσδιορίσουν εάν ο ελεγκτής επικοινωνίας είναι μετατροπέας (με αναγνωριστικό 1XX), σύστημα αποθήκευσης (με αναγνωριστικό 8XX) ή άλλος τύπος συσκευών (SolarEdge SunSpec Alliance, 2019). Αυτή η δυνατότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απλοποίηση της κατασκευής αλγορίθμων ελέγχου για συνεργατικές στρατηγικές που χρειάζονται προηγούμενη γνώση των ελεγκτών επικοινωνίας.



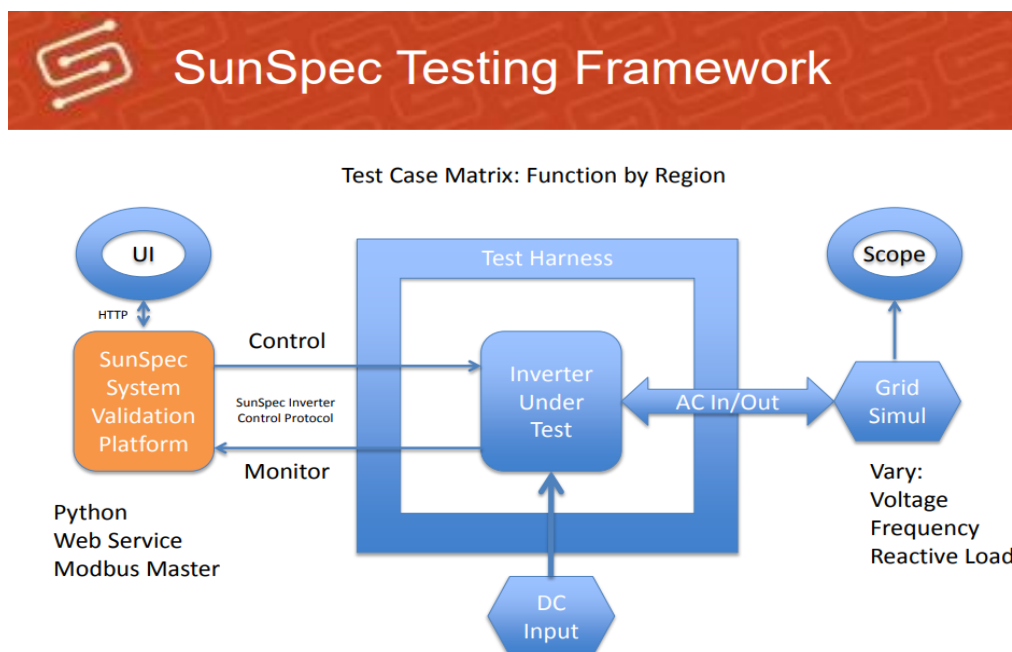
**Β) Πληροφορίες διαμόρφωσης:** Αυτή η κατηγορία επιτρέπει την τροποποίηση των παραμέτρων που καθορίζουν τις πραγματικές δυνατότητες λειτουργίας του μετατροπέα. Αυτές οι ρυθμίσεις διαμορφώνονται αρχικά με βάση τις τιμές που παρέχονται στις πληροφορίες της ετικέτα της συσκευής. Αυτό σημαίνει ότι ο χειριστής MG έχει τη δυνατότητα να τροποποιήσει τα χαρακτηριστικά του μετατροπέα, περιορίζοντας τις καθορισμένες τιμές του και εισάγοντας εναλλακτικές πληροφορίες σε αυτό το συγκεκριμένο τμήμα του πακέτου επικοινωνίας. Επομένως, όταν ο μετατροπέας προσδιορίζει ονομαστικές τιμές που διαφέρουν από αυτές που εμφανίζονται αρχικά στην ετικέτα της συσκευής, είναι απαραίτητο ο μετατροπέας να τροποποιήσει τη λειτουργία του. Αυτή η δυνατότητα μπορεί να είναι χρήσιμη κατά τον σχεδιασμό μιας συγχρονισμένης λειτουργίας για τον περιορισμό της εξόδου των μετατροπέων που βρίσκονται σε κρίσιμες θέσεις όπου θα μπορούσαν να ενεργοποιηθούν συντονισμοί ή άλλα προβλήματα ποιότητας ισχύος. Για τη μετάδοση πρόσθετων ποσοτήτων πέρα από τις βασικές που περιλαμβάνονται ήδη στο IEEE 1547-2018, μπορούν να εφαρμοστούν κάποιες στρατηγικές. Αυτές οι στρατηγικές περιλαμβάνουν την ανταλλαγή πακέτων δεδομένων μεταξύ των συμμετεχόντων ελεγκτών, όπου συγκεκριμένα πεδία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εισαγωγή πληροφοριών όπως τα ρεύματα αιχμής (Alonso et al., 2019) και οι υπολογισμοί των αρμονικών δυνάμεων (Han et al., 2017). Το στοιχείο "Πληροφορίες παρακολούθησης" του πακέτου δεδομένων περιέχει κυρίως τις πιο πρόσφατες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από τον μετατροπέα. Δεν είναι δυνατή η τροποποίηση ή η εγγραφή δεδομένων σ' αυτήν την περιοχή. Συνήθως, αυτές οι πληροφορίες περιλαμβάνουν την ενεργό και άεργο ισχύ, την τάση και τη συχνότητα, την κατάσταση φόρτισης οποιασδήποτε συσκευής αποθήκευσης ενέργειας και μερικούς επιπλέον αριθμούς για λόγους παρακολούθησης (IEEE, 2018). Επιπλέον, τα δεδομένα που μεταδίδονται σ' αυτήν την ενότητα του πακέτου περιέχουν τα θεμελιώδη ηλεκτρικά μεγέθη που είναι απαραίτητα για τις περισσότερες στρατηγικές ελέγχου που χρησιμοποιούν την επικοινωνία (Han et al., 2016; Cheng et al., 2018; Han et al., 2017; Tayab et al., 2017, Brandao et al., 2017, 2015).

**Γ) Πληροφορίες που σχετίζονται με τη διοίκηση μιας συγκεκριμένης οντότητας ή οργανισμού:** Αυτή η κατηγορία επιτρέπει τον χειρισμό των ρυθμίσεων λειτουργίας και λειτουργίας του μετατροπέα μέσω λειτουργιών ανάγνωσης και εγγραφής. Σε αυτό το σύστημα, διάφορα χαρακτηριστικά όπως η λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος, σημεία καμπύλης ενεργού/άεργου ισχύος, παράμετροι πτώσης συχνότητας και άλλα μπορούν να τροποποιηθούν για τον έλεγχο της λειτουργίας του μετατροπέα σύμφωνα με συγκεκριμένες απαιτήσεις. Έτσι, οι τεχνικές που χρησιμοποιούν τον έλεγχο της πτώσης ισχύος, όπως αυτές που προτείνονται από τους Han et al. (2017), Zhang & Ma (2012) και Busarello et al. (2018), έχουν τη δυνατότητα να χειρίζονται

απευθείας τα σημεία ρύθμισης ελέγχου εγγραφής μέσα σε αυτό το συγκεκριμένο τμήμα του πακέτου επικοινωνίας. Το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης μετατροπέων που συμμορφώνονται με το πρότυπο IEEE 1547-2018 για τις τεχνικές συνεργατικού ελέγχου είναι η τυποποίηση των μορφών πακέτων δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην επικοινωνία. Η ερμηνεία των μεταφερόμενων πληροφοριών γίνεται ευκολότερη με την τήρηση συγκρίσιμων μοτίβων δομής δεδομένων. Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας SunSpec, DNP3 και SEP2 παρουσιάζονται εδώ για να δείξουν τα χαρακτηριστικά και την καταλληλότητά τους για την καταναμημένη λειτουργία των μετατροπέων.

### 1.3 Πρωτόκολλο SunSpec Modbus

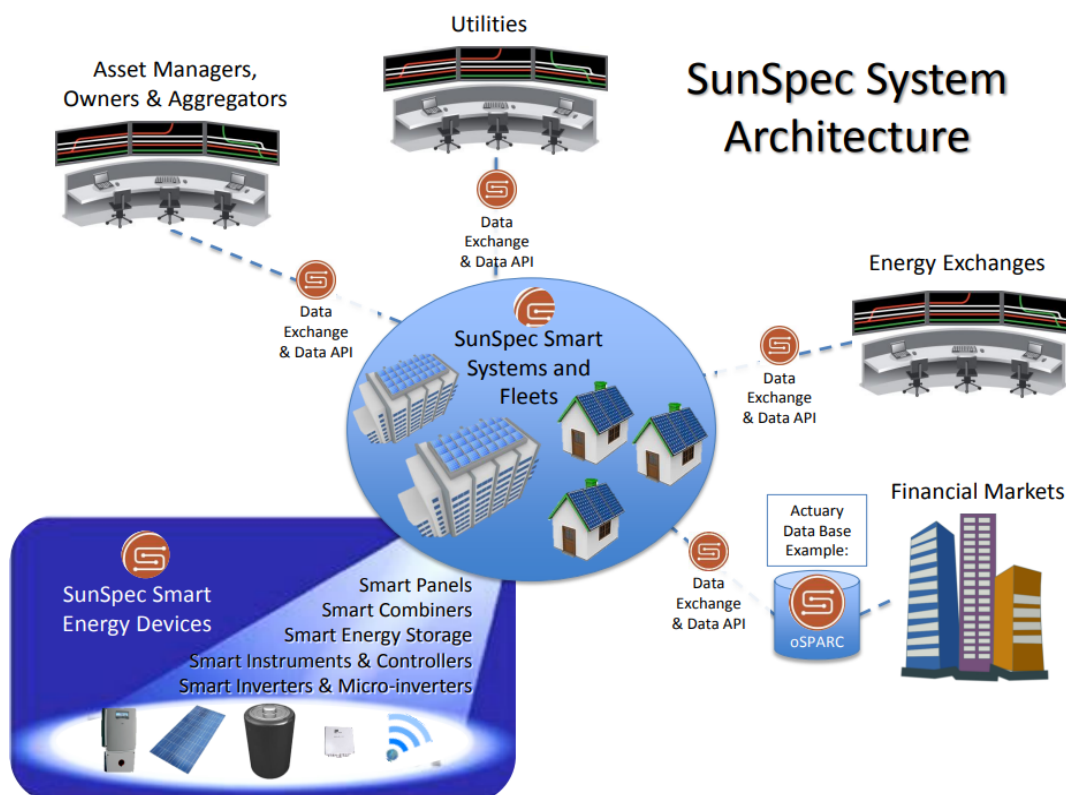
Το πρωτόκολλο SunSpec δημιουργήθηκε από την SunSpec Alliance, μια κοινοπραξία που αποτελείται από κατασκευαστές, προγραμματιστές και εμπορικούς παρόχους. Ο κύριος στόχος του είναι να ορίσει ένα πλαίσιο πληροφοριών και επικοινωνίας που προωθεί την απρόσκοπτη ενοποίηση μετατροπέων και άλλων συσκευών στον τομέα των SG (SolarEdge SunSpec Alliance, 2019; SunSpec Alliance, 2015). Το πρωτόκολλο SunSpec δίνει έμφαση κυρίως στην επικοινωνία σε επίπεδο συσκευής και δεν έχει σχεδιαστεί ειδικά για ομαδοποίηση ή δεδομένα σε επίπεδο βοηθητικού προγράμματος. Επομένως, μπορεί να χρησιμεύσει ως εναλλακτική επιλογή για την τοπική μετάδοση πληροφοριών μεταξύ των μετατροπέων και τις αλληλεπιδράσεις τους με ένα CC, όπως εμφανίζεται στην εικόνα 2.



Εικόνα 2 Δομή πρωτοκόλλου Sunspec (SunSpec, 2019)

Το εν λόγω πρωτόκολλο εφαρμόζεται κυρίως στο πρωτόκολλο εφαρμογής, το οποίο περιγράφεται εκτενώς στα έγγραφα SolarEdge SunSpec Alliance (2019) και SunSpec Alliance (2015) (Εικόνα 3). Επιπλέον, το IEEE (2018) καθορίζει περαιτέρω τεχνικά χαρακτηριστικά που πρέπει να τηρεί ως υποχρεωτική απαίτηση ένας μετατροπέας που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο SunSpec. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν:

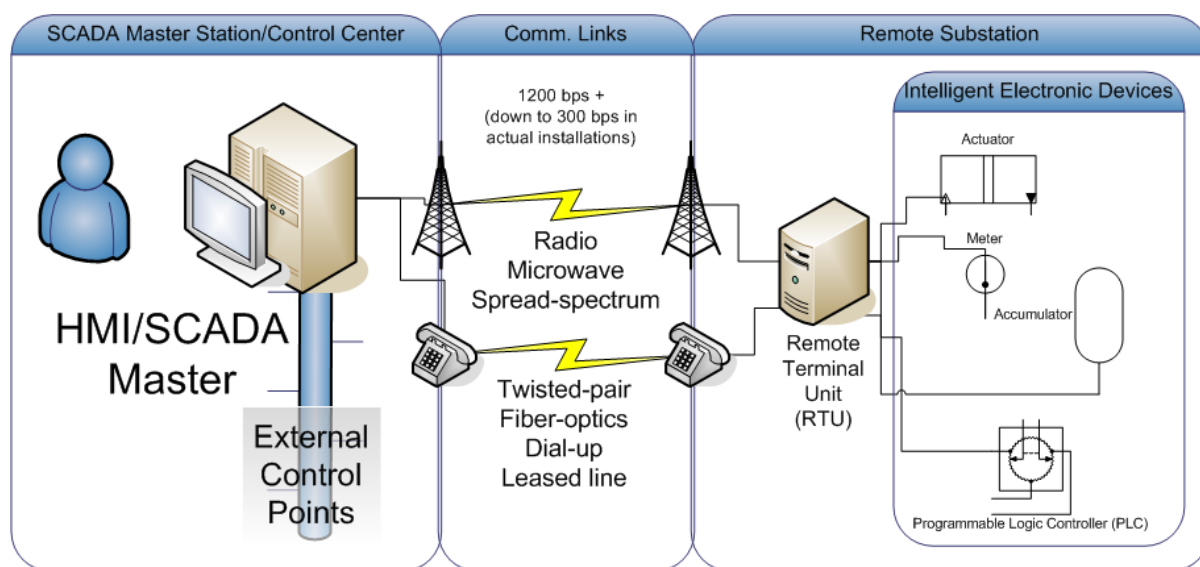
- i) Το πρωτόκολλο TCP/IP χρησιμοποιείται για την υλοποίηση επικοινωνίας στο επίπεδο μεταφοράς του μοντέλου OSI.
- ii) Το φυσικό επίπεδο μπορεί να συνδεθεί είτε μέσω σύνδεσης RS-485 είτε μέσω σύνδεσης Ethernet. Αυτό το πρωτόκολλο επιτρέπει στους μετατροπείς να χρησιμοποιούν επικοινωνία χαμηλής ταχύτητας δεδομένων, η οποία περιλαμβάνει τη μετάδοση στενής ζώνης με ρυθμούς baud που κυμαίνονται από 9600 bps έως 115200 bps (SolarEdge SunSpec Alliance, 2019). Αυτό το εύρος ρυθμών baud είναι αρκετό για να καλύψει τις ανάγκες μεταφοράς δεδομένων των περισσότερων στρατηγικών συνεργατικού ελέγχου που έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογή σε μικροδίκτυα χαμηλής τάσης μικρού έως μεσαίου μεγέθους (CIGRE Working Group C6.04, 2014).



Εικόνα 3 Αρχιτεκτονική συστήματος (SunSpec Alliance., 2019)

## 1.4 Το πρωτόκολλο DNP3

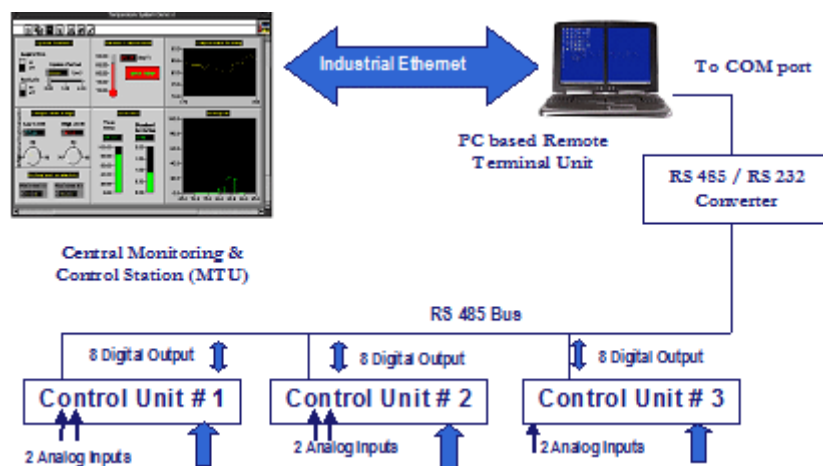
Το πρωτόκολλο DNP3, γνωστό και ως πρότυπο IEEE 1815 – 2012, είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο ανοιχτό πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται κυρίως για τη μεταφορά δεδομένων στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας. Εκτιμάται ιδιαίτερα για τα ειδικά κατασκευασμένα χαρακτηριστικά του και την ισχυρή αντοχή του σε παρεμβολές θορύβου. Ωστόσο, έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τη σύνδεση συσκευών DER σε συστήματα εποπτείας βοηθητικών προγραμμάτων, όπως το SCADA (Εικόνα 4). Σύμφωνα με το IEEE (2012), ορισμένες αξιοσημείωτες πτυχές για την εφαρμογή αυτού του πρωτοκόλλου, ειδικά για το σκοπό του συνεργατικού ελέγχου των μετατροπέων, περιλαμβάνουν τη μετάδοση, δεδομένα με χρονική σήμανση και ακριβή χρονικό συγχρονισμό. Πιο αναλυτικά, αυτό το πρωτόκολλο που περιλαμβάνεται στα πρότυπα IEEE (2018), είναι η καταλληλότερη μέθοδος για τη μετάδοση ενός μόνο μηνύματος σε πολλούς καταναμημένους μετατροπείς. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτο για στρατηγικές, όπως φαίνεται στις μελέτες που διεξήχθησαν από τους Brandao et al. (2017) και Caldognetto et al. (2015).



Εικόνα 4 Διάγραμμα Αρχιτεκτονικής SCADA και Επικοινωνίας με Απομακρυσμένους Υποσταθμούς μέσω Εξωτερικών Συνδέσμων και Τηλεμετρικών Μονάδων (Abdi et al., 2016)

Επιπλέον, η ακριβής χρονική σήμανση μπορεί να επιτευχθεί ανεξάρτητα από τη φύση των δεδομένων που αποστέλλονται. Ενώ πρωτόκολλα όπως το SunSpec μπορεί να καταγράφουν χρονικές σημάνσεις, η ακρίβειά τους μπορεί να διαφέρει σε σύγκριση με το DNP3, ανάλογα με παράγοντες όπως η μορφή

δεδομένων ή ο ρυθμός μετάδοσης επικοινωνίας. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι επίσης σημαντικό για τους Brandao et al. (2017) και Caldognetto et al. (2015).



Εικόνα 5 Αρχιτεκτονική SCADA (Abdi et al., 2016)

Για να βελτιωθεί η συντονισμένη λειτουργία των μετατροπέων, είναι επίσης απαραίτητο να ευθυγραμμιστεί η επικοινωνία τους έγκαιρα, χρησιμοποιώντας μεθόδους συγχρονισμού, με βάση τα χαρακτηριστικά της στρατηγικής ελέγχου. Επομένως, αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να είναι κατάλληλο για μεθοδολογίες όπως αυτή που χρησιμοποιείται από τους Golsorkhi et al. (2017).

Η υποδομή του πρωτοκόλλου DNP3 λειτουργεί κυρίως στα επίπεδα εφαρμογής και ζεύξης δεδομένων του μοντέλου OSI. Ενώ τηρεί τις κατηγορίες που περιγράφονται στο IEEE (2018), αυτή η προσέγγιση δίνει έμφαση κυρίως στην οργάνωση των δεδομένων σε ομάδες με βάση τον τύπο τους (όπως δυαδικό, αναλογικό, μετρητή κ.λπ.) και κατά πόσο χρησιμεύουν ως είσοδοι (όπως η ανάγνωση ενός στοιχείου ελέγχου μεταβλητή) ή εξόδους (όπως εντολή σε μετατροπέα) μέσα σε ένα πακέτο επικοινωνίας. Η μετάδοση δεδομένων καθορίζεται από συμβάντα, τα οποία ορίζονται από μια ουσιαστική αλλαγή στο σύστημα ή από μια σκόπιμη ενεργοποίηση στα κανάλια επικοινωνίας (IEEE, 2012). Η συμμόρφωση μ' αυτό το πρωτόκολλο περιορίζεται στην υλοποίηση TCP/IP και μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω μεθόδων Ethernet, όπως ορίζεται από το IEEE (2018).

Επιπλέον, σύμφωνα με την αξιολόγηση που διενεργήθηκε από τους Orega et al. (2015), το DNP3 έχει τη δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων με καθυστερήσεις που κυμαίνονται από 3 έως 100 ms. Η συγκεκριμένη διάρκεια της καθυστέρησης εξαρτάται από το είδος του μηνύματος που μεταδίδεται και τις αποστάσεις μεταξύ των κόμβων επικοινωνίας. Αυτό περιλαμβάνει επίσης τις αναμενόμενες καθυστερήσεις για τη μεταφορά δεδομένων εντός των MG, οι οποίες μπορεί να φτάσουν έως και τα 100 ms, όπως αναφέρεται από τους Angioni et al. (2015).

Συνοπτικά, αυτό το πρωτόκολλο είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την εφαρμογή συνεργατικών στρατηγικών, ιδιαίτερα για τεχνικές που χρειάζονται έναν κεντρικό ελεγκτή. Αυτός ο ελεγκτής μπορεί να παρακολουθεί και να αλλάζει τα δεδομένα του μετατροπέα, παρόμοια με τον τρόπο λειτουργίας των εφαρμογών που σχετίζονται με βοηθητικές εφαρμογές. Το πρωτόκολλο SEP2, γνωστό ως πρότυπο IEEE 2030.5 (IEEE, 2018), είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη διασφάλιση της αποτελεσματικότητας της μετάδοσης δεδομένων για συστήματα που βασίζονται σε Κατανεμημένους Ενεργειακούς Πόρους (DER). Εκτός από το ότι περιλαμβάνεται στο IEEE (2018), έχει ήδη χρησιμοποιηθεί ως τυπικό πρωτόκολλο σε εξέχουσες πραγματικές εφαρμογές έξυπνων μετατροπέων και κανονισμούς όπως ο Κανόνας 21 (SunSpec Alliance, 2018). Αυτό το πρωτόκολλο δίνει έμφαση στις μεθόδους και το σύστημα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για την αποστολή δεδομένων που σχετίζονται με την παρακολούθηση και τον έλεγχο των μετατροπέων. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτής της τεχνολογίας συνδέονται με το επίπεδο εφαρμογής του μοντέλου OSI. Χρησιμοποιεί το TCP/IP για την επικοινωνία με τα επίπεδα μεταφοράς και διαδικτύου, επιτρέποντας την κεντρική διαχείριση των διασκορπισμένων συσκευών (IEEE, 2018).

Μια ουσιαστική πτυχή που πρέπει να τονιστεί είναι η ικανότητά του να διαμορφώνει τις συνδέσεις μεταφοράς δεδομένων για να φιλοξενεί τόσο μεμονωμένους όσο και ομαδικούς μετατροπείς εντός του δικτύου επικοινωνίας. Επιπλέον, υπάρχουν πρόσθετα σχετικά χαρακτηριστικά που είναι σημαντικά για τη διαχείριση του ελέγχου MG (Microgrid) με τη χρήση συνεργατικών μετατροπέων. Ειδικότερα, το πρωτόκολλο μπορεί να ενσωματώσει δεδομένα τιμολόγησης ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, τα οποία είναι σημαντικά για τη βελτιστοποίηση των οικονομικών κερδών των μετατροπέων στα μικροδίκτυα. Αυτό ισχύει τόσο για τον γενικό στόχο του μικροδικτύου όσο και για τους μεμονωμένους ιδιοκτήτες κατανεμημένων ενεργειακών πόρων (DER), όπως καταδεικνύεται στις στρατηγικές των Zhang & Ma (2012) και Nutkani et al. (2014). Επιπροσθέτως, το πρωτόκολλο διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ πολλαπλών διανομέων ή κεντρικών μονάδων, επιτρέποντας τον συντονισμό συστάδων μετατροπέων σε διαφορετικά δίκτυα. Αυτό βελτιώνει τη δυνατότητα αποστολής των μικροδικτύων, όπως φαίνεται στη μελέτη των Brandao et al. (2017).

Το πρωτόκολλο έχει επίσης σχεδιαστεί για να αλληλεπιδρά με το επίπεδο διαδικτύου, καθιστώντας εύκολη την επικοινωνία με διακομιστές που βασίζονται σε cloud. Αυτό υποστηρίζει την εφαρμογή στρατηγικών όπως αυτές που προτείνονται από τους Harmon et al. (2018). Η θεμελιώδης ιδέα που οδηγεί τη διαλειτουργικότητα στο πρωτόκολλο SEP2 είναι η υλοποίηση της αρχιτεκτονικής RESTful (IEEE, 2018). Επομένως, αυτή η υποδομή επικοινωνίας εξαρτάται από μια αλληλεπίδραση διακομιστή-πελάτη στην οποία δημιουργούνται πακέτα επικοινωνίας σύμφωνα με τη δομή του

πρωτοκόλλου μεταφοράς υπερκειμένου (HTTP) (Held, 1999). Ενώ αυτό το πρωτόκολλο επιτρέπει τη λειτουργία plug & play για μετατροπείς, μπορεί επίσης να οδηγήσει σε καθυστερήσεις επικοινωνίας αρκετών δευτερολέπτων, όπως αναφέρεται από τους Goodman et al. (2017). Αυτές οι καθυστερήσεις μπορεί να μην είναι κατάλληλες για συνεργατικές στρατηγικές που εξαρτώνται από έναν κεντρικό ελεγκτή για την παροχή γρήγορης απόκρισης συχνότητας.

Όσον αφορά τις αποστάσεις επικοινωνίας, η λέξη «μικρή» αναφέρεται σε μέγιστα μήκη λίγων μόλις χιλιομέτρων, ενώ η λέξη «μεσαία» και η «μακριά» αντιστοιχούν σε αποστάσεις έως και δεκάδων και εκατοντάδων χιλιομέτρων, αντίστοιχα. Η τεχνολογική ετοιμότητα αναφέρεται στο επίπεδο ανάπτυξης και διαθεσιμότητας ενός πρωτοκόλλου σε εμπορικές λύσεις εντός της ηλεκτρικής βιομηχανίας. Η δυσκολία υλοποίησης είναι ευθέως ανάλογη με τον αριθμό των απαιτούμενων εντολών κώδικα.

Στη συνέχεια, παρέχεται μια συνοπτική εξέταση των περιορισμών σε σχέση με αυτά τα πρωτόκολλα, με ιδιαίτερη έμφαση στη χρήση τους στον συντονισμό των μετατροπέων. Ενώ τα πρότυπα και οι κανονισμοί όπως το IEEE (2018) και η SunSpec Alliance (2018) καλύπτουν τα βασικά χαρακτηριστικά των πρωτοκόλλων SunSpec, DNP3 και SEP2, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν σχετικά με τη χρήση τους στον συντονισμό κατανεμημένων μετατροπέων. Πρώτον, είναι σημαντικό να αναγνωριστεί η αξία της διαλειτουργικότητας, ανεξάρτητα από τη συγκεκριμένη χρήση αυτών των πρωτοκόλλων. Οι κατασκευαστές μετατροπέων πρέπει να διασφαλίσουν ότι παρέχουν συμβατότητα για τουλάχιστον μία από αυτές τις τεχνολογίες, προκειμένου να πληρούν τα πρότυπα συμμόρφωσης που ορίζει η IEEE (2018). Από επιχειρηματική άποψη, αυτή η απαίτηση είναι συμφέρουσα, καθώς επιτρέπει στους κατασκευαστές να επιλέξουν το πρωτόκολλο που ταιριάζει καλύτερα στα σχέδιά τους. Ωστόσο, η παρουσία πολλών τεχνολογιών πρωτοκόλλου που περιλαμβάνονται στους μετατροπείς, οι οποίοι δεν έχουν άμεση συμβατότητα μεταξύ τους, μπορεί να περιορίσει σημαντικά τη διαλειτουργικότητα. Σε πρακτικές εφαρμογές του συνεταιριστικού ελέγχου, ένα σύστημα διαχείρισης για ένα μικροδίκτυο θα λάμβανε αναμφίβολα υπόψη τους κατανεμημένους μετατροπείς από διάφορους κατασκευαστές.

Στην SunSpec Alliance (2018), προκύπτει ένας συγκρίσιμος περιορισμός, καθώς οι διεπαφές επικοινωνίας των μετατροπέων δεν είναι υποχρεωτικό να είναι συμβατές με περισσότερα από ένα πρωτόκολλα. Αντίθετα, καθιστώντας το SEP2, καθίσταται ευκολότερο να καθιερωθεί ένα πρότυπο. Επίσης, η χρήση της επικοινωνίας σε DER και SGs προκαλεί μια σημαντική ανησυχία γνωστή ως ασφάλεια στον κυβερνοχώρο (Sridhar et al., 2012).

Εκτός από τις προκλήσεις διαλειτουργικότητας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, το IEEE (2018) δεν προσδιορίζει συγκεκριμένες απαιτήσεις σχετικά μ' αυτό το ζήτημα. Αντίθετα, προτείνει ότι η ασφάλεια των δεδομένων θα πρέπει να καθοριστεί με βάση την ανάπτυξη των μετατροπών, με αμοιβαία συμφωνία μεταξύ των ιδιοκτητών DER. Η έλλειψη μιας σαφώς καθορισμένης συνθήκης περιπλέκει τη διαδικασία δημιουργίας συμπλεγμάτων μετατροπών σε MG, επειδή δεν υπάρχουν τυπικές ρυθμίσεις λειτουργίας για αξιόπιστη πρόσβαση στα δεδομένα ενός μετατροπέα. Ακόμη και μεταξύ συσκευών που χρησιμοποιούν τα ίδια πρωτόκολλα, διαφορετικοί κατασκευαστές ενδέχεται να εφαρμόσουν συγκεκριμένες ρυθμίσεις ασφάλειας στον κυβερνοχώρο που θα μπορούσαν ενδεχομένως να περιορίσουν την πρόσβαση σε πληροφορίες ελέγχου.

## **1.5 Προκλήσεις και Λύσεις στην Επικοινωνία των Έξυπνων Μετατροπών**

Η επικοινωνία μεταξύ έξυπνων μετατροπών σε κατανεμημένα ενεργειακά συστήματα (DERs) είναι κρίσιμη για την επίτευξη αποτελεσματικής διαχείρισης και βελτιστοποίησης της παραγωγής και χρήσης ενέργειας. Ωστόσο, η εφαρμογή επικοινωνιακών υποδομών για έξυπνους μετατροπείς αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις. Αυτές οι προκλήσεις σχετίζονται κυρίως με τη διαλειτουργικότητα, την κυβερνοασφάλεια, την αξιοπιστία της επικοινωνίας, την καθυστέρηση και το κόστος υλοποίησης. Παρακάτω αναλύονται οι κύριες προκλήσεις που παρουσιάζονται στην επικοινωνία των έξυπνων μετατροπών και οι προτεινόμενες λύσεις για την αντιμετώπισή τους.

Η διαλειτουργικότητα είναι μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στην επικοινωνία των έξυπνων μετατροπών. Καθώς τα κατανεμημένα ενεργειακά συστήματα περιλαμβάνουν εξοπλισμό από διαφορετικούς κατασκευαστές, υπάρχει μεγάλη ποικιλία σε πρωτόκολλα επικοινωνίας και τυποποιήσεις. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα στη συνεργασία των συσκευών, καθώς διαφορετικά πρωτόκολλα μπορεί να μην είναι συμβατά μεταξύ τους. Η έλλειψη κοινών προτύπων μπορεί να αυξήσει την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης και της συντήρησης των συστημάτων και να μειώσει την αποδοτικότητα τους.

Η σύνδεση των έξυπνων μετατροπών με δίκτυα επικοινωνίας, ιδιαίτερα με το Διαδίκτυο, τους καθιστά ευάλωτους σε επιθέσεις από κακόβουλους παράγοντες. Οι απειλές κυβερνοασφάλειας μπορεί να περιλαμβάνουν απόπειρες παραβίασης δεδομένων, επιθέσεις τύπου Denial of Service (DoS), ή ακόμα και την παραποίηση των δεδομένων που μεταδίδονται. Αυτές οι επιθέσεις μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο τη λειτουργικότητα και την ασφάλεια των ενεργειακών συστημάτων, με δυνητικά καταστροφικές συνέπειες.



Η αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων είναι κρίσιμη για τη σωστή λειτουργία των έξυπνων μετατροπέων, ειδικά σε περιπτώσεις που απαιτούν ακριβή συγχρονισμό και έλεγχο, όπως η ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας. Ωστόσο, η ποιότητα της επικοινωνίας μπορεί να επηρεαστεί από φυσικούς παράγοντες, όπως οι παρεμβολές και η απόσταση μεταξύ των συσκευών, ή από την υπερφόρτωση των δικτύων δεδομένων.

Η καθυστέρηση στην επικοινωνία μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση των έξυπνων μετατροπέων, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου απαιτείται γρήγορη απόκριση, όπως η διαχείριση φορτίων ή η απόκριση σε διακυμάνσεις του δικτύου. Οι υψηλές καθυστερήσεις μπορούν να μειώσουν την ικανότητα των συστημάτων να αντιδρούν γρήγορα και να ρυθμίζουν τη λειτουργία τους ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου.

Η ανάπτυξη και η διατήρηση αξιόπιστων επικοινωνιακών υποδομών μπορεί να είναι δαπανηρή, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές. Το κόστος υλοποίησης περιλαμβάνει όχι μόνο την εγκατάσταση του εξοπλισμού αλλά και τη συντήρηση, την αναβάθμιση και την ασφάλιση του συστήματος έναντι απειλών και δυσλειτουργιών. Η υιοθέτηση και εφαρμογή κοινών προτύπων επικοινωνίας, όπως το Πρωτόκολλο SunSpec και το DNP3, μπορεί να βελτιώσει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των διαφόρων συσκευών και συστημάτων. Αυτά τα πρότυπα παρέχουν ένα κοινό πλαίσιο για την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών κατασκευαστών, διευκολύνοντας την ενσωμάτωση και τη συνεργασία των συσκευών σε ένα ενιαίο σύστημα. Η ανάπτυξη και η εφαρμογή ισχυρών πρωτοκόλλων ασφαλείας είναι απαραίτητη για την προστασία των έξυπνων μετατροπέων από κυβερνοεπιθέσεις. Τεχνολογίες όπως το blockchain μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ασφαλή αποθήκευση και μετάδοση δεδομένων, ενώ η κρυπτογράφηση δεδομένων και η χρήση ασφαλών δικτύων μπορεί να αποτρέψει μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση και επιθέσεις (Gonzalez et al., 2018).

Η χρήση αξιόπιστων και ανθεκτικών τεχνολογιών επικοινωνίας, όπως τα δίκτυα με βάση το Ethernet ή οι οπτικές ίνες, μπορεί να μειώσει τις παρεμβολές και να αυξήσει την αξιοπιστία της μετάδοσης δεδομένων. Επιπλέον, η υιοθέτηση πρωτοκόλλων που παρέχουν μηχανισμούς επιβεβαίωσης και επανάληψης των μεταδόσεων μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια και την αξιοπιστία των επικοινωνιών.

Η χρήση προηγμένων πρωτοκόλλων που υποστηρίζουν την ταχεία ανταλλαγή δεδομένων με ελάχιστες καθυστερήσεις είναι κρίσιμη για την υποστήριξη εφαρμογών πραγματικού χρόνου. Πρωτόκολλα όπως το DNP3 έχουν σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιούν τις καθυστερήσεις και να διασφαλίζουν τον ακριβή συγχρονισμό μεταξύ των συσκευών, καθιστώντας τα ιδανικά για

εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη απόκριση. Η χρήση οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών επικοινωνίας, όπως τα ασύρματα δίκτυα χαμηλής κατανάλωσης (Low Power Wide Area Networks - LPWAN), μπορεί να μειώσει το κόστος υλοποίησης και συντήρησης των επικοινωνιακών υποδομών, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες περιοχές. Επιπλέον, η ανάπτυξη υβριδικών λύσεων που συνδυάζουν διαφορετικές τεχνολογίες επικοινωνίας μπορεί να προσφέρει μια ισορροπία μεταξύ κόστους και απόδοσης. Οι προκλήσεις στην επικοινωνία των έξυπνων μετατροπέων αποτελούν σημαντικά εμπόδια για την ευρεία υιοθέτηση και αποδοτική λειτουργία των κατανεμημένων ενεργειακών συστημάτων. Ωστόσο, με την εφαρμογή κατάλληλων λύσεων και τεχνολογιών, είναι δυνατή η βελτίωση της διαλειτουργικότητας, της ασφάλειας, της αξιοπιστίας, και της αποδοτικότητας αυτών των συστημάτων. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα των επικοινωνιακών πρωτοκόλλων και των τεχνολογιών ασφάλειας είναι κρίσιμη για την αντιμετώπιση των προκλήσεων αυτών και την προώθηση της βιωσιμότητας και της αποτελεσματικότητας των έξυπνων ενεργειακών δικτύων (IEEE, 2018).

## **2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Σημασία της διαλειτουργικότητας σε συστήματα ηλιακής ενέργειας**

Η διαλειτουργικότητα είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την πρόοδο και την ευρεία υιοθέτηση συστημάτων ηλιακής ενέργειας, επιτρέποντας την απρόσκοπτη ενοποίηση και ενισχύοντας τη συνολική απόδοση και αξιοπιστία στον τομέα των ηλιακών φωτοβολταϊκών (φωτοβολταϊκά). Αυτή η συζήτηση διερευνά τη σημασία της διαλειτουργικότητας, τις τεχνικές της πτυχές, τα οφέλη, τις προκλήσεις και τις μελλοντικές προοπτικές στο πλαίσιο των συστημάτων ηλιακής ενέργειας.

### **2.1 Σημασία της Διαλειτουργικότητας**

Η διαλειτουργικότητα σε συστήματα ηλιακής ενέργειας αναφέρεται στην ικανότητα διαφορετικών εξαρτημάτων, συσκευών και εφαρμογών λογισμικού να επικοινωνούν αποτελεσματικά και να λειτουργούν συνεκτικά μέσα σε ένα τυποποιημένο πλαίσιο. Αυτή η ικανότητα είναι απαραίτητη για την επίτευξη απρόσκοπτης ολοκλήρωσης σε διάφορα στάδια του κύκλου ζωής ενός ηλιακού φωτοβολταϊκού συστήματος, από το σχεδιασμό και την εγκατάσταση έως τη λειτουργία και τη συντήρηση.

Ο τομέας της ηλιακής ενέργειας περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα εξαρτημάτων όπως μετατροπείς, μετρητές, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και λογισμικό παρακολούθησης, που συχνά κατασκευάζονται από διαφορετικές εταιρείες. Η διαλειτουργικότητα διασφαλίζει ότι αυτά τα στοιχεία μπορούν να διασυνδεθούν και να επικοινωνούν χωρίς προβλήματα συμβατότητας, διευκολύνοντας την ομαλότερη ενοποίηση του συστήματος (SunSpec Alliance, nd). Για παράδειγμα, το πρωτόκολλο SunSpec που αναπτύχθηκε από την SunSpec Alliance ορίζει τυποποιημένα μοντέλα δεδομένων και πρωτόκολλα επικοινωνίας που επιτρέπουν τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων φωτοβολταϊκού συστήματος (SunSpec Alliance, nd). Τα τυποποιημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως το Modbus και το IEEE 1547.1 διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη βελτίωση της λειτουργικής αποτελεσματικότητας, επιτρέποντας την παρακολούθηση, τον έλεγχο και την ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μεταξύ των στοιχείων (Modbus-IDA, 2004; Kang et al., 2024). Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει στους διαχειριστές συστημάτων να βελτιστοποιούν την απόδοση, να διαγιγνώσκουν προβλήματα έγκαιρα και να εφαρμόζουν αποτελεσματικές στρατηγικές συντήρησης, μεγιστοποιώντας έτσι την παραγωγή ενέργειας και διασφαλίζοντας τη σταθερότητα του δικτύου (Gonzalez et al., 2018).

## **2.2 Τεχνικά θεμέλια**

Κεντρικό στοιχείο της διαλειτουργικότητας στα συστήματα ηλιακής ενέργειας είναι τα τυποποιημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας που καθορίζουν τον τρόπο ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ των συσκευών. Για παράδειγμα, το Modbus, ένα ευρέως διαδεδομένο πρωτόκολλο στον βιομηχανικό αυτοματισμό, διευκολύνει την απρόσκοπτη επικοινωνία μεταξύ των μετατροπέων, των μετρητών και των συστημάτων ελέγχου εποπτείας (Modbus-IDA, 2004). Επιπλέον, η ενσωμάτωση πρωτοκόλλων όπως το Modbus με συγκεκριμένα βιομηχανικά πρότυπα όπως το IEEE 1547.1 εξασφαλίζει συμβατότητα και διαλειτουργικότητα σε διάφορα εξαρτήματα φωτοβολταϊκών συστημάτων (Kang et al., 2024).

Τέλος, η διαλειτουργικότητα υποστηρίζεται περαιτέρω από προκαθορισμένα μοντέλα δεδομένων και καταχωρητές που καθορίζουν τη δομή και τη σημασιολογία των σημείων δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ των συσκευών. Αυτά τα μοντέλα εξασφαλίζουν συνέπεια και συμβατότητα, επιτρέποντας στον εξοπλισμό διαφορετικών κατασκευαστών να συνεργάζονται απρόσκοπτα σε μια εγκατάσταση ηλιακής ενέργειας (SunSpec Alliance, nd).

## **2.3 Οφέλη από τη διαλειτουργικότητα**

Με την προώθηση της διαλειτουργικότητας, τα συστήματα ηλιακής ενέργειας μπορούν να επιτύχουν βελτιωμένη αξιοπιστία και απόδοση. Τα τυποποιημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας μειώνουν τον κίνδυνο σφαλμάτων ενσωμάτωσης και ζητημάτων συμβατότητας, ενισχύοντας τη συνολική λειτουργική σταθερότητα των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων (Gonzalez et al., 2018). Αυτή η αξιοπιστία είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη των στόχων παραγωγής ενέργειας, την ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής λειτουργίας και τη διασφάλιση της συνεχούς λειτουργίας υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Συγχρόνως, η διαλειτουργικότητα μειώνει το κόστος εγκατάστασης και επιταχύνει την ανάπτυξη της αγοράς, απλοποιώντας τις διαδικασίες σχεδιασμού, εγκατάστασης και συντήρησης του συστήματος. Επιτρέπει στους ενοποιητές συστημάτων να επιλέγουν εξαρτήματα με βάση την απόδοση και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας αντί για ζητήματα συμβατότητας (SunSpec Alliance, nd). Επιπλέον, τα διαλειτουργικά συστήματα διευκολύνουν την καινοτομία και τον ανταγωνισμό μεταξύ των κατασκευαστών, οδηγώντας τις τεχνολογικές εξελίξεις και μειώνοντας το συνολικό κόστος του συστήματος (Gonzalez et al., 2018).

## **2.4 Πολυπλοκότητα ολοκλήρωσης**

Παρά τα οφέλη της, η επίτευξη της διαλειτουργικότητας σε συστήματα ηλιακής ενέργειας παρουσιάζει προκλήσεις που σχετίζονται με την πολυπλοκότητα της ολοκλήρωσης και τις δοκιμές συμβατότητας. Ειδικότερα, οι παραλλαγές στα πρότυπα υλοποίησης και τα ιδιόκτητα πρωτόκολλα μεταξύ των κατασκευαστών μπορεί να περιπλέξουν τις προσπάθειες διαλειτουργικότητας, απαιτώντας αυστηρές διαδικασίες δοκιμών και επικύρωσης (Gonzalez et al., 2018). Η ενοποίηση διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων εγείρει επίσης ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο και το απόρρητο των δεδομένων. Ως εκ τούτου, τα τυποποιημένα πρωτόκολλα πρέπει να ενσωματώνουν ισχυρά μέτρα ασφαλείας για την προστασία από απειλές στον κυβερνοχώρο και μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, προστατεύοντας τις ευαίσθητες πληροφορίες και διασφαλίζοντας την ακεραιότητα των επιχειρησιακών δεδομένων (Onunkwo et al., 2019).

## **2.5 Μελλοντικές κατευθύνσεις**

Οι μελλοντικές εξελίξεις στη διαλειτουργικότητα πιθανότατα θα επικεντρωθούν στην ενίσχυση των μέτρων ασφαλείας στο πλαίσιο τυποποιημένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Η ενσωμάτωση μηχανισμών κρυπτογράφησης, ελέγχου ταυτότητας και ελέγχου πρόσβασης θα ενισχύσει την ανθεκτικότητα της κυβερνοασφάλειας, μετριάζοντας τους κινδύνους που σχετίζονται με διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα (Onunkwo et al., 2019). Επιπλέον, η ενσωμάτωση τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης (AI) και μηχανικής μάθησης (ML) υπόσχεται την ενίσχυση της διαλειτουργικότητας στα ηλιακά συστήματα ενέργειας. Για την ακρίβεια, οι αλγόριθμοι που βασίζονται στο AI μπορούν να βελτιστοποιήσουν την απόδοση του συστήματος, να προβλέψουν τις ανάγκες συντήρησης και να αυτοματοποιήσουν τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων με βάση τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία (Gonzalez et al., 2018).

### **3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Εξέλιξη συστημάτων ηλιακής ενέργειας**

Είναι εμφανές ότι τα συστήματα ηλιακής ενέργειας έχουν εξελιχθεί σημαντικά κατά τη διάρκεια των δεκαετιών, με γνώμονα τις τεχνολογικές εξελίξεις, τις παρεμβάσεις πολιτικής και την αύξηση της περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης. Αυτό το κεφάλαιο παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση της εξέλιξης των συστημάτων ηλιακής ενέργειας, παρακολουθώντας την ανάπτυξή τους από τις πρώτες απαρχές έως τις σύγχρονες καινοτομίες και τις μελλοντικές προοπτικές.

Η ηλιακή ενέργεια, που προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία, έχει χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο εδώ και αιώνες με διάφορες μορφές όπως η παθητική θέρμανση και η γεωργική ξήρανση. Η ανάπτυξη των ηλιακών τεχνολογιών έχει προχωρήσει σημαντικά, ιδιαίτερα τον 20ο και τον 21ο αιώνα, μετατρέποντας την ηλιακή ενέργεια σε βιώσιμη και ολοένα πιο ανταγωνιστική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Η ιστορία της χρήσης της ηλιακής ενέργειας χρονολογείται από την αρχαιότητα, όπου οι πολιτισμοί χρησιμοποιούσαν παθητικές ηλιακές τεχνικές για θέρμανση και φωσ. Σύμφωνα με το Παγκόσμιο Συμβούλιο Ενέργειας (Goswami & Besarati, 2013), οι πρώτοι πολιτισμοί στην Κίνα και την Ελλάδα χρησιμοποιούσαν καθρέφτες και μεγεθυντικούς φακούς για τη συγκέντρωση του ηλιακού φωτός για σκοπούς θέρμανσης. Αυτές οι τεχνικές έθεσαν τα θεμέλια για τις σύγχρονες ηλιακές θερμικές εφαρμογές.

#### **3.1 Τεχνολογικές εξελίξεις στα Φωτοβολταϊκά**

Η σύγχρονη εποχή της ηλιακής ενέργειας ξεκίνησε με την ανακάλυψη του φωτοβολταϊκού φαινομένου από τον Edmond Becquerel το 1839. Αυτή η ανακάλυψη έδειξε ότι η ηλεκτρική ενέργεια μπορούσε να παραχθεί απευθείας από το ηλιακό φως, χρησιμοποιώντας ένα υλικό ημιαγωγών όπως το πυρίτιο (IEA, 2014). Η ανάπτυξη του πρώτου πρακτικού ηλιακού στοιχείου από την Bell Laboratories το 1954 σηματοδότησε ένα σημαντικό ορόσημο στην ηλιακή τεχνολογία (IRENA, 2016). Έκτοτε, η έρευνα επικεντρώθηκε στη βελτίωση της απόδοσης των Φ/Β κυψελών, στη μείωση του κόστους παραγωγής και στην επέκταση των εφαρμογών. Οι κυβερνητικές πολιτικές και τα κίνητρα ήταν καθοριστικής σημασίας για την προώθηση της υιοθέτησης συστημάτων ηλιακής ενέργειας. Οι χώρες σε όλο τον κόσμο έχουν εφαρμόσει τιμολόγια τροφοδοσίας, φορολογικά κίνητρα και πρότυπα χαρτοφυλακίου ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για να ενθαρρύνουν τις επενδύσεις σε ηλιακές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις (IRENA, 2018, IEA, 2017). Η εικόνα 6 δείχνει ένα μέρος μιας τέτοιας εγκατάστασης. Παράδειγμα αποτελεί η οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, όπου έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για την ανάπτυξη ανανεώσιμων

πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ηλιακής ενέργειας. Αυτό οδηγεί στην ανάπτυξη της αγοράς σε ολόκληρη την περιοχή (Eurocham Myanmar, 2018).



**Εικόνα 6 Φωτοβολταϊκή συστοιχία (Wikimedia contributors., 2024)**

Παράλληλα, η ενοποίηση των συστημάτων ηλιακής ενέργειας με τεχνολογίες έξυπνων δικτύων έχει ενισχύσει την αξιοπιστία και την απόδοσή τους. Οι λύσεις έξυπνων δικτύων επιτρέπουν την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, την απόκριση της ζήτησης και την απρόσκοπτη ενσωμάτωση της καταναεμημένης ηλιακής παραγωγής στο ηλεκτρικό δίκτυο (Moreno-Garcia et al., 2016). Οι πρόοδοι στις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες ιόντων λιθίου και η αντλούμενη υδροηλεκτρική αποθήκευση, έχουν αντιμετωπίσει τη διαλείπουσα χρήση της ηλιακής ενέργειας, επιτρέποντας μεγαλύτερη σταθερότητα του δικτύου και ενεργειακή ανεξαρτησία (IRENA, 2016). Η ευρεία υιοθέτηση της ηλιακής ενέργειας έχει επίσης σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, συμπεριλαμβανομένων των μειωμένων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που σχετίζεται με την καύση ορυκτών καυσίμων (REN21, 2016). Τέλος, τα ηλιακά συστήματα ενέργειας έχουν συμβάλει στη δημιουργία θέσεων εργασίας και στην οικονομική ανάπτυξη στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, υποστηρίζοντας τις τοπικές οικονομίες και ενισχύοντας την ενεργειακή ασφάλεια (IEA, 2016).

Κοιτάζοντας το μέλλον, το μέλλον των συστημάτων ηλιακής ενέργειας υπόσχεται μια συνεχή καινοτομία και μείωση του κόστους. Οι αναδυόμενες τεχνολογίες όπως τα ηλιακά κύτταρα λεπτής μεμβράνης, οι μονάδες διπλής όψης και οι ηλιακές κυψέλες περοβσκήτη αναμένεται να βελτιώσουν περαιτέρω την απόδοση και την οικονομική προσιτότητα (IRENA, 2018). Ωστόσο, προκλήσεις όπως η ενοποίηση στο δίκτυο, η επεκτασιμότητα της αποθήκευσης ενέργειας και οι ρυθμιστικές αβεβαιότητες μένουν να αντιμετωπιστούν για να ξεκλειδωθεί το πλήρες δυναμικό της ηλιακής ενέργειας (Asian Development Bank, 2018).

Συμπερασματικά, η εξέλιξη των συστημάτων ηλιακής ενέργειας από τις αρχαίες παθητικές τεχνικές στις σύγχρονες φωτοβολταϊκές και θερμικές εφαρμογές αντανακλά ένα ταξίδι τεχνολογικής καινοτομίας. Με τις συνεχείς εξελίξεις και τις ευνοϊκές πολιτικές, η ηλιακή ενέργεια είναι έτοιμη να διαδραματίσει κεντρικό ρόλο στις προσπάθειες παγκόσμιας ενεργειακής μετάβασης προς τη βιωσιμότητα και την ενεργειακή ανεξαρτησία.

### **3.2 Ανάγκη τυποποίησης στην επικοινωνία ηλιακής ενέργειας**

Στο δυναμικό τοπίο των συστημάτων ηλιακής ενέργειας, η τυποποίηση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στη διασφάλιση της διαλειτουργικότητας, της αξιοπιστίας και της επεκτασιμότητας σε διάφορες εφαρμογές. Αυτό το κεφάλαιο διερευνά την κρίσιμη σημασία της τυποποίησης στην επικοινωνία ηλιακής ενέργειας, εξετάζοντας τα οφέλη, τις προκλήσεις και τις μελλοντικές κατευθύνσεις. Η ηλιακή ενέργεια, που προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία, έχει αναδειχθεί ως κρίσιμο συστατικό της παγκόσμιας μετάβασης από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Καθώς οι εγκαταστάσεις ηλιακών φωτοβολταϊκών (PV) πολλαπλασιάζονται παγκοσμίως, η ενσωμάτωση διαφορετικών εξαρτημάτων όπως μετατροπείς, συστήματα παρακολούθησης και διεπαφές δικτύου απαιτεί ισχυρά πρότυπα επικοινωνίας για τη διευκόλυνση της απρόσκοπτης λειτουργίας και ανταλλαγής δεδομένων (IRENA, 2016).

Πιο αναλυτικά, η τυποποίηση στην επικοινωνία ηλιακής ενέργειας αναφέρεται στην ανάπτυξη και υιοθέτηση κοινών πρωτοκόλλων, διεπαφών και μοντέλων δεδομένων που επιτρέπουν τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών στοιχείων και συστημάτων. Εξασφαλίζει ότι ο εξοπλισμός από διάφορους κατασκευαστές μπορεί να επικοινωνεί αποτελεσματικά, μειώνοντας το κόστος ολοκλήρωσης και τις τεχνικές πολυπλοκότητες (IEA PVPS, 2014). Συγκεκριμένα, η τυποποίηση ενισχύει την αξιοπιστία, ορίζοντας συνεπείς μορφές επικοινωνίας και πρωτόκολλα, ελαχιστοποιώντας έτσι τα σφάλματα και βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος. Υποστηρίζει επίσης την επεκτασιμότητα, επιτρέποντας στα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα να επεκτείνονται



εύκολα και να ενσωματώνονται στην υπάρχουσα υποδομή χωρίς προβλήματα συμβατότητας (González et al., 2018).

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η διαλειτουργικότητα είναι θεμελιώδης για την αποτελεσματική λειτουργία και διαχείριση των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τα τυποποιημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως το SunSpec Modbus και το IEEE 1547.1, διευκολύνουν την απρόσκοπτη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των μετατροπέων, των μετρητών ενέργειας και των συσκευών παρακολούθησης (Modbus-IDA, 2004; Wang et al., 2014). Αυτή η διαλειτουργικότητα επιτρέπει στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να βελτιστοποιούν τις λειτουργίες του δικτύου, να εφαρμόζουν στρατηγικές ανταπόκρισης στη ζήτηση και να βελτιώνουν τη σταθερότητα του δικτύου σε περιόδους υψηλής διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (IEA, 2017). Συγχρόνως, η υιοθέτηση τυποποιημένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας απλοποιεί την ενοποίηση των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων με τεχνολογίες έξυπνων δικτύων και συστήματα διαχείρισης ενέργειας. Με τη δημιουργία κοινών διεπαφών, οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας μπορούν να παρακολουθούν και να ελέγχουν την κατανεμημένη ηλιακή παραγωγή πιο αποτελεσματικά, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία και την ανθεκτικότητα του δικτύου (González et al., 2018).

Η τυποποίηση υποστηρίζει επίσης την ανάπτυξη προηγμένων υπηρεσιών δικτύου, όπως η ρύθμιση τάσης και ο έλεγχος συχνότητας, οι οποίες είναι κρίσιμες για τη διατήρηση της σταθερότητας του δικτύου παρουσία μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (IRENA, 2018). Επιπλέον, τα τυποποιημένα πρωτόκολλα επιτρέπουν την απρόσκοπτη ενσωμάτωση με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, ενισχύοντας την ευελιξία και την απόδοση των ηλιακών φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων (IEA, 2016).

Η υιοθέτηση τυποποιημένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας μειώνει το κόστος που σχετίζεται με την ενοποίηση του συστήματος, τη συντήρηση και την αντιμετώπιση προβλημάτων. Η συμβατότητα μεταξύ εξαρτημάτων από διαφορετικούς κατασκευαστές ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο σφαλμάτων επικοινωνίας και διακοπής λειτουργίας, διασφαλίζοντας αξιόπιστη απόδοση σε όλο τον κύκλο ζωής του συστήματος (IEA PVPS, 2014). Επιπλέον, τα τυποποιημένα πρωτόκολλα προωθούν την καινοτομία και τον ανταγωνισμό στον κλάδο της ηλιακής ενέργειας, ενθαρρύνοντας ίσους όρους ανταγωνισμού για τους παρόχους τεχνολογίας. Οι κατασκευαστές μπορούν να επικεντρωθούν στην ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων και στη βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος, αντί να αντιμετωπίζουν ζητήματα συμβατότητας (IRENA, 2016).

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η επίτευξη καθολικής τυποποίησης στην επικοινωνία ηλιακής ενέργειας θέτει προκλήσεις. Οι παραλλαγές στους περιφερειακούς κανονισμούς, η τεχνολογική

ποικιλομορφία μεταξύ των κατασκευαστών και οι εξελισσόμενες απαιτήσεις του κλάδου περιπλέκουν την ανάπτυξη και υιοθέτηση κοινών πρωτοκόλλων (Yaseen et al., 2023). Η εναρμόνιση των υφιστάμενων προτύπων και η ενημέρωσή τους για την προσαρμογή των τεχνολογικών εξελίξεων απαιτεί συνεχή συνεργασία και δημιουργία συναίνεσης μεταξύ των ενδιαφερομένων (González et al., 2018). Το μέλλον της τυποποίησης στις επικοινωνίες ηλιακής ενέργειας υπόσχεται σημαντικά την καινοτομία και τη βιωσιμότητα. Οι αναδύομενες τεχνολογίες, όπως το blockchain για τις αποκεντρωμένες ενεργειακές συναλλαγές και η τεχνητή νοημοσύνη για την προγνωστική συντήρηση, υπογραμμίζουν την ανάγκη για ευέλικτα και προσαρμοστικά πρότυπα επικοινωνίας (IRENA, 2018; Reihls et al., 2023). Οι διεθνείς πρωτοβουλίες και οι συνεργατικές προσπάθειες μεταξύ των ενδιαφερομένων του κλάδου είναι απαραίτητες για την αντιμετώπιση των ρυθμιστικών φραγμών, την προώθηση της διαλειτουργικότητας και την υποστήριξη της παγκόσμιας ανάπτυξης ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων (IEA, 2016). Με την προώθηση μιας ανοιχτής και χωρίς αποκλεισμούς προσέγγισης για την τυποποίηση, η ηλιακή βιομηχανία μπορεί να ξεκλειδώσει νέες ευκαιρίες για ανάπτυξη, να ενισχύσει την ανθεκτικότητα του συστήματος και να επιταχύνει τη μετάβαση προς ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον.

Συμπερασματικά, η τυποποίηση στην επικοινωνία της ηλιακής ενέργειας είναι απαραίτητη για την προώθηση της αξιοπιστίας, της απόδοσης και της επεκτασιμότητας των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων. Με τη θέσπιση κοινών πρωτοκόλλων και διεπαφών, οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να μετριάσουν τα τεχνικά εμπόδια, να μειώσουν το κόστος και να επιταχύνουν την υιοθέτηση της ανανεώσιμης ενέργειας παγκοσμίως. Στο πλαίσιο αυτό, η συνεχής συνεργασία και η καινοτομία στον κλάδο της ηλιακής ενέργειας θα είναι κρίσιμη για την αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού της τυποποιημένης επικοινωνίας για την οικοδόμηση ενός ανθεκτικού και ολοκληρωμένου ενεργειακού οικοσυστήματος.

### **3.3 Ενσωμάτωση και Διαχείριση Ενέργειας σε Υβριδικά Συστήματα Φωτοβολταϊκών**

Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε υβριδικές ενεργειακές λύσεις αποτελεί μια από τις πιο ενδιαφέρουσες και ραγδαία εξελισσόμενες πτυχές του τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα υβριδικά συστήματα συνδυάζουν την ηλιακή ενέργεια με άλλες πηγές ενέργειας, όπως αιολική, υδροηλεκτρική ή ακόμα και συμβατικές γεννήτριες καυσίμου, για να προσφέρουν μια πιο ευέλικτη, αποδοτική και αξιόπιστη λύση στην παραγωγή και διαχείριση ενέργειας. Η διαχείριση αυτών των συστημάτων είναι κρίσιμη για τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση του

κόστους λειτουργίας, απαιτώντας προηγμένες στρατηγικές ελέγχου και διαχείρισης ενέργειας (González et al., 2018).

Τα υβριδικά συστήματα φωτοβολταϊκών είναι σχεδιασμένα για να εξασφαλίζουν σταθερή και αδιάλειπτη παροχή ενέργειας, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες ή την ώρα της ημέρας. Η επιτυχία αυτών των συστημάτων επιτυγχάνεται μέσω της συνδυασμένης χρήσης διαφόρων πηγών ενέργειας, οι οποίες μπορούν να αντισταθμίσουν τις διακυμάνσεις στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Με αυτόν τον τρόπο, παρέχουν αυξημένη αξιοπιστία, βελτιστοποιούν τη χρήση των διαθέσιμων πόρων και μειώνουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Επίσης, τα υβριδικά συστήματα μειώνουν το κόστος καυσίμων και συντήρησης, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η πρόσβαση σε συμβατικές πηγές ενέργειας είναι περιορισμένη. Συνήθως, τα υβριδικά συστήματα φωτοβολταϊκών περιλαμβάνουν φωτοβολταϊκά πάνελ, ανεμογεννήτριες, γεννήτριες καυσίμου και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από το ηλιακό φως, ενώ οι ανεμογεννήτριες παράγουν ενέργεια από τον άνεμο, εξασφαλίζοντας συνεχή παραγωγή. Οι γεννήτριες καυσίμου λειτουργούν ως εφεδρικές πηγές ενέργειας όταν η παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές είναι ανεπαρκής. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες, συγκρατούν την πλεονάζουσα ενέργεια για μελλοντική χρήση, ενώ τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας (EMS) ελέγχουν τη ροή ενέργειας μεταξύ των διαφορετικών συνιστωσών του συστήματος για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας. Η εικόνα 7 απεικονίζει μια τέτοια υλοποίηση.



**Εικόνα 7 Υβριδικά Συστήματα Φωτοβολταϊκών (Wikimedia, 2024)**

Η διαχείριση της ενέργειας σε υβριδικά συστήματα φωτοβολταϊκών αποτελεί ένα σύνθετο πεδίο που απαιτεί συνδυασμό τεχνολογίας, στρατηγικών ελέγχου και λογισμικού διαχείρισης. Ο στόχος είναι να εξισορροπηθεί η προσφορά και η ζήτηση ενέργειας, να βελτιωθεί η ενεργειακή απόδοση και να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες. Η διαχείριση της αποθήκευσης ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για την εξισορρόπηση της παραγωγής και της κατανάλωσης, μεγιστοποιώντας τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και μειώνοντας την ανάγκη για γεννήτριες καυσίμου. Παράλληλα, η προσαρμογή της ζήτησης ενέργειας μέσω ελέγχου φορτίου είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της σταθερότητας του συστήματος. Οι έξυπνοι ελεγκτές φορτίου και τα έξυπνα δίκτυα επιτρέπουν τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής, εξισορροπώντας τη συνολική ζήτηση με την παραγωγή και διασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Τέλος, οι μελλοντικές τάσεις στον τομέα των υβριδικών ενεργειακών συστημάτων περιλαμβάνουν την εξέλιξη της τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας, την ανάπτυξη νέων υλικών για φωτοβολταϊκά πάνελ και την επέκταση των δικτύων έξυπνης ενέργειας. Αυτές οι εξελίξεις αναμένεται να βελτιώσουν περαιτέρω την απόδοση, την αξιοπιστία και τη βιωσιμότητα των υβριδικών συστημάτων, επιτρέποντας μια πιο αποτελεσματική διαχείριση της καταναλωμένης παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας στο μέλλον (Sun et al. 2015).

Οι τεχνολογίες Vehicle-to-Home (V2H) και Vehicle-to-Grid (V2G) αποτελούν κρίσιμες καινοτομίες στη διαχείριση ενέργειας, ενισχύοντας τον ρόλο των ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) όχι μόνο ως μέσο μετακίνησης αλλά και ως αποθηκευτικών μονάδων ενέργειας. Η ιδέα πίσω από τις τεχνολογίες V2H και V2G βασίζεται στην αμφίδρομη ροή ενέργειας, όπου τα EVs μπορούν να αποθηκεύουν ενέργεια στις μπαταρίες τους και να την επιστρέφουν είτε σε ένα σπίτι (V2H) είτε στο ηλεκτρικό δίκτυο (V2G). Αυτές οι εφαρμογές επιτρέπουν την καλύτερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τη βελτίωση της σταθερότητας του δικτύου και τη μείωση του ενεργειακού κόστους για τους καταναλωτές (IEA PVPS, 2014).

Το V2H (Vehicle-to-Home) αναφέρεται στην τεχνολογία που επιτρέπει σε ένα ηλεκτρικό όχημα να παρέχει ενέργεια σε ένα οικιακό σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι το EV μπορεί να λειτουργήσει ως μια αποθηκευτική μονάδα ενέργειας που χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση των οικιακών συσκευών και την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ενός σπιτιού. Η λειτουργία αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία όταν υπάρχει υπερπαραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως τα φωτοβολταϊκά συστήματα, κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς και σε περιπτώσεις διακοπής ρεύματος ή ανάγκης για αποφυγή χρήσης της ενέργειας του δικτύου σε ώρες αιχμής. Η βασική ιδέα πίσω από το V2H είναι η ενεργειακή αυτονομία και η μείωση του ενεργειακού κόστους. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, όταν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά, παράγουν περισσότερη ενέργεια από ό,τι

χρειάζεται το νοικοκυριό, η περίσσεια μπορεί να αποθηκευτεί στη μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος. Τη νύχτα, όταν η παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά είναι μηδενική, η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλυφθούν οι ανάγκες του σπιτιού. Αυτή η προσέγγιση μειώνει την εξάρτηση από το ηλεκτρικό δίκτυο, επιτρέποντας στο νοικοκυριό να λειτουργεί αυτόνομα για μεγαλύτερες περιόδους (González et al., 2018).

Το V2H αποτελεί επίσης μια πολύτιμη λύση σε περιπτώσεις διακοπής ρεύματος ή σε απομακρυσμένες περιοχές που δεν έχουν πρόσβαση σε σταθερό ηλεκτρικό δίκτυο. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η αποθηκευμένη ενέργεια στο ηλεκτρικό όχημα μπορεί να τροφοδοτήσει τις κρίσιμες ανάγκες του σπιτιού, όπως τη θέρμανση, τον φωτισμό και τις βασικές ηλεκτρονικές συσκευές. Η τεχνολογία V2G (Vehicle-to-Grid) προχωρά ένα βήμα παραπέρα, επιτρέποντας την αμφίδρομη επικοινωνία και τη ροή ενέργειας μεταξύ του ηλεκτρικού οχήματος και του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Στο σύστημα αυτό, το ηλεκτρικό όχημα λειτουργεί ως κινητή μονάδα αποθήκευσης ενέργειας που μπορεί να τροφοδοτεί το δίκτυο σε ώρες αιχμής ή όταν υπάρχει αυξημένη ζήτηση, και στη συνέχεια να επαναφορτίζεται όταν η ζήτηση είναι χαμηλή.

Το V2G είναι ένας από τους βασικούς πυλώνες της μετάβασης σε έξυπνα δίκτυα ενέργειας (smart grids). Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης ενέργειας στο δίκτυο, μειώνοντας την ανάγκη για συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αποτρέποντας τις διακοπές ρεύματος σε περιόδους υψηλής ζήτησης. Το V2G επιτρέπει την ενεργή συμμετοχή των κατόχων ηλεκτρικών οχημάτων στην ενεργειακή αγορά, καθώς μπορούν να πουλήσουν την περίσσεια ενέργεια που έχουν αποθηκεύσει πίσω στο δίκτυο, κερδίζοντας οικονομικά οφέλη. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του V2G είναι η δυνατότητα εξομάλυνσης των διακυμάνσεων στην παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική, οι οποίες είναι διακοπτόμενες. Κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής παραγωγής, τα EVs που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο μπορούν να τροφοδοτήσουν ενέργεια στο σύστημα, εξασφαλίζοντας σταθερότητα και επάρκεια. Αυτό είναι κρίσιμο σε μια μελλοντική εποχή όπου οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα κυριαρχούν στην ενεργειακή παραγωγή. Η εφαρμογή των τεχνολογιών V2H και V2G απαιτεί την ανάπτυξη νέων υποδομών και τεχνολογικών λύσεων. Οι φορτιστές των EVs πρέπει να υποστηρίζουν την αμφίδρομη ροή ενέργειας, κάτι που δεν είναι ακόμη κοινό χαρακτηριστικό για όλα τα ηλεκτρικά οχήματα. Επίσης, τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να εκσυγχρονιστούν για να επιτρέπουν την αμφίδρομη επικοινωνία με τα οχήματα. Αυτό περιλαμβάνει τη χρήση συστημάτων διαχείρισης ενέργειας που μπορούν να συντονίζουν τη φόρτιση και την αποφόρτιση των EVs με βάση τις ανάγκες του δικτύου ή του νοικοκυριού.

Οι βασικές προκλήσεις στην εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών περιλαμβάνουν την πολυπλοκότητα της διαχείρισης της ενέργειας και των φορτίων στο δίκτυο, τη μακροπρόθεσμη επίδραση της χρήσης των μπαταριών των EVs για αποθήκευση και επιστροφή ενέργειας και την ανάγκη για κατάλληλο νομοθετικό πλαίσιο. Οι συχνοί κύκλοι φόρτισης και αποφόρτισης των μπαταριών μπορεί να επηρεάσουν τη διάρκεια ζωής τους, γεγονός που απαιτεί την ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών μπαταριών που αντέχουν σε τέτοιες χρήσεις. Παράλληλα, το V2G απαιτεί μια κατάλληλη τιμολογιακή πολιτική και σύστημα ανταμοιβών για τους κατόχους EVs, ώστε να έχουν κίνητρο να συμμετέχουν στο δίκτυο. Αυτό σημαίνει ότι οι πάροχοι ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να προσφέρουν ανταγωνιστικά τιμολόγια για την ενέργεια που επιστρέφεται στο δίκτυο, εξισορροπώντας τις ανάγκες του συστήματος με τα συμφέροντα των καταναλωτών (Sun et al. 2015).

Τα οφέλη από την υιοθέτηση των τεχνολογιών V2H και V2G είναι πολυδιάστατα και περιλαμβάνουν οικονομικά, περιβαλλοντικά και τεχνικά πλεονεκτήματα. (IEA PVPS, 2014).

1. **Μείωση του ενεργειακού κόστους:** Με την τεχνολογία V2H, οι χρήστες μπορούν να μειώσουν σημαντικά το κόστος της ενέργειας, αξιοποιώντας την αποθηκευμένη ενέργεια του οχήματός τους κατά τις ώρες αιχμής. Το ηλεκτρικό όχημα μπορεί να λειτουργήσει ως εφεδρική πηγή ενέργειας κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής ζήτησης, όταν το κόστος της ενέργειας είναι υψηλότερο.
2. **Σταθεροποίηση του δικτύου:** Το V2G βοηθά στη σταθεροποίηση του ηλεκτρικού δικτύου, ιδίως όταν αυξάνεται η χρήση διακοπτόμενων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα EVs μπορούν να παρέχουν αποθηκευμένη ενέργεια στο δίκτυο όταν υπάρχει αυξημένη ζήτηση, μειώνοντας την πίεση στους σταθμούς παραγωγής και αποτρέποντας ενδεχόμενες διακοπές ρεύματος.
3. **Μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub>:** Με την ευρεία χρήση του V2G, τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να συμβάλλουν στην απορρόφηση της περίσσειας ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και στη μείωση της ανάγκης για ενεργοβόρους σταθμούς παραγωγής με καύση άνθρακα ή άλλων ορυκτών καυσίμων, μειώνοντας τις συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub>.
4. **Βελτιστοποίηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας:** Οι τεχνολογίες V2H και V2G επιτρέπουν τη βέλτιστη χρήση ανανεώσιμων πηγών, καθώς η ενέργεια που παράγεται μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί σε περιόδους χαμηλής παραγωγής, εξασφαλίζοντας την ενεργειακή επάρκεια ακόμα και σε δύσκολες συνθήκες.

Η υιοθέτηση των τεχνολογιών V2H και V2G αναμένεται να επιταχυνθεί τα επόμενα χρόνια, καθώς η αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συνεχίζει να αναπτύσσεται. Η μετάβαση σε ένα έξυπνο και βιώσιμο ενεργειακό σύστημα θα περιλαμβάνει

αυξημένη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων, όχι μόνο ως μέσα μετακίνησης αλλά και ως κρίσιμα στοιχεία του ενεργειακού συστήματος. Στο πλαίσιο αυτό, οι εξελίξεις στις τεχνολογίες μπαταριών και υποδομών φόρτισης, καθώς και η εφαρμογή νέων πολιτικών για την ενέργεια και την κλιματική αλλαγή, θα διαδραματίσουν καίριο ρόλο στη διάδοση των τεχνολογιών αυτών. Οι κατασκευαστές οχημάτων θα πρέπει να ενσωματώσουν λύσεις που υποστηρίζουν την αμφίδρομη φόρτιση, ενώ οι πάροχοι ενέργειας θα πρέπει να αναπτύξουν κατάλληλα τιμολόγια και στρατηγικές διαχείρισης του δικτύου. Η συμβολή των τεχνολογιών V2H και V2G στη διαχείριση της ενέργειας είναι κρίσιμη για τη μετάβαση σε ένα πιο βιώσιμο, αποδοτικό και οικονομικό ενεργειακό μέλλον (IEA, 2017).

## **4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Εισαγωγή στη SunSpec Alliance και ο ρόλος της**

Η SunSpec Alliance διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στον τομέα της ηλιακής ενέργειας, εστιάζοντας στην τυποποίηση και τη διαλειτουργικότητα των πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Η συμμαχία, που ιδρύθηκε το 2009, εμφανίστηκε ως απάντηση στον κατακερματισμό και την αποκλειστική φύση των διεπαφών επικοινωνίας στα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα (ΦΒ). Αυτή η έλλειψη τυποποίησης έθεσε σημαντικές προκλήσεις για την ενοποίηση, την επεκτασιμότητα και την αποτελεσματικότητα των ηλιακών εγκαταστάσεων παγκοσμίως.

Η κύρια αποστολή της SunSpec Alliance είναι να αναπτύξει και να προωθήσει ανοιχτά πρότυπα που διευκολύνουν την απρόσκοπτη επικοινωνία και τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των διαφόρων στοιχείων των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων. Με τη θέσπιση αυτών των προτύπων, η SunSpec στοχεύει στον εξορθολογισμό της ολοκλήρωσης του συστήματος, στη μείωση του κόστους και στην επιτάχυνση της υιοθέτησης τεχνολογιών ηλιακής ενέργειας σε περιβάλλοντα κλίμακας κοινής χρήσης και κατανεμημένης ενέργειας. Η ταχεία επέκταση των ηλιακών φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στις αρχές του 21ου αιώνα ανέδειξε την ανάγκη για τυποποιημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Διάφοροι κατασκευαστές ανέπτυξαν ιδιόκτητες διεπαφές για μετατροπείς, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και συσκευές παρακολούθησης, παρεμποδίζοντας τη διαλειτουργικότητα και περιπλέκοντας τη διαχείριση του συστήματος. Σε απάντηση, οι ηγέτες του κλάδου αναγνώρισαν την ανάγκη για συνεκτικά πρότυπα που θα επέτρεπαν τη συμβατότητα plug-and-play και θα ενίσχυαν την αξιοπιστία του συστήματος (IEA, 2017).

### **4.1 Αποστολή και Στόχοι**

Στον πυρήνα της, η SunSpec Alliance καθοδηγείται από μια αποστολή να προωθήσει την υιοθέτηση ηλιακών φωτοβολταϊκών μέσω τυποποιημένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Για την ακρίβεια, επιδιώκει να καθορίσει και να βελτιώσει αυτά τα πρωτόκολλα σε συνεργασία με τους ενδιαφερόμενους του κλάδου, συμπεριλαμβανομένων των κατασκευαστών, των επιχειρήσεων κοινής ωφελείας, των ερευνητικών ιδρυμάτων και των ρυθμιστικών φορέων. Αυτή η συλλογική προσέγγιση διασφαλίζει ότι τα πρότυπα SunSpec ευθυγραμμίζονται με τις ανάγκες της βιομηχανίας, τις τεχνολογικές εξελίξεις και τις κανονιστικές απαιτήσεις (González et al., 2018).

Οι στόχοι της SunSpec εκτείνονται πέρα από την τεχνική τυποποίηση και περιλαμβάνουν:



- **Διαλειτουργικότητα**

Καθιερώνοντας κοινές διεπαφές επικοινωνίας και μοντέλα δεδομένων, η SunSpec προωθεί τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων. Αυτή η διαλειτουργικότητα επιτρέπει την απρόσκοπτη επικοινωνία μεταξύ συσκευών από διαφορετικούς κατασκευαστές και υποστηρίζει προηγμένες λειτουργίες δικτύου, όπως η απόκριση ζήτησης και η σταθερότητα του δικτύου (Wang et al., 2014).

- **Ενεργοποίηση αγοράς**

Μέσω των προτύπων της, η SunSpec στοχεύει να μειώσει τα εμπόδια εισόδου για νέες τεχνολογίες και λύσεις στην αγορά της ηλιακής ενέργειας. Οι κατασκευαστές που συμμορφώνονται με τα πρότυπα SunSpec μπορούν να αναπτύξουν διαλειτουργικά προϊόντα που ενσωματώνονται εύκολα στα υπάρχοντα φωτοβολταϊκά συστήματα, επιταχύνοντας έτσι την ανάπτυξη και βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος (IEA, 2016).

- **Πιστοποίηση και Συμμόρφωση**

Το πρόγραμμα SunSpec Certified διασφαλίζει ότι τα προϊόντα συμμορφώνονται με τα πρότυπα SunSpec μέσω αυστηρών δοκιμών και επικύρωσης. Αυτή η πιστοποίηση παρέχει διαβεβαίωση στους ενοποιητές συστημάτων, τους εγκαταστάτες και τους τελικούς χρήστες ότι τα προϊόντα πληρούν τα κορυφαία στον κλάδο κριτήρια διαλειτουργικότητας και απόδοσης (SunSpec Alliance, nd).

## **4.2 Ο ρόλος της SunSpec Alliance**

Η SunSpec Alliance εκπληρώνει τον ρόλο της μέσω πολλών βασικών πρωτοβουλιών και δραστηριοτήτων. Πρώτα απ' όλα, η SunSpec αναπτύσσει και διατηρεί πρότυπα όπως το πρωτόκολλο SunSpec Modbus και τα μοντέλα πληροφοριών. Αυτά τα πρότυπα ορίζουν τη δομή, τη μορφή και τη σημασιολογία των δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ ηλιακών φωτοβολταϊκών εξαρτημάτων, διασφαλίζοντας συνεπή επικοινωνία και έλεγχο μεταξύ διαφορετικών συσκευών (Modbus-IDA, 2004; SunSpec Alliance, nd).

Παράλληλα, η συνεργασία είναι κεντρική στην προσέγγιση της SunSpec. Για την ακρίβεια, δεσμεύει τα ενδιαφερόμενα μέρη μέσω τεχνικών ομάδων εργασίας, εργαστηρίων και βιομηχανικών φόρουμ για τη συγκέντρωση πληροφοριών, την επίτευξη συναίνεσης και τη βελτίωση των προτύπων με βάση τις εφαρμογές και την ανατροφοδότηση του πραγματικού κόσμου (IEA PVPS, 2014).

Επιπλέον, η SunSpec υποστηρίζει την υιοθέτηση των προτύπων της παγκοσμίως και παρέχει εκπαιδευτικούς πόρους στα ενδιαφερόμενα μέρη. Αυτές οι προσπάθειες στοχεύουν στην αύξηση της

ευαισθητοποίησης, στην προώθηση των βέλτιστων πρακτικών και στη διευκόλυνση της εφαρμογής διαλειτουργικών λύσεων στον τομέα της ηλιακής ενέργειας (SunSpec Alliance, nd).

Συμπερασματικά, η SunSpec Alliance αποτελεί έναν κεντρικό οργανισμό στον κλάδο της ηλιακής ενέργειας, οδηγώντας την τυποποίηση και τη διαλειτουργικότητα μέσω συνεργατικών προσπαθειών και δέσμευσης της βιομηχανίας. Καθιερώνοντας πρότυπα ανοιχτής επικοινωνίας και προωθώντας την υιοθέτησή τους, η SunSpec επιταχύνει την καινοτομία, μειώνει το κόστος και ενισχύει την αξιοπιστία των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων παγκοσμίως. Καθώς το τοπίο της ηλιακής ενέργειας συνεχίζει να εξελίσσεται, η SunSpec παραμένει προσηλωμένη στη διαμόρφωση ενός βιώσιμου μέλλοντος μέσω της τεχνολογικής προόδου και της πρωτοπορίας του κλάδου.

### **4.3 Αρχιτεκτονικές και σχεδιαστικές αρχές του πρωτοκόλλου SunSpec**

Το πρωτόκολλο SunSpec αντιπροσωπεύει ένα κρίσιμο πλαίσιο για τη διασφάλιση της διαλειτουργικότητας και της τυποποίησης στην ταχέως αναπτυσσόμενη βιομηχανία ηλιακής ενέργειας. Καθιερώνοντας μια κοινή γλώσσα επικοινωνίας για εξαρτήματα φωτοβολταϊκών (PV), το Πρωτόκολλο SunSpec διευκολύνει την απρόσκοπτη ενοποίηση, την αποτελεσματική ανταλλαγή δεδομένων και την ισχυρή απόδοση σε διάφορα συστήματα ηλιακής ενέργειας. Αυτό το κεφάλαιο εμβαθύνει στη λεπτομερή αρχιτεκτονική και τις αρχές σχεδιασμού του Πρωτοκόλλου SunSpec, εξετάζοντας την ιεραρχική του δομή, την ενσωμάτωση με πρότυπα επικοινωνίας, μοντέλα δεδομένων και πληροφοριών, επεκτασιμότητα, ζητήματα ασφαλείας, πρακτικές εφαρμογές και μελλοντικές κατευθύνσεις.

Ουσιαστικά, το πρωτόκολλο SunSpec αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει το κατακερματισμένο τοπίο των διεπαφών επικοινωνίας στη βιομηχανία ηλιακών φωτοβολταϊκών. Καθώς τα συστήματα ηλιακής ενέργειας επεκτάθηκαν, έγινε εμφανής η ανάγκη για ένα τυποποιημένο πρωτόκολλο επικοινωνίας για να διασφαλιστεί ότι τα εξαρτήματα από διαφορετικούς κατασκευαστές θα μπορούσαν να λειτουργούν αρμονικά. Η SunSpec Alliance, μια κοινοπραξία μετόχων της βιομηχανίας, πρωτοστάτησε στην ανάπτυξη του Πρωτοκόλλου SunSpec, με στόχο τη δημιουργία ενός καθολικού προτύπου που θα απλοποιούσε την ενοποίηση του συστήματος, θα ενίσχυε την αξιοπιστία και θα μείωνε το κόστος (SunSpec Alliance, nd).

Στον πυρήνα της αρχιτεκτονικής του Πρωτοκόλλου SunSpec βρίσκεται η ιεραρχική του δομή, η οποία οργανώνει μοντέλα δεδομένων και μορφές μηνυμάτων σε ένα συνεκτικό πλαίσιο. Αυτή η ιεραρχική προσέγγιση έχει σχεδιαστεί για να διασφαλίζει τη συμβατότητα και τη διαλειτουργικότητα σε διάφορες συσκευές, συμπεριλαμβανομένων των μετατροπέων, των μετρητών και των

συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Το πρωτόκολλο ορίζει μια σειρά επιπέδων, καθένα από τα οποία είναι υπεύθυνο για διαφορετικές πτυχές της επικοινωνίας και της διαχείρισης δεδομένων. Σύμφωνα με τον Abdulhadi (2022), η ιεραρχική δομή του Πρωτοκόλλου SunSpec είναι απαραίτητη για την επίτευξη λειτουργικότητας plug-and-play. Αυτή η δομή επιτρέπει στις συσκευές να επικοινωνούν αποτελεσματικά χωρίς να απαιτούν εκτεταμένες προσαρμοσμένες ρυθμίσεις παραμέτρων, απλοποιώντας έτσι την ανάπτυξη και τη συντήρηση. Τα επίπεδα του πρωτοκόλλου περιλαμβάνουν φυσικές διεπαφές, επίπεδα σύνδεσης δεδομένων και επίπεδα εφαρμογής, καθένα από τα οποία συμβάλλει στη συνολική ευρωστία και αποτελεσματικότητα του συστήματος.

Επιπλέον, το πρωτόκολλο SunSpec αξιοποιεί καθιερωμένα πρότυπα επικοινωνίας για να διευκολύνει την ανταλλαγή δεδομένων και τις δυνατότητες παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο. Δύο βασικά πρότυπα που ενσωματώνονται στο πλαίσιο SunSpec είναι το Modbus και το IEEE 1547.1. Το Modbus, ένα ευρέως διαδεδομένο πρωτόκολλο επικοινωνίας στον βιομηχανικό αυτοματισμό, χρησιμεύει ως βάση για το πρότυπο SunSpec Modbus. Αυτό το πρότυπο ορίζει μοντέλα δεδομένων για κοινά ηλιακά εξαρτήματα, επιτρέποντας συνεπή επικοινωνία και έλεγχο μεταξύ διαφορετικών συσκευών. Η ενσωμάτωση του Modbus στο πρωτόκολλο SunSpec διασφαλίζει ότι τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν αξιόπιστα και αποτελεσματικά, υποστηρίζοντας διάφορες εφαρμογές από απλή παρακολούθηση έως πολύπλοκα συστήματα ελέγχου (Modbus-IDA, 2004). Το IEEE 1547.1, ένα άλλο κρίσιμο πρότυπο, εστιάζει στη δοκιμή και την επικύρωση των διασυνδέσεων μεταξύ καταναμημένων ενεργειακών πόρων (DER) και του δικτύου. Με την ενσωμάτωση του IEEE 1547.1, το πρωτόκολλο SunSpec διασφαλίζει ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να πληρούν αυστηρά πρότυπα απόδοσης και ασφάλειας, διευκολύνοντας την απρόσκοπτη ενσωμάτωση με το ευρύτερο ηλεκτρικό δίκτυο (KAUR & ANANDAN, nd).

Κεντρικό στοιχείο του πρωτοκόλλου SunSpec είναι τα μοντέλα δεδομένων και τα μοντέλα πληροφοριών του, τα οποία καθορίζουν τη δομή, τη μορφή και τη σημασιολογία των δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ συσκευών. Αυτά τα μοντέλα είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη της διαλειτουργικότητας και τη διασφάλιση ότι οι συσκευές διαφορετικών κατασκευαστών μπορούν να ερμηνεύουν και να χρησιμοποιούν δεδομένα με συνέπεια. Επίσης, τα μοντέλα πληροφοριών SunSpec καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να δομούνται και να κοινοποιούνται τα σημεία δεδομένων που σχετίζονται με τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα. Αυτά τα μοντέλα καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένων των ενδείξεων τάσης, ρεύματος, ισχύος εξόδου και κατάστασης. Με την τυποποίηση αυτών των παραμέτρων, το Πρωτόκολλο SunSpec επιτρέπει την ομοιόμορφη αναπαράσταση δεδομένων, διευκολύνοντας την ακριβή παρακολούθηση, τον έλεγχο και την ανάλυση των συστημάτων ηλιακής ενέργειας (González et al., 2021). Για παράδειγμα, το

μοντέλο αντιστροφέα SunSpec ορίζει σημεία δεδομένων που σχετίζονται με την κατάσταση λειτουργίας των μετατροπέων, όπως τάση AC, τάση συνεχούς ρεύματος DC, ισχύς εξόδου και συνθήκες σφάλματος. Αυτό το μοντέλο διασφαλίζει ότι τα δεδομένα από τους μετατροπείς μπορούν να ερμηνεύονται ομοιόμορφα, ανεξάρτητα από τον κατασκευαστή, υποστηρίζοντας την αποτελεσματική διαχείριση συστήματος και την αντιμετώπιση των προβλημάτων.

#### **4.4 Επεκτασιμότητα και Ευελιξία**

Η αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου SunSpec έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει την επεκτασιμότητα και την ευελιξία, επιτρέποντάς του να προσαρμόζεται σε διάφορα μεγέθη και διαμορφώσεις του συστήματος. Αυτή η επεκτασιμότητα επιτυγχάνεται μέσω αρθρωτών μοντέλων δεδομένων που μπορούν να επεκταθούν ή να προσαρμοστούν για να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες απαιτήσεις εφαρμογής. Σύμφωνα με τους González & Becker (2018), η επεκτασιμότητα του Πρωτοκόλλου SunSpec είναι ιδιαίτερα εμφανής στην εφαρμογή του σε αρχιτεκτονικές πολλαπλών επιπέδων για έξυπνα μικροδίκτυα. Αυτές οι αρχιτεκτονικές ενσωματώνουν ετερογενή DER, όπως ηλιακά πάνελ, ανεμογεννήτριες και συστήματα αποθήκευσης μπαταριών, σε ένα συνεκτικό δίκτυο. Αξιοποιώντας τυποποιημένες διεπαφές επικοινωνίας, το πρωτόκολλο SunSpec επιτρέπει σε αυτά τα διαφορετικά εξαρτήματα να λειτουργούν συντονισμένα, βελτιστοποιώντας την παραγωγή και τη διανομή ενέργειας. Η ευελιξία είναι ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό του πρωτοκόλλου SunSpec, το οποίο του επιτρέπει να υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών από οικιακές ηλιακές εγκαταστάσεις έως έργα κοινής ωφελείας μεγάλης κλίμακας. Τέλος, ο αρθρωτός σχεδιασμός του πρωτοκόλλου διασφαλίζει ότι μπορεί να προσαρμοστεί στις νέες τεχνολογίες και τις εξελισσόμενες ανάγκες της βιομηχανίας, παρέχοντας μια μελλοντική λύση για την επικοινωνία με την ηλιακή ενέργεια.

#### **4.5 Θέματα ασφαλείας**

Καθώς τα συστήματα ηλιακής ενέργειας γίνονται ολοένα και πιο διασυνδεδεμένα, η ασφάλεια έχει αναδειχθεί ως κρίσιμη ανησυχία. Το πρωτόκολλο SunSpec ενσωματώνει διάφορα μέτρα ασφαλείας για την προστασία από απειλές στον κυβερνοχώρο και τη διασφάλιση της ακεραιότητας των δεδομένων που μεταδίδονται μέσω του δικτύου. Στο πλαίσιο αυτό, οι Onunkwo et al. (2019) τονίζουν τη σημασία των ισχυρών πρωτοκόλλων ασφαλείας στα δίκτυα επικοινωνίας DER.

Έτσι, το πρωτόκολλο SunSpec αντιμετωπίζει αυτές τις ανησυχίες, εφαρμόζοντας μηχανισμούς κρυπτογράφησης, ελέγχου ταυτότητας και ελέγχου πρόσβασης. Αυτά τα μέτρα προστατεύουν από

μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, παραβιάσεις δεδομένων και άλλες απειλές στον κυβερνοχώρο, διασφαλίζοντας ότι τα ηλιακά συστήματα ενέργειας παραμένουν ασφαλή και αξιόπιστα.

#### **4.6 Εφαρμογή σε Φωτοβολταϊκά Συστήματα**

Η πρακτική εφαρμογή του Πρωτοκόλλου SunSpec στα φωτοβολταϊκά συστήματα αναδεικνύει την αποτελεσματικότητά του στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος και στη διευκόλυνση της ολοκλήρωσης του δικτύου. Αρκετές περιπτωσιολογικές μελέτες και υλοποιήσεις σε πραγματικό κόσμο καταδεικνύουν τον αντίκτυπο του πρωτοκόλλου στη διαχείριση της ηλιακής ενέργειας. Οι Wang et al. (2014) συζητούν την ενσωμάτωση του Πρωτοκόλλου SunSpec σε συστήματα V2H/V2G για ανταπόκριση στη ζήτηση. Αυτά τα συστήματα διευκολύνουν τη δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλιακών εγκαταστάσεων και του δικτύου, επιτρέποντας την αποδοτική χρήση ενέργειας και τη σταθερότητα του δικτύου.

Επιπλέον, οι τυποποιημένες διεπαφές επικοινωνίας του πρωτοκόλλου SunSpec διευκολύνουν την ανταλλαγή και τον έλεγχο δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, υποστηρίζοντας προηγμένες υπηρεσίες δικτύου, όπως ρύθμιση τάσης και έλεγχος συχνότητας. Μια άλλη αξιοσημείωτη εφαρμογή είναι η ανάπτυξη συστημάτων SCADA που είναι συμβατά με το SunSpec σε ηλιακά έργα μεγάλης κλίμακας. Αυτά τα συστήματα αξιοποιούν το πρωτόκολλο SunSpec για την παρακολούθηση και τον έλεγχο μεγάλων συστοιχιών ηλιακών συλλεκτών, διασφαλίζοντας τη βέλτιστη απόδοση και ελαχιστοποιώντας το χρόνο διακοπής λειτουργίας (González & Becker, 2018). Παρέχοντας ένα συνεπές πλαίσιο επικοινωνίας, το πρωτόκολλο SunSpec ενισχύει την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα αυτών των εγκαταστάσεων μεγάλης κλίμακας.

#### **4.7 Μελλοντικές Κατευθύνσεις και Καινοτομίες**

Το πρωτόκολλο SunSpec συνεχίζει να εξελίσσεται, με συνεχείς προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης με στόχο την επέκταση των δυνατοτήτων του και την αντιμετώπιση των αναδυόμενων προκλήσεων. Αρκετές τάσεις και καινοτομίες διαμορφώνουν το μέλλον του πρωτοκόλλου, υποσχόμενες να ενισχύσουν τη χρησιμότητα και την εφαρμογή του σε συστήματα ηλιακής ενέργειας επόμενης γενιάς. Μια σημαντική τάση είναι η ενσωμάτωση των τεχνολογιών Internet of Things (IoT) στο πρωτόκολλο SunSpec. Οι συσκευές με δυνατότητα IoT μπορούν να παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και προηγμένες αναλύσεις, υποστηρίζοντας την προγνωστική συντήρηση και την βελτιστοποιημένη

διαχείριση ενέργειας. Οι Burgio et al. (2023) υπογραμμίζουν τις δυνατότητες των λύσεων που βασίζονται στο IoT για τη βελτίωση της παρακολούθησης και του ελέγχου των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας της μπαταρίας, απεικονίζοντας τη συνέργεια μεταξύ των προτύπων IoT και του SunSpec.

Ένας άλλος τομέας καινοτομίας είναι η ανάπτυξη προηγμένων μέτρων κυβερνοασφάλειας για την προστασία των δικτύων επικοινωνίας DER. Καθώς οι απειλές στον κυβερνοχώρο γίνονται πιο εξελιγμένες, το Πρωτόκολλο SunSpec πρέπει να ενσωματώνει τεχνολογίες ασφάλειας αιχμής για την προστασία από πιθανές επιθέσεις. Έτσι, οι Onunkwo et al. (2019) τονίζουν την ανάγκη για συνεχή βελτίωση των πρωτοκόλλων ασφαλείας, διασφαλίζοντας ότι τα συστήματα ηλιακής ενέργειας παραμένουν ανθεκτικά και ασφαλή.

## **4.8 Βασικά στοιχεία και οι λειτουργίες τους (π.χ. μοντέλα δεδομένων, καταχωρητές)**

### **4.8.1 Μοντέλα Δεδομένων**

Τα μοντέλα δεδομένων είναι θεμελιώδη για το Πρωτόκολλο SunSpec, καθορίζοντας τη δομή και τη σημασιολογία των δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ των συσκευών. Αυτά τα μοντέλα καθορίζουν τις παραμέτρους, τις μονάδες και τις μορφές για διάφορους τύπους πληροφοριών, διασφαλίζοντας τη συνεπή ερμηνεία και επεξεργασία σε όλο το σύστημα.

Ένα μοντέλο δεδομένων στο πρωτόκολλο SunSpec είναι μια λογική αναπαράσταση των σημείων των δεδομένων που σχετίζονται με μια συγκεκριμένη συσκευή ή λειτουργία. Κάθε μοντέλο δεδομένων περιλαμβάνει πολλαπλά σημεία δεδομένων, γνωστά ως καταχωρητές, τα οποία ενσωματώνουν μεμονωμένα κομμάτια πληροφοριών όπως τάση, ρεύμα, ισχύ εξόδου και δείκτες κατάστασης. Το μοντέλο δεδομένων καθορίζει τον τρόπο οργάνωσης και επικοινωνίας αυτών των μητρώων, παρέχοντας ένα τυποποιημένο πλαίσιο για την ανταλλαγή δεδομένων (Abdulhadi, 2022). Όλα τα κοινά μοντέλα δεδομένων χρησιμοποιούνται ευρέως στο Πρωτόκολλο SunSpec για την αναπαράσταση διαφορετικών τύπων ηλιακών φωτοβολταϊκών εξαρτημάτων. Για παράδειγμα, το μοντέλο μετατροπέα SunSpec ορίζει σημεία δεδομένων που σχετίζονται με την κατάσταση λειτουργίας των μετατροπέων, συμπεριλαμβανομένων της τάσης AC, του ρεύματος συνεχούς ρεύματος, της ισχύος εξόδου και των συνθηκών σφάλματος. Αυτό το μοντέλο διασφαλίζει ότι τα δεδομένα από τους μετατροπέες μπορούν να ερμηνεύονται ομοιόμορφα, υποστηρίζοντας την αποτελεσματική διαχείριση του συστήματος και την αντιμετώπιση των προβλημάτων (González et al., 2021). Ένα άλλο παράδειγμα είναι το SunSpec Meter Model, το οποίο καθορίζει σημεία

δεδομένων για μετρητές ενέργειας. Αυτό το μοντέλο περιλαμβάνει παραμέτρους όπως η συνολική παραγόμενη ενέργεια, η κατανάλωση και οι στιγμιαίες μετρήσεις ισχύος. Με την τυποποίηση αυτών των παραμέτρων, το SunSpec Meter Model διευκολύνει την ακριβή παρακολούθηση και τιμολόγηση σε ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα (SunSpec Alliance, nd).

#### **4.8.2 Μητρώα**

Οι καταχωρητές είναι οι θεμελιώδεις μονάδες δεδομένων εντός του Πρωτοκόλλου SunSpec, που ενσωματώνουν μεμονωμένα σημεία δεδομένων που ορίζονται από τα μοντέλα δεδομένων. Κάθε μητρώο περιέχει μια συγκεκριμένη πληροφορία, όπως μια αριθμητική τιμή ή έναν δείκτη κατάστασης και χρησιμοποιεί ένα μοναδικό αναγνωριστικό.

Το πρωτόκολλο SunSpec ορίζει διάφορους τύπους καταχωρητών, ο καθένας από τους οποίους εξυπηρετεί μια διαφορετική λειτουργία εντός του πλαισίου επικοινωνίας. Αυτά περιλαμβάνουν:

- **Μητρώα εισόδου**

Αυτοί οι καταχωρητές διατηρούν δεδομένα που είναι μόνο για ανάγνωση και τυπικά αντιπροσωπεύουν μετρήσεις ή δείκτες κατάστασης. Για παράδειγμα, ένας καταχωρητής εισόδου μπορεί να αποθηκεύσει την τρέχουσα ισχύ εξόδου ενός μετατροπέα ή τη θερμοκρασία μιας μπαταρίας.

- **Τήρηση Μητρώων**

Αυτοί οι καταχωρητές περιέχουν δεδομένα που μπορούν να διαβαστούν και να γραφτούν, επιτρέποντας εντολές ελέγχου και ρυθμίσεις διαμόρφωσης. Για παράδειγμα, ένας καταχωρητής αναμονής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της τάσης στόχου για έναν μετατροπέα ή για την ενεργοποίηση ενός συγκεκριμένου τρόπου λειτουργίας.

- **Καταχωρητές διακριτών εισόδων**

Αυτοί οι καταχωρητές αποθηκεύουν δυαδικά δεδομένα που αντιπροσωπεύουν διακριτές καταστάσεις, όπως συνθήκες ενεργοποίησης/απενεργοποίησης ή καταστάσεις σφαλμάτων. Είναι μόνο για ανάγνωση και παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες για την παρακολούθηση της κατάστασης λειτουργίας των συσκευών.

- **Μητρώα πηνίων**

Αυτοί οι καταχωρητές αποθηκεύουν επίσης δυαδικά δεδομένα, αλλά διαβάζονται/εγγράφονται, επιτρέποντας τον έλεγχο διακριτών λειτουργιών, όπως η ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση μιας συσκευής.

Επιπλέον, η υλοποίηση των μητρώων εντός του Πρωτοκόλλου SunSpec διέπεται από τυποποιημένες μορφές και σχήματα διευθύνσεων. Σε κάθε μητρώο εκχωρείται μια μοναδική διεύθυνση, επιτρέποντας την ακριβή αναγνώριση και πρόσβαση εντός του δικτύου επικοινωνίας. Τα δεδομένα που αποθηκεύονται σε μητρώα μορφοποιούνται σύμφωνα με προκαθορισμένα πρότυπα, διασφαλίζοντας τη συνεπή ερμηνεία σε διαφορετικές συσκευές και συστήματα (SunSpec Alliance, nd).

Για παράδειγμα, το μοντέλο αντιστροφέα SunSpec περιλαμβάνει μια σειρά από καταχωρητές εισόδου και διατήρησης που καταγράφουν λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την απόδοση και την κατάσταση λειτουργίας του μετατροπέα. Αυτά τα μητρώα αντιστοιχίζονται σε συγκεκριμένες διευθύνσεις, επιτρέποντας στα συστήματα παρακολούθησης να διαβάζουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και να εκδίδουν εντολές ελέγχου όπως απαιτείται.

### **4.8.3 Διεπαφές και Επικοινωνία**

Το πρωτόκολλο SunSpec βασίζεται σε τυποποιημένες διεπαφές και πρωτόκολλα επικοινωνίας για τη διευκόλυνση της ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ των συσκευών. Αυτές οι διεπαφές ορίζουν τις μεθόδους και τις μορφές για τη μετάδοση δεδομένων, διασφαλίζοντας την αξιόπιστη και αποτελεσματική επικοινωνία σε όλο το σύστημα.

### **4.8.4 Πρωτόκολλο Modbus**

Ένα από τα κύρια πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στο πρωτόκολλο SunSpec είναι το Modbus. Το Modbus είναι ένα ευρέως διαδεδομένο πρωτόκολλο στον βιομηχανικό αυτοματισμό, γνωστό για την απλότητα και την στιβαρότητά του. Το πρότυπο SunSpec Modbus καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο τα μοντέλα δεδομένων και οι καταχωρητές αντιστοιχίζονται σε καταχωρητές Modbus, επιτρέποντας την απρόσκοπτη επικοινωνία μεταξύ συσκευών συμβατών με το SunSpec και των συστημάτων που βασίζονται σε Modbus (Modbus-IDA, 2004).



#### **4.8.5 IEEE 1547.1 και IEEE 2030.5**

Εκτός από το Modbus, το πρωτόκολλο SunSpec ενσωματώνει πρότυπα όπως το IEEE 1547.1 και το IEEE 2030.5 για τη βελτίωση της διαλειτουργικότητας και της ενοποίησης του δικτύου. Συγκεκριμένα, το IEEE 1547.1 εστιάζει στη δοκιμή και την επικύρωση των διασυνδέσεων μεταξύ καταναμημένων ενεργειακών πόρων (DER) και του δικτύου, διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με τα πρότυπα απόδοσης και ασφάλειας. Το IEEE 2030.5, γνωστό και ως Έξυπνο Ενεργειακό Προφίλ 2.0 (SEP2), ορίζει πρωτόκολλα επικοινωνίας για εφαρμογές έξυπνου δικτύου, υποστηρίζοντας προηγμένες λειτουργίες όπως η απόκριση ζήτησης και οι υπηρεσίες δικτύου (KAUR & ANANDAN, nd).

#### **4.9 Εφαρμογές σε Ηλιακά Φ/Β Συστήματα**

Τα βασικά στοιχεία του Πρωτοκόλλου SunSpec διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο σε διάφορες εφαρμογές στα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα, βελτιώνοντας την απόδοση, την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα. Τα τυποποιημένα μοντέλα δεδομένων και τα μητρώα που ορίζονται από το Πρωτόκολλο SunSpec διευκολύνουν την ολοκληρωμένη παρακολούθηση και τον έλεγχο των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από μετατροπείς, μετρητές και άλλα εξαρτήματα μπορούν να συλλεχθούν, να αναλυθούν και να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Για παράδειγμα, ένα σύστημα SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) μπορεί να αξιοποιήσει δεδομένα συμβατά με το SunSpec για την παρακολούθηση της υγείας και της απόδοσης ενός ηλιακού πάρκου, επιτρέποντας την προληπτική συντήρηση και ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής λειτουργίας (González & Becker, 2018).

Η αποτελεσματική ενσωμάτωση στο δίκτυο είναι επίσης μια κρίσιμη πτυχή των σύγχρονων ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων. Το πρωτόκολλο SunSpec υποστηρίζει την απρόσκοπτη αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλιακών εγκαταστάσεων και του ηλεκτρικού δικτύου, επιτρέποντας λειτουργίες όπως η ρύθμιση τάσης, ο έλεγχος συχνότητας και η απόκριση ζήτησης. Με την τυποποίηση των διεπαφών επικοινωνίας, το πρωτόκολλο διασφαλίζει ότι τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις του δικτύου και να συμβάλουν στη σταθερότητα και την αξιοπιστία του δικτύου (Wang et al., 2014).

## 4.10 Σύγκριση με άλλα πρωτόκολλα επικοινωνίας στην Βιομηχανία Ηλιακής Ενέργειας

- **Πρωτόκολλο SunSpec**

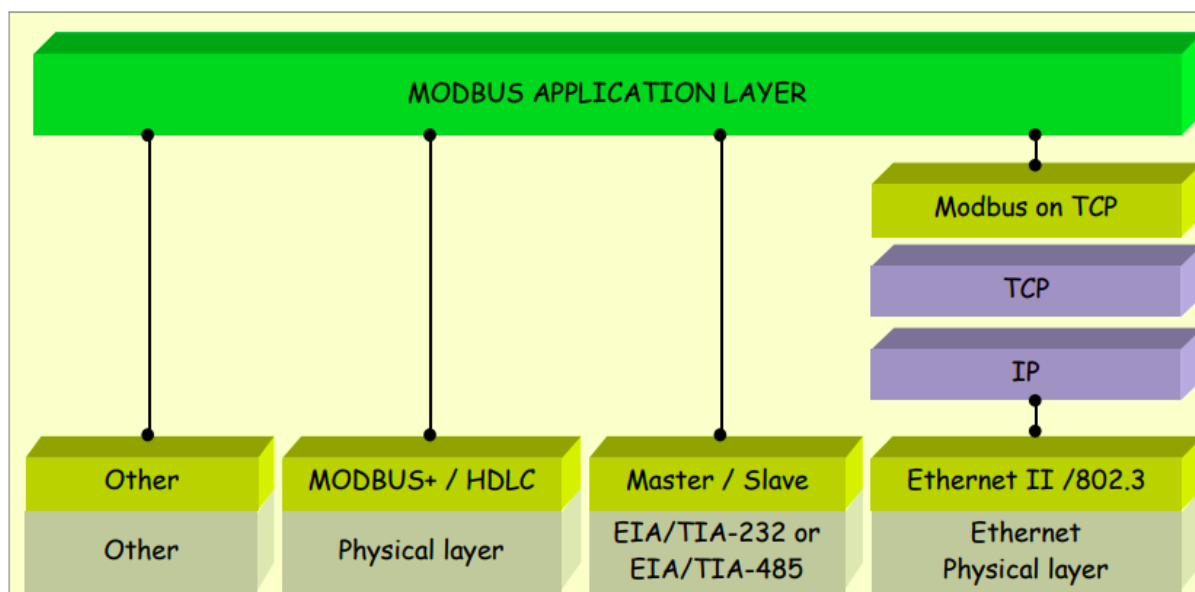
Το πρωτόκολλο SunSpec, που αναπτύχθηκε από την SunSpec Alliance, έχει σχεδιαστεί ειδικά για τη βιομηχανία ηλιακών φωτοβολταϊκών. Ορίζει τυποποιημένα μοντέλα δεδομένων και διεπαφές που διευκολύνουν τη διαλειτουργικότητα μεταξύ συσκευών διαφορετικών κατασκευαστών. Η SunSpec αξιοποιεί τα υπάρχοντα πρότυπα επικοινωνίας όπως το Modbus και το IEEE 1547, ενισχύοντας τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε συστήματα ηλιακής ενέργειας (SunSpec Alliance, nd).

Η κύρια δύναμη της SunSpec έγκειται στα τυποποιημένα μοντέλα δεδομένων που εξασφαλίζουν τη συνεπή αναπαράσταση δεδομένων σε διάφορα ηλιακά εξαρτήματα. Αυτή η ομοιομορφία απλοποιεί την ενοποίηση και τη συντήρηση του συστήματος, καθώς συσκευές διαφορετικών κατασκευαστών μπορούν να επικοινωνούν απρόσκοπτα, χρησιμοποιώντας τις ίδιες δομές δεδομένων. Συγχρόνως, η ευελιξία του SunSpec το καθιστά κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από μικρά οικιακά συστήματα έως εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας. Αυτή η προσαρμοστικότητα είναι ζωτικής σημασίας σε έναν κλάδο όπου οι διαμορφώσεις συστημάτων μπορεί να διαφέρουν σημαντικά.

- **Πρωτόκολλο Modbus**

Το Modbus είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα επικοινωνίας σε συστήματα βιομηχανικού αυτοματισμού και ελέγχου. Αναπτύχθηκε από τη Modicon το 1979, το Modbus έχει γίνει ένα de facto πρότυπο για τη σύνδεση βιομηχανικών ηλεκτρονικών συσκευών λόγω της απλότητας και της ευκολίας εφαρμογής του. Το Modbus υποστηρίζει πολλαπλούς τρόπους επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των RTU (Remote Terminal Unit), ASCII και TCP/IP, παρέχοντας ευελιξία σε διαφορετικά περιβάλλοντα δικτύωσης (Modbus-IDA, 2004).

Το πρωταρχικό πλεονέκτημα του Modbus είναι η ευθύτητα του, η οποία οδήγησε σε ευρεία υιοθέτηση και υποστήριξη από ένα ευρύ φάσμα κατασκευαστών. Αυτή η ευρεία συμβατότητα καθιστά το Modbus ελκυστική επιλογή για πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Ωστόσο, το Modbus δεν καθορίζει συγκεκριμένα μοντέλα δεδομένων, αφήνοντας τους κατασκευαστές συσκευών να καθορίσουν πώς αναπαρίστανται τα δεδομένα. Αυτή η έλλειψη τυποποίησης μπορεί να οδηγήσει σε ζητήματα διαλειτουργικότητας κατά την ενσωμάτωση συσκευών από διαφορετικούς προμηθευτές. Στην εικόνα 8 δείχνεται το μοντέλο το οποίο περιγράφει την επικοινωνία στο Modbus.



Εικόνα 8 Στοιβά επικοινωνίας MODBUS (Banik et al., 2023)

Ενώ το Modbus παρέχει τον υποκείμενο μηχανισμό επικοινωνίας για το SunSpec, δεν καθορίζει τα συγκεκριμένα μοντέλα δεδομένων που χρησιμοποιούνται στα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα. Η SunSpec βασίζεται στο Modbus, παρέχοντας τυποποιημένα μοντέλα δεδομένων προσαρμοσμένα στη βιομηχανία ηλιακής ενέργειας. Αυτό καθιστά το SunSpec πιο κατάλληλο για ηλιακές εφαρμογές όπου η τυποποιημένη αναπαράσταση δεδομένων και η διαλειτουργικότητα είναι ζωτικής σημασίας. Ουσιαστικά, το SunSpec επεκτείνει το Modbus, προσθέτοντας ένα επίπεδο τυποποίησης που διασφαλίζει ότι όλες οι συσκευές μιλούν την ίδια γλώσσα, διευκολύνοντας την ομαλότερη ενσωμάτωση και λειτουργία (González et al., 2021).

- **Πρότυπο IEEE 1547**

Το πρότυπο IEEE 1547 θεσπίζει κριτήρια και απαιτήσεις για τη διασύνδεση των καταναμημένων ενεργειακών πόρων (DER) με το δίκτυο. Αυτό το πρότυπο διασφαλίζει ότι τα DER, συμπεριλαμβανομένων των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων, μπορούν να λειτουργούν με ασφάλεια και αξιοπιστία όταν συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το IEEE 1547 εστιάζει σε πτυχές όπως η ρύθμιση τάσης, ο έλεγχος συχνότητας και η προστασία νησίδας, τα οποία είναι κρίσιμα για τη διατήρηση της σταθερότητας και της αξιοπιστίας του δικτύου (KAUR & ANANDAN, nd). Η βασική δύναμη του IEEE 1547 έγκειται στις περιεκτικές οδηγίες του για την απόδοση, τη λειτουργία και την ασφάλεια των διασυνδέσεων DER. Θέτοντας σαφή πρότυπα για τη διαλειτουργικότητα του δικτύου, το IEEE 1547 διασφαλίζει ότι τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα δεν επηρεάζουν αρνητικά τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του δικτύου. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς

αυξάνεται η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εισάγοντας δυνητικά μεταβλητότητα και πολυπλοκότητα στις λειτουργίες του δικτύου. Ενώ το IEEE 1547 εστιάζει στα πρότυπα διασύνδεσης δικτύου, το SunSpec το συμπληρώνει, παρέχοντας τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που απαιτούνται για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων. Το IEEE 1547 διασφαλίζει ότι τα ηλιακά συστήματα μπορούν να συνδεθούν με ασφάλεια στο δίκτυο, ενώ το SunSpec διασφαλίζει ότι τα εξαρτήματα εντός του ηλιακού συστήματος μπορούν να επικοινωνούν αποτελεσματικά. Συλλογικά, αυτά τα πρότυπα αντιμετωπίζουν τόσο την ενσωμάτωση της ηλιακής ενέργειας σε μακροεπίπεδο στο δίκτυο όσο και την επικοινωνία σε μικροεπίπεδο μεταξύ των μεμονωμένων ηλιακών εξαρτημάτων.

- **Πρωτόκολλο DNP3**

Το Πρωτόκολλο Κατανεμημένου Δικτύου (DNP3) χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία ηλεκτρικών ειδών κοινής ωφέλειας για την επικοινωνία μεταξύ του εξοπλισμού απόκτησης και ελέγχου δεδομένων. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για περιβάλλοντα όπου η αξιοπιστία και η έγκαιρη παράδοση δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας. Το DNP3 υποστηρίζει χαρακτηριστικά όπως δεδομένα με χρονική σήμανση, καταγραφή συμβάντων και πολύπλοκες δομές επικοινωνίας, καθιστώντας το μια ισχυρή επιλογή για εφαρμογές βοηθητικής χρήσης (González et al., 2021).

Ειδικότερα, η στιβαρότητα και η αξιοπιστία του DNP3 είναι τα κύρια δυνατά σημεία. Έχει σχεδιαστεί για να χειρίζεται τις απαιτητικές απαιτήσεις των δικτύων κοινής ωφέλειας, παρέχοντας λειτουργίες όπως συγχρονισμό χρόνου και ελέγχους ακεραιότητας δεδομένων. Αυτό καθιστά το DNP3 κατάλληλο για εφαρμογές όπου η ακριβής και αξιόπιστη επικοινωνία δεδομένων είναι απαραίτητη. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα και η εξειδικευμένη φύση του DNP3 μπορεί να είναι ένα μειονέκτημα σε απλούστερα συστήματα ή όπου η ευκολία χρήσης και υλοποίησης αποτελούν προτεραιότητα. Σε σύγκριση με το SunSpec, το DNP3 προσφέρει πιο προηγμένες δυνατότητες για εφαρμογές σε κλίμακα χρησιμότητας, αλλά μπορεί να είναι υπερβολικό για μικρότερες ή λιγότερο περίπλοκες εγκαταστάσεις ηλιακών φωτοβολταϊκών. Τέλος, η απλότητα και η εστίαση του SunSpec σε τυποποιημένα μοντέλα δεδομένων το καθιστούν πιο προσιτή επιλογή για ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών, από μικρά οικιακά συστήματα έως μεγάλα ηλιακά πάρκα. Ωστόσο, για έργα κοινής ωφέλειας μεγάλης κλίμακας που απαιτούν ισχυρές δυνατότητες διαχείρισης και ελέγχου δεδομένων, το DNP3 μπορεί να είναι η προτιμώμενη επιλογή λόγω των προηγμένων δυνατοτήτων του.

- **Πρωτόκολλο Zigbee**

Το Zigbee είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας σχεδιασμένο για εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης και χαμηλής ταχύτητας δεδομένων. Χρησιμοποιείται ευρέως στον οικιακό

αυτοματισμό, στον βιομηχανικό έλεγχο και σε εφαρμογές έξυπνης ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα του Zigbee έγκεινται στη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, τις δυνατότητες δικτύωσης πλέγματος και την ευκολία ανάπτυξης, καθιστώντας το ελκυστική επιλογή για καταναμεημένα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα (Gonzalez & Becker, 2018).

Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας του Zigbee είναι ιδιαίτερα ευεργετική για συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία, επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής τους και μειώνοντας τις απαιτήσεις συντήρησης. Η δυνατότητα δικτύωσης πλέγματος επιτρέπει στις συσκευές να επικοινωνούν σε εκτεταμένες αποστάσεις, αναμεταδίδοντας δεδομένα μέσω ενδιάμεσων κόμβων και βελτιώνοντας την αξιοπιστία και την κάλυψη του δικτύου. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν το Zigbee κατάλληλο για εφαρμογές όπου η απόδοση ισχύος και η ευελιξία είναι κρίσιμες. Ωστόσο, ο χαμηλός ρυθμός δεδομένων και η περιορισμένη εμβέλεια του Zigbee μπορεί να είναι μειονεκτήματα σε εφαρμογές που απαιτούν μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας ή επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις. Αν και είναι κατάλληλο για μικρού έως μεσαίου μεγέθους ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα, το Zigbee μπορεί να δυσκολευτεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις μεγάλων εγκαταστάσεων που απαιτούν ισχυρή διαχείριση δεδομένων και επικοινωνία υψηλής ταχύτητας.

Το SunSpec, από την άλλη πλευρά, παρέχει μια πιο δομημένη και τυποποιημένη προσέγγιση στην επικοινωνία δεδομένων, καθιστώντας το κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα ηλιακών εφαρμογών. Ενώ το Zigbee προσφέρει ευελιξία και ευκολία ανάπτυξης, τα τυποποιημένα μοντέλα δεδομένων και οι διεπαφές της SunSpec διασφαλίζουν συνεπή αναπαράσταση δεδομένων και διαλειτουργικότητα σε διαφορετικές συσκευές, παρέχοντας μια πιο ολοκληρωμένη λύση για τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα.

- **Πρωτόκολλο LoRaWAN**

Το LoRaWAN (Δίκτυο ευρείας περιοχής μεγάλης εμβέλειας) είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας σχεδιασμένο για εφαρμογές μεγάλης εμβέλειας και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές IoT (Internet of Things), όπου οι συσκευές πρέπει να επικοινωνούν σε μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Η ικανότητα του LoRaWAN να παρέχει κάλυψη ευρείας περιοχής με χαμηλές απαιτήσεις ισχύος το καθιστά ελκυστική επιλογή για απομακρυσμένα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα και εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας (Burgio et al., 2023).

Το κύριο πλεονέκτημα του LoRaWAN είναι η ικανότητά του να υποστηρίζει την επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας, καθιστώντας το ιδανικό για απομακρυσμένη παρακολούθηση και έλεγχο των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων σε γεωγραφικά διασκορπισμένες τοποθεσίες. Η χαμηλή

κατανάλωση ενέργειας το καθιστά επίσης κατάλληλο για συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής τους και μειώνοντας το κόστος συντήρησης. Επιπλέον, το LoRaWAN υποστηρίζει την αμφίδρομη επικοινωνία, επιτρέποντας τόσο τη μετάδοση δεδομένων όσο και τον απομακρυσμένο έλεγχο των συσκευών. Ωστόσο, ο χαμηλός ρυθμός δεδομένων του LoRaWAN μπορεί να αποτελεί περιορισμό σε εφαρμογές που απαιτούν μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας ή παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο. Αν και υπερέρχει στην παροχή κάλυψης μεγάλης εμβέλειας και απόδοσης ισχύος, ενδέχεται να μην ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των εφαρμογών που απαιτούν συχνή και μεγάλης έντασης επικοινωνία δεδομένων. Σε σύγκριση με το SunSpec, το LoRaWAN προσφέρει συμπληρωματικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας και την απόδοση ισχύος. Ενώ η SunSpec παρέχει τυποποιημένα μοντέλα δεδομένων και διεπαφές για συνεπή αναπαράσταση δεδομένων και διαλειτουργικότητα, το LoRaWAN ενισχύει την ικανότητα του πρωτοκόλλου να υποστηρίζει απομακρυσμένα και κατανεμημένα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα. Με την ενσωμάτωση του LoRaWAN με το SunSpec, τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να επωφεληθούν τόσο από την τυποποιημένη επικοινωνία δεδομένων όσο και από την εκτεταμένη κάλυψη δικτύου, διασφαλίζοντας την αξιόπιστη και αποτελεσματική λειτουργία σε διαφορετικά περιβάλλοντα.

- **Πρωτόκολλο BACnet**

Το BACnet (Δίκτυο Αυτοματισμού και Ελέγχου Κτιρίων) είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας σχεδιασμένο για συστήματα αυτοματισμού και ελέγχου κτιρίων. Παρέχει ένα τυποποιημένο πλαίσιο για την ενσωμάτωση διαφόρων συστημάτων κτιρίων, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων HVAC (Θέρμανση, εξαερισμός και κλιματισμός), φωτισμού, ασφάλειας και διαχείρισης ενέργειας. Η ικανότητα του BACnet να υποστηρίζει πολύπλοκα συστήματα αυτοματισμού κτιρίων το καθιστά κατάλληλο πρωτόκολλο για την ενσωμάτωση ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων σε έξυπνα κτίρια και λύσεις διαχείρισης ενέργειας (Gonzalez & Becker, 2018). Η κύρια δύναμη του BACnet έγκειται στην ευελιξία και την επεκτασιμότητα του, επιτρέποντάς του να υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και μεγεθών συστημάτων. Παρέχει ολοκληρωμένα μοντέλα δεδομένων και υπηρεσίες επικοινωνίας που επιτρέπουν την απρόσκοπτη ενοποίηση και διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων κτιρίων. Αυτό καθιστά το BACnet κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν προηγμένη διαχείριση ενέργειας και ενσωμάτωση με άλλα κτιριακά συστήματα. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα και η εξειδικευμένη φύση του BACnet μπορεί να είναι ένα μειονέκτημα σε απλούστερα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα ή εφαρμογές όπου η ευκολία χρήσης και υλοποίησης αποτελούν προτεραιότητα. Αν και διαπρέπει στην παροχή ενός ολοκληρωμένου πλαισίου για τον αυτοματισμό κτιρίων, μπορεί να είναι υπερβολικό για αυτόνομες εγκαταστάσεις ηλιακών

φωτοβολταϊκών που δεν απαιτούν εκτεταμένη ενοποίηση με άλλα συστήματα. Σε σύγκριση με το SunSpec, το BACnet προσφέρει πιο προηγμένες δυνατότητες για αυτοματισμό κτιρίων και διαχείριση ενέργειας, αλλά μπορεί να είναι λιγότερο προσβάσιμο για απλούστερες εφαρμογές ηλιακών φωτοβολταϊκών. Τα τυποποιημένα μοντέλα δεδομένων και οι διεπαφές της SunSpec παρέχουν μια πιο απλή και συνεπή προσέγγιση στην επικοινωνία δεδομένων, καθιστώντας την κατάλληλη για ένα ευρύ φάσμα ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ωστόσο, για εφαρμογές που απαιτούν προηγμένο αυτοματισμό κτιρίων και ενοποίηση με άλλα συστήματα, το BACnet μπορεί να είναι η προτιμώμενη επιλογή λόγω των ολοκληρωμένων δυνατοτήτων του.

## 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία για αυτή τη συστηματική ανασκόπηση περιλαμβάνει μια δομημένη προσέγγιση για τον εντοπισμό, την αξιολόγηση και τη σύνθεση της υπάρχουσας έρευνας που σχετίζεται με τις εφαρμογές, τις προκλήσεις και τις μελλοντικές κατευθύνσεις του Πρωτοκόλλου SunSpec σε καταναμημένους ενεργειακούς πόρους (DER), φωτοβολταϊκά (PV) συστήματα, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (ESS) και έξυπνα δίκτυα.

### 5.1 Τα κριτήρια ένταξης

1. **Είδος άρθρου** : Άρθρα, διατριβές, εργασίες συνεδρίων
2. **Θέμα** : Άρθρα που επικεντρώνονται σε εφαρμογές, προκλήσεις και μελλοντικές κατευθύνσεις του Πρωτοκόλλου SunSpec.
3. **Συνάφεια** : Μελέτες που αφορούν συγκεκριμένα τη χρήση του Πρωτοκόλλου SunSpec σε καταναμημένους ενεργειακούς πόρους (DER), φωτοβολταϊκά (PV) συστήματα, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (ESS) και έξυπνα δίκτυα.
4. **Μεθοδολογία** : Έρευνα με καλά καθορισμένες μεθοδολογίες και σαφή αποτελέσματα που σχετίζονται με το πρωτόκολλο SunSpec.
5. **Ημερομηνία δημοσίευσης** : Άρθρα που δημοσιεύθηκαν από το 2014 έως το 2024 για να διασφαλιστεί η συμπερίληψη της πιο πρόσφατης και σχετικής έρευνας.

### 5.2 Κριτήρια εξαίρεσης

1. **Μη Αγγλικά Άρθρα** : Μελέτες που δημοσιεύονται σε άλλες γλώσσες εκτός από τα Αγγλικά.
2. **Μη σχετιζόμενα θέματα** : Άρθρα που δεν σχετίζονται άμεσα με το Πρωτόκολλο SunSpec ή τις εφαρμογές, τις προκλήσεις και τις μελλοντικές κατευθύνσεις του.
3. **Ανεπαρκή δεδομένα** : Έρευνα με ελλιπή στοιχεία ή έλλειψη σαφών μεθοδολογιών και αποτελεσμάτων.
4. **Διπλότυπες μελέτες** : Πολλά άρθρα που αναφέρουν τα ίδια ερευνητικά ευρήματα.



### 5.3 Μεθοδολογία αναζήτησης

- **Βάσεις δεδομένων και μηχανές αναζήτησης**
- **Βάσεις δεδομένων :** IEEE Xplore, Google Scholar, ScienceDirect και SpringerLink.
- **Μηχανές Αναζήτησης :** Google και Microsoft Academic.
- **Αλγόριθμοι και λέξεις-κλειδιά αναζήτησης**
- **Λέξεις-κλειδιά :** "Πρωτόκολλο SunSpec", "Εφαρμογές SunSpec", "Προκλήσεις SunSpec", "Μελλοντικές κατευθύνσεις SunSpec", "Κατανεμημένοι Ενεργειακοί Πόροι", "Φωτοβολταϊκά Συστήματα", "Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας", "Έξυπνα Δίκτυα".
- **Συμβολοσειρές αναζήτησης :**
  - ("Πρωτόκολλο SunSpec" ΚΑΙ "Εφαρμογές")
  - ("Πρωτόκολλο SunSpec" ΚΑΙ "Προκλήσεις")
  - ("Πρωτόκολλο SunSpec" ΚΑΙ "Μελλοντικές κατευθύνσεις")
  - ("Κατανεμημένοι ενεργειακοί πόροι" ΚΑΙ "SunSpec")
  - ("Φωτοβολταϊκά συστήματα" ΚΑΙ "SunSpec")
  - ("Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας" ΚΑΙ "SunSpec")
  - ("Έξυπνα δίκτυα" ΚΑΙ "SunSpec")

### 5.4 Σκοπός και Ερευνητικά Ερωτήματα

#### Σκοπός

Ο σκοπός αυτής της συστηματικής ανασκόπησης είναι να διερευνήσει τις εφαρμογές, τις προκλήσεις και τις μελλοντικές κατευθύνσεις του Πρωτοκόλλου SunSpec σε κατανεμημένους ενεργειακούς πόρους (DER), φωτοβολταϊκά (PV) συστήματα, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (ESS) και έξυπνα δίκτυα. Αυτή η ανασκόπηση στοχεύει να συνθέσει την υπάρχουσα έρευνα προκειμένου να παρέχει μια ολοκληρωμένη κατανόηση της τρέχουσας κατάστασης και των πιθανών μελλοντικών εξελίξεων του Πρωτοκόλλου SunSpec.

## Ερευνητικά ερωτήματα

### 1. Εφαρμογές :

- Ποιες είναι οι τρέχουσες εφαρμογές του Πρωτοκόλλου SunSpec σε DER, Φ/Β συστήματα, ESS και έξυπνα δίκτυα;
  - Πώς το πρωτόκολλο SunSpec ενισχύει τη διαλειτουργικότητα και τη λειτουργικότητα σε αυτά τα συστήματα;

### 2. Προκλήσεις :

- Ποιές είναι οι κύριες προκλήσεις που σχετίζονται με την εφαρμογή του Πρωτοκόλλου SunSpec;
- Πώς επηρεάζουν αυτές οι προκλήσεις την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια των συστημάτων DER;

### 3. Μελλοντικές κατευθύνσεις :

- Ποιες μελλοντικές ευκαιρίες και εξελίξεις μπορούν να βελτιώσουν περαιτέρω το Πρωτόκολλο SunSpec;
- Πώς μπορούν οι αναδυόμενες τεχνολογίες όπως το IoT, το blockchain και η τεχνητή νοημοσύνη να ενσωματωθούν στο πρωτόκολλο SunSpec για τη βελτίωση των συστημάτων DER;
- Ποια βήματα απαιτούνται για να ξεπεραστούν οι προκλήσεις που εντοπίστηκαν και να συνειδητοποιηθούν πλήρως τα οφέλη του Πρωτοκόλλου SunSpec;

## 6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> : Αποτελέσματα

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από διάφορες μελέτες σχετικά με τις εφαρμογές, τις προκλήσεις και τις μελλοντικές προοπτικές του πρωτοκόλλου SunSpec. Ο πίνακας συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε μελέτης, συμπεριλαμβανομένων της μεθοδολογίας, του υλικού που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και των βασικών ευρημάτων. Αυτή η ανάλυση παρέχει μια περιεκτική εικόνα για τις διαφορετικές προσεγγίσεις στην αξιολόγηση του πρωτοκόλλου SunSpec και τις εφαρμογές του σε συστήματα DER.

Συγγραφέας	Έτος	Είδος άρθρου	Μεθοδολογία	Υλικό	Αποτελέσματα
<b>Johnson et al.</b>	2021	Συστηματική αξιολόγηση	Τέσσερις διαφορετικές συσκευές δοκιμής	Προσομοιωτής SunSpec DER με διεπαφή SunSpec Modbus, προσομοιωτής DER που αναπτύχθηκε από την EPRI με διεπαφή IEEE 1815, προσομοιωτής Kitu Systems DER με διεπαφή IEEE 2030.5, μετατροπέας EPRI IEEE 2030.5 σε Modbus	Εντοπίστηκαν περιορισμοί και ασάφειες στα πρωτόκολλα επικοινωνίας, τα μοντέλα πληροφοριών και τη μέθοδο δοκιμής IEEE 1547.1-2020. Συστάσεις για βελτιώσεις σε μελλοντικά πρότυπα. Αντιμετωπίζει εφαρμογές SunSpec Protocol, προκλήσεις και μελλοντικές κατευθύνσεις.
<b>Boudier</b>	2018	Πτυχιακή Εργασία	Ανάπτυξη πρωτοτύπων, προσομοίωση δοκιμών	SunSpec Modbus, Raspberry Pi, Emoncms	Ανέπτυξε ένα οικονομικά αποδοτικό πρωτότυπο για την παρακολούθηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων χρησιμοποιώντας το SunSpec Modbus. Το πρωτότυπο πληρούσε τις περισσότερες απαιτήσεις, αλλά χρειαζόταν περαιτέρω τροποποιήσεις και επικύρωση. Συζητά τις εφαρμογές στην παρακολούθηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων και τις πιθανές βελτιώσεις

					για συστήματα έξυπνων δικτύων.
<b>Milot et al.</b>	2022	Εργασία σε εξέλιξη	Ανάπτυξη δοκιμαστικής κλίνης με χρήση εργαλείων ανοιχτού κώδικα	Πρωτόκολλο SunSpec, δοχεία Docker, Energy Box	Αναπτύχθηκε μια βάση δοκιμών για την αξιολόγηση μέτρων κυβερνοασφάλειας για συστήματα DER χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Επικυρώθηκε σε περίπτωση χρήσης για τον εντοπισμό επιθέσεων άνθρωπος στη μέση. Υπογραμμίζει την ανάγκη για ενσωμάτωση της κυβερνοασφάλειας στις εφαρμογές SunSpec Protocol και εντοπίζει προκλήσεις.
<b>Kaur &amp; Anadan</b>	2021	Συστηματική αξιολόγηση	Τέσσερις διαφορετικές συσκευές δοκιμής	Προσομοιωτής SunSpec DER με διεπαφή SunSpec Modbus, προσομοιωτής DER που αναπτύχθηκε από την EPRI με διεπαφή IEEE 1815, προσομοιωτής Kitu Systems DER με διεπαφή IEEE 2030.5, μετατροπέας EPRI IEEE 2030.5 σε Modbus	Αξιολογήθηκε η διαλειτουργικότητα των DER, εντοπίστηκαν περιορισμοί στα πρωτόκολλα επικοινωνίας και στις μεθόδους δοκιμής. Συστάσεις για τη βελτίωση των προτύπων. Συζητά τις εφαρμογές του πρωτοκόλλου SunSpec, τις προκλήσεις και τις μελλοντικές ευκαιρίες.
<b>Johnson et al.</b>	2017	Μελέτη περίπτωσης (case study)	CHIL testbed, αυτοματοποιημένη πλατφόρμα δοκιμών	Πρωτόκολλο SunSpec, σύστημα Typhoon HIL, μετατροπέας έξυπνου δικτύου (SGC)	Αναπτύχθηκε μια οικονομικά αποδοτική μέθοδος για την αξιολόγηση προηγμένων δοκιμών λειτουργικότητας πλέγματος χρησιμοποιώντας μια δοκιμαστική κλίνη CHIL και μια αυτοματοποιημένη πλατφόρμα δοκιμών. Επίδειξη

					προηγμένων δοκιμών λειτουργικότητας πλέγματος χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Συζητά τις εφαρμογές στις υπηρεσίες υποστήριξης δικτύου και τις προκλήσεις στη διαλειτουργικότητα.
<b>Tancy et al.</b>	2019	Μελέτη περίπτωσης	Αξιολόγηση λειτουργικών απαιτήσεων από 330 εταιρείες	Πρωτόκολλο SunSpec, Ταξονομία Orange Button	Αναπτύχθηκε πρότυπο μετάδοσης δεδομένων με το Orange Button για χρηματοδότηση και λειτουργίες ηλιακής ενέργειας για μείωση του soft cost. Τονίζει τη χρήση του πρωτοκόλλου SunSpec για την επίτευξη διαλειτουργικότητας και τη μείωση του κόστους. Συζητά τις εφαρμογές και τις μελλοντικές ευκαιρίες για το πρωτόκολλο SunSpec.
<b>King and Sugiyam</b>	2017	Μελέτη περίπτωσης	Εφαρμογή και αξιολόγηση FleetLink	Πρωτόκολλο SunSpec, λύση επικοινωνίας FleetLink	Αναπτύχθηκε λύση επικοινωνίας FleetLink για τη μείωση του κόστους και τη βελτίωση της αξιοπιστίας για την παρακολούθηση της παραγωγής PV/DER στο χώρο. Υπογραμμίζει τις εφαρμογές στην ηλιακή επέκταση κατοικιών και εντοπίζει προκλήσεις στο κόστος και την αξιοπιστία. Συζητά τις μελλοντικές ευκαιρίες για το πρωτόκολλο SunSpec σε λύσεις επικοινωνίας.

<p><b>Onunkwo et al.</b></p>	<p>2019</p>	<p>Μελέτη περίπτωσης</p>	<p>Προσομοιωμένα δίκτυα επικοινωνίας DER</p>	<p>Πρωτόκολλο SunSpec, πλατφόρμα συν-προσομοίωσης Sandia (SCEPTRE)</p>	<p>Αξιολόγησε τη στάση ασφαλείας των διαφορετικών τεχνολογιών επικοινωνίας για DER χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Προσδιόρισε κινδύνους κυβερνοασφάλειας και προτεινόμενες λύσεις. Συζητά τις εφαρμογές στον τομέα της κυβερνοασφάλειας για το Πρωτόκολλο SunSpec και τις προκλήσεις στην προστασία των δικτύων DER.</p>
<p><b>Goncalves et al.</b></p>	<p>2023</p>	<p>Συστηματική αξιολόγηση</p>	<p>Έρευνα μετατροπέων, ανάλυση επικοινωνίας</p>	<p>Πρωτόκολλο SunSpec, ηλιακά συστήματα, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας, σταθμοί φόρτισης EV</p>	<p>Αναλύθηκαν οι δυνατότητες του μετατροπέα, οι λειτουργίες υποστήριξης δικτύου και οι μέθοδοι επικοινωνίας. Συζητά τις εφαρμογές στη διαχείριση συστημάτων με ηλιακή, αποθήκευση και φόρτιση EV. Προσδιορίζει τις προκλήσεις και τις μελλοντικές κατευθύνσεις για την ενσωμάτωση του Πρωτοκόλλου SunSpec σε αυτά τα συστήματα.</p>
<p><b>Burgio et al.</b></p>	<p>2023</p>	<p>Μελέτη περίπτωσης</p>	<p>Ανάπτυξη λύσεων IoT, δοκιμές επικύρωσης</p>	<p>Συστήματα αποθήκευσης μπαταριών SunSpec, ABB, Sonnen, SolarEdge</p>	<p>Ανέπτυξε μια λύση βασισμένη στο IoT για την παρακολούθηση και τον έλεγχο συστημάτων αποθήκευσης μπαταριών χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Οι δοκιμές επικύρωσης έδειξαν</p>

					αποτελεσματικότητα. Συζητά τις εφαρμογές στη διαχείριση ενέργειας οικιακής και εμπορικής χρήσης, εντοπίζει προκλήσεις και μελλοντικές ευκαιρίες για το πρωτόκολλο SunSpec.
<b>Kang et al.</b>	2024	Μελέτη περίπτωσης	Δοκιμή τύπου για επαλήθευση λειτουργικότητας	SunSpec Modbus, προσομοιωτής δικτύου, μετατροπέας IDER, προσομοιωτής μπαταρίας, αναλυτής ισχύος	Παρέχεται λειτουργική επαλήθευση των IDER χρησιμοποιώντας διαδικασίες δοκιμών του προτύπου IEEE 1547.1-2020. Αποδεδειγμένη διαλειτουργικότητα και λειτουργίες συνδεδεμένες στο δίκτυο χρησιμοποιώντας το SunSpec Modbus. Συζητά τις εφαρμογές στην αξιοπιστία του δικτύου και τις προκλήσεις στην εκπλήρωση ενημερωμένων προτύπων.
<b>Yaseen et al.</b>	2023	Μελέτη περίπτωσης	Προσομοίωση Matlab, απαιτήσεις δοκιμών SunSpec	Πρωτόκολλο SunSpec, αποδιαμόρφωση S-FSK με βάση το RMS	Αναπτύχθηκε ένα σύστημα δέκτη συμβατό με SunSpec για καταστάσεις γρήγορου τερματισμού λειτουργίας. Αποδεδειγμένη λειτουργικότητα και συμμόρφωση με τις απαιτήσεις δοκιμών SunSpec. Συζητά τις εφαρμογές σε συστήματα ασφαλείας και τις προκλήσεις όσον αφορά τη διασφάλιση της συμμόρφωσης.
<b>Reihs et al.</b>	2023	Μελέτη περίπτωσης	Ανάπτυξη ψηφιακής	Πρωτόκολλο SunSpec,	Αναπτύχθηκε μια ψηφιακή διεπαφή για

			διεπαφής, επισκόπηση αγοράς	εύκαμπτα φορτία, κατανεμημένες γεννήτριες	τη διαχείριση της ευελιξίας σε δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Εντοπίστηκαν πιθανοί υποψήφιοι για τυποποίηση. Συζητά τις εφαρμογές στη διαχείριση πλέγματος και τις προκλήσεις για την επίτευξη ευελιξίας.
<b>Wang et al.</b>	2014	Μελέτη περίπτωσης	Προσομοίωση και υλοποίηση υβριδικού συστήματος	Πρωτόκολλο SunSpec, σύστημα V2H/V2G, ηλεκτρικά οχήματα	Ανέπτυξε ένα υβριδικό σύστημα V2H/V2G χρησιμοποιώντας τυπικά πρωτόκολλα επικοινωνίας, επικυρωμένα μέσω προσομοίωσης και υλοποίησης. Συζητά τις εφαρμογές για την ενσωμάτωση των EV στο δίκτυο και τις προκλήσεις στη διαχείριση φορτίου.
<b>Gonzales &amp; Becker</b>	2018	Μελέτη περίπτωσης	Αξιολόγηση Προγράμματος Συνεργατών APS Solar	Πρωτόκολλο SunSpec, σύστημα SCADA, σύνθετοι μετατροπείς	Αξιολόγησε το κεντρικό σύστημα ελέγχου του προγράμματος APS Solar Partner για την παρακολούθηση και τη ρύθμιση των μετατροπέων χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Συζητά τις εφαρμογές σε φωτοβολταϊκά συστήματα κατοικιών που ανήκουν σε επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και τις προκλήσεις στις απαιτήσεις SCADA.
<b>Gonzalez et al.</b>	2021	Μελέτη περίπτωσης	Πειραματική ανάπτυξη έξυπνου μικροδικτύου	Πρωτόκολλο SunSpec, Modbus TCP, ανοιχτού κώδικα και	Πρότεινε μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική για την ανάπτυξη



				ιδιόκτητος εξοπλισμός	συστημάτων αυτοματισμού και παρακολούθησης σε μικροδίκτυα χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Επικυρώθηκε με ένα πειραματικό έξυπνο μικροδίκτυο. Συζητά τις εφαρμογές σε έξυπνα δίκτυα, τις προκλήσεις στην ετερογένεια και τις μελλοντικές κατευθύνσεις για το πρωτόκολλο SunSpec.
<b>Abdulhadi</b>	2022	Πτυχιακή εργασία	Αξιολόγηση συστημάτων ταχείας απενεργοποίησης συμβατά με SunSpec	Πρωτόκολλο SunSpec, συστήματα ταχείας απενεργοποίησης, IEEE 1547	Παρουσίασε μια τεχνική ανοιχτού κώδικα για την αξιολόγηση της διαλειτουργικότητας των DER χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Αποδεδειγμένη ικανότητα με διάφορες συσκευές δοκιμής. Συζητά τις εφαρμογές, τις προκλήσεις και τις μελλοντικές ευκαιρίες για το Πρωτόκολλο SunSpec σε συστήματα ταχείας διακοπής λειτουργίας και διαλειτουργικότητα DER.
<b>SolarEdge SunSpec Alliance</b>	2019	Τεχνική Σημείωση	Περιγραφική Ανάλυση	Πρωτόκολλο SunSpec σε μετατροπείς SolarEdge	Βελτιωμένη καταγραφή δεδομένων, παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και τηλεχειρισμός.
<b>SunSpec Alliance</b>	2015	Τεχνική Σημείωση	Περιγραφική Ανάλυση	Επισκόπηση πρωτοκόλλου SunSpec	Βελτιωμένη ολοκλήρωση και διαχείριση των ενεργειακών πόρων.

IEEE	2018	Πρότυπο	Ρυθμιστικό Πλαίσιο	Πρότυπο IEEE 1547	Προσδιορίστηκαν προκλήσεις διαλειτουργικότητας και κυβερνοασφάλειας.
Sridhar, S., Hahn, A., & Govindarasu, M.	2012	Άρθρο περιοδικού	Ανασκόπηση και Ανάλυση	Κυβερνοασφάλεια στο ηλεκτρικό δίκτυο	Προτεινόμενα μέτρα για την ενίσχυση της ασφάλειας πρωτοκόλλου.
Harmon, E., et al	2018	Άρθρο περιοδικού	Εμπειρική μελέτη	Ενσωμάτωση IoT σε μικροδίκτυα	Βελτιωμένη ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και συντονισμός συστημάτων DER.
Sun, Q., et al	2015	Άρθρο περιοδικού	Ανάπτυξη αλγορίθμων	Multi-Agent Systems, Blockchain	Δυνατότητα αποκεντρωμένου ελέγχου και βελτιωμένης ασφάλειας δεδομένων.
Goodman, F., et al.	2017	Τεχνική Σημείωση	Έργο επίδειξης	Πρότυπα Επικοινωνίας για DER	Ενσωμάτωση AI για προγνωστική ανάλυση και προηγμένο έλεγχο.

Οι **Johnson et al. (2021)** κυκλοφόρησαν μια συστηματική ανασκόπηση του προτύπου IEEE 1547 για τη διασύνδεση των κατανεμημένων ενεργειακών πόρων (DER) στις ΗΠΑ, που ενημερώθηκε το 2018 για να περιλαμβάνει τυποποιημένα χαρακτηριστικά διαλειτουργικότητας. Η μελέτη χρησιμοποίησε τέσσερις συσκευές δοκιμής, έναν προσομοιωτή SunSpec DER με διεπαφή SunSpec Modbus, έναν προσομοιωτή DER που αναπτύχθηκε από την EPRI με διεπαφή IEEE 1815, έναν προσομοιωτή Kitu Systems DER με διεπαφή IEEE 2030.5 και έναν μετατροπέα EPRI IEEE 2030.5 σε Modbus για την αξιολόγηση της διαλειτουργικότητας DER. Οι ερευνητές εντόπισαν περιορισμούς και ασάφειες στα πρωτόκολλα επικοινωνίας και τις μεθόδους δοκιμής, υποδηλώνοντας ότι οι φορείς ανάπτυξης προτύπων πρέπει να αντιμετωπίσουν αυτά τα ζητήματα για να βελτιώσουν τα μελλοντικά πρότυπα.

Στη διατριβή του, ο **Boudier (2018)** δημιούργησε ένα πρωτότυπο, αξιοποιώντας το Modbus SunSpec για να προσφέρει μια οικονομικά αποδοτική λύση για την παρακολούθηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Το έργο χρησιμοποίησε μια μεθοδολογία μηχανικής που περιλάμβανε ένα σαφές πεδίο εφαρμογής, χρονοδιάγραμμα και στόχους. Το πρωτότυπο, που χρησιμοποιεί λογισμικό Emomcms και ένα Raspberry Pi προγραμματισμένο σε Python, δεν μπόρεσε να δοκιμαστεί επιτόπου λόγω των συνθηκών της αγοράς, αλλά αποδείχθηκε σταθερό και λειτουργικό σε προσομοιωμένες δοκιμές.

Επιπλέον, το πρωτότυπο πληρούσε τις περισσότερες απαιτήσεις και πρότεινε πιθανές βελτιώσεις για τις δυνατότητες αυτοματισμού και ελέγχου των συστημάτων έξυπνου δικτύου.

**Οι Milot et al. (2022)** παρουσίασαν μια μελέτη περίπτωσης σε εξέλιξη που επικεντρώνεται στην ασφάλεια στον κυβερνοχώρο σε κρίσιμες υποδομές, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Ανέπτυξαν ένα πεδίο δοκιμών με εργαλεία ανοιχτού κώδικα και κοντέινερ Docker για την αξιολόγηση μέτρων κυβερνοασφάλειας για συστήματα DER. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν μια συσκευή περιορισμένης χρήσης υλικού, το Energy Box, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητά της στον εντοπισμό επιθέσεων από τον άνθρωπο. Αυτή η μελέτη υπογραμμίζει την αναγκαιότητα ενσωμάτωσης της ασφάλειας στον κυβερνοχώρο με τα πρότυπα SunSpec για την προστασία των συστημάτων DER από εξωτερικές απειλές.

**Οι Kaur και Anandan (2021)** πραγματοποίησαν μια συστηματική ανασκόπηση του αμερικανικού προτύπου συνδεσιμότητας DER, IEEE 1547, που ενημερώθηκε το 2018. Χρησιμοποίησαν τέσσερις συσκευές δοκιμής, συμπεριλαμβανομένου ενός προσομοιωτή SunSpec DER, για να αξιολογήσουν τη διαλειτουργικότητα. Η μελέτη εντόπισε περιορισμούς και ασάφειες στα πρωτόκολλα επικοινωνίας και τις μεθόδους δοκιμής, προτείνοντας βελτιώσεις για τα πρότυπα. Η έρευνά τους υπογραμμίζει τη σημασία των ισχυρών μεθοδολογιών δοκιμών για τη διασφάλιση της διαλειτουργικότητας του DER και τονίζει πιθανούς τομείς για περαιτέρω ανάπτυξη στα πρότυπα SunSpec.

**Οι Johnson et al. (2017)** διεξήγαγαν μια μελέτη περίπτωσης σχετικά με τα νέα πρότυπα σύνδεσης DER και διαλειτουργικότητας λόγω της αυξημένης χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για την ακρίβεια, ανέπτυξαν ένα σύστημα CHIL και μια αυτοματοποιημένη πλατφόρμα δοκιμών για την αξιολόγηση των προηγμένων δοκιμών λειτουργικότητας πλέγματος, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Το σύστημα CHIL επέδειξε προηγμένες δοκιμές λειτουργικότητας δικτύου, συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου άεργου ισχύος και συχνότητας-βατ. Η μελέτη τόνισε τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και την ευελιξία του συστήματος CHIL στην αξιολόγηση των υπηρεσιών υποστήριξης δικτύου και της διαλειτουργικότητας.

**Οι Tancy et al. (2019)** παρουσίασαν μια μελέτη περίπτωσης σχετικά με το πρότυπο μετάδοσης δεδομένων Orange Button για τη χρηματοδότηση και τις λειτουργίες ηλιακής ενέργειας, με στόχο τη μείωση του ήπιου κόστους. Η SunSpec Alliance συνεργάστηκε με περισσότερες από 330 εταιρείες για τη δημιουργία 4.500 στοιχείων ταξινόμησης και API με Orange Button. Το έργο, που ολοκληρώθηκε εντός χρονοδιαγράμματος και εντός προϋπολογισμού, παρουσίασε τον ρόλο του πρωτοκόλλου SunSpec στην επίτευξη διαλειτουργικότητας και στη μείωση του κόστους, τονίζοντας τις μελλοντικές ευκαιρίες στη χρηματοδότηση και τις λειτουργίες ηλιακής ενέργειας.

**Οι King και Sugiyama (2017)** διεξήγαγαν μια μελέτη περίπτωσης για το FleetLink, μια νέα λύση επικοινωνίας που έχει σχεδιαστεί για τη μείωση του κόστους και τη βελτίωση της αξιοπιστίας στην παρακολούθηση της παραγωγής PV/DER στο χώρο. Το FleetLink είχε ως στόχο να μειώσει το κόστος επικοινωνίας με τοποθεσίες οικιστικών τελικών χρηστών και να εξασφαλίσει μια συνεπή διαθεσιμότητα δεδομένων. Η μελέτη κατέδειξε την ικανότητα της FleetLink να μειώνει το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης και να βελτιώνει την αξιοπιστία, συζητώντας τις μελλοντικές ευκαιρίες για το πρωτόκολλο SunSpec σε λύσεις επικοινωνίας.

**Οι Onunkwo et al. (2019)** παρουσίασαν μια μελέτη περίπτωσης για την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο των δικτύων επικοινωνίας DER, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν την πλατφόρμα συν-προσομοίωσης των Εθνικών Εργαστηρίων Sandia, SCEPTRE, για να αξιολογήσουν τη στάση ασφαλείας διαφόρων τεχνολογιών επικοινωνίας. Η μελέτη εντόπισε τρωτά σημεία στα δίκτυα DER και πρότεινε λύσεις όπως η κατάτμηση και η κρυπτογράφηση δικτύου για τη βελτίωση της ασφαλείας. Η έρευνα τόνισε επίσης την ανάγκη για ισχυρά μέτρα κυβερνοασφαλείας για την προστασία των συστημάτων DER που είναι συμβατά με το SunSpec από επιθέσεις στον κυβερνοχώρο.

**Οι Goncalves et al. (2023)** πραγματοποίησαν μια συστηματική ανασκόπηση των δυνατοτήτων των μετατροπέων σε συνδεδεμένα στο δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα, εστιάζοντας στις στατικές και δυναμικές λειτουργίες υποστήριξης του δικτύου. Η μελέτη υπογράμμισε τη σημασία των προηγμένων ηλεκτρονικών ισχύος για τη βελτίωση της χωρητικότητας φιλοξενίας φωτοβολταϊκών και προσδιόρισε μεθόδους επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένου του πρωτοκόλλου SunSpec, για τη διαχείριση συστημάτων με ηλιακή ενέργεια, αποθήκευση μπαταρίας και φόρτιση EV. Η έρευνα παρείχε επίσης πληροφορίες για τις εφαρμογές του Πρωτοκόλλου SunSpec στην ενίσχυση της υποστήριξης του δικτύου και στη διαχείριση ολοκληρωμένων ενεργειακών συστημάτων.

**Οι Burgio et al. (2023)** παρουσίασαν μια μελέτη περίπτωσης για μια λύση που βασίζεται στο IoT για την παρακολούθηση και τον έλεγχο συστημάτων αποθήκευσης μπαταριών, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Για την ακρίβεια, ανέπτυξαν μια οικιακή πύλη για τη διαχείριση της αποθήκευσης της μπαταρίας τοπικά μέσω τοπικών API και Wi-Fi, με μια βοηθητική συσκευή για ενσωμάτωση πρωτοκόλλου SunSpec. Οι δοκιμές επικύρωσης έδειξαν την αποτελεσματικότητα της λύσης στη διαχείριση συστημάτων αποθήκευσης από τις ABB, Sonnen και SolarEdge. Η μελέτη εξέτασε τις δυνατότητες του Πρωτοκόλλου SunSpec στη διαχείριση ενέργειας οικιακής και εμπορικής χρήσης, εντοπίζοντας μελλοντικές ευκαιρίες και προκλήσεις.

**Οι Kang et al. (2024)** διεξήγαγαν μια μελέτη περίπτωσης σχετικά με τη λειτουργική επαλήθευση των διαλειτουργικών κατανεμημένων ενεργειακών πόρων (IDER), χρησιμοποιώντας τις διαδικασίες δοκιμής στο πρότυπο IEEE 1547.1-2020. Η μελέτη χρησιμοποίησε το SunSpec Modbus για διασύνδεση με συστήματα IDER συνδεδεμένα στο δίκτυο και πραγματοποίησε δοκιμές τύπου για επαλήθευση της λειτουργικότητας. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν ότι το IDER πληρούσε τα ενημερωμένα κριτήρια σύνδεσης στο δίκτυο, τονίζοντας τις εφαρμογές του Πρωτοκόλλου SunSpec για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας του δικτύου και τον εντοπισμό προκλήσεων σε συμμόρφωση με τα εξελισσόμενα πρότυπα.

**Οι Yaseen et al. (2023)** παρουσίασαν μια μελέτη περίπτωσης για ένα σύστημα δέκτη συμβατό με το SunSpec σχεδιασμένο για καταστάσεις ταχείας διακοπής λειτουργίας. Το σύστημα χρησιμοποίησε μια μη παραδοσιακή αποδιαμόρφωση S-FSK που βασίζεται σε RMS, εξαλείφοντας την ανάγκη για φίλτρα και διευκολύνοντας την ενσωμάτωση CMOS. Ο δέκτης αποκωδικοποίησε επιτυχώς τα σήματα FSK και πληρούσε τις απαιτήσεις δοκιμής SunSpec. Η μελέτη εξέτασε την εφαρμογή του πρωτοκόλλου SunSpec για τη βελτίωση των συστημάτων ασφαλείας και εντόπισε προκλήσεις στη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τα πρότυπα ταχείας διακοπής λειτουργίας.

**Οι Reihls et al. (2023)** διεξήγαγαν μια μελέτη περίπτωσης για την ανάπτυξη μιας ψηφιακής διεπαφής για τη διαχείριση της ευελιξίας σε δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Η μελέτη εντόπισε πιθανούς υποψηφίους για την τυποποίηση της διεπαφής μέσω μιας επισκόπησης της αγοράς των τρεχόντων προτύπων και πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Η έρευνα ανέδειξε τις εφαρμογές του Πρωτοκόλλου SunSpec στη διαχείριση δικτύου και συζήτησε τις προκλήσεις για την επίτευξη ευελιξίας στα δίκτυα διανομής.

**Οι Wang et al. (2014)** πραγματοποίησαν μια μελέτη περίπτωσης σε ένα υβριδικό σύστημα Vehicle-to-Home (V2H) και Vehicle-to-Grid (V2G), χρησιμοποιώντας τυπικά πρωτόκολλα επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένου του πρωτοκόλλου SunSpec. Το σύστημα διαχειριζόταν τόσο τα νησιωτικά φορτία AC/DC όσο και το ηλεκτρικό δίκτυο, επικυρωμένα μέσω προσομοίωσης και υλοποίησης. Η μελέτη κατέδειξε την ικανότητα του συστήματος να υποστηρίζει κρίσιμα φορτία και να ανταποκρίνεται σε απομακρυσμένα σήματα απόκρισης ζήτησης, συζητώντας εφαρμογές για την ενσωμάτωση των EV στο δίκτυο και εντοπίζοντας προκλήσεις διαχείρισης φορτίου.

**Οι Gonzalez και Becker (2018)** παρουσίασαν μια μελέτη περίπτωσης για το Πρόγραμμα Solar Partner (SPP) της Arizona Public Service Company (APS), το οποίο ενσωμάτωσε φωτοβολταϊκά συστήματα στέγης κατοικιών που ανήκουν σε κοινή χρήση χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Το πρόγραμμα ανέπτυξε ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου για την παρακολούθηση και τη

ρύθμιση πολύπλοκων μετατροπέων. Η μελέτη τόνισε τα τεχνικά ζητήματα και τις απαιτήσεις SCADA που είναι απαραίτητες για τη λειτουργικότητα του προγράμματος, συζητώντας τις εφαρμογές σε Φ/Β συστήματα που ανήκουν σε επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και εντοπίζοντας προκλήσεις για την επίτευξη της αξιοπιστίας και της ποιότητας ισχύος.

**Οι Gonzalez et al. (2021)** διεξήγαγαν μια μελέτη περίπτωσης για την ανάπτυξη ετερογενών συστημάτων αυτοματισμού και παρακολούθησης σε μικροδίκτυα, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Πρότειναν μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική για την ενσωμάτωση ανοιχτού κώδικα και ιδιόκτητου εξοπλισμού, επικυρωμένη με ένα πειραματικό έξυπνο μικροδίκτυο που τροφοδοτείται από φωτοβολταϊκά. Η μελέτη εξέτασε τις εφαρμογές του Πρωτοκόλλου SunSpec σε έξυπνα δίκτυα, την αντιμετώπιση προκλήσεων στη διαχείριση της ετερογένειας υλικού και λογισμικού και μελλοντικές κατευθύνσεις για τη βελτίωση της διαλειτουργικότητας.

**Ο Abdulhadi (2022)** παρουσίασε μια διατριβή σχετικά με την αξιολόγηση συστημάτων ταχείας απενεργοποίησης συμβατών με το SunSpec για DER. Η μελέτη χρησιμοποίησε διάφορες συσκευές δοκιμής για να αποδείξει τη διαλειτουργικότητα, εστιάζοντας στα πρότυπα SunSpec Modbus και IEEE 1547. Τα ευρήματα τόνισαν τις δυνατότητες του Πρωτοκόλλου SunSpec για την ενίσχυση της ασφάλειας του γρήγορου τερματισμού λειτουργίας και της διαλειτουργικότητας του DER, εντοπίζοντας προκλήσεις και μελλοντικές ευκαιρίες για περαιτέρω ανάπτυξη και τυποποίηση.

Η τεχνική σημείωση **SolarEdge SunSpec Alliance (2019)** παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση του τρόπου με τον οποίο εφαρμόζεται το Πρωτόκολλο SunSpec στους μετατροπείς SolarEdge, ένα κρίσιμο στοιχείο σε DER, φωτοβολταϊκά συστήματα, ESS και έξυπνα δίκτυα.

Το έγγραφο των **SunSpec Alliance (2015)** περιγράφει τις θεμελιώδεις αρχές του Πρωτοκόλλου SunSpec, δίνοντας έμφαση στις εφαρμογές του σε DER και έξυπνα δίκτυα. Εξετάζει την ικανότητα του πρωτοκόλλου να τυποποιεί την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών συσκευών, διευκολύνοντας την καλύτερη ενοποίηση και διαχείριση των ενεργειακών πόρων, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική απόδοση και αξιοπιστία του συστήματος.

Το πρότυπο **IEEE. (2018)** υπογραμμίζει διάφορες προκλήσεις που σχετίζονται με την εφαρμογή του Πρωτοκόλλου SunSpec, συμπεριλαμβανομένων των θεμάτων τεχνικής διαλειτουργικότητας, των τρωτών σημείων της κυβερνοασφάλειας και της ανάγκης για τυποποιημένες μορφές ανταλλαγής δεδομένων. Συζητά πώς αυτές οι προκλήσεις μπορούν να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια των συστημάτων DER.

Το έγγραφο των **Sridhar, S., Hahn, A., και Govindarasu, M. (2012)** εξετάζει ζητήματα κυβερνοασφάλειας που σχετίζονται με τα συστήματα DER και το Πρωτόκολλο SunSpec. Εντοπίζει

πιθανούς κινδύνους και τρωτά σημεία, προτείνοντας μέτρα για την ενίσχυση της ασφάλειας του πρωτοκόλλου. Οι προκλήσεις που συζητήθηκαν περιλαμβάνουν τη διασφάλιση της ακεραιότητας των δεδομένων, την πρόληψη της μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης και την προστασία από επιθέσεις στον κυβερνοχώρο.

Η μελέτη των **Harmon, E., et al. (2018)** διερευνά την ενοποίηση αναδυόμενων τεχνολογιών όπως το IoT με το Πρωτόκολλο SunSpec. Συζητά πώς το IoT μπορεί να διευκολύνει την ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και να βελτιώσει τον συντονισμό των συστημάτων DER, παρουσιάζοντας ευκαιρίες για ενισχυμένο έλεγχο και αποτελεσματικότητα.

Το άρθρο των **Sun, Q., et al. (2015)** μελετά πώς τα συστήματα πολλαπλών παραγόντων και οι τεχνολογίες blockchain μπορούν να ενσωματωθούν με το πρωτόκολλο SunSpec για τη βελτίωση των συστημάτων DER. Υπογραμμίζει επίσης τη δυνατότητα για αποκεντρωμένο έλεγχο, βελτιωμένη ασφάλεια δεδομένων και βελτιωμένη λειτουργική αποτελεσματικότητα μέσω αυτών των προηγμένων τεχνολογιών.

Η τεχνική σημείωση των **Goodman, F., et al. (2017)** παρέχει πληροφορίες για μελλοντικές εξελίξεις του Πρωτοκόλλου SunSpec και τα απαραίτητα βήματα για την αντιμετώπιση των τρεχουσών προκλήσεων. Σκιαγραφεί τις δυνατότητες ενσωμάτωσης της τεχνητής νοημοσύνης για προγνωστική ανάλυση και προηγμένους μηχανισμούς ελέγχου, προτείνοντας έναν οδικό χάρτη για μελλοντική ανάπτυξη και εφαρμογή.

## 7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup> : Συζήτηση

Το πρωτόκολλο SunSpec είναι καθοριστικής σημασίας για την τυποποίηση της επικοινωνίας και τη διασφάλιση της διαλειτουργικότητας στα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα (ΦΒ). Αυτό το πρωτόκολλο διευκολύνει την απρόσκοπτη ενοποίηση μεταξύ διαφορετικών στοιχείων, όπως μετατροπείς, μετρητές και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, ορίζοντας κοινά μοντέλα δεδομένων και διεπαφές επικοινωνίας. Αυτή η συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση εστιάζει στις εφαρμογές, τις προκλήσεις και τις μελλοντικές ευκαιρίες που σχετίζονται με το Πρωτόκολλο SunSpec, βασιζόμενη σε διάφορες ακαδημαϊκές και βιομηχανικές πηγές.

### 7.1 Εφαρμογές του Πρωτοκόλλου SunSpec

Το πρωτόκολλο SunSpec διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη διαλειτουργικότητα και την επικοινωνία των κατανεμημένων ενεργειακών πόρων (DER), ιδιαίτερα σε φωτοβολταϊκά συστήματα (ΦΒ), συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (ESS) και έξυπνα δίκτυα. Αυτό το κεφάλαιο εμβαθύνει στις διάφορες εφαρμογές του Πρωτοκόλλου SunSpec, χρησιμοποιώντας τις γνώσεις από διάφορες μελέτες για να τονίσει τη σημασία του στη βελτίωση της λειτουργικότητας, της αποτελεσματικότητας και της ασφάλειας των συστημάτων DER.

- **Ενίσχυση της διαλειτουργικότητας και της τυποποίησης**

Το πρωτόκολλο SunSpec είναι καθοριστικό για την επίτευξη της τυποποιημένης διαλειτουργικότητας σε διαφορετικά συστήματα DER. Με αφορμή αυτό, οι Johnson et al. (2021) συζήτησαν το ενημερωμένο πρότυπο IEEE 1547, το οποίο ορίζει ότι όλοι οι DER, συμπεριλαμβανομένων των φωτοβολταϊκών μετατροπέων και των ESS, πρέπει να έχουν μια καθορισμένη διεπαφή επικοινωνίας όπως το SunSpec Modbus. Αυτή η τυποποίηση επιτρέπει στα βοηθητικά προγράμματα και σε τρίτους να αλληλεπιδρούν απρόσκοπτα με DER, να διαβάζουν πληροφορίες πινακίδας, μετρήσεις ισχύος και συναγερμούς και να διαμορφώνουν ρυθμίσεις για την υποστήριξη του δικτύου. Η μελέτη ανέδειξε επίσης μια τεχνική ανοιχτού κώδικα για την αξιολόγηση της διαλειτουργικότητας του DER, χρησιμοποιώντας διάφορες συσκευές δοκιμής, συμπεριλαμβανομένου ενός προσομοιωτή SunSpec DER, που υπογραμμίζει τον ρόλο του πρωτοκόλλου στη διασφάλιση της τυποποιημένης επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών συστημάτων.

- **Οικονομικές Λύσεις Παρακολούθησης**

Ο Boudier (2018) διερεύνησε την ανάπτυξη ενός πρωτοτύπου, χρησιμοποιώντας το Modbus SunSpec για την παρακολούθηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Το πρωτότυπο είχε ως στόχο να παρέχει



μια οικονομικά αποδοτική λύση για την παρακολούθηση της ενέργειας, ενσωματώνοντας ένα Raspberry Pi προγραμματισμένο σε Python με το πρωτόκολλο SunSpec Modbus. Παρά τις προκλήσεις στις επιτόπιες δοκιμές λόγω της επιβράδυνσης στη βιομηχανία φωτοβολταϊκών της Μιανμάρ, οι προσομοιωμένες δοκιμές απέδειξαν τη σταθερότητα και τη λειτουργικότητα του πρωτοτύπου. Αυτή η εφαρμογή προβάλλει τις δυνατότητες της SunSpec στη δημιουργία προσιτών και αποτελεσματικών συστημάτων παρακολούθησης που μπορούν να αλληλεπιδρούν με διάφορους κατασκευαστές μετατροπέων, απλοποιώντας έτσι τη διαδικασία παρακολούθησης και συγκεντρώνοντας τη συλλογή δεδομένων σε μια ενιαία πλατφόρμα.

- **Κυβερνοασφάλεια στα συστήματα DER**

Η ενσωμάτωση του πρωτοκόλλου SunSpec στα συστήματα DER εκτείνεται πέρα από τη διαλειτουργικότητα και την παρακολούθηση, φτάνοντας στη σφαίρα της κυβερνοασφάλειας. Οι Milot et al. (2022) ανέπτυξαν μια δοκιμαστική βάση, χρησιμοποιώντας το SunSpec Protocol και τα δοχεία Docker για την αξιολόγηση των μέτρων κυβερνοασφάλειας για τα συστήματα DER. Αυτή η κλίνη δοκιμών, επικυρωμένη με μια συσκευή περιορισμένης χρήσης υλικού, γνωστή ως Energy Box, έδειξε την αποτελεσματικότητά της στον εντοπισμό επιθέσεων από τον άνθρωπο. Η μελέτη τόνισε τη σημασία της ασφάλειας των συστημάτων DER που συνδέονται όλο και περισσότερο με εξωτερικά δίκτυα, χρησιμοποιώντας ανοιχτά πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως το SunSpec και τονίζοντας την εφαρμογή του στην ενίσχυση της ασφάλειας των κρίσιμων υποδομών.

- **Προηγμένη λειτουργικότητα πλέγματος**

Οι Johnson et al. (2017) παρουσίασαν μια μελέτη περίπτωσης για την ανάπτυξη ενός ελεγκτή hardware-in-the-loop (CHIL) σε συνδυασμό με μια αυτοματοποιημένη πλατφόρμα δοκιμών για την αξιολόγηση προηγμένων λειτουργιών πλέγματος, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Αυτή η τεχνολογία διευκόλυνε τις οικονομικά αποδοτικές και ευέλικτες αξιολογήσεις εξελιγμένων υπηρεσιών υποστήριξης δικτύου χωρίς να απαιτείται μεγάλος και ακριβός εξοπλισμός ισχύος. Το σύστημα CHIL εκτέλεσε με επιτυχία προηγμένες δοκιμές λειτουργικότητας δικτύου, όπως έλεγχο άεργου ισχύος και συχνότητα-βατ, αποδεικνύοντας την ικανότητα της SunSpec να υποστηρίζει πολύπλοκες λειτουργίες δικτύου και να βελτιώνει την αξιοπιστία και την απόδοση των συστημάτων ισχύος.

- **Solar Finance and Operations**

Το SunSpec Protocol βρίσκει επίσης εφαρμογές στις οικονομικές και λειτουργικές πτυχές της ηλιακής ενέργειας. Οι Tancy et al. (2019) ανέπτυξαν το πρότυπο μετάδοσης δεδομένων Orange Button με στόχο τη μείωση του ήπιου κόστους στη χρηματοδότηση και τις λειτουργίες ηλιακής

ενέργειας. Συμμετέχοντας περισσότερες από 330 εταιρείες και δημιουργώντας μια ολοκληρωμένη ταξινόμηση με API, το έργο απεικόνισε τον ρόλο της SunSpec στην επίτευξη διαλειτουργικότητας και στη μείωση του κόστους στα ηλιακά έργα. Η επιτυχής εφαρμογή του προτύπου Orange Button υπογραμμίζει τις δυνατότητες του Πρωτοκόλλου SunSpec στον εξορθολογισμό της ανταλλαγής δεδομένων και τη βελτίωση της λειτουργικής απόδοσης στη βιομηχανία ηλιακής ενέργειας.

- **Λύσεις Επικοινωνίας για Συστήματα Φ/B/DER**

Οι King και Sugiyama (2017) παρουσίασαν το FleetLink, μια νέα λύση επικοινωνίας που αξιοποιεί το πρωτόκολλο SunSpec για τη μείωση του κόστους και την ενίσχυση της αξιοπιστίας της παρακολούθησης της παραγωγής PV/DER στο χώρο. Το FleetLink στόχευε να αντιμετωπίσει ζητήματα όπως αστοχίες συνδέσεων επικοινωνίας, περίπλοκη παροχή και υψηλό κόστος συντήρησης. Η λύση plug-and-play μείωσε σημαντικά το κόστος επικοινωνίας και βελτίωσε την αξιοπιστία του συστήματος, διευκολύνοντας την επέκταση των οικιακών ηλιακών εγκαταστάσεων. Αυτή η εφαρμογή υπογραμμίζει το ρόλο της SunSpec στην παροχή ισχυρών και επεκτάσιμων λύσεων επικοινωνίας για συστήματα καταναμημένης ενέργειας.

- **Αξιολογήσεις κυβερνοασφάλειας**

Οι Onunkwo et al. (2019) επικεντρώθηκαν στις πτυχές της κυβερνοασφάλειας των δικτύων DER, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Χρησιμοποίησαν την πλατφόρμα συν-προσομοίωσης των Εθνικών Εργαστηρίων Sandia, SCEPTRE, για να αξιολογήσουν τη στάση ασφαλείας διαφόρων τεχνολογιών επικοινωνίας. Η μελέτη εντόπισε σημαντικές ευπάθειες στα δίκτυα DER και πρότεινε λύσεις όπως η κατάτμηση και η κρυπτογράφηση δικτύου για την ενίσχυση της ασφάλειας. Αυτή η έρευνα υπογραμμίζει την κρίσιμη ανάγκη για ενσωμάτωση μέτρων κυβερνοασφάλειας σε συστήματα DER που είναι συμβατά με το SunSpec για προστασία από πιθανές απειλές στον κυβερνοχώρο.

- **Δυνατότητες μετατροπέα και υποστήριξη δικτύου**

Οι Goncalves et al. (2023) εξέτασαν τις δυνατότητες των μετατροπέων σε συνδεδεμένα στο δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα, δίνοντας έμφαση στις στατικές και δυναμικές λειτουργίες υποστήριξης του δικτύου. Η μελέτη υπογράμμισε τη σημασία των προηγμένων ηλεκτρονικών ισχύος για τη βελτίωση της χωρητικότητας φιλοξενίας φωτοβολταϊκών και προσδιόρισε μεθόδους επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένου του πρωτοκόλλου SunSpec, για τη διαχείριση ολοκληρωμένων συστημάτων με ηλιακή ενέργεια, αποθήκευση μπαταριών και φόρτιση EV. Αυτή η εφαρμογή καταδεικνύει τον ρόλο της SunSpec στην ενίσχυση της λειτουργικής απόδοσης και των δυνατοτήτων υποστήριξης δικτύου των σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων.

- **Παρακολούθηση και έλεγχος που βασίζεται στο IoT**

Οι Burgio et al. (2023) ανέπτυξαν μια λύση βασισμένη στο IoT για την παρακολούθηση και τον έλεγχο συστημάτων αποθήκευσης μπαταριών, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Η λύση περιλάμβανε μια οικιακή πύλη που διαχειριζόταν τοπικά την αποθήκευση μπαταρίας μέσω API και μια βοηθητική συσκευή για την ενσωμάτωση SunSpec. Οι δοκιμές επικύρωσης έδειξαν την αποτελεσματικότητα του συστήματος στη διαχείριση συστημάτων αποθήκευσης από διάφορους κατασκευαστές, υπογραμμίζοντας την εφαρμογή της SunSpec στη διαχείριση ενέργειας οικιακής και εμπορικής χρήσης και τις δυνατότητές του να βελτιώσει το συντονισμό και την απόδοση των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

- **Λειτουργική επαλήθευση DER**

Οι Kang et al. (2024) διεξήγαγαν μια λειτουργική επαλήθευση των διαλειτουργικών κατανεμημένων ενεργειακών πόρων (IDER) χρησιμοποιώντας διαδικασίες δοκιμής SunSpec Modbus και IEEE Standard 1547.1-2020. Η μελέτη έδειξε ότι τα IDER θα μπορούσαν να πληρούν ενημερωμένα κριτήρια σύνδεσης στο δίκτυο, υπογραμμίζοντας την εφαρμογή της SunSpec για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της συμμόρφωσης των συστημάτων DER με τα εξελισσόμενα πρότυπα. Αυτή η έρευνα υπογραμμίζει τη σημασία του Πρωτοκόλλου SunSpec για την επαλήθευση της λειτουργικότητας και της διαλειτουργικότητας των προηγμένων ενεργειακών συστημάτων.

- **Συστήματα ταχείας διακοπής λειτουργίας**

Οι Yaseen et al. (2023) ανέπτυξαν ένα σύστημα δέκτη συμβατό με το SunSpec για καταστάσεις ταχείας διακοπής λειτουργίας, χρησιμοποιώντας μια μη παραδοσιακή αποδιαμόρφωση S-FSK που βασίζεται σε RMS. Η ικανότητα του συστήματος να αποκωδικοποιεί τα σήματα FSK και να πληροί τις απαιτήσεις δοκιμών SunSpec δείχνει την εφαρμογή του στη βελτίωση των συστημάτων ασφαλείας για εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών. Αυτή η έρευνα υπογραμμίζει τον ρόλο της SunSpec στη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τα πρότυπα ασφαλείας και στη βελτίωση της αξιοπιστίας των μηχανισμών ταχείας απενεργοποίησης σε συστήματα ηλιακής ενέργειας.

- **Ψηφιακή διεπαφή για διαχείριση πλέγματος**

Οι Reihls et al. (2023) διερεύνησαν την ανάπτυξη μιας ψηφιακής διεπαφής για τη διαχείριση της ευελιξίας σε δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Η μελέτη εντόπισε πιθανούς υποψηφίους για την τυποποίηση της διεπαφής μέσω μιας επισκόπησης της αγοράς των τρεχόντων προτύπων και πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Η έρευνα έδωσε έμφαση στην εφαρμογή της SunSpec στη διαχείριση δικτύου, ιδιαίτερα στην επίτευξη ευελιξίας και στη βελτίωση της προβλεψιμότητας και της σταθερότητας των δικτύων διανομής.

- **Ένταξη Ηλεκτρικών Οχημάτων**

Οι Wang et al. (2014) ερευνήσαν την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) με το ηλεκτρικό δίκτυο, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec σε ένα υβριδικό σύστημα Vehicle-to-Home (V2H) και Vehicle-to-Grid (V2G). Το σύστημα διαχειριζόταν τόσο τα νησιωτικά φορτία AC/DC όσο και το ηλεκτρικό δίκτυο, επικυρωμένα μέσω προσομοίωσης και υλοποίησης. Αυτή η μελέτη κατέδειξε την ικανότητα του συστήματος να υποστηρίζει κρίσιμα φορτία και να ανταποκρίνεται σε απομακρυσμένα σήματα απόκρισης ζήτησης, παρουσιάζοντας την εφαρμογή της SunSpec στη διευκόλυνση της ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο και στην αντιμετώπιση προκλήσεων διαχείρισης φορτίου.

- **Φ/Β Συστήματα που ανήκουν σε επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας**

Οι Gonzalez και Becker (2018) αξιολόγησαν το Πρόγραμμα Solar Partner Company Public Service Company (APS) της Αριζόνα, το οποίο ενσωμάτωσε φωτοβολταϊκά συστήματα στέγης κατοικιών που ανήκουν σε επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Το πρόγραμμα ανέπτυξε ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου για την παρακολούθηση και τη ρύθμιση πολύπλοκων μετατροπέων και την αντιμετώπιση των τεχνικών ζητημάτων και απαιτήσεων SCADA. Αυτή η μελέτη περίπτωσης τόνισε τις εφαρμογές του Πρωτοκόλλου SunSpec σε φωτοβολταϊκά συστήματα που ανήκουν σε επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και τις προκλήσεις για την επίτευξη αξιοπιστίας και ποιότητας ισχύος σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις ηλιακής ενέργειας.

- **Ετερογενή Συστήματα Αυτοματισμού και Παρακολούθησης**

Οι Gonzalez et al. (2021) πρότειναν μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική για την ανάπτυξη ετερογενών συστημάτων αυτοματισμού και παρακολούθησης σε μικροδίκτυα, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Η αρχιτεκτονική διευκόλυνε την ενσωμάτωση ανοιχτού κώδικα και ιδιόκτητου εξοπλισμού, επικυρωμένου με ένα πειραματικό έξυπνο μικροδίκτυο που τροφοδοτείται από φωτοβολταϊκά. Αυτή η μελέτη έδωσε έμφαση στην εφαρμογή του SunSpec σε έξυπνα δίκτυα, αντιμετωπίζοντας προκλήσεις στη διαχείριση της ετερογένειας υλικού και λογισμικού και παρέχοντας μελλοντικές κατευθύνσεις για τη βελτίωση της διαλειτουργικότητας και της αποτελεσματικότητας του συστήματος.

- **Αξιολόγηση συστημάτων ταχείας απενεργοποίησης**

Ο Abdulhadi (2022) παρουσίασε μια διατριβή σχετικά με την αξιολόγηση συστημάτων ταχείας απενεργοποίησης συμβατών με το SunSpec για DER. Χρησιμοποιώντας διάφορες συσκευές δοκιμής,

η μελέτη κατέδειξε τη διαλειτουργικότητα και τη λειτουργικότητα αυτών των συστημάτων, εστιάζοντας στα πρότυπα SunSpec Modbus και IEEE 1547. Η έρευνα τόνισε τις δυνατότητες του πρωτοκόλλου SunSpec για την ενίσχυση της ασφάλειας του γρήγορου τερματισμού λειτουργίας και της διαλειτουργικότητας του DER, εντοπίζοντας προκλήσεις και μελλοντικές ευκαιρίες για περαιτέρω ανάπτυξη και τυποποίηση.

Συμπερασματικά, το Πρωτόκολλο SunSpec είναι ζωτικής σημασίας σε διάφορες εφαρμογές, που κυμαίνονται από τη βελτίωση της διαλειτουργικότητας και της τυποποίησης στα συστήματα DER έως τη βελτίωση της ασφάλειας στον κυβερνοχώρο, της παρακολούθησης και των δυνατοτήτων ελέγχου. Οι μελέτες που εξετάστηκαν υπογραμμίζουν τον κρίσιμο ρόλο της SunSpec στην προώθηση της λειτουργικότητας, της αποτελεσματικότητας και της ασφάλειας των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, υπογραμμίζοντας τις δυνατότητές της στην αντιμετώπιση των τρεχουσών προκλήσεων και ανοίγοντας το δρόμο για μελλοντικές εξελίξεις στον κλάδο της ηλιακής ενέργειας.

## **7.2 Προκλήσεις στην εφαρμογή του πρωτοκόλλου SunSpec**

Το πρωτόκολλο SunSpec έχει βελτιώσει σημαντικά τη διαλειτουργικότητα και τις δυνατότητες επικοινωνίας των κατανεμημένων ενεργειακών πόρων (DER), ιδιαίτερα σε φωτοβολταϊκά (ΦΒ) συστήματα και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (ESS). Ωστόσο, η εφαρμογή και η αξιοποίηση του πρωτοκόλλου συνοδεύεται από αρκετές προκλήσεις, όπως αποδεικνύεται από τη συστηματική ανασκόπηση διαφόρων μελετών. Αυτό το κεφάλαιο συνθέτει τις κύριες προκλήσεις που σχετίζονται με τη χρήση του Πρωτοκόλλου SunSpec, επισημαίνοντας τεχνικά, λειτουργικά και θέματα ασφάλειας που πρέπει να αντιμετωπιστούν για να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητά του.

Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία είναι η παρουσία τεχνικών περιορισμών και ασαφειών εντός του ίδιου του Πρωτοκόλλου SunSpec. Για παράδειγμα, οι Johnson et al. (2021) τόνισαν τους περιορισμούς και τις ασαφείς στα πρωτόκολλα επικοινωνίας και τα μοντέλα πληροφοριών κατά την αξιολόγηση της διαλειτουργικότητας του DER, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Η μελέτη τους αποκάλυψε ότι ενώ το πρωτόκολλο διευκολύνει την τυποποιημένη επικοινωνία, υπάρχουν ασυνέπειες στις μεθόδους δοκιμής και στα μοντέλα πληροφοριών που πρέπει να διευκρινιστούν προκειμένου να διασφαλιστεί η απρόσκοπτη διαλειτουργικότητα. Αυτό το ζήτημα απαιτεί συνεχείς ενημερώσεις και βελτιώσεις του πρωτοκόλλου από φορείς ανάπτυξης προτύπων για την αντιμετώπιση αυτών των τεχνικών κενών.

Ομολογουμένως, η ενσωμάτωση του πρωτοκόλλου SunSpec στα υπάρχοντα ενεργειακά συστήματα θέτει σημαντικές προκλήσεις. Ο Boudier (2018) συζήτησε τις πολυπλοκότητες που συνεπάγεται η

ανάπτυξη ενός πρωτοτύπου, χρησιμοποιώντας το Modbus SunSpec για την παρακολούθηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η διαδικασία απαιτούσε εκτεταμένες προσπάθειες μηχανικής για να δημιουργηθεί ένα σαφές πεδίο εφαρμογής, χρονοδιάγραμμα και στόχοι, μαζί με την ανάγκη για διάφορες τεχνολογικές ενοποιήσεις. Οι δυσκολίες στις επιτόπιες δοκιμές λόγω των συνθηκών της αγοράς περιπλέκουν περαιτέρω την ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων, υπογραμμίζοντας την πρόκληση της προσαρμογής του πρωτοκόλλου σε διαφορετικά και δυναμικά λειτουργικά περιβάλλοντα.

Αξίζει επίσης να τονιστεί ότι η αυξημένη συνδεσιμότητα των συστημάτων DER με εξωτερικά δίκτυα εισάγει σημαντικούς κινδύνους για την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο. Οι Milot et al. (2022) επεσήμαναν ότι πολλά συστήματα DER, συμπεριλαμβανομένων αυτών που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο SunSpec, είναι ευάλωτα σε επιθέσεις στον κυβερνοχώρο λόγω της εξάρτησής τους από ανοιχτά και τυποποιημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας με ελάχιστα μέτρα ασφαλείας. Οι συνεχείς εργασίες τους για την ανάπτυξη μιας κλίνης δοκιμών για την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο, χρησιμοποιώντας το SunSpec υπογράμμισαν την ευκολία με την οποία θα μπορούσαν να εκτελεστούν οι επιθέσεις man-in-the-middle. Αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη για ισχυρά πλαίσια κυβερνοασφάλειας για την προστασία των συστημάτων DER από πιθανές απειλές.

Παρά τον ρόλο του πρωτοκόλλου στην τυποποίηση, η επίτευξη πλήρους διαλειτουργικότητας σε διάφορα συστήματα παραμένει πρόκληση. Οι Kaur και Anandan (2021) τόνισαν τους περιορισμούς στα πρωτόκολλα επικοινωνίας και τις μεθόδους δοκιμής κατά την αξιολόγηση της διαλειτουργικότητας των συστημάτων DER, χρησιμοποιώντας το SunSpec. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι οι διαφορετικές ερμηνείες και υλοποιήσεις του πρωτοκόλλου σε διαφορετικές δικαιοδοσίες και συσκευές μπορεί να οδηγήσουν σε ασυνέπειες, απαιτώντας πιο αυστηρά και παγκοσμίως αποδεκτά πρότυπα και μεθοδολογίες δοκιμών για τη διασφάλιση της συμβατότητας και της απρόσκοπτης ενοποίησης.

Η εφαρμογή του Πρωτοκόλλου SunSpec μπορεί επίσης να είναι απαγορευτική από πλευράς κόστους και πολύπλοκη, ιδιαίτερα για μικρότερους οργανισμούς ή σε λιγότερο ανεπτυγμένες αγορές. Με αφορμή αυτό, οι King και Sugiyama (2017) συζήτησαν το υψηλό κόστος και την πολυπλοκότητα που σχετίζεται με την εγκατάσταση και τη συντήρηση συσκευών παρακολούθησης για την παρακολούθηση της παραγωγής PV/DER στο χώρο. Αν και η λύση FleetLink στόχευε στη μείωση αυτού του κόστους, η αρχική επένδυση κεφαλαίου και η τεχνική τεχνογνωσία που απαιτούνται για την υλοποίηση παραμένουν σημαντικά εμπόδια. Αυτή η πρόκληση επιδεινώνεται περαιτέρω σε περιοχές με περιορισμένη πρόσβαση σε προηγμένη τεχνολογία και τεχνογνωσία.

Η διασφάλιση ασφαλούς και αξιόπιστης επικοινωνίας μεταξύ των συστημάτων DER και φορέων κοινής ωφέλειας είναι μια άλλη σημαντική πρόκληση. Οι Onunkwo et al. (2019) υπογράμμισαν τα τρωτά σημεία στα δίκτυα επικοινωνίας DER που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο SunSpec, ιδιαίτερα όταν συνδέονται μέσω δημόσιων δικτύων Διαδικτύου. Η μελέτη τόνισε την εκτεταμένη επιφάνεια επίθεσης και τις περιορισμένες δυνατότητες επεξεργασίας των συσκευών DER, οι οποίες συχνά στερούνται σύγχρονων χαρακτηριστικών ασφαλείας, όπως η πιστοποίηση ταυτότητας ή η κρυπτογράφηση. Έτσι, η αντιμετώπιση αυτών των κενών ασφαλείας είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ακεραιότητας και της αξιοπιστίας των επικοινωνιών DER.

Επιπροσθέτως, η ταχεία εξέλιξη της τεχνολογίας στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί πρόκληση για την προσαρμοστικότητα του Πρωτοκόλλου SunSpec. Οι Goncalves et al. (2023) σημείωσαν την ανάγκη για προηγμένα ηλεκτρονικά ισχύος και μεθόδους επικοινωνίας για τη διαχείριση ολοκληρωμένων συστημάτων που περιλαμβάνουν ηλιακή ενέργεια, αποθήκευση μπαταρίας και φόρτιση EV. Καθώς η τεχνολογία προχωρά, το πρωτόκολλο πρέπει να εξελίσσεται συνεχώς για να ικανοποιεί νέες λειτουργίες και απαιτήσεις ολοκλήρωσης, κάτι που μπορεί να είναι ένα τρομακτικό έργο δεδομένου του ρυθμού καινοτομίας στον τομέα.

Παράλληλα, η διασφάλιση της αξιοπιστίας και της λειτουργικότητας των συστημάτων που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο SunSpec είναι κρίσιμη, αλλά και πρόκληση. Οι Kang et al. (2024) συζήτησαν τις δυσκολίες στην επαλήθευση της λειτουργικότητας των διαλειτουργικών κατανεμημένων ενεργειακών πόρων (IDER), χρησιμοποιώντας τυποποιημένες διαδικασίες δοκιμών. Η ανάγκη για ολοκληρωμένες δοκιμές τύπου και διαδικασίες επικύρωσης για να διασφαλιστεί ότι τα συστήματα DER πληρούν τα ενημερωμένα κριτήρια που συνδέονται με το δίκτυο θέτει σημαντικές λειτουργικές προκλήσεις, ιδίως όσον αφορά τη διατήρηση της συνέπειας και της ακρίβειας σε διαφορετικά συστήματα και περιβάλλοντα.

Εκτός των άλλων, η υιοθέτηση του Πρωτοκόλλου SunSpec εμποδίζεται από την περιορισμένη διείσδυση και ευαισθητοποίηση στην αγορά, ειδικά σε περιοχές με αναδυόμενες αγορές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ο Abdulhadi (2022) τόνισε τις προκλήσεις στην εφαρμογή συστημάτων συμβατών με το SunSpec λόγω των ποικίλων συνθηκών της αγοράς και της έλλειψης ευρείας κατανόησης των πλεονεκτημάτων και των λειτουργιών του πρωτοκόλλου. Η αύξηση της ευαισθητοποίησης και η παροχή στοχευμένων προγραμμάτων εκπαίδευσης και κατάρτισης είναι ουσιαστικής σημασίας για την υπέρβαση αυτών των φραγμών και την προώθηση της ευρύτερης υιοθέτησης.

Η επεκτασιμότητα και η ευελιξία είναι επίσης κρίσιμες για την επιτυχή εφαρμογή του Πρωτοκόλλου SunSpec σε διαφορετικές κλίμακες εγκαταστάσεων DER. Οι Reihls et al. (2023) τόνισαν την ανάγκη για ευέλικτη διαχείριση φορτίου και παραγωγής σε δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης, υπογραμμίζοντας τις προκλήσεις στην ανάπτυξη κλιμακωτών λύσεων που μπορούν να προσαρμοστούν στις ποικίλες συνθήκες ζήτησης και προσφοράς. Ως εκ τούτου, η διασφάλιση ότι το πρωτόκολλο μπορεί να υποστηρίξει τόσο μικρής κλίμακας οικιακά συστήματα όσο και μεγάλης κλίμακας εμπορικές εγκαταστάσεις απαιτεί σημαντικές προόδους στην επεκτασιμότητα και την προσαρμοστικότητα.

Συμπερασματικά, ενώ το Πρωτόκολλο SunSpec προσφέρει πολυάριθμα οφέλη όσον αφορά τη διαλειτουργικότητα, την επικοινωνία και την τυποποίηση στα συστήματα DER, η εφαρμογή του είναι γεμάτη προκλήσεις. Η αντιμετώπιση των τεχνικών περιορισμών, η ενίσχυση της κυβερνοασφάλειας, η απλοποίηση της ολοκλήρωσης και της ανάπτυξης καθώς και η βελτίωση της διείσδυσης και της ευαισθητοποίησης στην αγορά αποτελούν ουσιαστικά βήματα προς τη μεγιστοποίηση των δυνατοτήτων του πρωτοκόλλου. Επιπλέον, η συνεχής εξέλιξη και τελειοποίηση του πρωτοκόλλου, σε συνδυασμό με ισχυρές διαδικασίες δοκιμών και επαλήθευσης, είναι απαραίτητες για να ξεπεραστούν αυτές οι προκλήσεις και να πραγματοποιηθούν πλήρως τα οφέλη του SunSpec στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

### **7.3 Μελλοντικές ευκαιρίες για το πρωτόκολλο SunSpec**

Το πρωτόκολλο SunSpec έχει αναδειχθεί ως βασικό πρότυπο στη σφαίρα των καταναμημένων ενεργειακών πόρων (DER), ιδιαίτερα σε φωτοβολταϊκά συστήματα (ΦΒ), συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (ESS) και έξυπνα δίκτυα.

Επιπλέον, οι μελλοντικές εφαρμογές του Πρωτοκόλλου SunSpec είναι έτοιμες να αντιμετωπίσουν τις τρέχουσες προκλήσεις και να αξιοποιήσουν τις τεχνολογικές εξελίξεις για να βελτιώσουν τη λειτουργικότητα, τη διαλειτουργικότητα και την ασφάλεια των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτό το κεφάλαιο διερευνά τις πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις για το Πρωτόκολλο SunSpec, αντλώντας πληροφορίες από υπάρχουσες μελέτες και εντοπίζοντας βασικούς τομείς για ανάπτυξη και καινοτομία. Το μέλλον του SunSpec Protocol έγκειται στην ικανότητά του να βελτιώνει περαιτέρω τη διαλειτουργικότητα και την απρόσκοπτη ενσωμάτωση σε διάφορα συστήματα DER. Οι Johnson et al. (2021) επεσήμαναν την ανάγκη για συνεχείς ενημερώσεις για την αντιμετώπιση περιορισμών και ασαφειών στα πρωτόκολλα επικοινωνίας και στα μοντέλα πληροφοριών. Οι μελλοντικές εξελίξεις θα πρέπει να επικεντρωθούν στη βελτίωση αυτών των προτύπων για να



εξασφαλιστεί μια συνεπής και αξιόπιστη διαλειτουργικότητα. Η ανάπτυξη πιο εξελιγμένων μεθοδολογιών και εργαλείων δοκιμών, όπως η πλατφόρμα δοκιμών ανοιχτού κώδικα που προτείνεται από τους Johnson et al., μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερες διαδικασίες επικύρωσης και πιστοποίησης για τους προμηθευτές, τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και τα εργαστήρια πιστοποίησης DER.

Καθώς τα συστήματα DER συνδέονται όλο και περισσότερο με εξωτερικά δίκτυα, η ασφάλεια στον κυβερνοχώρο παραμένει ένα κρίσιμο μέλημα. Οι Milot et al. (2022) τόνισαν τα τρωτά σημεία που σχετίζονται με τη χρήση ανοιχτών και τυποποιημένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας όπως το SunSpec. Έτσι, οι μελλοντικές κατευθύνσεις θα πρέπει να περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση προηγμένων πλαισίων και τεχνολογιών κυβερνοασφάλειας για την προστασία των συστημάτων DER από απειλές στον κυβερνοχώρο. Αυτό περιλαμβάνει την ενσωμάτωση μέτρων κρυπτογράφησης, ελέγχου ταυτότητας και τμηματοποίησης δικτύου, καθώς και την ανάπτυξη προληπτικών πρωτοκόλλων ασφαλείας για τον εντοπισμό και τον μετριασμό πιθανών επιθέσεων. Η θέσπιση ολοκληρωμένων προτύπων κυβερνοασφάλειας ειδικά για το Πρωτόκολλο SunSpec θα είναι ουσιαστικής σημασίας για την προστασία της υποδομής ζωτικής σημασίας. Η ενσωμάτωση του Πρωτοκόλλου SunSpec με αναδυόμενες τεχνολογίες όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), το blockchain και η τεχνητή νοημοσύνη (AI) παρουσιάζει συναρπαστικές ευκαιρίες. Στο πλαίσιο αυτό, οι Burgio et al. (2023) κατέδειξαν τις δυνατότητες μιας λύσης που βασίζεται στο IoT για την παρακολούθηση και τον έλεγχο συστημάτων αποθήκευσης μπαταριών, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Έτσι, διαπιστώθηκε ότι η επέκταση αυτής της ολοκλήρωσης μπορεί να επιτρέψει πιο έξυπνα και αυτοματοποιημένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας, βελτιώνοντας την απόδοση και την αξιοπιστία. Η τεχνολογία Blockchain μπορεί επίσης να παρέχει ασφαλή και διαφανή αρχεία συναλλαγών για συναλλαγές ενέργειας, ενώ η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να βελτιστοποιήσει τα πρότυπα διανομής και κατανάλωσης ενέργειας, αξιοποιώντας περαιτέρω τις δυνατότητες του Πρωτοκόλλου SunSpec.

Παράλληλα, εντοπίστηκε ότι η αυξανόμενη υιοθέτηση ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) προσφέρει μια σημαντική οδό για εφαρμογές SunSpec Protocol. Οι Wang et al. (2014) συζήτησαν τα υβριδικά συστήματα Vehicle-to-Home (V2H) και Vehicle-to-Grid (V2G), χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SunSpec. Οι μελλοντικές εξελίξεις μπορούν να επικεντρωθούν στην ενίσχυση της αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ των ηλεκτρικών οχημάτων και του δικτύου, επιτρέποντας πιο αποτελεσματική αποθήκευση και διανομή ενέργειας. Η ανάπτυξη τυποποιημένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας για την ενσωμάτωση EV θα διευκολύνει την απρόσκοπτη αλληλεπίδραση με το δίκτυο, βελτιστοποιώντας τη διαχείριση φορτίου και υποστηρίζοντας τη σταθερότητα του συστήματος ισχύος.

Επιπροσθέτως, η εξέλιξη των έξυπνων δικτύων και των μικροδικτύων αντιπροσωπεύει έναν κρίσιμο τομέα για τη μελλοντική εφαρμογή του Πρωτοκόλλου SunSpec. Οι Gonzalez et al. (2021) πρότειναν

μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική για την ανάπτυξη ετερογενών συστημάτων αυτοματισμού και παρακολούθησης σε μικροδίκτυα. Οι μελλοντικές κατευθύνσεις θα πρέπει να στοχεύουν στην ενίσχυση της επεκτασιμότητας και της ευελιξίας αυτών των συστημάτων, διασφαλίζοντας ότι μπορούν να προσαρμοστούν στις ποικίλες συνθήκες ζήτησης και προσφοράς. Ταυτόχρονα, η ενσωμάτωση προηγμένων αλγορίθμων ανάλυσης δεδομένων και μηχανικής μάθησης μπορεί να βελτιώσει τις προγνωστικές δυνατότητες των έξυπνων δικτύων, επιτρέποντας πιο αποτελεσματική διαχείριση ενέργειας και εντοπισμό σφαλμάτων.

Η ενίσχυση των διαδικασιών τυποποίησης και πιστοποίησης για το πρωτόκολλο SunSpec θα είναι επίσης ζωτικής σημασίας για τις μελλοντικές του εφαρμογές. Οι Kaur και Anandan (2021) τόνισαν τη σημασία των ισχυρών μεθοδολογιών δοκιμών για τη διασφάλιση της διαλειτουργικότητας του DER. Η ανάπτυξη πιο ολοκληρωμένων προτύπων πιστοποίησης και η επέκταση του εύρους των δοκιμών για να συμπεριλάβει νέες λειτουργίες και τεχνολογίες θα διασφαλίσει ότι τα συστήματα που είναι συμβατά με το SunSpec πληρούν τις εξελισσόμενες απαιτήσεις του κλάδου. Αυτό θα διευκολύνει επίσης τη μεγαλύτερη διείσδυση στην αγορά και την αποδοχή του Πρωτοκόλλου SunSpec σε διαφορετικές περιοχές και εφαρμογές.

Η μείωση του κόστους που σχετίζεται με την εφαρμογή και τη διατήρηση του Πρωτοκόλλου SunSpec είναι επίσης απαραίτητη για την ευρύτερη υιοθέτησή του. Οι King και Sugiyama (2017) κατέδειξαν τις δυνατότητες του FleetLink στη μείωση του κόστους επικοινωνίας για συστήματα PV/DER. Οι μελλοντικές προσπάθειες θα πρέπει να επικεντρωθούν στην ανάπτυξη πιο οικονομικά αποδοτικών λύσεων και στην απλούστευση των διαδικασιών εγκατάστασης. Επιπλέον, η επέκταση της ευαισθητοποίησης και η παροχή στοχευμένων προγραμμάτων εκπαίδευσης και κατάρτισης μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της διείσδυσης στην αγορά, ιδιαίτερα σε αναδυόμενες αγορές με περιορισμένη πρόσβαση σε προηγμένη τεχνολογία.

Η βελτίωση των μηχανισμών ασφαλείας που σχετίζονται με το πρωτόκολλο SunSpec είναι μια άλλη κρίσιμη μελλοντική κατεύθυνση. Οι Yaseen et al. (2023) ανέπτυξαν ένα σύστημα δέκτη συμβατό με το SunSpec για καταστάσεις γρήγορου τερματισμού λειτουργίας, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για ισχυρά πρωτόκολλα ασφαλείας. Ως εκ τούτου, οι μελλοντικές εξελίξεις θα πρέπει να επικεντρωθούν στην ενίσχυση της αξιοπιστίας και της ανταπόκρισης των συστημάτων ταχείας απενεργοποίησης, διασφαλίζοντας ότι συμμορφώνονται με τα εξελισσόμενα πρότυπα ασφαλείας. Αυτό περιλαμβάνει την ανάπτυξη πιο εξελιγμένων τεχνικών αποδιαμόρφωσης και την ενσωμάτωση προηγμένων συστημάτων παρακολούθησης και ελέγχου για την πρόληψη και την αποτελεσματική αντιμετώπιση πιθανών κινδύνων.

Καθώς η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συνεχίζει να αυξάνεται, το πρωτόκολλο SunSpec θα διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στην υποστήριξη της ενσωμάτωσής τους στο ηλεκτρικό δίκτυο. Οι Goncalves et al. (2023) τόνισαν τη σημασία των προηγμένων μετατροπέων και ηλεκτρονικών ισχύος για τη βελτίωση της χωρητικότητας φιλοξενίας Φ/B. Οι μελλοντικές κατευθύνσεις θα πρέπει να επικεντρωθούν στην ανάπτυξη πιο προηγμένων τεχνολογιών μετατροπέων και στην ενίσχυση των επικοινωνιακών δυνατοτήτων των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτό θα επιτρέψει καλύτερες λειτουργίες υποστήριξης του δικτύου, όπως τη ρύθμιση τάσης και τον έλεγχο συχνότητας, διασφαλίζοντας τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του συστήματος ισχύος.

Αξιοσημείωτο επίσης είναι ότι η επεκτασιμότητα και η ευελιξία είναι βασικά στοιχεία για τη μελλοντική εφαρμογή του Πρωτοκόλλου SunSpec. Οι Reihls et al. (2023) συζήτησαν την ανάγκη για εύελικτη διαχείριση φορτίου και παραγωγής σε δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης. Οι μελλοντικές εξελίξεις θα πρέπει να στοχεύουν στην ανάπτυξη επεκτάσιμων λύσεων που μπορούν να προσαρμοστούν σε ποικίλες συνθήκες λειτουργίας και να υποστηρίζουν τόσο μικρής κλίμακας οικιστικά συστήματα όσο και μεγάλης κλίμακας εμπορικές εγκαταστάσεις. Αυτό περιλαμβάνει τη βελτίωση της ικανότητας του πρωτοκόλλου να διαχειρίζεται την κατανεμημένη παραγωγή και την εξισορρόπηση φορτίου, διασφαλίζοντας αποτελεσματική και αξιόπιστη διανομή ενέργειας. Η συνεργατική καινοτομία και έρευνα θα είναι καθοριστικής σημασίας για την προώθηση της μελλοντικής ανάπτυξης του Πρωτοκόλλου SunSpec. Η ενθάρρυνση των εταιρικών σχέσεων μεταξύ των ενδιαφερομένων του κλάδου, των ερευνητικών ιδρυμάτων και των ρυθμιστικών φορέων μπορεί να διευκολύνει την ανταλλαγή γνώσεων και πόρων. Οι κοινές ερευνητικές πρωτοβουλίες μπορούν να εξερευνήσουν νέες εφαρμογές και τεχνολογίες, διασφαλίζοντας ότι το πρωτόκολλο SunSpec παραμένει στην πρώτη γραμμή των προόδων στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτή η συλλογική προσέγγιση θα βοηθήσει επίσης στην αντιμετώπιση κοινών προκλήσεων και θα επιταχύνει την υιοθέτηση καινοτόμων λύσεων.

## **7.4 Σύνοψη απαντήσεων στα ερευνητικά ερωτήματα**

### **7.4.1 Εφαρμογές**

Ποιες είναι οι τρέχουσες εφαρμογές του Πρωτοκόλλου SunSpec σε DER, Φ/B συστήματα, ESS και έξυπνα δίκτυα;

Το Πρωτόκολλο SunSpec χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορα ενεργειακά συστήματα για τη διαχείριση και βελτιστοποίηση της ενέργειας. Στα κατανεμημένα ενεργειακά συστήματα (DER), το

SunSpec εξασφαλίζει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συσκευών, όπως μετατροπείς και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, επιτρέποντας την αποδοτική διαχείριση και παρακολούθηση των πόρων αυτών. Σε φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα, το SunSpec επιτρέπει την παρακολούθηση της απόδοσης και την απομακρυσμένη διαχείριση των μονάδων παραγωγής ενέργειας, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα και μειώνοντας το κόστος συντήρησης. Στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (ESS), το πρωτόκολλο διασφαλίζει την ασφαλή και αξιόπιστη ενσωμάτωση των συστημάτων αποθήκευσης με το υπόλοιπο δίκτυο, επιτρέποντας την καλύτερη διαχείριση της αποθηκευμένης ενέργειας. Στα έξυπνα δίκτυα, το SunSpec χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της διαχείρισης της ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας τη δυναμική προσαρμογή των ροών ενέργειας σύμφωνα με τη ζήτηση και την παραγωγή, ενισχύοντας έτσι τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα του δικτύου(Sunspec + Systematic δι...).

Πώς το πρωτόκολλο SunSpec ενισχύει τη διαλειτουργικότητα και τη λειτουργικότητα σε αυτά τα συστήματα;

Το Πρωτόκολλο SunSpec ενισχύει τη διαλειτουργικότητα μέσω της τυποποίησης των μοντέλων δεδομένων και των διεπαφών επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση διαφορετικών συσκευών και συστημάτων. Αυτή η τυποποίηση επιτρέπει στα διάφορα εξαρτήματα ενός ενεργειακού συστήματος να επικοινωνούν απρόσκοπτα μεταξύ τους, ανεξάρτητα από τον κατασκευαστή ή τον τύπο του εξοπλισμού. Έτσι, μειώνεται η πολυπλοκότητα κατά την ενσωμάτωση νέων συσκευών και βελτιώνεται η συνολική λειτουργικότητα του συστήματος, επιτρέποντας την ευκολότερη παρακολούθηση, έλεγχο και βελτιστοποίηση των λειτουργιών του συστήματος. Επιπλέον, η υποστήριξη προηγμένων λειτουργιών παρακολούθησης και ελέγχου από το πρωτόκολλο επιτρέπει την αποδοτικότερη διαχείριση της ενέργειας και την καλύτερη απόκριση στις αλλαγές της ζήτησης και της παραγωγής(Sunspec + Systematic δι...).

#### **7.4.2 Προκλήσεις**

Ποιες είναι οι κύριες προκλήσεις που σχετίζονται με την εφαρμογή του Πρωτοκόλλου SunSpec;

Η εφαρμογή του Πρωτοκόλλου SunSpec αντιμετωπίζει διάφορες προκλήσεις, όπως τεχνικούς περιορισμούς, κινδύνους κυβερνοασφάλειας, και ζητήματα κόστους και πολυπλοκότητας υλοποίησης. Οι τεχνικοί περιορισμοί περιλαμβάνουν την ανάγκη για συμβατότητα με υπάρχοντα συστήματα και πρωτόκολλα, καθώς και την απαίτηση για υψηλή ακρίβεια και ταχύτητα στη μεταφορά δεδομένων, κάτι που είναι κρίσιμο για την ομαλή λειτουργία των ενεργειακών

συστημάτων. Οι κίνδυνοι κυβερνοασφάλειας σχετίζονται με την ανάγκη προστασίας των συστημάτων από κακόβουλες επιθέσεις και παραβιάσεις, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου οι συσκευές είναι συνδεδεμένες σε δίκτυα με πρόσβαση στο διαδίκτυο. Τέλος, η πολυπλοκότητα και το κόστος υλοποίησης αναφέρονται στην ανάγκη για εξειδικευμένη τεχνογνωσία και στη διαχείριση των τεχνικών και ρυθμιστικών απαιτήσεων, οι οποίες μπορεί να αυξήσουν το συνολικό κόστος των έργων (SunSpec + Systematic δι...).

Πώς επηρεάζουν αυτές οι προκλήσεις την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια των συστημάτων DER;

Οι προκλήσεις που σχετίζονται με την εφαρμογή του Πρωτοκόλλου SunSpec μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια των συστημάτων DER. Οι τεχνικοί περιορισμοί μπορεί να οδηγήσουν σε δυσλειτουργίες ή μειωμένη απόδοση των συστημάτων, καθώς η ανάγκη για συμβατότητα μπορεί να επιβραδύνει την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών ή να προκαλέσει προβλήματα στην ενσωμάτωση νέων συσκευών. Οι κίνδυνοι κυβερνοασφάλειας αποτελούν μια σοβαρή απειλή, καθώς οι επιθέσεις μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα και τη διαθεσιμότητα των συστημάτων, θέτοντας σε κίνδυνο την ασφάλεια των δεδομένων και των λειτουργιών. Η πολυπλοκότητα και το κόστος υλοποίησης μπορεί να καθυστερήσουν την υιοθέτηση των συστημάτων και να αυξήσουν το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, μειώνοντας έτσι τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος (SunSpec + Systematic δι...).

### **7.4.3 Μελλοντικές κατευθύνσεις**

Ποιες μελλοντικές ευκαιρίες και εξελίξεις μπορούν να βελτιώσουν περαιτέρω το Πρωτόκολλο SunSpec;

Οι μελλοντικές ευκαιρίες και εξελίξεις για το Πρωτόκολλο SunSpec περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση νέων και αναδυόμενων τεχνολογιών όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), το blockchain και η τεχνητή νοημοσύνη (AI). Το IoT μπορεί να βελτιώσει τη συνδεσιμότητα και την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας καλύτερη διαχείριση των πόρων και προληπτική συντήρηση των συστημάτων. Το blockchain μπορεί να προσφέρει μια ασφαλή και αδιάβλητη πλατφόρμα για την καταγραφή και την ανταλλαγή δεδομένων ενέργειας, ενισχύοντας την ασφάλεια και την εμπιστοσύνη στα συστήματα. Η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προγνωστική ανάλυση και προηγμένους μηχανισμούς ελέγχου, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και την απόδοση των ενεργειακών συστημάτων μέσω της προσαρμογής στις μεταβαλλόμενες συνθήκες της αγοράς και των δικτύων (SunSpec + Systematic δι...).

Η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της διαλειτουργικότητας, της ασφάλειας και της αποδοτικότητας των συστημάτων DER, ανοίγοντας νέες δυνατότητες για την ανάπτυξη και εξέλιξη των ενεργειακών συστημάτων και την ενίσχυση της βιωσιμότητας και της απόδοσης τους στο μέλλον.

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Το πρωτόκολλο SunSpec διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη βιομηχανία ηλιακής ενέργειας, παρέχοντας τυποποιημένα πλαίσια επικοινωνίας που προάγουν τη διαλειτουργικότητα, την αξιοπιστία και την ασφάλεια. Οι εφαρμογές του στη διαλειτουργικότητα DER, την παρακολούθηση συστημάτων φωτοβολταϊκών και την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο είναι κρίσιμες για την αποτελεσματική λειτουργία των συστημάτων ηλιακής ενέργειας. Ωστόσο, προκλήσεις όπως η τυποποίηση, η ασφάλεια στον κυβερνοχώρο και η υιοθέτηση της αγοράς πρέπει να αντιμετωπιστούν για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων των προτύπων SunSpec. Οι μελλοντικές ευκαιρίες βρίσκονται στην ενσωμάτωση των αναδυόμενων τεχνολογιών, στην ενίσχυση των μέτρων κυβερνοασφάλειας και στην ανάπτυξη ισχυρών πλαισίων δοκιμών. Καθώς η ηλιακή βιομηχανία συνεχίζει να εξελίσσεται, το πρωτόκολλο SunSpec θα παραμείνει ουσιαστικό για τη διαμόρφωση του τοπίου των καταναμημένων ενεργειακών πόρων και τον εκσυγχρονισμό του δικτύου.

Επιπροσθέτως, το πρωτόκολλο SunSpec είναι ένα βασικό πλαίσιο στον τομέα των καταναμημένων ενεργειακών πόρων (DER), των φωτοβολταϊκών (PV) συστημάτων, των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (ESS) και των έξυπνων δικτύων, κυρίως λόγω της ικανότητάς του να βελτιώνει τη διαλειτουργικότητα και τη λειτουργικότητα σε αυτούς τους τομείς. Οι εφαρμογές του Πρωτοκόλλου SunSpec είναι ευρείες και επηρεάζουν, από την ενεργοποίηση αποδοτικών μοντέλων αποθήκευσης ενέργειας έως τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης από την πλευρά της ζήτησης και τη διασφάλιση δυνατοτήτων ταχείας απενεργοποίησης για φωτοβολταϊκά συστήματα ταρατσας. Αυτή η ευελιξία πηγάζει από τα στιβαρά του πρότυπα που διευκολύνουν την απρόσκοπτη επικοινωνία και την ενοποίηση μεταξύ διαφόρων συσκευών και συστημάτων στο ενεργειακό τοπίο.

Το πρωτόκολλο SunSpec διαδραματίζει επίσης κρίσιμο ρόλο στην ενίσχυση της αποτελεσματικότητας και της αξιοπιστίας των συστημάτων DER. Για παράδειγμα, τα μοντέλα αποθήκευσης ενέργειας του είναι καθοριστικής σημασίας για τη διαχείριση και τη βελτιστοποίηση πολυτεχνολογικών συστημάτων αποθήκευσης μπαταριών, τα οποία είναι απαραίτητα για τη σταθεροποίηση του δικτύου και την υποστήριξη της ενοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (SunSpec Alliance, nd-b; Fernández et al., 2018). Επιπλέον, το πρωτόκολλο υποστηρίζει την ενσωμάτωση διαφόρων καταναμημένων ενεργειακών πόρων μέσα σε μικροδίκτυα, αντιμετωπίζοντας

τις περίπλοκες προκλήσεις της διαλειτουργικότητας και της βελτιστοποίησης του συστήματος (Chauhan & Chauhan, 2019). Στα έξυπνα δίκτυα, το πρωτόκολλο SunSpec ενισχύει τη λειτουργικότητα των συστημάτων βιομηχανικού ελέγχου (ICS), παρέχοντας τυποποιημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας που διασφαλίζουν αξιόπιστες και ασφαλείς λειτουργίες. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε δίκτυα υποδομής όπως τα συστήματα SCADA, όπου η ασφάλεια και η διαλειτουργικότητα είναι πρωταρχικής σημασίας (Knapp, 2014; Stouffer et al., nd). Επιπλέον, το SunSpec Dashboard προσφέρει μια ολοκληρωμένη λύση λογισμικού για την παρακολούθηση και τη διαχείριση αυτών των πολύπλοκων συστημάτων, αποδεικνύοντας περαιτέρω την εφαρμογή του πρωτοκόλλου σε σενάρια πραγματικού κόσμου (SunSpec Alliance, nd-a).

Το πρωταρχικό πλεονέκτημα του Πρωτοκόλλου SunSpec είναι η ικανότητά του να διευκολύνει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών ενεργειακών συστημάτων. Παρέχοντας μια κοινή γλώσσα και τυποποιημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας, το πρωτόκολλο SunSpec διασφαλίζει ότι διαφορετικές συσκευές και συστήματα μπορούν να συνεργάζονται απρόσκοπτα. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας στο πλαίσιο του DER, όπου πολλαπλές πηγές ενέργειας πρέπει να ενσωματώνονται και να διαχειρίζονται αποτελεσματικά (SunSpec Alliance, nd-b). Επιπλέον, το πρωτόκολλο υποστηρίζει μηχανισμούς ταχείας απενεργοποίησης φωτοβολταϊκών συστημάτων, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για τη διασφάλιση της ασφάλειας κατά τη διάρκεια έκτακτης ανάγκης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στα φωτοβολταϊκά συστήματα τάρτσας, όπου οι δυνατότητες ταχείας απενεργοποίησης μπορούν να αποτρέψουν ηλεκτρικούς κινδύνους και να ενισχύσουν την ασφάλεια των πυροσβεστών (Cordova et al., 2017; Ball & Fisher, 2016; SunSpec Alliance, 2021; Zetawi et al., 2021). Η ανάπτυξη προδιαγραφών ταχείας απενεργοποίησης και η ανάπτυξη ηλεκτρονικών σε επίπεδο πίνακα υπογραμμίζουν τη δέσμευση του πρωτοκόλλου για ασφάλεια και λειτουργική απόδοση (ABB Solar Inverters, nd; SunSpec Alliance, 2021).

Παρά τα πολυάριθμα πλεονεκτήματά του, η εφαρμογή του Πρωτοκόλλου SunSpec παρουσιάζει αρκετές προκλήσεις. Ένα από τα κύρια ζητήματα είναι η πολυπλοκότητα της ενσωμάτωσης του πρωτοκόλλου σε υπάρχοντα συστήματα, το οποίο συχνά απαιτεί σημαντικές τροποποιήσεις και ενημερώσεις (Sundararajan et al., 2018). Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα δύσκολο για παλαιού τύπου συστήματα που δεν σχεδιάστηκαν με γνώμονα τη διαλειτουργικότητα (Menze, 2020).

Επιπροσθέτως, η κυβερνοασφάλεια αποτελεί μείζον θέμα στο πλαίσιο του DER και των έξυπνων δικτύων. Η ενοποίηση διαφόρων συσκευών και συστημάτων αυξάνει την πιθανή επιφάνεια επίθεσης, καθιστώντας απαραίτητη την εφαρμογή ισχυρών μέτρων ασφαλείας (Leszczyna, 2019; Mahrenholz et al., 2020). Οι προκλήσεις και οι λύσεις σε επίπεδο πρωτοκόλλου για την κυβερνο-φυσική ασφάλεια

κατανεμημένων ενεργειακών πόρων υπογραμμίζουν την ανάγκη για συνεχή βελτίωση και προσαρμογή στις αναδυόμενες απειλές (Sundararajan et al., 2018).

## **Μελλοντικές κατευθύνσεις**

Το μέλλον του Πρωτοκόλλου SunSpec έγκειται στην ικανότητά του να προσαρμόζει και να ενσωματώνει αναδυόμενες τεχνολογίες. Το Internet of Things (IoT), το blockchain και η τεχνητή νοημοσύνη (AI) προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες για τη βελτίωση των συστημάτων DER. Για παράδειγμα, οι συσκευές IoT μπορούν να παρέχουν δεδομένα και αναλύσεις σε πραγματικό χρόνο, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και την ανταπόκριση των ενεργειακών συστημάτων (Khan et al., 2020). Η τεχνολογία Blockchain μπορεί να ενισχύσει την ασφάλεια και τη διαφάνεια των συναλλαγών στην αγορά ενέργειας, ενώ η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να βελτιστοποιήσει τη διαχείριση ενέργειας και την προγνωστική συντήρηση (Ekisa et al., 2021).

Οι εξελίξεις σε αυτές τις τεχνολογίες μπορούν να αξιοποιηθούν για να ξεπεραστούν οι τρέχουσες προκλήσεις που σχετίζονται με το πρωτόκολλο SunSpec. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη ελαφρών κλινών δοκιμών για πειράματα ασφάλειας στον κυβερνοχώρο μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό τρωτών σημείων και στη δοκιμή στρατηγικών μετριασμού σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον (Kumar & Tapaswi, 2012; Khan et al., 2020). Επιπρόσθετα, οι ανοιχτού κώδικα δοκιμαστικές κλίνες και τα πλαίσια για την ανάπτυξη πειραματικών δικτύων SCADA μπορούν να διευκολύνουν την ανάπτυξη και τη δοκιμή νέων μέτρων ασφαλείας (Maynard et al., 2018; Maynard, nd; Elmenreich et al., 2018).

Για να συνειδητοποιήσουμε πλήρως τα πλεονεκτήματα του Πρωτοκόλλου SunSpec, είναι απαραίτητο να συνεχίσουμε να αναπτύσσουμε και να βελτιώνουμε τις προδιαγραφές του. Αυτό περιλαμβάνει την ενημέρωση των ελάχιστων τεχνικών απαιτήσεων για τη σύνδεση και την παράλληλη λειτουργία με δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης (VDE Reference, 2008). Επιπλέον, η υιοθέτηση τυποποιημένων σημάτων επικοινωνίας για γρήγορο τερματισμό λειτουργίας και η εφαρμογή τεχνικών κεντρικού εντοπισμού και πρόληψης έναντι των απειλών στον κυβερνοχώρο θα ενισχύσει την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια του πρωτοκόλλου (SunSpec Alliance, 2021; Kumar & Tapaswi, 2012).



Αναμφίβολα, το πρωτόκολλο SunSpec έχει θέσει μια ισχυρή βάση για τη βελτίωση της ασφάλειας, της απόδοσης και της διαλειτουργικότητας των κατανεμημένων ενεργειακών πόρων (DER) και των φωτοβολταϊκών (PV) συστημάτων. Ωστόσο, είναι απαραίτητες μελλοντικές εξελίξεις και έρευνα για την αντιμετώπιση των υφιστάμενων προκλήσεων και την αξιοποίηση των αναδυόμενων τεχνολογιών για περαιτέρω βελτίωση αυτών των συστημάτων. Αυτή η ενότητα διερευνά πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις και τομείς για έρευνα.

Αναλυτικότερα, οι μηχανισμοί ταχείας απενεργοποίησης είναι κρίσιμοι για τη διασφάλιση της ασφάλειας των φωτοβολταϊκών συστημάτων, ιδιαίτερα σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Το πρωτόκολλο SunSpec έχει κάνει σημαντικά βήματα σε αυτόν τον τομέα με την ανάπτυξη σημάτων επικοινωνίας και προδιαγραφών δοκιμών για γρήγορο τερματισμό λειτουργίας (SunSpec Alliance, 2021; SunSpec Alliances, 2020). Έτσι, η μελλοντική έρευνα μπορεί να επικεντρωθεί στη βελτίωση αυτών των μηχανισμών για να ενισχύσει την αξιοπιστία και την ανταπόκρισή τους. Αυτό περιλαμβάνει τη βελτίωση της ευρωστίας των σημάτων επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται σε συστήματα ταχείας απενεργοποίησης, η οποία μπορεί να επιτευχθεί μέσω προηγμένων τεχνικών διαμόρφωσης και μεθόδων διόρθωσης σφαλμάτων (Bali, 2018). Επιπλέον, η ενσωμάτωση ηλεκτρονικών σε επίπεδο πίνακα, όπως αποδεικνύεται στις τρέχουσες συσκευές ταχείας απενεργοποίησης, μπορεί να επεκταθεί για να συμπεριλάβει πιο εξελιγμένα χαρακτηριστικά παρακολούθησης και ελέγχου (Cordova, 2017). Αυτό θα επέτρεπε τη διάγνωση σε πραγματικό χρόνο και τις δυνατότητες προσαρμοστικής απόκρισης, διασφαλίζοντας ότι τα συστήματα ταχείας απενεργοποίησης μπορούν να χειριστούν ένα ευρύτερο φάσμα συνθηκών σφαλμάτων και περιβαλλοντικών σεναρίων (συσκευή ταχείας διακοπής λειτουργίας Ginlog Solis, nd).

Η ενσωμάτωση αναδυόμενων τεχνολογιών όπως το Internet of Things (IoT), η τεχνητή νοημοσύνη (AI) και το blockchain μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τις δυνατότητες του Πρωτοκόλλου SunSpec. Οι συσκευές IoT μπορούν να παρέχουν αναλυτικά δεδομένα σχετικά με την απόδοση και την κατάσταση των συστημάτων DER, επιτρέποντας πιο ακριβή έλεγχο και βελτιστοποίηση (Barker, 2020). Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να διερευνήσει την ανάπτυξη αισθητήρων και ελεγκτών με δυνατότητα IoT που είναι συμβατοί με το Πρωτόκολλο SunSpec, διευκολύνοντας την απρόσκοπτη ενοποίηση και ανταλλαγή δεδομένων. Η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανάλυση των τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων που παράγονται από τα συστήματα DER, παρέχοντας πληροφορίες για προγνωστική συντήρηση, ανίχνευση σφαλμάτων και βελτιστοποίηση απόδοσης. Μπορούν να αναπτυχθούν αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης για την πρόβλεψη αστοχιών του συστήματος και τη βελτιστοποίηση των στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας, ενισχύοντας τη συνολική απόδοση και αξιοπιστία των συστημάτων DER (Rivet & Deval, 2022). Η τεχνολογία

Blockchain προσφέρει πολλά υποσχόμενες εφαρμογές για την ενίσχυση της ασφάλειας και της διαφάνειας των συναλλαγών στην αγορά ενέργειας. Τα έξυπνα συμβόλαια και τα αποκεντρωμένα λογιστικά βιβλία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αυτοματοποίηση και την ασφάλεια των ενεργειακών συναλλαγών, διασφαλίζοντας ότι όλα τα μέρη που εμπλέκονται στη διαδικασία ανταλλαγής ενέργειας τηρούν προκαθορισμένες συμφωνίες (SunSpec Alliance, 2021). Η έρευνα σε αυτόν τον τομέα θα πρέπει να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη πλαισίων blockchain που είναι ειδικά προσαρμοσμένα για αγορές ενέργειας και συμβατά με το πρωτόκολλο SunSpec.

Η κυβερνοασφάλεια παραμένει κρίσιμη ανησυχία για τα συστήματα DER. Καθώς αυτά τα συστήματα γίνονται πιο διασυνδεδεμένα, η πιθανή επιφάνεια επίθεσης αυξάνεται, απαιτώντας ισχυρά μέτρα ασφαλείας. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να δώσει προτεραιότητα στην ανάπτυξη προηγμένων πλαισίων κυβερνοασφάλειας που μπορούν να προστατεύσουν τα συστήματα DER από ένα ευρύ φάσμα απειλών. Αυτό περιλαμβάνει τον σχεδιασμό ασφαλών πρωτοκόλλων επικοινωνίας, συστημάτων ανίχνευσης εισβολών και αυτοματοποιημένων μηχανισμών απόκρισης απειλών (Abdulhadi & Zetawi, 2022).

Επιπλέον, η εφαρμογή φίλτρων ταχείας απενεργοποίησης για φωτοβολταϊκά συστήματα ενσωματωμένα στην οροφή χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση για να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητά τους έναντι των απειλών στον κυβερνοχώρο. Αυτά τα φίλτρα μπορούν να σχεδιαστούν για να ανιχνεύουν και να μετριάζουν κακόβουλα σήματα που θα μπορούσαν ενδεχομένως να προκαλέσουν ψευδείς τερματισμούς λειτουργίας ή δυσλειτουργίες του συστήματος (Zetawi, 2021).

Η επικοινωνία Powerline (PLC) είναι ένα κρίσιμο στοιχείο του πρωτοκόλλου SunSpec, που επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων μέσω της υπάρχουσας ηλεκτρικής καλωδίωσης. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να στοχεύει στη βελτίωση της ευρωστίας και της αξιοπιστίας του PLC αναπτύσσοντας προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (Bali, 2018). Η πειραματική επικύρωση αυτών των τεχνικών μπορεί να εξασφαλίσει την πρακτική εφαρμογή και την αποτελεσματικότητά τους σε σενάρια πραγματικού κόσμου. Επιπλέον, η ανάπτυξη ραδιοφωνικών δεκτών που ορίζονται από λογισμικό (SDR) για PLC μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και προσαρμοστικότητα στο χειρισμό διαφόρων προτύπων και πρωτοκόλλων επικοινωνίας (Rivet & Deval, 2022). Η τεχνολογία SDR επιτρέπει τη δυναμική αναδιαμόρφωση των παραμέτρων επικοινωνίας, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα των συστημάτων PLC σε παρεμβολές και υποβάθμιση του σήματος. Τα ρεύματα διαρροής αποτελούν σημαντική πρόκληση στα φωτοβολταϊκά συστήματα, επηρεάζοντας την απόδοση και την ασφάλειά τους. Η έρευνα έχει δείξει ότι τα υλικά ντόπινγκ όπως το WO<sub>x</sub> στο PEDOT μπορούν να μειώσουν τα ρεύματα διαρροής, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση των οργανικών

φωτοβολταϊκών (Kanwat et al., 2014). Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να διερευνήσει την εφαρμογή παρόμοιων τεχνικών ντόπινγκ σε διαφορετικά φωτοβολταϊκά υλικά και διαμορφώσεις για την περαιτέρω ελαχιστοποίηση των ρευμάτων διαρροής και την ενίσχυση της αξιοπιστίας του συστήματος.

Το μέλλον του Πρωτοκόλλου SunSpec έγκειται στην ικανότητά του να προσαρμόζεται και να ενσωματώνεται με τις αναδυόμενες τεχνολογίες, ενώ αντιμετωπίζει τις υπάρχουσες προκλήσεις. Οι βελτιώσεις στους μηχανισμούς ταχείας διακοπής λειτουργίας, η ενοποίηση με το IoT, το AI και το blockchain, οι εξελίξεις στην ασφάλεια στον κυβερνοχώρο και οι βελτιώσεις στην επικοινωνία μέσω ηλεκτρικού ρεύματος και η μείωση του ρεύματος διαρροής είναι κρίσιμοι τομείς για μελλοντική έρευνα. Εστιάζοντας σε αυτές τις κατευθύνσεις, το Πρωτόκολλο SunSpec μπορεί να συνεχίσει να οδηγεί την εξέλιξη των συστημάτων DER και φωτοβολταϊκών, διασφαλίζοντας την ασφάλεια, την αποτελεσματικότητα και τη διαλειτουργικότητά τους σε ένα ολοένα πιο περίπλοκο ενεργειακό τοπίο.

Συμπερασματικά, το πρωτόκολλο SunSpec είναι ο ακρογωνιαίος λίθος των σύγχρονων συστημάτων DER, φωτοβολταϊκών συστημάτων, ESS και έξυπνων δικτύων, παρέχοντας βασικά πρότυπα για διαλειτουργικότητα και λειτουργικότητα. Ενώ εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις στην εφαρμογή του, η ενσωμάτωση των αναδυόμενων τεχνολογιών και η συνεχής βελτίωση των προδιαγραφών του θα εξασφαλίσουν τη συνεχή συνάφεια και αποτελεσματικότητά του στο εξελισσόμενο ενεργειακό τοπίο. Αντιμετωπίζοντας αυτές τις προκλήσεις και αξιοποιώντας νέες ευκαιρίες, το Πρωτόκολλο SunSpec μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση και την ασφάλεια των μελλοντικών ενεργειακών συστημάτων.

## Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

Abdulhadi, O. (2022). *Discrete Hardware Solution of a Rapid-Shutdown Front-End Receiver for Rooftop Photovoltaic Systems as Per SunSpec Specification* (Master's thesis, Princess Sumaya University for Technology (Jordan)).

Ahmed, A. B., Weber, L., Nasiri, A., & Hosseini, H. (2014, October). Microgrid Communications: State of the Art and Future Trends. In *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy Research and Applications*. <https://doi.org/10.1109/icrera.2014.7016491>

Alonso, A. M. S., et al. (2019). A Selective Harmonic Compensation and Power Control Approach Exploiting Distributed Electronic Converters in Microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105452>

Angioni, A., et al. (2015). Coordinated Voltage Control in Distribution Grids with LTE Based Communication Infrastructure. In *Proceedings of the 15th International Conference on Environmental and Electrical Engineering*. <https://doi.org/10.1109/eeeic.2015.7165498>

Asian Development Bank. (2018). Myanmar, Economy. Retrieved June 2018, from Asian Development Bank: <https://www.adb.org/countries/myanmar/economy>

Ball, G., & Fisher, J. (2016). Rooftop PV systems and firefighter safety. *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 1244-1249. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2016.7749813>

Boudier, U. N. (2018). Design of a Prototype for Inverter Monitoring with SunSpec Modbus Protocol. <https://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1293422&dswid=7824>

Brandao, D. I., et al. (2017). Centralized Control of Distributed Single-Phase Inverters Arbitrarily Connected to Three-Phase Four-Wire Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(1). <https://doi.org/10.1109/tsg.2016.2586744>

Bründlinger, R. (2015, December 8). Advanced smart inverter and DER functions requirements in latest European grid codes and future trends. *Solar Canada*. DOI:[10.13140/RG.2.1.3396.3922](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3396.3922)

Bründlinger, R. (n.d.). SunSpec and AIT Smart Grid Converter (SGC) control platform: Using controller hardware in the loop to implement SunSpec protocols in the AIT SGC control platform [Webinar].

Bründlinger, R., Ablinger, R., & Miletic, Z. (2016, September 13). AIT Smart Grid Converter (SGC) controller featuring SunSpec protocol support utilizing hardware-in-the-loop (HIL) technology. *SunSpec Meeting*. DOI:[10.13140/RG.2.2.24127.92324](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24127.92324)

Bründlinger, R., Strasser, T., Lauss, G., Hoke, A., Chakraborty, S., Martin, G., Kroposki, B., Johnson, J., & de Jong, E. (2015). Lab tests: Verifying that smart grid power converters are truly smart. *IEEE Power and Energy Magazine*, 13(2), 30-42. <https://doi.org/10.1109/MPE.2014.2379935>

Burgio, A., Cimmino, D., Nappo, A., Smarrazzo, L., & Donatiello, G. (2023). An IoT-based solution for monitoring and controlling battery energy storage systems at residential and commercial levels. *Energies*, 16(7), 3140. <https://doi.org/10.3390/en16073140>

Busarello, T. D. C., Mortezaei, A., Peres, A., & Simoes, M. G. (2018). Application of the Conservative Power Theory Current Decomposition in a Load Power-Sharing Strategy Among Distributed Energy Resources. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(4), 3771-3781. <https://doi.org/10.1109/tia.2018.2820641>

Caldognetto, T., Buso, S., Tenti, P., & Brandao, D. I. (2015). Power-Based Control of Low-Voltage Microgrids. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(4), 1056-1066. <https://doi.org/10.1109/jestpe.2015.2413361>

Chauhan, R., & Chauhan, K. (2019). Distributed energy resources in micro-grids: Integration challenges and optimization. Elsevier. ISBN: 978-0-12-817774-7

Cheng, Z., et al. (2018). To Centralize or to Distribute: That Is the Question: A Comparison of Advanced Microgrid Management Systems. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 12(1), 6-24. <https://doi.org/10.1109/mie.2018.2789926>

CIGRE Working Group C6.04. (2014). Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources. *CIGRE Task Force C6.04 – Technical Note 575*, 1-119. ISBN: 978-285-873-270-8

Cordova, A., Merz, C., Bettenwort, G., Hopf, M., Knopf, H., & Laschinski, J. (2017). Rapid shutdown with panel level electronics - A suitable safety measure. *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 1965-1967. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2017.8366726>

Ekisa, C., Briain, D. O., & Kavanagh, Y. (2021, June). An open-source testbed to visualise ICS cybersecurity weaknesses and remediation strategies - A research agenda proposal. *2021 32nd Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/issc52156.2021.9467852>

Elmenreich, W., Moll, P., Theuermann, S., & Lux, M. (2018). Making computer science results reproducible - A case study using Gradle and Docker. *PeerJ Prepr*, 6, e27082. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.27082>

Esteban Damián, G. M. (n.d.). DER Testbed. Retrieved from <https://github.com/esguti/TestbedDER>

Eurocham Myanmar. (2018). Energy Guide 2018. European Chamber of Commerce in Myanmar. <https://doi.org/10.30875/b3060af4-fr>

Fang, X., Misra, S., Xue, G., & Yang, D. (2011). Smart Grid – The New and Improved Power Grid: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(4). <https://doi.org/10.1109/surv.2011.101911.00087>

Fernández, G., Bludszuweit, H., Torres, J., Almajano, J., Machin, I., & Sanz, J., et al. (2018). Optimal demand-side management with a multi-technology battery storage system. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1, 345-349. <https://doi.org/10.24084/repqj16.310>

Golsorkhi, M. S., Lu, D. D., & Guerrero, J. M. (2017). A GPS-Based Decentralized Control Method for Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(2), 1615-1625. <https://doi.org/10.1109/tpel.2016.2551265>

Gonçalves, J. M., Rodrigues, E., Grilo, A., Carvalho, P., Creado, N., & Morais, H. (2023, June). Identification and characterization of inverters used for PV generation and storage systems. In *27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023)* (Vol. 2023, pp. 594-598). IET. <https://doi.org/10.1049/icp.2023.0426>

González, I., Calderón, A. J., & Portalo, J. M. (2021). Innovative multi-layered architecture for heterogeneous automation and monitoring systems: Application case of a photovoltaic smart microgrid. *Sustainability*, 13(4), 2234. <https://doi.org/10.3390/su13042234>

Gonzalez, L. C., & Becker, F. (2018, April). Case Study: Arizona Public Service Solar Partnership Program and the Powerful SCADA Controller that Made it Work. In *2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)* (pp. 1-9). IEEE. <https://doi.org/10.1109/tdc.2018.8440327>

Goodman, F., et al. (2017). Module 2: Pre-Commercial Demonstration of Communication Standards for DER. *San Diego Gas & Electric Company - Technical Note*.

Goswami, D. Y., & Besarati, S. M. (2013). World Energy Resources: Solar. World Energy Council. ISBN: 978 0 946121 29 8

Guerrero, J. M., et al. (2011). Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids - A General Approach Toward Standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 158-172. <https://doi.org/10.1109/tie.2010.2066534>

Gungor, V. C., et al. (2011). Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(4), 529-540. <https://doi.org/10.1109/tii.2011.2166794>

Guo, F., et al. (2015). Distributed Secondary Voltage and Frequency Restoration Control of Droop-Controlled Inverter-Based Microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(7), 4355-4364. <https://doi.org/10.1109/tie.2014.2379211>

Han, H., et al. (2016). Review of Power Sharing Control Strategies for Islanding Operation of AC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(1), 200-215. <https://doi.org/10.1109/tsg.2015.2434849>

Han, Y., et al. (2017). Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(3), 2427-2451. <https://doi.org/10.1109/tpel.2016.2569597>

Han, Y., et al. (2018). MAS-Based Distributed Coordinated Control and Optimization in Microgrid and Microgrid Clusters: A Comprehensive Overview. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(8). <https://doi.org/10.1109/tpel.2017.2761438>

Harmon, E., et al. (2018). The Internet of Microgrids: A Cloud-Based Framework for Wide Area Networked Microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(3), 1262-1275. <https://doi.org/10.1109/tii.2017.2785317>

Held, G. (1999). *Handbook of Communication Systems Management*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351072465>

Held, G. (2000). *Understanding Data Communications: From Fundamentals to Networking* (3rd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470841486>

Hoke, A., et al. (2018). Setting the Smart Solar Standard: Collaborations Between Hawaiian Electric and the National Renewable Energy Laboratory. *IEEE Power & Energy Magazine*, 16, 18-29. <https://doi.org/10.1109/mpe.2018.2864226>

IEA PVPS. (2014). Analytical Monitoring of Grid-connected Photovoltaic Systems Good Practices for Monitoring and Performance Analysis. IEA Photovoltaic Power Systems Programme. ISBN 978-3-906042-18-3

IEA. (2014). Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy. <https://doi.org/10.1787/9789264088047-en>

IEA. (2016). Snapshot of Global Photovoltaic Market. Photovoltaic Power System Program.

IEA. (2017). Renewables 2017. International Energy Agency. <https://doi.org/10.1787/renew-2017-en>

IEC 61850-7-420. (2009). Communication networks and systems for power utility automation - Part 7-420: Basic communication structure - Distributed energy resources logical nodes. <https://doi.org/10.3403/30145435u>

IEC Technical Report IEC 61850-90-7. (2013). Communication networks and systems for power utility automation – Part 90-7: Object models for power converters in distributed energy resources (DER) systems (Edition 1.0). <https://doi.org/10.3403/30427507>

IEEE Standard 1547.1-2005. (2005). Standard for conformance test procedures for equipment interconnecting distributed resources with electric power systems. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2005.96289>

IEEE Standard 1547-2003. (2003). Standard for interconnecting distributed resources with electric power systems. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2008.4816078>

IEEE. (2012). *IEEE Standard for Electric Power Systems Communications — Distributed Network Protocol (DNP3)*. IEEE 1815 Std. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2012.6327578>

IEEE. (2018). *IEEE Standard 1547 for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2024.10534228>

IEEE. (2018). *IEEE Standard for Smart Energy Profile Application Protocol*. IEEE 2030.5 Std. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2018.8608044>

IRENA. (2016). Letting in the Light: How solar photovoltaics will revolutionize the electricity system. International Renewable Energy Agency.

IRENA. (2018). Renewable Energy Market Analysis: Southeast Asia. Abu Dhabi: IRENA.

Johnson, J., & Fox, B. (2014, June 8-13). Automating the Sandia advanced interoperability test protocols. *40th IEEE PVSC*, Denver, CO.

Johnson, J., Bründlinger, R., Urrego, C., & Alonso, R. (2014, September 22-26). Collaborative development of automated advanced interoperability certification test protocols for PV smart grid integration. *EU PVSEC*, Amsterdam, Netherlands. DOE Contract Number: AC04-94AL85000



Johnson, J., Fox, B., Kaur, K., & Anandan, J. (2021). Evaluation of interoperable distributed energy resources to iec 1547.1 using sunspec modbus, iec 1815, and iec 2030.5. *IEEE Access*, 9, 142129-142146. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3120304>

Johnson, J., Jencka, L., Ortiz, T., Jones, C. B., Chavez, A., Wright, B., & Summers, A. (2021). *Design considerations for distributed energy resource honeypots and canaries* (No. SAND2021-11609). Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States). <https://doi.org/10.2172/1821540>

Johnson, J., Neely, J., Delhotal, J., & Lave, M. (2016). Photovoltaic frequency-watt curve design for frequency regulation and fast contingency reserves. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 6(6), 1611-1618. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2016.2598275>

Kabalci, Y. (2016). A Survey on Smart Metering and Smart Grid Communication. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.114>

Kang, M., Yoon, G., Hong, S., Bae, K. Y., Kim, H., Na, W., & Baek, J. (2024). Functionality Verification of Inverters for Interoperable Distributed Energy Resources Based on IEEE Std 1547.1–2020. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s42835-023-01780-w>

KAUR, K., & ANANDAN, J. Evaluation of Interoperable Distributed Energy Resources to IEEE 1547.1 Using SunSpec Modbus, IEEE 1815, and IEEE 2030.5. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3120304>

Khan, M., Rehman, O., Rahman, I. M. H., & Ali, S. (2020, September). Lightweight testbed for cybersecurity experiments in SCADA-based systems. *2020 International Conference on Computing and Information Technology (ICCIT-1441)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/iccit-144147971.2020.9213791>

King, R., & Sugiyama, R. (2017). *A New Remote Communications Link to Reduce Residential PV Solar Costs* (No. DOE-OperantSolar-0007592). Operant Solar Corporation, CA (United States). <https://doi.org/10.2172/1412534>

Knapp, E. D. (2014). *Industrial network security: Securing critical infrastructure networks for smart grid SCADA and other industrial control systems*. Waltham, MA: Elsevier.

Kumar, S., & Tapaswi, S. (2012). A centralized detection and prevention technique against ARP poisoning. *CyberSec*, 259-264. <https://doi.org/10.1109/cybersec.2012.6246087>

Legenthiran, T., et al. (2015). Intelligent Control System for Microgrids Using Multiagent System. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(4), 1036-1045. <https://doi.org/10.1109/jestpe.2015.2443187>

Leszczyna, R. (2019). *Cybersecurity in the electricity sector: Managing critical infrastructure*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-19538-0>

Mahrenholz, D., Lukas, G., Paffrath, J., & Detken, K. (2020). Detecting low-level attacks on wireless OT networks. *IDAACS-SWS*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/idaacs-sws50031.2020.9297097>

Marzal, S., Sala, R., Medina, R. G., Garcera, G., & Figures, E. (2017). Current Challenges and Future Trends in the Field of Communication Architectures for Microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3610-3622. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.101>

Maynard, P. (n.d.). ICS TestBed Framework. Retrieved from <https://github.com/PMaynard/ICS-TestBed-Framework>

Maynard, P., McLaughlin, K., & Sezer, S. (2018). An open framework for deploying experimental SCADA testbed networks. <https://doi.org/10.14236/ewic/ics2018.11>

Menze, T. (2020). The state of industrial cybersecurity in the era of digitalization. Retrieved from [https://ics.kaspersky.com/media/Kaspersky\\_ARC\\_ICs-2020-Trend-Report.pdf](https://ics.kaspersky.com/media/Kaspersky_ARC_ICs-2020-Trend-Report.pdf)

Miletic, Z. (n.d.). AIT Smart Grid Converter (SGC) control platform: Using controller hardware in the loop for the AIT Smart Grid Converter (SGC) control platform [Webinar]. Retrieved from <http://info.typhoon-hil.com/recordedwebinar-ait-smart-grid-converter-control-platform-andcontroller-hardware-in-the-loop>

Mlot, E. D. G., Saldana, J., & Rodríguez, R. J. (2022, September). Towards a testbed for critical industrial systems: SunSpec protocol on DER systems as a case study. In *2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/etfa52439.2022.9921522>

Modbus FAQ. (n.d.). Retrieved from <https://modbus.org/faq.php>

Modbus-IDA. (2004). Modbus Application Protocol Specification V1.1a.

Nutkani, I. U., Loh, P. C., & Blaabjerg, F. (2014). Droop Scheme With Consideration of Operating Costs. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(3). <https://doi.org/10.1109/tpel.2013.2276251>

OffSec Services. (n.d.). Kali Linux — Penetration testing and ethical hacking Linux distribution. Retrieved from <https://www.kali.org>

Onunkwo, I., Wright, B. J., Cordeiro, P. G., Jacobs, N., Lai, C. F., Johnson, J. T., ... & Schwalm, K. (2019). *Cybersecurity assessments on emulated DER communication networks* (No. SAND-2019-2406). Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United

States); DNK Consulting, Albuquerque, NM (United States). DOE Contract Number: AC04-94AL85000

Orega, A., et al. (2015). Performance Evaluation of the DNP3 Protocol for Smart Grid Applications over IEEE 802.3/802.11 Networks and Heterogeneous Traffic. In *Proceedings of the International Conference on Communications*. ISBN: 978-1-61804-318-4

Palmintier, B., Broderick, R., Mather, B., Coddington, M., Baker, K., Ding, F., Reno, M., Lave, M., & Bharatkumar, A. (2016). On the path to SunShot: Emerging issues and challenges in integrating solar with the distribution system. *National Renewable Energy Laboratory*. NREL/TP-5D00-65331. <https://doi.org/10.2172/1253980>

Qin, J., Ma, Q., Shi, Y., & Wang, L. (2017). Recent Advances in Consensus of Multi-Agent Systems: A Brief Survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(6), 4972-4983. <https://doi.org/10.1109/tie.2016.2636810>

Rapid shutdown (RSD) system for residential and small commercial. (n.d.). *ABB Solar Inverters*.

Reihs, D., Bouda, F., Leimgruber, F., Machtinger, K., Strasser, T. I., Stefan, M., ... & Schober, L. (2023). Unlocking customer flexibilities through standardized communication interfaces. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 140(5), 441-451. <https://doi.org/10.1007/s00502-023-01153-1>

Rodofile, N. R., Radke, K., & Foo, E. (2017). Framework for SCADA cyber-attack dataset creation. *Proceedings of the Australasian Computer Science Week Multiconference*, 1-10. <https://doi.org/10.1145/3014812.3014883>

Rosewater, J. Johnson, M. Verga, R. Lazzari, C. Messner, R. Bründlinger, K. Johannes, J. Hashimoto, K. Otani, International development of energy storage interoperability test protocols for renewable energy integration, EU PVSEC, Hamburg, Germany, 14-18 Sept, 2015. Sandia Reference Number SAND2015-7755 C

Seal, B. (2014, February 21). Common functions for smart inverters (Version 3). *EPRI Report 3002002233*.

Seguin, R., Woyak, J., Costyk, D., Hambrick, J., & Mather, B. (2016). High-penetration PV integration handbook for distribution engineers. *NREL Technical Report NREL/TP-5D00-63114*. <https://doi.org/10.2172/1235905>

Snort - Network intrusion detection and prevention system. (n.d.). Retrieved from <https://www.snort.org>

SolarEdge SunSpec Alliance. (2019). SunSpec Logging in SolarEdge Inverters. *SunSpec Alliance – Technical Note*, 1-29.

Sridhar, S., Hahn, A., & Govindarasu, M. (2012). Cyber-Physical System Security for the Electric Power Grid. *Proceedings of the IEEE*, 100(1), 210-224. <https://doi.org/10.1109/jproc.2011.2165269>

Stouffer, K., Pillitteri, V., Lightman, S., Abrams, M., & Hahn, A. (n.d.). Guide to industrial control systems (ICS) security (Tech. Rep. NIST SP 800 - 82 Revision 2). <https://doi.org/10.6028/nist.sp.800-82r2>

Sun, Q., et al. (2015). A Multi-Agent-Based Consensus Algorithm for Distributed Coordinated Control of Distributed Generators in the Energy Internet. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(6). <https://doi.org/10.1109/tsg.2015.2412779>

Sundararajan, A., Chavan, A., Saleem, D., & Sarwat, A. (2018). A survey of protocol-level challenges and solutions for distributed energy resource cyber-physical security. *Energies*, 11(9), 2360. <https://doi.org/10.3390/en11092360>

SunSpec Alliance. (2015). SunSpec Technology Overview - Spec Alliance Interoperability Specification. *SunSpec Alliance – Technical Note*, 1-8.

SunSpec Alliance. (2018). Common Smart Inverter Profile: IEEE 2030.5 Implementation Guide for Smart Inverters. *SunSpec Alliance – Technical Note*, 1-63.

SunSpec Alliance. (2021, April 20). Communication signal for rapid shutdown - SunSpec interoperability specification. Retrieved from <https://sunspec.org/rapid-shutdown/>

SunSpec Alliance. (n.d.). SunSpec Dashboard [Software]. Retrieved from <http://sunspec.org/sunspec-dashboard/>

SunSpec Alliance. (n.d.). SunSpec energy storage models. Retrieved from <https://sunspec.org/sunspec-energy-storage-model-description>

SunSpec Alliance. (n.d.). SunSpec System Validation Platform (SVP) [Software]. Retrieved from <http://sunspec.org/sunspec-svp/>

System Validation Platform Github Repository. (n.d.). Retrieved from [https://github.com/sunspec/svp\\_directories](https://github.com/sunspec/svp_directories)

TALENT project. (n.d.). Retrieved from <https://talentproject.eu>

Tansy, T. (2019). *SunSpec Open Solar Data Exchange (oSDX)* (No. 7316-FTR-SunSpec). SunSpec Alliance, San Jose, CA (United States). <https://doi.org/10.2172/1504213>

Tayab, U. B., Roslan, M. A. B., Hwai, J. J., & Kashif, M. (2017). A Review of Droop Control Techniques for Microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 717-727. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.028>

Underwriters Laboratories 1741 Ed. 2. (2010). Inverters, converters, controllers and interconnection system equipment for use with distributed energy resources.

VDE Reference. (2008, August). VDE-AR-N 4105 Power generation systems connected to the low voltage distribution network - Technical minimum requirements for the connection to and parallel operation with low voltage distribution networks. <https://doi.org/10.3403/30117567>

Verga, M., Lazzari, R., Johnson, J., Rosewater, D., Messner, C., & Hashimoto, J. (2016). SIRFN draft test protocols for advanced battery energy storage system interoperability functions. *ISGAN Annex #5 Discussion Paper*. <https://doi.org/10.2172/1761996>

Wang, Y., Sheikh, O., Hu, B., Chu, C. C., & Gadh, R. (2014, November). Integration of V2H/V2G hybrid system for demand response in distribution network. In 2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm) (pp. 812-817). IEEE. <https://doi.org/10.1109/smartgridcomm.2014.7007748>

Williams, A. B. (2006). Electronic filter design hand book. In *Electronic Filter Design Hand Book* (pp. 208-236). Chicago: McGraw-Hill. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-61554-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-61554-7_4)

Yaseen, B., Akour, A., Shahroury, F. R., & Ahmad, H. H. (2023, April). A Filter-less RMS-based S-FSK demodulation technique for SunSpec rapid shutdown receiver. In *2023 IEEE 16th Dallas Circuits and Systems Conference (DCAS)* (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/dcas57389.2023.10130177>

Zavar, B. A., Garcia, E. J. P., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2019). Smart Inverters for Microgrid Applications: A Review. *Energies*, 12(1-22). <https://doi.org/10.3390/en12050840>

Zetawi, E. A., Abdulhadi, E. O., Shahroury, F. R., Ahmad, H. H., & Akour, A. (2021). Components and specification of rapid shutdown for roof PV systems. *2021 International Conference on Microelectronics (ICM)*, 182-185. <https://doi.org/10.1109/ICM52667.2021.9664910>

Zhang, W., & Ma, H. (2012). Theoretical and Experimental Investigation of Networked Control for Parallel Operation of Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(4), 1961-1971. <https://doi.org/10.1109/tie.2011.2165459>