



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

*Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής
Πολυτεχνική Σχολή*

Προηγμένα Πληροφοριακά Συστήματα

Θέμα: IoT Σύστημα επιτήρησης και διαχείρισης Φωτοβολταϊκών πάρκων.

Ακαδημαϊκό έτος 2019-2020

Project Εξαμήνου

ΓΕΩΡΓΟΠΟΥΛΟΣ- ΝΙΝΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

AM:1054385

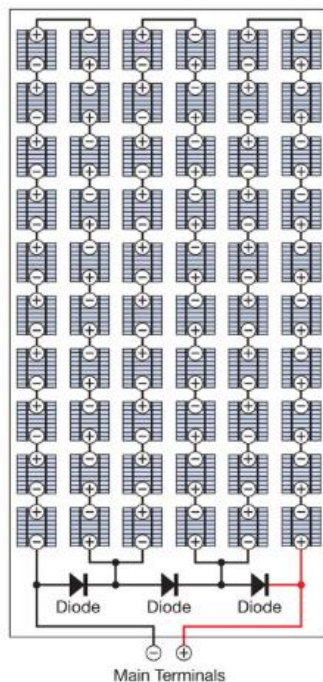
Email: gninos@ceid.upatras.gr

Κυριακή 5 Ιανουαρίου 2020

1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

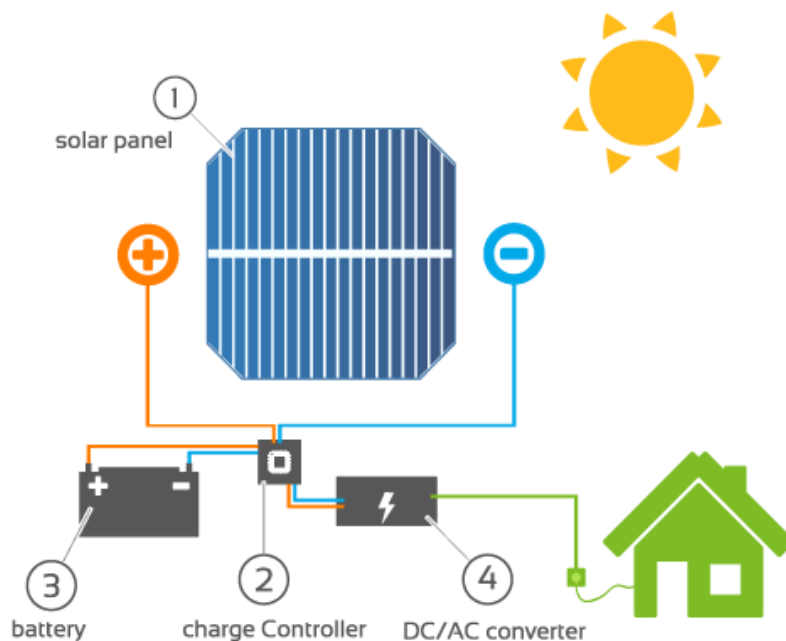
Στόχος: η ανάπτυξη ενός συστήματος επιτήρησης και καταγραφής όλων των παραμέτρων που καθορίζουν τη λειτουργία ενός Φ/Β πλαισίου (φυσικών και ηλεκτρικών), με απώτερο σκοπό τη διερεύνηση της συσχέτισης των διαφόρων φαινομένων, που επιδρούν αρνητικά στην απόδοση μίας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (PID, Hot zones, αστοχία ηλεκτρολογικών ενώσεων εσωτερικού κυκλώματος), με τα μετρούμενα μεγέθη και την υλοποίηση ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων (ΑΔΑ) για την πρόβλεψη και την επιδιόρθωση πιθανών προβλημάτων λειτουργίας και ενεργειακής απόδοσης.

Παράδειγμα Φωτοβολταϊκού πλαισίου:



Circuit Theory

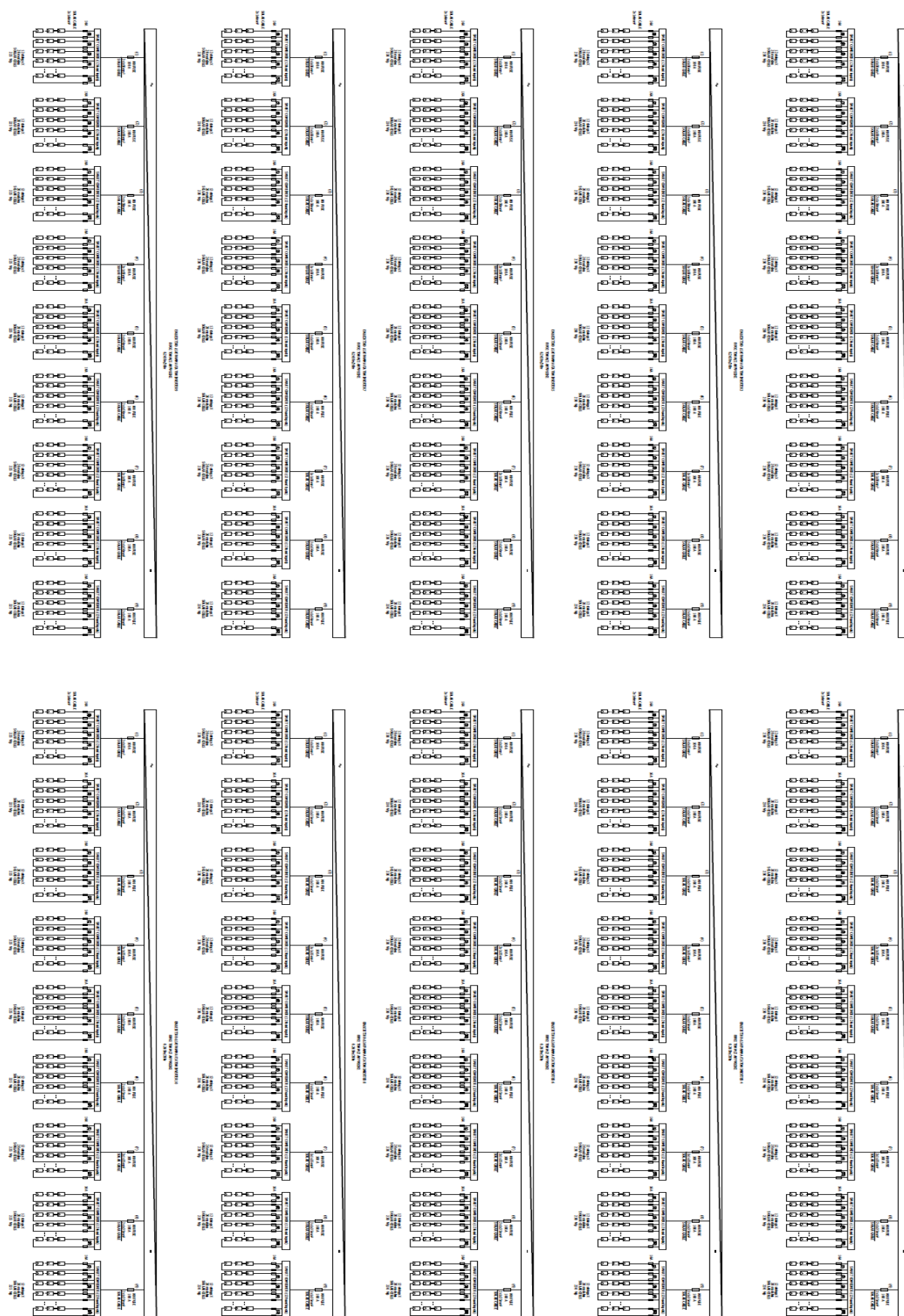
- **No cells shaded:** Current passes through all cells. No current passes through bypass diodes.
- **One cell shaded:** Current bypasses the 20-cell series string and passes through the bypass diode in parallel with that string.
- **One row of cells shaded:** Current bypasses three 20-cell series strings and passes through three bypass diodes.
- **One column of cells shaded:** Current bypasses the 20-cell series string and passes through the bypass diode in parallel with that string.
- **Entire module shaded:** Current bypasses all cells and passes through three bypass diodes.



Εικόνες από ένα Φ/Β πάρκο:



Εικόνες ηλεκτρολογικού σχεδίου cells :

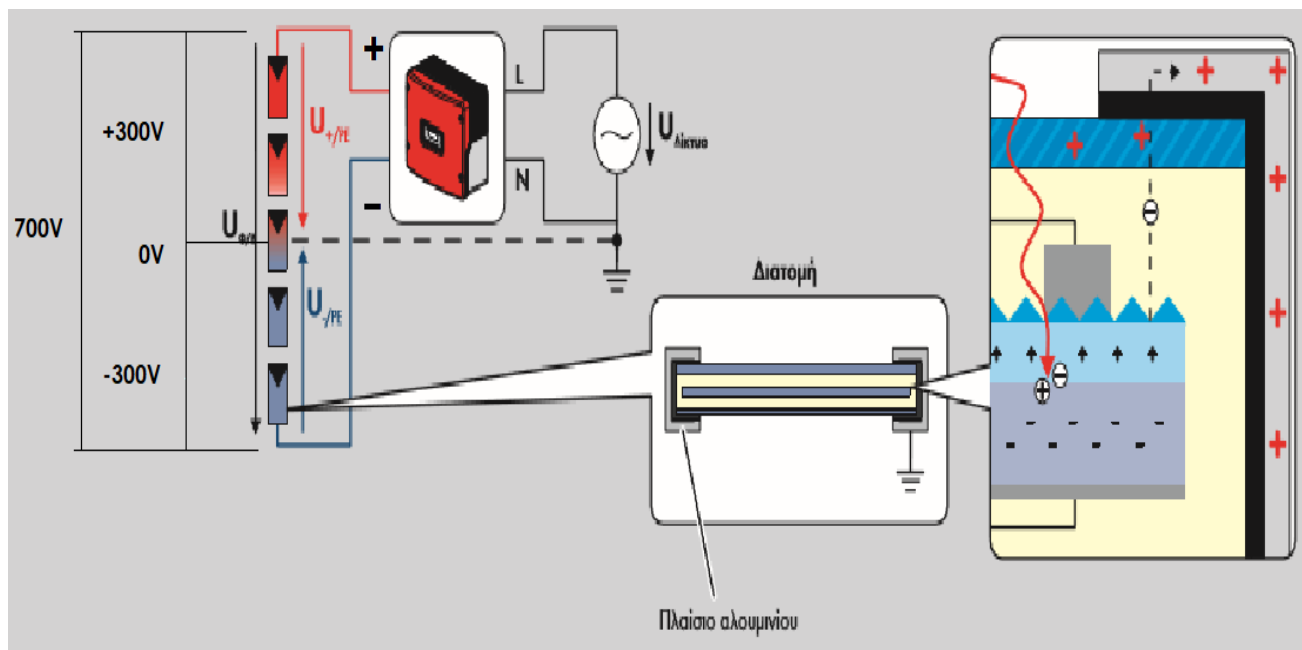


2. ΑΙΤΙΕΣ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΟΥ

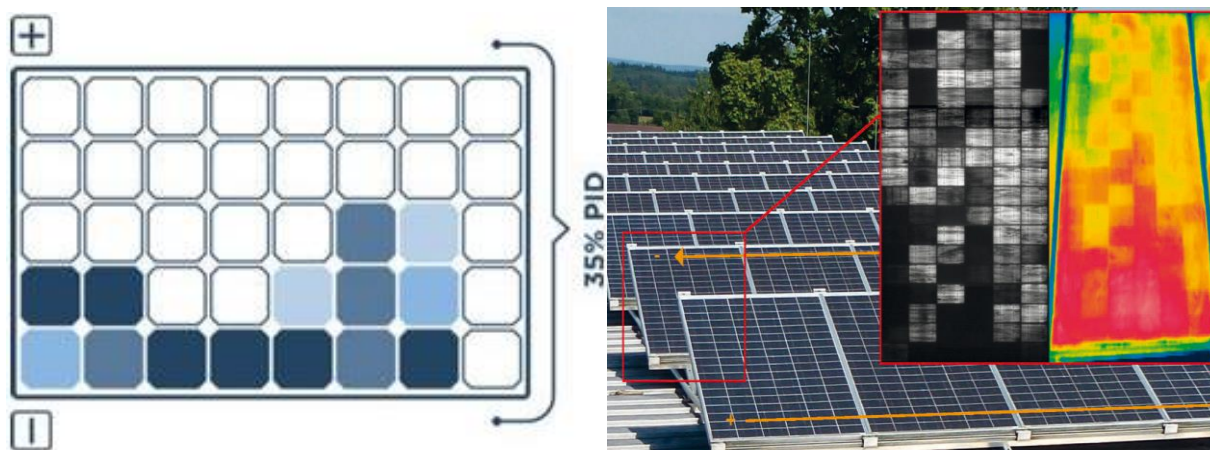
Ο κατασκευαστής στην λειτουργία του Φ/Β δίνει αναμενόμενη μείωση της απόδοσης η οποία κυμαίνεται σε μερικές περιπτώσεις στο +/- 5% και είναι η φυσιολογική. Σε περιπτώσεις όμως απωλειών άνω του 10% ειδικά στα πρώτα χρόνια λειτουργίας αρχίζουν να εγείρουν ανησυχίες.

Το φαινόμενο PID

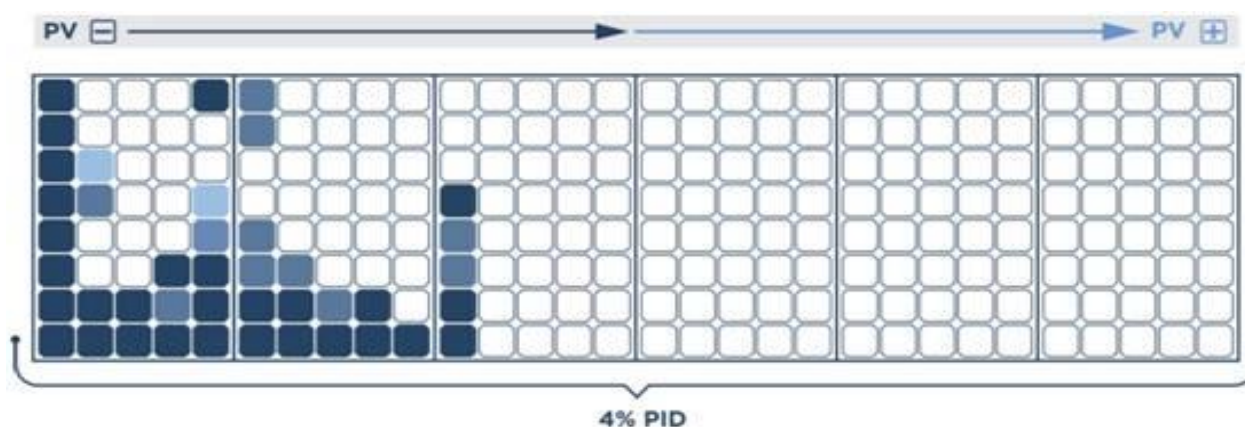
Το φαινόμενο **PID** (Potential Induced Degradation) συναντάται περισσότερο συχνά σε ΦΒ πλαίσια που λειτουργούν με φωτοβολταϊκές κυψέλες (solar cells). Μπορεί να εμφανιστεί μόλις λίγα χρόνια μετά την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού πάρκου ενώ η ιδιαιτερότητά του έγκειται στο γεγονός ότι μπορεί να ξεκινήσει από ένα μόνο ΦΒ πλαίσιο και σταδιακά να επεκταθεί σε περισσότερα, ακόμη και σε όλα τα πλαίσια μίας ΦΒ εγκατάστασης αν δεν αντιμετωπιστεί εγκαίρως. Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται ιδίως στο ΦΒ πλαίσιο που βρίσκεται πλησιέστερα στον αρνητικό πόλο. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ του θετικού και του αρνητικού πόλου μίας στοιχειοσειράς κυμαίνεται περίπου στα 700 Vdc (τα 1000Vdc είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο μέγεθος τάσης που δίνεται από τους κατασκευαστές των inverter). Επειδή το σημείο 0Vdc δεν συμπίπτει με τον αρνητικό πόλο, το δυναμικό (τάση προς γη) των φωτοβολταϊκών κυψελών κυμαίνεται συνήθως μεταξύ -200V και -350V, ανάλογα με τον αριθμό των πλαισίων μίας στοιχειοσειράς και τον τύπο συσκευής του χρησιμοποιούμενου μετατροπέα. Αντίθετα, το πλαίσιο των φωτοβολταϊκών μονάδων έχει δυναμικό 0 V, επειδή πρέπει να είναι γειωμένο για λόγους ασφαλείας. Λόγω αυτής της ηλεκτρικής τάσης μεταξύ των φωτοβολταϊκών κυψελών και του πλαισίου μπορεί να απελευθερωθούν ηλεκτρόνια από τα χρησιμοποιούμενα, στο φωτοβολταϊκό πάνελ, υλικά τα οποία ρέουν μέσω του γειωμένου πλαισίου.



Σε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ, το φαινόμενο PID εμφανίζεται εντονότερα στις κυψέλες που βρίσκονται πιο κοντά στο πλαίσιο αλουμινίου και η αρχή γίνεται πάντα από την πλευρά του (-) πόλου. Αντίθετα, το PID εμφανίζεται λιγότερο έντονα στις κυψέλες που βρίσκονται στο κέντρο του φωτοβολταϊκού πάνελ.



Σε μια συστοιχία φωτοβολταϊκών πάνελ (string), το PID εμφανίζεται εντονότερα στα πάνελ που είναι πιο κοντά στην πιο αρνητική, από άποψη δυναμικού, πλευρά της στοιχειοσειράς (string).

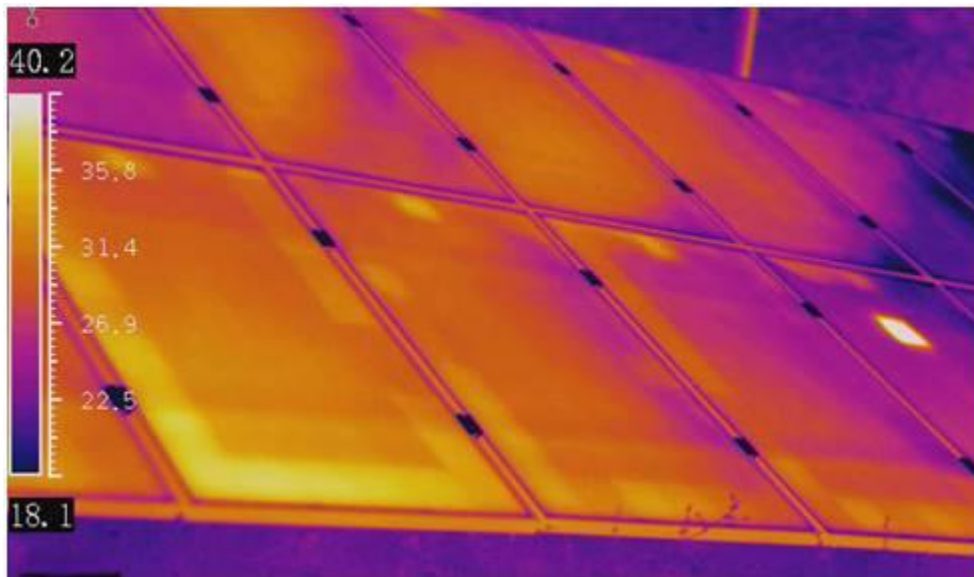


Παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο PID

1. Φωτοβολταϊκές κυψέλες (solar cells): Υπάρχουν ενδείξεις ότι πολλοί τύποι φωτοβολταϊκών κυψελών εμφανίζουν ευαισθησία κατά την έκθεσή τους σε υψηλό αρνητικό δυναμικό. Η δομή της ίδιας της κυψέλης παίζει ρόλο στην εμφάνιση και στην εξάπλωση του PID. Υπάρχουν περιπτώσεις που τα κυκλώματα ή ακόμα και οι ίδιες οι κυψέλες είναι τοποθετημένα πολύ κοντά στο frame αλουμινίου οπότε έχουμε την εμφάνιση του φαινομένου.
2. Πρώτες Ύλες: Τα υλικά από τα οποία έχουν κατασκευαστεί τα φωτοβολταϊκά πάνελ, όπως για παράδειγμα η χημική σύνθεση του γυαλιού επηρεάζουν το φαινόμενο. Συνήθως ανακυκλωμένα και χαμηλής ποιότητας υλικά τα οποία μπορεί να περιέχουν αγώγιμα υλικά συντελούν στην ανάπτυξη και την επιτάχυνση του φαινομένου.
3. Ιδιαιτερότητες φωτοβολταϊκού σταθμού: Σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του PID παίζει το μέγιστο αρνητικό δυναμικό στο οποίο οι φωτοβολταϊκές κυψέλες υπόκεινται. Αυτό εξαρτάται από τον αριθμό των πλαισίων ανά στοιχειοσειρά (string), τον τύπο του μετατροπέα (με ή χωρίς μετασχηματιστή) και τη γείωση του φωτοβολταϊκού σταθμού. Ο μεγάλος αριθμός πλαισίων και η επακόλουθη μεγάλη διαφορά δυναμικού μεταξύ των + και - πόλων θα επιταχύνει την ανάπτυξη του φαινομένου.
4. Εξωγενείς παράγοντες: Η θερμοκρασία και η υγρασία είναι ορισμένοι από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες που έχουν σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση και την εξέλιξη του PID

Διάγνωση του PID

Η διάγνωση γίνεται κυρίως με θερμογραφικό έλεγχο. Δείτε το παράδειγμα στην εικόνα:



Επίσης, διάγνωση μπορεί να γίνει από απομακρυσμένο έλεγχο δηλαδή με την διαρκή μέτρηση και καταγραφή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των string η οποία θα ήταν ιδανική αν γινόταν σε επίπεδο κάθε Φ/Β πάνελ.

Το φαινόμενο των Hot-spots

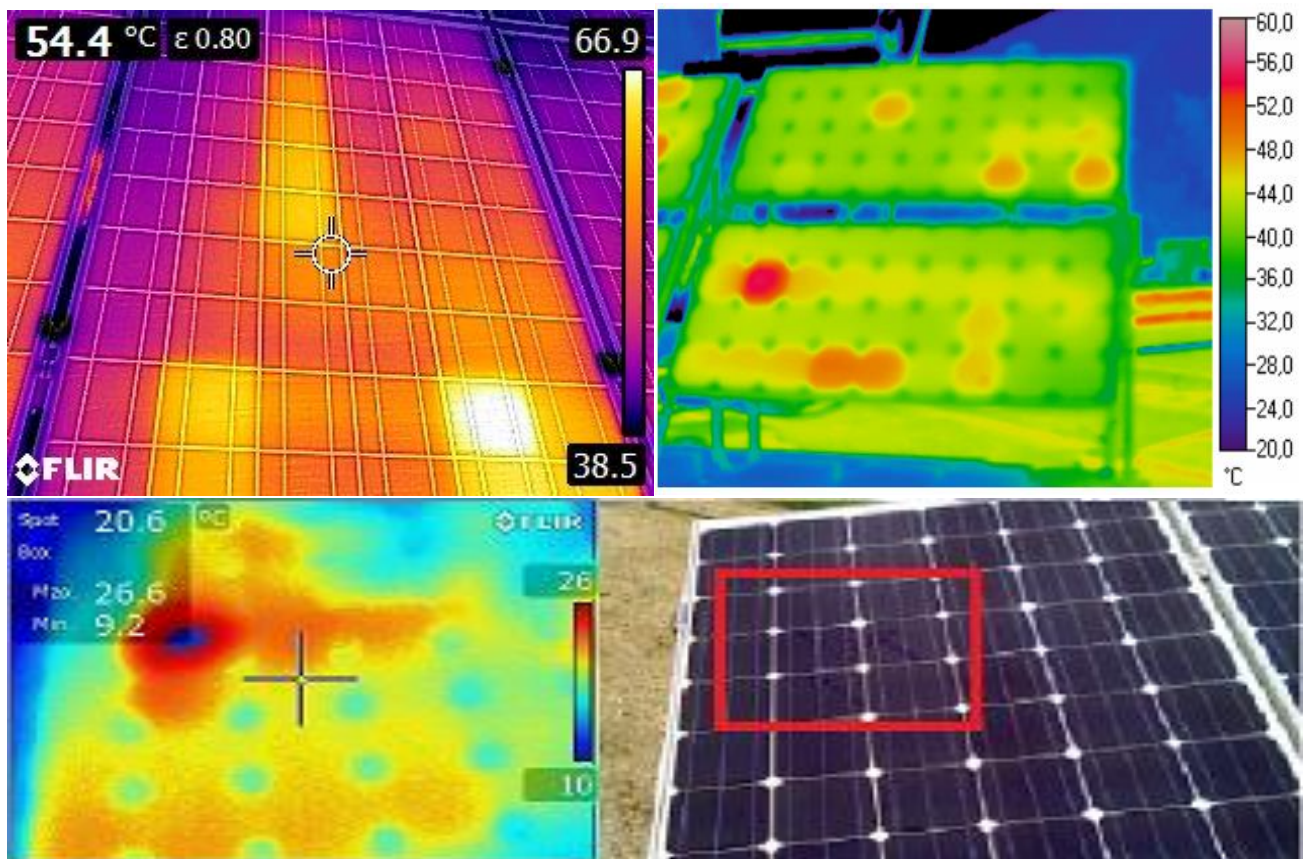
Hotspots είναι περιοχές υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσονται τμηματικά σε ΦΒ Πάνελ και επηρεάζουν αρνητικά την απόδοσή τους. Με την εμφάνιση του φαινομένου παρατηρείται αρχικά τοπική μείωση της απόδοσης του ΦΒ πάνελ, η οποία εξελίσσεται σε μειωμένη παραγόμενη ισχύ όλου του πάνελ και τελικά στην υποβάθμιση και αστοχία των υλικών στην περιοχή του Hotspot .

Τα ΦΒ πάνελ παράγουν σημαντική ισχύ και τα hotspots εμφανίζονται όταν η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική και δεν αξιοποιείται. Τα Hot Spots δημιουργούνται και εξαπλώνονται μέχρι την πλήρη καταστροφή της απόδοσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας του Φ/Β πάνελ.

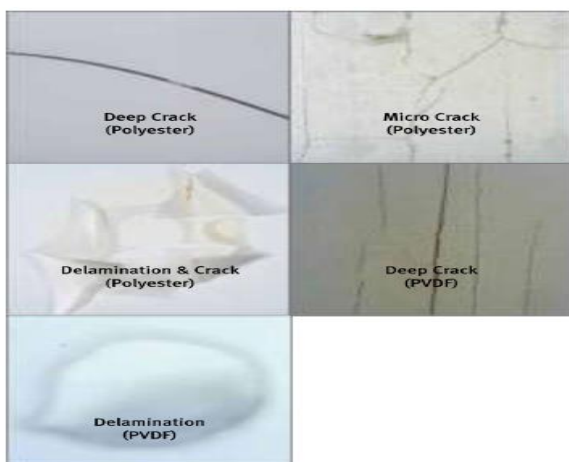
Τα βασικά αίτια εμφάνισης του φαινομένου είναι τα εξής:

1. Δεν υπάρχει συμβατότητα των ρευμάτων των κυψελών που απαρτίζουν το ΦΒ πάνελ. Καθώς η σύνδεση είναι σε σειρά θα πρέπει οι κυψέλες που χρησιμοποιούνται για την σύνθεση του πάνελ να έχουν την ίδια τιμή ρεύματος.
2. Καταστροφή κάποιων κυψελών μπορεί πιθανά κατά την διάρκεια παραγωγής των ΦΒ πάνελ ή κατά την μεταφορά και εγκατάστασή τους.
3. Κακές ηλεκτρολογικές συνδέσεις στο εσωτερικό κύκλωμα του.
4. Μακροχρόνια σκίαση από βλάστηση, σκόνη και τοπικούς ρύπους, και κακό σχεδιασμό στην εγκατάσταση (σκίαση μίας στοιχειοσειράς από την άλλη, τεχνητά ή φυσικά εμπόδια όπως δέντρα, κολώνες κ.λ.π)

Παραδείγματα σημείων Hot-spot:



Το ζητούμενο στην εμφάνιση των Hot Spots είναι η έγκαιρη ανίχνευση του φαινομένου η οποία γίνεται με μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του πάνελ με αισθητήρια . Αν λοιπόν εντοπιστεί έγκαιρα αυτή η θερμοκρασιακή διαφορά στο πάνελ θα μπορεί έγκαιρα να αξιολογηθεί το αίτιο που την προκάλεσε και να βρεθεί ή λύση η οποία μπορεί να είναι καθαρισμός χόρτων, πλύσιμο πάνελ αλλά και αντικατάσταση Φ/Β πάνελ τα οποία επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση όλης της στοιχειοσειράς στην οποία ανήκουν. Οι παρακάτω φωτογραφίες δείχνουν καταστροφή των κυψελών και των διαφόρων υλικών του πάνελ από εμφάνιση hotspots.



Hot spots lead to bubbling



Bubbling leads to cracking



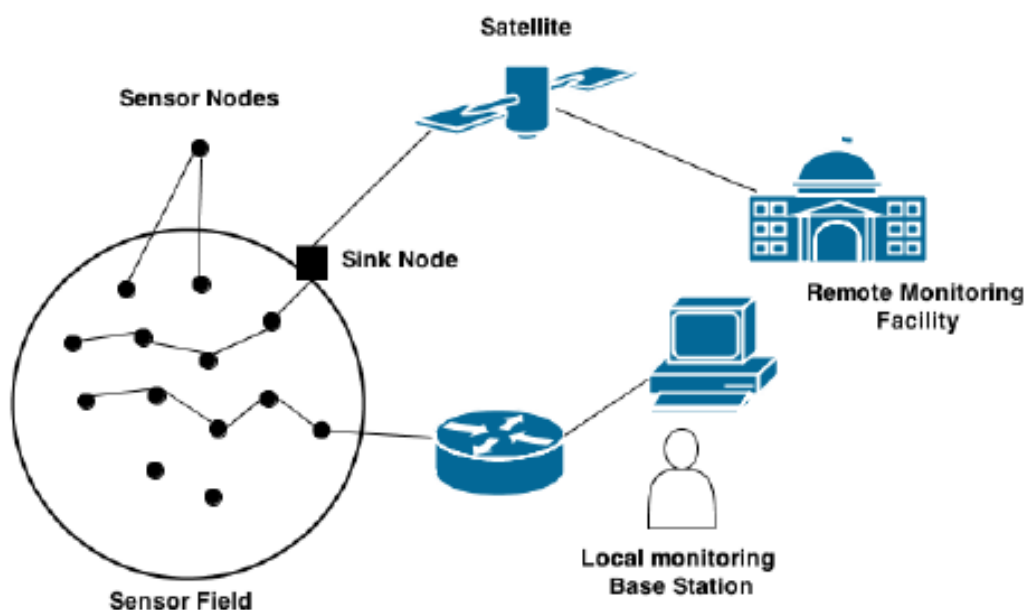
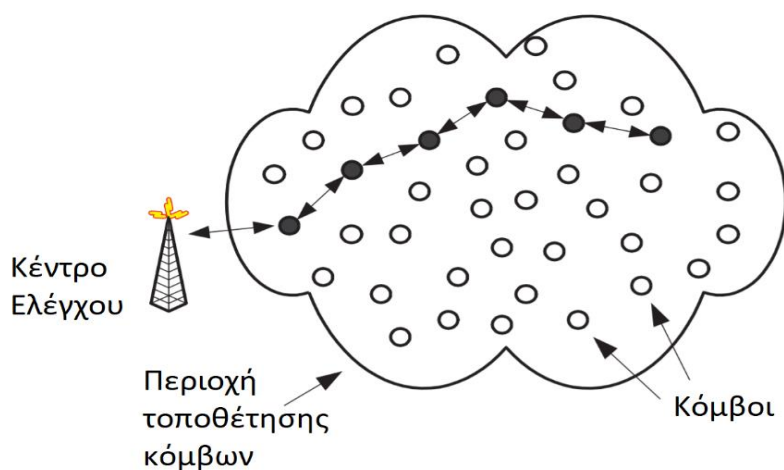
High intensity hot spots in PVDF-based backsheets

3. ΑΣΥΡΜΑΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Αναγκαιότητα ανάπτυξης του προτεινόμενου Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων για την αντιμετώπιση των φαινομένων.

Ορισμός: Τα **Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων** (ΑΔΑ) είναι μία νέα και διαρκώς εξελισσόμενη τεχνολογία αιχμής, καθώς αποτελούνται από υπολογιστικούς κόμβους που επικοινωνούν ασύρματα μεταξύ τους, έχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, υποστηρίζουν μεγάλη ποικιλία αισθητήρων για επιτήρηση περιβαλλοντικών συνθηκών, εφαρμόζουν προηγμένες τεχνολογίες IoT (Internet of Things), έχουν χαμηλό κόστος αγοράς και εγκατάστασης και δίνουν τη δυνατότητα στον απλό χρήστη να τα διαχειριστεί απομακρυσμένα από εύχρηστο γραφικό περιβάλλον. Επίσης, τα ΑΔΑ παρέχουν τη δυνατότητα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων σε συστήματα που καθιστούν την εφαρμογή συμβατικών τεχνολογιών δικτύου δύσκολη και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανίχνευση διαφόρων προβλημάτων σε διάφορες εφαρμογές, με βασικό στόχο τη βελτίωση της συνολικής λειτουργίας της εφαρμογής και την πιθανή ανίχνευση σφαλμάτων, έχοντας ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος.

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων



4. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

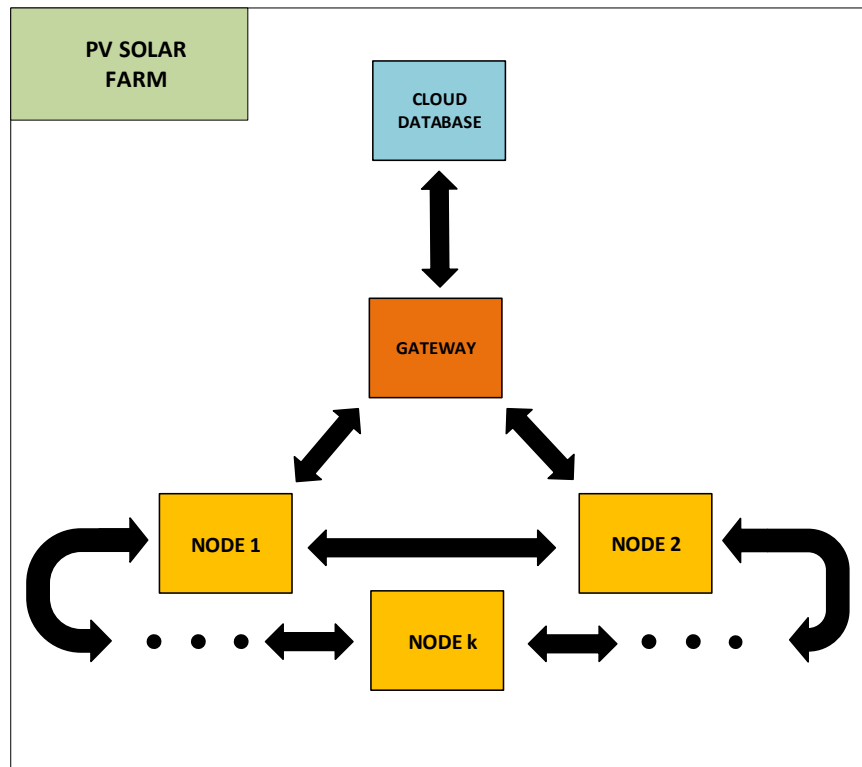
Η σχεδίαση και υλοποίηση ενός ΑΔΑ θα επιλύσει τα προβλήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως και που εμφανίζονται σε μεγάλα φωτοβολταϊκά συστήματα - φωτοβολταϊκά πάρκα και επιδρούν αρνητικά στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ του πάρκου. Το σύστημα αφορά το σχεδιασμό ενός καινοτόμου ΑΔΑ που θα συλλέγει και θα αξιοποιεί δεδομένα που επηρεάζουν τη λειτουργία του πάρκου, με στόχο την πρόβλεψη και την επιδιόρθωση πιθανών προβλημάτων λειτουργίας και ενεργειακής απόδοσης. Ωστόσο, ιδιαίτερη βαρύτητα θα πρέπει να δοθεί στο φαινόμενο PID, καθώς αποτελεί έναν από τους κυριότερους λόγους μείωσης της ενεργειακής απόδοσης του φωτοβολταϊκού πάρκου και συναντάται σε πάρκα μεγάλης κλίμακας. Η χρήση του ΑΔΑ συμβάλει και στην ανίχνευση άλλων τεχνικών βλαβών που παρουσιάζονται στα φωτοβολταϊκά πάρκα και συνεισφέρει στην ταχεία επίλυσή τους.

Εκτός του σχεδιασμού του ΑΔΑ και της υλοποίησης των κατάλληλων αλγορίθμων ελέγχου, αισθητήρες θα είναι υπεύθυνοι για τον έλεγχο της θερμοκρασίας και της υγρασίας και άλλων πιθανών χαρακτηριστικών που συναντώνται σε ένα φωτοβολταϊκό πάρκο. Λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες λειτουργικές και περιβαλλοντικές συνθήκες που συναντώνται στα φωτοβολταϊκά πάρκα αυτοί οι αισθητήρες θα επιλύσουν το πρόβλημα. Το σύστημα θα παρακολουθεί τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν συνολικά στο φωτοβολταϊκό πάρκο, αλλά και την κατάσταση του κάθε πλαισίου ξεχωριστά και θα καταγράφει κεντρικά τα δεδομένα. Τα δεδομένα που θα συλλέγονται από το ΑΔΑ και τα συμπεράσματα που θα εξάγονται από τους αλγορίθμους, θα κοινοποιούνται στους τελικούς χρήστες μέσω κατάλληλου λογισμικού για την πρόβλεψη τυχόν προβλημάτων και έγκαιρης προειδοποίησης.

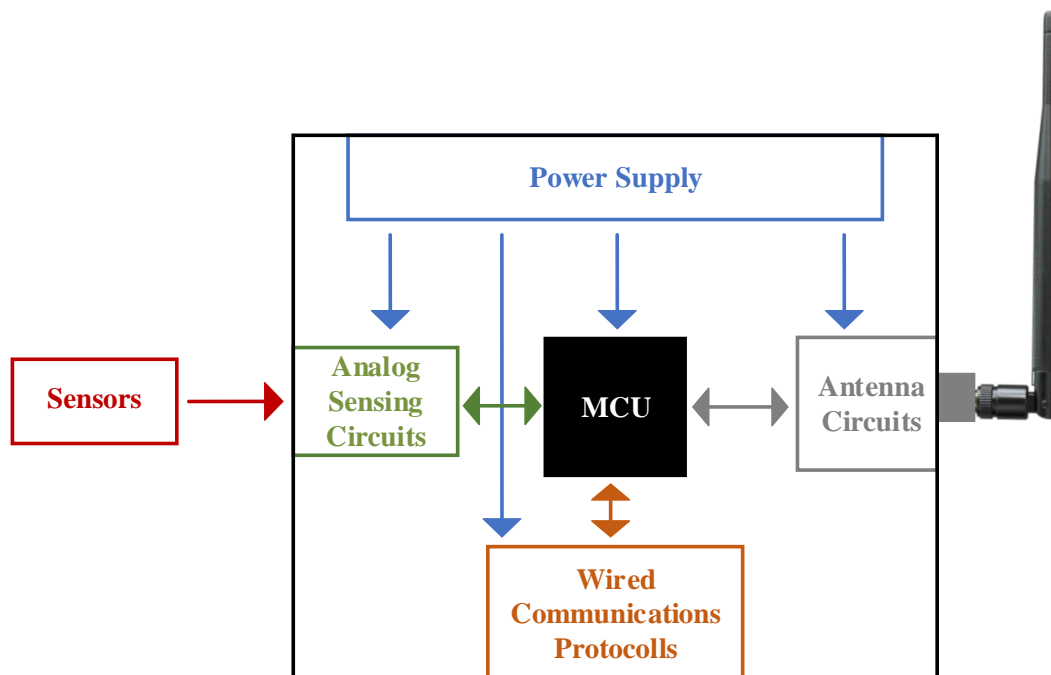
Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα θα αποτελείται από αισθητήρες που θα είναι τοποθετημένοι στα πλαίσια και θα συνδέονται με έναν κόμβο (**Sensor Node**) του ΑΔΑ. Οι κόμβοι του ΑΔΑ θα παίρνουν μετρήσεις από τους αισθητήρες και μέσω ασύρματης επικοινωνίας θα στέλνουν την πληροφορία στην κεντρική βάση (Gateway) του δικτύου εντός του φωτοβολταϊκού πάρκου. Από εκεί μέσω διαδικτυακής σύνδεσης (4G) οι πληροφορίες θα καταγράφονται σε κεντρικό Web Server στο **Cloud**. Εν συνεχεία, θα πραγματοποιείται επεξεργασία των μετρήσεων και μέσα από ειδικές μεθόδους πρόβλεψης βλαβών ή πτώσης της ενεργειακής απόδοσης (βασισμένες σε **AI** και **Machine Learning**) θα εκτελούνται σενάρια για την έγκαιρη ειδοποίηση και αντιμετώπισή τους. Ο χρήστης θα μπορεί να έχει απομακρυσμένη πρόσβαση σε όλη αυτή την πληροφορία από ένα φιλικό προς το χρήστη (**User Friendly**) γραφικό περιβάλλον (**Interface**).

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου PID θα κατασκευαστεί ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή (AC-DC). Το πλάτος της συνεχούς τάσης εξόδου πρέπει να είναι αρκετά υψηλό για την αποτελεσματική αναζωογόνηση των Φ/Β πλαισίων μιας στοιχειοσειράς και παράλληλα μικρότερη από τη μέγιστη τάση εισόδου του κεντρικού αντιστροφέα στον οποίο συνδέονται τα εν σειρά Φ/Β πλαίσια της συστοιχίας. Μια ακόμη παράμετρος του συστήματος αποτελεί η συνδυαστική αξιοποίηση του ΑΔΑ με την τοπολογία ενός μικρο-αντιστροφέα για τον απομακρυσμένο έλεγχο των Φ/Β πλαισίων που αναμένεται να αυξήσει τόσο την αξιοπιστία του συστήματος όσο και την ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Τέλος, τα χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων θα καθορίσουν τις παραμέτρους για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του μικρο-αντιστροφέα, εξασφαλίζοντας τη μέγιστη δυνατή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το πλαίσιο και κατ' επέκταση από το σύνολο του Φ/Β πάρκου.

Αρχιτεκτονική συστήματος:

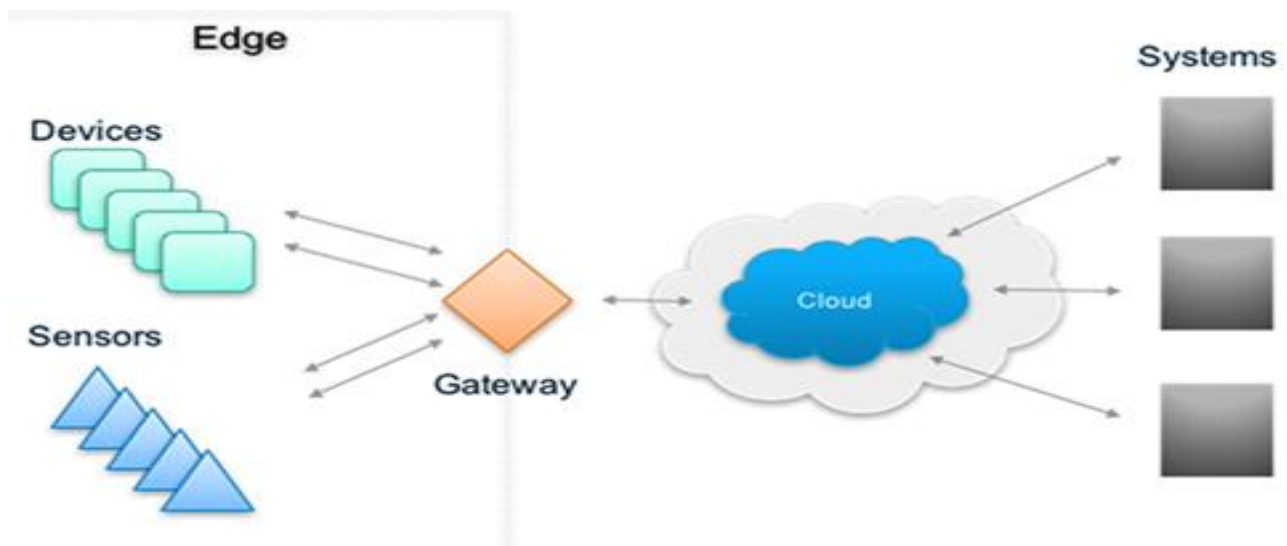


Δομικό διάγραμμα των κόμβων του ΑΔΑ:



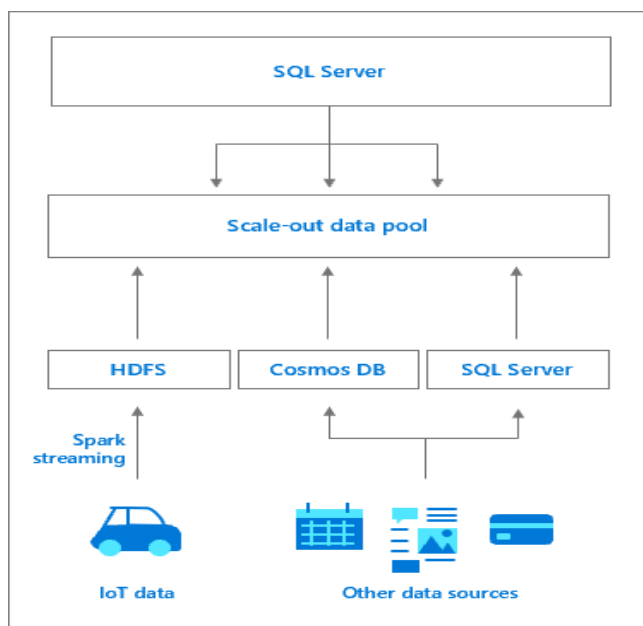
Κάθε κόμβος του ΑΔΑ θα είναι υπεύθυνος για τη συλλογή και τη μετάδοση των δεδομένων σε γειτονικούς κόμβους και στην κεντρική πύλη. Κάθε κόμβος θα τροφοδοτεί τους αισθητήρες και το μικροελεγκτή που θα διαχειρίζεται τη συλλογή και τη μετάδοση των δεδομένων είτε μέσω της κεραίας, για την ασύρματη μετάδοση τους σε άλλα Φ/Β πλαίσια, είτε μέσω ενσύρματου διαύλου επικοινωνίας για την επικοινωνία με άλλες διατάξεις στο ίδιο Φ/Β πλαίσιο, όπως είναι η διάταξη αντιμετώπισης του φαινομένου PID.

Η σύνδεση των συσκευών με το Cloud μέσω του Gateway



5. Μεθοδολογία υλοποίησης

Αρχικά, η υλοποίηση μιας μετρητικής διάταξης για τη συλλογή των τιμών των βασικών φυσικών και ηλεκτρικών παραμέτρων, που απορρέουν από τη λειτουργία των πλαισίων, αποτελεί τη βάση του συστήματος για την σωστή λειτουργία ενός Φ/Β πάρκου. Η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, η θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά και ενδεικτικές θερμοκρασίες από την πίσω πλευρά του πλαισίου, η υγρασία, η τάση και το ρεύμα διακρίνονται ανάμεσα στις βασικές λειτουργικές παραμέτρους ενός Φ/Β πλαισίου και κατάλληλοι αισθητήρες θα αξιοποιηθούν για τη συγκέντρωση όλης της πληροφορίας. Εκτός από τη συλλογή των βασικών λειτουργικών παραμέτρων των πλαισίων, η μετρητική διάταξη θα επιφορτίζεται και με τη μετάδοση των δεδομένων στην κεντρική βάση (**Gateway**) για τη δημιουργία μιας δεξαμενής δεδομένων (**data pool**) και τη μετέπειτα αξιοποίηση και αξιολόγηση της πολύτιμης πληροφορίας που συγκεντρώνεται σε βάθος χρόνου από τη λειτουργία του Φ/Β πάρκου.

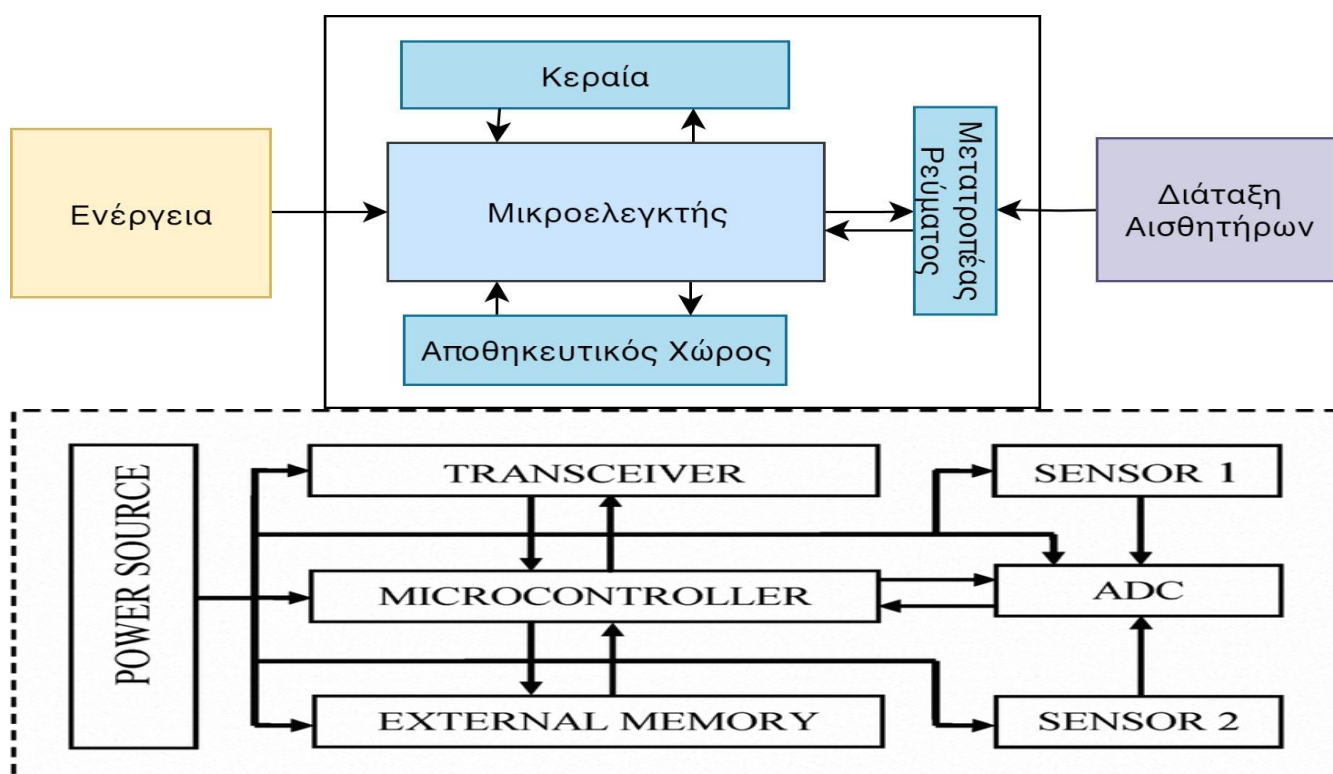


Πιο συγκεκριμένα κάθε εξεταζόμενο Φ/Β πλαίσιο θα έχει αισθητήρες φυσικών μεγεθών, για την επιτήρηση τόσο της κατάστασης του πλαισίου όσο και των περιβαλλοντικών συνθηκών στις οποίες λειτουργεί το πλαίσιο, και αισθητήρες ηλεκτρικών μεγεθών για την εκτίμηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και τη συνδυαστική αξιολόγηση της κατάστασης του πλαισίου για την εξέταση της πιθανότητας εμφάνισης του φαινομένου PID. Παράλληλα, πρέπει να σχεδιασθούν και να υλοποιηθούν τα κυκλώματα προσαρμογής των σημάτων των αισθητήρων για τη συλλογή τους από έναν μικροελεγκτή, ο οποίος σε επόμενη φάση θα τα στέλνει ασύρματα στην κεντρική βάση. Η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει την αξιοποίηση της μετρητικής διάταξης ως ένα μεμονωμένο και ανεξάρτητο κόμβο του ΑΔΑ (**Sensor Node**), το οποίο συνεπάγεται την τοποθέτηση μιας κεραίας ανά Φ/Β πλαίσιο για την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων και της κεντρικής βάσης. Η τοποθέτηση της κεραίας θα γίνει στην πλευρά του Φ/Β που βρίσκεται πιο ψηλά για να μεγιστοποιηθεί η εμβέλεια της κεραίας και παράλληλα να περιοριστούν οι επιπτώσεις από πιθανή μερική σκίαση του πλαισίου λόγω της κεραίας.

Κάθε κόμβος του ΑΔΑ θα είναι μερικώς ενεργειακά αυτόνομος, καθώς θα ενσωματώνει τα δικά του τροφοδοτικά ηλεκτρικής ενέργειας. Η μπαταρία θα φορτίζει από το ίδιο το Φ/Β πάνελ. Για την ενδιάμεση αποθήκευση της ενέργειας έχουμε δυο παραμέτρους: η μία πλευρά επιτρέπει την ενεργειακή ανεξαρτητοποίηση των κόμβων του ΑΔΑ (αύξηση αξιοπιστίας συστήματος σε περίπτωση βλάβης της κεντρικής τροφοδοσίας), ενώ παράλληλα η υψηλή εκτιμώμενη θερμοκρασία στην πίσω πλευρά των Φ/Β πλαισίων περιορίζει την πιθανότητα εφαρμογής της συγκεκριμένης λύσης.

Τέλος, το αναπτυχθέν σύστημα απομακρυσμένης επιτήρησης θα προσαρμοστεί στη νέα τεχνολογία Φ/Β πλαισίων με μικρο-αντιστροφέα, η οποία φαίνεται να αποτελεί το μέλλον ακόμα και σε εφαρμογές Φ/Β πάρκων. Στην περίπτωση αυτή, ο μικρο-αντιστροφέας θα επιφορτίζεται τόσο με τη διασύνδεση του πλαισίου με το δίκτυο χαμηλής τάσης όσο και με τη μετάδοση των δεδομένων, καθώς θα αποτελεί έναν ανεξάρτητο κόμβο του ΑΔΑ, στον οποίο θα συνδέονται όλοι οι προαναφερθέντες αισθητήρες αλλά και οι νέοι αισθητήρες, που είναι απαραίτητοι για τη λειτουργία του μετατροπέα, παρέχοντας μια πλήρη εικόνα στο διαχειριστή του κεντρικού συστήματος ελέγχου για την κατάσταση όλων των επιμέρους στοιχείων του συστήματος.

Γενική αρχιτεκτονική ενός κόμβου σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων



6. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

1. Καθορισμός αισθητήρων

Η υλοποίηση του συστήματος αφορά τη συλλογή των τιμών των βασικών φυσικών και ηλεκτρικών παραμέτρων, που προέρχονται από τη λειτουργία των Φ/Β πλαισίων. Ενδεικτικοί αισθητήρες που θα επιλεγθούν για τη μέτρηση:

1. της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας
2. της υγρασίας του περιβάλλοντος
3. της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος
4. ενδεικτικών θερμοκρασιών από την πίσω πλευρά του Φ/Β πλαισίου
5. της τάσης στα άκρα του Φ/Β πλαισίου
6. και του ρεύματος του Φ/Β πλαισίου.
7. πυρανόμετρο
8. ταυτόχρονη μέτρηση με το ίδιο στοιχείο της υγρασίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για τη βέλτιστη εκτίμηση της σχετικής υγρασίας, χωρητικός αισθητήρας υγρασίας
9. θερμίστορ τύπου NTC
10. αναλογικά κυκλώματα με διαιρέτες τάσης και τελεστικούς ενισχυτές
11. αναλογικό κύκλωμα με αντίσταση δειγματοληψίας ρεύματος και τελεστικό ενισχυτή.

Δεδομένης της αυξημένης θερμοκρασίας λειτουργίας ενός Φ/Β πλαισίου πρέπει να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες με δυνατότητα λειτουργίας σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 100°C. Ο τύπος, το πλήθος και οι προδιαγραφές των αισθητήρων εξαρτάται από την υλοποίηση του Προηγμένου Πληροφοριακού Συστήματος.

2. Επικοινωνία των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Ένα από τα βασικά μέρη του **Προηγμένου Πληροφοριακού Συστήματος** είναι η υλοποίηση ενός ΑΔΑ, το οποίο θα είναι υπεύθυνο για τη συλλογή των δεδομένων που χαρακτηρίζουν την κατάσταση του πάρκου με σκοπό την επεξεργασία τους και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ομαλή ή μη λειτουργία των πάνελ, αλλά και την πρόληψη τυχόν μελλοντικών προβλημάτων.

Η κατάλληλη τοπολογία και δρομολόγηση είναι ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του ΑΔΑ. Οι κόμβοι του δικτύου θα πρέπει να σχηματίζουν μια τοπολογία μέσω της οποίας θα μπορούν με ευκολία να στέλνουν τα δεδομένα μεταξύ τους ή στο κέντρο ελέγχου (δομή πλέγματος, αστέρα κτλ.). Το πρωτόκολλο είναι σημαντικό να εκτελεί την δρομολόγηση των δεδομένων με όσο το δυνατό λιγότερες αποστολές μηνυμάτων από κόμβο σε κόμβο, καθώς η διαδικασία αποστολής αυξάνει την πολυπλοκότητα.

Επίσης, το πρωτόκολλο δρομολόγησης και η τοποθέτηση των κόμβων πρέπει να εφαρμοστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει ανοχή στα σφάλματα. Δεδομένου ότι το πάρκο αποτελείται από πολλά πάνελ και λόγω της χαμηλής αξιοπιστίας των κόμβων όσο αφορά τη συνεχή λειτουργία (φυσική καταστροφή, προβλήματα υλικού ή λογισμικού κλπ), υπάρχει μεγάλη πιθανότητα κάποιος από αυτούς να τεθεί απρόσμενα εκτός λειτουργίας. Γενικότερα, θα πρέπει να υπάρχει εγγύηση αποστολής των δεδομένων στο κέντρο ελέγχου προς επεξεργασία ακόμη και αν κάποιος από τους κόμβους τεθεί εκτός λειτουργίας.

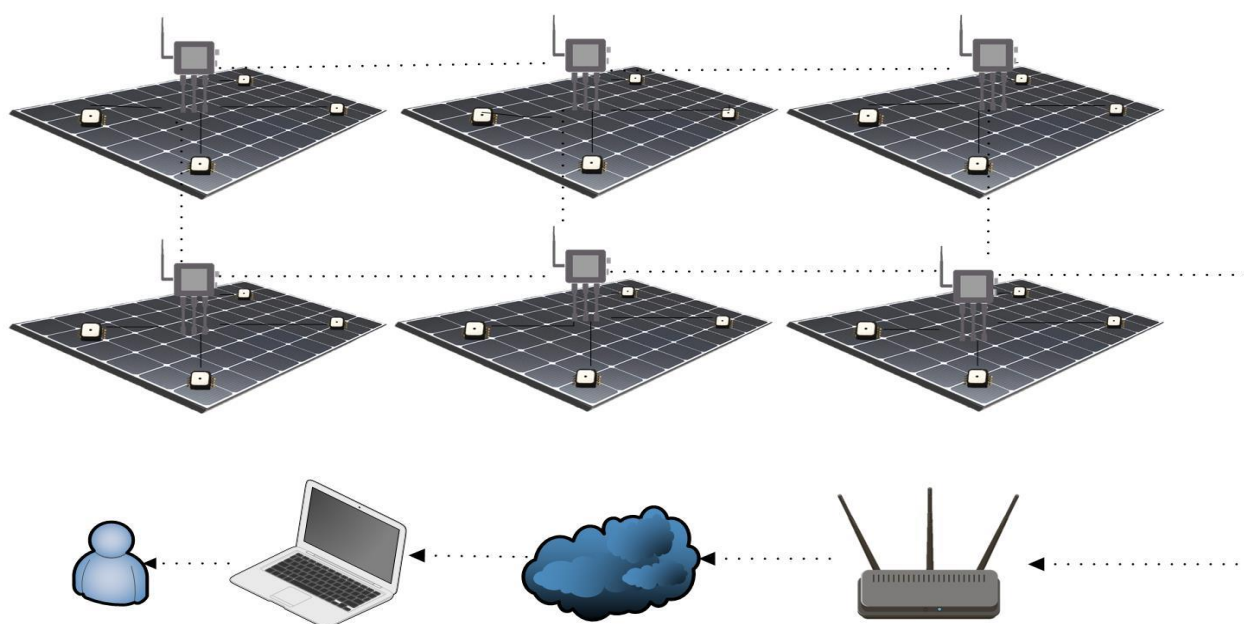
Επίσης, η εμβέλεια επικοινωνίας πρέπει να είναι τέτοια ώστε οι κόμβοι να είναι ικανοί να επικοινωνήσουν από πάνελ σε πάνελ (ή από πάνελ σε **Gateway**), ακόμη κι αν η απόσταση αυτή είναι

αρκετά μεγάλης κλίμακας. Γενικότερα, όπως το πρωτόκολλο και οι κεραίες θα πρέπει να υποστηρίζουν μεγάλες εμβέλεις για την ικανοποίηση μεγάλων πάρκων.

Η επιλογή μιας τοπολογίας πλέγματος (mesh topology) αποτελεί την λύση, καθώς έτσι τα δεδομένα θα έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρονται στο Gateway από κόμβο σε κόμβο χωρίς να είναι απαραίτητη η αποστολή δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις. Έτσι, ανεξάρτητα από το μέγεθος του Φ/Β πάρκου, κάθε κόμβος θα έχει τη δυνατότητα να αποστέλλει δεδομένα στο Gateway χρησιμοποιώντας άλλους κόμβους ως μεσάζοντες. Σε συνδυασμό επομένως με την τοπολογία πλέγματος, θα εφαρμοστεί ένα multi-hop πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο θα είναι υπεύθυνο για την έξυπνη δρομολόγηση των δεδομένων από κόμβο σε κόμβο, λαμβάνοντας υπόψιν την κατάσταση των διαθέσιμων προς αποστολή κόμβων, την απόστασή τους από το Gateway κτλ. Επίσης, το πρωτόκολλο δρομολόγησης θα λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε η δρομολόγηση να μη βασίζεται σε συγκεκριμένους κόμβους, δημιουργώντας εναλλακτικά μονοπάτια σε περίπτωση που κάποιος από τους κόμβους που λειτουργούσε ως μεσάζων τεθεί εκτός λειτουργίας.

Έχοντας ως σκοπό την υλοποίηση ενός ΑΔΑ το οποίο θα είναι ικανό να προσαρμοστεί σε κάθε Φ/Β πάρκο, η ασύρματη τεχνολογία, θα δίνει την δυνατότητα εύκολης προσθαφαίρεσης κόμβων χωρίς να απαιτείται κάποια επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία.

Η αρχιτεκτονική του ΑΔΑ:



Το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων θα βασίζεται στην επικοινωνία μεταξύ των κόμβων για την μετάδοση των δεδομένων τα οποία θα συλλέγονται. Η ασύρματη τεχνολογία που ταιριάζει σε αυτό το Προηγμένο Πληροφοριακό Σύστημα είναι το πρότυπο Digimesh.

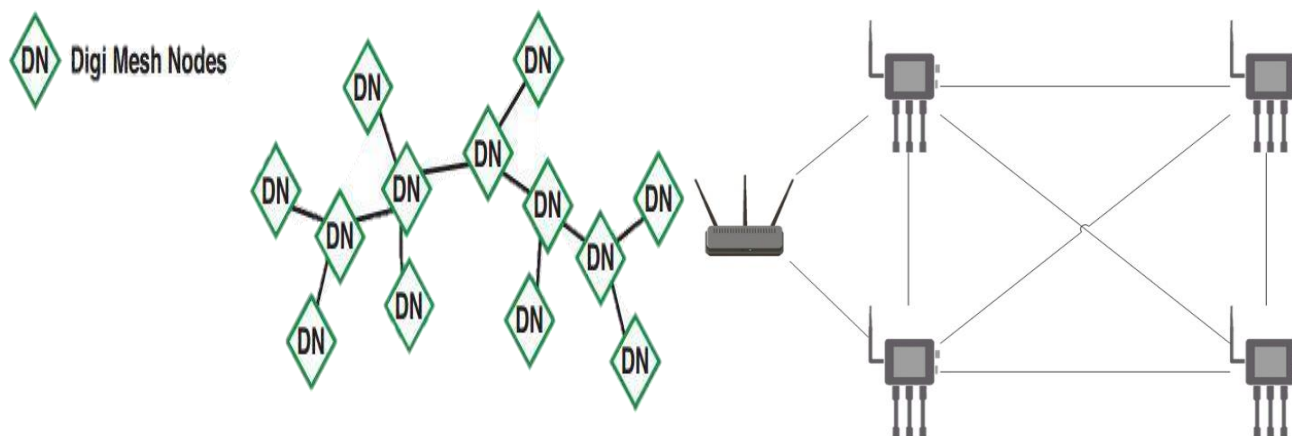
Το **DigiMesh** αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει τις ανάγκες μιας ευρείας κατηγορίας εφαρμογών ασύρματης δικτύωσης, δημιουργώντας μια ισχυρή δικτύωση τοπολογίας πλέγματος. Η τοπολογία πλέγματος δίνει τη δυνατότητα για αποστολή δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις καθώς οι κόμβοι στέλνουν τα δεδομένα ο ένας στον άλλο μέχρι αυτά να καταλήξουν στο Gateway. Έτσι, ανεξάρτητα από το μέγεθος του πάρκου στο οποίο θα τοποθετείται το ΑΔΑ, τα δεδομένα θα μπορούν να φτάσουν στο Gateway χωρίς περιορισμούς. Επίσης, το Digimesh είναι ένα ενεργειακά βελτιστοποιημένο πρότυπο που χρησιμοποιεί τους κόμβους μόνο ως δρομολογητές (Routers) οι οποίοι υποστηρίζουν κατάσταση αναμονής (sleep mode) μειώνοντας έτσι την ενεργειακή κατανάλωση.

Η χρήση των κόμβων μόνο ως δρομολογητές συνεπάγεται μεγαλύτερη αυτονομία δικτύου καθώς δεν υπάρχει διαχειριστής δικτύου (Coordinator) και το συγχρονισμό πραγματοποιεί ένας δρομολογητής με διαδικασία “επιλογής”. Η ευκολία στη χρήση και η δικτύωση γίνεται εύκολα. Δεδομένου ότι όλοι οι κόμβοι είναι ίσοι, η αφαίρεση κάποιου κόμβου δε δημιουργεί σοβαρό πρόβλημα στη λειτουργία του δικτύου καθώς τα δεδομένα απλά αναδρομολογούνται σε άλλον κόμβο. Αντίστοιχα, και η προσθήκη ενός νέου κόμβου είναι αρκετά πιο εύκολη. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι απαραίτητα καθώς η προσθήκη νέων ή αφαίρεση υπαρχόντων κόμβων είναι πολύ πιθανή σε ένα φωτοβολταϊκό πάρκο.

Η **ασφάλεια** ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις καθώς τα μηνύματα θα κρυπτογραφούνται ενώ μια διαδικασία ταυτοποίησης αποτρέπει μη εξουσιοδοτημένους χρήστες να στέλνουν ή να παραλαμβάνουν μηνύματα του δικτύου. Η αξιοπιστία αποστολής των μηνυμάτων φτάνει μέχρι και το 99.99% . Τέλος, το σύστημα θα υποστηρίζει μεγάλου μεγέθους πακέτα δεδομένων με υποστήριξη κατακερματισμού μηνυμάτων.

Ένα mesh δίκτυο. Όλοι οι κόμβοι είναι ίσοι:

Τοπολογία Πλέγματος:

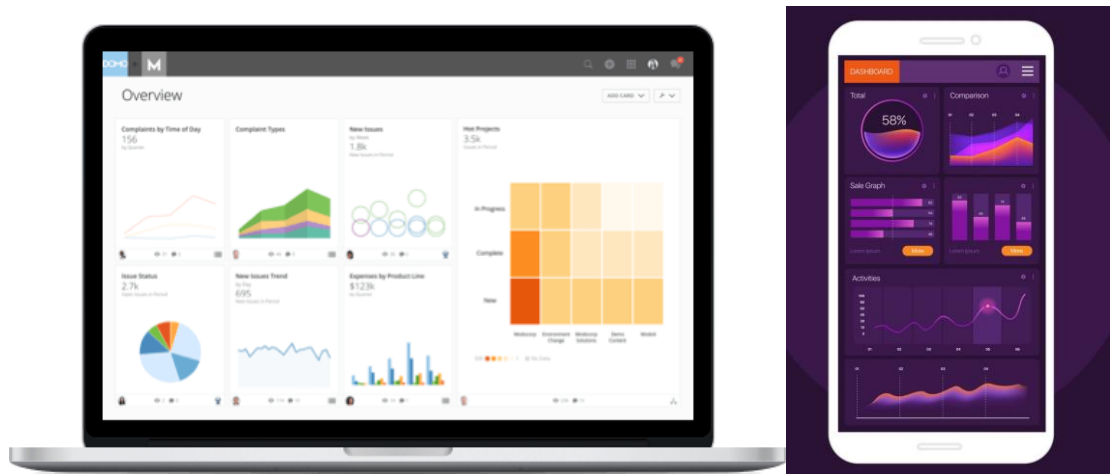


3. Πλατφόρμα διαχείρισης δεδομένων

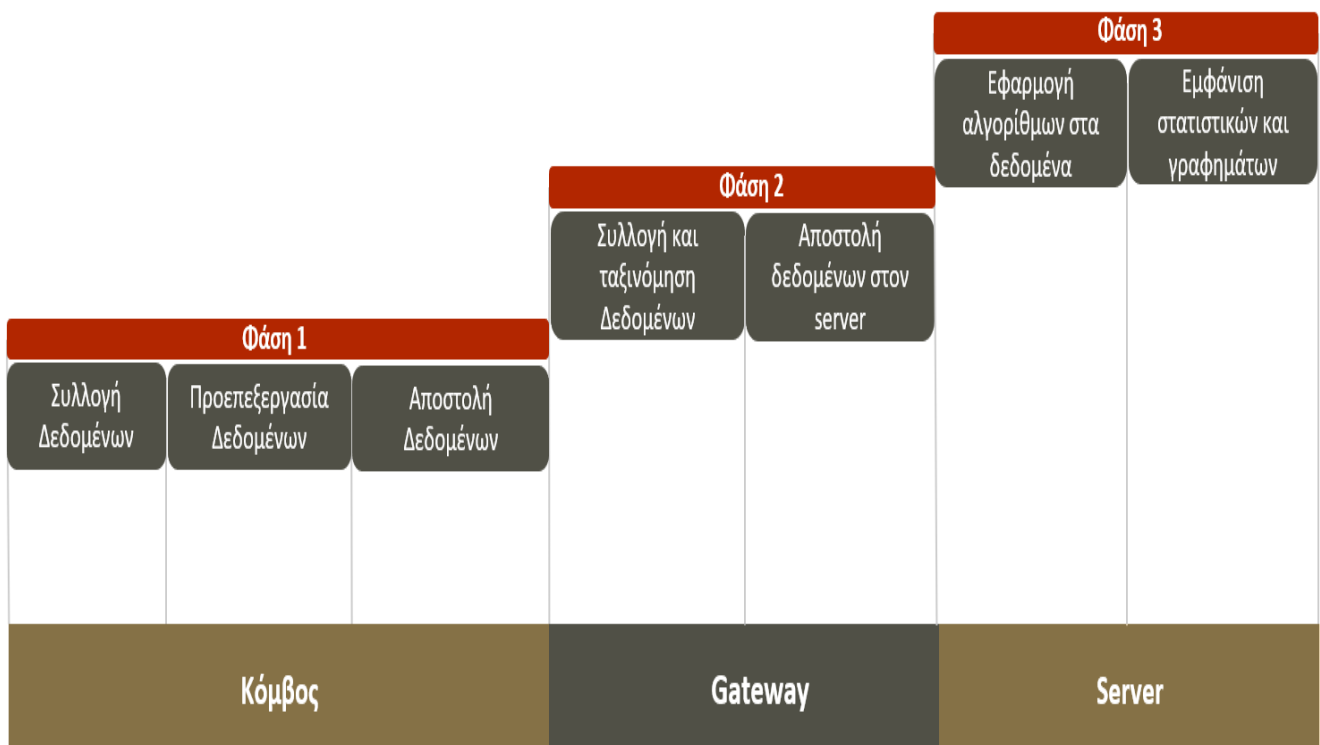
Τα δεδομένα που θα συλλέγονται από τους αισθητήρες, θα καταλήγουν στην πλατφόρμα διαχείρισης δεδομένων όπου θα δέχονται την κατάλληλη επεξεργασία και ανάλυση. Ο χρήστης, έπειτα, μέσω μιας διεπαφής (**interface**) θα έχει τη δυνατότητα να παρατηρήσει την κατάσταση του πάρκου και να επέμβει αν αυτό κρίνεται απαραίτητο. Όπως και τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος, η πλατφόρμα αποτελείται από μια σειρά στοιχείων τα οποία πρέπει να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούν τις ανάγκες του συστήματος.

Καταρχήν, θα γίνει χρήση τεχνολογιών **cloud** για την υλοποίηση της πλατφόρμας, καθώς μπορούν να επιφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι η επεκτασιμότητα αφού η προσθήκη επιπλέον πόρων δεν απαιτεί προσθήκη νέου υλικού. Επίσης, η συλλογή δεδομένων διευκολύνεται χρησιμοποιώντας μια ενιαία cloud πλατφόρμα. Ένα από τα καθήκοντα της πλατφόρμας είναι η σωστή διαχείριση των δεδομένων που θα προέρχονται από τους αισθητήρες, η οργάνωσή τους και εξαγωγή συμπερασμάτων για την κατάσταση των πάνελ και κατ' επέκταση του πάρκου. Για να γίνουν σωστά οι παραπάνω διαδικασίες, κατάλληλοι αλγόριθμοι θα αναλύουν τα δεδομένα και θα καλούν διαδικασίες για την ειδοποίηση του χρήστη.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης θα παρουσιάζονται σε web εφαρμογή η οποία θα είναι φιλική προς τον χρήστη και θα του παρέχει πληροφορίες σε μορφή γραφημάτων, πινάκων κ.α. Η εφαρμογή θα είναι σχεδιασμένη ώστε να είναι εξίσου λειτουργική και προσβάσιμη από πληθώρα ηλεκτρονικών συσκευών (πχ. προσωπικός Η/Υ, smartphone κ.α.), ενώ η πρόσβαση σε αυτή θα γίνεται έπειτα από μια κατάλληλη διαδικασία ταυτοποίησης. Επίσης, τα δεδομένα του κάθε χρήστη θα παραμένουν ασφαλή, καθώς θα χρησιμοποιηθεί κάποιας μορφής κρυπτογράφηση. Τέλος, η πλατφόρμα θα είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο ώστε να δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να έχει πρόσβαση στις πληροφορίες σε ζωντανό χρόνο.



Η πορεία των δεδομένων από τους κόμβους ως τον server :



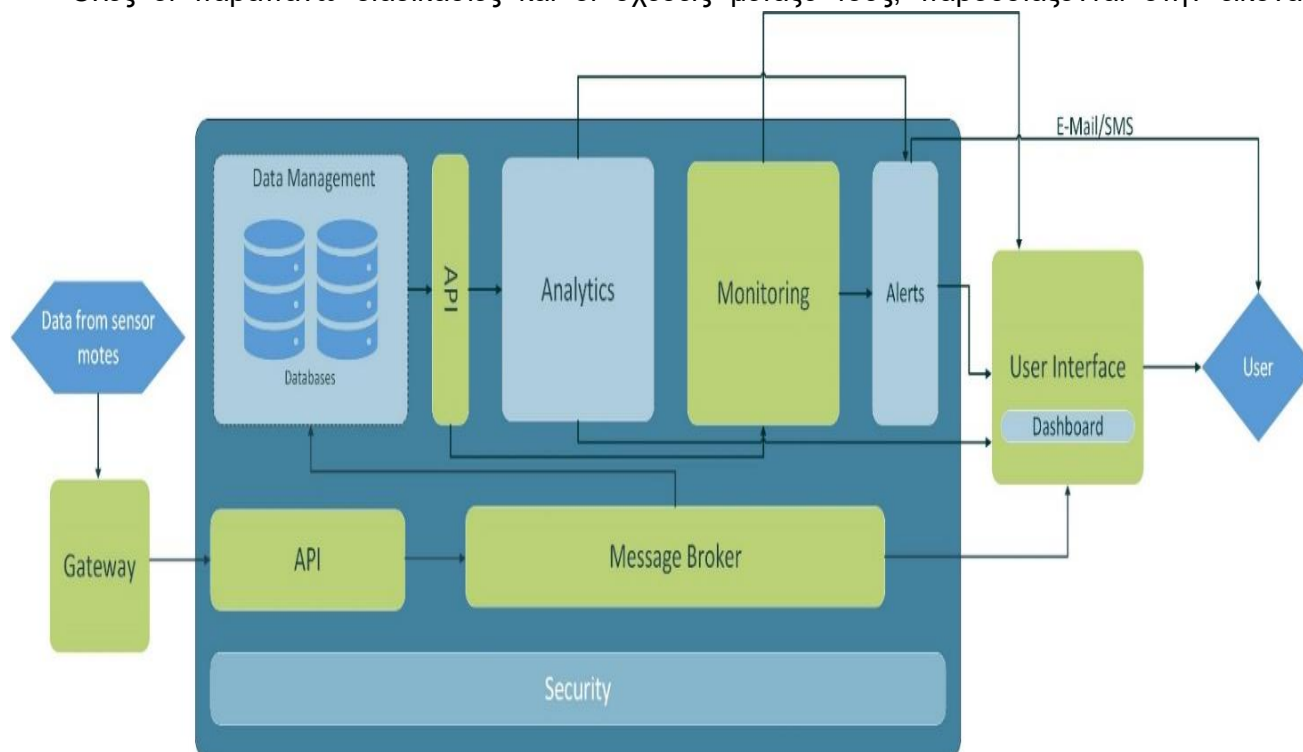
Τα δεδομένα αφού συλλεχθούν στο Gateway θα περνάνε από μια διαδικασία κατά την οποία θα λαμβάνουν κατάλληλη μορφή έτσι ώστε να μπορούν να αποθηκευτούν με ευκολία. Στη συνέχεια, θα δημοσιεύονται σε **topics του message broker** ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη διαμοίραση των δεδομένων που γίνονται εγγραφή σε ένα topic του, στα τμήματα του συστήματος τα οποία είναι εγγεγραμμένα στο topic αυτό.

Το βασικό στοιχείο του συστήματος που πρέπει να είναι εγγεγραμμένο είναι η βάση δεδομένων η οποία θα βρίσκεται στο server. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές βάσεις δεδομένων (πχ MySQL, MongoDB, MariaDB κτλ.) καθεμιά από τις οποίες έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Στο **server** μαζί με τη βάση δεδομένων θα υλοποιηθούν και οι Διεπαφές Προγραμματισμού Εφαρμογών, ευρύτερα γνωστές με τον όρο **APIs (Application Programming Interfaces)**. Τα APIs είναι απλά προγράμματα τα οποία δίνουν τη δυνατότητα σε κάποιον χρήστη που έχει λάβει την κατάλληλη εξουσιοδότηση να έχει πρόσβαση στα δεδομένα μιας βάσης δεδομένων του server, εκτελώντας απλά αιτήματα (http requests). Τα APIs στην προκειμένη περίπτωση θα είναι υπεύθυνα ώστε να παρέχουν τα δεδομένα της βάσης είτε απ' ευθείας στην εφαρμογή χρήστη είτε στους αλγορίθμους οι οποίοι θα "τρέχουν" στο server και οποίοι θα είναι υπεύθυνοι για την επεξεργασία των δεδομένων και την εξαγωγή στατιστικών και συμπερασμάτων με βάση αυτά (**Analytics**).

Το τελευταίο στάδιο είναι η εμφάνιση των απλών δεδομένων ή αυτών που θα προέρχονται από κάποια επεξεργασία, στην **web** εφαρμογή στην οποία θα έχει πρόσβαση ο χρήστης. Τα δεδομένα θα προέρχονται από τα APIs. Μέσω της εφαρμογής ο χρήστης θα έχει μια συνολική εικόνα για την κατάσταση του πάρκου, καθώς θα του παρέχει στατιστικά για την κατάσταση των πάνελ, γραφήματα και οποιαδήποτε άλλη πληροφορία κριθεί χρήσιμη (**Monitoring**). Επίσης, θα του δίνεται η δυνατότητα να προσαρμόσει τα δεδομένα προς προβολή θέτοντας παραμέτρους όπως το χρονικό διάστημα ή το Φ/Β πάνελ που επιθυμεί. Επίσης, θα εφαρμόζονται λειτουργίες για την ειδοποίηση του χρήστη μέσω E-mail/SMS σε περίπτωση που κάποια από τις παραμέτρους παρουσιάζει σημαντική απόκλιση από το φυσιολογικό (**Alerts**).

Όλες οι παραπάνω διαδικασίες και οι σχέσεις μεταξύ τους, παρουσιάζονται στην εικόνα:



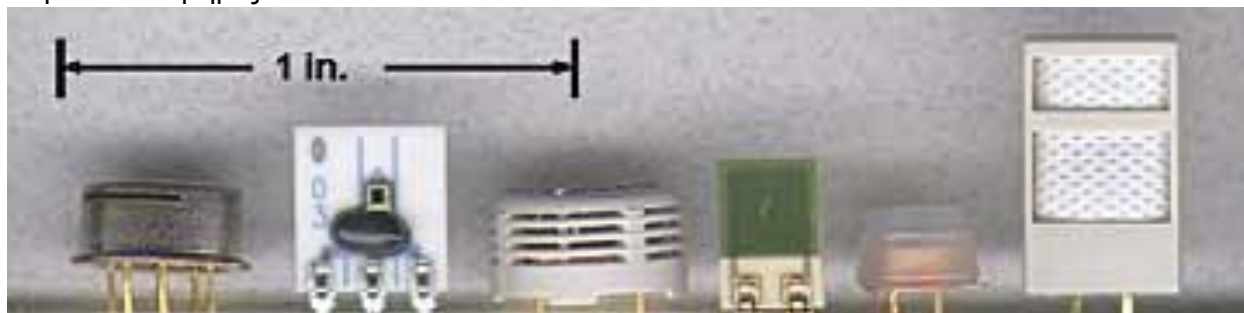
4. Προδιαγραφές κόμβου ΑΔΑ

Η ανάπτυξη ενός συστήματος απομακρυσμένου ελέγχου των Φ/Β πλαισίων αποτελεί ένα βασικό κομμάτι του ΠΠΣ. Κάθε Φ/Β πλαίσιο θα έχει το μέγιστο δυνατό αριθμό αισθητήρων για τη συγκέντρωση της μέγιστης δυνατής πληροφορίας.

Δεδομένης της δομής των Φ/Β πλαισίων θα τοποθετηθούν τουλάχιστον **60 αισθητήρες** θερμοκρασίας ανά πλαίσιο (ένας αισθητήρας θερμοκρασίας ανά Φ/Β κύτταρο(Shell)). Θα μετριέται επίσης η τάση ανά 20 κύτταρα. Σε κάθε πλαίσιο θα τοποθετηθούν:

1. 1 αισθητήρας ακτινοβολίας (πυρανόμετρο)
2. 1 αισθητήρας υγρασίας (χωρητικός αισθητήρας υγρασίας)
3. 1 αισθητήρας θερμοκρασίας περιβάλλοντος (ταυτόχρονη μέτρηση από τον αισθητήρα υγρασίας)
4. 85 αισθητήρες θερμοκρασίας στην πίσω πλευρά του πλαισίου (θερμίστορ)
5. 3 αισθητήρες τάσης
6. και 1 αισθητήρας ρεύματος

Μερικοί αισθητήρες:

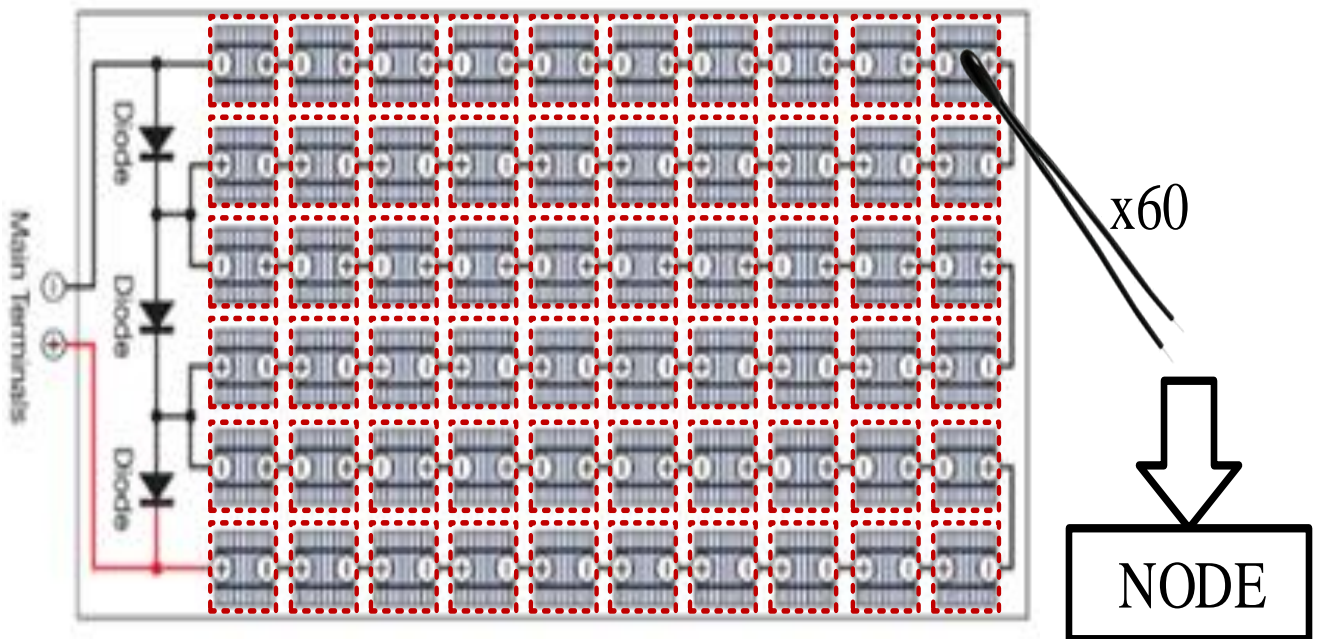


Οι προαναφερθέντες αισθητήρες θα συνδέονται στη μετρητική διάταξη και μέσω κατάλληλα σχεδιασμένων κυκλωμάτων προσαρμογής, οι φυσικές και ηλεκτρικές παράμετροι του συστήματος θα μετατρέπονται σε αναλογικά σήματα για τη μετέπειτα συλλογή και μετατροπή τους σε ψηφιακά μέσω του μικροελεγκτή. Δεδομένου του πολύ μεγάλου πλήθους των αισθητήρων θερμοκρασίας θα πρέπει να τοποθετηθούν περισσότερες από μια μετρητικές διατάξεις.

Ο μικροελεγκτής αποτελεί βασικό στοιχείο της μετρητικής διάταξης καθώς είναι υπεύθυνος για τη συλλογή των δεδομένων και την επικοινωνία με το υπόλοιπο σύστημα, είτε αυτό αφορά τις επιπλέον διατάξεις ανά Φ/Β πλαίσιο (αντιμετώπισης φαινομένου PID) είτε την κεντρική βάση. Με την ενσωμάτωση της συλλογής και της μετάδοσης των δεδομένων σε ένα ολοκληρωμένο επιτυγχάνεται η υλοποίηση των κόμβων του ΑΔΑ στις υπάρχουσες μετρητικές διατάξεις. Κατ' επέκταση θα τοποθετηθεί μια κεραία ανά Φ/Β πλαίσιο για την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων και της κεντρικής βάσης. Η τοποθέτηση της κεραίας θα γίνει στην πλευρά του Φ/Β που βρίσκεται πιο ψηλά για να μεγιστοποιηθεί η εμβέλεια της κεραίας και παράλληλα να περιοριστούν οι επιπτώσεις από πιθανή μερική σκίαση του πλαισίου λόγω της κεραίας.

Να σημειωθεί πως, λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας λειτουργίας ενός Φ/Β πλαισίου, τα προς επιλογή στοιχεία της μετρητικής διάταξης θα πρέπει να έχουν αντοχή σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 100°C.

Προτεινόμενη θέση του αισθητήρα θερμορασίας:



Η τοποθέτηση ενός κόμβου σε Φ/Β πάνελ:



5. Αντιμετώπιση φαινομένου PID

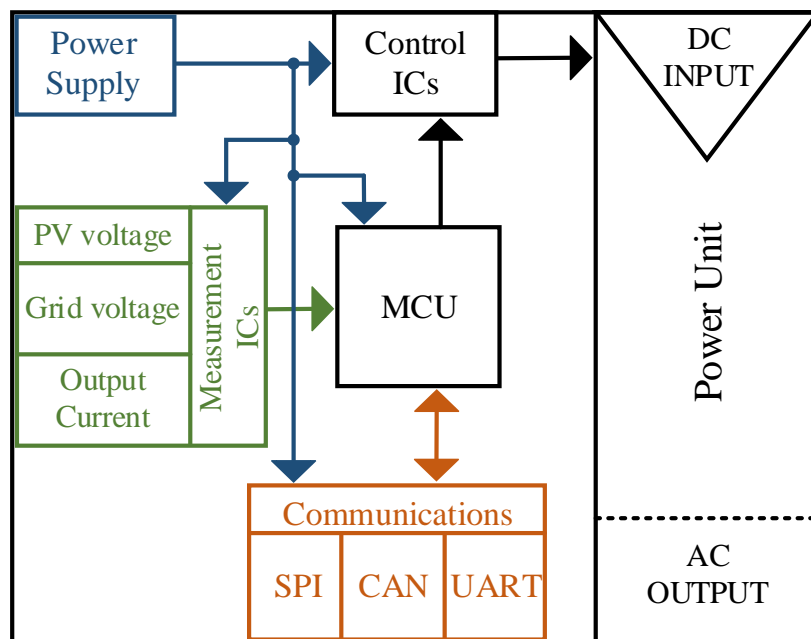
Στα πλαίσια της αναζωογόνησης των Φ/Β πλαισίων θα συμβάλλει ένας μετατροπέας εναλασσόμενης τάσης σε συνεχή (AC-DC). Σκοπός είναι ο εξαναγκασμός της ροής ηλεκτρονίων δια μέσου του πλαισίου στήριξης και των Φ/Β κυττάρων, με εφαρμογή συνεχούς τάσης κατάλληλης πολικότητας, ώστε να δημιουργηθούν συνθήκες που να αντιτίθενται στο φαινόμενο που προκάλεσε το φαινόμενο Potential Induced Degradation – PID. Η τιμή της τάσης πρέπει να είναι μεγάλη για αποτελεσματικότερη αναζωογόνηση, αλλά μικρότερη από τη μέγιστη τάση αντοχής του κεντρικού αντιστροφέα, στον οποίο είναι συνδεδεμένες οι συστοιχίες Φ/Β πλαισίων. Ο μετατροπέας θα έχει στόχο την υποστήριξη ενός εύρους τάσης στην έξοδο, ούτως ώστε να εξυπηρετεί διαφορετικές Φ/Β στοιχειοσειρές και αντιστροφείς.

6. Προδιαγραφές μικρο-αντιστροφέα

Οι απαιτήσεις και οι προδιαγραφές του μετατροπέα, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλασσόμενη (αντιστροφέας), καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών.

Η χρήση ενός μικρο-αντιστροφέα (microinverter) με γαλβανική απομόνωση, είναι μια καλή επιλογή λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει. Μερικά πλεονεκτήματα είναι η μέγιστη απομάστευση ισχύος από όλο το φωτοβολταϊκό πάρκο, καθώς σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο εγκαθίσταται και ένας μικρο-αντιστροφέας, και ο μηδενισμός των ρευμάτων διαρροής των φωτοβολταϊκών πλαισίων προς γη, αφού η ύπαρξη γαλβανικής απομόνωσης επιτρέπει τη γείωση του αρνητικού (ή του θετικού ακροδέκτη) του πλαισίου. Η παράλληλη λειτουργία του μετατροπέα ως ένας ανεξάρτητος κόμβος του ΑΔΑ θα ενισχύσει την αξιοπιστία του συστήματος, προσφέροντας επιπλέον στοιχεία στο διαχειριστή του συστήματος.

Δομικό διάγραμμα μικρο-αντιστροφέα ως ανεξάρτητος κόμβος του ΑΔΑ:



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] CompleteSolar (2013, September 17). Micro Inverters vs. String Inverters. <http://completesolar.com/micro-inverters-vs-string-inverters>
- [2] The Inverter Pocket Guide. (2018, August). EcoGeneration. <http://www.ecogeneration.com.au/wp-content/uploads/2018/08/Inverter-Pocket-Guide-201808.pdf>
- [3] Schwartz, J. (2017, May/June). High-Power c-Si PV Module Specifications (2017). Solar Professional. <https://solarprofessional.com/products-equipment/modules>, (https://solarprofessional.com/sites/default/files/articles/ajax/docs/SolarPro_10_3_pg_46_Schwartz.pdf)
- [4] Minnaert, Ben. (2008). Thin film solar cells: an overview. Ghent University researchers. doi: 1854/LU-4238935
- [5] Fraunhofer Institoute, Solar Energy Systems, ISE. (2018, August 27). Photovoltaics Report [Press release]. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
- [6] European Commission JRC Technical Reports, Market data and trends. (2018, June). Preparatory study for solar photovoltaic modules, inverters and systems [Press release]. http://susproc.jrc.ec.europa.eu/solar_photovoltaics/docs/180611_PV_Prep_study_Task_2_Consultation_final.pdf
- [7] Schwartz, J. (2017, January/February). 2017 Single and 3-Phase String Inverter Specifications. Solar Professional, 10(1), 27-42. <https://solarprofessional.com/articles/products-equipment/inverters/2017-single-and-3-phase-string-inverter-specifications#.XAj2B9v7SMQ>
- [8] SolarProfessional Staff. (2018, July/August). 2018 Single-Phase String Inverter Specifications. Solar Professional, 11(4), 47-49. <https://solarprofessional.com/articles/products-equipment/inverters/2018-single-phase-string-inverter-specifications#.XAj1Jdv7SMQ>
- [9] SolarProfessional Staff. (2018, September/October). 2018 3-Phase String Inverter Specifications. Solar Professional, 11(5), 43-45. <https://solarprofessional.com/articles/products-equipment/inverters/2018-3-phase-string-inverter-specifications#.XAjzZNv7SMQ>
- [10] SMA Duennschicht-TI-UGR114630 | Έκδοση 3.0 Technical information (PID)
- [11] R. M. Swanson et al., “The surface polarization effect in high-efficiency silicon solar cells,” 15th Asian PVSEC, pp. 410–411, 2005.
- [12] T. P. Mouselinos, E. C. Tatakis, “Multilevel Inverters: A survey of limitations and recommended problem-solving techniques”, 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2019), 2-6 Sept. 2019. (accepted for publication)