

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ (IoT) ΣΕ ΕΞΥΠΝΑ ΔΙΚΤΥΑ

Χ. Ζιώγου^{1*}, Σ. Παπαδοπούλου², Σ. Βουτετάκης¹

¹Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων, Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ)

²Τμήμα Μηχανικών Αυτοματισμού, Αλεξάνδρειο ΤΕΙ Θεσσαλονίκης

(*czioqou@cperi.certh.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία περιγράφει την ανάπτυξη ενός ευέλικτου μηχανισμού διαχείρισης της απόκρισης στη ζήτηση ενέργειας (Demand Response - DR) που υλοποιείται με τη χρήση ενός αρχιτεκτονικού μοντέλου αναφοράς για το Διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things - IoT). Η διαχείριση της ενέργειας βασίζεται σε μια προσέγγιση βέλτιστης εξισορρόπησης φορτίου με προτεραιότητες που ενημερώνονται δυναμικά με βάση την κατάσταση του κάθε κόμβου και την διαχείριση των φορτίων του. Οι κανόνες λειτουργίας περιγράφονται από προτασιακή λογική και η εφαρμογή τους πραγματοποιείται σε τοπικούς διαχειριστές (aggregators) που αλληλεπιδρούν με ένα σύνολο συνδεδεμένων κόμβων (καταναλωτές). Τα βασικά οφέλη που προκύπτουν είναι ο έλεγχος των τελικών καταναλώσεων και η μείωση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας για τους τελικούς καταναλωτές με διατήρηση του επιθυμητού επιπέδου άνεσης.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

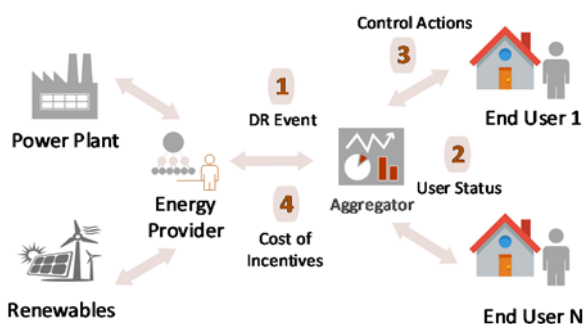
Η συνεχόμενη αύξηση της ζήτησης ενέργειας σε συνδυασμό με τη μείωση της διαθεσιμότητας των συμβατικών καυσίμων, την διακύμανση των τιμών των καυσίμων και το θέμα της κλιματικής αλλαγής, απαιτούν την δημιουργία έξυπνων δικτύων που να μπορούν να εξισορροπήσουν την παραγωγή σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας. Η Διαχείριση της Ζήτησης (Demand Side Management - DSM) αποτελεί μία από τις μεθόδους που συμβάλουν σε αυτή την εξισορρόπηση καθώς μπορεί να μεταβάλλει το φορτίο του καταναλωτή και να μειώσει το συνολικό κόστος της ενέργειας για τους συμμετέχοντες [1]. Γενικά στα έξυπνα δίκτυα είναι απαραίτητη η διασυνδεσιμότητα και η συνεχής ενημέρωση μεταξύ των εμπλεκόμενων για την κατάσταση της παραγωγής και της ζήτησης. Το Διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things - IoT) μπορεί να συμβάλει στην επικοινωνία και μαθηματική μοντελοποίηση της κατάστασης των συμμετεχόντων [2], είτε πρόκειται για τις πληροφορίες που στέλνει η εταιρεία παροχής ενέργειας είτε πρόκειται για τις πληροφορίες που ανταλλάσσουν οι καταναλωτές με έναν τοπικό διαχειριστή (aggregator). Στη συνέχεια παρουσιάζεται γενικά η μέθοδος της διαχείρισης της ζήτησης και η χρήση ενός μοντέλου αναφοράς IoT που περιγράφει την συμπεριφορά του τελικού καταναλωτή. Επιπλέον διαμορφώνεται και επιλύεται ένα πρόβλημα δυναμικής βελτιστοποίησης που στοχεύει στον καθορισμό των βέλτιστων τιμών για τον έλεγχο των συσκευών όταν υπάρχει αίτημα μείωσης της ζήτησης.

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΖΗΤΗΣΗΣ

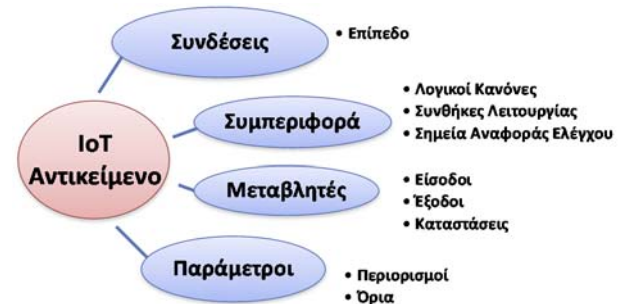
Οι μέθοδοι DSM στηρίζονται σε δύο βασικές επιλογές, στις μεθόδους απόκρισης ζήτησης (Demand Response - DR) και στις μεθόδους που στοχεύουν στην εξοικονόμησης ενέργειας μέσω της αντικατάστασης του εξοπλισμού των καταναλωτών. Η απόκριση ζήτησης (DR) περιλαμβάνει κάθε δραστηριότητα από τη μεριά της ζήτησης, που έχει ως στόχο την αλλαγή των προτύπων της κατανάλωσης ενέργειας των τελικών καταναλωτών, βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα, βελτιώνοντας έτσι την ενεργειακή αποδοτικότητα και βελτιστοποιώντας την χρήση της ηλεκτρικής

ενέργειας [3]. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας είτε μεθόδους που βασίζονται στο κόστος (Price-based DR - PbDR) είτε σε κίνητρα (Incentive-based DR - IbDR). Γενικά οι μέθοδοι DR στοχεύουν στην βέλτιστη χρήση των συσκευών του κάθε κόμβου εξασφαλίζοντας παράλληλα την αξιοπιστία του ηλεκτρικού δικτύου.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η προσέγγιση IbDR. Στόχος της μεθόδου IbDR είναι η συνεργασία των επιχειρήσεων ηλεκτρισμού και των καταναλωτών με σκοπό τη μείωση της ηλεκτρικής ζήτησης σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους αιχμής προς όφελος δικό τους και του συνολικού δικτύου. Τα κίνητρα που δίνονται στον καταναλωτή αφορούν στην επιβράβευση της συμπεριφοράς του με απόκτηση δωρεάν ή σε μειωμένη τιμή μέρους της ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνει. Κατά τη διάρκεια της ημέρας ο διαχειριστής του δικτύου στέλνει αιτήματα μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας (Demand Response Events) που περιγράφονται από τη χρονική διάρκεια μείωσης (t_{DR}) σε λεπτά και την ισχύ που πρέπει να μειωθεί (P_{DR}) σε kW (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Ροή της πληροφορίας



Σχήμα 2. IoT Αντικείμενο – Δομικά στοιχεία

Η διαχείριση των φορτίων γίνεται από έναν τοπικό διαχειριστή που αναλαμβάνει να επικοινωνεί με τους διαχειριστές του δικτύου ενέργειας, τις εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και τους καταναλωτές. Επιπλέον λαμβάνει ειδοποιήσεις σχετικά με αιτήματα απόκρισης ζήτησης που πρέπει να εφαρμόσει και ενημερώνει για το κόστος της επιβράβευσης που δικαιούνται οι τελικοί χρήστες λόγω της συμμετοχής τους στο πρόγραμμα DR. Τέλος με βάση καθορισμένους κανόνες για κάθε καταναλωτή ελέγχει τα φορτία του ώστε να πετύχει το επιθυμητό αποτέλεσμα που είναι ο συνδυασμός κόστους και άνεσης.

ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ (IoT)

Η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των καταναλωτών επιλέχθηκε να γίνει με τη χρήση ενός μοντέλου αναφοράς που βασίζεται στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT), με σκοπό την γενικευμένη αναπαράσταση των εμπλεκόμενων καταναλωτών-κόμβων. Στην παρούσα εργασία κάθε κόμβος είναι ένας καταναλωτής. Γενικά το IoT αποτελεί ένα σύνολο στοιχείων που αποτελούν μια ευρύτερη υποδομή, που επιτρέπει την υλοποίηση προηγμένων υπηρεσιών μέσω της διασύνδεσης (φυσικών και εικονικών) πραγμάτων με τη χρήση υφιστάμενων και διαλειτουργικών τεχνολογιών πληροφορικής [2]. Με βάση αυτή την προσέγγιση στοχεύουμε στην ανάπτυξη ενός πλαισίου που λαμβάνει υπόψη τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές και μπορεί να μετατρέψει τα διάφορα επίπεδα λειτουργίας και επικοινωνίας τους σε συμβατή με το IoT αρχιτεκτονική [5]. Η εφαρμογή της προσέγγισης αυτής μπορεί να προσφέρει μια καλύτερη εικόνα και δυνατότητα διαχείρισης των φυσικών συστημάτων και τη διασύνδεσή τους με το κυβερνοχώρο (cyber space). Η χρήση ενός αρχιτεκτονικού μοντέλου που βασίζεται στο IoT διευκολύνει το σχεδιασμό και την ανάπτυξη επεκτάσιμων, ευέλικτων και εύκολα συντηρούμενων συστημάτων για το πεδίο λειτουργιών (operations domain) των έξυπνων δικτύων [4]. Η προτεινόμενη μοντελοποίηση δεν περιορίζεται τεχνικά στην υλοποίηση ενός συγκεκριμένου δικτύου αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Ο κάθε κόμβος (καταναλωτής) σε ένα δίκτυο μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα IoT αντικείμενο (Σχήμα 2).

Ένα δίκτυο ενέργειας αποτελείται από καταναλωτές με διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά, προφίλ κατανάλωσης ενέργειας και λειτουργικές συνθήκες. Συνεπώς ο τοπικός διαχειριστής θα πρέπει να είναι σε θέση να αντιμετωπίσει μεταβαλλόμενους στόχους λειτουργίας, που επηρεάζουν το σύνολο των συνδεδεμένων καταναλωτών. Η διασύνδεση των επιμέρους κόμβων και η τοπολογία γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να επεκταθεί ανάλογα με το εκάστοτε δίκτυο. Προτείνεται η συστηματική αξιοποίηση των λειτουργικών και ενεργειακών παραμέτρων που μεταβάλλονται για όλους τους διασυνδεδεμένους κόμβους, με σκοπό τη βέλτιστη, δυναμική προσαρμογή των στόχων λειτουργίας του δικτύου. Κάθε καταναλωτής έχει ένα σύνολο συσκευών που επιτρέπει να ελέγχονται σε περίπτωση αιτήματος μείωσης της κατανάλωσης (Air condition – AirC, θερμοσίφωνα - WH, Πλυντήριο πιάτων - DW, Πλυντήριο/Στεγνωτήριο ρούχων - CD). Επιπλέον κάθε καταναλωτής ορίζει τα επιθυμητά όρια για τη θερμοκρασία του χώρου και του ζεστού νερού καθώς και τις επιθυμητές προτεραιότητες για τη σειρά με την οποία θα ελεγχθούν οι συσκευές του. Γενικά η περιγραφή των συνδεδεμένων κόμβων-καταναλωτών αφορά [5]:

- Τη δομή, που καθορίζει τη σύνδεση των επιμέρους κόμβων με τον τοπικό διαχειριστή.
- Τα συστατικά, που καθορίζουν τις δομικές, λειτουργικές παραμέτρους-μεταβλητές και τις συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων.
- Τα όρια που καθορίζουν το πεδίο εφαρμογής των ενεργειών και διαφοροποιούν τόσο τις παραμέτρους για ένα σύστημα όσο και τα συστήματα μεταξύ τους.
- Τη συμπεριφορά, που εμπεριέχει την έννοια της ενεργοποιημένης ή όχι κατάστασης καθώς και την εκτέλεση ενεργειών.

Ένα δίκτυο μπορεί να αναπαρασταθεί ως σύστημα και ορίζεται ως ένα σύνολο $Sys = \{Un_1, Un_2, \dots, Un_n\}$ το οποίο αποτελείται από επιμέρους αυτόνομες μονάδες. Μία μονάδα ορίζεται ως το σύνολο $Un_i = \{St_i, Mt_i, \delta_i\}$ όπου St οι στατικές παράμετροι και Mt οι χρονικά μεταβαλλόμενες παράμετροι. Η τροποποίηση των μεταβαλλόμενων παραμέτρων συσχετίζεται με λογικές μεταβλητές (δ_i). Τα δομικά στοιχεία του κάθε καταναλωτή-μονάδας που είναι διαθέσιμα στο επίπεδο του δικτύου προς διαχείριση είναι:

- Σύνολο των στατικών σταθερών παραμέτρων $St_{const} = \{Eff, L_R, P_{App,RATED}\}$, Eff είναι η επίδραση που έχει η χρήση της συσκευής στη μεταβολή της θερμοκρασίας στον χώρο, L_R είναι ο συντελεστής απωλειών και ορίζονται για το κλιματιστικό και τον θερμοσίφωνα του κάθε καταναλωτή και $P_{App,RATED}$ είναι η ονομαστική ισχύς των ελεγχόμενων φορτίων.
- Σύνολο των στατικών παραμέτρων που μπορούν να τροποποιηθούν $St_{mod} = \{T_0, T_{high}, T_{low}\}$ που είναι η αρχική θερμοκρασία, το μέγιστο και ελάχιστο επιθυμητό όριο της και ορίζονται για το κλιματιστικό και τον θερμοσίφωνα του κάθε καταναλωτή.
- Το σύνολο των μεταβλητών του συστήματος $Mt = \{T_R, T_{amb}, P_{crit}\}$, που είναι η θερμοκρασία του χώρου και η θερμοκρασία περιβάλλοντος αντίστοιχα και ορίζονται για το κλιματιστικό και τον θερμοσίφωνα του κάθε καταναλωτή και P_{crit} που είναι η ισχύς των κρίσιμων-μη ελεγχόμενων φορτίων.
- Οι λογικές μεταβλητές (ΛΜ) που συσχετίζονται με τις στατικές παραμέτρους που μπορούν να μεταβληθούν: δ_{App} , δ_{DR} , δ_{com} , είναι η κατάσταση των συσκευών, η ενεργοποίηση τους μέσω DR και η επιλογή του καταναλωτή για έλεγχο των συσκευών του.

Σύμφωνα με την παραπάνω προσέγγιση μπορούν να αναπαρασταθούν οι επιλογές των καταναλωτών που συμμετέχουν στο πρόγραμμα DR.

ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΠΙΒΡΑΒΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΕΣΗΣ

Η εφαρμογή της μεθόδου IbDR προϋποθέτει τον υπολογισμό των δεικτών επιβράβευσης και άνεσης του καταναλωτή. Το επίπεδο της επιβράβευσης είναι ο συνδυασμός των προτιμήσεων του καταναλωτή και του δείκτη άνεσης, που υπολογίζεται δυναμικά κατά τη διάρκεια της ημέρας

ανάλογα με τη χρήση των συσκευών του. Πιο συγκεκριμένα ο υπολογισμός του κινήτρου (In) για κάθε χρονικό διάστημα (t) υπολογίζεται σύμφωνα με:

$$In_{i,t} = \left(P_{tot,i,t} - \left(P_{crit,i,t} + \sum_j P_{App,RATED,i,j} \delta_{App,i,j,t} \delta_{DR,i,j,t} \right) \right) In_{L,i,t}, j = [AirC, WH, DW, CD], i = [1..N_{res}] \quad (1)$$

$$In_{L,i,t} = \begin{cases} L_1, CPI_{i,t} > CI_{nom,i} \\ L_2, (CPI_{i,t} \leq CI_{nom,i}) \delta_{com} \\ L_3, (CPI_{i,t} \leq CI_{nom,i})! \delta_{com} \end{cases} \quad (2)$$

$$CPI_{i,t} = \sum_k w_{CI,k} CI_k + w_{CI,i} \sum_j \delta_{App,i,j,t}, k = [AirC, WH], j = [AirC, WH, DW, CD], i = [1..N_{res}] \quad (3)$$

$$CI_k = \left| \frac{2T_{R,k} - T_{high,k} - T_{low,k}}{T_{low,k} - T_{high,k}} \right|, k = [AirC, WH] \quad (4)$$

$$T_{R,k} = T_{0,k} - L_{R,k} (T_{0,k} - T_{amb,k}) - Eff_k P_{App,RATED,k} \delta_{App,k}, k = [AirC, WH] \quad (5)$$

Όπου N_{res} είναι το πλήθος των καταναλωτών που συνδέονται στον τοπικό διαχειριστή, CPI , CI , CI_{nom} και w_{CIk} είναι ο συνολικός δείκτης άνεσης, ο δείκτης άνεσης ανά συσκευή, ο τυπικός δείκτης άνεσης ανά καταναλωτή και η βαρύτητα που έχει η κάθε συσκευή στον συνολικό δείκτη άνεσης για κάθε καταναλωτή αντίστοιχα. Οι εξισώσεις (1-5) αποτελούν μέρος της αποτίμησης της συμπεριφοράς του κάθε κόμβου και είναι από τα βασικά συστατικά του IoT αντικειμένου. Αφού έχει γίνει η μοντελοποίηση και έχει καθοριστεί η συμπεριφορά του κάθε καταναλωτή, είναι απαραίτητη η εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης στον τοπικό διαχειριστή ώστε σε κάθε αίτημα DR να αποκρίνεται με το βέλτιστο τρόπο.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ

Ο τοπικός διαχειριστής υλοποιεί μια στρατηγική διαχείρισης ενέργειας (ΣΔΕ) των καταναλώσεων που βασίζεται στην επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, συνδυάζοντας τις απαιτήσεις για μείωση του κόστους της καταναλισκόμενης ενέργειας και τη βελτίωση της αξιόπιστης λειτουργίας του δικτύου. Επιπλέον επιτυγχάνει τον περιορισμό/εξομάλυνση των αιχμών ζήτησης και τη μετάθεση χρονικά των φορτίων. Για τον σκοπό αυτό επιλύεται το παρακάτω πρόβλημα βελτιστοποίησης που έχει δύο στόχους α) τη μείωση του κόστους επιβράβευσης για την εταιρία παροχής ενέργειας και β) τη διατήρηση της άνεσης των καταναλωτών σε συγκεκριμένα επίπεδα.

$$J = \min \left\{ w_{In} \sum_i^{N_{res}} In_{i,t} + w_{CPI} \sum_i^{N_{res}} \Delta CPI_{i,t} \right\} \quad (6)$$

$$s.t.: \left(P_{tot,i,t} - \left(P_{crit,i,t} + \sum_j P_{App,RATED,i,j} \delta_{App,i,j,t} \delta_{DR,i,j,t} \right) \right) > P_{DR}, j = [AirC, WH, DW, CD]$$

Όπου P_{DR} είναι η ισχύς που πρέπει να μειωθεί κατά τη χρονική διάρκεια ενός γεγονότος απόκρισης ζήτησης. Το παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται για το χρονικό διάστημα που έχει καθοριστεί για τους εμπλεκόμενους καταναλωτές όταν ο τοπικός διαχειριστής λαμβάνει ένα αίτημα για προσαρμογή του φορτίου.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

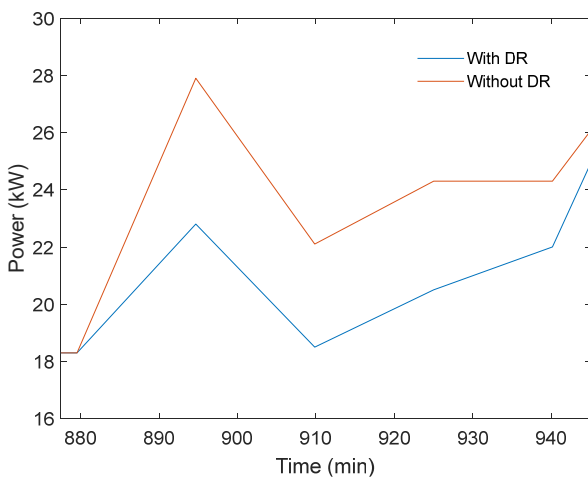
Για να διερευνηθεί η λειτουργία της μεθόδου IbDR επιλέχθηκε ένας τοπικός διαχειριστής με 5 συνδεδεμένους καταναλωτές που έχουν όλοι τις ίδιες συσκευές. Ο χρόνος δειγματοληψίας είναι 15min για την ανταλλαγή δεδομένων από τον καταναλωτή στον τοπικό διαχειριστή. Τα τρία επίπεδα ($L1$, $L2$, $L3$) του δείκτη κινήτρων (In_L) αντιστοιχούν στο κόστος που έχει 1kWh, 2kWh και 3kWh αντίστοιχα. Επομένως κάθε φορά που ένας καταναλωτής συμμετέχει στο πρόγραμμα IbDR

θα αμείβεται ανάλογα. Στο υπό μελέτη σύστημα, ο μέσος όρος κατανάλωσης των 5 συμμετεχόντων είναι 35.7kW. Οι καταναλώσεις των κρίσιμων φορτίων έχουν μια διακύμανση +/- 15% κατά τη διάρκεια της ημέρας και κυμαίνονται από 1.1kW έως 1.8kW. Οι συσκευές CD και DW λειτουργούν 2 φορές την ημέρα για 2ώρες τη φορά. Ο δείκτης συμμετοχής στο πρόγραμμα DR (DR_{hist}) είναι απαραίτητος ώστε εάν 2 καταναλωτές έχουν τον ίδιο δείκτη απόδοσης να δοθεί η δυνατότητα σε αυτόν με τον χαμηλότερο δείκτη να συμμετάσχει ώστε να είναι δικαιότερη η συμμετοχή. Ο δείκτης αυτός επηρεάζει τα βάρη στην αντικειμενική συνάρτηση (6). Τα χαρακτηριστικά των καταναλωτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

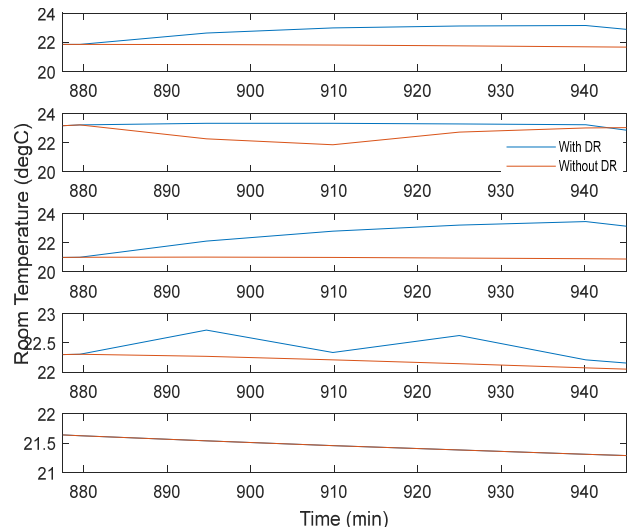
Πίνακας 1. Επιλογές καταναλωτών που συμμετέχουν στο πρόγραμμα IbDR

#N	Trange, AC (°C)	P_{crit} (kW)	P_{AirC} , P_{WH} , P_{DW} , P_{CD} (kW)	$P_{App, Rated}$ (kW)	Priority	DRhist
1	22-24	1.1	1.8, 3.1, 2.5, 3.7	10.4	CD	9
2	21-23	1.3	1.3, 4.0, 1.8, 4.1	10.2	-	7
3	20-24	1.0	1.2, 3.5, 2.0, 3.0	9.7	DW	3
4	20-22.5	1.5	1.5, 3.8, 2.0, 3.5	10.8	CD	5
5	19-22	1.1	1.3, 3.9, 2.2, 3.0	10.4	DW	21

Προκειμένου να διαπιστωθεί η λειτουργία της μεθόδου και η επίδρασή που έχει στην άνεση των καταναλωτών, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από ένα γεγονός αιτήματος απόκρισης. Ο τοπικός διαχειριστής λαμβάνει ένα αίτημα για μείωση 20% των καταναλώσεων για 1ώρα που αντιστοιχεί σε 5.6kW. Στο σχήμα 4 φαίνεται το πώς μειώνεται η κατανάλωση σε σύγκριση με το τι θα ζητούσαν συνολικά οι καταναλωτές χωρίς τη συμμετοχή στους στο πρόγραμμα IbDR.



Σχήμα 4. Καταναλισκόμενη ισχύς με και χωρίς συμμετοχή στο πρόγραμμα IbDR για τους 5 καταναλωτές μαζί



Σχήμα 5. Θερμοκρασία χώρου με και χωρίς συμμετοχή στο πρόγραμμα IbDR (από πάνω προς τα κάτω: Καταναλωτής 1-5)

Πίνακας 2. Αποτελέσματα αιτήματος DR για 20% μείωσης ισχύος

#N	Άνεση (%)	Επίπεδο Κινήτρου	Κόστος Επιβράβευσης (kWh)	Συσκευή που επηρεάστηκε
1	100	L1	4	Κλιματιστικό
2	100	L1	4	Κλιματιστικό
3	100	L1	4	Κλιματιστικό
4	75	L1,L2	5	Κλιματιστικό
5	100	L1	4	-

Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο τοπικός διαχειριστής επιλέγει να σταματήσει τη λειτουργία του κλιματιστικού ώστε να εξοικονομηθεί η ζητούμενη ισχύς, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2. Στο Σχήμα 5 βλέπουμε το πώς επηρεάζεται η θερμοκρασία δωματίου κατά τη διάρκεια της ώρας που ισχύει το αίτημα μείωσης. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η άνεση, τα επίπεδα των κινήτρων που δόθηκαν στους καταναλωτές και το κόστος επιβράβευσης. Κάθε κόμβος παραμένει εντός των ζωνών άνεσης που έχει επιλέξει, εκτός από τον 4^ο που για 15min βρίσκεται εκτός γι' αυτό και ανταμείβεται με το επίπεδο L2 του κινήτρου συμμετοχής. Από τους καταναλωτές οι 1-4 συμμετείχαν ενώ ο 5^{ος} δεν χρειάστηκε να ενεργοποιηθεί καθώς καλύφθηκε η μείωση. Ο 5^{ος} καταναλωτής είχε και το μεγαλύτερο πλήθος συμμετοχών σε αιτήματα DR (DR_{hist}), με το μικρότερο βάρος στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Παρ' όλα αυτά και ο 5^{ος} καταναλωτής είχε επιβράβευση, καθώς και μόνο η συμμετοχή τους στο πρόγραμμα IbDR τον ανταμείβει με το μικρότερο επίπεδο (L1). Συνολικά η μείωση της ισχύος ήταν κατά μέσο όρο 23% (6.3kW) ενώ το αίτημα για μείωση ήταν 20%.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία παρουσίασε την επίδραση που έχει η εφαρμογή της μεθόδου απόκρισης ζήτησης με τη χρήση κινήτρων (IbDR) σε ένα μικρό αριθμό καταναλωτών. Η αναπαράσταση της συμπεριφοράς των καταναλωτών έγινε με τη χρήση ενός μοντέλου αναφοράς που βασίζεται στο IoT. Έχοντας ως βασικό στόχο την απόκριση στις απαιτήσεις μείωσης της κατανάλωσης και ταυτόχρονα τη διατήρηση της άνεσης του καταναλωτή αναπτύχθηκε μια μέθοδος που επιτρέπει τη δομική αναπαράσταση και τη χρονικά μεταβαλλόμενη συμπεριφορά των συμμετεχόντων με τη χρήση του IoT. Από την ανάλυση του σεναρίου λειτουργίας προκύπτει ότι η εφαρμογή προγραμμάτων τύπου IbDR μπορεί να αυξήσει τις δυνατότητες για μείωση της ζήτησης, ενώ η εφαρμογή μεθόδων δυναμικής βελτιστοποίησης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη χρήση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «integrated Smart GRID Cross-Functional Solutions for Optimized Synergetic Energy Distribution, Utilization & Storage Technologies - [inteGRIDy]», και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (HORIZON2020) (κωδικός έργου: 731268).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] L. Gelazanskas and K. A. A. Gamage, *Sustain. Cities Soc.*, vol. 11, pp. 22-30, Feb. 2014.
- [2] A. Bassi, M., Bauer, M., Fiedler, T., Kramp, R., van Kranenburg, S., Lange, S., Meissner, (2013), *IoT Architectural Reference Model*, Springer, 1-349
- [3] Q. Hu, F. Li, X. Fang, and L. Bai, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 1, pp. 497-505, Jan. 2018.
- [4] C. Ziogou, S. Voutetakis, S. Papadopoulou. (2016). 23rd IEEE International Conference on Telecommunications (ICT), 28-30 May 2016, Thessaloniki, Greece.
- [5] C. Ziogou, S. Voutetakis, S. Papadopoulou. (2017). *Computer Aided Chemical Engineering*, 40:2473-2478.