

Δίκαιες Χρεώσεις Χρήσεις Δικτύου

Άγγελος Γεώργιος Κουλούρας Mindy Lin Δημήτρης Μπερτσιμάς
Νικόλαος Τριχάκης*

19 Οκτωβρίου 2020

1. Σύνοψη

Στην παρούσα εργασία εξετάζουμε πως μπορεί να επιτευχθεί ένας δίκαιος επιμερισμός κόστους λειτουργίας σε ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Το δίκτυο προσφέρει υπηρεσίες σε διάφορες ομάδες καταναλωτών, οι οποίες έχουν διαφορετικές ανάγκες χρήσης του δικτύου. Η λειτουργία του δικτύου απαιτεί πάγια έξοδα, τα οποία σχετίζονται με τη μέγιστη ισχύ ζήτησης, και μεταβλητά έξοδα, που σχετίζονται με τη συνολική ενέργεια ζήτησης. Το ζητούμενο είναι ένας επιμερισμός του συνολικού κόστους λειτουργίας στις ομάδες καταναλωτών και στους χρήστες τους, ο οποίος να είναι δίκαιος, με την έννοια ότι αντικατοπτρίζει αποκλειστικά το φόρτο και τα επιπρόσθετα έξοδα που αυτοί προκαλούν στο δίκτυο.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται σε ένα θεμελιώδες και γενικό μοντέλο επιμερισμού κόστους της Οικονομικής Θεωρίας, το μοντέλο τιμών 'Shapley'. Το μοντέλο αυτό θεωρείται το κατεξοχήν μοντέλο επιμερισμού κόστους, είναι αξιωματικά αιτιολογημένο, και έχει αποδειχθεί ως το μοναδικό μοντέλο που οδηγεί σε δίκαιο επιμερισμό βάσει του φόρτου που επιφέρει η κάθε ομάδα στο σύνολο. Επιπλέον, παραθέτουμε και μία απλοποιημένη μεθοδολογία που βασίζεται στον αναλογικό επιμερισμό του πάγιου και μεταβλητού κόστους, με κλείδες την ισχύ και την ενέργεια χρέωσης. Ο αναλογικός επιμερισμός προσεγγίζει τον επιμερισμό βάσει του μοντέλου Shapley στις περιπτώσεις στις οποίες οι περίοδοι αιχμής χρήσης όλων των ομάδων είναι προσεγγιστικά οι ίδιοι, οπότε και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης ως δίκαιος επιμερισμός.

Τέλος, μελετούμε πως η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί στο Ελληνικό Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, λαμβάνοντας υπ όψιν τις διαφορετικές ομάδες καταναλωτών, το διαχω-

*MIT Operations Research Center and Sloan School of Management; contact ntrichakis@mit.edu

ρισμό του δικτύου σε πρωτεύον και δευτερεύον, όπως επίσης και την εποχιακή χρήση κάποιων ομάδων.

2. Μοντέλο και Προτεινόμενη Μεθοδολογία

Σε αυτό το μοντέλο εξετάζουμε ένα συγκεκριμένο δίκτυο διανομής, για παράδειγμα το Ελληνικό Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, για ένα συγκεκριμένο διάστημα λειτουργίας. Θεωρούμε ότι υπάρχουν διακριτές ομάδες καταναλωτών, με την κάθε ομάδα να έχει τη δική της καμπύλη κατανάλωσης. Για αρχή, κάνουμε την παραδοχή πως η καμπύλη κατανάλωσης κάθε ομάδας παραμένει προσεγγιστικά σταθερή για όλες τις ημέρες κατά το διάστημα λειτουργίας που εξετάζουμε. Αργότερα, θα εξετάσουμε πως το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις περιπτώσεις στις οποίες οι καμπύλες κατανάλωσης δύναται να μεταβάλλονται με κάποια συχνότητα.

Για την εξυπηρέτηση όλων των καταναλωτών, το δίκτυο υφίσταται έξοδα, τα οποία μπορούν να διαχωριστούν σε πάγια και μεταβλητά έξοδα. Τα πάγια έξοδα σχετίζονται με το μέγιστο φορτίο μέσης ωριαίας ισχύος, ενώ τα μεταβλητά σχετίζονται με την συνολική ενέργεια κατανάλωσης.

Το ζητούμενο είναι να υπολογιστούν χρεώσεις χρήσης δικτύου για τους καταναλωτές, οι οποίες να έχουν τις εξής τρεις επιθυμητές ιδιότητες:

- Οι συνολικές χρεώσεις θα πρέπει να ανακτούν το *Απαιτούμενο Έσοδο Δικτύου* που αφορά τους καταναλωτές, και σχετίζεται με τα προαναφερθέντα έξοδα δικτύου.
- Οι χρεώσεις θα πρέπει να οδηγούν σε έναν επιμερισμό του απαιτούμενου εσόδου δικτύου ανά καταναλωτή, ο οποίος να είναι δίκαιος, υπό την έννοια πως η χρέωση αντικατοπτρίζει το φόρτο και μόνο το φόρτο που ο κάθε καταναλωτής φέρνει στο δίκτυο.
- Η τελική κοστολόγηση θα πρέπει να είναι απλή και κατανοητή στον καταναλωτή.

2.1. Απαιτούμενα Δεδομένα

- N : ο αριθμός ημερών λειτουργίας για το διάστημα που εξετάζουμε.
- $RR(L)$: Απαιτούμενο έσοδο δικτύου διανομής από τους καταναλωτές. Το έσοδο διαχωρίζεται βάσει των αντίστοιχων εξόδων σε δύο συνιστώσες: πάγια και μεταβλητή:
 - $cRR(L)$: πάγια συνιστώσα του $RR(L)$
 - $vRR(L)$: μεταβλητή συνιστώσα του $RR(L)$,

έτσι ώστε

$$RR(L) = cRR(L) + vRR(L).$$

- $\{1, \dots, G\}$: ομάδες καταναλωτών
- g_h^i : προβλεπόμενη μέση ωριαία ισχύς της ομάδας καταναλωτών $i \in \{1, \dots, G\}$, την ώρα $h \in \{1, \dots, 24\}$.

2.2. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία αποτελείται από δύο μέρη: στο πρώτο μέρος, καθορίζεται ο δίκαιος επιμερισμός του απαιτούμενου εσόδου δικτύου για κάθε ομάδα καταναλωτών. Στο επόμενο κεφάλαιο, Κεφάλαιο 3, παρατίθεται αναλυτική μεθοδολογία για επιμερισμό του απαιτούμενου εσόδου δικτύου, όπως επίσης και απλοποιημένη μεθοδολογία η οποία μπορεί να εφαρμοστεί υπό προϋποθέσεις, οι οποίες συχνά πληρούνται στην πράξη.

Στο δεύτερο μέρος, καθορίζονται μοναδιαίες χρεώσεις για τους καταναλωτές, ώστε οι αναμενόμενες χρεώσεις χρήσης δικτύου κάθε ομάδας να προσεγγίζουν το δίκαιο μερίδιο του απαιτούμενου εσόδου δικτύου της ομάδας που καθορίστηκε στο πρώτο μέρος. Η προτεινόμενη μεθοδολογία για αυτό το μέρος παρατίθεται στο Κεφάλαιο 4.

3. Επιμερισμός του Απαιτούμενου Εσόδου Δικτύου ανά Ομάδα Καταναλωτών

Σε αυτό το μέρος καθορίζονται τα δίκαια μερίδια του απαιτούμενου εσόδου δικτύου για κάθε ομάδα καταναλωτών. Πρώτα παρουσιάζουμε αναλυτικά την προτεινόμενη μεθοδολογία, η οποία ακολουθεί μοντέλο τιμών Sharpley. Έπειτα παρουσιάζουμε μία απλοποιημένη μεθοδολογία, η οποία ακολουθεί έναν απλό αναλογικό επιμερισμό του εσόδου βάσει κατάλληλων κλειδών. Η απλοποιημένη μεθοδολογία είναι εύλογο να εφαρμοστεί μόνο υπό προϋποθέσεις, οι οποίες όμως συχνά πληρούνται στην πράξη.

3.1. Αναλυτικός Επιμερισμός: Τιμές Sharpley

Η προτεινόμενη αναλυτική μεθοδολογία είναι ο επιμερισμός του εσόδου για κάθε ομάδα ανάλογα με την τιμή Sharpley της ομάδας ('Sharpley value'). Η τιμή Sharpley είναι ο κατεξοχήν δίκαιος επιμερισμός κόστους που έχει προταθεί στη σχετική βιβλιογραφία της Οικονομικής Επιστήμης, και για αυτήν την εφαρμογή επιμερίζει το απαιτούμενο έσοδο σε κάθε ομάδα ανάλογα με το φόρτο και μόνο με το φόρτο που αυτή προκαλεί στα κόστη λειτουργίας του δικτύου. Για περισσότερες πληροφορίες για το μοντέλο Sharpley, βλέπε Κεφάλαιο Α του Παραρτήματος.

Για τον υπολογισμό των τιμών Sharpley, απαιτείται ο υπολογισμός του απαιτούμενου εσόδου δικτύου σε περίπτωση που αυτό εξυπηρετούσε μόνο ένα υποσύνολο των ομάδων καταναλωτών. Για τον υπολογισμό αυτού του εσόδου, θα χρησιμοποιήσουμε την παραδοχή ότι το έσοδο έχει δύο συνιστώσες, η μία εκ των οποίων, η μεταβλητή, είναι ανάλογη της απαιτούμενης συνολικής ποσότητας ενέργειας, και η δεύτερη εκ των οποίων, η πάγια, είναι ανάλογη της μέγιστης απαιτούμενης μέσης ωριαίας ισχύος. Δηλαδή,

$$\begin{aligned} \text{Απαιτούμενο Έσοδο Δικτύου} &= \alpha \times (\text{συνολική ποσότητα ενέργειας}) \\ &+ \beta \times N \times (\text{μέγιστη μέση ωριαία ισχύς}) \end{aligned}$$

όπου ο πρώτος αθροιστής είναι η μεταβλητή συνιστώσα, ο δεύτερος η πάγια συνιστώσα, και α , β είναι οι αντίστοιχοι συντελεστές αναλογίας.

Οι παραπάνω συντελεστές αναλογίας μπορούν να υπολογιστούν από τις συνιστώσες του

συνολικού απαιτούμενου εσόδου. Συγκεκριμένα, έχουμε πως

$$\alpha \times \underbrace{\left(N \times \sum_{h=1}^{24} \sum_{i=1}^G g_h^i \right)}_{\text{συνολική ποσότητα ενέργειας}} = vRR(L),$$

όπου ο πολλαπλασιαστής του συντελεστή α είναι η συνολική ποσότητα ενέργειας κατανάλωσης του δικτύου για το διάστημα μελέτης.

Αντίστοιχα, έχουμε πως

$$\beta \times N \times \underbrace{\left(\max_{h \in \{1, \dots, 24\}} \sum_{i=1}^G g_h^i \right)}_{\text{μέγιστη μέση ωριαία ισχύς}} = cRR(L),$$

όπου ο πολλαπλασιαστής του συντελεστή β είναι η μέγιστη μέση ωριαία ισχύ για το δίκτυο κατά το διάστημα λειτουργίας επί των ημερών λειτουργίας.

Έχοντας υπολογίσει τους συντελεστές αναλογίας, μπορούμε πλέον να εκφράσουμε το απαιτούμενο εσόδο δικτύου σε περίπτωση που αυτό εξυπηρετούσε μόνο ένα υποσύνολο $S \subset \{1, \dots, G\}$ των ομάδων καταναλωτών, το οποίο και συμβολίζουμε με $c(S)$, ως εξής:

$$c(S) = \alpha \times \left(N \times \sum_{h=1}^{24} \sum_{i \in S} g_h^i \right) + \beta \times N \times \left(\max_{h \in \{1, \dots, 24\}} \sum_{i \in S} g_h^i \right). \quad (1)$$

Τέλος, βάσει της βιβλιογραφίας, σε ένα μοντέλο τιμών Shapley, ο υπολογισμός των τιμών Shapley γίνεται βάσει της σχέσης

$$c^i = \sum_{S \subset \{1, \dots, G\} \setminus \{i\}} \frac{|S|!(G - |S| - 1)!}{G!} (c(S \cup \{i\}) - c(S)), \quad (2)$$

όπου $c(\cdot)$ είναι η λεγόμενη χαρακτηριστική συνάρτηση κόστους του μόντελου. (Για περισσότερες πληροφορίες για το μοντέλο Shapley, βλέπε Κεφάλαιο Α του Παραρτήματος) Χρησιμοποιώντας την παραπάνω συνάρτηση $c(S)$ από τη σχέση (1) ως την χαρακτηριστική συνάρτηση κόστους μπορούμε να υπολογίσουμε αναλυτικά το δίκαιο μερίδιο του απαιτούμενου εσόδου δικτύου για την κάθε ομάδα καταναλωτών.

3.2. Απλοποιημένος Αναλογικός Επιμερισμός

Υπό προϋποθέσεις, ο αναλυτικός επιμερισμός μέσω των τιμών Shapley παίρνει τη μορφή ενός απλού αναλογικού επιμερισμού: η κάθε ομάδα επιμερίζεται μέρος της μεταβλητής συνιστώσας του εσόδου ανάλογα με την ενέργεια που καταναλώνει, και μέρος της πάγιας συνιστώσας του εσόδου ανάλογα με την μέση ωριαία ισχύ που καταναλώνει κατά την περίοδο αιχμής.

Ο αναλυτικός δίκαιος επιμερισμός μέσω των τιμών Shapley είναι ισοδύναμος με τον προαναφερθέντα αναλογικό επιμερισμό μόνο εφόσον οι περίοδοι αιχμής συμπίπτουν για όλες τις ομάδες καταναλωτών, δηλαδή, μόνο εφόσον

$$\operatorname{argmax}_h g_h^i = \operatorname{argmax}_h g_h^j, \quad \forall i, j \in \{1, \dots, G\}.$$

Συγκεκριμένα, σε περίπτωση που η παραπάνω σχέση ισχύει, τότε το δίκαιο επιμέρους Απαιτούμενο Έσοδο Δικτύου για την ομάδα καταναλωτών, που δίνεται αναλυτικά από τη σχέση (2), μπορεί να απλοποιηθεί και να γραφεί ως άθροισμα δύο συνιστωσών: (α) της συνιστώσας ενέργειας, c_e^i , και (β) της συνιστώσας ισχύος, c_p^i , αντίστοιχα, έτσι ώστε

$$c^i = c_e^i + c_p^i,$$

για την ομάδα i . Οι συνιστώσες επιμερίζουν το μεταβλητό και πάγιο απαιτούμενο έσοδο ανάλογα με την ενέργεια κατανάλωσης και την μέγιστη ισχύ στην περίοδο αιχμής, αντίστοιχα. Δηλαδή, αν εκφράσουμε τη συνολική ενέργεια κατανάλωσης της ομάδας i ως

$$e^i = N \times \sum_{h \in \{1, \dots, 24\}} g_h^i \quad (3)$$

και την μέγιστη μέση ισχύ στην περίοδο αιχμής της ομάδας i επί των ημερών λειτουργίας ως

$$p^i = N \times \max_{h \in \{1, \dots, 24\}} g_h^i, \quad (4)$$

τότε έχουμε πως

$$\begin{aligned} c_e^i &= \frac{e^i}{\sum_{j=1}^G e^j} \times vRR(L), \\ c_p^i &= \frac{p^i}{\sum_{j=1}^G p^j} \times cRR(L). \end{aligned} \quad (5)$$

Να σημειωθεί πως, σε περίπτωση που οι περίοδοι αιχμής συμπίπτουν για όλες τις ομάδες καταναλωτών έστω και προσεγγιστικά, είναι εύλογο να εφαρμοστεί ο αναλογικός επιμερισμός, αφού είναι πιο εύκολος και κατανοητός, και θα παραμένει προσεγγιστικά ίσος με τον αναλυτικό.

Σε περίπτωση όμως που οι διάφορες ομάδες καταναλωτών έχουν σημαντικά διαφορετικές περιόδους αιχμής, τότε ο αναλογικός επιμερισμός δύναται επίσης να διαφέρει σημαντικά από τον αναλυτικό επιμερισμό, και ως εκ τούτου δεν θα είναι δίκαιος.

3.3. Παραδείγματα

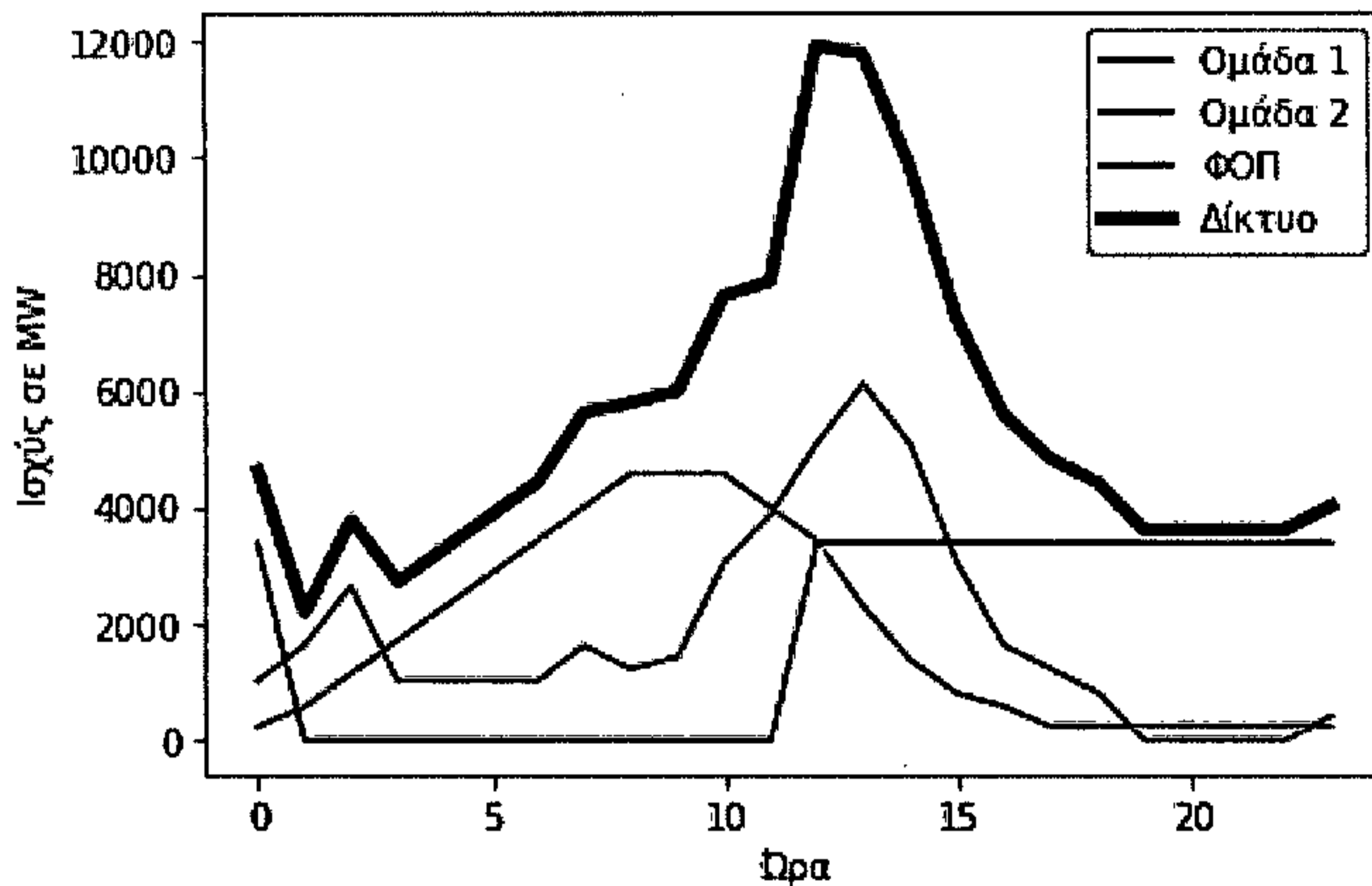
Παραθέτουμε δύο παράδειγματα επιμερισμού του Απαιτούμενου Εσόδου Δικτύου. Σε κάθε παράδειγμα εξετάζουμε τρεις ομάδες καταναλωτών, κάνοντας χρήση πλασματικών δεδομένων. Οι ομάδες έχουν την ίδια συνολική κατανάλωση ενέργειας, διαφέρουν ωστόσο στην ωριαία διακύμανσης ισχύος κατανάλωσης. Το Απαιτούμενου Έσοδου Δικτύου είναι €740εκ, και διαχωρίζεται ισότιμα σε πάγια (€370εκ) και μεταβλητή συνιστώσα (€370εκ). Βάσει αυτών των δεδομένων, υπολογίζονται για κάθε παράδειγμα οι χρεώσεις σε κάθε ομάδα βάσει του αναλυτικού επιμερισμού του εσόδου (Shapley), όπως επίσης και του απλοποιημένου αναλογικού επιμερισμού.

Τα παραδείγματα επιδεικνύουν πως ο αναλυτικός επιμερισμός καταλήγει σε όλες τις περιπτώσεις σε δίκαιες χρεώσεις για τις ομάδες, ανάλογα με το φόρτο που αυτές επιφέρουν στο δίκτυο. Επίσης, από τα παραδείγματα διαφαίνεται πως ο απλοποιημένος αναλογικός επιμερισμός μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τον αναλυτικό, σε περίπτωση που οι ώρες χρήσης αιχμής των ομάδων διαφέρουν. Σε αντίθετη περίπτωση που οι ώρες χρήσης αιχμής είναι προσεγγιστικά οι ίδιες, τότε ο αναλογικός επιμερισμός επίσης προσεγγίζει τον αναλυτικό.

Παράδειγμα 1

Το Σχήμα 1 απεικονίζει τις καμπύλες ωριαίας διακύμανσης ισχύος για τις ομάδες καταναλωτών: Ομάδα 1, Ομάδα 2 και Ομάδα Φωτισμού Οδών και Πλατειών (ΦΟΠ). Οι ομάδες έχουν την ίδια συνολική ενέργεια κατανάλωσης. Οι Ομάδες 1 και 2 έχουν σημαντική διακύμανση ισχύος ανά την ημέρα, με παρόμοιες, αλλά όχι ίδιες, περιόδους αιχμής χρήσης. Η Ομάδα ΦΟΠ έχει σταθερή ζήτηση όσο ο φωτισμός είναι απαραίτητος, και σχεδόν μηδενική την υπόλοιπη ημέρα.

Ο Πίνακας 1 παραθέτει τις δίκαιες χρεώσεις χρήσης για την κάθε ομάδα βάσει του Αναλυτικού, αλλά και του Αναλογικού επιμερισμού. Βάσει του πρώτου, η Ομάδα 1 χρεώνεται το



Σχήμα 1: Καμπύλες ωριαίας διακύμανσης ισχύος για τις ομάδες καταναλωτών και για το δίκτυο συνολικά για το Παράδειγμα 1

υψηλότερο κόστος, λόγω της υψηλής ζήτησης κατά την περίοδο αιχμής. Οι Ομάδες 2 και ΦΟΠ έχουν πιο ήπιες διακυμάνσεις στη ζήτηση ισχύος, οι οποίες είναι και σχετικά παρόμοιες μεταξύ τους. Ως αποτέλεσμα, οι χρεώσεις τους είναι επίσης παρόμοιες. Ο Αναλογικός επιμερισμός,

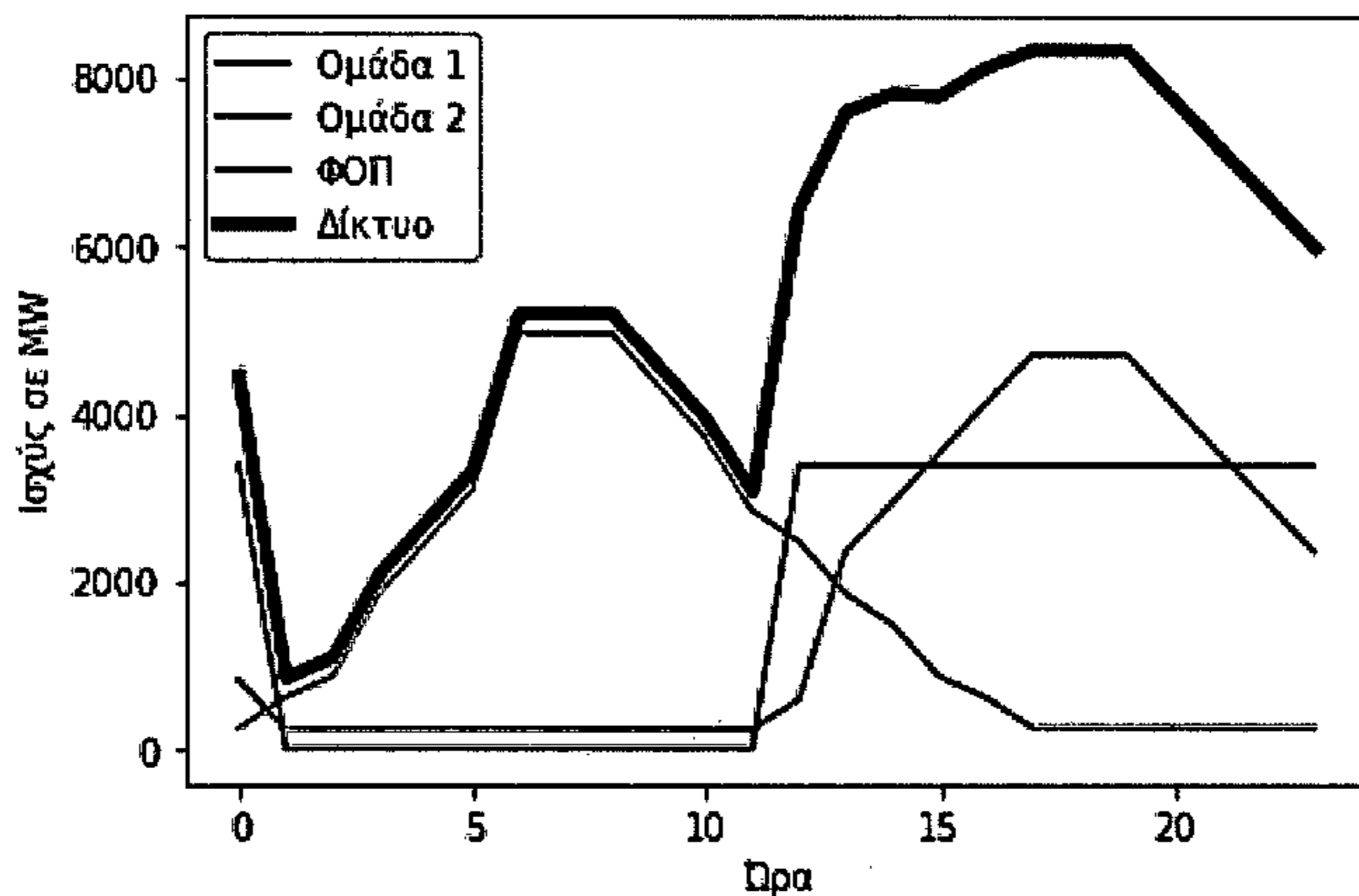
Πίνακας 1: Χρεώσεις χρήσης δικτύου για τις ομάδες καταναλωτών του Παραδείγματος 1, βάσει του απλοποιημένου αναλογικού, και του αναλυτικού επιμερισμού.

| | Αναλυτικός επιμερισμός | Αναλογικός επιμερισμός |
|---------|------------------------|------------------------|
| Ομάδα 1 | €292εκ (39%) | €303εκ (40%) |
| Ομάδα 2 | €226εκ (31%) | €201εκ (27%) |
| ΦΟΠ | €222εκ (30%) | €235εκ (33%) |
| Σύνολο | €740εκ (100%) | €740εκ (100%) |

από την άλλη, επικεντρώνεται αποκλειστικά στην περίοδο αιχμής συνολικά του δικτύου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ελαφρά μικρότερη χρέωση της Ομάδας 2, και ελαφρά μεγαλύτερη της Ομάδας ΦΟΠ, σχετικά με τον Αναλυτικό επιμερισμό, αφού η αιχμή ζήτησης της πρώτης συμπίπτει λιγότερο με την περίοδο αιχμής συνολικά του δικτύου. Συνολικά, οι δύο μεθοδολογίες οδηγούν σε σχετικά παρόμοιες χρεώσεις, αφού οι αιχμές ζήτησης για όλες τις ομάδες συμπίπτουν προσεγγιστικά μεταξύ τους.

Παράδειγμα 2

Το Σχήμα 2 απεικονίζει τις καμπύλες ωριαίας διακύμανσης ισχύος για τις ομάδες καταναλωτών: Ομάδα 1, Ομάδα 2 και Ομάδα ΦΟΠ. Όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα, οι ομάδες έχουν την ίδια συνολική ενέργεια κατανάλωσης. Οι Ομάδες 1 και 2 έχουν σημαντική διακύμανση ισχύος ανά την ημέρα, με σημαντικά διαφορετικές περιόδους αιχμής ζήτησης η καθεμία. Η Ομάδα ΦΟΠ έχει σταθερή ζήτηση όσο ο φωτισμός είναι απαραίτητος, και σχεδόν μηδενική την υπόλοιπη ημέρα.



Σχήμα 2: Καμπύλες ωριαίας διακύμανσης ισχύος για τις ομάδες καταναλωτών και για το δίκτυο συνολικά για το Παράδειγμα 2

Ο Πίνακας 2 παραθέτει τις δίκαιες χρεώσεις χρήσης για την κάθε ομάδα βάσει του Αναλυτικού, αλλά και του Αναλογικού επιμερισμού. Βάσει του πρώτου, οι Ομάδες 2 και ΦΟΠ χρεώνονται τα υψηλότερα κόστη, λόγω της υψηλής ζήτησης κατά την περίοδο αιχμής. Η Ομάδα 1, παρότι έχει υψηλότερη μέγιστη ισχύ ζήτησης, χρεώνεται χαμηλότερο κόστος, αφού η ζήτηση δεν είναι κατά την περίοδο αιχμής του δικτύου συνολικά. Ο Αναλογικός επιμερισμός, από την άλλη, επικεντρώνεται αποκλειστικά στην περίοδο αιχμής συνολικά του δικτύου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την Ομάδα 1 να έχει ένα σημαντικά μικρότερο κόστος, και τις Ομάδες 2 και ΦΟΠ να έχουν σημαντικά υψηλότερα.

Πίνακας 2: Χρεώσεις χρήσης δικτύου για τις ομάδες καταναλωτών του Παραδείγματος 2, βάσει του απλοποιημένου αναλογικού, και του αναλυτικού επιμερισμού.

| | Αναλυτικός επιμερισμός | Αναλογικός επιμερισμός |
|---------|------------------------|------------------------|
| Ομάδα 1 | €222εκ (30%) | €140εκ (19%) |
| Ομάδα 2 | €266εκ (36%) | €325εκ (44%) |
| ΦΟΠ | €252εκ (34%) | €275εκ (37%) |
| Σύνολο | €740εκ (100%) | €740εκ (100%) |

Αυτό το παράδειγμα επιδεικνύει, αφενός μεν, πως ο απλοποιημένος αναλογικός επιμερισμός δεν καταλήγει πάντα σε δίκαιο επιμερισμό. Συγκεκριμένα, η Ομάδα 1, παρότι έχει σημαντική διακύμανση στη χρήση, και την υψηλότερη ωριαία ζήτηση ισχύος, χρεώνεται ένα μικρό κόστος. Αντίστοιχα, οι Ομάδες 2 και ΦΟΠ χρεώνονται ιδιαίτερα υψηλά κόστη. Αφετέρου, το παράδειγμα επιδεικνύει πως ο αναλυτικός επιμερισμός καταλήγει σε δίκαιες χρεώσεις για τις ομάδες, ανάλογα με το φόρτο που αυτές επιφέρουν στο δίκτυο. Να σημειωθεί πως η διαφορά ανάμεσα στα μερίδια των δύο μεθοδολογιών οφείλεται στη διαφορά μεταξύ των ωρών αιχμής των ομάδων μεταξύ τους. Σε αυτή την περίπτωση, όπως προαναφέρθηκε και βάσει της θεωρίας, μόνο ο αναλυτικός επιμερισμός είναι σίγουρο πως θα καταλήξει σε δίκαιες χρεώσεις.

4. Μοναδιαίες Χρεώσεις Χρηστών ανά Ομάδα Καταναλωτών

Σε αυτό το μέρος θα υπολογίσουμε μοναδιαίες χρεώσεις χρήσης δικτύου, έτσι ώστε οι επιφερόμενες συνολικές χρεώσεις για τους χρήστες κάθε ομάδας να ισούνται με το δίκαιο επιμέρους Απαιτούμενο Έσοδο Δικτύου της ομάδας που υπολογίσαμε στο Κεφάλαιο 3—είτε μέσω του αναλυτικού ή του απλοποιημένου αναλογικού επιμερισμού.

Συγκεκριμένα, ας μελετήσουμε την ομάδα καταναλωτών i . Το συνολικό Απαιτούμενο Έσοδο Δικτύου για την ομάδα καταναλωτών, c^i , μπορεί να διαχωριστεί σε δύο συνιστώσες: συνιστώσα ενέργειας και συνιστώσα ισχύος. Ας συμβολίσουμε όπως προηγουμένως τις συνιστώσες c_e^i και c_p^i , αντίστοιχα, έτσι ώστε $c^i = c_e^i + c_p^i$.

- Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ο απλοποιημένος επιμερισμός Απαιτούμενου Εσόδου από την παράγραφο 3.2, τότε οι συνιστώσες c_e^i και c_p^i , έχουν ήδη υπολογιστεί βάσει των σχέσεων (5).
- Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ο αναλυτικός επιμερισμός, ο διαχωρισμός στις δύο συνιστώσες μπορεί να συνεχίσει να γίνεται βάσει συντελεστών που εφαρμόστηκαν στο παρελθόν (βλ. Απόφαση ΡΑΕ 455/2016, παράγραφος Β). Για παράδειγμα, αν οι συντελεστές είναι 80% για την ενέργεια και 20% για την ισχύ, τότε έχουμε πως

$$c_e^i = 0,8 \times c^i \quad \text{και} \quad c_p^i = 0,2 \times c^i.$$

Εναλλακτικά, ο επιμερισμός μπορεί να γίνει και βάσει των συντελεστών αναλογίας κόστους α και β που χρησιμοποιούμε στον αναλυτικό υπολογισμό του Απαιτούμενου Εσόδου για το δίκτυο στην παράγραφο 3.1. Συγκεκριμένα,

$$c_e^i = \frac{\alpha e^i}{\alpha e^i + \beta p^i} \times c^i,$$

$$c_p^i = \frac{\beta p^i}{\alpha e^i + \beta p^i} \times c^i,$$

όπου e^i και p^i είναι η συνολική ενέργεια κατανάλωσης και η μέγιστη ισχύ στην περίοδο αιχμής της ομάδας, και δίνονται όπως προηγουμένως από τις σχέσεις (3) και (4) παραπάνω.

Τέλος, οι χρεώσεις των χρηστών έχουν δύο συνιστώσες, αντίστοιχα:

1. τη μοναδιαία μεταβλητή χρέωση, ή μοναδιαία χρέωση ενέργειας, η οποία επιμερίζει τη συνιστώσα εσόδου ενέργειας αναλογικά με την ενέργεια που καταναλώνει ο κάθε χρήστης, δηλαδή

$$\text{Μοναδιαία Χρέωση Ενέργειας ομάδας } i = \frac{c_e^i}{e^i}.$$

Ως εκ τούτου, κάθε χρήστης της ομάδας i θα χρεώνεται τη Μοναδιαία Χρέωση Ενέργειας για κάθε μονάδα ενέργειας Wh που καταναλώνει.

2. τη μοναδιαία πάγια χρέωση, ή μοναδιαία χρέωση ισχύος, η οποία επιμερίζει τη συνιστώσα ισχύος εσόδου ανάλογα με την ισχύ χρέωσης του κάθε χρήστη. Αν συμβολίσουμε με \hat{p}^i τη συνολική ισχύ χρέωσης όλων των χρηστών της ομάδας επί των ημερών λειτουργίας, έχουμε

$$\text{Μοναδιαία Χρέωση Ισχύος ομάδας } i = \frac{c_p^i}{\hat{p}^i}.$$

Ως εκ τούτου, κάθε χρήστης της ομάδας i θα χρεώνεται τη Μοναδιαία Χρέωση Ισχύος για κάθε μονάδα ισχύος χρέωσης W που καταναλώνει τη μέρα.

Να σημειωθεί πως η ισχύς χρέωσης δεν ισούται κατ'ανάγκη με την μέγιστη ισχύ στην περίοδο αιχμής—άλλωστε, για χρήστες που δεν διαθέτουν ωριαίο μετρητή η μέγιστη ισχύς δε μπορεί να εκτιμηθεί με ασφάλεια. Η ισχύς χρέωσης μπορεί να ορισθεί ως εξής. Σε περίπτωση που οι καταναλωτές δεν έχουν ωριαίο μετρητή, η ισχύς χρέωσης δύναται να είναι η μέγιστη συμφωνημένη ισχύς. Σε περίπτωση που έχουν ωριαίο μετρητή, η ισχύς χρέωσης δύναται να είναι η μέγιστη χρέωση τις ώρες αιχμής του δικτύου, οι οποίες θεωρούνται πως είναι οι ώρες μεταξύ 11:00 και 14:00 ($h \in \{11, 12, 13, 14\}$). Βάσει των προηγούμενων δεδομένων, για παράδειγμα, για την δεύτερη περίπτωση έχουμε πως

$$\hat{p}^i = N \times \max_{h \in \{11, 12, 13, 14\}} g_h^i.$$

5. Εφαρμογή Μεθοδολογίας στο Ελληνικό Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Σε αυτό το κεφάλαιο, παραθέτουμε περαιτέρω πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί ώστε να καθοριστούν δίκαιες μοναδιαίες χρεώσεις για τους χρήστες καταναλωτές του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας ώστε να ανακτηθεί το απαιτούμενο έσοδο δικτύου σε ετήσια βάση. Τα βήματα που δύναται να ακολουθηθούν έχουν ως εξής:

Βήμα 1: Διαχωρισμός Απαιτούμενου Εσόδου και Χρεώσεων για το Πρωτεύον και Δευτερεύον τμήμα του Δικτύου

Δεδομένου πως το δίκτυο διαχωρίζεται σε πρωτεύον και δευτερεύον τμήματα, η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί ξεχωριστά για τα δύο αυτά τμήματα. Συγκεκριμένα, το συνολικό απαιτούμενο έσοδο δικτύου μπορεί να διαχωριστεί σε απαιτούμενα έσοδα που αφορούν το πρωτεύον και το δευτερεύον δίκτυο, αντίστοιχα, ανάλογα με τα οικονομικά στοιχεία και τις λειτουργικές δαπάνες του καθενός τμήματος.

Τα επόμενα βήματα μπορούν να εφαρμοστούν ξεχωριστά για κάθε ένα από τα δύο τμήματα, ώστε να καθοριστούν οι δίκαιες μοναδιαίες χρεώσεις για το αντίστοιχο τμήμα για την κάθε ομάδα καταναλωτών που το χρησιμοποιεί. Ομάδες καταναλωτών που κάνουν χρήση και των δύο τμημάτων (π.χ., ορισμένοι καταναλωτές Χαμηλής Τάσης), θα έχουν συνολικές μοναδιαίες χρεώσεις που θα προκύπτουν από το άθροισμα των επιμέρους χρεώσεων. (βλ. Βήμα 5)

Βήμα 2: Επιμερισμός Απαιτούμενου Εσόδου Δικτύου σε Πάγια και Μεταβλητή Συνιστώσες

Το ετήσιο απαιτούμενο έσοδο δικτύου, $RR(L)$, διαχωρίζεται σε πάγια, $cRR(L)$, και μεταβλητή, $vRR(L)$, συνιστώσα. Ο διαχωρισμός γίνεται βάσει οικονομικών στοιχείων κόστους, συγκεκριμένα σε αναλογία με τα έξοδα του δικτύου που ορίζονται ως πάγια ή μεταβλητά.

Τα πάγια έξοδα δεν εξαρτώνται από την ποσότητα 'ενέργεια κατανάλωσης', σε αντίθεση με τα μεταβλητά. Για περισσότερες πληροφορίες για το πως μπορεί να τελεστεί ο διαχωρισμός

εξόδων και ο επιμερισμός του $RR(L)$ σε $cRR(L)$ και $vRR(L)$, βλ. Κεφάλαιο 6, Άρθρο 19 του Εγχειριδίου Χρεώσεων Χρήσης Δικτύου του ΔΕΔΔΗΕ (Ιανουάριος 2018).

Πάγια έξοδα που είναι ανεξάρτητα από τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων των καταναλωτών, δηλαδή σταθερά έξοδα, μπορούν να επιμεριστούν αναλογικά με τους μετρητές κατανάλωσης, και δεν αφορούν την παρούσα μελέτη. (βλ. Κεφάλαιο 6, Άρθρο 19 του Εγχειριδίου Χρεώσεων Χρήσης Δικτύου του ΔΕΔΔΗΕ, Ιανουάριος 2018)

Βήμα 3: Καθορισμός Ομάδων Καταναλωτών και Καμπύλη Ωριαίας Διακύμανσης Ισχύος

Για να επιτευχθεί ένας δίκαιος επιμερισμός του Απαιτούμενου Εσόδου, οι καταναλωτές πρέπει να καταταχθούν σε ομάδες με άλλους καταναλωτές οι οποίοι επιφέρουν παρόμοιο φόρτο στη λειτουργία του Δικτύου, και συγκεκριμένα όσων αφορά στα πάγια έξοδα του Δικτύου και μόνο. Αυτό αποτυπώνεται αποκλειστικά και μόνο στη μέση ωριαία διακύμανση της κατανάλωσής τους, δηλαδή στη μορφή της καμπύλης της μέσης ωριαίας ισχύος που καταναλώνουν.

Ως εκ τούτου, πρώτον, για κάθε χρήστη πρέπει να υπολογιστεί η καμπύλη κατανάλωσης μέσω ιστορικών δεδομένων από τη χρήση ωριαίου μετρητή. Αν αυτός δεν είναι διαθέσιμος, η καμπύλη συνάγεται από παρόμοιους χρήστες που διαθέτουν (βλ. Κεφάλαιο 4 του Εγχειριδίου Χρεώσεων Χρήσης Δικτύου του ΔΕΔΔΗΕ, Ιανουάριος 2018). Δεδομένου πως οι χρήστες δύναται να έχουν εποχιακές διακυμάνσεις στο προφίλ της κατανάλωσής τους, είναι εύλογο η καμπύλη μέσης ωριαίας ισχύος να εκτιμηθεί σε μηνιαία βάση, δηλαδή για κάθε καταναλωτή να υπάρχει εκτίμηση για τη μέση ωριαία ισχύ κατανάλωσης κατά την ώρα $h \in \{1, \dots, 24\}$, τον μήνα $m \in \{1, \dots, 12\}$.

Βάσει αυτών των δεδομένων, οι ομάδες καθορίζονται έτσι ώστε για την ομάδα i καταναλωτών, ο λόγος της μέσης ωριαίας ισχύος που καταναλώνει ο κάθε χρήστης της ομάδας ως προς τη μέση ωριαία ισχύ κατανάλωσης της ομάδας συνολικά, να είναι προσεγγιστικά σταθερός καθ' όλην τη διάρκεια της ημέρας, για κάθε μήνα.

$$\frac{\text{(μέση ωριαία ισχύς χρήστη της ομάδας } i \text{ την ώρα } h \text{ το μήνα } m)}{g_{hm}^i} \approx \text{σταθερός,}$$

όπου g_{hm}^i είναι η μέση ωριαία ισχύς της ομάδας i συνολικά την ώρα h το μήνα m .

Η προτεινόμενη μεθοδολογία καθορισμού ομάδων είναι παρόμοια με αυτή που περιγράφεται

στο Κεφάλαιο 4 του Εγχειριδίου Χρεώσεων Χρήσης Δικτύου του ΔΕΔΔΗΕ (Ιανουάριος 2018). Ως εκ τούτου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν οι ομάδες κατανάλωσης που προτείνονται στο αναφερόμενο εγχειρίδιο, δηλαδή, 1) ΧΤ Αγροτικοί, χωρίς «Ωριαίο Μετρητή», 2) ΧΤ Εμπορικοί, χωρίς «Ωριαίο Μετρητή», 3) ΧΤ Βιομηχανικοί, χωρίς «Ωριαίο Μετρητή», 4) ΧΤ Φωτισμός Οδών και Πλατειών («ΦΟΠ»), χωρίς «Ωριαίο Μετρητή», 5) Λοιποί Καταναλωτές ΧΤ, χωρίς «Ωριαίο Μετρητή», 6) ΧΤ Αγροτικοί, με «Ωριαίο Μετρητή», 7) Λοιποί Καταναλωτές ΧΤ, με «Ωριαίο Μετρητή», 8) ΜΤ Αγροτικοί, με «Ωριαίο Μετρητή», και 9) ΜΤ Λοιποί, με «Ωριαίο Μετρητή».

Βήμα 4: Επιμερισμός Απαιτούμενου Εσόδου Δικτύου ανά Ομάδα

Σε αυτό το βήμα, εφαρμόζουμε τη μεθοδολογία του Κεφαλαίου 3 για τον επιμερισμό του Απαιτούμενου Εσόδου Δικτύου στις ομάδες καταναλωτών.

Σε περίπτωση που όλες οι ομάδες καταναλωτών έχουν καμπύλες διακύμανσης με παρόμοιες περιόδους αιχμής κατανάλωσης ισχύος για όλους τους μήνες, τότε είναι δυνατή η χρήση της απλοποιημένης αναλογικής μεθοδολογίας (Κεφάλαιο 3.2). Σε αντίθετη περίπτωση προτείνεται η χρήση της αναλυτικής μεθοδολογίας (Κεφάλαιο 3.1).

Παρακάτω εξετάζουμε τις δύο περιπτώσεις ξεχωριστά:

Αναλυτικός Επιμερισμός

Για να εφαρμοστεί η αναλυτική μεθοδολογία, ορίζουμε πρώτα τους συντελεστές κόστους αντίστοιχα όπως και στο Κεφάλαιο 3.1, λαμβάνοντας υπ' όψιν τους διαφορετικούς μήνες:

$$\alpha = \frac{vRR(L)}{\sum_{m=1}^{12} 30 \times \sum_{h=1}^{24} \sum_{i=1}^G g_{hm}^i}$$

και

$$\beta = \frac{cRR(L)}{\sum_{m=1}^{12} 30 \times \max_{h \in \{1, \dots, 24\}} \sum_{i=1}^G g_{hm}^i}.$$

Η χαρακτηριστική συνάρτηση σε αυτή την περίπτωση δίνεται από

$$c(S) = \alpha \times \left(\sum_{m=1}^{12} 30 \times \sum_{h=1}^{24} \sum_{i \in S} g_{hm}^i \right) + \beta \times \sum_{m=1}^{12} 30 \times \left(\max_{h \in \{1, \dots, 24\}} \sum_{i \in S} g_{hm}^i \right).$$

και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστούν τα επιμέρους Απαιτούμενα Έσοδα ανά ομάδα, c^i , $i = 1, \dots, G$, από τη σχέση (2).

Αναλογικός Επιμερισμός

Εφαρμόζοντας την απλοποιημένη μεθοδολογία αναλογικού επιμερισμού του Κεφαλαίου 3.2 για κάθε μηνιαίο διάστημα, έχουμε

$$c_e^i = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} \frac{30 \times \sum_{h=1}^{24} g_{hm}^i}{\sum_{j=1}^G 30 \times \sum_{h=1}^{24} g_{hm}^j} \times vRR(L),$$

$$c_p^i = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} \frac{30 \times \max_{h \in \{11,12,13,14\}} g_{hm}^i}{30 \times \sum_{j=1}^G \max_{h \in \{11,12,13,14\}} g_{hm}^j} \times cRR(L),$$

$$c^i = c_e^i + c_p^i.$$

Βήμα 5: Καθορισμός Μοναδιαίων Χρεώσεων

Στο τελευταίο βήμα εφαρμόζουμε τη μεθοδολογία του Κεφαλαίου (4) για κάθε ομάδα, ώστε να επιμερίζεται στους χρήστες το δίκαιο Απαιτούμενο Έσοδο της ομάδας που υπολογίσαμε στο Βήμα 4.

Πρώτον, για κάθε ομάδα διαχωρίζουμε το δίκαιο Απαιτούμενο Έσοδο c^i σε συνιστώσες ενέργειας c_e^i και ισχύος, c_p^i :

- Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ο αναλογικός επιμερισμός Απαιτούμενου Εσόδου στο Βήμα 4, τότε οι συνιστώσες c_e^i και c_p^i , έχουν ήδη υπολογιστεί στο Βήμα 4.
- Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ο αναλυτικός επιμερισμός, ο διαχωρισμός στις δύο συνιστώσες μπορεί να συνεχίσει να γίνεται βάσει συντελεστών που εφαρμόστηκαν στο παρελθόν (βλ. Απόφαση ΡΑΕ 455/2016, παράγραφος Β). Για παράδειγμα, αν οι συντελεστές είναι 80% για την ενέργεια και 20% για την ισχύ, τότε έχουμε πως

$$c_e^i = 0,8 \times c^i, \quad \text{και} \quad c_p^i = 0,2 \times c^i.$$

Εναλλακτικά, ο επιμερισμός μπορεί να γίνει και βάσει των συντελεστών αναλογίας κόστους

α και β που χρησιμοποιούμε στο Βήμα 4, συγκεκριμένα

$$c_e^i = \frac{\alpha \times \sum_{m=1}^{12} 30 \times \sum_{h=1}^{24} g_{hm}^i}{\alpha \times \sum_{m=1}^{12} 30 \times \sum_{h=1}^{24} g_{hm}^i + \beta \times \sum_{m=1}^{12} 30 \times \max_{h \in \{1, \dots, 24\}} g_{hm}^i} \times c^i,$$

$$c_p^i = \frac{\beta \times \sum_{m=1}^{12} 30 \times \max_{h \in \{1, \dots, 24\}} g_{hm}^i}{\alpha \times \sum_{m=1}^{12} 30 \times \sum_{h=1}^{24} g_{hm}^i + \beta \times \sum_{m=1}^{12} 30 \times \max_{h \in \{1, \dots, 24\}} g_{hm}^i} \times c^i.$$

Τέλος, οι χρεώσεις των χρηστών έχουν δύο συνιστώσες, αντίστοιχα:

1. τη μοναδιαία μεταβλητή χρέωση, ή μοναδιαία χρέωση ενέργειας, η οποία επιμερίζει τη συνιστώσα εσόδου ενέργειας αναλογικά με την ενέργεια που καταναλώνει ο κάθε χρήστης, δηλαδή

$$\text{Μοναδιαία Χρέωση Ενέργειας ομάδας } i = \frac{c_e^i}{\sum_{m=1}^{12} 30 \times \sum_{h=1}^{24} g_{hm}^i}.$$

Ως εκ τούτου, κάθε χρήστης της ομάδα i θα χρεώνεται τη Μοναδιαία Χρέωση Ενέργειας για κάθε μονάδα ενέργειας Wh που καταναλώνει.

2. τη μοναδιαία πάγια χρέωση, ή μοναδιαία χρέωση ισχύος, η οποία επιμερίζει τη συνιστώσα ισχύος εσόδου ανάλογα με την ισχύ χρέωσης του κάθε χρήστη. Αν συμβολίσουμε με \hat{p}_m^i τη συνολική ισχύ χρέωσης όλων των χρηστών της ομάδας επί των ημερών λειτουργίας κατά το μήνα m , έχουμε

$$\text{Μοναδιαία Χρέωση Ισχύος ομάδας } i = \frac{c_p^i}{\sum_{m=1}^{12} \hat{p}_m^i}.$$

Ως εκ τούτου, κάθε χρήστης της ομάδα i θα χρεώνεται τη Μοναδιαία Χρέωση Ισχύος για κάθε μονάδα ισχύ χρέωσης W που καταναλώνει τη μέρα.

Να σημειωθεί πως η ισχύς χρέωσης δεν ισούται κατ'ανάγκη με την μέγιστη ισχύ στην περίοδο αιχμής—άλλωστε, για χρήστες που δεν διαθέτουν ωριαίο μετρητή η μέγιστη ισχύς δε μπορεί να εκτιμηθεί με ασφάλεια. Η ισχύς χρέωσης μπορεί να ορισθεί ως εξής: σε περίπτωση που οι καταναλωτές δεν έχουν ωριαίο μετρητή, η ισχύς χρέωσης δύναται να είναι η μέγιστη συμφωνημένη ισχύ τον αντίστοιχο μήνα. Σε περίπτωση που έχουν ωριαίο μετρητή, η ισχύς χρέωσης δύναται να είναι η μέγιστη χρέωση τις ώρες αιχμής του δικτύου, οι οποίες θεωρούνται πως είναι οι ώρες μεταξύ 11:00 και 14:00 ($h \in \{11, 12, 13, 14\}$). Βάσει των προηγούμενων δεδομένων, για

παράδειγμα, για την δεύτερη περίπτωση έχουμε πως

$$\hat{p}_m^i = 30 \times \max_{h \in \{11,12,13,14\}} g_{hm}^i.$$

Παράρτημα

Α'. Μοντέλο Τιμών Shapley

Το μοντέλο τιμών Shapley δημοσιεύτηκε το 1953 στην εργασία 'A value for n-person games' από τον Lloyd S. Shapley. Το μοντέλο θεωρείται πλέον ως ένα από τα θεμελιώδη μοντέλα στην Οικονομική Θεωρία, και αποτέλεσε τη βάση για τη βράβευση του Lloyd S. Shapley το 2012 με το Nobel Prize στην Οικονομική Επιστήμη. Για μία εκτενή παρουσίαση του μοντέλου και των πολυπληθών εφαρμογών του, βλ. το βιβλίο 'The Shapley value—Essays in honor of Lloyd S. Shapley' από τον (επίσης βραβευμένο με Nobel) συγγραφέα Alvin E. Roth.

Μία από τις πιο σημαντικές εφαρμογές του μοντέλου τιμών Shapley είναι ο επιμερισμός κόστους ανάμεσα σε διαφορετικές ομάδες που μοιράζονται κάποιες παροχές. Συγκεκριμένα, το μοντέλο τιμών Shapley θεωρείται το κατ' εξοχήν μοντέλο το οποίο καταλήγει σε έναν δίκαιο επιμερισμό κόστους, υπό την έννοια πως επιμερίζει το κόστος με βάση, και μόνο με βάση το επιπλέον κόστος παροχής που επιβάλλει η κάθε ομάδα στο σύνολο. Για την ακρίβεια, η εργασία του Shapley το 1953 απέδειξε κάνοντας χρήση ένα γενικό μαθηματικό μοντέλο πως το μοντέλο τιμών Shapley είναι και η μοναδική μεθοδολογία επιμερισμού που βασίζεται στο επιπλέον κόστος παροχής που επιβάλλει η κάθε ομάδα στο σύνολο και μόνο σε αυτό.

Μαθηματικό μοντέλο. Το μαθηματικό μοντέλο είναι απλό και γενικό. Ας υποθέσουμε πως υπάρχουν G ομάδες, τις οποίες και συμβολίζουμε με $\mathcal{G} = \{1, \dots, G\}$. Το κύριο (και μοναδικό) μέρος του μοντέλου είναι η χαρακτηριστική συνάρτηση κόστους, την οποία συμβολίζουμε με c . Η συνάρτηση κόστους δέχεται ως όρισμα ένα σύνολο ομάδων, και επιστρέφει ως τιμή το κόστος παροχών για να εξυπηρετηθεί αυτό το σύνολο. Για παράδειγμα, όταν προσφέρονται παροχές σε όλες τις ομάδες, \mathcal{G} , τότε το κόστος είναι $c(\mathcal{G})$. Αν από τις ομάδες αφαιρέσουμε κάποια ομάδα, π.χ. την ομάδα i , τότε το κόστος παροχών είναι $c(\mathcal{G} \setminus \{i\})$.

Η διαφορά $c(\mathcal{G}) - c(\mathcal{G} \setminus \{i\})$ αντικατοπτρίζει το επιπλέον κόστος που επιφέρει η ομάδα i στο σύνολο των ομάδων. Γενικότερα, για οποιοδήποτε υποσύνολο ομάδων $S \subset \mathcal{G}$, η διαφορά

$$c_S^i = c(S \cup \{i\}) - c(S)$$

αντικατοπτρίζει το επιπλέον κόστος που επιφέρει η ομάδα i σε αυτό το σύνολο.

Βάσει αυτού του απλού και γενικού μοντέλου, η ερώτηση είναι ποια μεθοδολογία μπορεί να οδηγήσει σε έναν επιμερισμό του συνολικού κόστους $c(\mathcal{G})$ στις ομάδες, ώστε ο επιμερισμός να είναι δίκαιος. Ας συμβολίσουμε το μερίδιο κόστους της ομάδας i με c^i . Για να είναι δίκαιος ο επιμερισμός, ζητούμε να ικανοποιεί τα εξής σημαντικά αξιώματα:

1. *Αποδοτικότητα*. Ο επιμερισμός θα πρέπει να κατανέμει το συνολικό κόστος, δηλαδή $c^1 + c^2 + \dots + c^G = c(\mathcal{G})$.
2. *Συμμετρία*. Ο επιμερισμός θα πρέπει να είναι ανεξάρτητος από τον τρόπο συμβολισμού των ομάδων. Δηλαδή, το αν μία ομάδα συμβολιστεί ως η ομάδα 1 ή η ομάδα 2, η γενικότερα η ομάδα i , δε θα πρέπει να επηρεάζει το μερίδιο κόστους της.
3. *Οριακό κόστος*. Ο επιμερισμός θα πρέπει να εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από το επιπλέον ή οριακό κόστος που επιφέρει η κάθε ομάδα. Δηλαδή, αν για δύο ομάδες i και j τα οριακά τους κόστη είναι ίδια, $c_S^i = c_S^j \forall S \subset \mathcal{G}$, τότε και το μερίδιο κόστους τους θα πρέπει να είναι ίδιο, $c^i = c^j$.

Ο Shapley απέδειξε στην εργασία του πως υπάρχει μία και μοναδική μεθοδολογία που ικανοποιεί και τα τρία αξιώματα. Ως εκ τούτου, οποιαδήποτε άλλη μεθοδολογία θα παραβιάζει αναγκαστικά τουλάχιστον ένα από τα αξιώματα. Δεδομένου του πόσο βασικά και σημαντικά είναι τα αξιώματα για μία δίκαια κατανομή, η μεθοδολογία που πρότεινε ο Shapley θεωρείται το κατ'εξοχήν μοντέλο το οποίο καταλήγει σε έναν δίκαιο επιμερισμό κόστους. (βλ. επίσης και το βιβλίο 'Fair Allocation' του H. Peyton Young)

Η μεθοδολογία, που ονομάζεται μοντέλο τιμών Shapley, επιμερίζει το κόστος ως εξής:

$$c^i = \sum_{S \subset \{1, \dots, G\} \setminus \{i\}} \frac{|S|!(G - |S| - 1)!}{G!} \times c_S^i.$$

Δηλαδή, το μερίδιο της ομάδας i είναι ένας κατάλληλα σταθμισμένος μέσος όρος των επιπλέον κόστων που επιφέρει η ομάδα i .

Εφαρμογή στο Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας. Ας εξετάσουμε ένα δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που προσφέρει υπηρεσίες σε διάφορες ομάδες καταναλωτών. Για τον επιμερισμό του κόστους λειτουργίας του δικτύου, αν το ζητούμενο είναι αυτός

να γίνει βάσει του επιπλέον φόρτου που κάθε ομάδα προκαλεί, δηλαδή αν το ζητούμενο είναι ένας δίκαιος επιμερισμός, τότε βάσει της θεωρίας του Shapley, το μοντέλο τιμών Shapley είναι η ενδεδειγμένη μεθοδολογία.

Το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας προσφέρει υπηρεσίες σε όλες τις ομάδες καταναλωτών. Ως εκ τούτου, το κόστος λειτουργίας του στην πράξη αντικατοπτρίζει το κόστος παροχής υπηρεσιών σε όλες τις ομάδες. Εξ' ορισμού, αν το ζητούμενο είναι ο επιμερισμός να γίνει βάσει του επιπλέον φόρτου που κάθε ομάδα προκαλεί στο δίκτυο, τότε πρέπει να ήμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε το κόστος λειτουργίας του δικτύου αν παρείχε υπηρεσίες όχι σε όλες τις ομάδες, αλλά σε ένα υποσύνολο αυτών. Με το που υπάρχουν αυτές οι εκτιμήσεις, τότε στην ουσία έχουμε ορίσει τη χαρακτηριστική συνάρτηση κόστους ενός μοντέλου τιμών Shapley, και η προαναφερθείσα μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί. (βλ. Κεφάλαιο 3.1)