



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΕΥΦΥΗ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αγγελής Κατσιούφης

**Επίβλεψη :** Παύλος Σ. Γεωργιάκης, Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Νικόλαος Κουτσούκης, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΕΥΦΥΗ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αγγελής Κατσιούφης

**Επίβλεψη :** Πάυλος Σ. Γεωργιάκης, Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Νικόλαος Κουτσούκης, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 31<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2017.

.....  
Πάυλος Γεωργιάκης  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεώργιος Κορρές  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Κωνσταντίνος Βουρνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

.....  
Αγγελής Κατσιούφης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αγγελής Κατσιούφης, 2017.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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 τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η απόκριση ζήτησης (AZ) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποφυγή αιχμών τάσης και την εξισορρόπηση παραγωγής-κατανάλωσης μέσω της βέλτιστης κατανομής της κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος. Οι συνήθειες μέθοδοι AZ λειτουργούν σε χρονικό εύρος λεπτών έως ωρών. Εντούτοις, οι δυνατότητες που προσφέρουν οι νέες τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών και εποπτείας μπορούν να αναβαθμίσουν τον ρόλο της AZ σε συστήματα ρύθμισης τάσης σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας στον διαχειριστή του δικτύου περισσότερη ευελιξία στον έλεγχο της τάσης και επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο διανομής.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η υλοποίηση μιας μεθόδου κεντρικού ελέγχου της τάσης, η οποία μεταβάλλει κατά ένα μικρό ποσοστό την κατανάλωση ενέργειας ελαστικών φορτίων και την έγχυση ισχύος των συσκευών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω εκπομπής ενός σήματος ελέγχου χαμηλού ρυθμού μετάδοσης. Αρχικά υλοποιούνται δύο μέθοδοι υπολογισμού των συντελεστών ευαισθησίας ως προς την μεταβολή ενεργού και αέργου ισχύος. Η πρώτη βασίζεται στον Ιακωβιανό πίνακα του συστήματος ενώ η δεύτερη, η οποία προτιμάται, ακολουθεί μία περισσότερο αναλυτική μαθηματική προσέγγιση. Η δεύτερη μέθοδος επιτρέπει επιπλέον τον υπολογισμό των συντελεστών ευαισθησίας της τάσης ως προς την μεταβολή λήψης του συστήματος αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ) του υποσταθμού. Στη συνέχεια, γίνεται περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης, η αντικειμενική συνάρτηση του οποίου στοχεύει στον περιορισμό της διακύμανσης της τάσης εντός επιτρεπτών ορίων. Οι περιορισμοί του προβλήματος αποτελούνται από τον περιορισμό του ποσοστού ελεγχόμενης ισχύος κάθε ζυγού, καθώς επίσης και από τον περιορισμό για διατήρηση του συντελεστή ισχύος του δικτύου εντός ορίων.

Για την υλοποίηση της μεθόδου αναπτύχθηκε λογισμικό σε περιβάλλον GAMS και MATLAB. Η μέθοδος εφαρμόστηκε στο δίκτυο 13 ζυγών του IEEE, σε δίκτυο 83 και 135 ζυγών για τις περιπτώσεις 10%, 20% και 30% ρυθμιζόμενου φορτίου σε κάθε ζυγό. Επιπλέον, εξετάστηκε η περίπτωση μερικής απόκρισης του φορτίου και περιεγράφηκε η χρήση ειδικών συντελεστών για την προσαρμογή των περιορισμών του προβλήματος βελτιστοποίησης ανάλογα με την απόκριση του φορτίου. Αυτή η μέθοδος AZ προσφέρει νέες δυνατότητες στον διαχειριστή του δικτύου διανομής, όπως ρύθμιση τάσης σε πραγματικό χρόνο, καλύτερο έλεγχο της αέργου ισχύος καθώς και αρτιότερη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ του υποσταθμού.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Βέλτιστη ρύθμιση τάσης, απόκριση ζήτησης, ελαστικό φορτίο, συντελεστές ευαισθησίας τάσης, μερική απόκριση φορτίου, κεντρικός έλεγχος τάσης, έλεγχος φορτίου, έλεγχος αέργου ισχύος.



## **ABSTRACT**

Demand Response (DR) can be employed for voltage peak shaving, optimal allocation of electricity consumption as well as maintaining the balance between generation and consumption in the network. DR mechanisms operate in range of minutes to hours. Thus, the utilities by exploiting the new communication and monitoring technologies can upgrade DR mechanisms to real-time control systems, providing ancillary services to the distribution network operator (DNO).

The scope of this diploma thesis is to propose a centralized voltage control scheme which mainly relies on slightly varying the energy consumption of elastic loads by broadcasting a low-bit rate control signal on a fast scale. Furthermore, this signal can be used for controlling different energy storage devices. Two methods are implemented for the computation of voltage sensitivity coefficients subject to the change of both active and reactive load. The former relies on the Jacobian matrix of the system whereas the latter, which is preferred in this thesis, uses a more analytic mathematical approach, enabling also the computation of voltage sensitivity coefficients subject to tap changes in the substation's on load tap changer (OLTC) system. Consequently, an optimization model is introduced, which aims at minimizing voltage deviation. The problem's constraints are the percentage of the elastic load's consumption as well as the power factor limit.

The method is implemented using GAMS and MATLAB software packages. It was applied on the IEEE 13 nodes test feeder, an 83-bus and a 135-bus distribution test system considering 10%, 20% and 30% of elastic demand. Furthermore, a solution method is proposed for the case of partial load response using adjustment coefficients. This DR method provides new abilities to the DNO such as real time voltage regulation, better leverage on the requested reactive power as well as improved usage of the substation's OLTC.

## **KEY WORDS**

Demand Response, centralized voltage control, optimal voltage regulation, elastic appliances, voltage sensitivity coefficients, partial load response, load control, reactive power control.





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2016-2017 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιάκη, επίκουρου καθηγητή του Ε.Μ.Π., της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, δίνοντάς μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Νίκο Κουτσούκη, για τη βοήθεια και την καθοδήγησή του κατά την εκπόνηση της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, την αδερφή μου και τους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράστασή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

1.1	Αντικείμενο της εργασίας	1
1.2	Στόχοι και καινοτομία της εργασίας	2
1.3	Δομή της εργασίας	3

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

2.1	Όρια λειτουργίας των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	5
2.2	Μέθοδοι ελέγχου τάσης σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	6
2.2.1	Σύντομη περιγραφή των μεθόδων ελέγχου	6
2.2.2	Ορολογία σχετική με τις μεθόδους ελέγχου τάσης	8
2.2.3	Ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ σε Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ	10
2.2.4	Ρύθμιση τάσης με συσκευές επί των γραμμών	16

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΑΣΗΣ**

3.1	Εισαγωγή	19
3.2	Μέθοδος υπολογισμού συντελεστών ευαισθησίας τάσης μέσω ιακωβιανής	20
3.3	Μέθοδος υπολογισμού συντελεστών ευαισθησίας τάσης μέσω αναλυτικής μεθόδου	22
3.3.1	Θεώρημα Tellegen	22
3.3.2	Μέθοδος Υπολογισμού	22
3.4	Υπολογισμός συντελεστών ευαισθησίας τάσης με ΣΑΤΥΦ	25
3.5	Αριθμητικά αποτελέσματα	27

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΕΥΦΥΗ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

4.1	Έλεγχος ελαστικών φορτίων μέσω ενιαίου μεταδιδόμενου σήματος ελέγχου	33
4.2	Μοντέλο βελτιστοποίησης για τον έλεγχο τάσης σε ευφυή δίκτυα διανομής	36
4.3	Μερικώς αποκρινόμενο φορτίο – Συντελεστές προσαρμογής	41

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΕΥΦΥΗ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

5.1	Εισαγωγή	43
5.2	Το λογισμικό GAMS	43
5.2.1	Βασικά χαρακτηριστικά του λογισμικού GAMS	43
5.2.2	Αρχείο εξόδου προγράμματος μαθηματικού προγραμματισμού σε GAMS	47
5.2.3	Ο επιλύτης BONMIN	49
5.3	Περιβάλλον λογισμικού MATLAB	50
5.3.1	Το πακέτο λογισμικού MATPOWER	50
5.3.2	Περιγραφή βασικών συναρτήσεων της εργασίας	51
5.3.3	Η βιβλιοθήκη GDXMLRW	52

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

6.1	Εισαγωγή	55
6.2	Δίκτυο 13 Ζυγών του IEEE	55
6.2.1	Περίπτωση Α: Δυνατότητα ελέγχου 10% του φορτίου	57
6.2.2	Περίπτωση Β: Δυνατότητα ελέγχου 20% του φορτίου	63
6.2.3	Περίπτωση Γ: Δυνατότητα ελέγχου 30% του φορτίου	66
6.2.4	Περίπτωση Δ: Λειτουργία με μερική απόκριση φορτίου	69
6.3	Δίκτυο 83 Ζυγών	70
6.3.1	Περίπτωση Α: Δυνατότητα ελέγχου 10% του φορτίου	71
6.3.2	Περίπτωση Β: Δυνατότητα ελέγχου 20% του φορτίου	75
6.3.3	Περίπτωση Γ: Δυνατότητα ελέγχου 30% του φορτίου	77
6.3.4	Περίπτωση Δ: Λειτουργία με μερική απόκριση φορτίου	80
6.4	Δίκτυο 135 Ζυγών	84
6.4.1	Περίπτωση Α: Δυνατότητα ελέγχου 10% του φορτίου	85
6.4.2	Περίπτωση Β: Δυνατότητα ελέγχου 20% του φορτίου	90
6.4.4	Περίπτωση Δ: Λειτουργία με μερική απόκριση φορτίου	93

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

7.1	Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της	99
7.2	Επεκτάσεις της εργασίας	102

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ** 105

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΩΝ** 109





## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

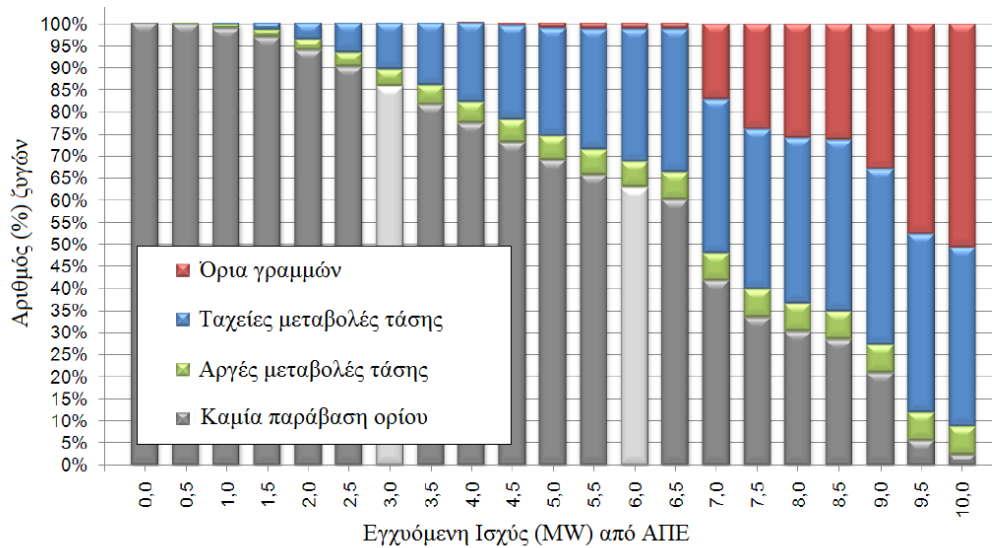
### 1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ σημαντικά επειδή εξυπηρετούν τις ανάγκες για ηλεκτρισμό. Τα πρώτα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.) δημιουργήθηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής στα τέλη της δεκαετίας του 1870. Έκτοτε, επεκτείνονται και εκσυγχρονίζονται διαρκώς. Το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα πολύ σύνθετο σύστημα, με διαρκώς νέες προκλήσεις και προβλήματα το οποίο παρόλα αυτά πρέπει να συμβαδίζει με τις εξελίξεις της εποχής του και τις ανάγκες της κοινωνίας. Το πρώτο Σ.Η.Ε. λειτούργησε με συνεχές ρεύμα και χρησιμοποιούνταν κυρίως για φωτισμό. Εντούτοις, η ανάγκη για μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας ολοένα και πιο μακριά, καθώς και οι νέες για την εποχή καινοτομίες, όπως ο μετασχηματιστής και η γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος, καθιέρωσαν το εναλλασσόμενο ρεύμα στα Σ.Η.Ε. Από τότε, πολλές καινοτομίες και αλλαγές έχουν καθιερωθεί, εξυπηρετώντας τις ανάγκες της εκάστοτε εποχής. Επεκτείνοντας διαρκώς τα δίκτυα, δημιουργήθηκε η ανάγκη για κατηγοριοποίηση σε Συστήματα Παραγωγής, Συστήματα Μεταφοράς και Δίκτυα Διανομής. Κάθε κατηγορία διακρίνεται για τα δικά της χαρακτηριστικά, της δικές της ανάγκες και συνήθως τον δικό τους διαχειριστή. Η γιγάντωση των δικτύων προκάλεσε σημαντική αύξηση των εξόδων για συντήρηση, λειτουργία και επέκταση. Γεννήθηκαν νέες προκλήσεις για μείωση του κόστους, λειτουργικού και επενδυτικού, καθώς και ένας νέος πολύ σημαντικός παράγοντας που είχε αγνοηθεί, οι περιβαλλοντικές συνέπειες [1].

Η δημιουργία και η διάδοση του ηλεκτρονικού υπολογιστή προσέφερε τη δυνατότητα για καλύτερη εποπτεία και έλεγχο του συστήματος. Παράλληλα με τα προηγμένα ηλεκτρονικά συστήματα, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) μπήκαν δυναμικά στα Σ.Η.Ε., δίνοντας ελπίδα για "πράσινη" ενέργεια στο μέλλον, δημιουργώντας παράλληλα νέες λειτουργικές, οικονομικές και θεσμικές προκλήσεις. Το γεγονός αυτό, δείχνει πόσο σύνθετα πλέον είναι τα Σ.Η.Ε. αλλά και πως είναι επιτακτική ανάγκη να ακολουθούν τις εξελίξεις στην οικονομία και την κοινωνία, παρόλες τις δυσκολίες που μπορούν να προκύψουν από αυτές. Σε αυτό το σημείο, βλέποντας τη δυναμική των νέων τεχνολογιών, γίνεται μία επανεξέταση του υπάρχοντος δικτύου. Άρχισε να εξετάζεται η απόδοση των Σ.Η.Ε. και τα περιθώρια βελτιστοποίησης της λειτουργίας τους με τα υπάρχοντα μέσα. Δημιουργήθηκε η έννοια του έξυπνου δικτύου, με χρήση ΑΠΕ, έξυπνων ηλεκτρικών συσκευών και μέσων τηλεμετρίας.

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας έγκειται στην προσπάθεια για βελτιστοποίηση της λειτουργίας των Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΔΗΕ), όσον αφορά τη διακύμανση της ηλεκτρικής τάσης. Τα ΔΔΗΕ δεν παρουσίαζαν ιδιαίτερη δυσκολία στον έλεγχο της τάσης μέχρι τα τελευταία έτη. Ωστόσο, η ολοένα αυξανόμενη διείσδυση παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στα ΔΔΗΕ προκαλεί μεγάλες διακυμάνσεις

στην τάση. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται μία μελέτη για ένα ιταλικό ΔΔΗΕ με μέσο φορτίο 4,5 MW και έγχυση ισχύος από ΑΠΕ έως 10 MW [2].



**Σχήμα 1.1:** Ποσοστό των ζυγών ενός ιταλικού δικτύου MT που παρουσιάζει προβλήματα διακύμανσης της τάσης με την αύξηση της εγχυόμενης ενέργειας από ΑΠΕ στο δίκτυο [2].

Η διείσδυση αυτή των ΑΠΕ θεωρείται πως στο μέλλον μπορεί να είναι ικανή να αντιστρέψει τη ροή της ισχύος σε ένα ΔΔΗΕ, έτσι ώστε αυτό να εγχέει ενέργεια στο υπόλοιπο δίκτυο. Ως εκ τούτου, δημιουργείται η πρόκληση περαιτέρω ελέγχου πραγματικού χρόνου των ΔΔΗΕ. Η εξέλιξη των μέσων τηλεπικοινωνίας των συσκευών του δικτύου μαζί με την βελτίωση των αλγορίθμων πρόβλεψης και εκτίμησης κατάστασης θέτουν νέες βάσεις για την ανάπτυξη μηχανισμών ελέγχου πραγματικού χρόνου [3].

## 1.2 ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να αναβαθμιστεί ο ρόλος της ρύθμισης του φορτίου, επικουρικά με τις υπόλοιπες μεθόδους, για τη βέλτιστη λειτουργία των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα τελευταία χρόνια τα προγράμματα απόκριση ζήτησης (Demand Response, DR) κερδίζουν έδαφος στο πεδίο της έρευνας. Ως απόκριση ζήτησης μπορεί να οριστεί η αλλαγή στη χρήση του δικτύου ενέργειας από τους καταναλωτές ανάλογα με την αλλαγή των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας και τις υποδείξεις του διαχειριστή του δικτύου. Ο τελικός καταναλωτής μετατρέπεται από απλός καταναλωτής σε ενεργό κύτταρο του δικτύου και βοηθά στην εύρυθμη λειτουργία του. Γενικά, υπάρχουν τρεις τρόποι να ενταχθούν οι χρήστες σε προγράμματα απόκρισης ζήτησης [4]:

- Πρώτον, οι καταναλωτές μπορούν να συνδράμουν μειώνοντας την κατανάλωσή τους σε ώρες αιχμής, όπου το δίκτυο τείνει να αγγίξει τα επιτρεπτά όρια, ενώ δεν αλλάζουν την συνηθισμένη κατανάλωσή τους την υπόλοιπη περίοδο. Αυτό γίνεται, για παράδειγμα, αν ρυθμιστούν οι συσκευές θέρμανσης και κλιματισμού σε ελαφρώς ηπιότερες θερμοκρασίες μειώνοντας την κατανάλωσή τους σε περιόδους αιχμής, γεγονός που μπορεί να αποφέρει μικρή δυσφορία στους χρήστες.



- Δεύτερον, εφαρμόζοντας κατάλληλη τιμολόγηση και ενημέρωση, ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να δώσει κίνητρο στους χρήστες να μετατοπίσουν ένα ευέλικτο μέρος της κατανάλωσής τους σε ώρες χαμηλής ζήτησης, όπως για παράδειγμα χρήση πλυντηρίων. Αυτό το πρόγραμμα συνήθως δεν απευθύνεται στους βιομηχανικούς χρήστες του δικτύου και αφορά το γενικότερο προφίλ κατανάλωσης των χρηστών μη επηρεάζοντας τη διάθεση των καταναλωτών.
- Ο τρίτος τρόπος αφορά τους καταναλωτές-παραγωγούς, όπου η διάθεση της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορεί να βοηθήσει στην κάλυψη μέρους της ζήτησης φορτίου.

Σε αυτή την εργασία γίνεται μελέτη για μία επέκταση του πρώτου τρόπου ένταξης των καταναλωτών σε πρόγραμμα απόκρισης ζήτησης, υποθέτοντας πως υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης ελαστικών φορτίων, όπως τα φορτία θέρμανσης και κλιματισμού. Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου ελέγχου τάσης σε πραγματικό χρόνο με τη βοήθεια των προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης.

Αυτό ο καινοτόμος αλγόριθμος, υποθέτει την ύπαρξη ενός ελεγκτή-δέκτη στις συσκευές αυτές, ο οποίος μπορεί και ανιχνεύει ένα σήμα που εκπέμπεται για αύξηση ή μείωση της κατανάλωσης. Η εργασία εξετάζει το πώς μπορεί να γίνει βέλτιστη ρύθμιση του δικτύου γνωρίζοντας ότι υπάρχει δυνατότητα ελέγχου ενός ποσοστού του φορτίου. Συγκεκριμένα, υποτίθεται πως σε κάθε ζυγό υπάρχει ένας ρυθμιστής (aggregator) ο οποίος λαμβάνει εντολή για την ιδανική ρύθμιση ισχύος στον συγκεκριμένο ζυγό και προσπαθεί να την υλοποιήσει συνδυάζοντας τη ρύθμιση ελαστικού φορτίου και τη χρήση εγκάρσιων πυκνωτών.

### 1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της εργασίας είναι η βέλτιστη ρύθμιση της τάσης σε δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με έλεγχο της ισχύος των ελαστικών φορτίων και του συστήματος αλλαγής τάσης υπό φορτίο (Σ.Α.Τ.Υ.Φ.) που είναι εγκατεστημένο στον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται οι κανονισμοί για τα όρια λειτουργίας των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και περιγράφονται οι υπάρχουσες μέθοδοι ελέγχου της τάσης στα δίκτυα αυτά.

Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύονται οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης και πως αυτοί γραμμικοποιούν τον έλεγχο της τάσης. Επιπλέον, παρουσιάζονται δύο μέθοδοι για τον υπολογισμό τους.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται το μοντέλο βελτιστοποίησης που στηρίζεται στους συντελεστές ευαισθησίας και γίνεται περιγραφή του ενιαίου μεταδιδόμενου σήματος για τον έλεγχο των ελαστικών φορτίων. Επιπλέον προτείνεται ένας τρόπος για την αντιμετώπιση του μερικής ανταποκρίσιμου φορτίου σε κάποιο ζυγό.

Στο **Κεφάλαιο 5** περιγράφεται το λογισμικό στο οποίο αναπτύχθηκε το πρόβλημα βελτιστοποίησης σε περιβάλλον GAMS, καθώς επίσης και το λογισμικό που δημιουργήθηκε η προσομοίωση του δικτύου για τη διάρκεια μίας μέρας, οι συναρτήσεις παραγωγής και επεξεργασίας του ενιαίου μεταδιδόμενου σήματος, οι συναρτήσεις υπολογισμού των συντελεστών ευαισθησίας της τάσης και των συντελεστών προσαρμογής (MATLAB).

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα δίκτυα στα οποία εφαρμόστηκαν οι προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και ο σχολιασμός τους. Χρησιμοποιήθηκαν δίκτυα των 13 ζυγών IEEE, 83 ζυγών και 135 ζυγών.

Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται μια σύνοψη της εργασίας και παρατίθενται προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις της.

## ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 2.1 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η διατήρηση της τάσης τροφοδότησης των καταναλωτών σε όσο το δυνατόν περισσότερο περιορισμένα όρια γύρω από την ονομαστική τάση λειτουργίας του Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΔΗΕ) αποτελεί έναν από τους πιο βασικούς παράγοντες της καλής ποιότητας εξυπηρέτησης των καταναλωτών. Οι μεταβολές της τάσης οφείλονται στη διακύμανση των φορτίων των ζυγών και στη διανεμημένη παραγωγή σε διάφορα σημεία του ΔΔΗΕ, κυρίως από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος από την προσδοκώμενη έχει ως αποτέλεσμα την πτώση τάσης σε ένα ζυγό ενώ η παραγωγή ισχύος που εγχέεται σε ένα ζυγό μπορεί να προκαλέσει ανύψωση τάσης. Οι μεταβολές της τάσης τροφοδότησης μπορούν να διακριθούν [5],[6]:

1. Στις αργές μεταβολές (ή διακυμάνσεις) της τάσης, οι οποίες οφείλονται στις μεταβολές του φορτίου ή της διανεμημένης παραγωγής και προκαλούν πτώσεις και ανυψώσεις τάσης στα στοιχεία του δικτύου ( γραμμές και μετασχηματιστές).
2. Στις απότομες μεταβολές της τάσης (συχνά διάρκειας δευτερολέπτων), οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε περιοδικά μεταβαλλόμενο φορτίο, για παράδειγμα σε ένα κινητήρα ή έναν συμπιεστή, στις μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας ορισμένων συσκευών, για παράδειγμα την εκκίνηση κινητήρων, ή τη διακοπόμενη λειτουργία αυτών. Ακόμα, μπορεί να οφείλονται στα μεταβατικά φαινόμενα που προκαλούνται από τη σύνδεση μονάδων παραγωγής με υπολογίσιμη ισχύ σε σχέση με την ισχύ του δικτύου.

Οι απότομες μεταβολές είναι φαινόμενο το οποίο δεν αντιμετωπίζεται συνήθως άμεσα από τον διαχειριστή του δικτύου αλλά έμμεσα μέσω διάφορων κανονισμών για τις προδιαγραφές λειτουργίας των συσκευών που συνδέονται στο ΔΔΗΕ, είτε οικιακών είτε επαγγελματικών.

Η αντιμετώπιση των αργών μεταβολών από την άλλη, αποτελεί αποκλειστική ευθύνη του διαχειριστή του δικτύου. Λόγω της συνεχούς μεταβολής του φορτίου και της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, είναι πρακτικά αδύνατο να μην υπάρχει διακύμανση στην τιμή της τάσης τροφοδότησης. Για τον λόγο αυτό, έχουν καθιερωθεί κάποια περιθώρια ασφαλούς διακύμανσης της τάσης, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τους οι κατασκευαστές ηλεκτρικών συσκευών που συνδέονται στο ΔΔΗΕ. Εντούτοις, ευθύνη του διαχειριστή του ΔΔΗΕ είναι η διατήρηση της τιμής της τάσης στα αποδεκτά αυτά όρια.

Τα επιτρεπτά όρια διακύμανσης της τάσης τροφοδότησης των καταναλωτών Χαμηλής Τάσης (ΧΤ), όπως καθορίστηκαν από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Ηλεκτροτεχνικής Τυποποίησης (CENELEC) και εγκρίθηκαν από την Ευρωπαϊκή Ένωση [7] και το Ελληνικό Κράτος, συνοψίζονται παρακάτω [8]:

1. Για την τάση τροφοδότησης των καταναλωτών ΧΤ η ονομαστική τιμή είναι 230V και η επιτρεπόμενη διακύμανση είναι +10%, -10%, δηλαδή από τα 207V μέχρι τα 253V. Η διακύμανση ορίζεται ως :

$$E_{\delta} = \frac{E_{max} - E_{min}}{2} \quad (2.1)$$

όπου,  $E_{max}$  η μέγιστη τάση του μεταβαλλόμενου μεγέθους και  $E_{min}$  η ελάχιστη.

2. Για τις γραμμές Μέσης Τάσης (ΜΤ), η τάση σε οποιοδήποτε σημείο επιτρέπεται να κυμαίνεται μέσα στην περιοχή  $E_{\mu} \pm 3\%$ , όπου  $E_{\mu}$  συμβολίζει τη μέση τιμή και ορίζεται ως :

$$E_{\mu} = \frac{E_{max} + E_{min}}{2} \quad (2.2)$$

Η μέση τιμή της τάσης μπορεί να διαφέρει από την ονομαστική τάση ( $E_N$ ) του ΔΔΗΕ, πρέπει όμως να ισχύει :

$$(E_N - 5\%) < E_{\mu} < (E_N + 5\%) \quad (2.3)$$

Το μεγαλύτερο πρόβλημα λόγω της αργής μεταβολής της τάσης παρουσιάζεται για μέγιστο φορτίο αλλά και για μέγιστη διείσδυση διανεμημένης παραγωγής. Η δεύτερη περίπτωση συμβαίνει κυρίως κατά τις μεσημεριανές ώρες που τα επίπεδα κατανάλωσης είναι χαμηλά και η παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά είναι μέγιστη.

## 2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 2.2.1 Σύντομη περιγραφή μεθόδων ελέγχου τάσης

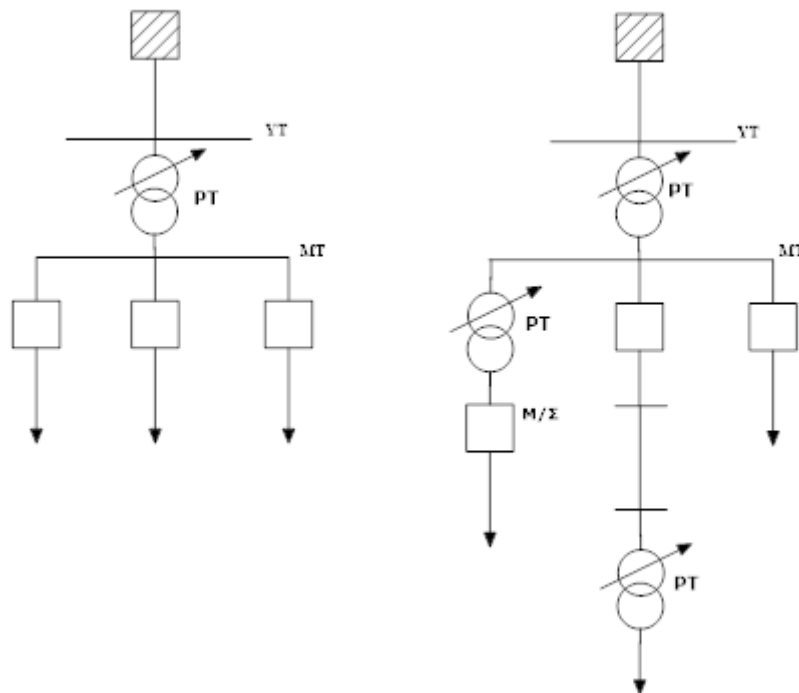
Προκειμένου να τηρηθεί η τάση του ΔΔΗΕ στα επιτρεπόμενα όρια χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα μέσα [6]:

1. Η ρύθμιση της τάσης στους υποσταθμούς Υψηλής Τάσης (ΥΤ) προς ΜΤ γίνεται μέσω Μετασχηματιστή (Μ/Σ) με Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) είτε μέσω αυτομετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ που συνδέεται μεταξύ του Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ του ζυγού ΜΤ της υποσταθμού. Οι συσκευές αυτές μεταβάλλουν την τάση εξόδου τους αυτόματα σε χρονική διάρκεια δευτερολέπτων.
2. Μ/Σ διανομής με δυνατότητα επιλογής μεταξύ εναλλακτικών λήψεων. Οι μετασχηματιστές αυτοί μπορούν να αλλάξουν τον λόγο μετασχηματισμού τους ανάλογα με την θέση των λήψεων στα τυλίγματα τους. Η αλλαγή των θέσεων αυτών γίνεται με τον Μ/Σ εκτός λειτουργίας και σε αραιά χρονικά διαστήματα.
3. Εγκάρσιοι πυκνωτές εγκατεστημένοι στις γραμμές ή τις διακλαδώσεις γραμμών ΜΤ προκαλώντας ανύψωση τάσης. Οι πυκνωτές αυτοί μπορεί να είναι μόνιμα

συνδεδεμένοι στο δίκτυο προκαλώντας μόνιμη ανύψωση τάσης, είτε μπορεί να είναι αποζεύξιμοι, ενισχύοντας την τάση σε περίπτωση που υπάρχει ανάγκη.

Οι ρυθμιστές τάσης (ΡΤ) υπό φορτίο υλοποιούνται με ΣΑΤΥΦ σε τυλίγματα ρύθμισης που είναι ενσωματωμένα στους Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ, σε σειρά προς ένα από τα δύο κύρια τυλίγματα του Μ/Σ, συνήθως το πρωτεύον. Η επαγόμενη τάση στο τυλίγμα ρύθμισης μπορεί να προστίθεται ή να αφαιρείται στην τάση του κύριου τυλίγματος μεταβάλλοντας την τάση συνήθως έως  $\pm 10\%$ , σε σπανιότερες περιπτώσεις έως  $\pm 15\%$ . Η μεταβολή αυτή στην τάση δεν γίνεται συνεχόμενα αλλά κατά διακριτά βήματα, στα ελληνικά δίκτυα συνήθως της τάξης του 1% της ονομαστικής τάσης.

Το ΣΑΤΥΦ είναι συνήθως ενσωματωμένο στον Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ του υποσταθμού του ΔΔΗΕ. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η ρύθμισή του να επηρεάζει όλες τις γραμμές ΧΤ που αναχωρούν από τον υποσταθμό αυτό. Θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι αργές μεταβολές σε όλες τις γραμμές. Αυτό συνήθως δεν απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή όταν τα φορτία των γραμμών είναι ίδιου τύπου, δηλαδή κυρίως οικιακά ή κυρίως βιομηχανικά. Για παράδειγμα, οι γραμμές με οικιακά φορτία έχουν παρόμοιες καμπύλες ζήτησης φορτίου, γεγονός που σημαίνει σχετικά ταυτοχρονισμένα μέγιστα και ελάχιστα. Αν σε έναν υποσταθμό υπάρχουν γραμμές με τελείως διαφορετικά χαρακτηριστικά και η ρύθμιση με κοινό Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ γίνεται δύσκολη, θα πρέπει να εγκατασταθεί αυτομετασχηματιστής (ρυθμιστής τάσης) με ΣΑΤΥΦ στην αφετηρία των γραμμών αυτών ακριβώς μετά από τον υποσταθμό. Επιπλέον, σε περιπτώσεις που το δίκτυο παρουσιάζει πρόβλημα στην τάση μετά από μεγάλη επέκταση, μπορεί να εγκατασταθεί ΡΤ αυτομετασχηματιστή σε ένα προβληματικό σημείο για τη ρύθμιση της τάσης από εκεί και ως το τέλος της γραμμής. Η πρακτική αυτή συνήθως γίνεται σχετικά βραχυπρόθεσμα (μερικά έτη), μέχρι να γίνουν περαιτέρω έργα για τη λύση του προβλήματος, όπως δημιουργία νέου υποσταθμού. Παραδείγματα για τη θέση εγκατάστασης των ρυθμιστών τάσης φαίνονται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Θέσεις εγκατάστασης ρυθμιστών τάσης.

Ο δεύτερος τρόπος ρύθμισης της τάσης τροφοδοσίας στα ΔΔΗΕ είναι μέσω των Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ με αλλαγή λήψεων. Οι λήψεις αυτές πραγματοποιούνται μόνο όταν ο Μ/Σ είναι αποσυνδεδεμένος από το δίκτυο και συνεπώς οι αλλαγές αυτές δεν συμβαίνουν συχνά. Για παράδειγμα, η λήψη του Μ/Σ μπορεί να αλλάξει στη διάρκεια μερικών ετών επειδή αυξήθηκε το φορτίο που είναι συνδεδεμένο στη γραμμή με την πάροδο του χρόνου και οι αργές μεταβολές του πλησιάζουν τα κατώτερα όρια της τάσης. Στην Ελλάδα, όπως και σε κάποιες άλλες χώρες της Ευρώπης, οι τυποποιημένες λήψεις των Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ είναι από -5% έως +5% με βήμα 2,5% που σημαίνει τις ίδιες μεταβολές στην τάση του πρωτεύοντος. Η ρύθμιση γίνεται σχεδόν πάντα στο πρωτεύον, δηλαδή στη ΜΤ. Στη ΜΤ κυκλοφορούν μικρότερα ρεύματα από ότι στη ΧΤ κάνοντας ευκολότερη την αλλαγή λήψης. Επίσης στη ΜΤ υπάρχουν περισσότερα τυλίγματα, επιτρέποντας ακριβέστερη ρύθμιση τάσης.

Ο τρίτος τρόπος αφορά τη χρήση εγκάρσιων πυκνωτών στα ΔΔΗΕ για τη ρύθμιση της τάσης. Οι πυκνωτές αυτοί συνδέονται είτε μόνιμα (οπότε ονομάζονται μόνιμοι πυκνωτές ή σταθεροί πυκνωτές ή μη αποζεύξιμοι πυκνωτές) είτε μέσω διακοπών και διατάξεως αυτοματισμού (οπότε ονομάζονται αποζεύξιμοι πυκνωτές). Η διάταξη αυτοματισμού αποτελείται βασικά από έναν ηλεκτρονόμο τάσης, ο οποίος προκαλεί τη ζεύξη των πυκνωτών, όταν η τάση βρεθεί κάτω από μία ορισμένη τιμή, προκαλώντας ανύψωση τάσης, είτε την απόζευξη των πυκνωτών, όταν αυτοί δεν χρειάζονται ή η συμβολή τους έχει προκαλέσει ανεπιθύμητη ανύψωση τάσης. Οι μόνιμοι πυκνωτές, δεν συμβάλουν στην αντιμετώπιση των αργών μεταβολών, ενώ η συμβολή τους είναι κυρίως για την ικανοποίηση του ορίου της μέσης τιμής της τάσης.

### 2.2.2 Ορολογία σχετική με τις μεθόδους ελέγχου τάσης

Πριν γίνει μια αναλυτική περιγραφή για τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούνται οι παραπάνω μέθοδοι, είναι ωφέλιμο να γίνει μία επεξήγηση χρήσιμων όρων που σχετίζονται με τη ρύθμιση τάσεως με τα παραπάνω μέσα [9].

- *Μέγιστη τάση ( $E_{max}$ ), Ελάχιστη τάση ( $E_{min}$ ):* Οι ακραίες τιμές της τάσης στο εξεταζόμενο σημείο του δικτύου. Ως ακραίες τιμές δεν λαμβάνονται υπόψη οι γρήγορες μεταβολές της τάσης και λοιπά μεταβατικά φαινόμενα. Για την αντικειμενικότερη μέτρηση των ακραίων τιμών λαμβάνεται ως τελική τιμή ο μέσος όρος τιμών χρονικού διαστήματος περίπου 5 λεπτών.
- *Μέση τιμή τάσης ( $E_{\mu}$ ):* Ο μέσος όρος της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής της τάσης, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.2).
- *Διακύμανση Τάσης ( $E_{\delta}$ ):* Η διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τάσης σε ένα σημείο του δικτύου, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.1). Εκφράζεται ως ποσοστό της ονομαστικής τάσης.
- *Σχετική απόκλιση τάσης (σε σχέση με την ονομαστική):* Η ποσοστιαία διαφορά της στιγμιαίας τάσης από την ονομαστική τάση :

$$E_{σχ.απ.} = \frac{E - E_N}{E_N} \quad (2.4)$$

- *Ρυθμιστής τάσης:* Μ/Σ ισχύος ή αυτομετασχηματιστής εφοδιασμένοι με ΣΑΤΥΦ.

- *Διάταξη ελέγχου ρυθμιστή*: Σύστημα που επιτρέπει τον επιμέρους έλεγχο του ρυθμιστή, χωρίς να επηρεάζει άμεσα την υπόλοιπη λειτουργία του Μ/Σ ισχύος ή του αυτομετασχηματιστή.
- *Λήψη*: Μία θέση του ΣΑΤΥΦ, τέτοια ώστε ένα μέρος του τυλίγματος του ρυθμιστή να βρίσκεται εντός του κυκλώματος.
- *Μεταγωγέας λήψεων*: Το σύστημα το οποίο πραγματοποιεί την αλλαγή λήψης.
- *Βήμα ή τάση βήματος*: Η διαφορά τάσης μεταξύ δύο διαδοχικών λήψεων. Είναι εύχρηστο η τάση αυτή να εκφράζεται ως ποσοστό της ονομαστικής τάσης και η τιμή της να αφορά την κατάσταση κενής λειτουργίας. Αυτό είναι απαραίτητο διότι σε λειτουργία υπό φορτίο η εσωτερική πτώση τάσης του Μ/Σ επηρεάζει τη διαφορά τάσης μεταξύ δύο διαδοχικών λήψεων.
- *Περιοχή ρυθμίσεως*: Η διαφορά τάσης εξόδου του Μ/Σ μεταξύ των δύο ακραίων τιμών που μπορεί να λάβει. Η κάθε μέτρηση αφορά λειτουργία χωρίς φορτίο και τροφοδότηση του Μ/Σ με ονομαστική τάση. Οι δύο ακραίες τιμές της τάσης αντιστοιχούν στις δύο ακραίες λήψεις του ΣΑΤΥΦ. Η περιοχή ρύθμισης χωρίζεται σε δύο επιμέρους περιοχές, την περιοχή ρύθμισης προς τα πάνω και την περιοχή ρύθμισης προς τα κάτω. Οι περιοχές αυτές χωρίζονται στο σημείο ονομαστικής τάσης. Η προς τα πάνω περιοχή περιλαμβάνει τιμές τάσεων εξόδου μεγαλύτερες της ονομαστικής τάσης εξόδου ενώ η περιοχή προς τα κάτω τιμές μικρότερες της ονομαστικής τάσης εξόδου.
- *Περιοχή λήψεων*: Όταν ο μεταγωγέας λήψεων βρίσκεται στην υψηλή τάση ( όπως συμβαίνει συνήθως ), ως περιοχή λήψεων ορίζεται η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ακραίων λήψεων του ΣΑΤΥΦ. Αυτό αντιστοιχεί στη μέγιστη διαφορά δυναμικού που συναντάται στην είσοδο του μετασχηματιστή , αντίθετα με την περιοχή ρύθμισης. Η περιοχή λήψεων χωρίζεται σε δύο επιμέρους περιοχές, την περιοχή λήψεων προς τα πάνω, που αντιστοιχεί στην υψηλότερη τάση εισόδου της ονομαστικής, και την περιοχή λήψεων προς τα κάτω, που αντιστοιχεί στην χαμηλότερη τάση εισόδου από την ονομαστική, όταν η τάση εξόδου είναι ίση με την ονομαστική. Όταν ο μεταγωγέας είναι συνδεδεμένος στη χαμηλή τάση (έξοδο) του Μ/Σ, ως περιοχή λήψεων ορίζεται η περιοχή ρύθμισης και αντίστροφα.
- *Τάση χωρίς φορτίο ( $E_0$ )*: Η ιδανική τάση εξόδου στην οποία έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί ο Μ/Σ όταν σε αυτόν δεν είναι συνδεδεμένο κάποιο φορτίο.
- *Τάση αντιστάθμισης ( $E_\alpha$ )*: Η ανύψωση ή πτώση τάσης που δημιουργείται στον ρυθμιστή τάσης λόγω του φορτίου.
- *Επιθυμητή τάση ( $E_\varepsilon$ )*: Το άθροισμα της τάσης χωρίς φορτίο και της τάσης αντιστάθμισης. Αποτελεί συνάρτηση της έντασης του φορτίου και είναι η ιδανική τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης.
- *Απόκλιση τάσης ( $\Delta E$ )*: Η διαφορά της τάσης στην έξοδο του ρυθμιστή από την επιθυμητή τάση για την τρέχουσα χρονική στιγμή. Συνήθως εκφράζεται ως εκατοστιαίο ποσοστό της ονομαστικής τάσης εξόδου.

$$\Delta E = \frac{E - E_\varepsilon}{E_N} 100\% \quad (2.5)$$

- *Απόκλιση διέγερσης της διάταξης ελέγχου*: Είναι η μικρότερη τιμή της απόκλισης τάσης που ενεργοποιεί το ΣΑΤΥΦ του ρυθμιστή τάσης, ώστε να αλλάξει την τάση

εξόδου του Μ/Σ μέσω αλλαγής λήψης. Αν η απόκλιση είναι θετική λέγεται απόκλιση διέγερσης προς τα πάνω ενώ αν είναι αρνητική ονομάζεται απόκλιση διέγερσης προς τα κάτω.

- *Εύρος ρύθμισης*: Σε περίπτωση που η απόκλιση διέγερσης προς τα πάνω είναι ίση με την απόκλιση διέγερσης προς τα κάτω, το εύρος ρύθμισης είναι διπλάσιο από την απόκλιση διέγερσης. Διαφορετικά δίνεται από τη διαφορά των δύο ακραίων τιμών της απόκλισης διέγερσης.
- *Χρονική καθυστέρηση διάταξης ελέγχου*: Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη στιγμή που έγινε αντιληπτή απόκλιση τάσης μεγαλύτερη από την απόκλιση διέγερσης, μέχρι τη στιγμή που δίνεται η εντολή από τη διάταξη ελέγχου του ΣΑΤΥΦ στον μεταγωγέα για αλλαγή λήψης.

### 2.2.3 Ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ σε Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ

Η ρύθμιση της τάσης στην έξοδο του υποσταθμού γίνεται με χρήση ΣΑΤΥΦ πάνω στον Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ που στεγάζεται στον υποσταθμό. Εάν αυτό δεν είναι δυνατό η ρύθμιση γίνεται με ΣΑΤΥΦ σε αυτομετασχηματιστή που συνδέεται απευθείας στην έξοδο του υποσταθμού. Ο αυτομετασχηματιστής χρησιμοποιείται και στην περίπτωση που μία ή περισσότερες γραμμές που τροφοδοτούνται από τον υποσταθμό χρειάζονται μόνιμα διαφορετικό χειρισμό στη ρύθμιση από τις υπόλοιπες.

Ο αυτομετασχηματιστής πέρα από την ονομαστική ισχύ λειτουργίας του, χαρακτηρίζεται και από μία εσωτερική ονομαστική ισχύ. Η δεύτερη ορίζεται ως το γινόμενο της πρώτης επί το μισό της περιοχής ρύθμισης εκφρασμένο ως ποσοστό της ονομαστικής ισχύος, δηλαδή εκφρασμένο σε ανά μονάδα τιμές με βάση την ονομαστική ισχύ. Η ανά μονάδα έκφραση της τάσης χρησιμοποιείται κατά κόρον στους παρακάτω υπολογισμούς και γενικότερα στις περιπτώσεις όπου εμπλέκονται Μ/Σ. Για παράδειγμα, ένας αυτομετασχηματιστής με ονομαστική (διερχόμενη) ισχύ 10,000 kVA και περιοχή ρύθμισης από -10% έως +10% της ονομαστικής τάσης έχει εσωτερική ισχύ 1000 kVA.

Τα ΣΑΤΥΦ που χρησιμοποιούνται στο ελληνικό δίκτυο ενέργειας είναι βηματικού τύπου, δηλαδή η μεταβολή της τάσης εξόδου χωρίς φορτίο μέσω του ΣΑΤΥΦ λαμβάνει διακριτές τιμές. Αυτό συμβαίνει διότι η ρύθμιση πραγματοποιείται μέσω μίας κινούμενης κεφαλής επαφής (μεταγωγέας λήψεων), η οποία κινείται σε διακριτές θέσεις χωρίς όμως να διακόπτεται το φορτίο του ρυθμιστή. Ο μεταγωγέας λήψεων βρίσκεται συνήθως στο τύλιγμα ΥΤ, όπου τα ρεύματα είναι μικρότερα και τα τυλίγματα μεγαλύτερα. Αν για παράδειγμα υπάρχει ΣΑΤΥΦ σε Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ με λόγο μετασχηματισμού 150/20 kV και περιοχή λήψεων -10% έως +10%, τότε ο Μ/Σ μπορεί να διατηρήσει σταθερή την τάση εξόδου του στα 20 kV αν η τάση εισόδου είναι μεγαλύτερη από 135 kV και μικρότερη από 175 kV. Για έναν αυτομετασχηματιστή ισχύει το ίδιο αλλά με τάση εισόδου μεταξύ 18 kV και 22 kV. Λόγω του ότι η τάση εξόδου λαμβάνει διακριτές τιμές, προκύπτει πως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος για αποκλίσεις τάσης μικρότερες από το μισό του βήματος ρύθμισης. Το βήμα ρύθμισης, ως εκ τούτου και η ακρίβεια ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ, εξαρτάται άμεσα από την περιοχή ρύθμισης και τον αριθμό των λήψεων. Το βήμα ρύθμισης προκύπτει από τη διαίρεση του πρώτου μεγέθους με το δεύτερο. Το παραπάνω ισχύει σε περίπτωση που το βήμα είναι σταθερό, ειδάλλως ο κατασκευαστής πρέπει να παρέχει πίνακα με το μέγεθος των βημάτων και την αντίστοιχη τάση εξόδου του Μ/Σ χωρίς φορτίο. Γενικά, ισχύει ότι όσο



μικρότερο είναι το βήμα, τόσο πιο ευαίσθητο στην απόκλιση τάσης και πιο ακριβές στις ρυθμίσεις του γίνεται το ΣΑΤΥΦ.

Η ενεργοποίηση του ρυθμιστή τάσης γίνεται αυτόματα από τη διάταξη ελέγχου. Το σύστημα αυτό δίνει εντολή για ρύθμιση προς τα πάνω σε περίπτωση που η απόκλιση της τάσης ξεπερνά την αντίστοιχη απόκλιση διέγερσης προς τα κάτω και εντολή για ρύθμιση προς τα κάτω αν ισχύει το αντίθετο. Για παράδειγμα, αν αυξηθεί πολύ η ισχύς του φορτίου και παρατηρηθεί πτώση τάσης στις γραμμές, το σύστημα ελέγχου αντιλαμβάνεται την απόκλιση τάσης και δίνει εντολή για αύξηση της τάσης εξόδου ώστε να αντισταθμίσει αυτή την πτώση τάσης. Η λειτουργία του ρυθμιστή είναι πολύ σημαντική διότι συμβάλει στην ανεξαρτησία της τάσης των ζυγών ΜΤ από την ΥΤ και την πτώση τάσης εντός του Μ/Σ. Πέρα από την αυτόματη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ, υπάρχει επιπλέον δυνατότητα ελέγχου μέσω ηλεκτρικού χειριστηρίου.

Η επιθυμητή τάση ορίζεται ως το άθροισμα της τάσης χωρίς φορτίο με την τάση αντιστάθμισης ( $E_\alpha$ ) η οποία είναι ανάλογη της ισχύος του φορτίου. Συγκεκριμένα, εξαρτάται από τη μέγιστη τιμή της τάσης αντιστάθμισης, η οποία αντιστοιχεί σε ονομαστικό φορτίο ( $P_N = \sqrt{3}I_N E_N$ ) του Μ/Σ έντασης που τροφοδοτεί το σύστημα ελέγχου. Ορίζεται στη σχέση (2.6) όπου οι τιμές των τάσεων είναι εκφρασμένες σε σύστημα ανά μονάδα με βασική τάση την ονομαστική και  $P$  μία τυχαία ισχύς.

$$E_\varepsilon = E_0 + \frac{P}{P_N} E_\alpha \quad (2.6)$$

Η τάση σε ένα σημείο του δικτύου, ή στους υποσταθμούς ορίζεται χρησιμοποιώντας τη μέση τάση ( $E_\mu$ ) και τη διακύμανση ( $E_\delta$ ) στο σημείο αυτό ως εξής :

$$E = E_\mu \pm E_\delta \quad (2.7)$$

Συνήθως η διακύμανση εκφράζεται σε ποσοστό επί τοις εκατό επί της ονομαστικής τάσης ( $\varepsilon_\delta = 100 \frac{E_\delta}{E_N} \%$ )<sup>1</sup>, οπότε για παράδειγμα η τάση δίνεται ως  $E = 20 \text{ kV} \pm 10\%$ . Πολλές φορές η μέση τιμή της τάσης εκφράζεται ως εκατοστιαίο ποσοστό της ονομαστικής τάσης ( $\varepsilon_\mu$ ) ως εξής:

$$E_\mu = \frac{E_N \pm \varepsilon_\mu}{100} \quad (2.8)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.8), η τάση ενός ζυγού μπορεί να εκφραστεί ως  $\varepsilon_\mu \pm \varepsilon_\delta = 2 \pm 1\%$ , που για ζυγό ονομαστικής τάσης 20 kV μεταφράζεται σε 20,4 kV ± 200V.

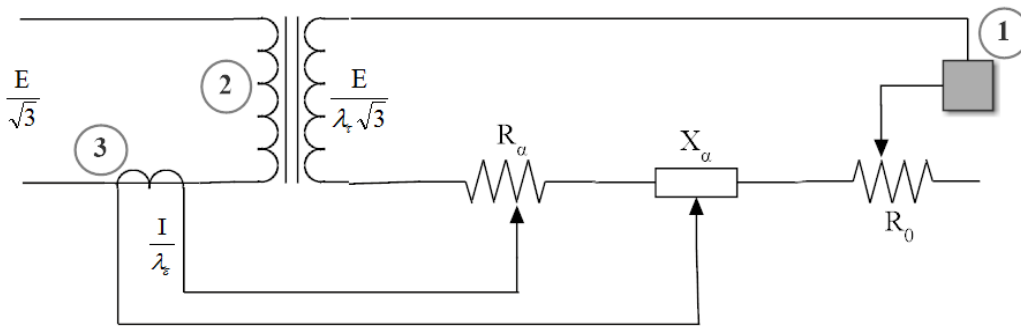
Η διάταξη ελέγχου (Σχήμα 2.2), ελέγχει τα επίπεδα της τάσης μέσω μετασχηματιστών τάσης και έντασης. Με άλλα λόγια, το κύκλωμα που αποτελεί τη διάταξη ελέγχου δεν θα μπορούσε να λειτουργεί με τα επίπεδα τάσης και έντασης που ισχύουν στο δίκτυο, οπότε ένας Μ/Σ τάσης και ένας Μ/Σ έντασης υποπολλαπλασιάζουν ανάλογα τις τιμές των μεγεθών αυτών. Ο Μ/Σ έντασης μεταφέρει την απόκλιση της τάσης στο κύκλωμα ελέγχου μέσω των αντιστάσεων  $R_a$  και  $X_a$ , στις οποίες προκαλείται ανάλογη πτώση τάσης με αυτή του δικτύου. Στη διάταξη υπάρχει συνδεδεμένη μία αντίσταση  $R_0$  η οποία χρησιμεύει για τη ρύθμιση της τάσης σε λειτουργία χωρίς φορτίο. Συνδέεται επίσης ένας βολτομετρικός ηλεκτρονόμος (H/N) ο οποίος δίνει την εντολή για ρύθμιση όταν

<sup>1</sup> Στο υπόλοιπο κεφάλαιο, το ίδιο γράμμα σε ένα σύμβολο, όταν χρησιμοποιείται με κεφαλαίο αναφέρεται σε πραγματικές τιμές ενώ όταν χρησιμοποιείται με πεζό (μικρό) αναφέρεται σε εκατοστιαίο ποσοστό του ίδιου μεγέθους ως προς το αντίστοιχο ονομαστικό μέγεθος.

ενεργοποιηθεί. Για να λειτουργήσει επομένως ο βολτομετρικός ηλεκτρονόμος, πρέπει η τάση να είναι μικρότερη από την ονομαστική, κατά μέγεθος μεγαλύτερο της απόκλισης τάσης διέγερσης προς τα κάτω ή αντίστοιχα μεγαλύτερη της απόκλισης τάσης διέγερσης προς τα πάνω. Αυτό συμβαίνει όταν η πτώση ή ανύψωση τάσης στις αντιστάσεις  $R_a$  και  $X_a$  λόγω της έντασης  $I$  που τις διαπερνά, ξεπεράσει την απόκλιση διέγερσης. Αν για παράδειγμα, σε τάση κενού φορτίου, η ένταση του φορτίου λάβει μια ένταση  $I$ , ο βολτομετρικός Η/Ν θα δώσει εντολή για ρύθμιση της τάσης μέχρι αυτή να λάβει την τιμή  $E = E_0 + K * I$ , όπου  $K$  είναι μία σταθερά που εξαρτάται από τον λόγο μετασχηματισμού των Μ/Σ έντασης ( $\lambda_\varepsilon$ ) και τάσης ( $\lambda_\tau$ ) του κυκλώματος ελέγχου καθώς και από τις αντιστάσεις  $R_a$  και  $X_a$ . Συγκεκριμένα η εντολή για ρύθμιση γίνεται :

$$\Delta E = \frac{\lambda_\tau}{\lambda_\varepsilon} I (R_a \cos\varphi + X_a \eta \mu\varphi) \quad (2.9)$$

όπου η μεταβολή της τάσης  $\Delta E$  αναφέρεται στην φασική τάση και  $\varphi$  είναι η γωνία της σύνθετης αντίστασης. Η διάταξη του Σχήματος 2.2 αποτελεί μία βασική απεικόνιση της λειτουργίας και όχι το πραγματικό κύκλωμα της διάταξης.



**Σχήμα 2.2:** Βασική διάταξη κυκλώματος ελέγχου του ΣΑΤΥΦ.

- Όπου: 1. Βολτομετρικός Ηλεκτρονόμος  
2. Μ/Σ τάσης με λόγο μετασχηματισμού  $\lambda_\tau$ .  
3. Μ/Σ έντασης με λόγο μετασχηματισμού  $\lambda_\varepsilon$ .

Η φασική πτώση τάσης σε ένα σημείο της γραμμής σε απόσταση  $l$  από τον ρυθμιστή, που τροφοδοτεί φορτίο με ένταση  $I$ , θα είναι :

$$E_{\pi\tau} = l I (r \cos\varphi + x \eta \mu\varphi) \quad (2.10)$$

όπου  $r$ ,  $x$  και  $\varphi$  είναι η ωμική αντίσταση της γραμμής ανά χιλιόμετρο, η επαγωγική αντίσταση της γραμμής ανά χιλιόμετρο και η γωνία της σύνθετης αυτής αντίστασης.

Σε κάθε γραμμή που αναχωρεί από τον ρυθμιστή, υπάρχει ένα σημείο στο οποίο η τάση έχει την ονομαστική τιμή. Εάν οι αντιστάσεις του κυκλώματος ελέγχου επιλεγθούν έτσι ώστε να είναι ανάλογες με τις αντιστάσεις της γραμμής τότε το σημείο αυτό θα έχει σταθερή τάση ανεξάρτητα του  $\cos\varphi$  και καλείται «σημείο ρύθμισης» (ή σταθερό σημείο). Εάν δεν επιλεγθούν έτσι ώστε να είναι ανάλογες, το σημείο αυτό μετακινείται κατά μήκος της γραμμής ανάλογα με το  $\cos\varphi$ . Αυτό δεν αποτελεί συνήθως πρόβλημα, διότι οι μεταβολές της γωνίας είναι συνήθως αρκετά μικρές με αποτέλεσμα μερικές διατάξεις ελέγχου να

χρησιμοποιούν μόνο ωμική αντίσταση χωρίς ιδιαίτερο πρόβλημα. Στην περίπτωση που υπάρχει φορτίο πριν το σημείο ρύθμισης, εάν αυτό μεταβάλλεται χωρίς να αλλάζει τη γωνία της αντίστασης της γραμμής, δεν επηρεάζει το σημείο ρύθμισης. Στην αντίθετη περίπτωση, εφόσον θα αλλάζει η γωνία, το σημείο μετακινείται κατά μήκος της γραμμής. Αν τα φορτία σε όλες τις γραμμές που αναχωρούν από τον μετασχηματιστή μεταβάλλονται ταυτόχρονα και ανάλογα με το συνολικό φορτίο του υποσταθμού, το σημείο ρύθμισης σε κάθε γραμμή θα παραμένει σταθερό. Με τον όρο ταυτόχρονα και αναλογικά με το συνολικό φορτίο εννοείται η μεταβολή του φορτίου μιας γραμμής με τρόπο τέτοιο που ο λόγος αυτού με το συνολικό φορτίο να παραμένει σταθερός.

Η απόσταση του σημείου ρύθμισης δίνεται από τη σχέση :

$$l_{\sigma.p.} = \frac{\lambda_{\tau} R_{\alpha}}{\lambda_{\varepsilon} r} = \frac{\lambda_{\tau} X_{\alpha}}{\lambda_{\varepsilon} x} \quad (2.11)$$

όπου  $r$  και  $x$  είναι η ωμική και επαγωγική αντίσταση της γραμμής. Η σχέση (2.11) ισχύει όταν ο Μ/Σ τάσης της διάταξης ελέγχου είναι συνδεδεμένος στη μία φάση. Συνήθως όμως ο Μ/Σ τάσης συνδέεται μεταξύ δύο φάσεων, οπότε η μετρούμενη τάση διαφέρει της φασικής κατά μέτρο και κατά γωνία. Εάν ο Μ/Σ έντασης είναι συνδεδεμένος σε μία από τις δύο φάσεις στις οποίες είναι συνδεδεμένος και ο Μ/Σ τάσης, θα έχει γωνιακή διαφορά 30 μοιρών σε κενό φορτίο. Άρα στο κύκλωμα της διάταξης ελέγχου θα υπάρχει απόκλιση 30 μοιρών μεταξύ τάσης και έντασης. Το σφάλμα αυτό στην πραγματικότητα δεν θεωρείται σημαντικό, παρόλα αυτά μπορεί να διορθωθεί αλλάζοντας τις αντιστάσεις σε :

$$R'_{\alpha} = 0,866R_{\alpha} + 0,5X_{\alpha} \quad (2.12)$$

$$X'_{\alpha} = 0,5R_{\alpha} + 0,866X_{\alpha} \quad (2.13)$$

Αν ο Μ/Σ έντασης συνδέεται στην άλλη φάση, τότε τα διανύσματα της τάσης και της έντασης στο κύκλωμα ελέγχου θα είναι κάθετα μεταξύ τους. Ως εκ τούτου, η ωμική αντίσταση θα είναι ίση με την επαγωγική και το αντίστροφο.

Η αντιστάθμιση της τάσης εξαρτάται από το συνολικό φορτίο του υποσταθμού. Αυτό συμβαίνει διότι όλες οι γραμμές αναχωρούν από τον Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ με ΣΑΤΥΦ του υποσταθμού. Για να γίνει αποδοτική η ρύθμιση της τάσης, ο διαχειριστής του υποσταθμού θα πρέπει να γνωρίζει το μέγιστο και ελάχιστο φορτίο κάθε γραμμής και τις αντίστοιχες πτώσεις τάσης. Επιπλέον, πρέπει να γνωρίζει τα βασικά χαρακτηριστικά του φορτίου κάθε γραμμής και αν η μεταβολή του ακολουθεί τη μεταβολή του συνολικού φορτίου ταυτόχρονα και αναλογικά. Όσον αφορά τη ρύθμιση της τάσης, διακρίνονται δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη το φορτίο των γραμμών μεταβάλλεται ταυτόχρονα και αναλογικά και η ρύθμιση μπορεί να εφαρμοστεί με τη χρήση υπολογισμών. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση όπου το φορτίο κάποιων γραμμών μεταβάλλεται σημαντικά ετεροχρονισμένα και μη αναλογικά με το συνολικό φορτίο του Υ/Σ ΥΤ/ΜΣ, ενδείκνυται η χρήση μετρήσεων από το δίκτυο ώστε να εφαρμοστεί με ασφάλεια η ρύθμιση της τάσης.

Για τον υπολογισμό της ρύθμισης τάσης για φορτία μεταβαλλόμενα ταυτόχρονα και αναλογικά αρκεί να καθοριστεί η θέση και η τάση του σημείου ρύθμισης μιας ιδεατής γραμμής. Έστω μία γραμμή με φορτία  $P_1 \dots P_n$  και σχετικές αποκλίσεις τάσης  $\varepsilon_{\alpha,1} \dots \varepsilon_{\alpha,n}$  στα σημεία τροφοδοσίας των φορτίων αυτών. Θα υπολογιστεί η θέση του σημείου ρύθμισης σε μία υποθετική γραμμή που θεωρείται πως τροφοδοτεί συγκεντρωμένο φορτίο, ίσο με το συνολικό φορτίο της γραμμής. Το φορτίο αυτό βρίσκεται στο λεγόμενο «χαρακτηριστικό

σημείο» της ιδανικής αυτής γραμμής. Το σημείο αυτό έχει, κατά ορισμό, σχετική απόκλιση τάσης ίση με:

$$\varepsilon_{\chi} = \sum_{i=1}^{\eta} \varepsilon_{\alpha,i} A_i \quad (2.14)$$

Όπου:

$\varepsilon_{\alpha,i} = \frac{E_i - E_N}{E_N} 100\%$ : Η επί τις εκατό ποσοστιαία απόκλιση τάσης από την ονομαστική.

$i$ : Ο δείκτης που δείχνει στο σύνολο των φορτίων ( $P_1 \dots P_{\eta}$ ) που αποτελούν το συνολικό φορτίο της ιδανικής γραμμής.

$E_i$ : Η τάση στο σημείο τροφοδοσίας του σημείου  $i$ .

$A_i = \frac{P_{\eta}}{P_{\gamma\text{ραμμής}}}$ : Ο συντελεστής βαρύτητας κάθε φορτίου.

Η ιδανική ρύθμιση της τάσης για την περίπτωση μίας γραμμής συμβαίνει όταν το χαρακτηριστικό σημείο της γραμμής αυτής ταυτιστεί με το σημείο ρύθμισης. Το χαρακτηριστικό σημείο βρίσκεται συνήθως στο σημείο της γραμμής που αντιστοιχεί στο 40% του συνολικού φορτίου της γραμμής. Αυτό ισχύει και για μη ομοιόμορφα κατανομημένο φορτίο εκτός όμως της περίπτωσης συγκεντρωμένου φορτίου που ξεπερνά το 50% του ολικού φορτίου της γραμμής όπου η μέθοδος πρέπει να τροποποιηθεί και δεν αναφέρεται στην παρούσα εργασία. Για την περίπτωση όπου δεν υπάρχει συγκεντρωμένο φορτίο, αν από τον υποσταθμό αναχωρούν  $\nu$  γραμμές ΜΤ με φορτία ( $P_1 \dots P_{\nu}$ ) καθορίζεται ένα χαρακτηριστικό σημείο για κάθε μία από αυτές. Αν οι αντίστοιχες τάσεις των χαρακτηριστικών σημείων είναι  $\varepsilon_{\chi,1} \dots \varepsilon_{\chi,\nu}$ , μπορεί να υπολογιστεί το χαρακτηριστικό σημείο μιας ιδεατής γραμμής που η τάση του θα είναι :

$$E_{\chi} = \sum_{i=1}^{\eta} \varepsilon_{\chi,i} A_i \quad (2.14)$$

όπου:

$A_i = \frac{P_{\gamma\text{ραμμής } i}}{P_{\text{ολικό}}}$  είναι ο συντελεστής βαρύτητας κάθε γραμμής ως προς το συνολικό φορτίο.

φορτίο.

Η «ιδεατή» γραμμή αναπαριστά όλες τις γραμμές που αναχωρούν από τον Μ/Σ του υποσταθμού ώστε να μπορέσει να επιτευχθεί μία ενιαία ρύθμιση τάσης. Η βέλτιστη ρύθμιση πάλι τείνει να ταυτίσει το σημείο ρύθμισης με το χαρακτηριστικό σημείο της ιδεατής γραμμής. Όπως συμπεραίνεται από τα παραπάνω, όταν αναφέρεται βέλτιστη ρύθμιση της τάσης, εννοείται βέλτιστη κατανομή των διακυμάνσεων της τάσης και όχι ξεχωριστός περιορισμός για κάθε σημείο ώστε να μην υπερβαίνει τα προδιαγεγραμμένα όρια.

Στην περίπτωση όπου η μεταβολή των φορτίων δεν είναι ταυτόχρονη και ανάλογη με το συνολικό φορτίο του υποσταθμού, το χαρακτηριστικό σημείο της αντίστοιχης ιδεατής γραμμής δεν είναι σταθερό. Οπότε γενικά χρησιμοποιείται το χαρακτηριστικό σημείο όπως αυτό μετρήθηκε για μέγιστο συνολικό φορτίο (ή και ελάχιστο σε περίπτωση που το συγκεκριμένο δίκτυο κινδυνεύει από υπέρταση), προκειμένου η ρύθμιση τάσης να εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία του δικτύου κατά την ακραία περίπτωση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η κατανομή της διακύμανσης της τάσης να μην είναι η βέλτιστη δυνατή σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

Η παρουσίαση των παραπάνω μεθόδων αποτελεί μια απλή εισαγωγή στη θεωρία του προβλήματος επιλογής των ρυθμίσεων του ΣΑΤΥΦ για τη ρύθμιση της τάσης. Στην πραγματικότητα, κατά τη ρύθμιση της τάσης στα ΔΔΗΕ παρουσιάζονται ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και παραλλαγές μεταξύ των διάφορων υποσταθμών και δικτύων, οπότε ο πρακτικός έλεγχος μπορεί να παρουσιάζει διαφοροποιήσεις και επιπρόσθετες λεπτομέρειες, τηρώντας όμως τα πλαίσια των παραπάνω βασικών αρχών.

Οι βασικές αρχές για την επιλογή των ρυθμίσεων της τάσης από το ΣΑΤΥΦ, όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω, έχουν ως βασικό κριτήριο την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος της διακύμανσης της τάσης στα διάφορα σημεία του δικτύου. Κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή κατανομή των διακυμάνσεων της τάσης. Ωστόσο στις μεθόδους αυτές δεν αναφέρεται κάποιος περιορισμός ο οποίος να εξασφαλίζει την τήρηση των ορίων για κάθε διακύμανση ξεχωριστά. Με άλλα λόγια, υπάρχει πιθανότητα να έχει επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή κατανομή των τάσεων αλλά σε μία απομακρυσμένη γραμμή με μικρό συντελεστή φορτίου η πτώση τάσης να ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια.

Για τον έλεγχο των ρυθμίσεων μετριέται η τάση στους ζυγούς του δικτύου και ελέγχεται αν τηρούνται τα επιτρεπτά όρια μέσης τάσης και διακύμανσης. Στην περίπτωση που τα φορτία μεταβάλλονται ταυτόχρονα και αναλογικά προς το ολικό φορτίο του υποσταθμού, ελέγχεται η τάση στο σημείο του δικτύου που παρουσιάζεται η μεγαλύτερη διακύμανση της τάσης από την ονομαστική τιμή. Για το σημείο αυτό υπολογίζονται οι ακραίες τιμές της τάσης και αν είναι εντός ορίων η ρύθμιση θεωρείται επιτυχημένη. Σε περίπτωση που υπάρχουν φορτία που δεν μεταβάλλονται ταυτόχρονα και αναλογικά ως προς το συνολικό φορτίο, γίνεται ο προηγούμενος έλεγχος για τις γραμμές των οποίων τα φορτία μεταβάλλονται ταυτόχρονα και αναλογικά, ενώ για τις υπόλοιπες γραμμές γίνεται έλεγχος της μέγιστης και ελάχιστης τάσης από την έξοδο του υποσταθμού μέχρι τον τερματισμό τους. Επίσης καταγράφεται η ώρα για την οποία ισχύουν οι ακραίες αυτές τιμές της τάσης.

Αν από τον παραπάνω έλεγχο διαπιστωθεί κάποια παράβαση των επιτρεπτών ορίων της τάσης, πραγματοποιούνται οι κατάλληλες διορθώσεις στη ρύθμιση. Σε περιπτώσεις που υπάρχουν γραμμές οι οποίες παρουσιάζουν πολύ μεγάλη πτώση τάσης, της τάξης του 15%, η τήρηση της τάσης αυτής εντός ορίων αποτελεί τον πρωταρχικό παράγοντα για την επιλογή της προς εφαρμογή ρύθμισης, παρά η μέθοδος ρύθμισης η οποία παρουσιάστηκε προηγουμένως. Σε αυτή την περίπτωση, υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστούν υπερτάσεις σε κάποια σημεία του δικτύου. Για να αντιμετωπιστούν τέτοια προβλήματα, είτε λαμβάνεται αυτή η γνώση από την αρχή υπόψη για την επιλογή της ρύθμισης και βρίσκεται μια μέση λύση για τη ρύθμιση αν είναι εφικτό, είτε συμφέρει να εφαρμοστεί επιπλέον έλεγχος της τάσης μέσω άλλων συσκευών. Για παράδειγμα, αντιστάθμιση με πυκνωτές ή Μ/Σ με αλλαγή λήψεων στις γραμμές που έχουν μεγάλο πρόβλημα. Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται επίσης διότι πρέπει να αποτρέπεται η εφαρμογή ακραίων θέσεων του μεταγωγέα λήψεων του ΣΑΤΥΦ.

Γενικά, όσον αφορά τη συχνότητα της χρήσης του ΣΑΤΥΦ θέτονται κάποιοι περιορισμοί λειτουργίας. Ο αριθμός των χρήσεων δεν πρέπει να ξεπερνά τις 20-30 ανά ημέρα (ιδανικά μέχρι 15) ώστε να προστατεύονται οι επαφές του μεταγωγέα από τη φθορά. Για τον περιορισμό αυτό χρησιμοποιείται χρονική καθυστέρηση μεταξύ δύο διαδοχικών ρυθμίσεων. Ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις, η καθυστέρηση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υπόταση ή υπέρταση σε κάποιο σημείο του δικτύου. Για να επιτευχθεί ένας ικανοποιητικός συμβιβασμός, η χρονική καθυστέρηση μεταξύ δύο διαδοχικών ρυθμίσεων δεν είναι σταθερή αλλά αντίστροφου χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι για μικρές αποκλίσεις της τάσης η

καθυστέρηση μπορεί να είναι μεγάλη ενώ όσο αυξάνεται η απόκλιση της τάσης το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο ρυθμίσεων γίνεται μικρότερο.

Σημαντικό παράγοντα για τη συχνότητα της χρήσης του ΣΑΤΥΦ αποτελεί ο λόγος βήματος της τάσης προς την απόκλιση διέγερσης. Συγκεκριμένα, αν η απόκλιση διέγερσης είναι μικρότερη από το βήμα της τάσης μεταξύ δύο διαδοχικών λήψεων, το ΣΑΤΥΦ θα ενεργοποιείται συνεχώς προσπαθώντας να ισορροπήσει μεταξύ των δύο αντίστοιχων λήψεων. Συνεπώς, η τάση διέγερσης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το βήμα της τάσης και συγκεκριμένα συνηθίζεται να επιλέγεται τιμή περίπου 1,5 ή 2 φορές μεγαλύτερη από την τιμή του βήματος.

### 2.2.3 Ρύθμιση τάσης με συσκευές επί των γραμμών

Οι αυτομετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ, λεγόμενοι και αυτοί ρυθμιστές τάσης, λειτουργούν ακριβώς όπως και οι ρυθμιστές τάσης που είναι εγκατεστημένοι στους Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ. Στα ελληνικά ΔΔΗΕ, συνήθως χρησιμοποιούνται ρυθμιστές τάσης με περιοχή ρύθμισης  $\pm 10\%$ , 33 λήψεις και βήμα 5/8%. Αυτοί εγκαθίστανται σε σημεία των γραμμών που παρουσιάζουν πρόβλημα στην τάση τους, και ρυθμίζουν την τάση από αυτό το σημείο μέχρι το τέλος της γραμμής. Η εγκατάσταση ενός τέτοιου μέσου ρύθμισης της τάσης είναι πολλές φορές χρονοβόρα και ακριβή διαδικασία. Πέρα από το μέγεθος του προβλήματος της τάσης, λαμβάνεται υπόψη η μελλοντική εξέλιξη των φορτίων, έτσι ώστε να αποφευχθεί μελλοντική μετακίνηση του ρυθμιστή, η δυνατότητα εξεύρεσης του απαιτούμενου χώρου για την εγκατάσταση, η προσβασιμότητα του σημείου εγκατάστασης και η ευχέρεια κατασκευής διπλού τέρματος της γραμμής.

Οι πυκνωτές σε παράλληλη σύνδεση χρησιμοποιούνται στα δίκτυα διανομής για την ανύψωση της τάσης ή τον περιορισμό της διακύμανσης της τάσης και τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος. Η διόρθωση του συντελεστή ισχύος έχει σαν αποτέλεσμα την αποφόρτιση του δικτύου και την μείωση των απωλειών. Οι πυκνωτές χαρακτηρίζονται από το μέγεθος της χαρακτηριστικής τους ισχύος σε  $CKVA$  (χωρητικά  $kVA$ ) μέσω της σχέσης :

$$CKVA = E_N^2 2\pi f C 10^{-3} \quad (2.17)$$

όπου:

$E_N$ : Η ονομαστική τάση σε kV.

$f$ : Η συχνότητα (Hz)

$C$ : Η χωρητικότητα ( $\mu F$ )

Στα ελληνικά ΔΔΗΕ χρησιμοποιείται συνήθως τριφασική συστοιχία πυκνωτών συνδεδεμένη κατά αγείωτο αστέρα. Οι συνηθέστερες τιμές για την ισχύ μίας συστοιχίας πυκνωτών είναι 300, 450, 600 ή 900  $CKVA$ .

Προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή βελτίωση της τάσης θα πρέπει ο πυκνωτής να εγκατασταθεί στο τέλος της γραμμής. Παρόλα αυτά, πολλές φορές αντί αυτού προτιμάται η εγκατάσταση περισσότερων πυκνωτών μικρότερης ισχύος κατά μήκος της γραμμής ώστε να αποφευχθεί η μεγάλη ανύψωση τάσης σε ένα σημείο της γραμμής. Όσο μεγαλύτερη είναι η διασπορά των πυκνωτών τόσο μειώνονται οι απώλειες του δικτύου.

Σε περίπτωση που το πρόβλημα της τάσης είναι μόνιμο επιλέγονται στατικοί πυκνωτές μόνιμα συνδεδεμένοι στη γραμμή. Αντίθετα, αν η τάση παρουσιάζει πρόβλημα συγκεκριμένες ώρες της ημέρας ή γενικά το πρόβλημα παρουσιάζεται επαναλαμβανόμενα και όχι συνεχόμενα, επιλέγονται αποζεύξιμοι πυκνωτές οι οποίοι συνδέονται στο δίκτυο μόνο όταν χρειάζεται.

Γενικά, τίθενται κάποιοι βασικοί κανόνες για τη λειτουργία των πυκνωτών. Αρχικά, ισχύει κατά κανόνα ότι η ισχύς από τη συστοιχία πυκνωτών δεν πρέπει να ξεπερνά την άεργο ισχύ του φορτίου κατά την ώρα ελάχιστου φορτίου. Επίσης, δεν πρέπει να ξεπερνά το διπλάσιο της άεργου ισχύος του φορτίου κατά την περίπτωση του μέγιστου φορτίου. Όσον αφορά την ανύψωση της τάσης, οι πυκνωτές δεν θα πρέπει να προκαλούν αύξηση της τιμής της τάσης μεγαλύτερη του 3-4% ώστε να μην προκαλείται αισθητό άλμα τάσης κατά τη σύνδεση ή αποσύνδεση της συστοιχίας.

Στο ΔΔΗΕ για την τήρηση της μέσης τιμής της τάσης σε επιθυμητά επίπεδα χρησιμοποιούνται Μ/Σ με δυνατότητα αλλαγής λήψης στο τύλιγμα του πρωτεύοντος. Οι Μ/Σ που χρησιμοποιούνται στα ελληνικά ΔΔΗΕ συνηθίζεται να έχουν ονομαστική τάση 20000 V στην πλευρά μέσης τάσης και 220 V στη γραμμή χαμηλής τάσης. Οι τυποποιημένοι (κατά GR 46) Μ/Σ διανομής έχουν σχέση μετασχηματισμού 20000/231V ή αλλιώς  $E_{N,MT} : (E_{N,XT} + 5\%)$ . Συνήθως οι Μ/Σ διαθέτουν 5 δυνατές λήψεις (Πίνακας 2.1):

**Πίνακας 2.1:** Οι δυνατές θέσεις του μεταγωγέα λήψεων Μ/Σ διανομής με δυνατότητα αλλαγής λήψεων και οι αντίστοιχοι λόγοι μετασχηματισμού.

Θέση 1	$E_{N,MT} : (E_{N,XT} + 10\%)$
Θέση 2	$E_{N,MT} : (E_{N,XT} + 7,5\%)$
Θέση 3	$E_{N,MT} : (E_{N,XT} + 5\%)$
Θέση 4	$E_{N,MT} : (E_{N,XT} + 2,5\%)$
Θέση 5	$E_{N,MT} : E_{N,XT}$

Τα όρια της διακύμανσης της τάσης για το δίκτυο ΧΤ είναι  $\pm 5\%$ , όσο είναι και η δυνατότητα ρύθμισης τάσης του Μ/Σ διανομής. Ως εκ τούτου θα μπορούσε η τάση να διορθωθεί από τις συσκευές αυτές. Ωστόσο, η μέγιστη επιτρεπόμενη διακύμανση της τάσης στο δίκτυο ΜΤ είναι  $\pm 3\%$  της ονομαστικής ενώ η τάση εξόδου του Μ/Σ διανομής είναι αρχικά  $+5\%$ . Λαμβάνοντας υπόψη αυτά, η διακύμανση της τάσης στην έξοδο του Μ/Σ είναι  $+5\% \pm 3\%$  της ονομαστικής, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η εσωτερική πτώση τάσης στον Μ/Σ διανομής. Οι τυποποιημένοι Μ/Σ διανομής έχουν τάση βραχυκύκλωσης έως  $4,5\%$  και υπό πλήρες φορτίο με συντελεστή ισχύος 0,8 η πτώση τάσης στην έξοδό τους φτάνει το  $3\%$ . Άρα, η πτώση τάσης από την είσοδο του Μ/Σ μέχρι τα άκρα μίας γραμμής μπορεί να φτάσει το  $8\%$ , δεδομένου ότι το όριο διακύμανσης για την ΧΤ είναι  $\pm 5\%$  και η μέγιστη πτώση τάση στον Μ/Σ είναι  $3\%$ . Στη χειρότερη περίπτωση, όταν το φορτίο της ΜΤ και της ΧΤ είναι ταυτόχρονα μέγιστα, η μεγαλύτερη διακύμανση τάσης στο άκρο του δικτύου μπορεί να είναι  $0\pm 6\%$ . Όμως αυτό σπάνια συμβαίνει, αφενός διότι οι Μ/Σ διανομής σπάνια φορτίζονται σε πλήρη ισχύ και αφετέρου γιατί ο ταυτοχρονισμός των φορτίων ΜΤ και ΧΤ είναι σπάνιος. Συνεπώς η τάση σπάνια ξεπερνά το  $\pm 5\%$  της ονομαστικής.





## ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΑΣΗΣ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στον ορισμό των συντελεστών ευαισθησίας τάσης, στην χρησιμότητά τους και στους τρόπους υπολογισμού τους [10]. Οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης είναι αλγεβρικοί συντελεστές που είναι ίσοι με την πρώτη παράγωγο της τάσης ως προς το μέγεθος που εξετάζεται η εξάρτηση αυτής. Με τους συντελεστές αυτούς μπορεί να γραμμικοποιηθεί το μη γραμμικό πρόβλημα ρύθμισης της ηλεκτρικής τάσης ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με μικρά περιθώρια σφάλματος. Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας προκαλούνται βυθίσεις και ανυψώσεις τάσης ανάλογα με την υπερφόρτωση ή υποφόρτιση της ισχύος των ζυγών. Οι αλλαγές στην τάση και την ισχύ ενός ζυγού επηρεάζει τους υπόλοιπους ζυγούς με διαφορετική βαρύτητα, η οποία εκφράζεται ουσιαστικά κατά προσέγγιση από τους συντελεστές ευαισθησίας. Χρησιμοποιώντας λοιπόν τα παραπάνω είναι δυνατόν να απλοποιηθεί η εποπτεία και ο έλεγχος του συστήματος. Στα συστήματα μεταφοράς κυρίαρχο ρόλο παίζει η άεργος ισχύς εφόσον η ωμική αντίσταση των γραμμών είναι κατά πολύ μικρότερη από την επαγωγική. Όμως, στα δίκτυα διανομής τα οποία εξετάζονται στην παρούσα εργασία, οι ωμικές και οι επαγωγικές αντιστάσεις είναι απολύτως συγκρίσιμες. Χρησιμοποιώντας λοιπόν τους συντελεστές της τάσης ως προς την ενεργό και άεργο ισχύ απλοποιείται το πρόβλημα βελτιστοποίησης της ρύθμισης της τάσης. Επιπλέον υπολογίζονται και οι συντελεστές των ζυγών ως προς τη ρύθμιση του ΣΑΤΥΦ, δηλαδή η βαρύτητα κάθε ζυγού στην απόφαση της αλλαγής λήψης του ΣΑΤΥΦ. Έστω ένα δίκτυο με  $N$  ζυγούς φορτίου και  $D$  ζυγούς αναφοράς. Έστω  $K$  το σύνολο των ζυγών:

$$K = N \cup D \quad (3.1)$$

Προκειμένου να γραμμικοποιηθούν οι εξαρτήσεις μεταξύ των ζυγών σε κάθε χρονική στιγμή  $t$ , πρέπει να είναι γνωστή η τάση σε κάθε ζυγό ( $\bar{E}_i$ ), για κάθε  $i \in N$  ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η εξάρτησή της ως προς την ενεργό ( $P_l$ ) και άεργο ισχύ ( $Q_l$ ) του ζυγού  $l$ , όπου  $l \in N$  και ως προς την τάση του ζυγού αναφοράς ( $E_{slack}$ ). Οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης ορίζονται ως η πρώτη μερική παράγωγος του μέτρου της τάσης ως προς την ενεργό και την άεργο ισχύ:

$$K_{P,il}(t) = \frac{\partial |\bar{E}_i|}{\partial P_l}(t),^2 \quad \forall i, l \in N \quad (3.2)$$

$$K_{Q,il}(t) = \frac{\partial |\bar{E}_i|}{\partial Q_l}(t), \quad \forall i, l \in N \quad (3.3)$$

---

<sup>2</sup> Με  $\bar{x}$  (πάνω μπάρα) συμβολίζεται μιγαδικός αριθμός ενώ με  $\underline{x}$  (κάτω μπάρα) ο συζυγής του.

$$K_{n,il}(t) = \frac{\partial |\bar{E}_i|}{\partial |E_{slack}|}(t), \quad \forall i, l \in N \quad (3.4)$$

Ο συντελεστής ευαισθησίας της τάσης του ζυγού  $i$  ως προς τη μεταβολή ενεργού ισχύος του ζυγού  $l$  τη χρονική στιγμή  $t$  ( $K_{P,il}(t)$ ) δίνεται από τη σχέση (3.2). Η (3.3) υπολογίζει τον συντελεστή ευαισθησίας της τάσης του ζυγού  $i$  ως προς τη μεταβολή της αέργου ισχύος του ζυγού  $l$  τη χρονική στιγμή  $t$  ( $K_{Q,il}(t)$ ). Ο συντελεστής ευαισθησίας της τάσης του ζυγού  $i$  ως προς τη μεταβολή της τάσης του ζυγού αναφοράς τη χρονική στιγμή  $t$  ( $K_{n,il}(t)$ ) δίνεται από την (3.4).

Στη συνέχεια μελετώνται δύο τρόποι υπολογισμού των παραπάνω συντελεστών. Στον πρώτο τρόπο, οι συντελεστές ευαισθησίας προκύπτουν μέσω της αντιστροφής του Ιακωβιανού πίνακα του συστήματος που προκύπτει από τις λύσεις των εξισώσεων ροών ισχύος. Στον δεύτερο τρόπο υπολογίζονται μέσω μιας αναλυτικής μεθόδου από τις εξισώσεις ισοζυγίου ισχύος.

### 3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕΣΩ ΙΑΚΩΒΙΑΝΗΣ

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι επίλυσης των εξισώσεων ροής ισχύος ενός Σ.Η.Ε. Η πιο διαδεδομένη είναι η μέθοδος Newton–Raphson η οποία ξεκινά θέτοντας αρχικές τιμές για όλες τις άγνωστες μεταβλητές (μέτρα τάσεων των ζυγών φορτίου, γωνίες τάσεων των ζυγών φορτίου, και γωνίες τάσεων των ζυγών παραγωγής). Ύστερα εκφράζει τη σχέση μεταξύ των δύο εξαρτώμενων μεγεθών μέσω της γραμμικής εξίσωσης, επιλύει ως προς τη νέα τιμή του ζητούμενου μεγέθους και συγκλίνει προς το αποτέλεσμα επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία. Για παράδειγμα, για τα μεγέθη της ενεργού ισχύος και της τάσης κατά την πρώτη επανάληψη της μεθόδου [11]:

$$P(E_1) = P(E_0) + \frac{\partial P(E)}{\partial E_0}(E_1 - E_0) \Leftrightarrow \quad (3.5)$$

$$P(E_1) - P(E_0) = \frac{\partial P(E)}{\partial E_0}(E_1 - E_0) \Leftrightarrow \quad (3.6)$$

$$\Delta P(E_{1,0}) = \frac{\partial P(E)}{\partial E_0}(\Delta E_{1,0}) \quad (3.7)$$

Άρα γενικά για την επανάληψη αριθμού  $m$ , η σχέση (3.7) γίνεται :

$$\Delta P(E_{m+1,m}) = \frac{\partial P(E)}{\partial E_m}(\Delta E_{m+1,m}) \quad (3.8)$$

Συνοψίζοντας τις μερικές παραγώγους της ενεργού και αέργου ισχύος ως προς το μέτρο της τάσης και τη γωνία για κάθε ζυγό προκύπτει ο λεγόμενος Ιακωβιανός πίνακας  $[J]$  :

$$J = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PE} \\ J_{Q\theta} & J_{QE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_N}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial \theta_N} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial |\bar{E}_2|} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |\bar{E}_N|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_N}{\partial |\bar{E}_2|} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial |\bar{E}_N|} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_N}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial \theta_N} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_2}{\partial |\bar{E}_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |\bar{E}_N|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_N}{\partial |\bar{E}_2|} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial |\bar{E}_N|} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

όπου με  $J_{P\theta}$ ,  $J_{PE}$ ,  $J_{Q\theta}$  και  $J_{QE}$  συμβολίζονται οι αντίστοιχοι υποπίνακες. Οι υποπίνακες αυτοί αναφέρονται στις μερικές παραγώγους των ζυγών φορτίου και παραγωγής. Συγκεκριμένα, ο υποπίνακας  $J_{P\theta}$  περιέχει τις μερικές παραγώγους της ενεργού ισχύος κάθε ζυγού ως προς την γωνία της τάσης των υπολοίπων ζυγών. Ο υποπίνακας  $J_{PE}$  περιέχει τις μερικές παραγώγους της ενεργού ισχύος κάθε ζυγού ως προς το μέτρο της τάσης των υπόλοιπων ζυγών. Αντίστοιχα, ο υποπίνακας  $J_{Q\theta}$  είναι η μερική παράγωγος της αέργου ισχύος προς τη γωνία της τάσης ενώ ο  $J_{QE}$  είναι η μερική παράγωγος της αέργου ισχύος ως προς το μέτρο της τάσης των υπόλοιπων ζυγών [12]-[15].

Για απλοποίηση, η σχέση (3.9) γράφεται όπως παρακάτω:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_l}{\partial \theta_i}(t) & \frac{\partial P_l}{\partial |\bar{E}_i|}(t) \\ \frac{\partial Q_l}{\partial \theta_i}(t) & \frac{\partial Q_l}{\partial |\bar{E}_i|}(t) \end{bmatrix}, \quad \forall i, l \in N \quad (3.10)$$

Όπότε γενικεύοντας την (3.8) και με τη χρήση της (3.9) προκύπτει η γενική εξίσωση της μεθόδου Newton–Raphson για τη ροή ισχύος :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta E_i \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$[J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta E_i \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Όπου,  $\Delta P$ : διάνυσμα με τη μεταβολή της ενεργού ισχύος κάθε ζυγού.

$\Delta Q$ : διάνυσμα με τη μεταβολή της αέργου ισχύος κάθε ζυγού.

$\Delta \theta$ : διάνυσμα με τη μεταβολή της γωνίας της τάσης κάθε ζυγού.

$\Delta E$ : διάνυσμα με τη μεταβολή του μέτρου της τάσης κάθε ζυγού.

Σε αυτή τη μέθοδο οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης, όπως αυτοί ορίζονται στις εξισώσεις (3.2) και (3.4), λαμβάνονται από την αντιστροφή του Ιακωβιανού πίνακα, όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.12). Αν  $A$ ,  $B$ ,  $G$ ,  $A$  είναι οι υποπίνακες του αντίστροφου Ιακωβιανού από την (3.12) προκύπτει :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{\Gamma} & \mathbf{\Delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_i \\ \Delta \mathbf{Q}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}_i \\ \Delta \mathbf{E}_i \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\mathbf{A} \Delta \mathbf{P}_i + \mathbf{B} \Delta \mathbf{Q}_i = \Delta \boldsymbol{\theta}_i \quad (3.14)$$

$$\& \quad \mathbf{\Gamma} \Delta \mathbf{P}_i + \mathbf{\Delta} \Delta \mathbf{Q}_i = \Delta \mathbf{E}_i \quad (3.15)$$

Οπότε, αντιστρέφοντας τον Ιακωβιανό πίνακα, οι υποπίνακες  $\mathbf{\Gamma}$  και  $\mathbf{\Delta}$  αντιστοιχούν στους συντελεστές ευαισθησίας της τάσης ως προς την ενεργό και άεργο ισχύ αντίστοιχα, όπως φαίνεται στη σχέση (3.15). Οπότε η (3.15) γράφεται :

$$\mathbf{K}_{P,il} \Delta \mathbf{P}_i + \mathbf{K}_{Q,il} \Delta \mathbf{Q}_i = \Delta \mathbf{E}_i \quad (3.16)$$

Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι πως δεν μπορούν να υπολογιστούν οι συντελεστές για τη ρύθμιση του ΣΑΤΥΦ και πως για κάθε αλλαγή ενός μεγέθους, θα πρέπει να υπολογιστεί εκ νέου ο Ιακωβιανός πίνακας, άρα να εκτελεστεί από την αρχή μία μέθοδος Newton–Raphson. Γενικά, η μέθοδος αυτή αποτελεί μια απαιτητική διαδικασία. Στη συνέχεια θα δειχθεί πως μπορεί να αποφευχθεί η μέθοδος αυτή λύνοντας στη θέση της ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων.

### 3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕΣΩ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια αναλυτική προσέγγιση στον υπολογισμό των ευαισθησιών [10], μέσω της εφαρμογής του θεωρήματος Tellegen από τη θεωρία κυκλωμάτων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας [16]–[20].

#### 3.3.1 Θεώρημα Tellegen

Σε κάθε συγκεντρωμένο ηλεκτρικό κύκλωμα ισχύει κάθε χρονική στιγμή η σχέση:

$$\sum_{j=1 \dots b} \Delta E_j(t) I_j(t) = 0 \quad (3.17)$$

$b$  : το πλήθος των κλάδων του κυκλώματος.

$I_j(t)$  : Η τιμή του ρεύματος ενός κλάδου τη χρονική στιγμή  $t$ .

$\Delta E_j$  : Η διαφορά δυναμικού στα δύο άκρα του κλάδου.

Το θεώρημα αυτό όταν εφαρμόζεται στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας εκφράζει το ισοζύγιο ισχύος σε κάθε ζυγό. Για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου χρειάζεται μια επίλυση των εξισώσεων της ροής ισχύος για να χρησιμοποιηθεί ως βάση για τις εξισώσεις της αναλυτικής μεθόδου.

#### 3.3.2 Μέθοδος Υπολογισμού

Σκοπός του κεφαλαίου είναι να υπολογιστούν οι όροι (3.2) και (3.3) μέσω των εξισώσεων του δικτύου. Οι όροι αυτοί, αφορούν το μέτρο της τάσης κάθε ζυγού, ένα μέγεθος που δεν συναντάται στις μιγαδικές εξισώσεις του δικτύου. Έτσι, εφαρμόζεται η παρακάτω

αλγεβρική ανάλυση, ώστε να προκύψουν οι ίδιοι όροι αλλά με τις μερικές παραγώγους του μιγαδικών και όχι των μέτρων τους.

$$\frac{\partial |\bar{E}_i|}{\partial P_l} = \frac{\partial \sqrt{|\bar{E}_i|^2}}{\partial P_l} = \frac{\partial \sqrt{\bar{E}_i \underline{E}_i}}{\partial P_l}, \forall i, l \in N \Leftrightarrow \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial |\bar{E}_i|}{\partial P_l} = \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{\bar{E}_i \underline{E}_i}} \frac{\partial (\bar{E}_i \underline{E}_i)}{\partial P_l} \Leftrightarrow \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial |\bar{E}_i|}{\partial P_l} = \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{\bar{E}_i \underline{E}_i}} \left( \bar{E}_i \frac{\partial (\underline{E}_i)}{\partial P_l} + \underline{E}_i \frac{\partial (\bar{E}_i)}{\partial P_l} \right) \Leftrightarrow \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial |\bar{E}_i|}{\partial P_l} = \frac{1}{|\bar{E}_i|} \operatorname{Re} \left( \underline{E}_i \frac{\partial \bar{E}_i}{\partial P_l} \right) \quad (3.21)$$

Όμοια, για τη μερική παράγωγο ως προς την άεργο ισχύ προκύπτει η σχέση :

$$\frac{\partial |\bar{E}_i|}{\partial Q_l} = \frac{1}{|\bar{E}_i|} \operatorname{Re} \left( \underline{E}_i \frac{\partial \bar{E}_i}{\partial Q_l} \right), \forall i, l \in N \quad (3.22)$$

Οι όροι  $\frac{\partial \bar{E}_i}{\partial P_l}$  και  $\frac{\partial \bar{E}_i}{\partial Q_l}$  θα αποτελέσουν για την υπόλοιπη ανάλυση τις νέες μεταβλητές, ώστε να μπορούν ύστερα να υπολογιστούν αναδρομικά οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης ως προς τη μεταβολή ενεργού και άεργου ισχύος όπως αυτοί ορίστηκαν στις (3.2) και (3.3), μέσω των εξισώσεων (3.21) και (3.22). Για να αποκτηθούν οι νέες αυτές μεταβλητές, θα χρησιμοποιηθεί το ισοζύγιο ισχύος ή αλλιώς, η εφαρμογή του θεωρήματος Tellegen για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Αρχικά, για κάθε δίκτυο, ο νόμος του Ohm γράφεται :

$$[\bar{I}_{abc}] = [\bar{Y}_{abc}] \times [\bar{E}_{abc}] \quad (3.23)$$

όπου a,b,c οι τρεις φάσεις του συστήματος,  $\bar{I}_{abc}$  ο πίνακας των ρευμάτων που εγγέεται σε κάθε ζυγό του συστήματος για τις τρεις φάσεις,  $\bar{E}_{abc}$  ο πίνακας των τάσεων των τριών φάσεων κάθε ζυγού του συστήματος και  $\bar{Y}_{abc}$  ο πίνακας αγωγιμοτήτων κάθε φάσης του δικτύου. Για τους παραπάνω πίνακες γράφεται αναλυτικά :

$$[\bar{I}_{abc}] = [\bar{I}^1_a, \bar{I}^1_b, \bar{I}^1_c, \dots, \bar{I}^K_a, \bar{I}^K_b, \bar{I}^K_c] \quad (3.24)$$

$$[\bar{E}_{abc}] = [\bar{E}^1_a, \bar{E}^1_b, \bar{E}^1_c, \dots, \bar{E}^K_a, \bar{E}^K_b, \bar{E}^K_c] \quad (3.25)$$

$$[\bar{Y}_{abc}] = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{aa}^{11} & \bar{Y}_{ab}^{11} & \bar{Y}_{ac}^{11} & & \bar{Y}_{aa}^{1K} & \bar{Y}_{ab}^{1K} & \bar{Y}_{ac}^{1K} \\ \bar{Y}_{ba}^{11} & \bar{Y}_{bb}^{11} & \bar{Y}_{bc}^{11} & \dots & \bar{Y}_{ba}^{1K} & \bar{Y}_{bb}^{1K} & \bar{Y}_{bc}^{1K} \\ \bar{Y}_{ca}^{11} & \bar{Y}_{cb}^{11} & \bar{Y}_{cc}^{11} & & \bar{Y}_{ca}^{1K} & \bar{Y}_{cb}^{1K} & \bar{Y}_{cc}^{1K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{Y}_{aa}^{K1} & \bar{Y}_{ab}^{K1} & \bar{Y}_{ac}^{K1} & & \bar{Y}_{aa}^{KK} & \bar{Y}_{ab}^{KK} & \bar{Y}_{ac}^{KK} \\ \bar{Y}_{ba}^{K1} & \bar{Y}_{bb}^{K1} & \bar{Y}_{bc}^{K1} & \dots & \bar{Y}_{ba}^{KK} & \bar{Y}_{bb}^{KK} & \bar{Y}_{bc}^{KK} \\ \bar{Y}_{ca}^{K1} & \bar{Y}_{cb}^{K1} & \bar{Y}_{cc}^{K1} & & \bar{Y}_{ca}^{KK} & \bar{Y}_{cb}^{KK} & \bar{Y}_{cc}^{KK} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Για συμμετρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας οι σχέσεις (3.24)–(3.26) απλοποιούνται ως εξής:

$$[\bar{\mathbf{I}}_{abc}] = [\bar{I}_1 \dots \bar{I}_K] \quad (3.27)$$

$$[\bar{\mathbf{E}}_{abc}] = [\bar{E}_1, \dots \bar{E}_K] \quad (3.28)$$

$$[\bar{\mathbf{Y}}_{abc}] = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \dots & \bar{Y}_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Y}_{K1} & \dots & \bar{Y}_{KK} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Η συζυγής εξίσωση του ισοζυγίου ισχύος για κάθε ζυγό είναι:

$$\underline{S}_i = \underline{E}_i \sum_{j \in D \cup N} \bar{Y}_{ij} \bar{E}_j, \quad i \in N \quad (3.30)$$

όπου  $\underline{S}_i$  είναι ο συζυγής της μιγαδικής ισχύος του ζυγού  $i$ . Λαμβάνεται η συζυγής σχέση έτσι ώστε να προκύψουν οι όροι  $\frac{\partial \bar{E}_i}{\partial P_l}$  και  $\frac{\partial \bar{E}_i}{\partial Q_l}$  και όχι οι συζυγείς τους.

Για τους ζυγούς αναφοράς του συστήματος ισχύει ότι η τάση τους παραμένει σταθερή ως προς οποιαδήποτε αλλαγή στην ισχύ των άλλων ζυγών :

$$\frac{\partial \bar{E}_i}{\partial P_l} = 0, \quad \forall i \in D, \quad \forall l \in K \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial \bar{E}_i}{\partial Q_l} = 0, \quad \forall i \in D, \quad \forall l \in K \quad (3.32)$$

Οπότε παραγωγίζοντας την (3.30) ως προς την ενεργό ισχύ προκύπτει :

$$\frac{\partial \underline{S}_i}{\partial P_l} = \frac{\partial \underline{E}_i}{\partial P_l} \sum_{j \in D \cup N} \bar{Y}_{ij} \bar{E}_j + \underline{E}_i \sum_{j \in N} \bar{Y}_{ij} \frac{\partial \bar{E}_j}{\partial P_l}, \quad \forall i, l \in N \quad (3.33)$$

Η ισχύς ενός ζυγού είναι ανεξάρτητη από την ενεργό και άεργο ισχύ οποιουδήποτε άλλου ζυγού :

$$\frac{\partial \underline{S}_i}{\partial P_l} = \frac{\partial \{P_i - jQ_i\}}{\partial P_l} = \mathbb{1}_{\{i=l\}}, \quad \forall i, l \in N \quad (3.34)$$

Ο όρος  $\mathbb{1}_{\{i=j\}}$  συμβολίζει έναν μοναδιαίο πίνακα διαστάσεων  $N \times N$ .

Άρα με τον συνδυασμό των παραπάνω σχέσεων (3.33) και (3.34) προκύπτει ένα σύστημα  $N$  εξισώσεων :

$$0 = \frac{\partial \underline{E}_i}{\partial P_l} \sum_{j \in D \cup N} \bar{Y}_{ij} \bar{E}_j + \underline{E}_i \sum_{j \in N} \bar{Y}_{ij} \frac{\partial \bar{E}_j}{\partial P_l}, \quad \forall i, l \in N, \quad i \neq l \quad (3.35)$$

$$1 = \frac{\partial \underline{E}_i}{\partial P_l} \sum_{j \in D \cup N} \bar{Y}_{ij} \bar{E}_j + \underline{E}_i \sum_{j \in N, j \neq l} \bar{Y}_{ij} \frac{\partial \bar{E}_j}{\partial P_l}, \quad \forall i, l \in N, \quad i = l \quad (3.36)$$

Ομοίως γίνεται η μερική παραγωγή ως προς την άεργο ισχύ :

$$\frac{\partial S_i}{\partial Q_l} = \frac{\partial E_i}{\partial Q_l} \sum_{j \in DUN} \bar{Y}_{ij} \bar{E}_j + E_i \sum_{j \in N} \bar{Y}_{ij} \frac{\partial \bar{E}_j}{\partial Q_l}, \quad \forall i, l \in N \quad (3.37)$$

όπου :

$$\frac{\partial S_i}{\partial Q_l} = \frac{\partial \{P_i - jQ_i\}}{\partial Q_l} = -j\mathbb{1}_{\{i=l\}} \quad (3.38)$$

όπου  $j$  είναι η φανταστική μονάδα όπως ορίζεται στη θεωρία μιγαδικών αριθμών. Παρόμοια με τις (3.35) και (3.36) προκύπτει :

$$0 = \frac{\partial E_i}{\partial Q_l} \sum_{j \in DUN} \bar{Y}_{ij} \bar{E}_j + E_i \sum_{j \in N} \bar{Y}_{ij} \frac{\partial \bar{E}_j}{\partial Q_l}, \quad \forall i, l \in N, \quad i \neq l \quad (3.39)$$

$$-j\mathbb{1} = \frac{\partial E_i}{\partial Q_l} \sum_{j \in DUN} \bar{Y}_{ij} \bar{E}_j + E_i \sum_{j \in N, j \neq l} \bar{Y}_{ij} \frac{\partial \bar{E}_j}{\partial Q_l}, \quad \forall i, l \in N, \quad i = l \quad (3.40)$$

Το παραπάνω σύστημα εξισώσεων (3.35), (3.36), (3.39), (3.40) είναι μη γραμμικό ως προς τις μιγαδικές μεταβλητές  $\frac{\partial E_j}{\partial P_l}$  και  $\frac{\partial E_j}{\partial Q_l}$ . Όμως, μπορεί να γίνει γραμμικό αν οι μιγαδικές αυτές εξισώσεις αναλυθούν σε φανταστικό και πραγματικό μέρος, έτσι ώστε να προκύψουν  $2 \times N$  εξισώσεις.

Παρατηρείται πως τα συστήματα εξισώσεων των σχέσεων (3.35), (3.36) και (3.39), (3.40) έχουν ίδιους πίνακες συντελεστών. Το γεγονός αυτό απλοποιεί την επίλυση του συστήματος. Η λύση του παραπάνω συστήματος είναι μοναδική για κάθε ακτινικό δίκτυο [10], [21].

Από τα παραπάνω συστήματα εξισώσεων προκύπτουν οι όροι  $\frac{\partial \bar{E}_j}{\partial P_l}$  και  $\frac{\partial \bar{E}_j}{\partial Q_l}$ . Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (3.21) και (3.22) προκύπτουν οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης. Πέρα από την απλοποίηση των υπολογισμών σε σχέση με τον υπολογισμό του αντίστροφου του ιακωβιανού πίνακα, σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως δεν χρειάζεται η επίλυση των εξισώσεων ροής ισχύος, αν θεωρείται γνωστό το διάνυσμα της τάσης σε κάθε ζυγό.

### 3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΣΑΤΥΦ

Προκειμένου να υπολογιστούν οι συντελεστές ευαισθησίας των ζυγών ως προς τις αλλαγές ΣΑΤΥΦ, πρέπει να υπολογιστεί ουσιαστικά η επιρροή της τάσης του ζυγού αναφοράς πάνω στους υπόλοιπους ζυγούς. Όμοια με την ανάλυση της Ενότητας 3.3, εφαρμόζεται στη σχέση (3.4) η συλλογιστική των (3.18)-(3.21), οπότε προκύπτει:

$$\frac{\partial |\bar{E}_i|}{\partial |\bar{E}_k|} = |\bar{E}_i| \operatorname{Re} \left( \frac{1}{\bar{E}_i} \frac{\partial \bar{E}_i}{\partial |\bar{E}_k|} \right) \quad (3.41)$$

Οπότε πλέον ως μεταβλητή θεωρείται ο όρος  $\frac{\partial \bar{E}_i}{\partial |\bar{E}_k|}$ , ο οποίος μπορεί να εμφανιστεί παραγωγίζοντας την εξίσωση (3.30) ως προς το μέτρο της τάσης των ζυγών αναφοράς και

χωρίζοντας τον δεύτερο όρο αθροισμάτων σε ένα άθροισμα για κάθε σύνολο προκύπτει η παρακάτω εξίσωση :

$$\frac{\partial \underline{S}_j}{\partial |\bar{E}_\kappa|} = \frac{\partial \underline{E}_j}{\partial |\bar{E}_\kappa|} \sum_{j \in D \cup N} \bar{Y}_{ij} \bar{E}_j + \underline{E}_j \sum_{j \in N} \bar{Y}_{ij} \frac{\partial \bar{E}_i}{\partial |\bar{E}_\kappa|} + \underline{E}_j \left( \sum_{j \in D} \bar{Y}_{ij} \frac{\partial \bar{E}_j}{\partial |\bar{E}_\kappa|} \right), \quad (3.42)$$

$$\forall i \in N, \kappa \in D$$

Γίνεται η αντικατάσταση  $\bar{E}_l = |\bar{E}_l| e^{j\theta_l}$  για τον τελευταίο όρο. Επίσης, για τους ζυγούς αναφοράς δεν υπάρχει αλληλεξάρτηση της τάσης οπότε ισχύει :

$$\frac{\partial |\bar{E}_j|}{\partial |\bar{E}_\kappa|} = 0, \quad \forall j \in D - \{k\} \quad (3.43)$$

Αρα για τον τελευταίο όρο ισχύει :

$$\left( \sum_{j \in D} \bar{Y}_{ij} \frac{\partial \bar{E}_j}{\partial |\bar{E}_\kappa|} \right) = \bar{Y}_{ik} e^{j\theta_k}, \quad \kappa \in D \quad (3.44)$$

Επιπλέον, θεωρείται λογικό πως η ισχύς που καταναλώνεται από το φορτίο κάθε ζυγού είναι ανεξάρτητη από την τάση του υποσταθμού:

$$\frac{\partial \underline{S}_j}{\partial |\bar{E}_\kappa|} = 0 \quad (3.45)$$

$$(3.42) \xrightarrow{(3.27),(3.44)} 0 = \frac{\partial \underline{E}_j}{\partial |\bar{E}_\kappa|} \sum_{j \in D \cup N} \bar{Y}_{ij} \bar{E}_j + \underline{E}_j \sum_{j \in N} \bar{Y}_{ij} \frac{\partial \bar{E}_i}{\partial |\bar{E}_\kappa|} + \underline{E}_j \bar{Y}_{ik} e^{j\theta_k} \quad (3.46)$$

$$-\underline{E}_j \bar{Y}_{ik} e^{j\theta_k} = \underline{W}_{ik} \sum_{j \in D \cup N} \bar{Y}_{ij} \bar{E}_j + \underline{E}_j \sum_{j \in N} \bar{Y}_{ij} \bar{W}_{ik} \quad (3.47)$$

όπου

$$\bar{W}_{ik} = \frac{\partial \bar{E}_i}{\partial |\bar{E}_\kappa|}, \quad i \in N \quad (3.48)$$

Παρατηρείται πάλι πως ο πίνακας συντελεστών του συστήματος (3.47) είναι ίδιος με τα προηγούμενα συστήματα. Παρόμοια, και αυτό το σύστημα είναι μη γραμμικό ως προς τις μιγαδικές μεταβλητές  $\bar{W}_{n_{ik}}$  ενώ γίνεται γραμμικό με διπλάσιες εξισώσεις αν κάθε εξίσωση αναλυθεί σε πραγματικό και φανταστικό μέρος.

Αναφέρθηκε για τα παραπάνω γραμμικά συστήματα ότι έχουν τον ίδιο πίνακα συντελεστών για κάθε χρονική στιγμή, όπου το διάνυσμα των τάσεων θεωρείται σταθερό. Όμως, ο πίνακας αυτός χρειάζεται να υπολογιστεί μόνο μία φορά ενώ εφαρμόζεται και στα τρία γραμμικά συστήματα εξισώσεων. Αυτό μειώνει αρκετά την ποσότητα των υπολογισμών δίνοντας πλεονέκτημα στη μέθοδο αυτή. Ακόμα, υποθέτοντας πως η μήτρα αγωγιμοτήτων παραμένει σταθερή, μπορούν να υπολογιστούν οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης για κάθε χρονική στιγμή  $t$ , αρκεί να είναι γνωστό το διάνυσμα των τάσεων, χωρίς να είναι υποχρεωτική η επίλυση των εξισώσεων ροής ισχύος του δικτύου. Αυτή η ιδιότητα είναι πολύ χρήσιμη για ένα σύστημα όπου απαιτείται κατά επανάληψη ο υπολογισμός των συντελεστών ευαισθησίας και το διάνυσμα των τάσεων είναι γνωστό είτε μέσω μετρήσεων είτε μέσω αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης.



### 3.5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από τις παραπάνω μεθόδους υπολογιστικά καλύτερη είναι η αναλυτική μέθοδος, ειδικά αν αυτή εκτελείται σε πολλές επαναλήψεις. Ακόμα περισσότερο όταν χρειάζεται ο υπολογισμός των συντελεστών για τη ρύθμιση ΣΑΤΥΦ.

Η αναλυτική μέθοδος δίνει τη δυνατότητα να υπολογιστούν οι συντελεστές μόνο των ζυγών που ενδιαφέρουν, υπολογίζοντας ουσιαστικά επιλεκτικά κάποια γραμμή του πίνακα των συντελεστών ευαισθησίας. Για παράδειγμα, αν κάποιος ζυγός δεν επιδέχεται ρύθμιση και δεν εμφανίζει κάποιο πρόβλημα, μπορεί να μην χρειάζεται ο υπολογισμός των συντελεστών του. Επιπλέον, εφόσον ο πίνακας των συντελεστών είναι με μικρή απόκλιση τριγωνικός μπορεί να υπολογιστεί μόνο η τελευταία και η πρώτη γραμμή, δίνοντας έτσι τη συνολική εικόνα του πίνακα για μία γρηγορότερη προσέγγιση.

Οι μέθοδοι δοκιμάστηκαν σε διαφορετικά ακτινικά δίκτυα με έναν υποσταθμό. Θεωρείται ότι ο ζυγός αναφοράς (ζυγός 1) ταυτίζεται με τον υποσταθμό, γεγονός που ισχύει κατά γενική περίπτωση στο ελληνικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Άρα  $D = \{1\}$ .

Έγινε υπολογισμός των συντελεστών ευαισθησίας για τα δίκτυα των 13, 33, 70, 83 και 135 ζυγών. Για το δίκτυο 13 ζυγών, οι Πίνακες 3.1 και 3.2 δείχνουν τους συντελεστές ευαισθησίας της τάσης ως προς την ενεργό και άεργο ισχύ, αντίστοιχα, με τη μέθοδο του Ιακωβιανού πίνακα. Οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης ως προς την ενεργό και άεργο ισχύ που υπολογίζονται με την αναλυτική μέθοδο δίνονται στους Πίνακες 3.3 και 3.4.

**Πίνακας 3.1:** Συντελεστές ευαισθησίας τάσης ως προς την ενεργό ισχύ των υπόλοιπων ζυγών φορτίου για το δίκτυο 13 ζυγών με την μέθοδο του Ιακωβιανού πίνακα.

Kp	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13
N2	0,0345	0,0348	0,0349	0,0347	0,0348	0,0375	0,0376	0,0377	0,0379	0,0379	0,0377	0,0380
N3	0,0345	0,0522	0,0524	0,0347	0,0348	0,0376	0,0377	0,0377	0,0379	0,0379	0,0377	0,0380
N4	0,0346	0,0522	0,0721	0,0348	0,0348	0,0376	0,0377	0,0377	0,0379	0,0380	0,0377	0,0380
N5	0,0345	0,0348	0,0349	0,0566	0,0568	0,0376	0,0377	0,0377	0,0379	0,0379	0,0377	0,0380
N6	0,0345	0,0348	0,0349	0,0567	0,0753	0,0376	0,0377	0,0377	0,0379	0,0379	0,0377	0,0380
N7	0,0349	0,0351	0,0353	0,0351	0,0352	0,0753	0,0755	0,0756	0,0760	0,0761	0,0756	0,0762
N8	0,0349	0,0351	0,0353	0,0351	0,0352	0,0754	0,0955	0,0956	0,0761	0,0761	0,0757	0,0763
N9	0,0349	0,0351	0,0353	0,0351	0,0352	0,0754	0,0955	0,1155	0,0761	0,0762	0,0757	0,0763
N10	0,0349	0,0352	0,0353	0,0351	0,0352	0,0755	0,0756	0,0757	0,0942	0,0943	0,0757	0,0944
N11	0,0349	0,0352	0,0353	0,0351	0,0352	0,0755	0,0757	0,0758	0,0942	0,1040	0,0758	0,0944
N12	0,0349	0,0351	0,0353	0,0351	0,0352	0,0754	0,0756	0,0757	0,0761	0,0761	0,0917	0,0763
N13	0,0349	0,0352	0,0353	0,0351	0,0352	0,0755	0,0757	0,0758	0,0942	0,0943	0,0758	0,1141

Για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων για όλους τους ζυγούς παρουσιάζονται γραφήματα με τους συντελεστές ευαισθησίας της τάσης του μακρινότερου ζυγού ως προς την ενεργό ισχύ των υπόλοιπων ζυγών. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.1 φαίνονται οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης του ζυγού 13 του δικτύου 13 ζυγών ως προς την ενεργό ισχύ. Στο Σχήμα 3.2 φαίνονται οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης του ζυγού 33 του δικτύου 33 ζυγών ως προς την ενεργό ισχύ. Στο Σχήμα 3.3 φαίνονται οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης του ζυγού 67 του δικτύου 70 ζυγών ως προς την ενεργό ισχύ. Στο

Σχήμα 3.4 φαίνονται οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης του ζυγού 72 του δικτύου 83 ζυγών ως προς την ενεργό ισχύ. Στο Σχήμα 3.5 φαίνονται οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης του ζυγού 118 του δικτύου 135 ζυγών ως προς την ενεργό ισχύ.

**Πίνακας 3.2:** Συντελεστές ευαισθησίας τάσης ως προς την άεργο ισχύ των υπόλοιπων ζυγών φορτίου για το δίκτυο 13 ζυγών με την μέθοδο του Ιακωβιανού πίνακα.

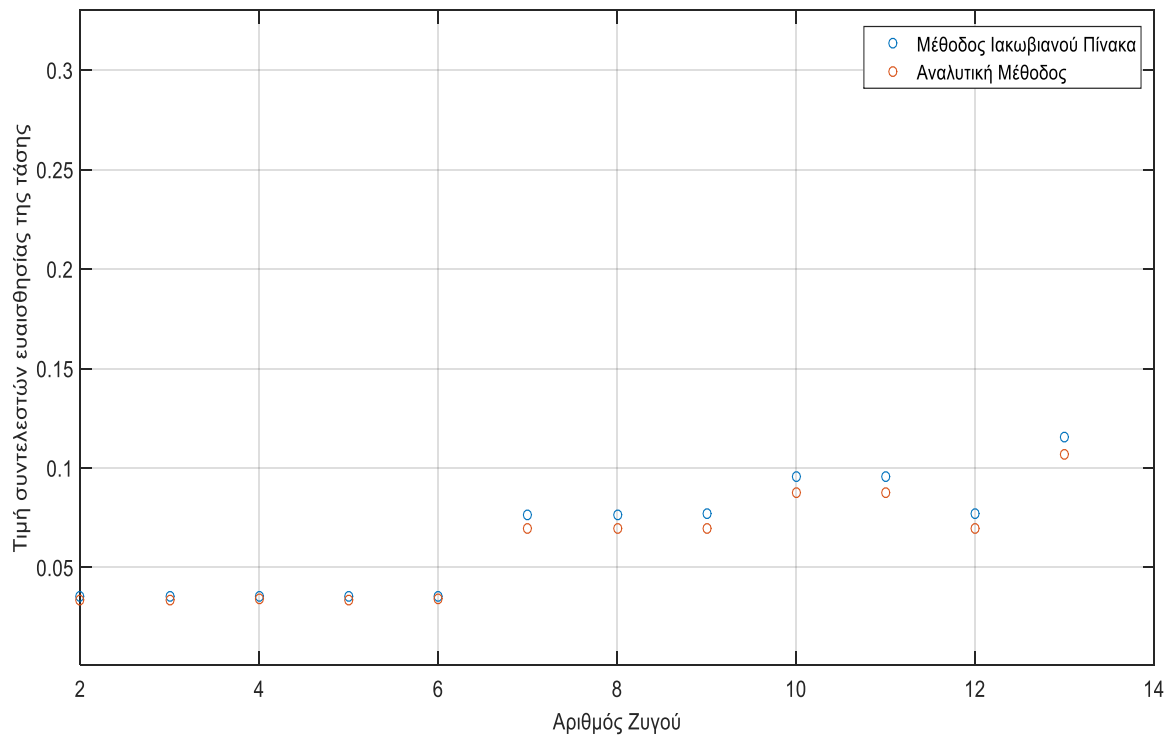
Kq	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13
N2	0,0984	0,0985	0,0986	0,0984	0,0984	0,0997	0,0997	0,0997	0,0998	0,0998	0,0997	0,0998
N3	0,0985	0,1264	0,1265	0,0985	0,0985	0,0998	0,0998	0,0999	0,0999	0,0999	0,0999	0,1000
N4	0,0986	0,1265	0,1581	0,0986	0,0986	0,0999	0,0999	0,0999	0,1000	0,1000	0,0999	0,1000
N5	0,0985	0,0986	0,0987	0,1208	0,1208	0,0998	0,0998	0,0998	0,0999	0,0999	0,0998	0,0999
N6	0,0985	0,0986	0,0987	0,1209	0,1397	0,0998	0,0998	0,0999	0,0999	0,0999	0,0999	0,1000
N7	0,0994	0,0995	0,0996	0,0995	0,0995	0,2095	0,2096	0,2096	0,2098	0,2098	0,2097	0,2099
N8	0,0995	0,0996	0,0997	0,0995	0,0995	0,2096	0,2205	0,2205	0,2099	0,2099	0,2098	0,2100
N9	0,0995	0,0996	0,0997	0,0996	0,0996	0,2097	0,2205	0,2313	0,2100	0,2100	0,2099	0,2101
N10	0,0996	0,0997	0,0998	0,0996	0,0996	0,2099	0,2099	0,2100	0,2285	0,2285	0,2100	0,2286
N11	0,0996	0,0997	0,0998	0,0996	0,0997	0,2099	0,2100	0,2100	0,2285	0,2384	0,2101	0,2286
N12	0,0995	0,0996	0,0997	0,0995	0,0995	0,2096	0,2097	0,2097	0,2099	0,2099	0,2582	0,2100
N13	0,0997	0,0998	0,0999	0,0997	0,0997	0,2100	0,2101	0,2101	0,2286	0,2287	0,2102	0,2362

**Πίνακας 3.3:** Συντελεστές ευαισθησίας τάσης ως προς την ενεργό ισχύ των υπόλοιπων ζυγών φορτίου για το δίκτυο 13 ζυγών με την αναλυτική μέθοδο.

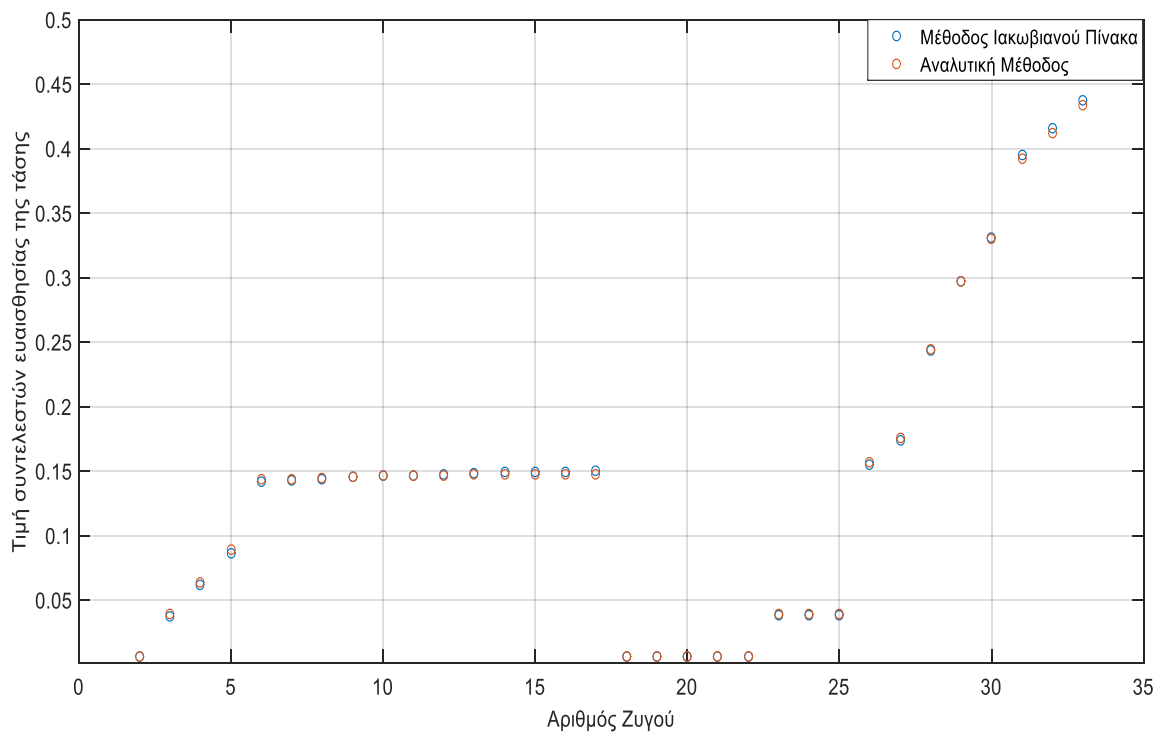
Kp	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13
N2	0,0327	0,0329	0,0329	0,0328	0,0329	0,0342	0,0343	0,0343	0,0344	0,0344	0,0343	0,0345
N3	0,0328	0,0498	0,0499	0,0329	0,0330	0,0343	0,0343	0,0344	0,0345	0,0345	0,0343	0,0345
N4	0,0328	0,0499	0,0691	0,0330	0,0330	0,0343	0,0344	0,0344	0,0345	0,0345	0,0344	0,0346
N5	0,0328	0,0329	0,0330	0,0544	0,0544	0,0343	0,0343	0,0344	0,0344	0,0345	0,0343	0,0345
N6	0,0328	0,0329	0,0330	0,0544	0,0726	0,0343	0,0343	0,0344	0,0345	0,0345	0,0343	0,0345
N7	0,0334	0,0335	0,0336	0,0335	0,0335	0,0690	0,0691	0,0692	0,0694	0,0695	0,0692	0,0696
N8	0,0334	0,0336	0,0336	0,0335	0,0336	0,0691	0,0888	0,0889	0,0695	0,0696	0,0692	0,0696
N9	0,0334	0,0336	0,0337	0,0336	0,0336	0,0691	0,0888	0,1085	0,0696	0,0696	0,0693	0,0697
N10	0,0335	0,0336	0,0337	0,0336	0,0336	0,0692	0,0694	0,0694	0,0871	0,0871	0,0694	0,0873
N11	0,0335	0,0336	0,0337	0,0336	0,0337	0,0693	0,0694	0,0695	0,0871	0,0966	0,0694	0,0873
N12	0,0334	0,0336	0,0336	0,0335	0,0336	0,0691	0,0692	0,0693	0,0695	0,0695	0,0838	0,0696
N13	0,0335	0,0337	0,0338	0,0336	0,0337	0,0693	0,0695	0,0695	0,0872	0,0873	0,0695	0,1068

**Πίνακας 3.4:** Συντελεστές ευαισθησίας τάσης ως προς την άεργο ισχύ των υπόλοιπων ζυγών φορτίου για το δίκτυο 13 ζυγών με την αναλυτική μέθοδο.

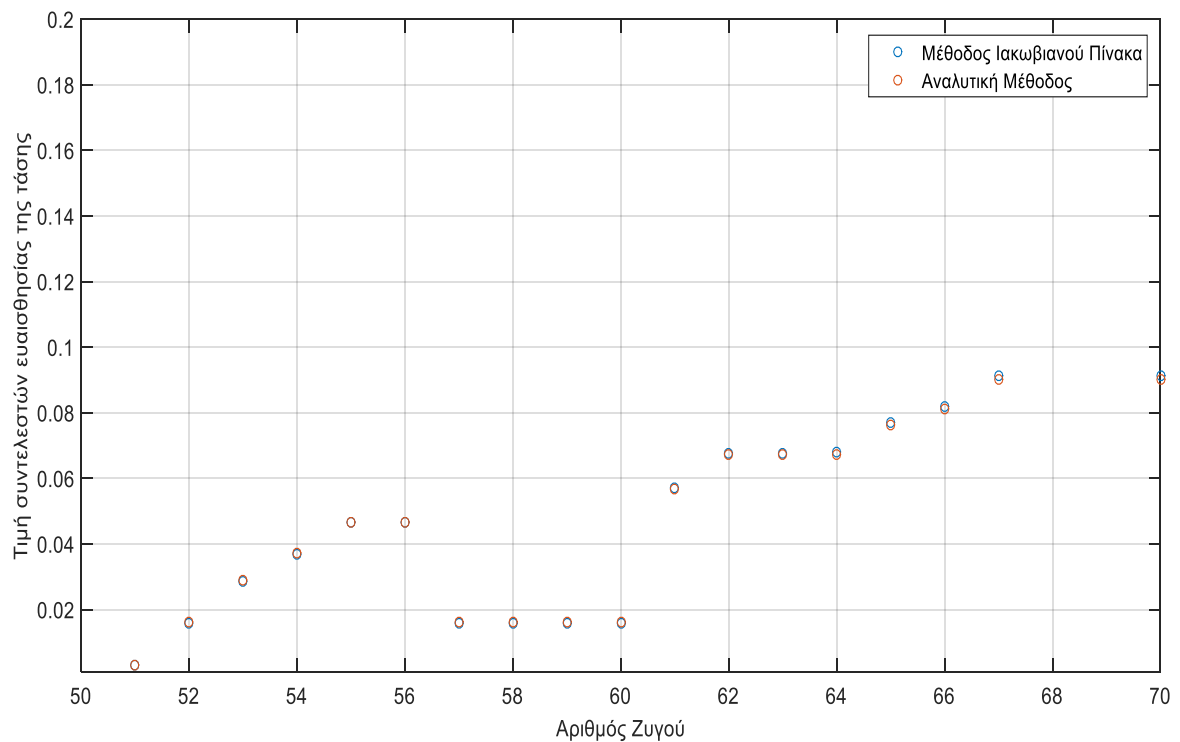
Κq	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13
N2	0,0990	0,0990	0,0990	0,0989	0,0989	0,0997	0,0996	0,0996	0,0997	0,0997	0,0997	0,0996
N3	0,0992	0,1273	0,1274	0,0992	0,0991	0,0999	0,0999	0,0999	0,0999	0,0999	0,0999	0,0999
N4	0,0993	0,1275	0,1594	0,0993	0,0993	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000
N5	0,0991	0,0992	0,0992	0,1218	0,1218	0,0998	0,0998	0,0998	0,0998	0,0998	0,0999	0,0998
N6	0,0992	0,0992	0,0992	0,1219	0,1410	0,0999	0,0999	0,0999	0,0999	0,0999	0,0999	0,0999
N7	0,1009	0,1010	0,1010	0,1009	0,1009	0,2114	0,2113	0,2113	0,2114	0,2114	0,2115	0,2113
N8	0,1011	0,1011	0,1011	0,1010	0,1010	0,2116	0,2229	0,2229	0,2116	0,2116	0,2117	0,2116
N9	0,1011	0,1012	0,1012	0,1011	0,1011	0,2118	0,2231	0,2344	0,2118	0,2118	0,2119	0,2117
N10	0,1013	0,1013	0,1013	0,1012	0,1012	0,2121	0,2120	0,2120	0,2309	0,2309	0,2122	0,2309
N11	0,1013	0,1013	0,1014	0,1013	0,1013	0,2122	0,2121	0,2121	0,2310	0,2411	0,2122	0,2310
N12	0,1010	0,1011	0,1011	0,1010	0,1010	0,2116	0,2116	0,2115	0,2116	0,2116	0,2605	0,2115
N13	0,1014	0,1014	0,1015	0,1014	0,1014	0,2124	0,2123	0,2123	0,2313	0,2313	0,2125	0,2393



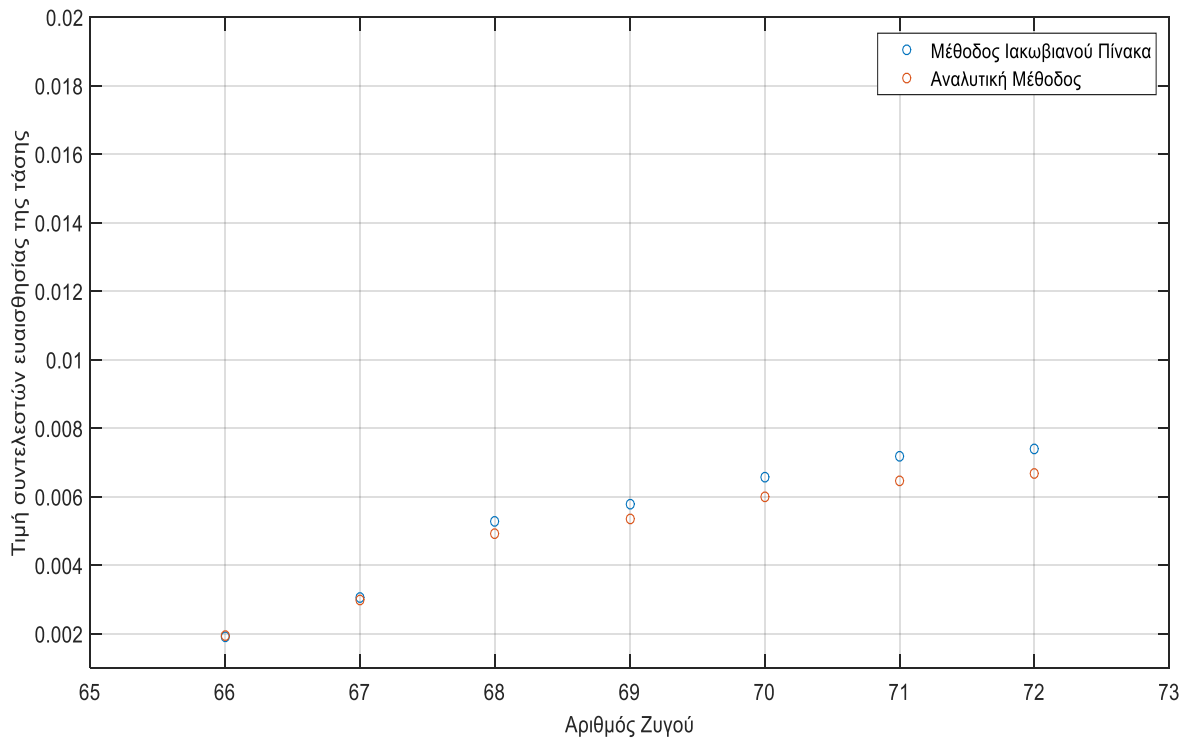
**Σχήμα 3.1:** Συντελεστές ευαισθησίας της τάσης του ζυγού 13 του δικτύου 13 ζυγών ως προς την ενεργό ισχύ.



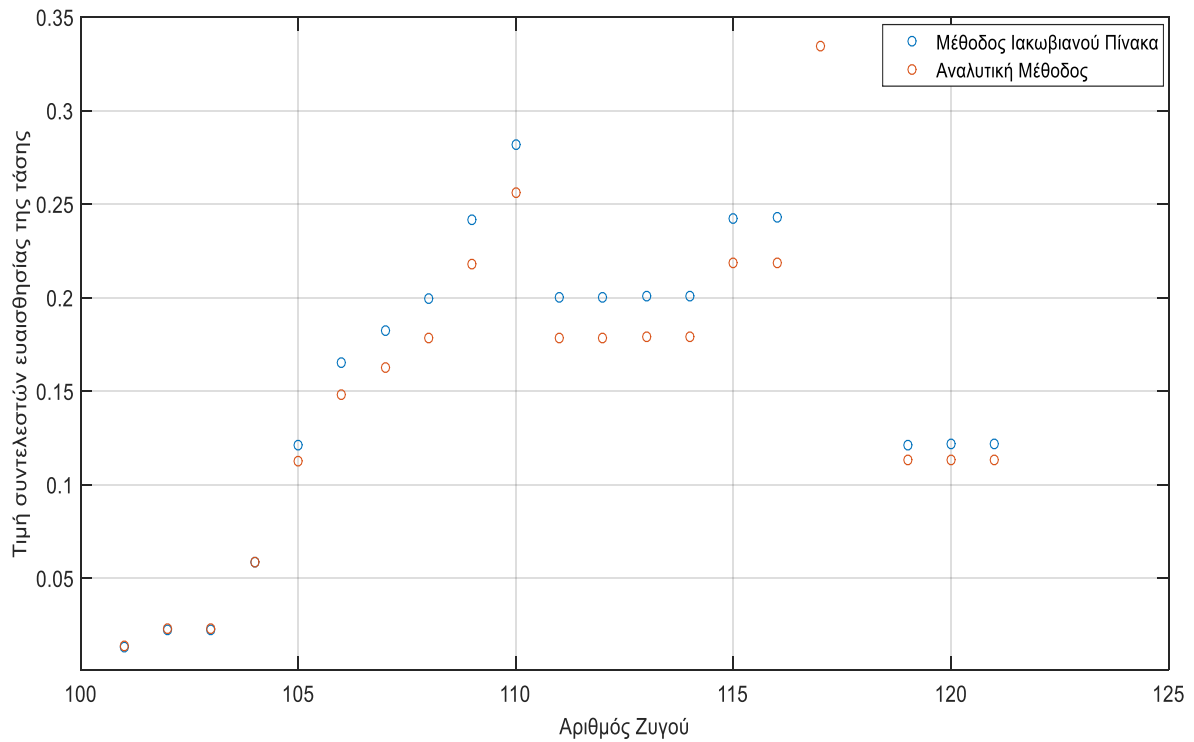
**Σχήμα 3.2:** Συντελεστές ευαισθησίας της τάσης του ζυγού 33 του δικτύου 33 ζυγών ως προς την ενεργό ισχύ.



**Σχήμα 3.3:** Συντελεστές ευαισθησίας της τάσης του ζυγού 67 του δικτύου 70 ζυγών ως προς την ενεργό ισχύ.



**Σχήμα 3.4:** Συντελεστές ευαισθησίας της τάσης του ζυγού 72 του δικτύου 83 ζυγών ως προς την ενεργό ισχύ.



**Σχήμα 3.5:** Συντελεστές ευαισθησίας της τάσης του ζυγού 118 του δικτύου 135 ζυγών ως προς την ενεργό ισχύ.

Παρατηρείται πως η απόκλιση των δύο μεθόδων είναι μικρή. Γενικά, φαίνεται στα γραφήματα πως μεγαλύτερη επιρροή στον εκάστοτε εξεταζόμενο ζυγό έχουν οι γειτονικοί ζυγοί, όχι όμως απαραίτητα με σταδιακή μείωση από τον κοντινότερο στον μακρινότερο. Οι ζυγοί που βρίσκονται σε άλλη γραμμή του ακτινικού δικτύου έχουν μηδενικό συντελεστή, άρα μηδενική επιρροή και δεν φαίνονται στο εκάστοτε γράφημα.

## **ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΕΥΦΥΗ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

### **4.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΜΕΣΩ ΕΝΙΑΙΟΥ ΜΕΤΑΔΙΔΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ**

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας εκσυγχρονίζονται συνεχώς. Σταδιακά το παραδοσιακό μοντέλο παραγωγής από κεντρικούς μεγάλους ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς μετατρέπεται σε ένα μοντέλο με διανεμημένη παραγωγή (ΔΠ) και διανεμημένα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό επιταχύνεται, πέρα από άλλα, και από την αύξηση των φορτίων με δυνατότητα αποθήκευσης, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα, και οι έξυπνες συσκευές. Όλα αυτά οδηγούν στην ενεργό συμμετοχή των καταναλωτών στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας με δυνατότητες πέρα από τα υπάρχοντα προγράμματα απόκρισης ζήτησης (demand response).

Τα προγράμματα απόκρισης ζήτησης αναφέρονται στην εσκεμμένη αλλαγή χρήσης του δικτύου από τους καταναλωτές, που επηρεάζει τη στιγμιαία ή γενική ζήτηση ενέργειας ή και το χρονοδιάγραμμά της [22]. Όμως, η προηγμένη τεχνολογία εποπτείας του δικτύου και των τηλεπικοινωνιών μπορούν να επεκτείνουν τον ρόλο των προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης και σε βοηθητικές λειτουργίες για ρύθμιση της τάσης και της ισχύος του δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Όπως αναφέρθηκε ο πρώτος τρόπος ένταξης καταναλωτών αφορά διάφορα φορτία τα οποία μπορούν να μεταβάλλουν την κατανάλωση ισχύος με μικρό αντίκτυπο στη διάθεση του χρήστη, όπως οι συσκευές θέρμανσης και κλιματισμού όπου η σχέση κατανάλωσης-θερμοκρασίας δεν είναι γραμμική και γενικά χαρακτηρίζονται από αργές αλλαγές κατάστασης [23]-[25]. Για αυτόν τον λόγο οι συσκευές αυτές λέγονται ελαστικά φορτία. Όταν με τον άμεσο μερικό έλεγχο αυτών των συσκευών ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να ελέγξει καλύτερα την ηλεκτρική τάση σε περιόδους αιχμής. Για να μπορεί να συμβεί αυτό, πρέπει η ανταπόκριση του μηχανισμού να είναι γρηγορότερη από τους κλασσικούς τρόπους απόκρισης ζήτησης, έτσι ώστε να ακολουθεί επαρκώς τις αλλαγές στην τάση. Επίσης απαραίτητη είναι η προϋπόθεση για τον διαχειριστή να έχει ενεργό ρόλο στη ρύθμιση, δηλαδή να έχει τηλεπικοινωνιακή πρόσβαση στα φορτία αυτά μέσω κατάλληλου συστήματος. Αυτή η λειτουργία των προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης γίνεται ολοένα πιο σημαντική σε μια εποχή όπου υπάρχει μεγάλη διεύδυση ΔΠ και η διακύμανση της τάσης μπορεί είναι μεγάλη.

Η χρήση ενός τέτοιου μηχανισμού μπορεί να επιφέρει περισσότερα οφέλη από την αποφυγή αιχμών (peak shaving). Το σημαντικό πλεονέκτημά της είναι η γρήγορη απόκριση, που κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά. Εκμεταλλευόμενος αυτό το

χαρακτηριστικό ο διαχειριστής μπορεί να ενεργοποιήσει τον μηχανισμό για την αποφυγή υπερτάσεων και για όσο το δυνατόν περισσότερη ταύτιση παραγωγής και κατανάλωσης σε περιπτώσεις που υπάρχει είτε πρόβλημα- ανεπάρκεια παραγωγής, είτε μη προβλεπόμενη απόδοση της διανεμημένης παραγωγής. Επιπλέον, σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον περαιτέρω έλεγχο της αέργου ισχύος που ζητείται στα ΔΔΗΕ. Ακόμα, έχει τη δυνατότητα να ελέγξει τον ρυθμό επανένταξης αυτών των συσκευών και αποφυγή του συγχρονισμού τους μετά από ρυθμίσεις της απόκρισης ζήτησης. Για να ισχύσουν τα παραπάνω βέβαια πρέπει να υπάρχει ένας ικανός αριθμός τέτοιων συσκευών που να έχει ενσωματωθεί σύστημα επικοινωνίας αλλά και ελεγκτής ο οποίος θα αποφασίζει το συμβιβασμό μεταξύ απαιτήσεων του διαχειριστή και επιθυμίας του καταναλωτή.

Για να μπορεί να γίνει ο άμεσος έλεγχος των συσκευών αυτών απαιτείται απευθείας επικοινωνία με τα φορτία αυτά. Αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη ενός δέκτη στη συσκευή, ενός πομπού από την πλευρά του διαχειριστή και ενός μέσου διάδοσης του σήματος ελέγχου. Όλες αυτές οι συσκευές θα επικοινωνούν μέσω ενός ενιαίου μεταδιδόμενου σήματος ελέγχου που θα πρέπει να εκπέμπεται στον εκάστοτε ζυγό με συχνότητα μερικών δευτερολέπτων ή λεπτών [26]. Το σήμα αυτό, εφόσον έχει χαμηλή συχνότητα σχετικά με τις συχνότητες των ρευμάτων και των τάσεων, μπορεί να φέρει ως μέσο, το ίδιο το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, κάνοντας την υλοποίηση της μεθόδου ευκολότερη. Το εύρος του σήματος είναι από -1 έως 1 και αντιστοιχεί στη ζήτηση του διαχειριστή αντίστοιχα για μείωση της κατανάλωσης (-1), ουδετερότητα (0) και αύξηση της κατανάλωσης (1). Σκοπός της μεθόδου είναι το σήμα να γίνεται αντιληπτό μόνο από τις συσκευές με τον αντίστοιχο πομπό και η ρύθμιση να γίνεται μόνο εφόσον το σήμα έχει περάσει από τον αντίστοιχο ελεγκτή, ο οποίος θα λάβει απόφαση για το εύρος της ρύθμισης ή για μη ρύθμιση. Έτσι, δεν είναι βέβαιο πως θα γίνει η αλλαγή στην κατανάλωση αλλά εξαρτάται από την παρούσα κατάσταση της συσκευής, την προηγούμενη κατάσταση της συσκευής, την επιθυμία του χρήστη, το πρόσημο και την ένταση του σήματος από τον διαχειριστή.

Το σήμα υπολογίζεται από τον υποσταθμό ή κατευθείαν από τον ρυθμιστή κάθε ζυγού (aggregator) με βάση τη βέλτιστη μεταβολή της ενεργού και αέργου ισχύος που υπολογίστηκε από το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Από εκεί, κυκλοφορεί σε όλο το υπόλοιπο δίκτυο μέχρι τους καταναλωτές. Αφού υπολογιστεί η βέλτιστη μεταβολή ισχύος, μπορεί να υπολογιστεί το σήμα για να οδηγήσει το σύστημα στην επιθυμητή κατάσταση. Ο υπολογισμός γίνεται σε συνάρτηση με την ιδανική ρύθμιση για την παρούσα χρονική στιγμή, την ιδανική ρύθμιση της προηγούμενης χρονικής στιγμής και την πραγματική ρύθμιση που έγινε την προηγούμενη χρονική στιγμή η οποία ενδεχομένως να διαφέρει από την ιδανική.

Αρχικά γίνεται αντιστοίχιση της μεταβολής ισχύος σε μία τιμή μεταξύ -1 και 1 :

$$f(\Delta P_i^*(t)) = \text{sign}(\Delta P_i^*(t))(1 - e^{-|\Delta P_i^*(t)|/b_i}) \quad (4.1)$$

όπου:

$\Delta P_i^*(t)$  : Η ιδανική μεταβολή ισχύος του ζυγού  $i$  για την χρονική στιγμή  $t$

$b_i$  : Παράμετρος ρύθμισης της κλίσης της συνάρτησης.

$\text{sign}(x)$ : Συνάρτηση που δίνει 1 αν  $x > 0$ , 0 αν  $x = 0$  ή *null* και -1 αν  $x < 0$ .

Ο εκθετικός όρος διαμορφώνει την κλίση της συνάρτησης. Όπως φαίνεται η αντιστοίχιση δεν είναι γραμμική αλλά εκθετική και η κλίση εξαρτάται από μία παράμετρο  $b_i$  σε περίπτωση που χρειάζεται να μεταβληθεί.



Το αποτέλεσμα της παραπάνω συνάρτησης προσαρμόζεται με τα αποτελέσματα της προηγούμενης χρονικής στιγμής, δηλαδή κατά πόσο εκτελέστηκε η εντολή του διαχειριστή για μεταβολή της ισχύος, μέσω μιας άλλης συνάρτησης  $G$  :

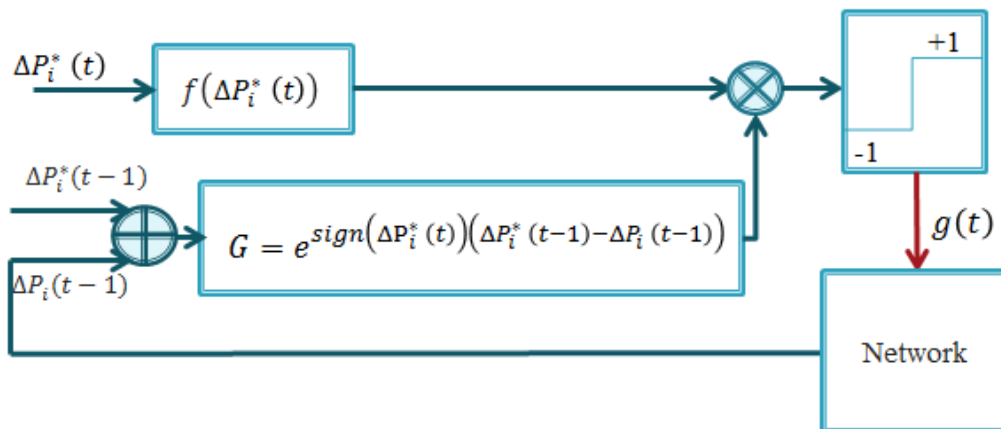
$$G = e^{\text{sign}(\Delta P_i^*(t))(\Delta P_i^*(t-1) - \Delta P_i(t-1))} \quad (4.2)$$

όπου :

$\Delta P_i^*(t-1)$  : Η ιδανική μεταβολή ισχύος κάθε ζυγού για τη χρονική στιγμή  $t-1$

$\Delta P_i(t-1)$  : Η πραγματική μεταβολή ισχύος που συνέβη τη χρονική  $t-1$

Αυτές οι δύο συναρτήσεις πολλαπλασιάζονται και παράγουν το τελικό σήμα  $g(t)$  (Σχήμα 4.1) σε κάθε χρονική στιγμή και για κάθε ζυγό.



Σχήμα 4.1: Βρόγχος ανάδρασης για το σήμα  $g(t)$ .

Για παράδειγμα :

1. Αν  $\Delta P_i^*(t) = 0,25 \alpha. \mu$

$$b_i = 0,0014$$

$$\Delta P_i^*(t-1) = 0,2 \alpha. \mu$$

$$\Delta P_i(t-1) = 0,15 \alpha. \mu$$

τότε

$$f(\Delta P_i^*(t)) = 1 \quad G = 1.0513 \quad g(t) = 1$$

2. Αν  $\Delta P_i^*(t) = 0,1 \alpha. \mu$

$$b_i = 0,0014$$

$$\Delta P_i^*(t-1) = 0,15 \alpha. \mu$$

$$\Delta P_i(t-1) = 0,15 \alpha. \mu$$

τότε

$$f(\Delta P_i^*(t)) = 1 \quad G = 1 \quad g(t) = 1$$

3. Αν  $\Delta P_i^*(t) = -0,25 \alpha. \mu$

$$b_i=0,0014$$

$$\Delta P_i^*(t-1) = -0,2 \alpha. \mu$$

$$\Delta P_i(t-1) = -0,15 \alpha. \mu$$

τότε

$$f(\Delta P_i^*(t)) = -1 \quad G = 1.0513 \quad g(t) = -1$$

4. Αν  $\Delta P_i^*(t) = 0,1 \alpha. \mu$

$$b_i=0,02$$

$$\Delta P_i^*(t-1) = 0,15 \alpha. \mu$$

$$\Delta P_i(t-1) = 0,15 \alpha. \mu$$

τότε

$$f(\Delta P_i^*(t)) = 0.993 \quad G = 1 \quad g(t) = 0.993$$

5. Αν  $\Delta P_i^*(t) = 0,1 \alpha. \mu$

$$b_i=0,2$$

$$\Delta P_i^*(t-1) = 0,15 \alpha. \mu$$

$$\Delta P_i(t-1) = 0,15 \alpha. \mu$$

τότε

$$f(\Delta P_i^*(t)) = 0.7135 \quad G = 1.0513 \quad g(t) = 0.7135$$

Αντικαθιστώντας στις (4.1) και (4.2) όπου  $P$  με  $Q$  υπολογίζεται το αντίστοιχο σήμα για την άεργο ισχύ, σε περίπτωση που υπάρχουν ελεγχόμενες συσκευές με τέτοια δυνατότητα, όπως συσκευές αποθήκευσης ενέργειας.

#### 4.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΕΥΦΥΗ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Ο έλεγχος της τάσης στα δίκτυα διανομής αποτελεί ένα αρκετά σύνθετο πρόβλημα στα σύγχρονα δίκτυα διανομής με μεγάλη διεύθυνση διανεμημένης παραγωγής. Οι εξισώσεις ροών ισχύος μαζί με τις εξισώσεις κόμβων και βρόγχων του δικτύου δημιουργούν ένα πολύπλοκο μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων. Όμως, το σύστημα αυτό είναι δύσκολο να επιλυθεί ως προς τη βέλτιστη λύση σε πραγματικό χρόνο για τη ρύθμιση της λειτουργίας του δικτύου. Για τον λόγο αυτό είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν οι συντελεστές ευαισθησίας του Κεφαλαίου 3, με τη χρήση των οποίων μπορεί να γραμμικοποιηθεί το πρόβλημα.

Για τη μελέτη του προβλήματος βελτιστοποίησης θα μελετηθεί μόνο ο υπολογισμός των κατάλληλων μεταβολών και όχι ο ακριβής τρόπος που αυτές θα πραγματοποιηθούν. Για αυτόν τον σκοπό υποτίθεται πως υπάρχει σε κάθε ζυγό ένας αρμόδιος ρυθμιστής (aggregator) [26] ο οποίος αναλαμβάνει να διεκπεραιώσει τη ρύθμιση χρησιμοποιώντας το Ενιαίο Σήμα Ρύθμισης Φορτίου. Για όλους τους ζυγούς ισχύει ένα μοντέλο φορτίου το οποίο έχει μεταβλητότητα 20%-50% και σε μερικούς ζυγούς υπάρχει φωτοβολταϊκή ή άλλη παραγωγή

που θεωρείται πως παράγει το μέγιστο της δυνατότητάς της κατά τη μέση της ημέρας. Οι παραδοχές που έχουν γίνει αποτελούν ακραίες περιπτώσεις όπου η λειτουργία του δικτύου πλησιάζει τις οριακές τιμές έτσι ώστε να ωθεί τον διαχειριστή να επέμβει δίνοντας εντολή για ρύθμιση του φορτίου ή του Μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ.

Πέρα από τα παραπάνω προκειμένου να γίνει ουσιαστικός έλεγχος θα πρέπει ο διαχειριστής να γνωρίζει την κατάσταση του δικτύου κάθε φορά που επιθυμεί να επιλύσει το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Θεωρείται πως στο δίκτυο χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης [27] που δίνει μια εκτίμηση για την ισχύ και την τάση κάθε ζυγού. Είναι επίσης φυσικό να θεωρηθεί πως χρησιμοποιείται ένας αντίστοιχος αλγόριθμος πρόβλεψης της επόμενης κατάστασης του δικτύου. Οι μέθοδοι αυτές έχουν πάντα ένα περιθώριο λάθους το οποίο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Χρησιμοποιώντας και τους τρεις συντελεστές ευαισθησίας από τις εξισώσεις (3.2)-(3.4), μπορεί να ξαναγραφεί η εξίσωση (3.16). Η νέα εξίσωση (4.3) δείχνει την εξάρτηση της μεταβολής του μέτρου της τάσης ενός ζυγού από τη μεταβολή ενεργού και αέργου ισχύος σε όλους τους ζυγούς, περιλαμβανομένου και του ίδιου, αλλά και ως προς τη μεταβολή της τάσης μέσω του ΣΑΤΥΦ του υποσταθμού:

$$\Delta|\bar{E}_i| = K_{P,il}(t)\Delta P_i + K_{Q,il}(t)\Delta Q_i + K_{n,i}(t)\Delta n \quad (4.3)$$

όπου  $\Delta n$  είναι η μεταβολή της λήψης στα τυλίγματα του ΣΑΤΥΦ του υποσταθμού. Με  $n \in \aleph$ , όπου  $\aleph$  το σύνολο των ακέραιων αριθμών, συμβολίζεται ο αριθμός της λήψης του ΣΑΤΥΦ, με τον μικρότερο ακέραιο να αντιστοιχεί στη λήψη με τη χαμηλότερη τιμή τάσης εξόδου του Μ/Σ.

Το ζητούμενο του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της τάσης, οπότε προκύπτει αρχικά η παρακάτω αντικειμενική συνάρτηση :

$$\min \left\{ \sum_i (|\bar{E}_i(t)| + \Delta|\bar{E}_i|(t) - |E_o|)^2 - \delta^2 \right\} \quad (4.4)$$

Όπου:

$\delta$  : Η επιτρεπτή διακύμανση της τάσης, π.χ. 0,4 α.μ.

$|E_o|$  : Το μέτρο της ιδανικής μέσης τιμής της τάσης για τον διαχειριστή, π.χ. 1 α.μ.

Αντικαθιστώντας τη σχέση (4.3) στη σχέση (4.4) προκύπτει:

$$\min \left\{ \sum_i (|\bar{E}_i(t)| + (K_{P,il}(t)\Delta P_i + K_{Q,il}(t)\Delta Q_i + K_{n,i}(t)\Delta n) - |E_o|)^2 - \delta^2 \right\} \quad (4.5)$$

Η σχέση (4.5) ελαχιστοποιείται αν η πρώτη παρένθεση στο τετράγωνο ισούται με μηδέν οπότε η τιμή της παράστασης είναι  $-\delta^2$ . Το ζητούμενο όμως είναι η ελαχιστοποίηση ως προς τη διακύμανση και μόνο, άρα δεν πρέπει να ενεργοποιείται η ρύθμιση όταν τα όρια της τάσης είναι αποδεκτά. Οπότε, αν η διαφορά τετραγώνων του παραπάνω όρου είναι θετική σημαίνει πως η διακύμανση της τάσης είναι σε αποδεκτά όρια και δεν πρέπει να γίνει καμία ρύθμιση της ενεργού και αέργου ισχύος ή αλλαγή λήψης του ΣΑΤΥΦ. Αν αντίθετα είναι αρνητική, πρέπει να γίνουν οι κατάλληλες μεταβολές έτσι ώστε να γίνει ξανά θετική και άρα η τάση να είναι εντός των ορίων διακύμανσης.

Για να γίνουν τα παραπάνω, η σχέση (4.5) παίρνει τη μορφή :

$$\min \left\{ \sum_i \left[ (|\bar{E}_i(t)| + (\mathbf{K}_{P,il}(t)\Delta\mathbf{P}_i + \mathbf{K}_{Q,il}(t)\Delta\mathbf{Q}_i + \mathbf{K}_{n,i}(t)\Delta\mathbf{n}) - |E_o|)^2 - \delta^2 \right]^+ \right\}^3 \quad (4.6)$$

Οι περιορισμοί του προβλήματος ελαχιστοποίησης είναι οι ακόλουθοι :

$$\gamma_i \leq \cos\varphi_i \leq 1 \quad (4.7)$$

$$n_{min} \leq n(t) \leq n_{max} \quad (4.8)$$

όπου  $\gamma_i$  είναι ο ελάχιστος επιτρεπτός συντελεστής ισχύος και  $\varphi_i$  η γωνία μεταξύ της μιγαδικής τάσης και της μιγαδικής έντασης του ρεύματος κάθε ζυγού, και  $n_{min}$ ,  $n_{max}$  είναι η ελάχιστη και η μέγιστη λήψη του μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ, αντίστοιχα.

Για την τρέχουσα λήψη του Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ ( $n(t)$ ), ισχύει πως μπορεί να υπολογιστεί προσθέτοντας στην αρχική λήψη τις μεταβολές των λήψεων που έγιναν σε όλα τα χρονικά βήματα από την αρχική (για χρόνο  $t_0$ ) μέχρι την τρέχουσα λήψη:

$$n(t) = n(t_0) + \sum_{\tau=t_0}^t \Delta n(\tau) \quad (4.9)$$

Όπως αναφέρθηκε, ο διαχειριστής μέσω ενός αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης θεωρείται ότι γνωρίζει την τάση και την ισχύ σε κάθε ζυγό κάθε φορά που καλείται να λύσει το παραπάνω πρόβλημα. Ακόμα, χρησιμοποιεί και έναν αλγόριθμο πρόβλεψης της επόμενης κατάστασης. Αν υποθεθεί ότι η πρόβλεψη που έκανε είναι σωστή και ότι λήφθηκαν τα κατάλληλα μέτρα για την εξυπηρέτησή της τότε δεν θα πρέπει να προκύψει πρόβλημα στο δίκτυο. Ένα σύστημα διανομής όμως, δεν μπορεί να είναι εντελώς προβλέψιμο, και οι αλγόριθμοι πρόβλεψης έχουν περιθώρια σφάλματος. Οπότε σε μια χρονική στιγμή που καλείται να λυθεί το πρόβλημα ελαχιστοποίησης, θα πρέπει να γίνει ένας συμψηφισμός σφαλμάτων των δύο αλγορίθμων, διότι είναι πιθανό η πραγματική τιμή της τάσης να διαφέρει λίγο από αυτήν που υποδεικνύει ο αντίστοιχος αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης και να απέχει λιγότερο από την τιμή που υπέδειξε ο αλγόριθμος πρόβλεψης. Ο όρος αυτός, υποχρεώνει την ιδανική μεταβολή της τάσης να βρίσκεται σε σχετική συμφωνία με την προβλεπόμενη μεταβολή της τάσης. Αυτός ο όρος σαφώς μπορεί να έχει διαφορετική βαρύτητα σε κάθε δίκτυο ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του και την τάξη μεγέθους της ισχύος κάθε ζυγού.

Προσθέτοντας αυτόν το όρο στην (4.6) προκύπτει :

$$\begin{aligned} & \min \sum_i \mu_i (\Delta(\mathbf{P}, \mathbf{Q})_i - \Delta(\mathbf{P}, \mathbf{Q})_f)^2 \\ & + \sum_i \lambda_i \left[ (|\bar{E}_i(t)| + (\mathbf{K}_{P,il}(t)\Delta\mathbf{P}_i + \mathbf{K}_{Q,il}(t)\Delta\mathbf{Q}_i + \mathbf{K}_{n,i}(t)\Delta\mathbf{n}) \right. \\ & \left. - |E_o|)^2 - \delta^2 \right]^+ \end{aligned} \quad (4.10)$$

Όπου :

$\mu_i$  : Συντελεστής βαρύτητας του πρώτου όρου.

$\lambda_i$  : Συντελεστής βαρύτητας του δεύτερου όρου.

<sup>3</sup>Όπου  $[x]^+$  είναι η συνάρτηση  $\max(0, x)$ .

$\Delta(P, Q)_f$ : Η προβλεπόμενη (forecasted) μεταβολή ενεργού και αέργου ισχύος.

$\Delta(P, Q)_i$ : Η βέλτιστη μεταβολή ενεργού και αέργου ισχύος που υπάρχει και στον 2<sup>ο</sup> όρο.

Κατά τη ρύθμιση της τάσης στα δίκτυα διανομής, η χρήση του μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ είναι περιορισμένη λόγω του κόστους που έχουν οι μετασχηματιστές αυτοί για αγορά και συντήρηση. Στην παρούσα εργασία, υποτίθεται πως ο διαχειριστής προτιμά τη ρύθμιση φορτίου από τη ρύθμιση του ΣΑΤΥΦ, το οποίο θα πρέπει να χρησιμοποιείται έως μερικές φορές την ημέρα αποτελώντας την εναλλακτική επιλογή για τη ρύθμιση της τάσης. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης θα πρέπει να προσαρμοστεί έτσι ώστε να εφαρμόζονται αυτά τα χαρακτηριστικά. Πρέπει να προστεθεί ένας όρος στο πρόβλημα βελτιστοποίησης ο οποίος θα αναλαμβάνει τον συμβιβασμό μεταξύ της χρήσης του σήματος για τη μείωση του φορτίου και του ΣΑΤΥΦ [4.5]. Για τον λόγο αυτό εισάγεται μια νέα συνάρτηση  $\psi_1$  που ανάλογα με τον κορεσμό του σήματος δίνει τα ανάλογα περιθώρια για ρύθμιση του Μετασχηματιστή στον υποσταθμό.

$$\psi_1 \left( \sum_i \hat{g}_i \right) := \alpha_1 e^{-\alpha_2 |\sum_i \hat{g}_i|} \quad (4.11)$$

όπου :

$\alpha_1$ : Παράμετρος ρύθμισης της βαρύτητα της συνάρτησης  $\psi_1$ .

$\alpha_2$ : Παράμετρος ρύθμισης της κλίσης της συνάρτησης κορεσμού του σήματος.

$\hat{g}_i$ : Κινητός μέσος του σήματος  $g_i(t)$  στο χρονικό παράθυρο  $W$

$W$ : Χρονικό παράθυρο που λαμβάνεται υπόψη για τον κορεσμό του σήματος.

Για το  $\hat{g}_i$  ισχύει :

$$\hat{g}_i(t) = \sum_{s=0}^{W-1} k_s g_i(t-s) \quad (4.12)$$

Όπου :

$k_s$  : Συντελεστής βαρύτητας κάθε χρονικού βήματος για μελέτη του κορεσμού του σήματος.

Στην παρούσα μελέτη έχουν τεθεί οι παρακάτω τιμές για τις παραμέτρους:

$$\alpha_1 = 1000 \quad (4.13)$$

$$\alpha_2 = 2 \quad (4.14)$$

$$W = 3 \quad (4.15)$$

Για τον κορεσμό του σήματος, όπως φαίνεται στις παραπάνω εξισώσεις λαμβάνονται υπόψη πέρα από την τρέχουσα κατάσταση και οι προηγούμενες καταστάσεις. Η βαρύτητα που δίνεται στην τρέχουσα κατάσταση είναι 80%, ενώ στις 2 προηγούμενες που βρίσκονται στο χρονικό παράθυρο  $W$  δίνεται από 10%. Οπότε η σχέση (4.12), για την παρούσα μελέτη γίνεται :

$$\hat{g}_i(t) = 0.8g_i(t) + 0.1g_i(t-1) + 0.1g_i(t-2) \quad (4.16)$$

Για να περιοριστεί η χρήση του μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ εισάγεται μια νέα συνάρτηση η οποία λαμβάνει υπόψη τις αλλαγές που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί στις λήψεις του μετασχηματιστή και επιβαρύνει εκθετικά κάθε επόμενη:

$$\psi_2 \left( \sum_i |\Delta n(t)| \right) := e^{a_3 \sum_{t_i < t < t_i + \tau_0} a_4 (n(t_i) \Delta n(t_i)) |\Delta n(t_i)|} \quad (4.17)$$

όπου :

$a_3$ : Παράμετρος ρύθμισης της βαρύτητας της συνάρτησης  $\psi_2$  εκθετικά.

$a_4$ : Παράμετρος ενεργοποίησης -ακύρωσης της συνάρτησης  $\psi_2$  ανάλογα με το αν υπήρξε αλλαγή στο ΣΑΤΥΦ.

$\Delta n(t_i)$ : Μεταβολή της λήψης του Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ.

$\tau_0$ : Το χρονικό παράθυρο όπου λαμβάνονται υπόψη οι προηγούμενες ρυθμίσεις του ΣΑΤΥΦ.

Στην παρούσα μελέτη έχουν τεθεί οι παρακάτω τιμές για τις παραμέτρους:

$$a_3 = 5 \quad (4.18)$$

$$a_4 = \begin{cases} 1, & \text{αν } n(t_i) \Delta n(t_i) \neq 0 \\ 0, & \text{αν } n(t_i) \Delta n(t_i) = 0 \end{cases} \quad (4.19)$$

$$\tau_0 = 3 \text{ ώρες} \quad (4.20)$$

Στις προσομοιώσεις που έγιναν το πρόβλημα βελτιστοποίησης επαναλαμβάνονταν κάθε 2 λεπτά κατά τη διάρκεια μίας μέρας, που αντιστοιχεί σε 720 επαναλήψεις σε 24 ώρες και 90 επαναλήψεις σε διάρκεια 3 ωρών.

Συμπεριλαμβάνοντας τις συναρτήσεις (4.11) και (4.17) στην (4.10) προκύπτει η τελική αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης :

$$\begin{aligned} & \min \sum_i \mu_i (\Delta(\mathbf{P}, \mathbf{Q})_i - \Delta(\mathbf{P}, \mathbf{Q})_f)^2 \\ & + \sum_i \lambda_i \left[ (|\bar{E}_i(t)| + (\mathbf{K}_{P,il}(t) \Delta \mathbf{P}_i + \mathbf{K}_{Q,il}(t) \Delta \mathbf{Q}_i + \mathbf{K}_{n,i}(t) \Delta n) \right. \\ & \left. - |E_o|)^2 - \delta^2 \right]^+ + \psi_1 \left( \sum_i \hat{g}_i \right) \psi_2 \left( \sum_i |\Delta n(t)| \right) \Delta n^2 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Πέρα από τους περιορισμούς (4.7), (4.8) ισχύει και περιορισμός με βάση το ποσοστό  $d$  του φορτίου που μπορεί να ελέγξει ο διαχειριστής:

$$\left\{ \begin{array}{l} [\mathbf{P}_i(1-d) \leq \mathbf{P}_i \leq \mathbf{P}_i(1+d)], \text{ αν } \mathbf{P}_i \geq 0 \\ \text{ή } [\mathbf{P}_i(1+d) \leq \mathbf{P}_i \leq \mathbf{P}_i(1-d)], \text{ αν } \mathbf{P}_i < 0 \end{array} \right\} \quad (4.22)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} [\mathbf{Q}_i(1-d) \leq \mathbf{Q}_i \leq \mathbf{Q}_i(1+d)], \text{ αν } \mathbf{Q}_i \geq 0 \\ \text{ή } [\mathbf{Q}_i(1+d) \leq \mathbf{Q}_i \leq \mathbf{Q}_i(1-d)], \text{ αν } \mathbf{Q}_i < 0 \end{array} \right\} \quad (4.23)$$

Το παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι ένα πρόβλημα μεικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού (mixed integer nonlinear programming – MINLP). Θα μπορούσε να γίνει πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού αν η μεταβολή της τάσης μέσω του ΣΑΤΥΦ του υποσταθμού ήταν συνεχής, πράγμα που δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα. Για τον Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ θεωρήθηκε ότι έχει 36 βήματα από την ελάχιστη στη μέγιστη τάση, και η διακύμανση της τάσης είναι  $\pm 10\%$ .

### 4.3 ΜΕΡΙΚΩΣ ΑΠΟΚΡΙΝΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ – ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ

Στα προγράμματα απόκρισης ζήτησης γενικότερα η ανταπόκριση των χρηστών είναι ένα μέγεθος με αβεβαιότητα. Αυτό δεν είναι τόσο σημαντικό όταν πρόκειται για ρύθμιση της συνολικότερης κατανάλωσης ισχύος. Όταν όμως πρόκειται για χρήση του προγράμματος απόκρισης ζήτησης για ρύθμιση της τάσης του δικτύου, όπως αυτή που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, η μερική αποκρισιμότητα του φορτίου των καταναλωτών μπορεί να αποφέρει προβλήματα στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει ο διαχειριστής να προσαρμόζει τις απαιτήσεις του για ρύθμιση του φορτίου ανάλογα με την αποκρισιμότητά του.

Σε αυτή την ενότητα θεωρείται πως ένας ζυγός δεν αποκρίνεται στη ρύθμιση που αποφασίζει ο διαχειριστής του δικτύου με αποτέλεσμα η επόμενη κατάσταση του συστήματος να μην είναι αυτή που υπολογίστηκε. Προτείνεται μια μέθοδος ώστε κάθε ζυγός που παρουσιάζει πρόβλημα να μειώνει τις προσδοκίες του διαχειριστή για την επόμενη ρύθμιση με το βάρος να μετατοπίζεται στους υπόλοιπους ζυγούς ανάλογα με τους συντελεστές της τάσης ως προς την ισχύ, όπως καθορίζει η αντικειμενική συνάρτηση (4.21). Για τον σκοπό αυτό εισάγονται οι συντελεστές προσαρμογής κάθε ζυγού  $h_{P_i}(t)$ ,  $h_{Q_i}(t)$ , οι οποίοι αυξομειώνουν τα όρια ρύθμισης της ενεργού και αέργου ισχύος, αντίστοιχα, ανάλογα με τις προηγούμενες επιδόσεις τους.

Συντελεστής προσαρμογής για τον περιορισμό των ορίων ρύθμισης ενεργού ισχύος :

$$h_P(t+1) = \sum_{s=0}^{W-1} c_s e^{\left( \left| \frac{P_i(t-s) - P_i^*(t-s)}{P_i^*(t-s)} \right| \right)} - 1 \quad (4.26)$$

όπου :

$P_i^*(t-s)$  : Η ενεργός ισχύς που επιθυμεί ο διαχειριστής για τον ζυγό  $i$  την χρονική στιγμή  $t-s$ .

$c_s$  : Συντελεστές που δίνουν διαφορετική βαρύτητα σε κάθε χρονικό βήμα που λαμβάνεται υπόψη στο χρονικό παράθυρο  $W$ .

Συντελεστής προσαρμογής για τον περιορισμό των ορίων ρύθμισης αέργου ισχύος :

$$h_Q(t+1) = \sum_{s=0}^{W-1} c_s e^{\left( \left| \frac{Q_i(t-s) - Q_i^*(t-s)}{Q_i^*(t-s)} \right| \right)} - 1 \quad (4.27)$$

Για την παρούσα εργασία οι (4.26) και (4.27) διαμορφώνονται ως εξής :

$$h_P(t+1) = 0.7e^{\left| \frac{P_i(t) - P_i^*(t)}{P_i^*(t)} \right|} + 0.2e^{\left| \frac{P_i(t-1) - P_i^*(t-1)}{P_i^*(t-1)} \right|} + 0.1e^{\left| \frac{P_i(t-2) - P_i^*(t-2)}{P_i^*(t-2)} \right|} - 1 \quad (4.28)$$

$$h_Q(t+1) = 0.7e^{\left| \frac{Q_i(t) - Q_i^*(t)}{Q_i^*(t)} \right|} + 0.2e^{\left| \frac{Q_i(t-1) - Q_i^*(t-1)}{Q_i^*(t-1)} \right|} + 0.1e^{\left| \frac{Q_i(t-2) - Q_i^*(t-2)}{Q_i^*(t-2)} \right|} - 1 \quad (4.29)$$

Για τους παραπάνω συντελεστές χρησιμοποιήθηκε εκθετική κλίση έτσι ώστε για μικρές αποκλίσεις από την απαιτούμενη ρύθμιση να μην έχουν μεγάλη ποινή. Η μέγιστη

ποινή αντιστοιχεί σε μηδενική ρύθμιση από πλευράς ζυγού και μέγιστη ζήτηση ρύθμισης ισχύος στον ζυγό από την πλευρά του διαχειριστή. Φτάνει έως 35% μείωση του πάνω και 35% μείωση του κάτω ορίου μεταβολής ισχύος που είχε ο ζυγός με βάση τις δυνατότητές του. Αυτό συμβαίνει ώστε να μπορεί ο διαχειριστής να προφυλαχθεί από σφάλμα στην σχεδίαση της επόμενης κατάστασης του δικτύου. Για να μπορέσει να γίνει ομαλότερη και ελαστικότερη η χρήση των παραπάνω συντελεστών, χρησιμοποιείται και εδώ ένα χρονικό παράθυρο τριών βημάτων. Ως αποτέλεσμα, εάν κάποιος ζυγός παρουσιάσει πρόβλημα μόνο για λίγα δευτερόλεπτα, η ποινή του έχει βαρύτητα 0,7. Αν αυτός επανέλθει στα προσδοκώμενα, στα επόμενα βήματα η ποινή του θα έχει βαρύτητα 0,2 και 0,1. Άρα η χρήση ενός χρονικού παραθύρου δίνει επιπλέον τη δυνατότητα ομαλής επιστροφής στα κανονικά όρια. Επίσης, προστατεύει τον διαχειριστή αναθέτοντας, έστω και λίγο, μικρότερη ρύθμιση στον ζυγό για τα επόμενα δύο βήματα.

Με την προσθήκη των συντελεστών προσαρμογής, οι περιορισμοί (4.22), (4.23) γίνονται :

$$\left\{ \begin{array}{l} [P_i(1 - d + h_p) \leq P_i \leq P_i(1 + d - h_p)], \text{ αν } P_i \geq 0 \\ \text{ ή } [P_i(1 + d - h_p) \leq P_i \leq P_i(1 - d + h_p)], \text{ αν } P_i < 0 \end{array} \right\} \quad (4.22)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} [Q_i(1 - d + h_q) \leq Q_i \leq Q_i(1 + d - h_q)], \text{ αν } Q_i \geq 0 \\ \text{ ή } [Q_i(1 + d - h_q) \leq Q_i \leq Q_i(1 - d + h_q)], \text{ αν } Q_i < 0 \end{array} \right\} \quad (4.23)$$

Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης δεν επιβαρύνθηκε με τη χρήση των παραπάνω συντελεστών εφόσον αυτοί δεν εμφανίζονται στην αντικειμενική συνάρτηση, ούτε δημιουργούν κάποια επιπλέον συνάρτηση ή περιορισμό. Όμως, η χρήση τους αποφέρει μεγάλο όφελος ως προς την αξιοπιστία του συστήματος ελέγχου τάσης με ρύθμιση φορτίου. Επιπλέον, θα μπορούσε να δώσει μόνιμη βοήθεια σε περίπτωση που ο διαχειριστής του δικτύου διανομής δεν γνωρίζει με βεβαιότητα το ποσοστό φορτίου που μπορεί να ελέγξει σε κάποιο ζυγό.



## **ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΕΥΦΥΗ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

### **5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφική εισαγωγή στις πλατφόρμες λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν. Αρχικά γίνεται μια παρουσίαση του GAMS ( Generic Algebraic Modeling System), των δομικών του χαρακτηριστικών και των διαφορετικών τύπων προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού που μπορεί να επιλύσει. Ύστερα, γίνεται παρουσίαση του λογισμικού MATLAB (Matrix Laboratory) και της βιβλιοθήκης MATPOWER, που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμα, περιγράφεται σύντομα ο τρόπος με τον οποίο η πλατφόρμα MATLAB εκτελεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης κατά την προσομοίωση καλώντας και ανταλλάσσοντας δεδομένα με το GAMS. Στο τέλος του κεφαλαίου δίνονται σύντομες περιγραφές για τις σημαντικότερες συναρτήσεις που γράφτηκαν στη γλώσσα του MATLAB, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν πέρα από τον σκοπό της παρούσας εργασίας και μία εισαγωγή στη βιβλιοθήκη GDXMWR, που επιτρέπει την επικοινωνία MATLAB-GAMS.

### **5.2 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GAMS**

#### **5.2.1 Βασικά χαρακτηριστικά του λογισμικού GAMS**

Το λογισμικό GAMS (General Algebraic Modeling System) είναι ένα περιβάλλον ηλεκτρονικού υπολογιστή, που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό, την ανάλυση και την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η γλώσσα που χρησιμοποιεί είναι ένα πολύ ισχυρό εργαλείο με πυκνή γραφή. Πιο συγκεκριμένα, κάθε πρόταση –περιορισμός για μία μεταβλητή, έχει την ίδια σύνταξη, είτε η μεταβλητή είναι μοναδική, είτε είναι εκατοντάδες όμοιες μεταβλητές. Ένα άλλο χαρακτηριστικό της γλώσσας GAMS είναι πως δεν αποτελεί μία ακόμα γλώσσα γραμμικού προγραμματισμού, αλλά μία γλώσσα μοντελοποίησης ενός μαθηματικού προβλήματος, γεγονός που την κάνει να απαιτεί περισσότερη εξοικείωση πριν χρησιμοποιηθεί για σύνθετα προβλήματα. Το GAMS επιλύει ένα πρόβλημα αυστηρά με τους κανόνες που έχουν οριστεί, οπότε ένα μικρό λάθος μπορεί να επηρεάσει σοβαρά το αποτέλεσμα. Όντας ένα εργαλείο μοντελοποίησης ενός μαθηματικού προβλήματος, μπορεί να λύσει μόνο προβλήματα επίλυσης μέσω μαθηματικού προγραμματισμού.

Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του GAMS είναι [28]:

- Η πυκνότητα της γλώσσας. Με την ίδια ποσότητα κώδικα μπορούν να λυθούν από μικρά (μερικές δεκάδες εξισώσεις και περιορισμοί) μέχρι πολύ μεγάλα προβλήματα (χιλιάδες εξισώσεις και περιορισμοί). Αυτό συμβαίνει κυρίως με την χρήση συνόλων, αθροισμάτων και πράξεων με τη χρήση των δεικτών των συνόλων.
- Η αυστηρότητα της γλώσσας. Ένα μικρό λάθος μπορεί να προκαλέσει μεγάλη αλλαγή στο αποτέλεσμα.
- Η γλώσσα GAMS είναι πολύ κοντά στον μαθηματικό φορμαλισμό, γεγονός που βοηθάει τον αναγνώστη να καταλάβει γρηγορότερα το μαθηματικό πρόβλημα.
- Ο διαχωρισμός του προβλήματος από τον αλγόριθμο λύσης. Είναι πολύ σημαντικό ότι χωρίς αλλαγές στον κώδικα του προβλήματος μπορούν να εφαρμοστούν διαφορετικοί αλγόριθμοι επίλυσης.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα δομικά χαρακτηριστικά του GAMS και οι συνηθέστερες εντολές του (Πίνακας 5.1).

1. Η εντολή **Sets** ή **Set** χρησιμοποιείται για τη δήλωση συνόλων και των δεικτών τους, αλλά και για τον καθορισμό του τύπου δεδομένων ή μεταβλητών που περιέχουν. Τα σύνολα μπορούν να είναι είτε στατικά (σταθερού μεγέθους) είτε δυναμικά (μεταβλητού μεγέθους). Ακόμα διαχωρίζονται σε διατεταγμένα και μη διατεταγμένα. Χρησιμοποιείται στην αρχή του προγράμματος. Αποτελείται από την εντολή, το όνομα του συνόλου, μια περιγραφή (η οποία αγνοείται κατά τον συντακτικό έλεγχο) και τα δεδομένα του. Το τμήμα δηλώσεων των συνόλων, όπως και κάθε τμήμα, τελειώνει με το σύμβολο του ερωτηματικού της ελληνικής αλφαβήτου –semicolon (;). Για παράδειγμα :

#### Sets

*N buses /1\*13/*

*D Day /Monday, Tuesday, Wednesday, Thursday, Friday, Saturday, Sunday/;*

2. Μετά τα σύνολα, δηλώνονται τα δεδομένα και οι μεταβλητές του προβλήματος. Αρχικά, δηλώνονται οι παράμετροι με την εντολή **parameters** και οι πίνακες με την εντολή **tables**. Ακόμα, δηλώνονται προαιρετικά τα βαθμωτά μεγέθη με την εντολή **scalar** ή **scalars**. Ύστερα ακολουθούν οι μεταβλητές με την εντολή **variables** και μετά τα όρια (*x.lo*, *x.up*) και η αρχική τιμή (*x.l*) για κάθε μεταβλητή αν είναι απαραίτητο. Μπορεί, αν χρειαστεί, να δηλωθεί και ο τύπος της μεταβλητής, ελεύθερη, θετική, αρνητική, ακέραιη ή δυαδική. Σε οποιαδήποτε από τις παραπάνω εντολές, μετά το σύμβολο του δεδομένου ή της μεταβλητής, μπορεί να ακολουθήσει μια περιγραφή η οποία δεν λαμβάνεται υπόψη κατά τον συντακτικό έλεγχο. Για παράδειγμα:

#### parameters

*V(N) Παράμετρος της τάσης κάθε ζυγού N*

*PLoad(D) Το φορτίο κάθε ζυγού D*

*VoltageCoefficient(N,N);*

#### Tables

*Y(N,N) Μήτρα αγωγιμοτήτων*

*5.1 -2.1 -1.5*

```
-2.1 25 -7
-1.5 -7 40;
```

**scalar**

```
pi= 3.14;
```

**variables**

```
z Αντικειμενική μεταβλητή
Active_load(N)
Integer variable OLTC_position;
OLTC_position.lo=1;
OLTC_position.up=36;
Active_load.lo(N)=-0.5;
Active_load.l(N)=0.2;
```

3. Έπειτα, ακολουθεί η λίστα των εξισώσεων και ανισώσεων μέσω της εντολής **equations** που διαμορφώνουν το πρόβλημα, και ύστερα η διατύπωσή τους. Η σύνταξη των εξισώσεων απαιτεί το όνομα της εξίσωσης στην αρχή της γραμμής ακολουθούμενη από δύο τελείες (..), έπειτα κενό και την εξίσωση/ανίσωση χρησιμοποιώντας τους μαθηματικούς τελεστές και κανόνες όπως ορίζονται στο συντακτικό του GAMS. Μία εξίσωση στον κώδικα μπορεί να αναπαραστήσει πολλές εξισώσεις ή ανισώσεις του μαθηματικού προβλήματος με τη βοήθεια δεικτών και συνόλων. Στο GAMS για να δηλωθεί ισότητα, χρησιμοποιείται η σύνταξη “=e=”, για την ανίσωση χρησιμοποιούνται τα “=g=” και “=l=” για το σύμβολο του μεγαλύτερου και του μικρότερου αντίστοιχα. Για παράδειγμα:

**equations**

```
obj αντικειμενική εξίσωση
tapsfunction
equationLoad(N);
obj.. z=e= Active_load(N)* ReActive_load(N);
tapsfunction.. Dn=e=tapn-tap;
equationLoad(N).. S=e=sqrt( sqr(ActiveLoad(N))+sqr(ReActiveLoad(N)));
```

Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το ίδιο σύνολο δύο φορές, χρειάζονται δύο διαφορετικοί δείκτες. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται μία πολύ σημαντική εντολή που αντιστοιχεί σε έναν δεύτερο δείκτη- όνομα σε υπάρχον σύνολο:

```
alias(N,NP);
```

Αυτή χρησιμοποιείται μετά την δήλωση των μεταβλητών και ουσιαστικά αντιστοιχεί ένα δεύτερο όνομα (NP) στο σύνολο N.

4. Στο τελευταίο κομμάτι του κώδικα ενός προβλήματος, με την εντολή **model** δηλώνεται το όνομα του προβλήματος και οι εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν (π.χ. /all/ ή /obj/). Με την εντολή **option** καθορίζεται ο τύπος του προβλήματος και επιλέγεται το πακέτο λογισμικού που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυσή του. Η εντολή **solve** ξεκινά την επίλυση με βάση τον στόχο που δηλώνεται, δηλαδή αν είναι πρόβλημα ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης και για ποια μεταβλητή. Για παράδειγμα, στον παρακάτω κώδικα, επιλέγονται προς επίλυση όλες οι εξισώσεις, είναι πρόβλημα μεικτού-ακεραίου μη γραμμικού προγραμματισμού (minlp), το

πακέτο λογισμικού που επιλέγεται για την επίλυση ονομάζεται *bonmin* και ο σκοπός της επίλυσης είναι η ελαχιστοποίηση της μεταβλητής  $z$ :

**model** *opti* /all/;

**option** *minlp=bonmin*;

**solve** *opti using minlp MINIMIZING z*;

Κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας τα παραπάνω στοιχεία. Δύο ακόμα πολύ χρήσιμα εργαλεία του GAMS είναι οι επαναληπτικοί βρόγχοι, (**loop**, **while**) και η εκτέλεση εντολών υπό συνθήκη (**if-else**) με χρήση λογικών εκφράσεων.

**Πίνακας 5.1:** Πίνακας συνηθέστερων εντολών του GAMS.

<i>display</i> $x$	Εμφανίζει στο αρχείο εξόδου την βέλτιστη τιμή του $x$ με την κατάληξη <i>.l</i>
<i>alias</i> ( $N, NP$ )	Δημιουργεί ένα ίδιο σύνολο με το $N$ με όνομα $NP$
<i>sum</i> ( $N, x(N)$ )	Αθροίζει την παράμετρο $x$ για κάθε στοιχείο του συνόλου $N$
<i>sqr</i> ( $x$ )	Υπολογίζει το τετράγωνο του αριθμού $x$
<i>sqrt</i> ( $x$ )	Υπολογίζει την τετραγωνική ρίζα του αριθμού $x$
<i>exp</i> ( $x$ )	Υπολογίζει την εκθετική τιμή $e^x$ του αριθμού $x$
<i>cos</i> ( $x$ )	Υπολογίζει την τιμή του συνημίτονου του $x$
<i>sin</i> ( $x$ )	Υπολογίζει την τιμή του ημιτόνου του $x$

Το GAMS συνεργάζεται με διάφορους εμπορικούς και ελεύθερους επιλύτες. Κάθε επιλύτης έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και δυνατότητες. Ο χρήστης του GAMS έχει την ευκαιρία να επιλέξει μέσα από ένα μεγάλο φάσμα επιλυτών, ανάλογα με την ανάγκη του και την τάξη του προβλήματος βελτιστοποίησης που θέλει να επιλύσει. Τα είδη των προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού είναι [28] [29]:

- Γραμμικός Προγραμματισμός (linear programming -LP), όπου το πρόγραμμα αποτελείται από γραμμικές αντικειμενικές συναρτήσεις και γραμμικούς περιορισμούς.
- Μεικτός-ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός (mixed-integer linear programming -MILP), όπου το πρόβλημα περιέχει γραμμικές αντικειμενικές συναρτήσεις και γραμμικούς περιορισμούς, ενώ οι μεταβλητές σχεδίασης (άγνωστοι του προβλήματος) είναι πραγματικές και ακέραιες μεταβλητές.
- Μη γραμμικός προγραμματισμός (non linear programming -NLP), όπου το πρόβλημα περιέχει είτε μη γραμμικές αντικειμενικές συναρτήσεις, είτε μη γραμμικούς περιορισμούς, είτε συνδυασμό αυτών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και το πρόβλημα εκτίμησης κατάστασης ενός ηλεκτρικού κυκλώματος.
- Μεικτός-ακέραιος μη γραμμικός προγραμματισμός (mixed -integer non linear programming -MINLP), όπου το πρόβλημα είναι μη γραμμικού προγραμματισμού, ενώ οι μεταβλητές σχεδίασης (άγνωστοι του προβλήματος) είναι πραγματικές και ακέραιες μεταβλητές.

### 5.2.2 Αρχείο εξόδου προγράμματος μαθηματικού προγραμματισμού σε GAMS

Η επιλογή του κατάλληλου επιλύτη για κάθε πρόβλημα απαιτεί σε βάθος κατανόηση και γνώση των χαρακτηριστικών κάθε επιλύτη, καθώς αυτή η επιλογή μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση του προγράμματος. Αφού το πρόγραμμα έχει συνταχθεί στην πλατφόρμα του GAMS, δημιουργείται αυτόματα το εκτελέσιμο αρχείο με την κατάληξη “.gms” και ο χρήστης μπορεί να το εκτελέσει πατώντας το κουμπί “Run Gams” ή το πλήκτρο F9. Τότε αν υπάρχουν λάθη στον κώδικα, εμφανίζεται η κατάλληλη ένδειξη από το GAMS. Αν δεν υπάρχουν λάθη, δημιουργείται το αρχείο εξόδου με την κατάληξη “.lst”. Στο αρχείο αυτό υπάρχει μια πλήρης περιγραφή της βέλτιστης λύσης του προβλήματος αν αυτή επιτεύχθηκε, ή ο λόγος που αυτή δεν βρέθηκε. Στο αρχείο αυτό υπάρχει αναλυτική περιγραφή των εξισώσεων που επιλύθηκαν, των στατιστικών του μοντέλου που δημιουργήθηκε (Σχήμα 5.1), αναφορά για την λύση που βρέθηκε (Σχήμα 5.2), τα όρια και η βέλτιστη λύση των εξισώσεων (Σχήμα 5.3) και των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν (Σχήμα 5.4) με την κατάλληλη ένδειξη “.lo” για το κάτω όριο, “.up” για το πάνω όριο και “.l” για την βέλτιστη τιμή.

```

Compilation
  Include File Summary
  Execution
  Display
  Equation Listing SOLVE opti Using MINLP From line 106
  Equation
  Column Listing SOLVE opti Using MINLP From line 106
  Column
  Model Statistics SOLVE opti Using MINLP From line 106
  Solution Report SOLVE opti Using MINLP From line 106
  SolEQU
  SolVAR
  Execution
  Display

```

```

---- tapn

tapn
      (.LO, .L, .UP, .M = 22, 22, 22, 0)
      -1      tapsfun

GAMS 24.1.3 r41464 Released Jul 26, 2013 WEX-WEI x86_64/MS Windows 09/25/17 18:21:29 Page 6
POWER FLOW 4 BUSES
Model Statistics SOLVE opti Using MINLP From line 106

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS      6      SINGLE EQUATIONS      50
BLOCKS OF VARIABLES      7      SINGLE VARIABLES      51
NON ZERO ELEMENTS      412      NON LINEAR N-Z      349
DERIVATIVE POOL      10      CONSTANT POOL      354
CODE LENGTH      882

GENERATION TIME      =      0.235 SECONDS      4 MB      24.1.3 r41464 WEX-WEI

EXECUTION TIME      =      0.235 SECONDS      4 MB      24.1.3 r41464 WEX-WEI
GAMS 24.1.3 r41464 Released Jul 26, 2013 WEX-WEI x86_64/MS Windows 09/25/17 18:21:29 Page 7
POWER FLOW 4 BUSES
Solution Report SOLVE opti Using MINLP From line 106

S O L V E      S U M M A R Y

```

Σχήμα 5.1: Στατιστικά του μοντέλου που δημιουργήθηκε.

```

Compilation
Include File Summary
Execution
  Display
  Equation Listing SOLVE opti Using MINLP From line 106
  Equation
  Column Listing SOLVE opti Using MINLP From line 106
  Column
  Model Statistics SOLVE opti Using MINLP From line 106
  Solution Report SOLVE opti Using MINLP From line 106
  SolEQU
  SolVAR
  Execution
  Display

```

```

          S O L V E      S U M M A R Y

MODEL      opti          OBJECTIVE      z
TYPE       MINLP        DIRECTION      MINIMIZE
SOLVER     BONMIN       FROM LINE    106

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      8 Integer Solution
**** OBJECTIVE VALUE    -0.0000

RESOURCE USAGE, LIMIT      0.047      1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT    0      2000000000
EVALUATION ERRORS        0          0

COIN-OR Bonmin  24.1.3 r41464 Released Jul 26, 2013 WEI x86_64/MS Windows
NLP0012I
NLP0014I      1          OPT -6.5998936e-010      7 0.015
NLP0012I
NLP0014I      1          OPT -6.5998934e-010      7 0.015
NLP0012I
NLP0014I      1          OPT -6.5998934e-010      7 0.012
Cbc0012I Integer solution of -6.5998934e-010 found by DiveMIPFractional after 0
iterations and 0 nodes (0.03 seconds)
Cbc0001I Search completed - best objective -6.599893392058915e-010, took 0 itera
tions and 0 nodes (0.03 seconds)
Cbc0035I Maximum depth 0, 0 variables fixed on reduced cost

NLP0012I
NLP0014I      1          OPT -6.5998934e-010      7 0.01

```

Σχήμα 5.2: Αναφορά λύσης που επιτεύχθηκε.

```

Compilation
Include File Summary
Execution
  Display
  Equation Listing SOLVE opti Using MINLP From line 106
  Equation
  Column Listing SOLVE opti Using MINLP From line 106
  Column
  Model Statistics SOLVE opti Using MINLP From line 106
  Solution Report SOLVE opti Using MINLP From line 106
  SolEQU
  OBJ
  cosfeq1
  tapsfun
  controlfun
  testfun
  linearizemax
  SolVAR
  Execution
  Display

```

```

|--- EQU OBJ      .      .      .      1.000

OBJ objective function

---- EQU cosfeq1 restrain

          LOWER      LEVEL      UPPER      MARGINAL
N2      .      0.003      +INF      2.9662E-9
N3      .      0.001      +INF      4.4697E-8
N4      .      0.003      +INF      2.9737E-9
N5      .      0.017      +INF      5.873E-10
N6      .      0.025      +INF      3.952E-10
N7      .      0.024      +INF      4.191E-10
N8      .      0.002      +INF      4.7198E-9
N9      .      9.2604E-4      +INF      1.4549E-8
N10     .      0.018      +INF      5.559E-10
N11     .      0.006      +INF      1.5500E-9
N12     .      0.001      +INF      8.9366E-8
N13     .      0.042      +INF      2.384E-10

          LOWER      LEVEL      UPPER      MARGINAL
---- EQU tapsfun      -22.000      -22.000      -22.000      -1.61E-11

---- EQU controlfun

          LOWER      LEVEL      UPPER      MARGINAL
N2      .      .      .      6.3046E-9
N3      .      .      .      6.3394E-9

```

Σχήμα 5.3: Όρια και η βέλτιστη τιμή των εξισώσεων.

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
---- VAR z	-INF	-6.60E-10	+INF	.
z objective function variable				
---- VAR P				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
N2	0.116	0.145	0.174	-7.55E-14
N3	0.141	0.177	0.212	1.093E-10
N4	0.138	0.172	0.207	2.996E-12
N5	0.216	0.270	0.324	-1.39E-12
N6	0.233	0.292	0.350	-1.24E-12
N7	0.300	0.375	0.450	-1.20E-12
N8	0.086	0.107	0.128	-1.14E-11
N9	0.096	0.121	0.145	3.398E-11
N10	0.267	0.333	0.400	-1.60E-12
N11	0.187	0.233	0.280	-1.83E-12
N12	0.167	0.208	0.250	1.216E-10
N13	0.427	0.533	0.640	-7.38E-13
---- VAR Q				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
N2	0.044	0.054	0.065	-1.80E-11
N3	0.073	0.091	0.109	-8.84E-11
N4	0.059	0.074	0.089	-9.84E-12
N5	0.057	0.071	0.085	-6.07E-12

Σχήμα 5.4: Όρια και η βέλτιστη τιμή των μεταβλητών.

### 5.2.3 Ο επιλύτης BONMIN

Ο επιλύτης που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται BONMIN (basic open-source nonlinear mixed integer programming) [30][31]. Με άλλα λόγια, αποτελεί ένα πειραματικό πακέτο λογισμικού ανοιχτού κώδικα που αναπτύχθηκε σε γλώσσα C++ για την επίλυση κυρίως προβλημάτων μεικτού-ακέραιου μη γραμμικού μαθηματικού προγραμματισμού. Το λογισμικό αναπτύχθηκε υπό την συνεργασία του πανεπιστημίου Κάρνεγκι Μέλον (Carnegie Mellon University) και του τμήματος έρευνας της εταιρείας IBM. Συγκεκριμένα, ο επιλύτης εφαρμόζει τους παρακάτω αλγορίθμους :

- Αλγόριθμος διακλάδωσης-και-φράγματος ( branch and bound algorithm- B-BB). Η βασική ιδέα του αλγορίθμου αυτού είναι η έξυπνη απαλοιφή (ή κλάδεμα) τμημάτων του χώρου αναζήτησης στα οποία είναι γνωστό πως δεν μπορεί να υπάρξει λύση του προβλήματος.
- Αλγόριθμος αποσύνθεσης εξωτερικής προσέγγισης (outer-approximation based decomposition algorithm – B-OA).
- Αλγόριθμος διακλάδωσης-και-αποκοπής εξωτερικής προσέγγισης (outer-approximation based branch-and-cut algorithm – B-QG).
- Υβριδικός αλγόριθμος διακλάδωσης και αποκοπής (hybrid outer-approximation based branch-and-cut algorithm – B-Hyb)

Ο επιλύτης BONMIN διανέμεται με τη γενική άδεια δημόσιας χρήσης (Common Public License -CPL) η οποία είναι αποδεκτή από την πρωτοβουλία ανοιχτού πηγαίου κώδικα (Open Source Initiative -OSI). Ο επιλύτης BONMIN είναι πιστοποιημένο λογισμικό ανοιχτού πηγαίου κώδικα.

### 5.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MATLAB

Το MATLAB (matrix laboratory) είναι ένα περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής και μια προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς [32]. Αποθηκεύει και κάνει τις πράξεις με βάση την άλγεβρα μητρών. Κατά κύριο λόγο δημιουργήθηκε για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για προγραμματισμό καθώς περιέχει εντολές από την C++ όπως εντολές διακλάδωσης και επαναληπτικών βρόχων. Στον τομέα των γραφικών όσον αφορά τον μαθηματικό κλάδο μπορεί να υλοποιήσει συναρτήσεις πραγματικές, μιγαδικές, πεπλεγμένες συναρτήσεις δύο μεταβλητών και άλλες. Όσον αφορά τον στατιστικό κλάδο μπορεί να υλοποιήσει ιστογράμματα, τομεογράμματα, ραβδοδιαγράμματα, εμβοδογράμματα και άλλα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος για τον κώδικα που αναπτύσσει ο χρήστης. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του λογισμικού αυτού είναι η ευρεία διάδοσή του, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα να έχουν δημιουργηθεί βιβλιοθήκες εντολών για πάρα πολλούς επιστημονικούς τομείς. Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι η 2015a για λειτουργικό σύστημα Windows 8.

Οι τυπικές απαιτήσεις συστήματος για τη χρήση του λογισμικού MATLAB είναι: 3-4 GB χώρος στο δίσκο, 1 GB στο δίσκο αποκλειστικά για το λογισμικό του MATLAB και 2 GB RAM. Επίσης, το λειτουργικό σύστημα θα πρέπει να είναι Windows XP Service Pack 3 ή νεότερο, ενώ ο επεξεργαστής (Intel ή AMD x86) θα πρέπει να υποστηρίζει το σύνολο εντολών SSE2.

#### 5.3.1 Το πακέτο λογισμικού MATPOWER

Το πακέτο λογισμικού MATPOWER [33] είναι ένα σύνολο από εκτελέσιμα αρχεία MATLAB (.m) για την επίλυση προβλημάτων ροής ισχύος και βέλτιστης ροής ισχύος [34], [35]. Οι βασικοί άξονες που στηρίζεται η δημιουργία του λογισμικού αυτού, είναι η καλύτερη δυνατή απόδοση και η απλότητα του κώδικα ώστε να μπορεί να κατανοηθεί και να τροποποιηθεί σχετικά εύκολα. Οι μεταβλητές εκφράζονται σε ανά μονάδα μεγέθη και οι γωνίες σε ακτίνια. Επιπλέον, τα δεδομένα εισάγονται σε δομές δεδομένων, με ευρεία χρήση πινάκων που είναι το βασικό εργαλείο του MATLAB γενικότερα. Όμοια, τα αποτελέσματα δίνονται σε δομή δεδομένων. Αξίζει να σημειωθεί ότι πολύ χρήσιμο χαρακτηριστικό είναι η άμεση και εύκολη επικοινωνία με αρχεία Microsoft Excel στα οποία έχουν μοντελοποιηθεί δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας.

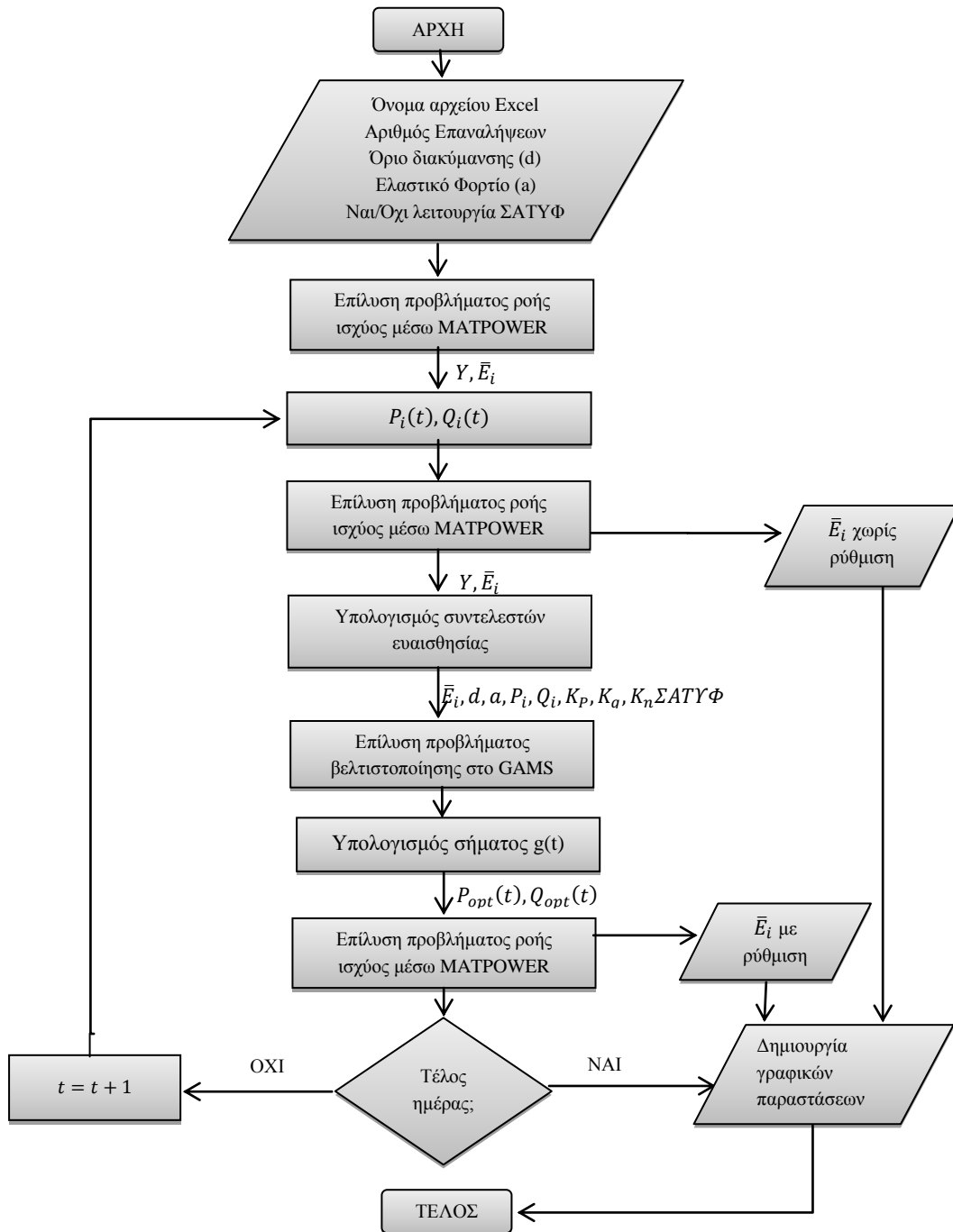
Το βασικό πρόβλημα ροής ισχύος περιλαμβάνει την επίλυση των εξισώσεων του δικτύου με διάφορες αριθμητικές μεθόδους ως προς τις τιμές της τάσης κάθε ζυγού και τις ροές ισχύος μεταξύ των ζυγών. Όλες οι μέθοδοι επίλυσης που χρησιμοποιούνται, εκμεταλλεύονται την αραιή δομή του προβλήματος και έτσι, εκτός της μεθόδου Gauss-Seidel, ανταποκρίνονται αρκετά καλά σε συστήματα μεγάλης κλίμακας. Αυτό το πακέτο λογισμικού προσφέρει δυνατότητα ανάλυσης της ροής ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος καθώς και ανάλυση ροής ισχύος συνεχούς ρεύματος.

Το MATPOWER, πέρα από τη βασική επίλυση των εξισώσεων ροής ισχύος, παρέχει στον χρήστη την επιλογή επέκτασης του προβλήματος, εισάγοντας νέες μεταβλητές, κόστη και περιορισμούς.



### 5.3.2 Περιγραφή βασικών συναρτήσεων της εργασίας.

Με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης συναρτήσεων του MATPOWER αναπτύχθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στο περιβάλλον του MATLAB για τη διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου. Προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα της βέλτιστης ρύθμισης τάσης, μέσα από το περιβάλλον του MATLAB καλείται η εκτέλεση ενός αρχείου GAMS. Για να γίνει πιο κατανοητή η ροή της προσομοίωσης παρατίθεται το διάγραμμα ροής του προβλήματος στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα ροής προσομοίωσης ΔΔΗΕ για βέλτιστη ρύθμιση τάσης.

Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή των βασικότερων συναρτήσεων που συντάχθηκαν στην γλώσσα του MATLAB:

1.  $[Kp, Kq] = \mathbf{Coeffs}(structure)$  : Η συνάρτηση δέχεται σαν είσοδο μία δομή δεδομένων, όπως αυτή δίνεται ως έξοδος από την επίλυση του προβλήματος ροής ισχύος από το `matpower`, και υπολογίζει τους συντελεστές ευαισθησίας της τάσης ως προς την μεταβολή ενεργού και αέργου ισχύος με την μέθοδο του Ιακωβιανού πίνακα. Μέσος χρόνος εκτέλεσης μετρήθηκε περίπου 0,002 s, εφόσον θεωρείται γνωστή η πλήρης κατάσταση του συστήματος. Όμως για τον σχηματισμό του Ιακωβιανού πίνακα απαιτείται κάθε φορά η επίλυση του συστήματος εξισώσεων ροής ισχύος. Λαμβάνοντας και αυτό υπόψη ο μέσος χρόνος επίλυσης γίνεται περίπου 1,15 s.
2.  $[Kp, Kq, Kn] = \mathbf{SC2}(Y, E, n, l)$  : Η συνάρτηση αυτή υπολογίζει τους συντελεστές ευαισθησίας της τάσης ως προς την μεταβολή της ενεργού και άεργου ισχύος, καθώς και ως προς την τάση του υποσταθμού (ζυγού αναφοράς) με ΣΑΤΥΦ. Δέχεται σαν είσοδο τη μήτρα αγωγιμοτήτων ενός δικτύου, το διάνυσμα των τάσεων κάθε ζυγού, τον αριθμό των ζυγών φορτίου –παραγωγής και τον αριθμό του ζυγού για τον οποίο ζητείται ο υπολογισμός των συντελεστών. Μέσος χρόνος εκτέλεσης περίπου 0,015s. Γνωρίζοντας ότι η μήτρα αγωγιμοτήτων παραμένει σταθερή και υποθέτοντας την μέτρηση ή εκτίμηση της τάσης σε όλο το ΔΔΗΕ, δεν χρειάζεται η επαναλαμβανόμενη επίλυση του προβλήματος ροής ισχύος.
3.  $[g f G] = \mathbf{signalfun}(a, b, c, d)$ : Η συνάρτηση αυτή υπολογίζει το ενιαίο σήμα  $g$  όπως αυτό περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Τα διανύσματα εισόδου είναι με την αντίστοιχη σειρά, η ιδανική μεταβολή ενεργού ισχύος για την τρέχουσα χρονική στιγμή, η ιδανική μεταβολή ενεργού ισχύος για το προηγούμενο χρονικό βήμα, η πραγματική μεταβολή ενεργού ισχύος που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο χρονικό βήμα, και η τιμή της παραμέτρου  $b$ . Μέσος χρόνος εκτέλεσης περίπου 0,0001 s.
4.  $[o] = \mathbf{ElasticLoads}(structure, t)$  : Η συνάρτηση αυτή υπολογίζει τους συντελεστές προσαρμογής ακολουθώντας την ανάλυση του Κεφαλαίου 4. Ως είσοδο δέχεται μία δομή δεδομένων που περιέχει μεταξύ άλλων, την ισχύ κάθε ζυγού για την τρέχουσα χρονική στιγμή αλλά και για τις προηγούμενες. Επίσης δέχεται την τιμή της τρέχουσας χρονικής στιγμής, που σημαίνει τον αριθμό της ημερήσιας επανάληψης για την οποία εκτελείται η ρύθμιση τάσης. Μέσος χρόνος εκτέλεσης περίπου 0,0005s.

### 5.2.3 Η βιβλιοθήκη GDXMRW

Η βιβλιοθήκη εντολών GDXMRW (GDX-matlab read write) είναι ένα εργαλείο που δημιουργήθηκε για την επικοινωνία του λογισμικού matlab με το λογισμικό gams [36]. Παρότι το matlab διαθέτει δυνατότητες για επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης μικρής κλίμακας, η ολοένα αυξανόμενη ανάγκη για βελτιστοποίηση σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας ώθησε στη δημιουργία της βιβλιοθήκης αυτής. Το γεγονός αυτό έχει διπλό σκοπό, από τη μία να παρέχει στους χρήστες του MATLAB ένα εκλεπτυσμένο λογισμικό για βελτιστοποίηση μη γραμμικών προβλημάτων και από την άλλη να δώσει τη δυνατότητα στους χρήστες του gams να οπτικοποιήσουν τα αποτελέσματά τους με τα εργαλεία γραφικών παραστάσεων και άλλων αναπαραστάσεων του MATLAB.

Για να επιτευχθεί η επικοινωνία των δύο προγραμμάτων έχουν δημιουργηθεί συναρτήσεις με τις οποίες το MATLAB μπορεί να διαβάσει και να γράψει αρχεία .gdx τα οποία μπορούν να διαβαστούν και να εγγραφούν αντίστοιχα από το GAMS.

Η βασική εντολή ανάγνωσης είναι η **rgdx** και η βασική της σύνταξη είναι :

$$x = \mathbf{rgdx}('fileName', structure);$$

Προκείμενου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτή η εντολή, τα δεδομένα πρέπει να διαμορφωθούν σε βασική δομή δεδομένων (struct). Για παράδειγμα για να αναγνωσθεί η μεταβλητή *P*:

```
P.name='P';
P.compress='true';
P=rgdx('fileName',P);
```

Πριν εκτελεστεί η εντολή ανάγνωσης πρέπει να οριστεί μια δομή με ετικέτες το όνομα “.name” και “.compress” που δηλώνει αν τα δεδομένα έχουν συμπιεστεί στο αρχείο .gdx. Αυτό βοηθά να εντοπιστούν τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε αυτό το σύμβολο από το GDX αρχείο με όνομα ‘fileName’. Τα δεδομένα ανακτώνται επίσης σε μορφή δομής δεδομένων, όπως φαίνεται στη συνέχεια του παραπάνω παραδείγματος :

```
P.name: 'P'
P.type: 'parameter'
P.dim: 3
P.val: [16x4 double]
P.form: 'sparse'
P.uels: {{1x8 cell} {1x8 cell} {1x8 cell}}
```

όπου :

*P.name*: Το σύμβολο που αναπαριστά τα δεδομένα.

*P.type*: Ο τύπος των δεδομένων. Μπορεί να είναι σύνολο, παράμετρος, μεταβλητή ή εξίσωση.

*P.dim*: Βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει τις διαστάσεις του πεδίου .val

*P.val*: Ο πίνακας με τις τιμές για το σύμβολο *P*.

*P.form*: Η μορφή με την οποία θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα, επιλογή μεταξύ αραιής αναπαράστασης (sparse form) ή πλήρους αναπαράστασης (full form) πίνακα.

*P.uels*: Αποτελείται από τα διανύσματα των δεικτών του πίνακα της παραμέτρου. Κάθε δείκτης αναπαρίσταται ως {1xN} όπου *N* η διάσταση του δείκτη. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η παράμετρος έχει 3 διαστάσεις άρα ορίζονται 3 δείκτες με διαστάσεις {1xN} έκαστος.

Μετά από αυτήν την εντολή, τα δεδομένα που αναγνώστηκαν από το αρχείο GDX είναι έτοιμα για χρήση στο MATLAB. Ακριβώς ανάλογα γίνεται και η εγγραφή από το MATLAB σε αρχείο GDX ώστε να είναι προσβάσιμα από το GAMS μέσω της εντολής **wgdx**('fileName', structure), όπου 'fileName' είναι το όνομα του αρχείου GDX στο οποίο θα γίνει η εγγραφή και structure είναι το σύμβολο των δεδομένων προς εγγραφή. Για παράδειγμα :

```
Kp.name='Kp';
Kp.val=Kpval;
Kp.type='parameter';
Kp.form='full';
```

```
Kp.uels={N.uels,N.uels};  
wgdx('fileName', Kp);
```

Για τα επιμέρους πεδία της δομής δεδομένων ισχύει ότι για την εντολή **rgdx**. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η επικοινωνία των δύο προγραμμάτων. Προκειμένου να είναι δυνατή η παραπάνω επικοινωνία θα πρέπει το η διεύθυνση της θέσης του αρχείου να ανήκει στις διευθύνσεις που έχει πρόσβαση το MATLAB. Επίσης το αρχείο *.gms* θα πρέπει να βρίσκεται στον ίδιο φάκελο με το αρχείο GDX. Για να εκτελεστεί η μεταφορά δεδομένων θα πρέπει η τρέχουσα διεύθυνση εργασίας του MATLAB να ταυτίζεται με τον φάκελο των δύο παραπάνω αρχείων.

## **ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

### **6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Σε αυτό το κεφάλαιο εφαρμόστηκε η αναλυτική μέθοδος υπολογισμού των συντελεστών ευαισθησίας της τάσης όπως αυτή περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 3 και η μέθοδος ελέγχου της τάσης όπως αυτή περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Η εφαρμογή έγινε σε διάφορα ΔΔΗΕ για να εξεταστεί καλύτερα η αποτελεσματικότητα της μεθόδου ελέγχου της τάσης. Χρησιμοποιήθηκαν δίκτυα 13, 83 και 135 ζυγών, διαμορφωμένα έτσι ώστε η διακύμανση της τάσης να ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια, ώστε να χρήζουν ελέγχου της τάσης. Συγκεκριμένα, σε κάθε ένα από αυτά τα δίκτυα, προσομοιώθηκαν οι ακόλουθες τέσσερις περιπτώσεις :

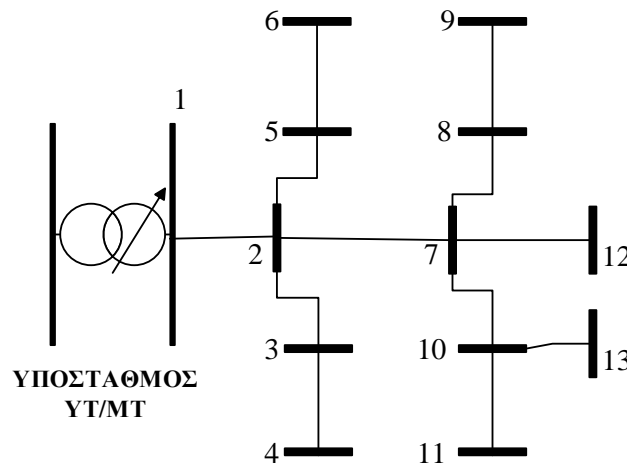
1. Περίπτωση Α: Δυνατότητα ρύθμισης 10% του φορτίου κάθε ζυγού, με επιπρόσθετη χρήση του ΣΑΤΥΦ του υποσταθμού και αντίστοιχα χωρίς τη χρήση του ΣΑΤΥΦ.
2. Περίπτωση Β: Δυνατότητα ρύθμισης 20% του φορτίου κάθε ζυγού, με επιπρόσθετη χρήση του ΣΑΤΥΦ του υποσταθμού και αντίστοιχα χωρίς τη χρήση του ΣΑΤΥΦ.
3. Περίπτωση Γ: Δυνατότητα ρύθμισης 30% του φορτίου κάθε ζυγού, με επιπρόσθετη χρήση του ΣΑΤΥΦ του υποσταθμού και αντίστοιχα χωρίς τη χρήση του ΣΑΤΥΦ.
4. Περίπτωση Δ: Δυνατότητα ρύθμισης 30% του φορτίου κάθε ζυγού ενόσω ένας ή περισσότεροι ζυγοί δεν ανταποκρίνονται επαρκώς στις ρυθμίσεις φορτίου που τους υποδεικνύονται.

Για τις παραπάνω περιπτώσεις θεωρείται ότι τα όρια της τάσης του δικτύου είναι από 0,95 α.μ έως 1,05 α.μ. Τα όρια της διακύμανσης στην παρούσα μέθοδο θέτονται από 0,96 α.μ έως 1,04 α.μ. Η διαφορά αυτή είναι απαραίτητη διότι η ρύθμιση του φορτίου μπορεί να είναι σταδιακή, δηλαδή να μην εφαρμόζεται όλη στιγμιαία αλλά σε διάρκεια μερικών δεκάδων δευτερολέπτων ή μερικών λεπτών. Επίσης είναι σημαντική ώστε να υπάρχει περιθώριο σφάλματος που οφείλεται στον συμψηφισμό των σφαλμάτων που μπορεί να ενέχουν η μέθοδος ρύθμισης αλλά και η μέθοδος πρόβλεψης. Η μέθοδος ενεργοποιείται μόνο όταν η τιμή της τάσης αγγίζει τα όρια διακύμανσης που ορίστηκαν στην μέθοδο ώστε να αποφεύγεται ο κορεσμός της χρήσης των διαθέσιμων δυνατοτήτων της ζήτησης απόκρισης καταναλωτών.

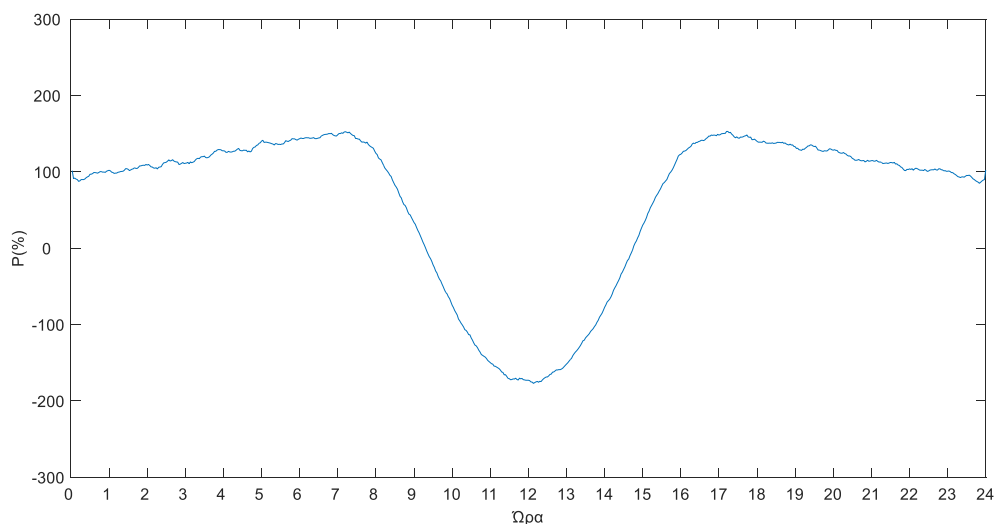
Συγκρίνοντας τις παραπάνω περιπτώσεις φαίνεται το όφελος από τη χρήση της μεθόδου καθώς επίσης φαίνονται τα σημεία στα οποία θα μπορούσε αυτή μελλοντικά να επεκταθεί και να βελτιωθεί. Όλες οι προσομοιώσεις έγιναν σε Η/Υ με επεξεργαστή Intel Core i3 2.4GHz και RAM 4 GB.

## 6.2 ΔΙΚΤΥΟ 13 ΖΥΓΩΝ ΤΟΥ ΙΕΕΕ

Το δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την υποενότητα είναι μία παραλλαγή του δικτύου 13 ζυγών [37] (Σχήμα 6.1) του Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών — ΙΕΕΕ (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Εδώ οι γραμμές έχουν γίνει 10-12 φορές μεγαλύτερες και τα φορτία στους ζυγούς έχουν αυξηθεί ώστε το δίκτυο να αγγίζει τα όρια λειτουργίας του. Στο δίκτυο θεωρείται ότι υπάρχουν δύο διαφορετικές ημερήσιες καμπύλες φορτίου, η καμπύλη Α του Σχήματος 6.2 που παρατηρείται στους ζυγούς 5, 6, 7, 10, 12 και 13 που έχουν φωτοβολταϊκή παραγωγή και η καμπύλη Β του Σχήματος 6.3 που παρατηρείται στους υπόλοιπους ζυγούς του δικτύου.



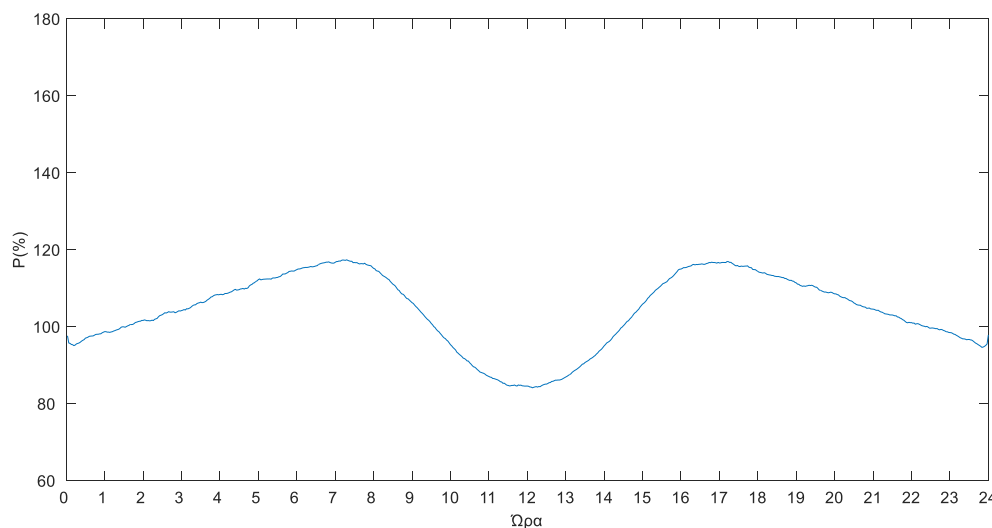
Σχήμα 6.1: Δίκτυο 13 ζυγών ΙΕΕΕ.



Σχήμα 6.2: Προφίλ Α: Ημερήσια καμπύλη έγχυσης (= Κατανάλωση - Παραγωγή) ενεργού ισχύος (%) για κάθε ζυγό με φωτοβολταϊκή παραγωγή.

Επισημαίνεται πως στο προφίλ Α οι μεταβολές της ισχύος είναι αρκετά μεγαλύτερες λόγω της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές οι οποίες για την συγκεκριμένη εργασία θεωρείται πως υπερκαλύπτουν τις ανάγκες του ζυγού που είναι

συνδεδεμένες. Συνολικά το ΔΔΗΕ θεωρείται πως για μέγιστη δυνατή διανεμημένη παραγωγή μπορεί να προσφέρει ενέργεια στο ανάντι δίκτυο.



**Σχήμα 6.3:** Προφίλ Β: Ημερήσια καμπύλη έγχυσης ενεργού ισχύος (%) για κάθε ζυγό φορτίου.

Το προφίλ Β χαρακτηρίζεται από ηπιότερες μεταβολές που κυμαίνονται  $\pm 20\%$  από την μέση τιμή του φορτίου. Αντίστοιχα μεταβάλλεται και η άεργος ισχύς κάθε ζυγού.

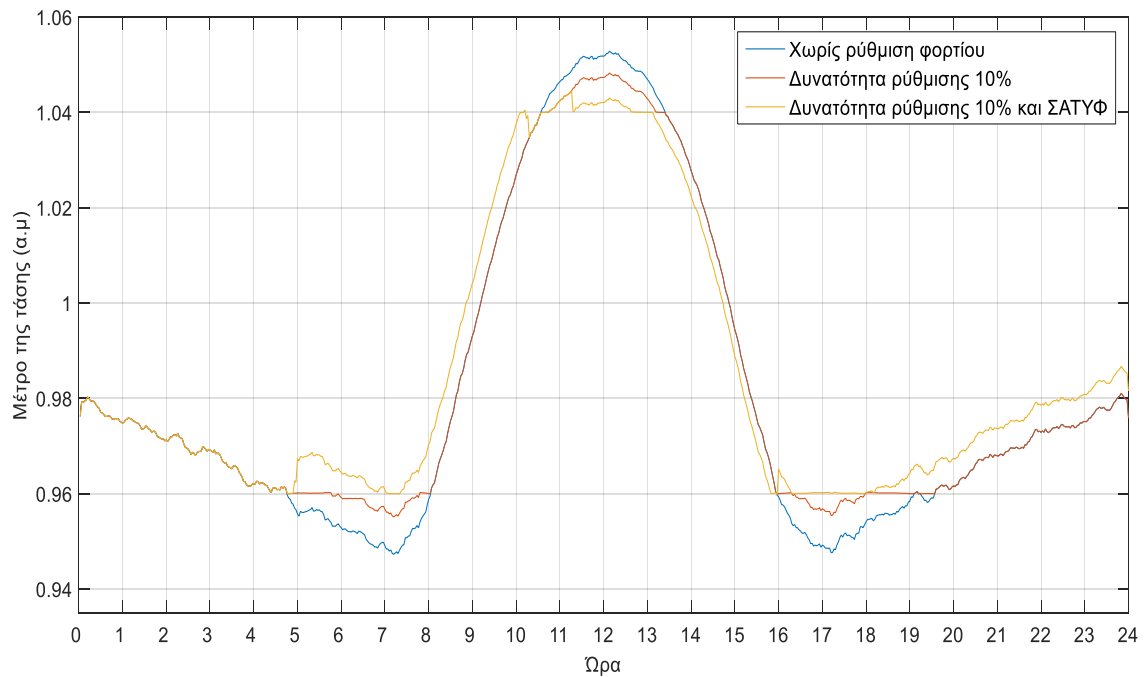
### 6.2.1 Περίπτωση Α: Δυνατότητα ρύθμισης 10% του φορτίου

Για την περίπτωση που ο διαχειριστής μπορεί να ρυθμίσει ελαστικό φορτίο της τάξης του 10% σε κάθε ζυγό, η διακύμανση της τάσης μπορεί να μειωθεί κατά ένα αναλογικά σημαντικό ποσοστό όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4, όπου δίνεται το γράφημα της τάσης του ζυγού 13 (μακρινότερος ζυγός) κατά τη διάρκεια μίας ημέρας. Το ποσοστό αυτό μπορεί να φτάσει έως 0,008 α.μ, όπως στην χρονική στιγμή 07:15, όπου το φορτίο του ζυγού είναι μέγιστο. Ωστόσο, η ρύθμιση μόνο του 10% του φορτίου δεν μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την τάση του ζυγού 13. Με τη χρήση του ΣΑΤΥΦ του υποσταθμού ταυτόχρονα με τη ρύθμιση του φορτίου παρατηρείται μεγάλη βελτίωση στη ρύθμιση της τάσης. Επιπρόσθετα, φαίνεται και μια δευτερεύουσα χρήση που μπορεί να έχει η παρούσα μέθοδος, η εξομάλυνση της μορφής της τάσης κατά την αλλαγή λήψης του ΣΑΤΥΦ.

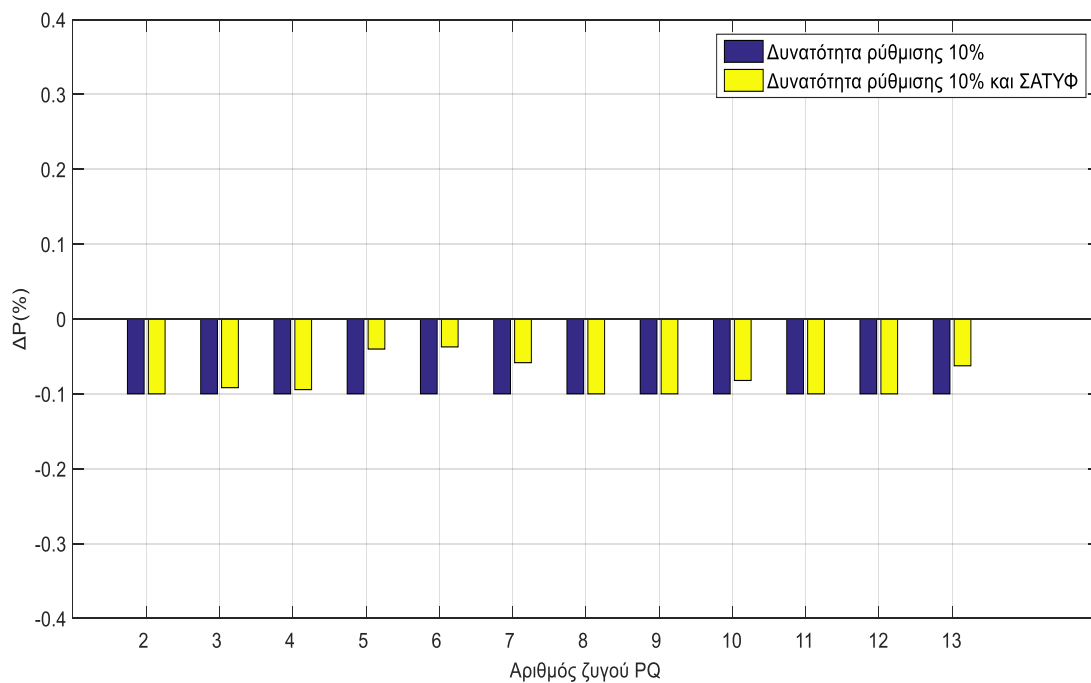
Παρατηρώντας τη ρύθμιση ενεργού ισχύος σε κάθε ζυγό για τη χρονική στιγμή 07:15 (Σχήμα 6.5), γίνεται αντιληπτό το πλεονέκτημα χρήσης του ΣΑΤΥΦ καθώς πέρα από την καλύτερη ρύθμιση της τάσης, η εντολή για μεταβολή της ισχύος είναι μικρότερη. Ωστόσο, λόγω της μεγάλης απόκλισης της τάσης και του μικρού ποσοστού του διαθέσιμου ρυθμιζόμενου φορτίου, κάθε ζυγός λαμβάνει εντολή για ρύθμιση ενεργού καθώς και αέργου ισχύος (Σχήμα 6.6).

Την χρονική στιγμή όπου το φορτίο στο δίκτυο είναι ελάχιστο και η διανεμημένη παραγωγή είναι μέγιστη (12:00), όλοι οι ζυγοί λαμβάνουν εντολή για ρύθμιση ενεργού (Σχήμα 6.7) και αέργου ισχύος (Σχήμα 6.8). Στην περίπτωση αυτή φαίνεται πως οι ζυγοί 5, 6, 7, 10, 11, 12, και 13 καλούνται να μειώσουν την παραγόμενη ισχύ, γεγονός που μπορεί να

γίνει είτε με μείωση της διανεμημένης παραγωγής, είτε με αύξηση της κατανάλωσης του φορτίου αφού ζητείται μείωση της εγχεόμενης ισχύος του ζυγού.

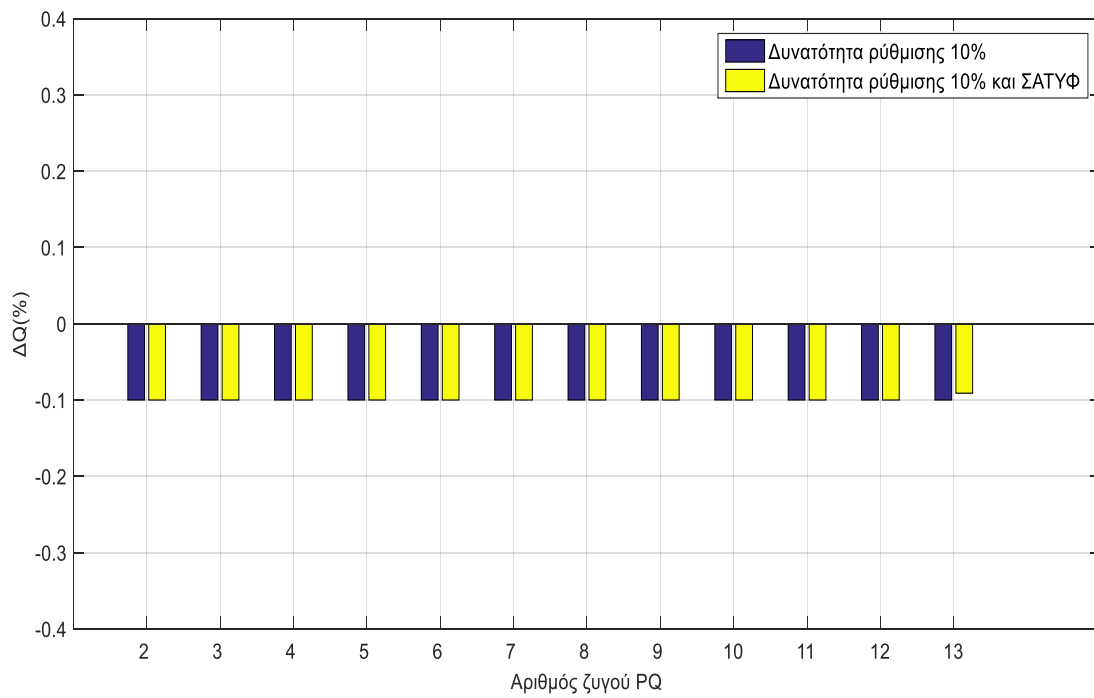


**Σχήμα 6.4:** Η τάση του ζυγού 13, του δικτύου 13 ζυγών, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας για 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

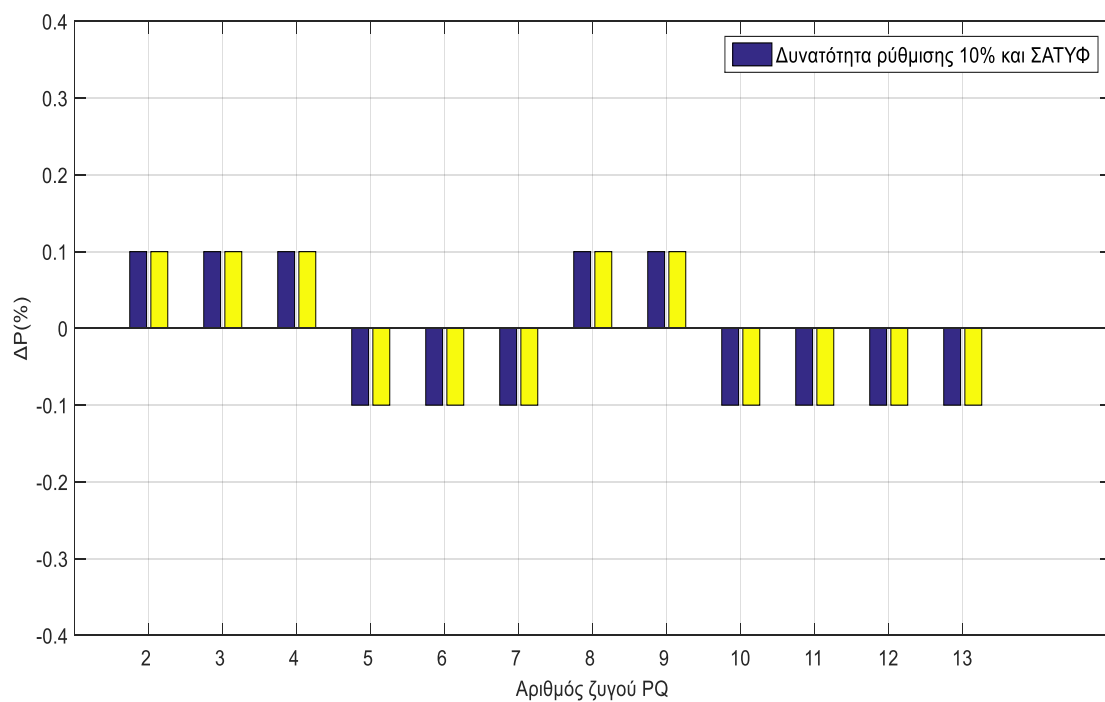


**Σχήμα 6.5:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) κάθε ζυγού τη χρονική στιγμή 07:15, για δίκτυο 13 ζυγών και για 10% διαθέσιμο ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

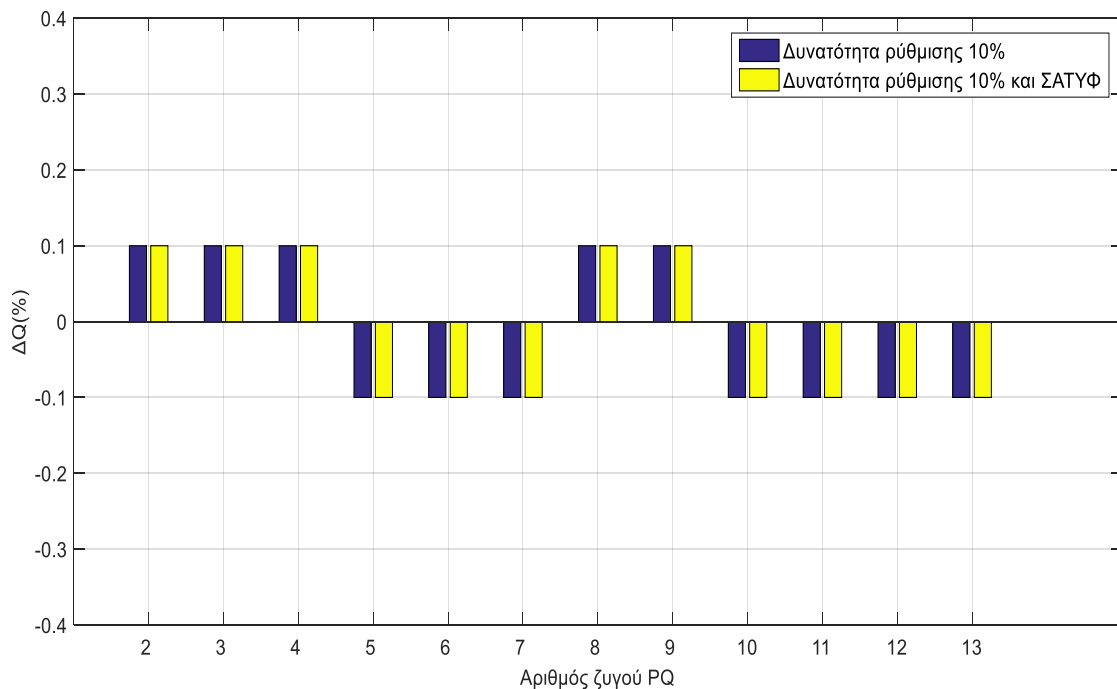




**Σχήμα 6.6:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης αέργου ισχύος (%) κάθε ζυγού κατά τη χρονική στιγμή 07:15 για δίκτυο 13 ζυγών και για 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.



**Σχήμα 6.7:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) κάθε ζυγού κατά τη χρονική στιγμή 12:00 για δίκτυο 13 ζυγών και για 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

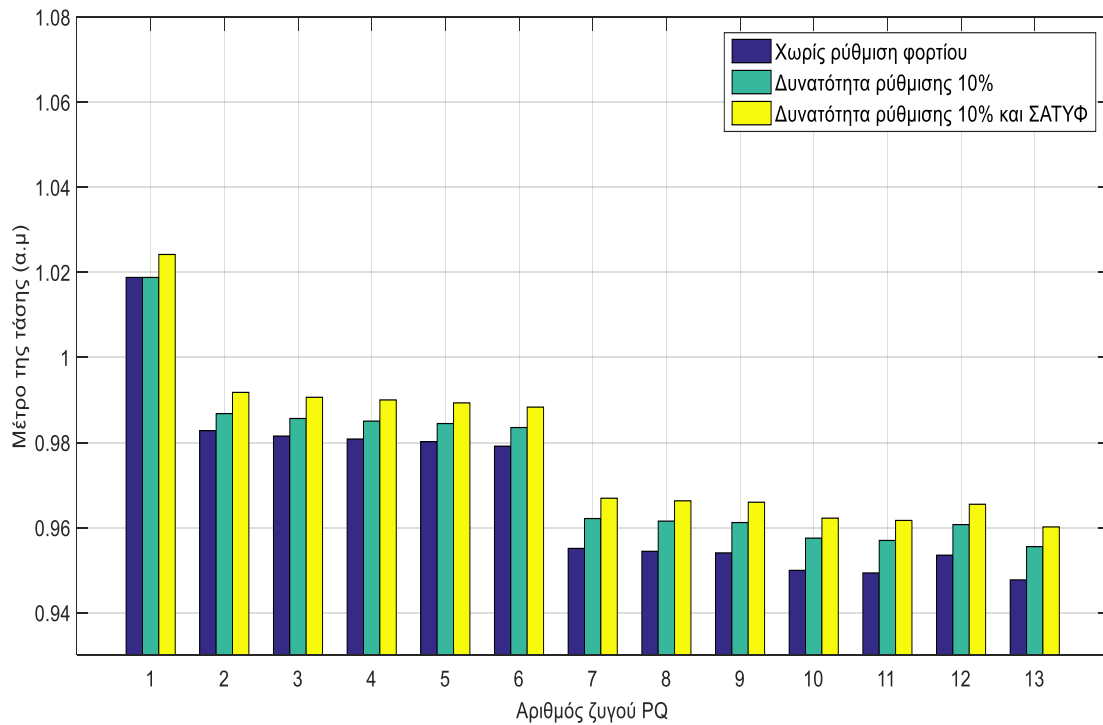


**Σχήμα 6.8:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης (%) αέργου ισχύος κάθε ζυγού κατά η χρονική στιγμή 07:15 για δίκτυο 13 ζυγών και για 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

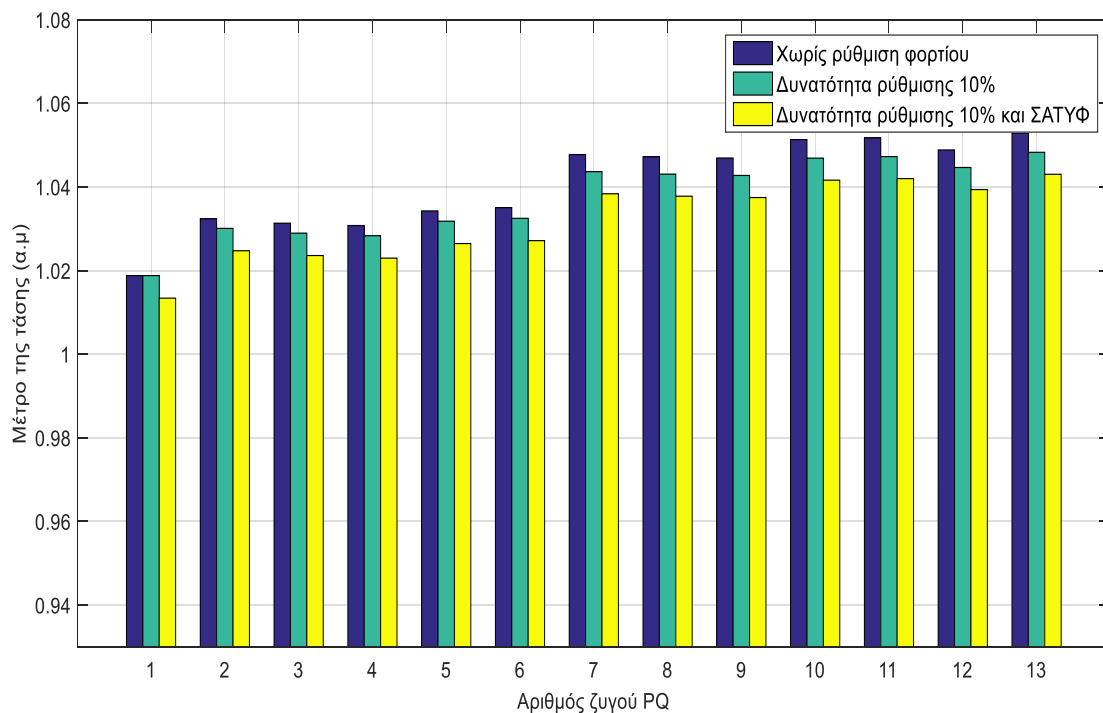
Η ζήτηση για μεταβολή της ισχύος όλων των ζυγών γίνεται σε περιπτώσεις που η μεταβαλλόμενη ισχύς ενός ζυγού δεν είναι αρκετή για τη διόρθωση της τάσης. Αυτό μπορεί να συμβεί σε περίπτωση που οι τελευταίοι ζυγοί μιας γραμμής παρουσιάζουν πρόβλημα, όπως στην παρούσα περίπτωση, και προκειμένου να διορθωθεί καλούνται να μεταβάλλουν το φορτίο τους και άλλοι ζυγοί που συνδέονται έμμεσα με τους ζυγούς αυτούς. Στα Σχήματα 6.9 και 6.10 φαίνονται οι τάσεις όλων των ζυγών στις δύο χρονικές στιγμές που παρουσιάζεται μεγαλύτερο πρόβλημα στην τάση. Η χρήση του ΣΑΤΥΦ όπως φαίνεται στα σχήματα αυτά, επηρεάζει την τάση όλων των ζυγών, η οποία έχει μικρότερη διακύμανση συνεχώς σε σχέση με την περίπτωση στην οποία υπάρχει μόνο η απόκριση ζήτησης για τη ρύθμιση της τάσης. Συμπεραίνεται, ότι η μέθοδος λαμβάνει δραστικές αποφάσεις για τη ρύθμιση της τάσης όταν παρουσιάζεται πρόβλημα, δίνοντας εντολή για μεταβολή της ισχύος ακόμα και σε ζυγούς που δεν παρουσιάζουν πρόβλημα. Ακόμα φαίνεται πως συνυπολογίζει την τάση όλων των ζυγών και αποφασίζει ώστε αυτοί να μην ρυθμίζονται παραπάνω από όσο χρειάζεται ώστε να φτάσουν κοντά στα επιτρεπτά όρια.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.9 η ημερήσια τιμή του ενιαίου μεταδιδόμενου σήματος για τη ρύθμιση του φορτίου στον ζυγό 13 ακολουθεί χρονικά την κυματομορφή της τάσης, δίνοντας τα κατάλληλα σήματα που υλοποιούν τις ρυθμίσεις των Σχημάτων 6.5–6.8. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ΣΑΤΥΦ, το σήμα μηδενίζεται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, γεγονός που σημαίνει ότι δεν απαιτείται ρύθμιση φορτίου για το διάστημα αυτό. Για παράδειγμα, μεταξύ 05:00 και 08:00, η μέθοδος χωρίς το ΣΑΤΥΦ ζητά από τον ζυγό μειωμένο φορτίο συνεχόμενα για 3 ώρες ενώ με τη χρήση ΣΑΤΥΦ η ζήτηση αυτή περιορίζεται για 5-10 λεπτά μεταξύ 04:50 και 05:00 και για 15 περίπου λεπτά μεταξύ 07:00 και 07:15. Η αντίστοιχη μεταβολή των λήψεων του ΣΑΤΥΦ φαίνονται στο σχήμα 6.10. Τονίζεται πως για το δίκτυο αυτό, η τιμή της παραμέτρου  $b$  επιλέχθηκε να είναι 0,0014, τιμή

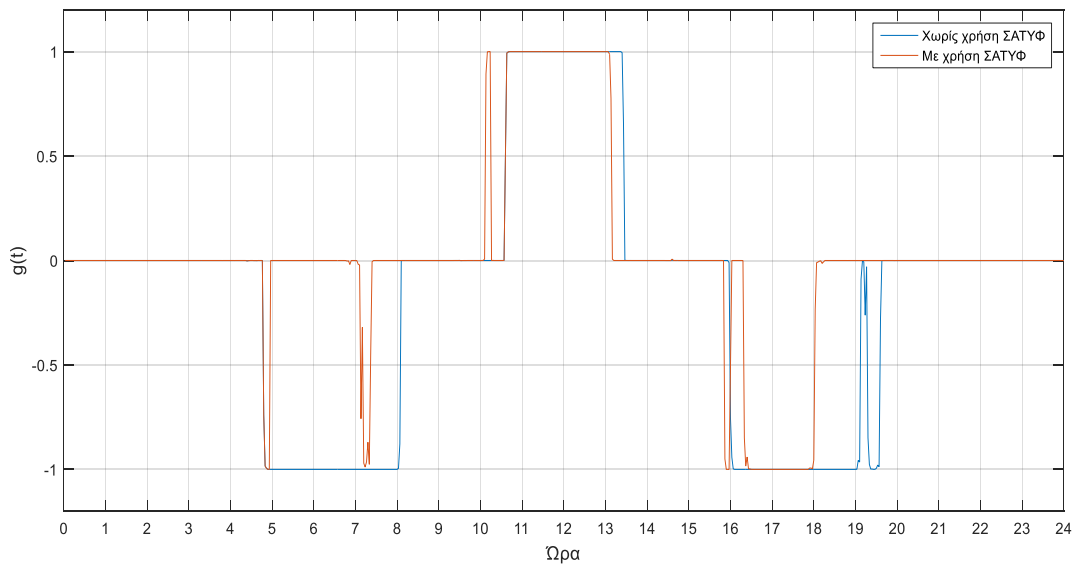
η οποία είναι σχετικά χαμηλή και επιταχύνει τον κορεσμό της τιμής του σήματος στο 1 ή το -1 ακόμα και για μικρές επιθυμητές μεταβολές της ισχύος.



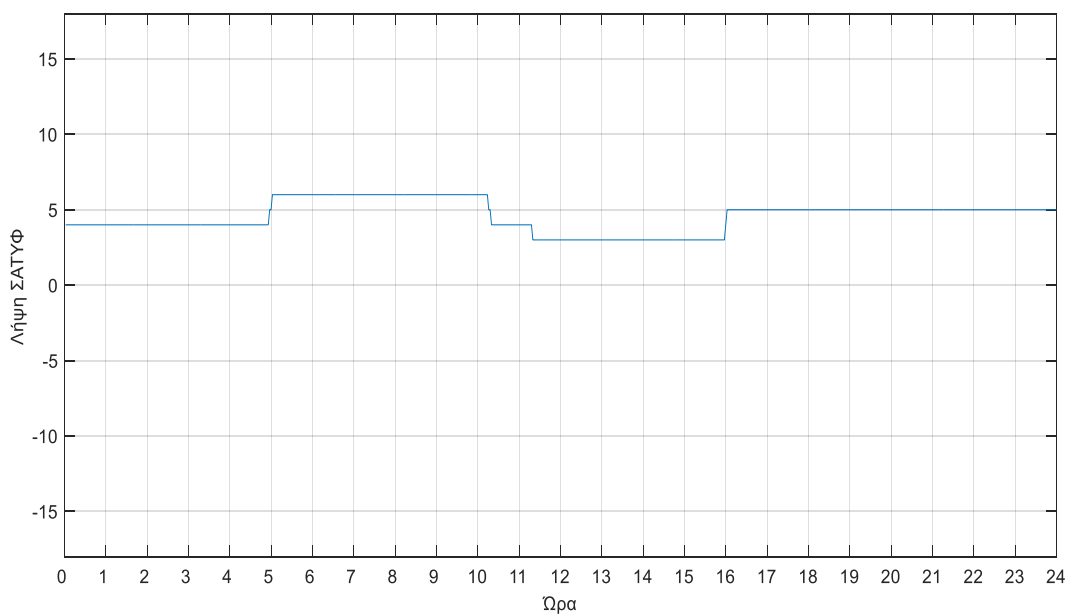
**Σχήμα 6.9:** Ραβδόγραμμα των τάσεων όλων των ζυγών τη χρονική στιγμή 07:15 για δίκτυο 13 ζυγών και για 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.



**Σχήμα 6.10:** Ραβδόγραμμα των τάσεων όλων των ζυγών τη χρονική στιγμή 12:00 για δίκτυο 13 ζυγών και για 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.



**Σχήμα 6.11:** Ενιαίο μεταδιδόμενο σήμα ελέγχου που εκπέμπεται στο ζυγό 13 του δικτύου 13 ζυγών για 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο με παράμετρο  $b=0.0014$ .



**Σχήμα 6.12:** Τιμή λήψης του ΣΑΤΥΦ κατά τη διάρκεια της ημέρας στο δίκτυο 13 ζυγών και για 10% ελεγχόμενο ελαστικό.

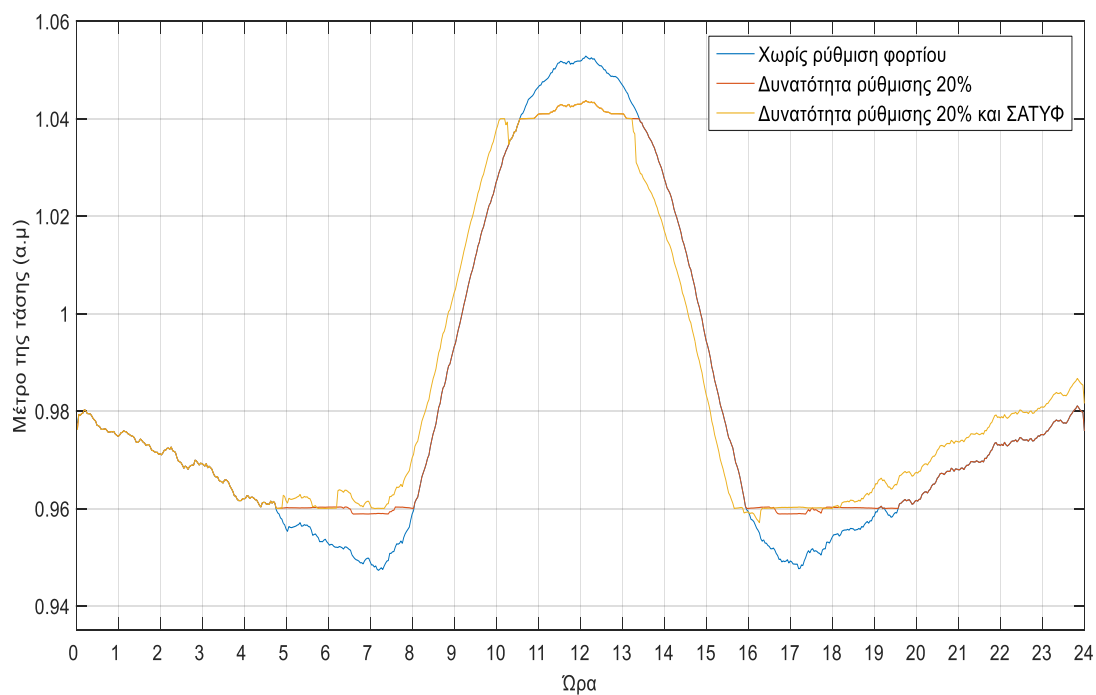
Συμπερασματικά, η χρήση της μεθόδου ρύθμισης φορτίου σε πραγματικό χρόνο με δυνατότητα ρύθμισης 10% του συνολικού φορτίου κάθε ζυγού, μπορεί να βελτιώσει τη διακύμανση της τάσης, ακόμα και να τη φέρει εντός επιτρεπτών ορίων για σχετικά μικρές αποκλίσεις. Ωστόσο, σε συνδυασμό με τη χρήση του ΣΑΤΥΦ μπορεί να αποφέρει πολύ καλύτερα αποτελέσματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4.

Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, δεδομένου ότι τα στοιχεία του δικτύου (τάσεις, ισχύεις, αντιστάσεις κλπ) θεωρούνται γνωστά, διαρκεί περίπου 0,004

δευτερόλεπτα ανά εκτέλεση. Η εκτέλεση όλου του λογισμικού προσομοίωσης, που για κάθε ρύθμιση εκτελεί μία προσομοίωση μέσω MATPOWER για τα δεδομένα του δικτύου, τον υπολογισμό των συντελεστών ευαισθησίας και μία ακόμα προσομοίωση για τα δεδομένα του δικτύου μετά την εφαρμογή της ρύθμισης έχει διάρκεια επανάληψης 1,1-1,2 δευτερόλεπτα ανά επανάληψη κατά μέσο όρο.

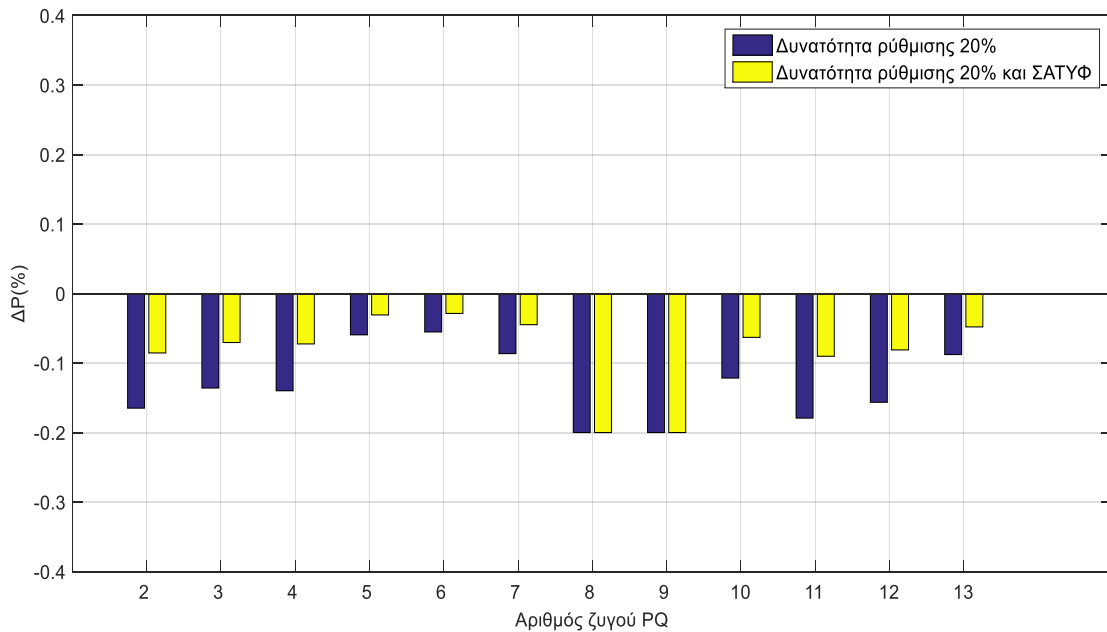
### 6.2.2 Περίπτωση Β: Δυνατότητα ρύθμισης 20% του φορτίου.

Αυξάνοντας το ποσοστό που μπορεί να ρυθμιστεί σε κάθε ζυγό, παρατηρείται ακόμα μεγαλύτερη βελτίωση της διακύμανσης της τάσης του ζυγού 13 κατά τη διάρκεια μίας ημέρας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.13.

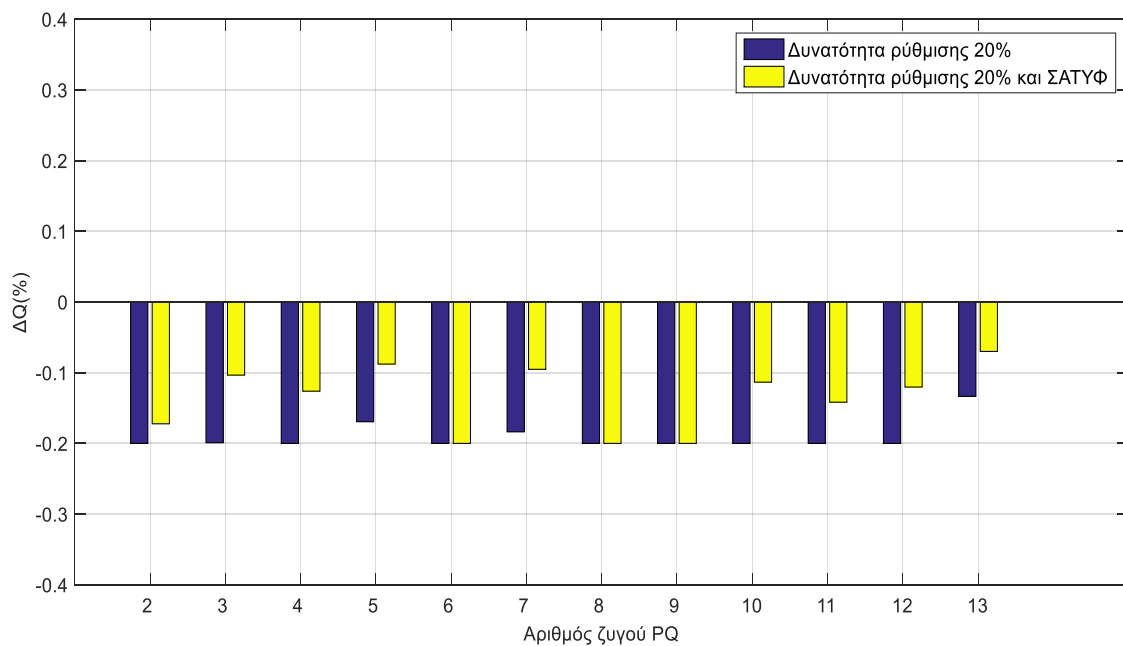


**Σχήμα 6.13:** Η τάση του ζυγού 13 του δικτύου 13 ζυγών κατά τη διάρκεια μιας ημέρας για 20% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

Η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της τάσης στο γράφημα αυτό είναι ίδια είτε χρησιμοποιείται αποκλειστικά η ρύθμιση φορτίου είτε συνδυάζεται με τη χρήση ΣΑΤΥΦ. Η διαφορά στις δύο περιπτώσεις έγκειται στο μέγεθος της ρύθμισης του φορτίου, το οποίο αντισταθμίζεται από τη ρύθμιση ΣΑΤΥΦ. Η διαφορά αυτή είναι πιο αισθητή τη χρονική στιγμή ελάχιστης τάσης, δηλαδή στις 07:15 (Σχήμα 6.14 και Σχήμα 6.15). Στις 12:00, όπου το φορτίο είναι ελάχιστο και η διανεμημένη παραγωγή από ΑΠΕ είναι μέγιστη (Σχήμα 6.16), παρατηρείται η μέγιστη ρύθμιση ενεργού ισχύος κάθε ζυγού.

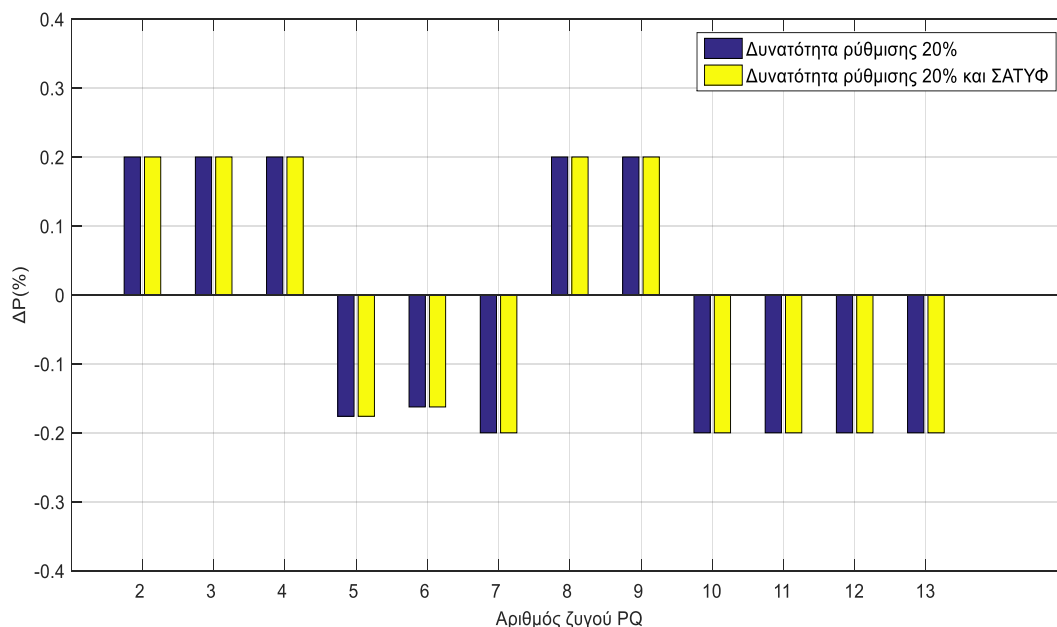


**Σχήμα 6.14:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) κάθε ζυγού τη χρονική στιγμή 07:15, για το δίκτυο 13 ζυγών και για 20% διαθέσιμο ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

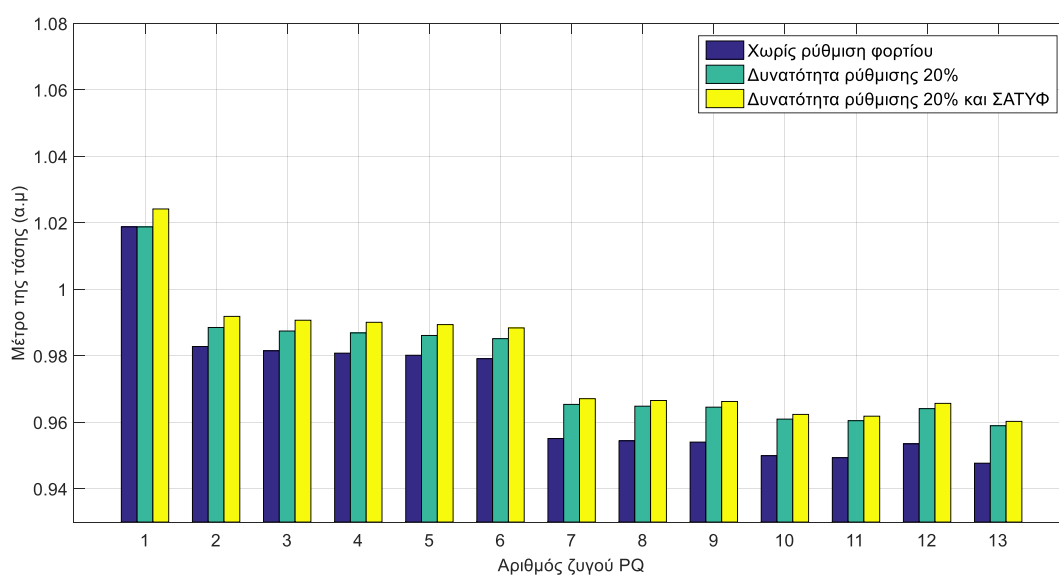


**Σχήμα 6.15:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης αέργου ισχύος(%) κάθε ζυγού τη χρονική στιγμή 07:15, για το δίκτυο 13 ζυγών και για 20% διαθέσιμο ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

Γενικά, προτιμάται η χρήση του ΣΑΤΥΦ να είναι περιορισμένη οπότε η χρήση του επιβαρύνεται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης του Κεφαλαίου 4. Ωστόσο, υπάρχει ανάλογος όρος που αντισταθμίζει την επιβάρυνση αυτή και ενθαρρύνει τη χρήση του ΣΑΤΥΦ σε περιπτώσεις που αποστέλλεται σήμα ελέγχου για ρύθμιση του φορτίου σε πολλούς ζυγούς. Αυτό συμβαίνει για παράδειγμα στις 06:10 περίπου στο μοντέλο προσομοίωσης, όπου οι ζυγοί 7-13 ξεπερνούν τα όρια της επιτρεπόμενης διακύμανσης (Σχήμα 6.17) .



**Σχήμα 6.16:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) κάθε ζυγού τη χρονική στιγμή 12:00, για το δίκτυο 13 ζυγών και για 20% διαθέσιμο ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

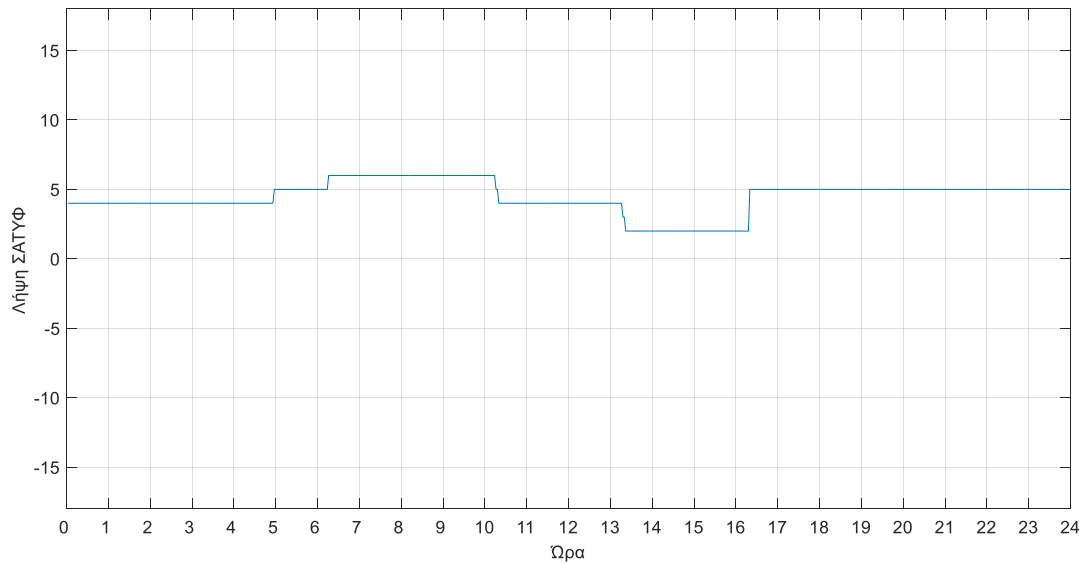


**Σχήμα 6.17:** Ραβδόγραμμα των τάσεων όλων των ζυγών τη χρονική στιγμή 06:10 για το δίκτυο 13 ζυγών και για 20% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

Η χρήση του ενιαίου μεταδιδόμενου σήματος και αλλαγή των λήψεων του ΣΑΤΥΦ (Σχήμα 6.18) είναι περίπου ίδια με την περίπτωση Α. Η αλλαγές του ΣΑΤΥΦ στην περίπτωση Α είναι κατά μία λιγότερες αλλά με μεγαλύτερο πλάτος βήματος, όπως φαίνεται τις χρονικές στιγμές 05:00 και 06:10. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι στην περίπτωση Β, η μέθοδος χρησιμοποιεί το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης δυνατότητας ρύθμισης φορτίου και επιλέγει να ρυθμίσει το ΣΑΤΥΦ σταδιακά σε συνδυασμό με το φορτίο.

Σημαντικό πλεονέκτημά της περίπτωσης αυτής είναι πως μπορεί να αποφευχθεί, αν αυτό είναι επιθυμητό, η χρήση του ΣΑΤΥΦ και το αποτέλεσμα θα είναι περίπου το ίδιο. Αν

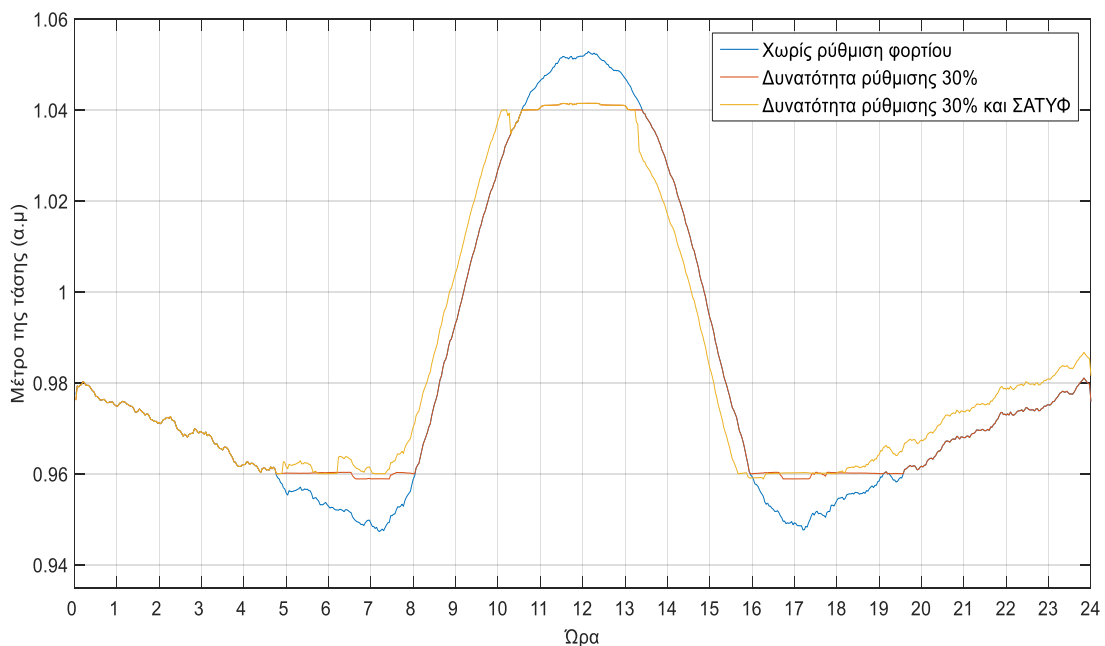
δεν υπάρχει τέτοιος περιορισμός, μπορεί να εφαρμοστεί η ρύθμιση του φορτίου επικουρικά στη χρήση του ΣΑΤΥΦ περιορίζοντας το πλάτος της αλλαγής λήψης. Ο χρόνος εκτέλεσης είναι ίδιος με την περίπτωση Α.



**Σχήμα 6.18:** Τιμή της λήψης του ΣΑΤΥΦ κατά τη διάρκεια της ημέρας στο δίκτυο 13 ζυγών για 20% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

### 6.2.3 Περίπτωση Γ: Δυνατότητα ρύθμισης 30% του φορτίου.

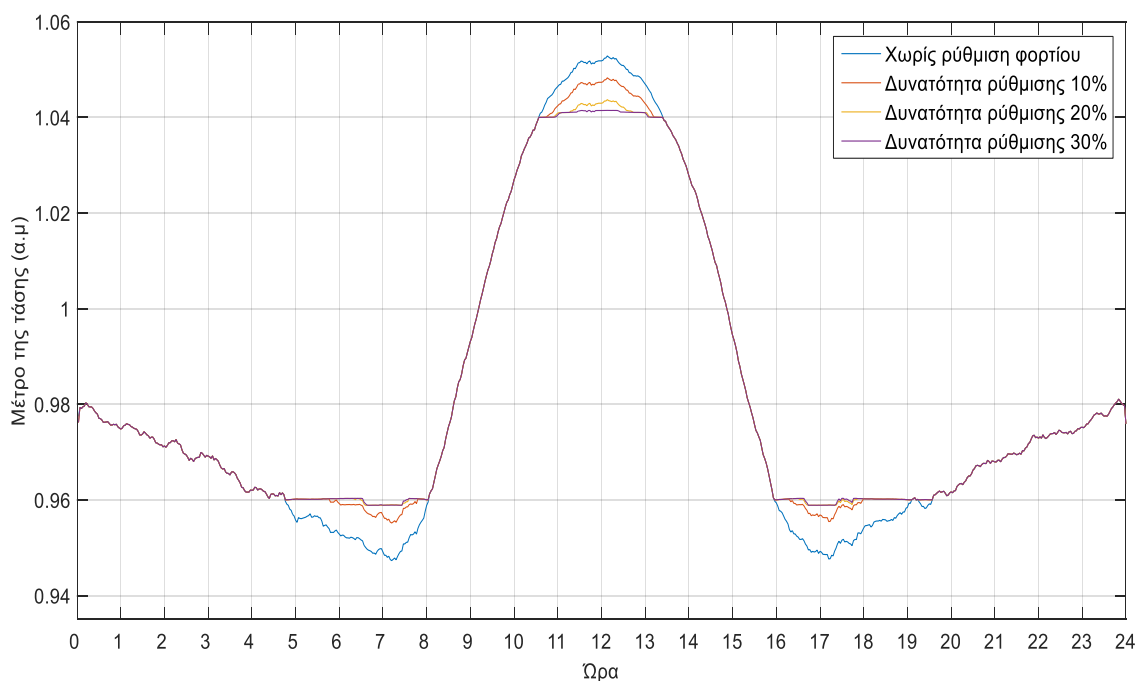
Η περαιτέρω αύξηση του ρυθμιζόμενου φορτίου από το 20% στο 30% δεν έχει μεγάλη επίπτωση στην τάση διότι ο στόχος της ρύθμισης είχε οριακά επιτευχθεί (Σχήμα 6.19).



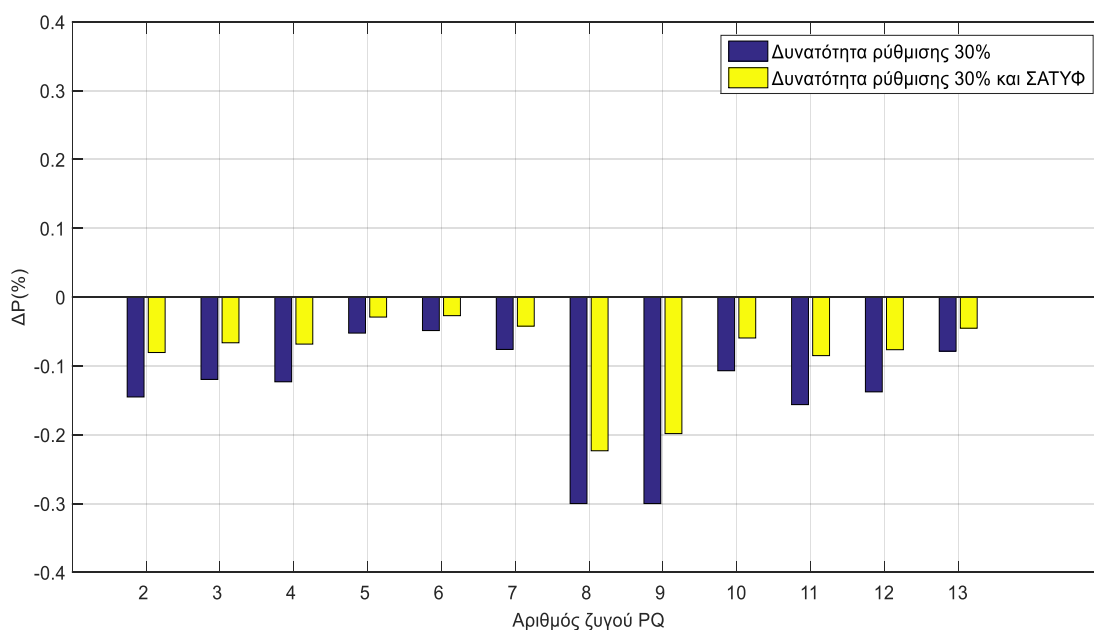
**Σχήμα 6.19:** Η τάση του ζυγού 13, δικτύου 13 ζυγών, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας για 30% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.



Συγκρίνοντας τις περιπτώσεις Α, Β και Γ (Σχήμα 6.20) γίνεται αντιληπτό ότι η μέθοδος μπορεί να διορθώσει την παρούσα διακύμανση με τουλάχιστον 20% ελεγχόμενο φορτίο. Επομένως, η χρήση ακόμα μεγαλύτερου ποσοστού, όπως το 30%, θα μπορούσε να διορθώσει ακόμα μεγαλύτερα προβλήματα χωρίς τη χρήση του ΣΑΤΥΦ. Είναι μία μέθοδος, με υψηλό κριτήριο οικονομίας και σημαντική επίπτωση στην τάση μίας γραμμής.

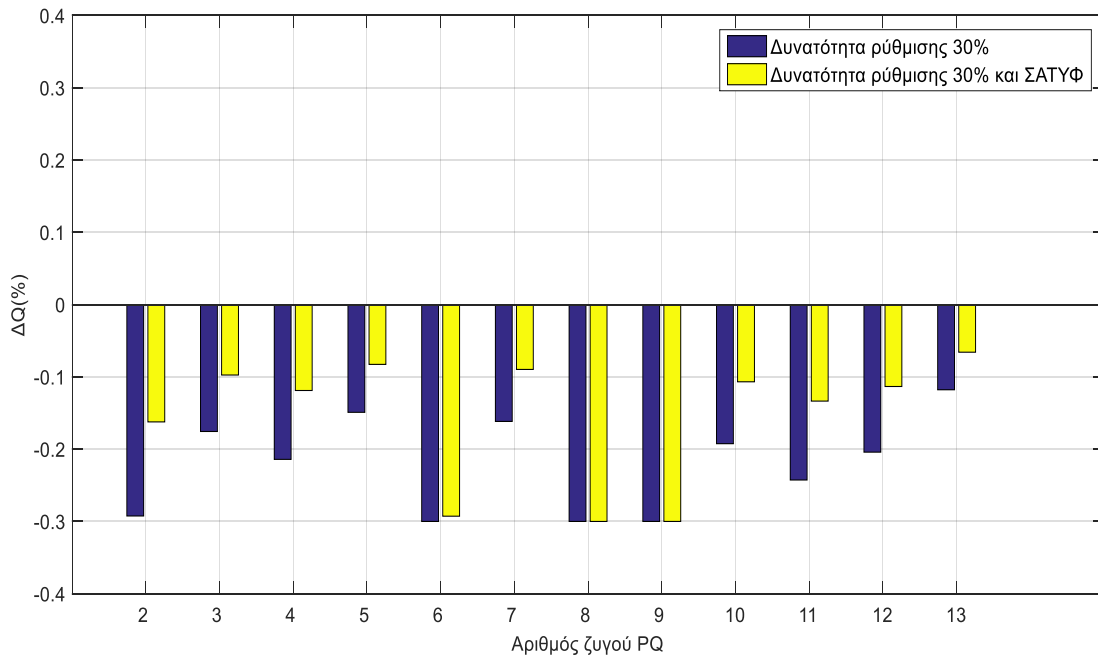


**Σχήμα 6.20:** Σύγκριση του μέτρου της τάσης (α.μ) για τις περιπτώσεις 10% ρυθμιζόμενου ελαστικού φορτίου, 20% ρυθμιζόμενου ελαστικού φορτίου και 30% ρυθμιζόμενου ελαστικού φορτίου.



**Σχήμα 6.21:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) κάθε ζυγού κατά τη στιγμή 07:15 για δίκτυο 13 ζυγών και 30% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

Η κατανομή της ρύθμισης ενεργού ισχύος στην περίπτωση Γ ( Σχήμα 6.21) είναι διαφορετική από την περίπτωση Β (Σχήμα 6.14) παρότι οι δύο μέθοδοι έχουν τα σχεδόν ίδια αποτελέσματα στην τάση. Για παράδειγμα, παρατηρείται πως η μεταβολή της ενεργού ισχύος στους ζυγούς 8 και 9 είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση Γ από την περίπτωση Β. Από αυτό συμπεραίνεται ότι όταν υπάρχει μεγαλύτερη δυνατότητα μεταβολής της ισχύος για κάθε ζυγό προσεγγίζεται περισσότερο η βέλτιστη λύση. Αντίστοιχα, ίδιο ισχύει και για την άεργο ισχύ στην περίπτωση Γ (Σχήμα 6.22) και στην περίπτωση Β (Σχήμα 6.15).

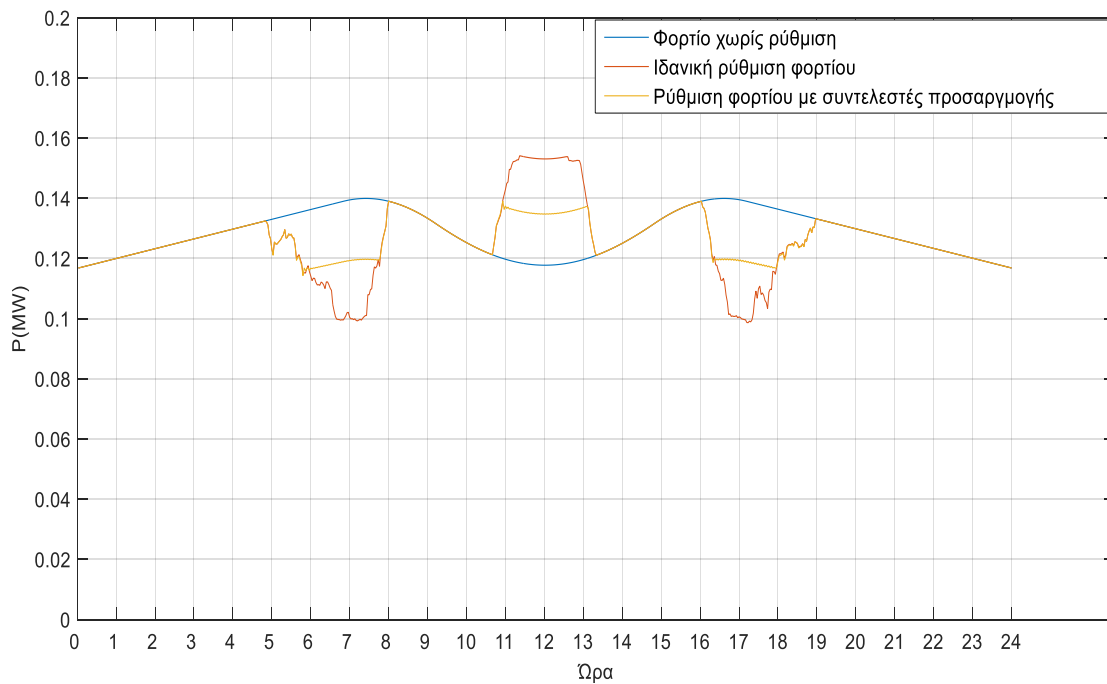


**Σχήμα 6.22:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης άεργου ισχύος (%) κάθε ζυγού κατά στιγμή 07:15 δίκτυο 13 ζυγών και για 30% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

Η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ και οι τιμές του ενιαίου μεταδιδόμενου σήματος ελέγχου είναι σχεδόν ίδιες με την περίπτωση Β καθώς η ανάγκη ρύθμισης της τάσης μέσω ελέγχου του φορτίου είχε σχεδόν κορεστεί ήδη από την περίπτωση αυτή. Τέλος, ο χρόνος εκτέλεσης είναι ίδιος με την περίπτωση Α.

#### 6.2.4 Περίπτωση Δ: Λειτουργία με μερική απόκριση φορτίου.

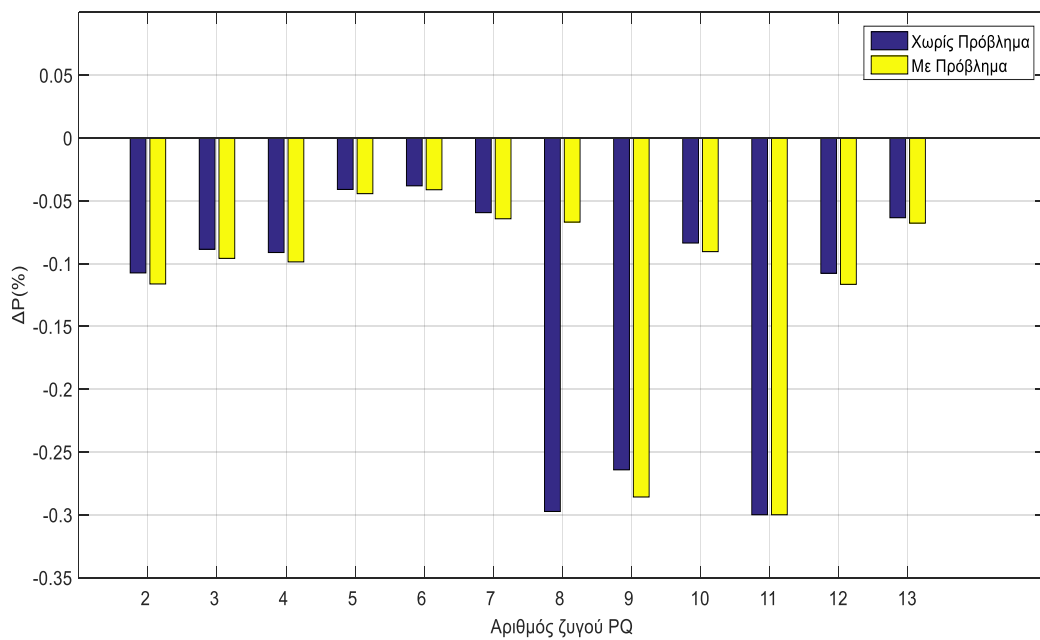
Στην περίπτωση που στο ζυγό 8 του ΔΔΗΕ 13 ζυγών που εξετάστηκε, δεν μπορεί να υλοποιηθεί η ρύθμιση που υπέδειξε ο ρυθμιστής του ζυγού, χρησιμοποιούνται οι συντελεστές προσαρμογής, όπως αυτοί παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4. Με την χρήση τους, ο ζυγός που παρουσιάζει πρόβλημα λαμβάνει εντολή για μικρότερη ρύθμιση ισχύος ανάλογα με το ποσοστό επιτυχίας του στις προηγούμενες ρυθμίσεις. Στην περίπτωση που ο ζυγός παρουσιάζει πρόβλημα για όλη τη διάρκεια της ημέρας, δίνεται γράφημα στο οποίο συγκρίνεται η ισχύς του ζυγού 8 χωρίς την χρήση συντελεστών προσαρμογής και με την χρήση συντελεστών προσαρμογής (Σχήμα 6.23). Αν ο ζυγός δεν έχει απόκριση φορτίου για όλη τη διάρκεια της ημέρας, οι εντολές του διαχειριστή παραμένουν χαμηλές.



**Σχήμα 6.23:** Σύγκριση τιμής ενεργού ισχύος του ζυγού 8 για τη διάρκεια μιας μέρας για τις περιπτώσεις: λειτουργίας χωρίς ρύθμιση φορτίου, λειτουργίας με ιδανική ρύθμιση φορτίου και για λειτουργία μη απόκρισης στην εντολή ρύθμισης και χρήση συντελεστών προσαρμογής.

Παρατηρείται πως η εντολή για μεταβολή της ισχύος διαφέρει σημαντικά, έως και 50% με τη χρήση των συντελεστών προσαρμογής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η ισχύς που λόγω προβλήματος δεν θα ρυθμιζόταν να καταναμεθεί έως ενός βαθμού στους υπόλοιπους ζυγούς. Στη διάρκεια μίας μέρας το ποσό ενέργειας που θα είχε προβλεφθεί λανθασμένα για ρύθμιση αγγίζει περίπου τις 0,75 MWh. Με τη χρήση των συντελεστών προσαρμογής το ποσό αυτό περιορίζεται στο μισό. Έτσι η μέθοδος ρύθμισης αποκτά μεγαλύτερη ακρίβεια σε τέτοιες περιπτώσεις και συνεπώς μεγαλύτερη αξιοπιστία. Στην περίπτωση που το πρόβλημα παρουσιάζεται τη στιγμή μεγίστου φορτίου (ώρα 07:15), δίνεται ένα ραβδόγραμμα που δείχνει την επόμενη εντολή για ρύθμιση προς όλους τους ζυγούς με τη χρήση συντελεστών προσαρμογής σε σύγκριση με την κανονική ρύθμιση, ώστε να φανεί η διαφορετική κατανομή των μεταβολών (Σχήμα 6.24).

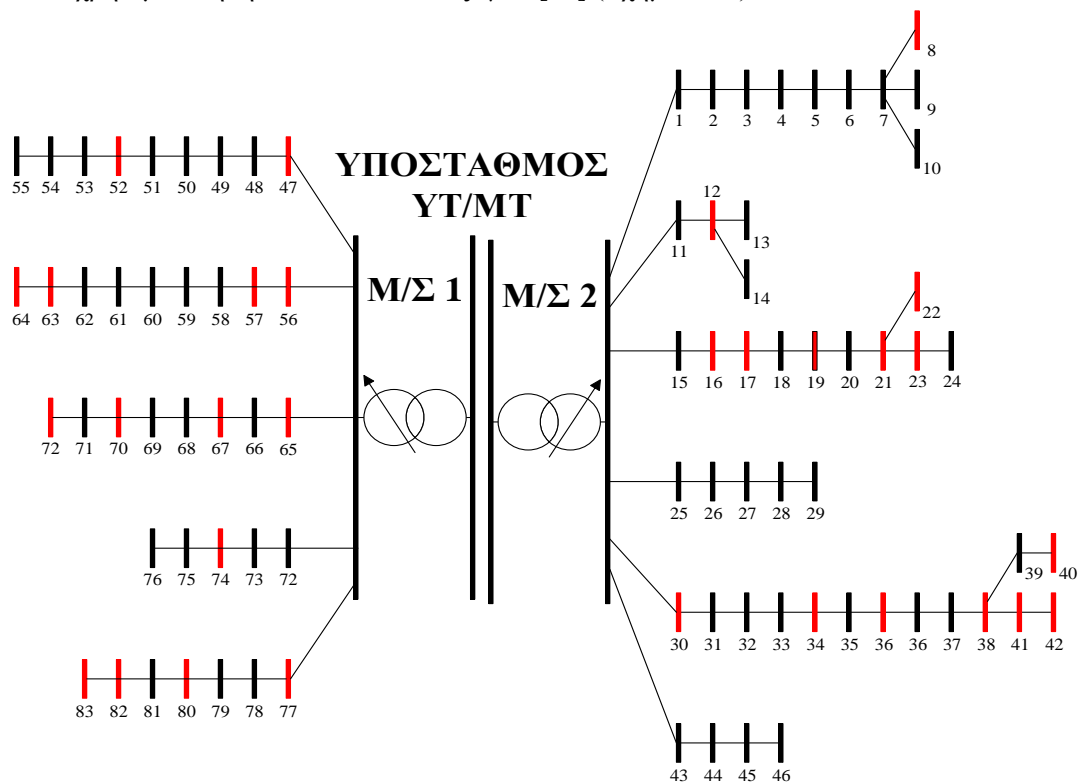
Η κατανομή του Σχήματος 6.24, δείχνει την επιθυμητή μεταβολή της ισχύος (%) επί της συνολικής ισχύος σε κάθε ζυγό. Τα ποσοστά κυμαίνονται από 1% έως 4%, τα οποία παρόλα αυτά αν αναχθούν σε ποσοστό της ρυθμιζόμενης ισχύος φτάνουν περίπου το 3.3% έως 17,2%. Το ποσοστό δεν εκφράζει την αντιστοιχία στα MW μεταξύ των μεταβολών αυτών. Με άλλα λόγια, το 3% ενός ζυγού μπορεί να αντιστοιχεί στο 10% ενός άλλου ζυγού.



**Σχήμα 6.24:** Σύγκριση της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) κατά τις 07:15 για λειτουργία με ιδανική ρύθμιση ισχύος και για λειτουργία με μη απόκριση στην εντολή ρύθμισης και χρήση συντελεστών προσαρμογής.

### 6.3 Δίκτυο 83 ζυγών

Προκειμένου να δοκιμαστεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου σε μεγαλύτερα δίκτυα χρησιμοποιήθηκε ένα ΔΔΗΕ 83 ζυγών [38] (Σχήμα 6.25).

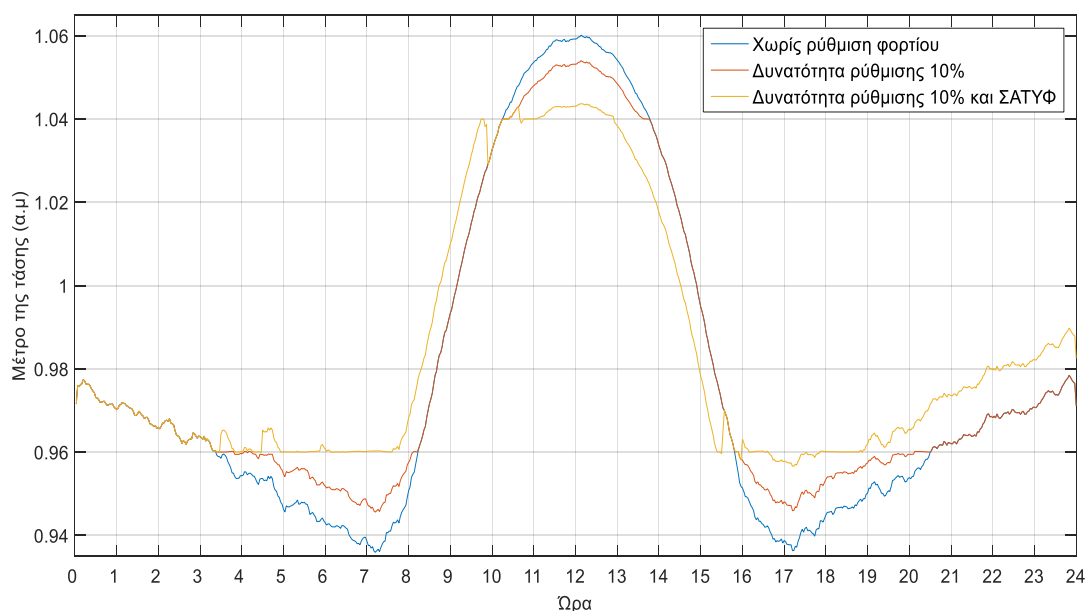


**Σχήμα 6.25:** Δίκτυο 83 ζυγών.

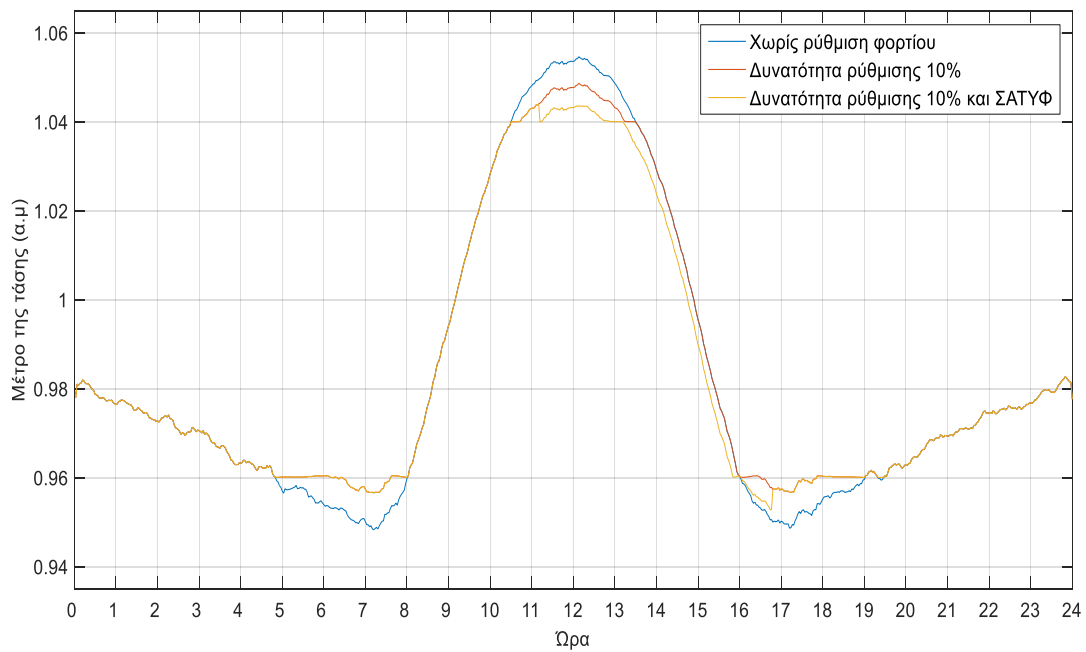
Για το δίκτυο αυτό οι αντιστάσεις θεωρούνται κατά 30% μεγαλύτερες και τα φορτία έχουν αυξηθεί προκειμένου να προκληθούν ακραίες τιμές της τάσης κατά την προσομοίωση. Στο δίκτυο αυτό, οι ζυγοί που έχουν κόκκινο χρώμα είναι οι ζυγοί με δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και ακολουθούν το προφίλ Α της ημερήσιας καμπύλης φορτίου (Σχήμα 6.2). Οι υπόλοιποι ζυγοί ακολουθούν το προφίλ Β (Σχήμα 6.3).

### 6.3.1 Περίπτωση Α: Δυνατότητα ρύθμισης 10% του φορτίου.

Στην περίπτωση αυτή ο διαχειριστής μπορεί να ρυθμίσει ελαστικό φορτίο της τάξης του 10%. Οι ζυγοί 42 (Σχήμα 6.26) και 83 (Σχήμα 6.27) παρουσιάζουν πρόβλημα λόγω υψηλής διακύμανσης της τάσης. Παρατηρείται πως η χρήση της ρύθμισης φορτίου της τάξης του 10% έχει σημαντική επίδραση στην τάση κατά τη διάρκεια της υπότασης, τις πρωινές ώρες από τις 04:00 έως 08:00 και τις απογευματινές ώρες από τις 16:00 έως τις 20:30, όπου το φορτίο είναι μέγιστο και λιγότερο σημαντική όταν το φορτίο είναι ελάχιστο και η διανεμημένη παραγωγή μέγιστη, από τις 10:30 έως τις 14:30. Συμπεραίνεται εδώ ότι η μέθοδος δρα λίγο καλύτερα στις περιπτώσεις πτώσεως τάσης, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η συμβολή της στην περίπτωση υπέρτασης δεν είναι σημαντική. Όσον αφορά τη ρύθμιση ισχύος, σε αυτό το δίκτυο το οποίο αποτελείται από αρκετές γραμμές, παρατηρείται μεταβολή στην ισχύ, κατά εντολή, μόνο στις γραμμές όπου υπάρχουν προβληματικοί ζυγοί. Για παράδειγμα, στις 07:15, όπου το φορτίο είναι μέγιστο, παρατηρώντας τους ζυγούς 2-42 (ζυγός 1 θεωρείται η έξοδος του υποσταθμού) επιβεβαιώνεται ότι μόνο οι ζυγοί της γραμμής 30-42 και της γραμμής 1-11 μεταβάλλουν το φορτίο τους (Σχήμα 6.28). Για να επιβεβαιωθεί αυτό δίνεται η τάση των αντίστοιχων ζυγών (Σχήμα 6.29) ώστε να διαπιστωθεί ότι οι ζυγοί που ρυθμίζονται βρίσκονται επί των γραμμών που παρουσιάζουν πρόβλημα.

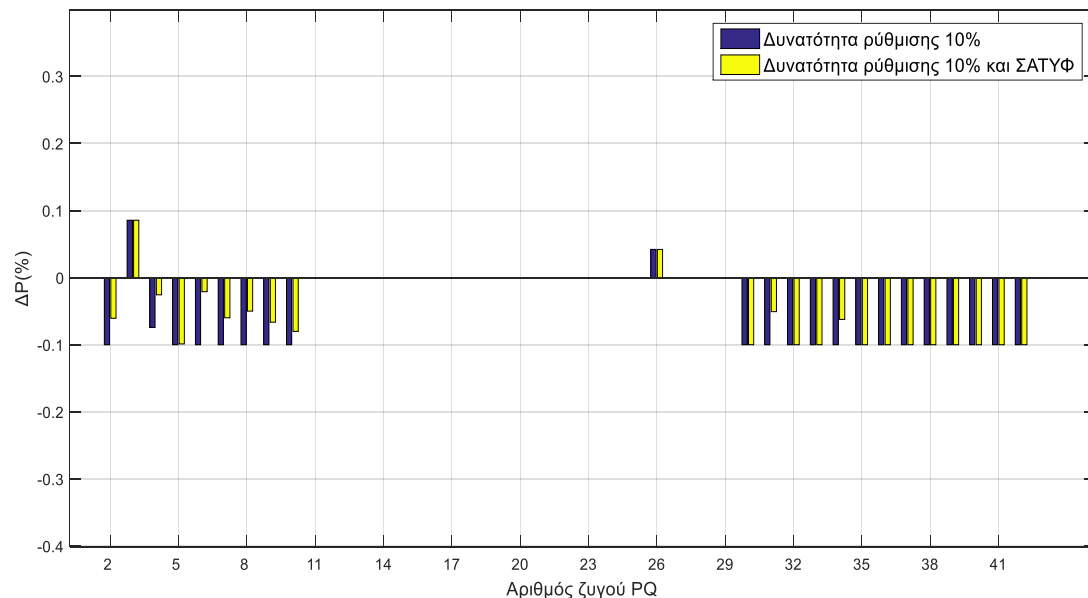


**Σχήμα 6.26:** Η τάση του ζυγού 42, δικτύου 83 ζυγών, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας για 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

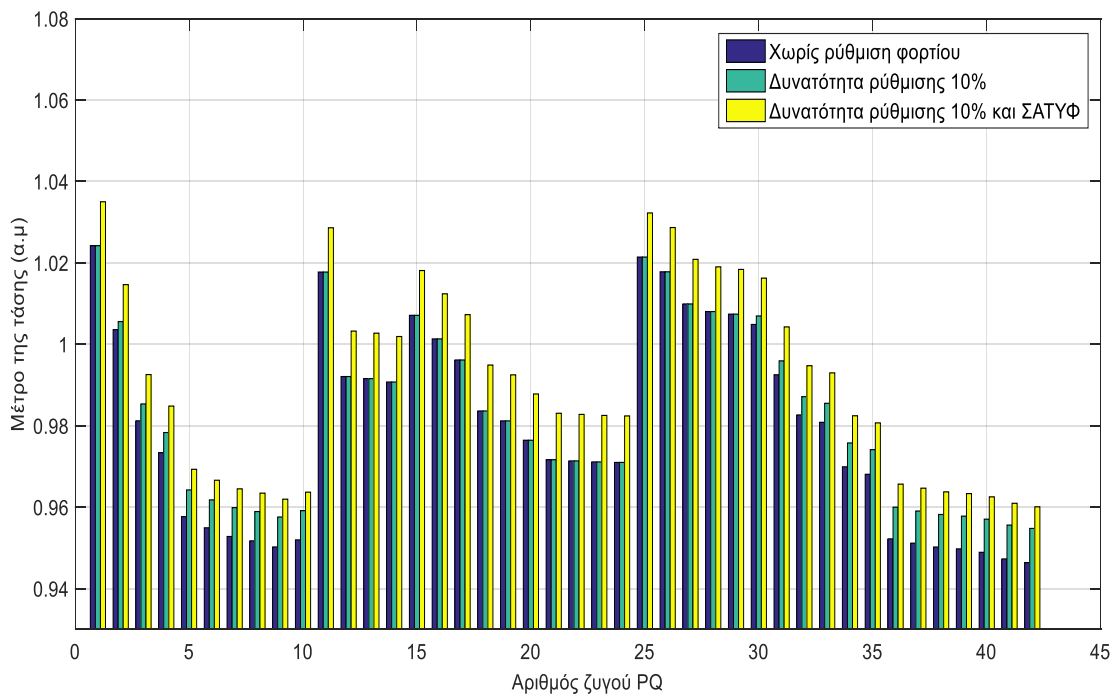


**Σχήμα 6.27:** Η τάση του ζυγού 83, δικτύου 83 ζυγών, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας για 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

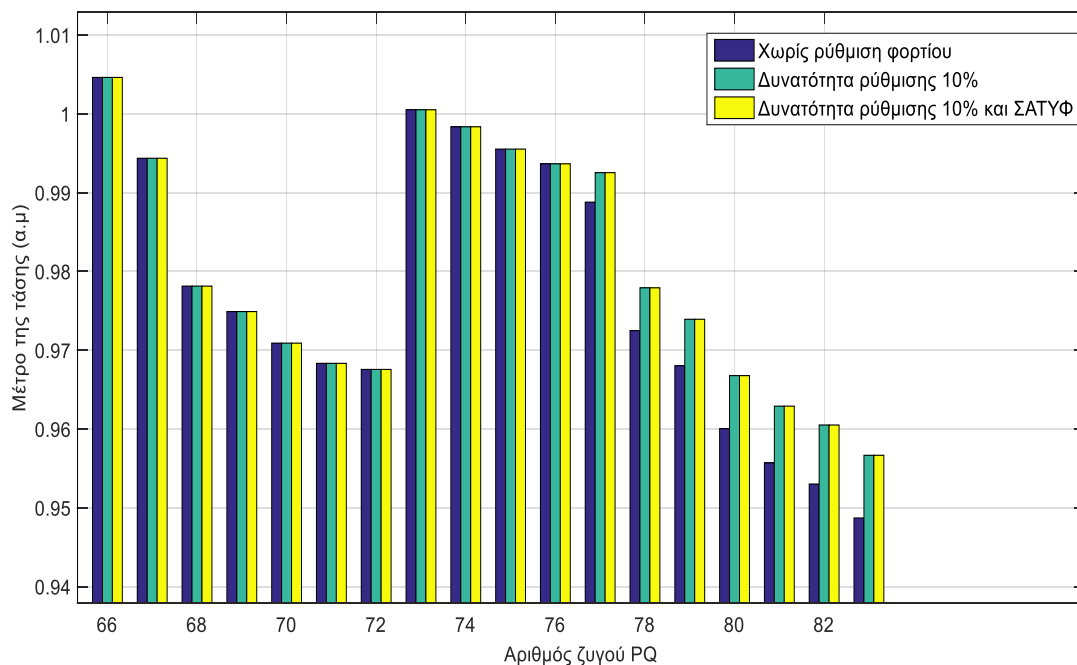
Αντίστοιχα, συμβαίνει και στους υπόλοιπους ζυγούς. Για την αριστερή πλευρά του δικτύου, δηλαδή τους ζυγούς 43-83, μόνο μία γραμμή παρουσιάζει πρόβλημα στην τάση κατά το μέγιστο φορτίο (Σχήμα 6.30). Η τάση του ζυγού 83 φτάνει την ελάχιστη τιμή 0,9487 α.μ.



**Σχήμα 6.28:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) των ζυγών 2-42 κατά τις 07:15, για δίκτυο 83 ζυγών και για 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.



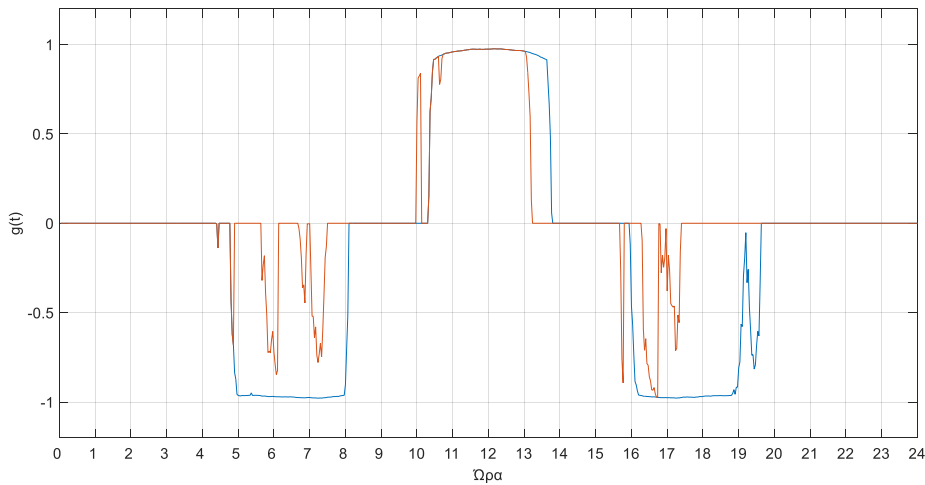
**Σχήμα 6.29:** Ραβδόγραμμα των τάσεων των ζυγών 1-42 κατά τις 07:15 για δίκτυο 83 ζυγών και για 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.



**Σχήμα 6.30:** Ραβδόγραμμα των τάσεων των ζυγών 66-83 κατά τις 07:15 για δίκτυο 83 ζυγών και για 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

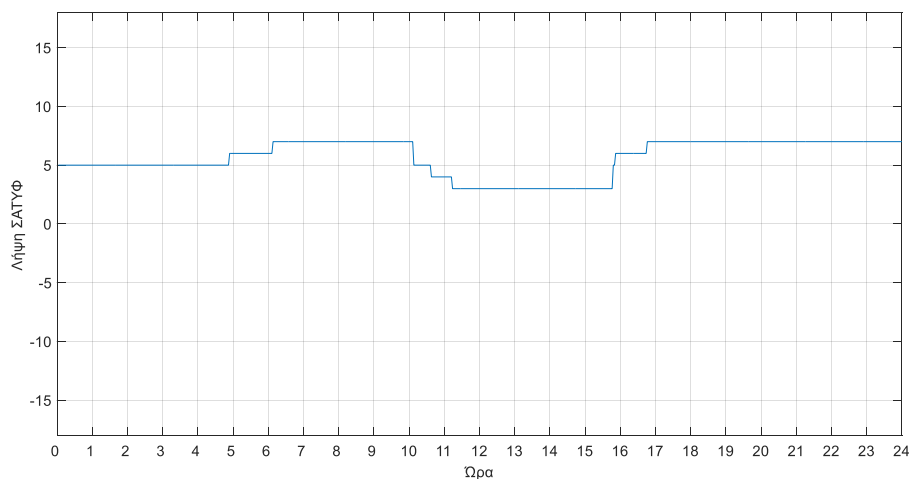
Στο δίκτυο αυτό χρησιμοποιήθηκε διαφορετική παράμετρος  $b$  για το κορεσμό του ενιαίου μεταδιδόμενου σήματος ελέγχου. Τέθηκε  $b=0.007$  και η κλίση της συνάρτησης του

σήματος μειώθηκε, επιτρέποντας στον aggregator να στέλνει ηπιότερες εντολές ρύθμισης ανάλογα με τις ανάγκες του ζυγού, όπως φαίνεται στο σήμα του ζυγού 42 (Σχήμα 6.31).



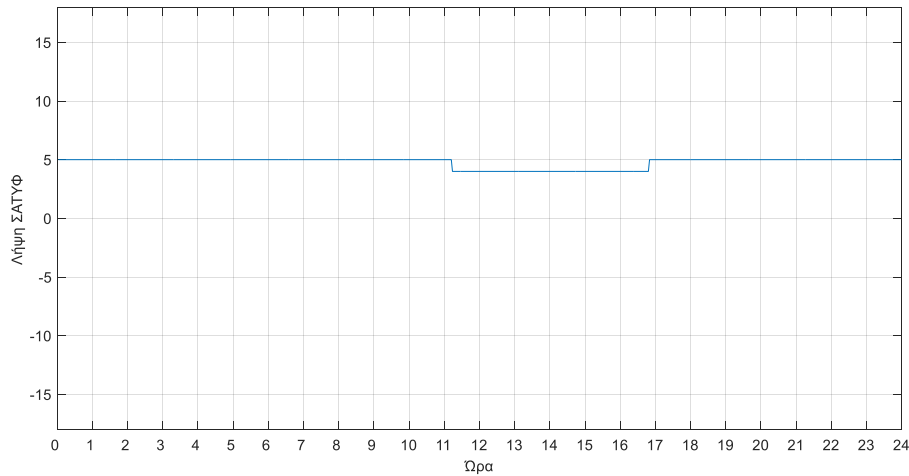
**Σχήμα 6.31:** Ενιαίο μεταδιδόμενο σήμα ελέγχου που εκπέμπεται στο ζυγό 42 δικτύου 83 ζυγών για 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο με παράμετρο  $b=0.007$ .

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.25 ο υποσταθμός χρησιμοποιεί δύο ρυθμιστές τάσης που αντιστοιχούν στους δύο Μ/Σ όπου μοιράζεται το φορτίο που εξυπηρετεί. Στους ζυγούς 43-83 οι οποίοι εξυπηρετούνται από το Μ/Σ 1, όπου το πρόβλημα της τάσης είναι ελαφρώς ηπιότερο, το αντίστοιχο ΣΑΤΥΦ εκτελεί λιγότερες ρυθμίσεις (Σχήμα 6.32) από ότι το ΣΑΤΥΦ που εξυπηρετεί τους ζυγούς 1-42 (Σχήμα 6.33). Εδώ φαίνεται η χρησιμότητα της μεθόδου όταν η απόκλιση της τάσης είναι μικρή, όπου μπορεί να διορθωθεί μόνο από τη ρύθμισή του φορτίου χωρίς να καταπονείται το ΣΑΤΥΦ.



**Σχήμα 6.32:** Τιμή λήψης του ΣΑΤΥΦ του Μ/Σ 2 κατά τη διάρκεια της ημέρας στο δίκτυο 83 ζυγών για 10% ελεγχόμενο ελαστικό.



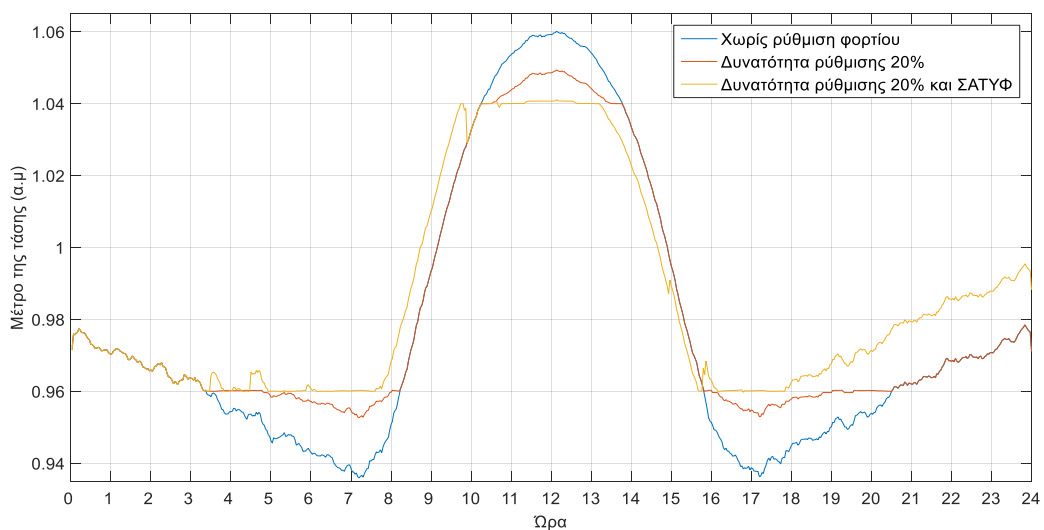


**Σχήμα 6.33:** Τιμή λήψης του ΣΑΤΥΦ του Μ/Σ 1 κατά τη διάρκεια της ημέρας στο δίκτυο 83 ζυγών για 10% ελεγχόμενο ελαστικό.

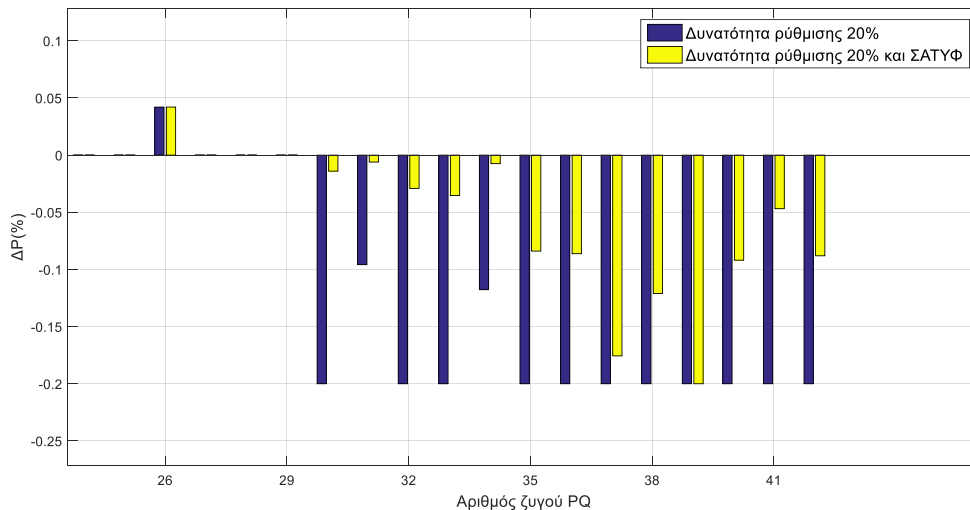
Ο χρόνος εκτέλεσης του προβλήματος βελτιστοποίησης για το δίκτυο των 83 ζυγών είναι περίπου 0,5 δευτερόλεπτα για τους ζυγούς του Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ 1 και περίπου 0,5 δευτερόλεπτα για το δίκτυο που εξυπηρετείται από τον Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ 2.

### 6.2.2 Περίπτωση Β: Δυνατότητα ρύθμισης 20% του φορτίου.

Αυξάνοντας το ποσοστό ρυθμιζόμενου φορτίου σε κάθε ζυγό παρατηρείται μεγαλύτερη βελτίωση της διακύμανσης της τάσης όπως φαίνεται στην κυματομορφή της τάσης του ζυγού 42 (Σχήμα 6.34). Η συνδυασμένη λειτουργία ΣΑΤΥΦ και ρύθμισης φορτίου, κατάφερε να διορθώσει εντελώς την τάση, ακόμα και στις περιπτώσεις όπου αυτή έφτασε στο  $\pm 6\%$ . Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται το ΣΑΤΥΦ, η μεταβολή του φορτίου της προβληματικής γραμμής έφτασε σε κορεσμό, ενώ με τη χρήση του ΣΑΤΥΦ η τάση ρυθμίστηκε πλήρως και η ρύθμιση του φορτίου ήταν ηπιότερη (Σχήμα 6.35 και Σχήμα 6.36).

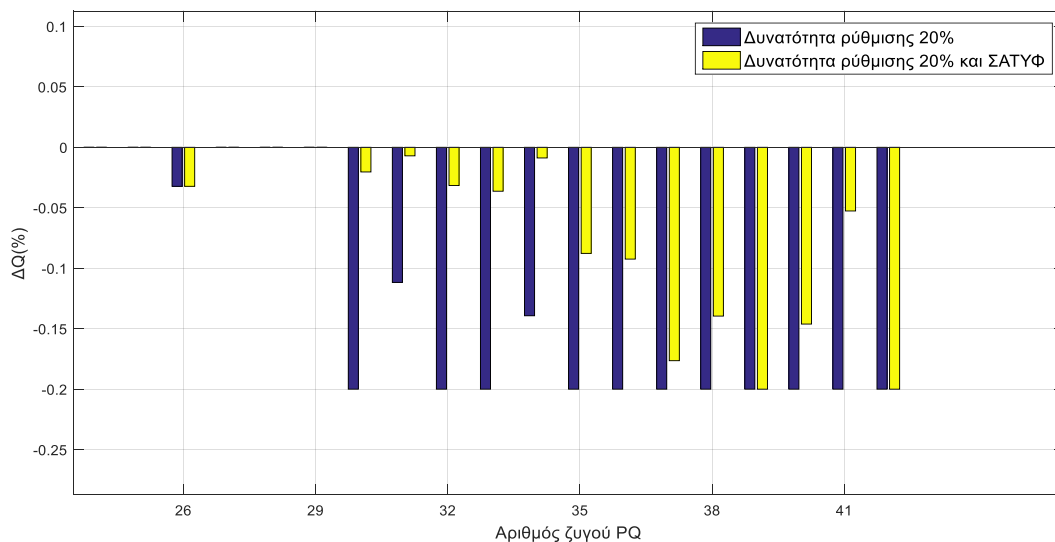


**Σχήμα 6.34:** Η τάση του ζυγού 42 του δικτύου 83 ζυγών, κατά τη διάρκεια μίας ημέρας για 20% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.



**Σχήμα 6.35:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) των ζυγών 26-42 κατά τις 07:15, για δίκτυο 83 ζυγών και 20% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

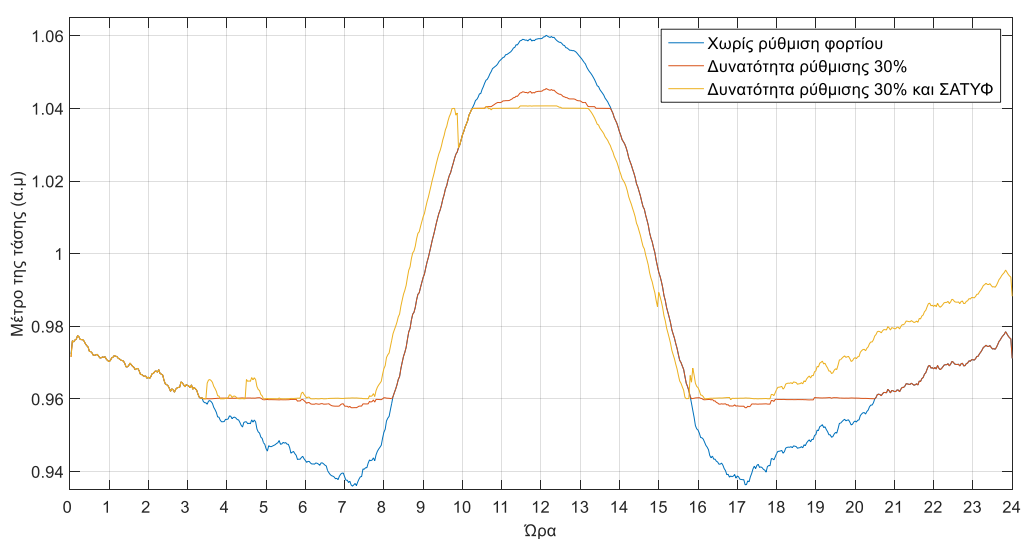
Η τάση του ζυγού 83 ακολουθεί περίπου την ίδια κυματομορφή με του ζυγού 42 με ελαφρώς ηπιότερη διακύμανση. Γενικά, η διακύμανση κατά την προσομοίωση αυτού του δικτύου είναι εντονότερη προκειμένου να δοκιμαστεί περαιτέρω η δυνατότητά της μεθόδου. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.33 ελέγχοντας το 20% του φορτίου δεν επιτυγχάνεται πλήρως η ρύθμιση της τάσης χωρίς τη χρήση του ΣΑΤΥΦ. Οι αλλαγές λήψεων που αυτό εκτελεί είναι περίπου ίδιες με την περίπτωση Α. Ο χρόνος εκτέλεσης του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι ίδιος με τον χρόνο της περίπτωσης Α.



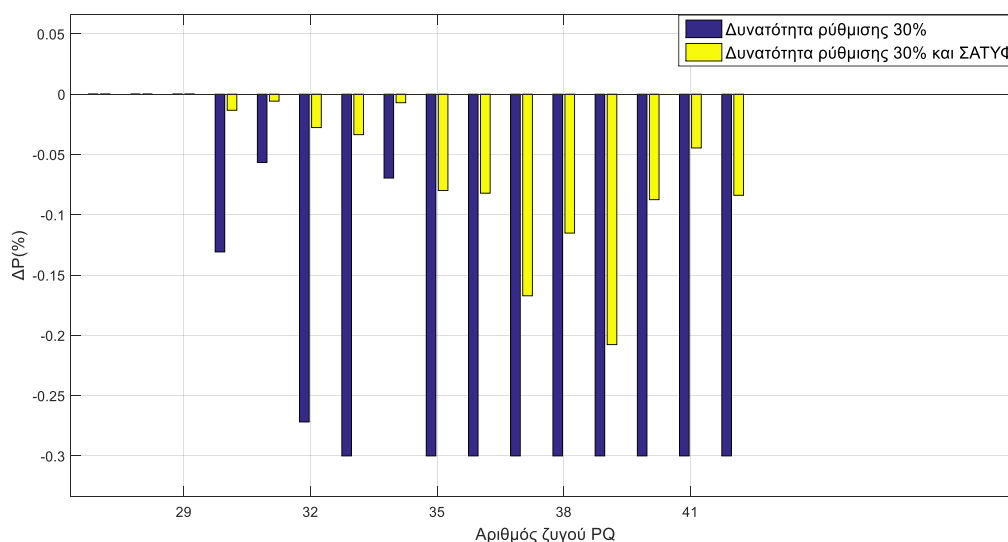
**Σχήμα 6.36:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης αέργου ισχύος (%) των ζυγών 26-42 κατά τις 07:15, για δίκτυο 83 ζυγών και 20% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

### 6.2.3 Περίπτωση Γ: Δυνατότητα ρύθμισης 30% του φορτίου.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αύξηση του ρυθμιζόμενου φορτίου σε 30% της ισχύος κάθε ζυγού είναι ακόμα καλύτερα από την περίπτωση Β. Όσον αφορά τις υποτάσεις που προκύπτουν τις πρωινές ώρες, από τις 04:00 έως 08:00, και τις απογευματινές ώρες, από τις 16:00 έως τις 20:30, η ρύθμιση φορτίου μπορεί να διορθώσει πλήρως την τάση από την ακραία τιμή 0,9363 α.μ στην επιτρεπόμενη τιμή 0.96 α.μ (Σχήμα 6.37). Την χρονική στιγμή όπου η διανεμημένη παραγωγή είναι μέγιστη (12:00), η τάση ρυθμίζεται από 1,06 α.μ σε 1.045 α.μ. Προκειμένου να επιτευχθεί η ρύθμιση αυτή παρατηρείται κορεσμός του ρυθμιζόμενου φορτίου της γραμμής, σε ενεργό και άεργο ισχύ (Σχήμα 6.38).

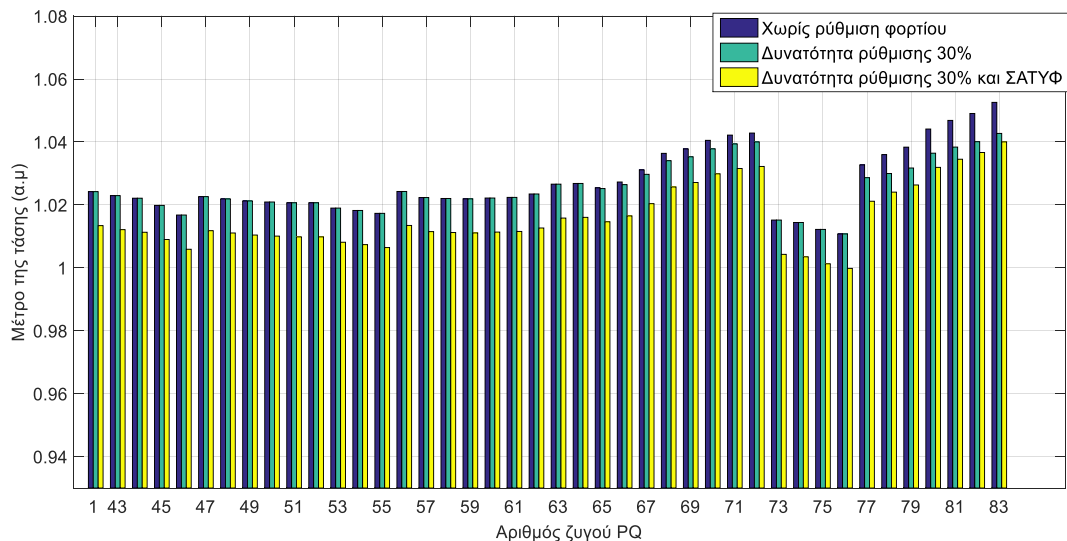


**Σχήμα 6.37:** Η τάση του ζυγού 42, δικτύου 83 ζυγών, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας για 20% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.



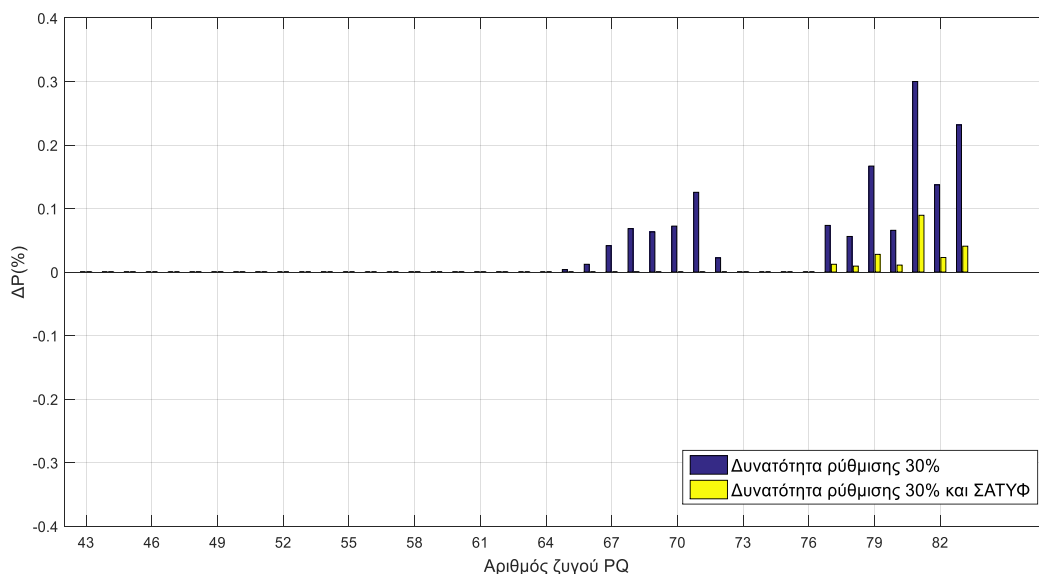
**Σχήμα 6.38:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) των ζυγών 30-42 κατά τις 07:15, για δίκτυο 83 ζυγών και 20% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

Οι υπόλοιποι ζυγοί έχουν μικρότερη διακύμανση από αυτήν του ζυγού 42. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος χρησιμοποιεί τους συντελεστές ευαισθησίας όπως αυτοί ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 3. Αυτό σημαίνει πως οποιοσδήποτε ζυγός συνδέεται άμεσα ή έμμεσα με τον ζυγό προς ρύθμιση, έχει συγκεκριμένη επιρροή πάνω του μέσω της αλλαγής της ισχύος του. Πράγματι, οι γραμμές των οποίων η τάση σε κάθε σημείο τους βρίσκεται εντός ορίων δεν επηρεάζονται από τη ρύθμιση των υπόλοιπων γραμμών. Για τους ζυγούς 43 έως 83 παρουσιάζεται ουσιαστικό πρόβλημα ανύψωσης τάσης μόνο σε μία γραμμή (ζυγοί 77-83) (Σχήμα 6.39).



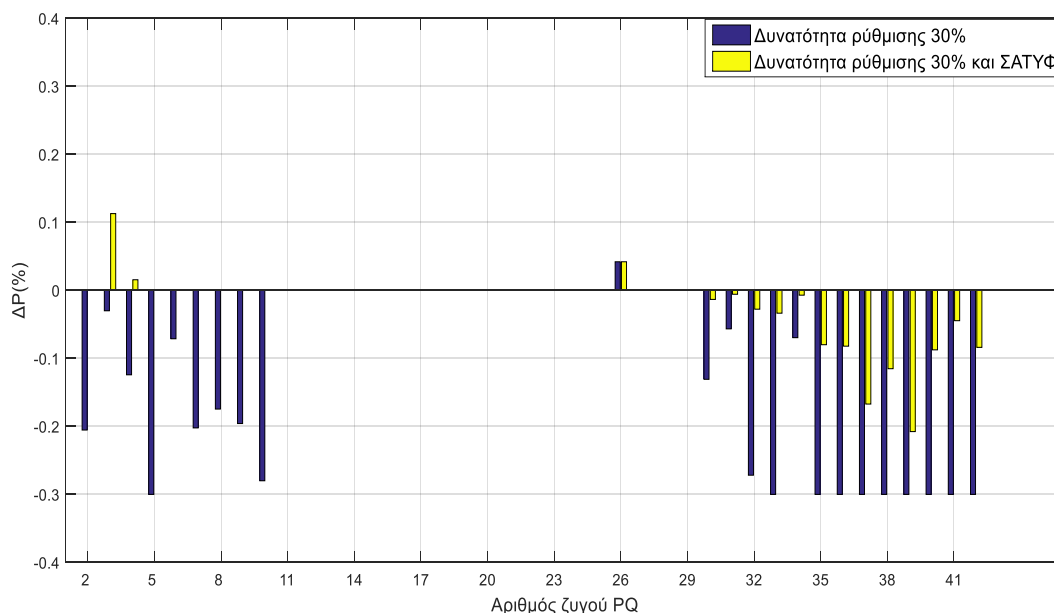
**Σχήμα 6.39:** Ραβδόγραμμα των τάσεων των ζυγών 43-83 κατά τις 12:00, για δίκτυο 83 ζυγών και 30% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

Οπότε, για ίδια χρονική στιγμή επιβεβαιώνεται ρύθμιση ισχύος (Σχήμα 6.40) μόνο στους αντίστοιχους ζυγούς.

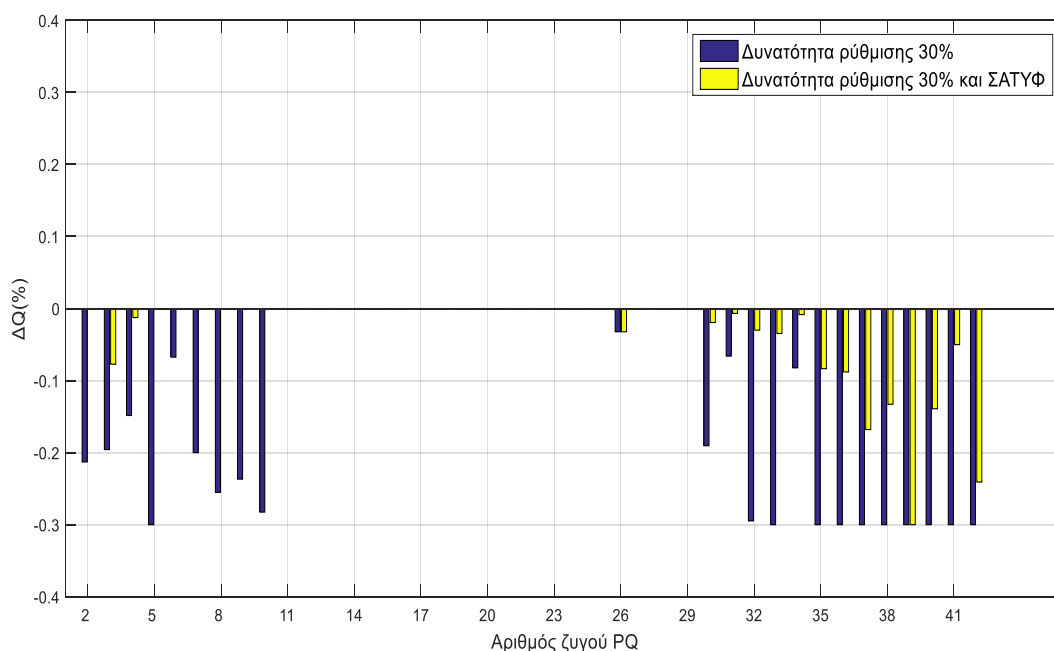


**Σχήμα 6.40:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) των ζυγών 30-42 κατά τις 07:15, για δίκτυο 83 ζυγών και για 20% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

Όσον αφορά τη χρήση του ΣΑΤΥΦ, επιβεβαιώνονται όσα αναφέρθηκαν για το δίκτυο των 13 ζυγών. Όπως φαίνεται στη ρύθμιση ενεργού (Σχήμα 6.41) και αέργου ισχύος (Σχήμα 6.42) κατά το μέγιστο φορτίο ( 07:15) η χρήση ΣΑΤΥΦ αποτρέπει την υπερβολική χρήση του ρυθμίσιμου φορτίου και συνεπώς τον κορεσμό του.

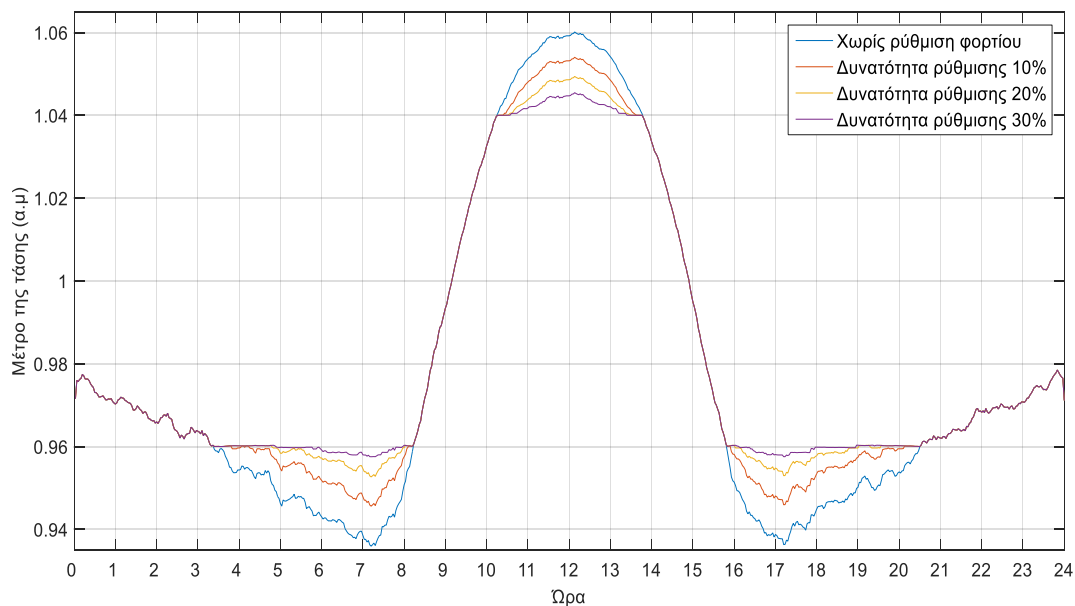


**Σχήμα 6.41:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) των ζυγών 2-42 κατά τις 07:15, για δίκτυο 83 ζυγών και 30% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.



**Σχήμα 6.42:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης αέργου ισχύος (%) των ζυγών 2-42 κατά τις 07:15, για δίκτυο 83 ζυγών και 30% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

Η αποτελεσματικότητα κάθε περίπτωσης φαίνεται στο συγκριτικό σχήμα 6.43.

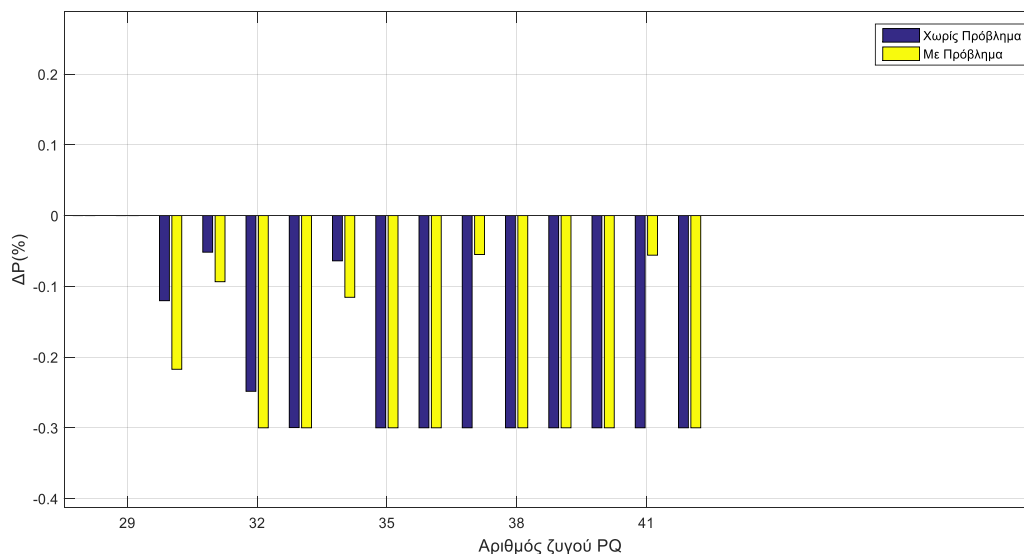


**Σχήμα 6.43:** Σύγκριση του μέτρου της τάσης (α.μ) για τις περιπτώσεις 10% ρυθμιζόμενου ελαστικού φορτίου, 20% ρυθμιζόμενου ελαστικού φορτίου και 30% ρυθμιζόμενου ελαστικού φορτίου.

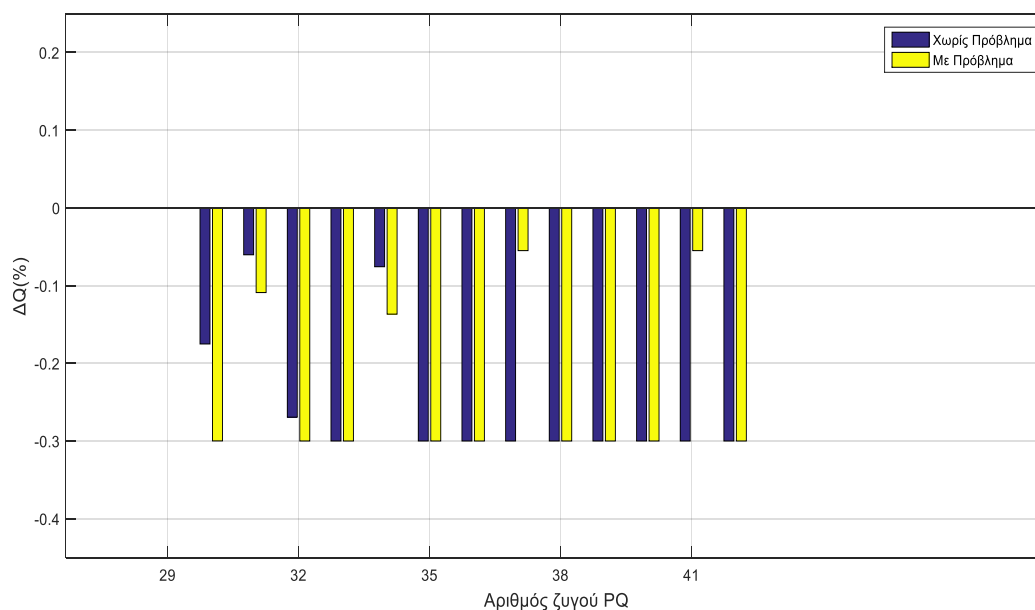
#### 6.3.4 Περίπτωση Δ: Λειτουργία με μερική απόκριση φορτίου.

Στην περίπτωση αυτή θεωρείται πως υπάρχουν ζυγοί που δεν ανταποκρίνονται στην εντολή για ρύθμιση του φορτίου τους. Εξετάζονται δύο περιπτώσεις, κατά την πρώτη το πρόβλημα εμφανίζεται στους ζυγούς 37 και 41 από τις 07:10 μέχρι 07:15 και κατά τις 11:55 μέχρι 12:00. Για να εξεταστεί η αντίδραση του συστήματος ρύθμισης τάσης αμέσως μετά την παρουσίαση του προβλήματος κατά τις 07:10, παρατηρείται η κατανομή της ρύθμισης ενεργού (Σχήμα 6.44) και της αέργου ισχύος (6.45) στην ακριβώς επόμενη ρύθμιση (07:12).

Παρατηρείται πως παρότι η ρύθμιση του φορτίου στους περισσότερους ζυγούς για την συγκεκριμένη χρονική στιγμή έχει κορεσθεί, οι ζυγοί 30, 31, 32 και 34 δέχονται επιπλέον μεταβολή ισχύος προκειμένου να αντισταθμίσουν το πρόβλημα των ζυγών 37 και 41. Η άμεση απόκριση του συστήματος έχει ως αποτέλεσμα η κυματομορφή της τάσης του ζυγού 42 να είναι σχεδόν ίδια με αυτήν της περίπτωσης Γ. Ακόμα, σημαντικό είναι το γεγονός ότι αφότου περάσει η πρώτη ρύθμιση μετά την εμφάνιση του προβλήματος, τα επίπεδα της μεταβολής ισχύος για τους ζυγούς 37 και 41 παραμένουν χαμηλά μέχρι η λειτουργία τους επανέλθει και ο περιορισμός των συντελεστών προσαρμογής σταδιακά μηδενιστεί, όπως περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.



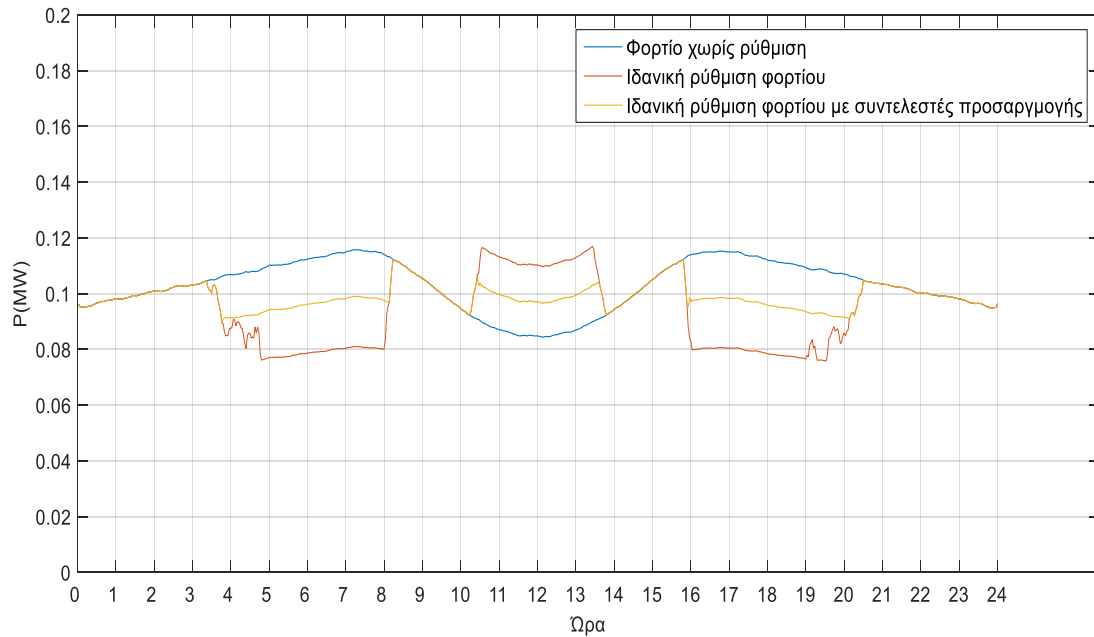
**Σχήμα 6.44:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) των ζυγών 30-42 κατά τις 07:12, για δίκτυο 83 ζυγών και 30% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο πρόβλημα στους ζυγούς 37 και 41.



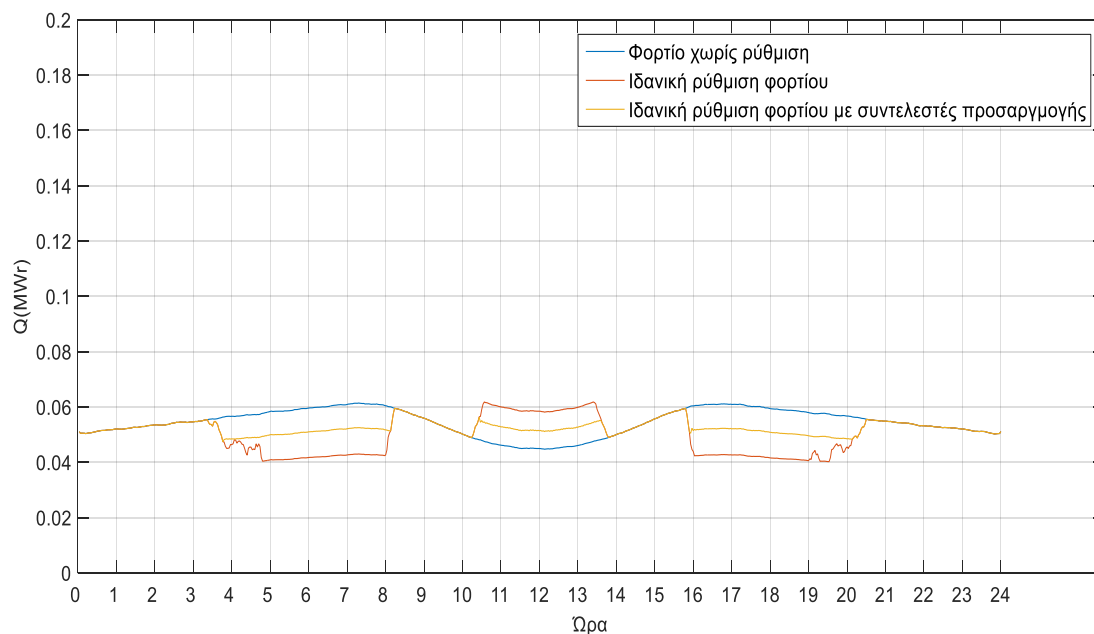
**Σχήμα 6.45:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης αέργου ισχύος (%) των ζυγών 30-42 κατά τις 07:12, για δίκτυο 83 ζυγών και 30% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο με πρόβλημα στους ζυγούς 37 και 41.

Κατά τη δεύτερη περίπτωση, θεωρείται πως ο ζυγός 36 παρουσιάζει πρόβλημα και δεν ανταποκρίνεται στις εντολές για ρύθμιση όλη τη μέρα. Προκειμένου να εξεταστεί η λειτουργία των συντελεστών προσαρμογής εξετάζεται η τιμή της ενεργού (Σχήμα 6.46) και της αέργου ισχύος (Σχήμα 6.47) του ζυγού 36 με και χωρίς τη χρήση των συντελεστών προσαρμογής. Παρατηρείται ότι η διαφορά της ισχύος είναι πολύ σημαντική. Η ρύθμιση περιορίζεται σε λίγο λιγότερο από το μισό με την χρήση των συντελεστών προσαρμογής. Η ισχύς αυτή, θα μπορούσε να έχει σημαντικά αποτελέσματα στην τάση, ειδικά αν υπήρχαν

περισσότεροι ζυγοί με προβληματική απόκριση φορτίου. Η διαφορά στην τάση που προκαλείται στον ζυγό 42, φαίνεται στο Σχήμα 6.48.



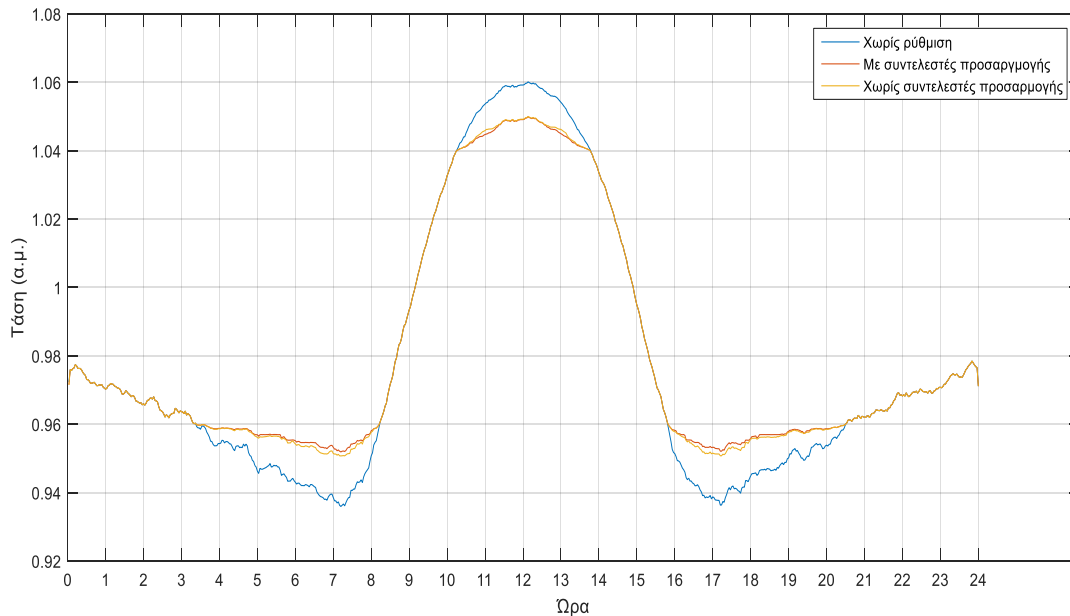
**Σχήμα 6.46:** Σύγκριση τιμής ενεργού ισχύος του ζυγού 36 για τη διάρκεια μιας μέρας για τις περιπτώσεις κανονικής λειτουργίας (χωρίς ρύθμιση), λειτουργίας με ιδανική ρύθμιση ισχύος και για λειτουργία με μη απόκριση στην εντολή ρύθμισης και χρήση συντελεστών προσαρμογής.



**Σχήμα 6.47:** Σύγκριση τιμής αέργου ισχύος του ζυγού 36 για τη διάρκεια μιας μέρας για τις περιπτώσεις: κανονικής λειτουργίας (χωρίς ρύθμιση), λειτουργίας με ιδανική ρύθμιση ισχύος και για λειτουργία με μη απόκριση στην εντολή ρύθμισης και χρήση συντελεστών προσαρμογής.



Η χρήση των συντελεστών αυτών, εξασφαλίζει την ασφαλέστερη ρύθμιση του συστήματος καθώς σε πραγματικά συστήματα η ρύθμιση σε πολλούς ζυγούς μπορεί να μην είναι η αναμενόμενη. Επιπρόσθετα, μπορεί να προσαρμόσει τα όρια του ρυθμιζόμενου φορτίου κάποιου ζυγού του οποίου το πραγματικό ποσοστό είναι αβέβαιο. Όλα αυτά εφαρμόζονται χωρίς επιπλέον επιβάρυνση της πολυπλοκότητας του προβλήματος βελτιστοποίησης.

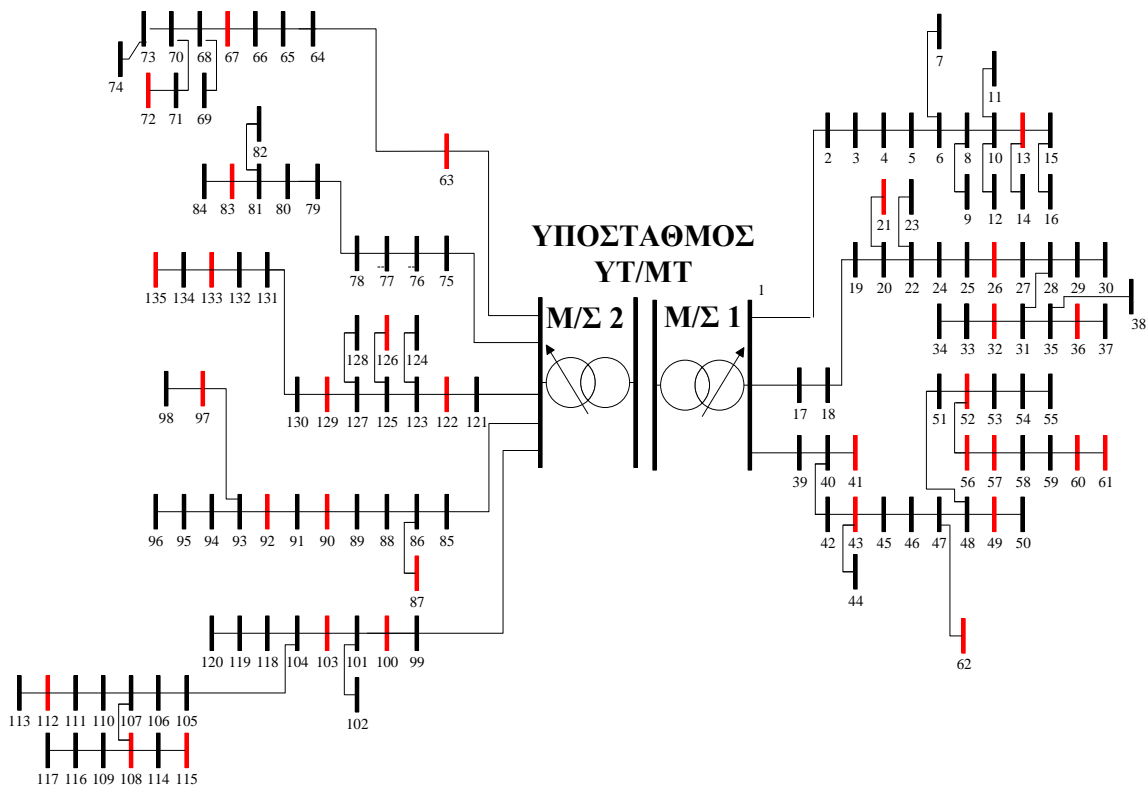


**Σχήμα 6.48.:** Σύγκριση τιμής της τάσης (α.μ.) του ζυγού 42 για τη διάρκεια μιας μέρας για τις περιπτώσεις: κανονικής λειτουργίας (χωρίς ρύθμιση), λειτουργίας με ρύθμιση χωρίς συντελεστές προσαρμογής και μη απόκριση του ζυγού 36 και για λειτουργία ρύθμισης με χρήση συντελεστών προσαρμογής και μη απόκριση του ζυγού 36.

#### 6.4. Δίκτυο 135 ζυγών.

Κατά την προσομοίωση αυτή χρησιμοποιήθηκε ένα μεγάλο ΔΔΗΕ με 135 ζυγούς [39]. Το δίκτυο αυτό εξυπηρετείται από δύο Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.49. Ο πρώτος εξυπηρετεί τους ζυγούς 1-62 και ο δεύτερος εξυπηρετεί τους ζυγούς 63-135. Οι δύο αυτοί Μ/Σ είναι εξοπλισμένοι με ΣΑΤΥΦ και λειτουργούν ανεξάρτητα. Στο δίκτυο αυτό, έχουν θεωρηθεί αντιστάσεις κατά 50-60% μεγαλύτερες του αρχικού ενώ η ισχύς κάποιων ζυγών έχει αλλαχθεί (παράρτημα Α). Έτσι, το σύστημα δοκιμάζεται στα όρια λειτουργίας του και εξετάζεται η αποτελεσματικότητά της μεθόδου. Το δίκτυο προσομοιώθηκε για τις περιπτώσεις Α, Β, Γ και Δ όπως αυτές εφαρμόστηκαν και στα προηγούμενα δίκτυα. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της περίπτωσης Γ δεν περιλαμβάνονται στο κεφάλαιο αυτό διότι η διόρθωση της τάσης επιτυγχάνεται ήδη από την περίπτωση Β. Μία σημαντική διαφορά που εφαρμόστηκε σε αυτή την προσομοίωση σε σχέση με τις προηγούμενες είναι η μείωση του συντελεστή του πρώτου όρου της αντικειμενικής συνάρτησης (4.21). Ο όρος αυτός περιορίζει τη ρύθμιση ισχύος, προσπαθώντας να συμψηφίσει τα σφάλματα της μεθόδου εκτίμησης κατάστασης και της μεθόδου πρόβλεψης. Όμως, σε αυτή την προσομοίωση δόθηκε περισσότερη ελευθερία όσον αφορά τη ρύθμιση ώστε να εξεταστεί λίγο διαφορετικά η λειτουργία της μεθόδου.

Οι ζυγοί του δικτύου που ακολουθούν το προφίλ Α (Σχήμα 6.2) συμβολίζονται με κόκκινο χρώμα στο σχήμα 6.49 ενώ αυτοί που ακολουθούν το προφίλ Β (Σχήμα 6.3) συμβολίζονται με μαύρο χρώμα στο Σχήμα 6.49.

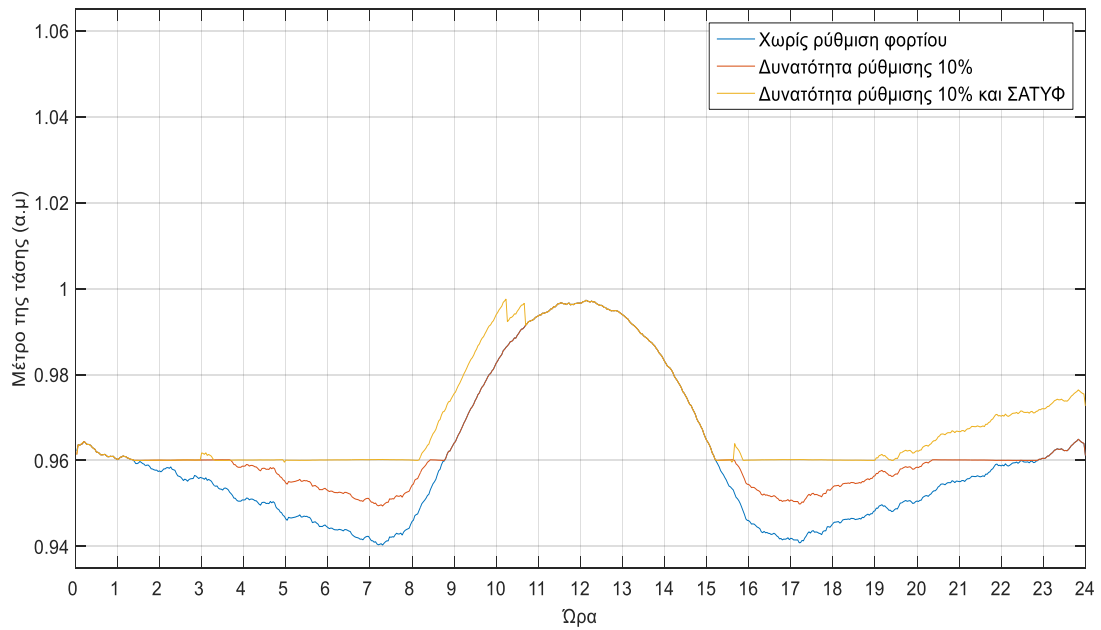


**Σχήμα 6.49:** Δίκτυο 135 ζυγών. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι ζυγοί με το προφίλ Α και με μαύρο χρώμα ζυγοί με το προφίλ Β.

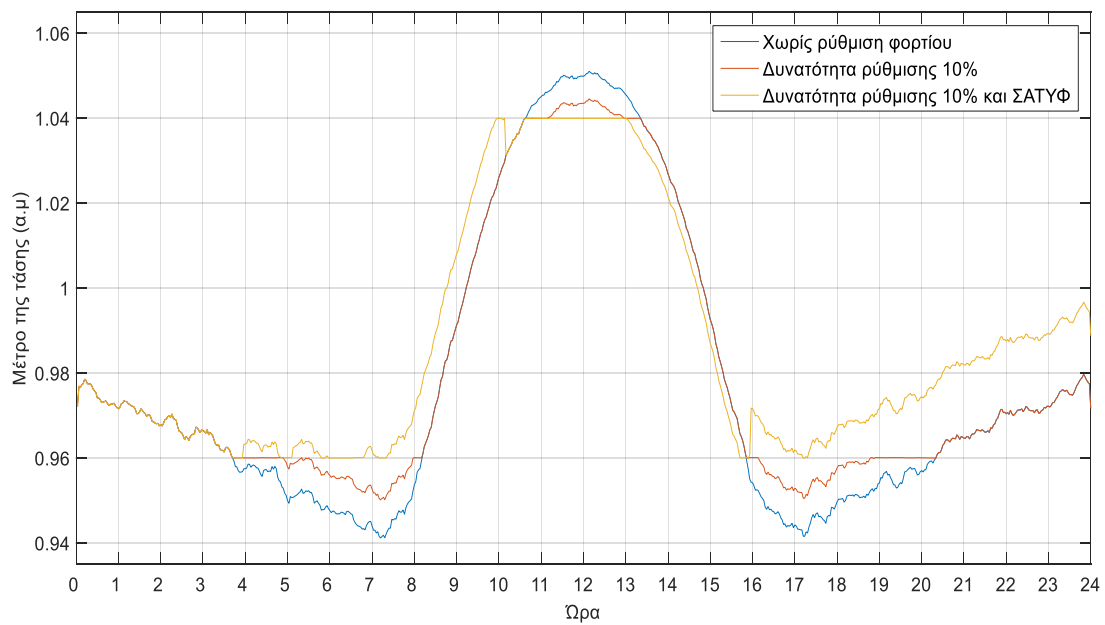
#### 6.4.1 Περίπτωση Α: Δυνατότητα ρύθμισης 10% του φορτίου.

Κατά την προσομοίωση, παρατηρείται πως μία γραμμή του δικτύου που περιέχει τους ζυγούς 99-118 παρουσιάζει μόνιμα μεγάλη πτώση τάσης (Σχήμα 6.50). Από την άλλη, οι ζυγοί με τη μεγαλύτερη διακύμανση τάσης είναι οι ζυγοί 61 και 135, που φαίνονται στο Σχήμα 6.51 και Σχήμα 6.52, αντίστοιχα.

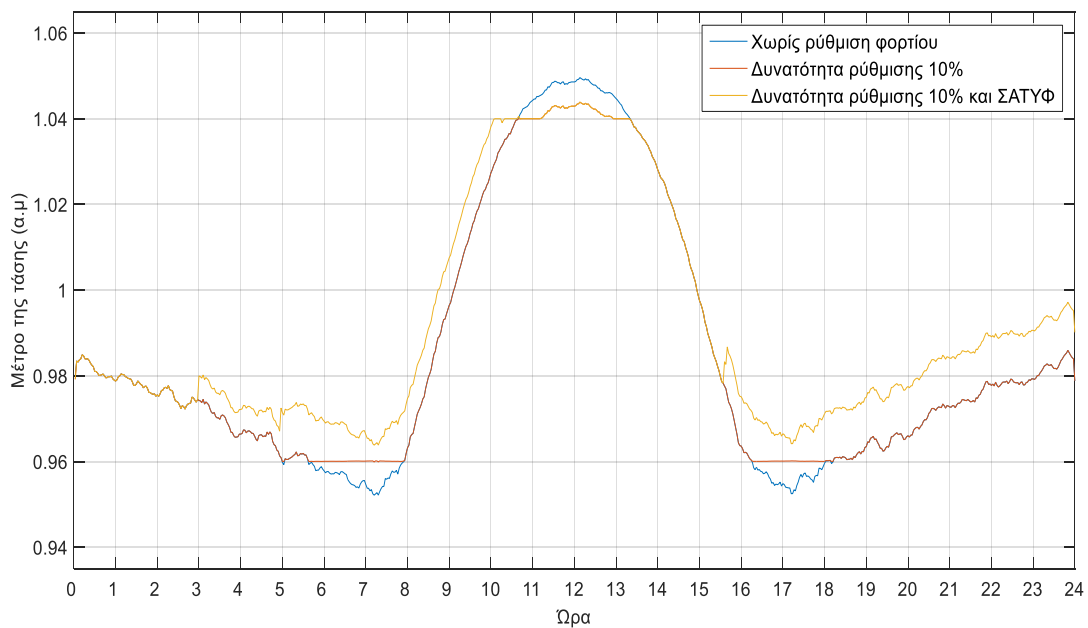
Όπως παρατηρείται στο σχήμα 6.50, η πτώση τάσης μπορεί να αντιμετωπιστεί πλήρως με τη χρήση ΣΑΤΥΦ (Σχήμα 6.53) σε συνδυασμό με τη ρύθμιση 10% του φορτίου. Παρόλα αυτά πρέπει να τονιστεί πως αυτό δεν αποτελεί μόνιμη λύση στο πρόβλημα πτώσης τάσης γιατί ο ζυγός δεν μπορεί να λειτουργεί με εντολή για μείωση του φορτίου κατά την μεγαλύτερη διάρκεια της ημέρας. Στις περιπτώσεις αυτές θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μία άλλη μέθοδος ρύθμισης της τάσης από αυτές που περιεγράφηκαν στο κεφάλαιο 2. Επιπλέον, φαίνεται για τον ίδιο ζυγό πως η πτώση τάσης μπορεί να διορθωθεί σε έναν βαθμό μόνο με τη χρήση των δυνατοτήτων του φορτίου. Στο ίδιο γράφημα επιβεβαιώνεται πως η ρύθμιση του φορτίου δεν χρησιμοποιείται περισσότερο από όσο είναι απαραίτητο ώστε η τάση να αγγίζει τα επιτρεπτά όρια, όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 3, για να αποφευχθεί η μη απαραίτητη επέμβαση στην κατανάλωση του φορτίου του καταναλωτή. Όσον αφορά την τάση του ζυγού 135 παρατηρείται πως μπορεί να διορθωθεί και χωρίς τη χρήση του ΣΑΤΥΦ ενώ αυτό δεν συμβαίνει για την πτώση τάσης του ζυγού 61.



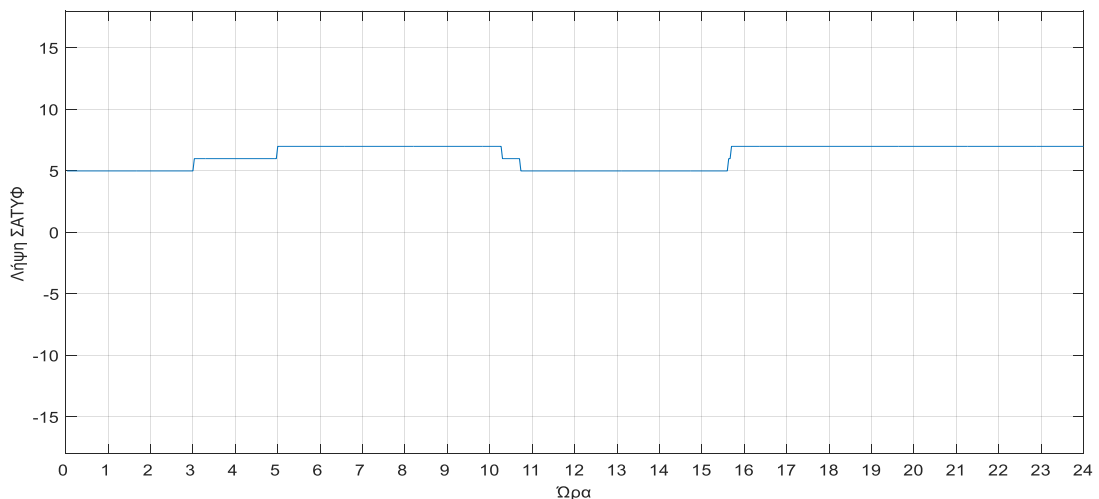
**Σχήμα 6.50:** Η τάση του ζυγού 118, δικτύου 135 ζυγών, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας για 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.



**Σχήμα 6.51:** Η τάση του ζυγού 61, δικτύου 135 ζυγών, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας για 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

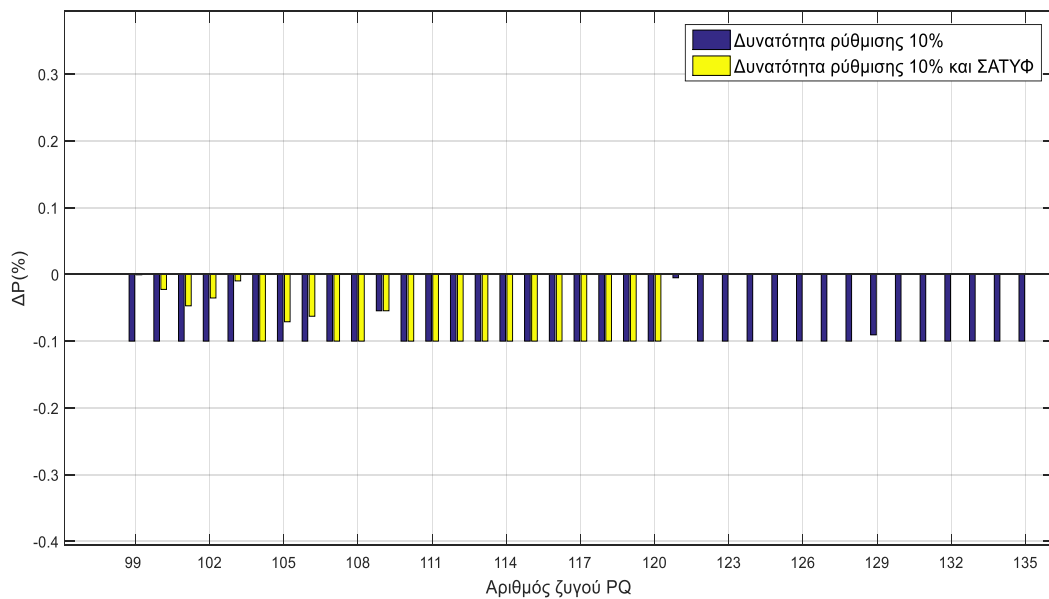


**Σχήμα 6.52:** Η τάση του ζυγού 135, δικτύου 135 ζυγών, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας για 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

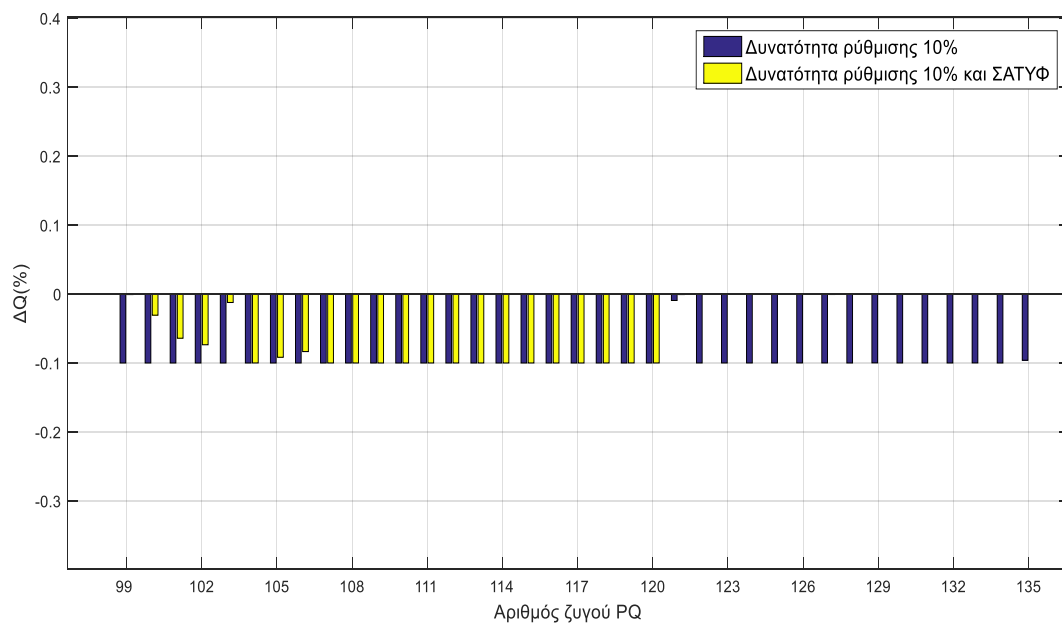


**Σχήμα 6.53:** Τιμή λήψης του SATYF του M/Σ 2 κατά τη διάρκεια της ημέρας στο δίκτυο 83 ζυγών και για 10% ελεγχόμενο ελαστικό.

Για να επιτευχθούν οι ρυθμίσεις αυτές, έγινε κορεσμός του αντίστοιχου ρυθμιζόμενου φορτίου ενώ το φορτίο των άλλων γραμμών έμεινε ανεπηρέαστο. Εδώ, δημιουργείται ενδιαφέρον για την χρήση της μεθόδου σε μη ακτινικά δίκτυα, όπου θα μπορούσε να η ρύθμιση των φορτίων να κατανεμηθεί αποδοτικότερα. Με την χρήση του SATYF του M/Σ 2 (Σχήμα 6.52), η προς ρύθμιση ενεργός (Σχήμα 6.54) και άεργος ισχύς (Σχήμα 6.55) των ζυγών 99 έως 120 για τη στιγμή μεγίστου φορτίου (07:15) είναι σημαντικά μικρότερη ενώ για τους ζυγούς 122–135 η ρύθμιση του φορτίου είναι μηδενική.

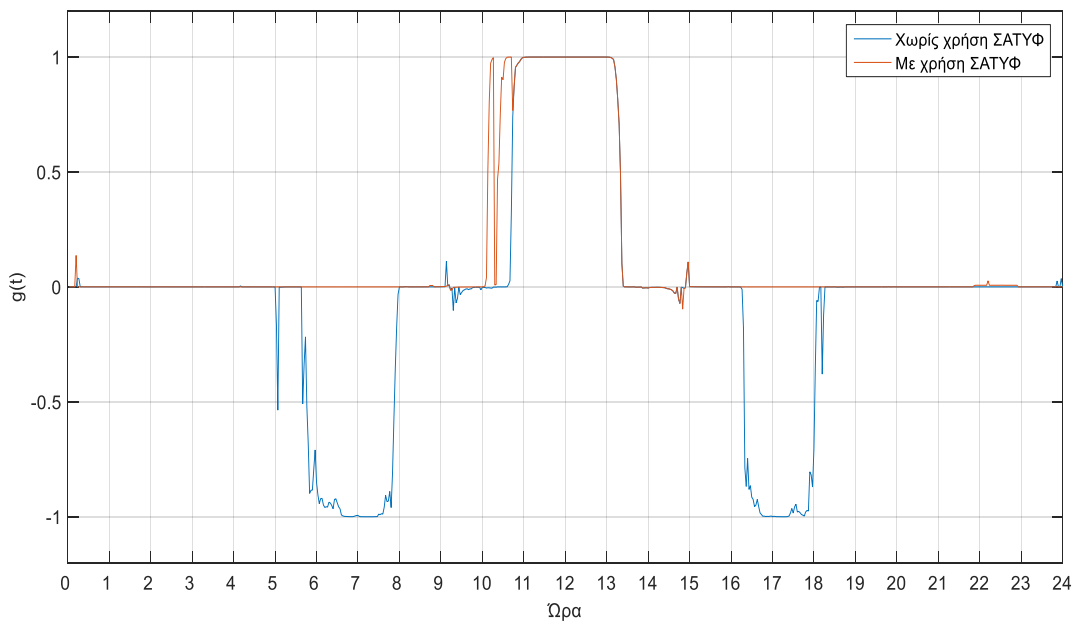


**Σχήμα 6.54:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) των ζυγών 99-135 κατά τις 07:15, για δίκτυο 135 ζυγών και 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.



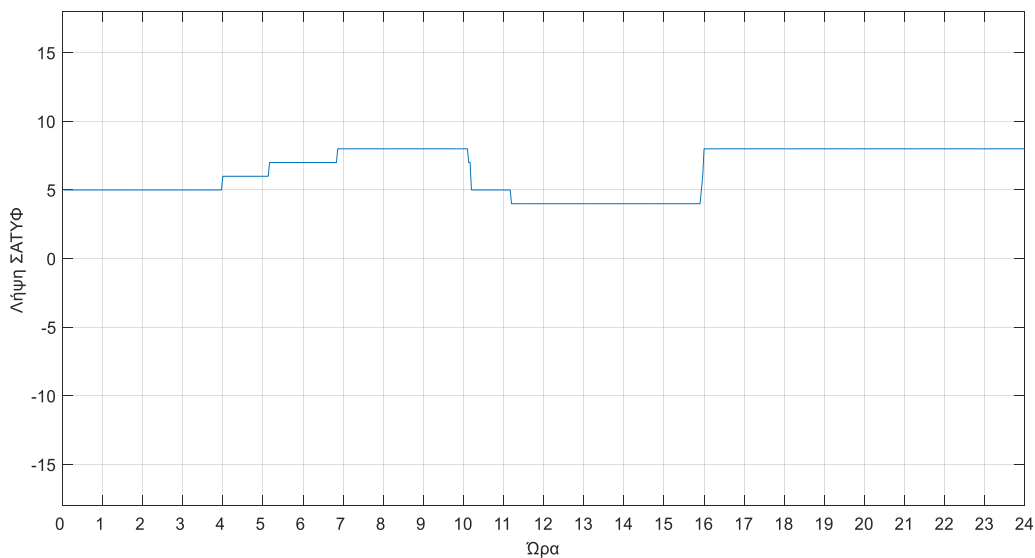
**Σχήμα 6.55:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης αέργου ισχύος (%) των ζυγών 99-135 κατά τις 07:15, για δίκτυο 135 ζυγών και 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

Η εντολή για μηδενική ρύθμιση στον ζυγό 135 στις 07:15 επαληθεύεται και από τη γραφική παράσταση του ενιαίου μεταδιδόμενου σήματος ελέγχου που εκπέμπεται στο ζυγό (Σχήμα 6.56). Όπως φαίνεται, με τη χρήση ΣΑΤΥΦ δεν δίνεται εντολή για ρύθμιση της ισχύος του ζυγού 135 για τις ώρες μεγίστου φορτίου, δηλαδή από τις 06:00 μέχρι τις 08:00 και από τις 16:00 μέχρι τις 18:00.



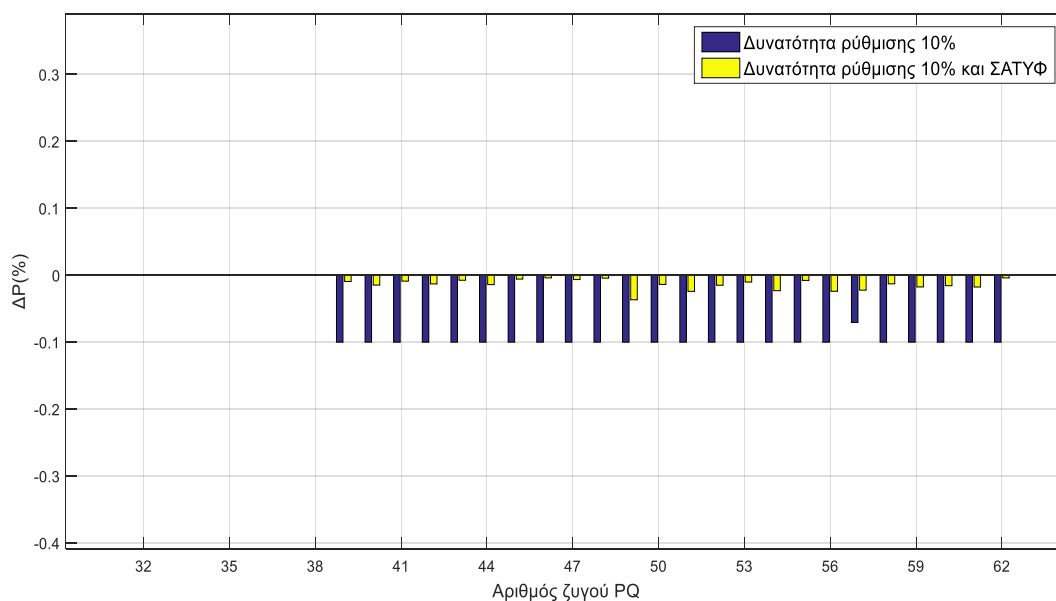
**Σχήμα 6.56:** Ενιαίο μεταδιδόμενο σήμα ελέγχου που εκπέμπεται στο ζυγό 42 του δικτύου 83 ζυγών και για 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο με παράμετρο  $b=0.007$ .

Αντίστοιχα αποτελέσματα έχει η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ του Μ/Σ 1 (Σχήμα 6.57), όπως φαίνεται στην εντολή για ρύθμιση ενεργού ισχύος στους ζυγούς 40-63 (Σχήμα 6.58).

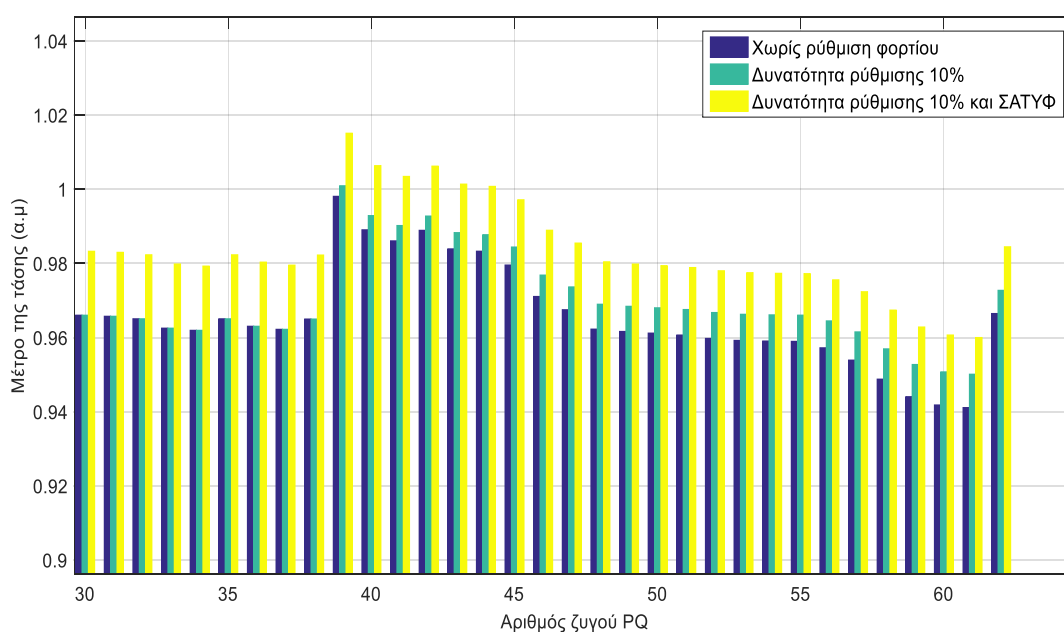


**Σχήμα 6.57:** Τιμή λήψης του ΣΑΤΥΦ του Μ/Σ 1 κατά τη διάρκεια της ημέρας στο δίκτυο 83 ζυγών και 10% ελεγχόμενο ελαστικό.

Για την επιβεβαίωση της παραπάνω ρύθμισης δίνεται ραβδόγραμμα των τάσεων των αντίστοιχων ζυγών για το ίδιο στιγμιότυπο (Σχήμα 6.59). Στο σχήμα αυτό φαίνεται πως οι ζυγοί που δέχονται ρύθμιση τάσης είναι οι 39 έως 62, οποίοι προέρχονται από κοινή γραμμή αναχώρησης από τον υποσταθμό και συνεπώς συνδέονται μεταξύ τους άμεσα ή έμμεσα μέσω κοινού κόμβου (όχι του Υ/Σ).



**Σχήμα 6.58:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) των ζυγών 32-62 κατά τις 07:15, για δίκτυο 135 ζυγών και 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.



**Σχήμα 6.59:** Ραβδόγραμμα των τάσεων των ζυγών 30-62 κατά τις 07:15 για δίκτυο 135 ζυγών και για 10% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

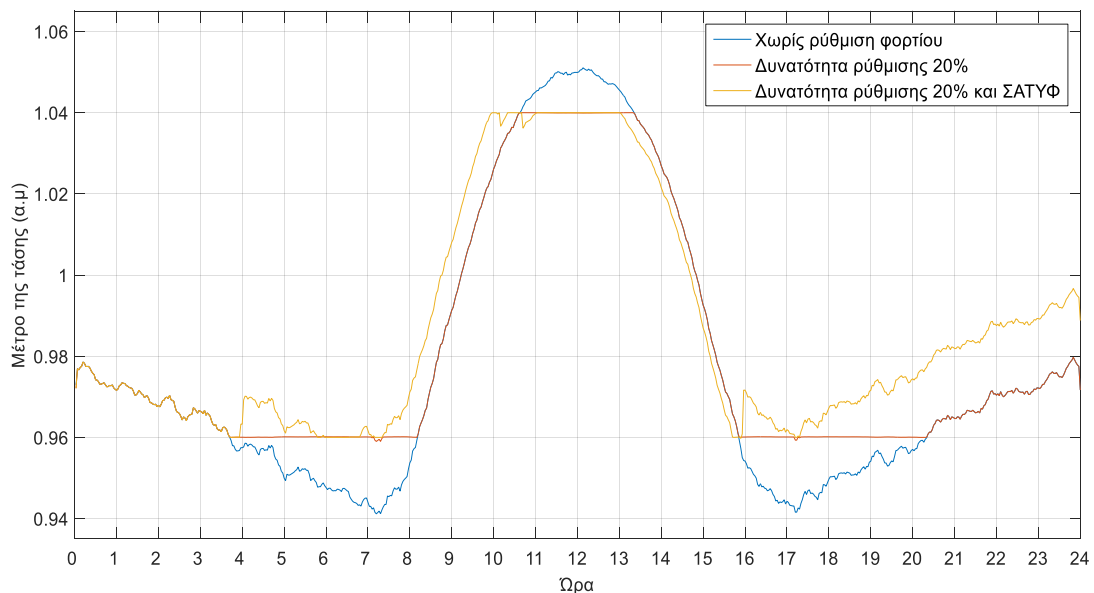
Ο χρόνος εκτέλεσης του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι περίπου 0,5-0,08 δευτερόλεπτα. Η επιτυχία της μεθόδου είναι ανάλογη των προηγούμενων δικτύων. Συμπερασματικά, η μέθοδος αυτή λειτουργεί με όμοιες επιδόσεις σε διαφορετικού μεγέθους δίκτυα για τον απλό λόγο πως όταν τα δίκτυα αυτά είναι ακτινικά, η ρύθμιση φορτίου αφορά κάθε γραμμή ξεχωριστά. Αντιθέτως, το μέρος του προβλήματος που αφορά την λειτουργία του ΣΑΤΥΦ γίνεται πολυπλοκότερο καθώς αυξάνουν οι ζυγοί. Το πρόβλημα γίνεται ακόμα

πιο απαιτητικό όταν τα φορτία των διαφορετικών γραμμών δεν μεταβάλλονται αναλογικά με το συνολικό φορτίο, πράγμα που δεν αφορά την παρούσα εργασία.

#### 6.4.2 Περίπτωση Β: Δυνατότητα ρύθμισης 20% του φορτίου.

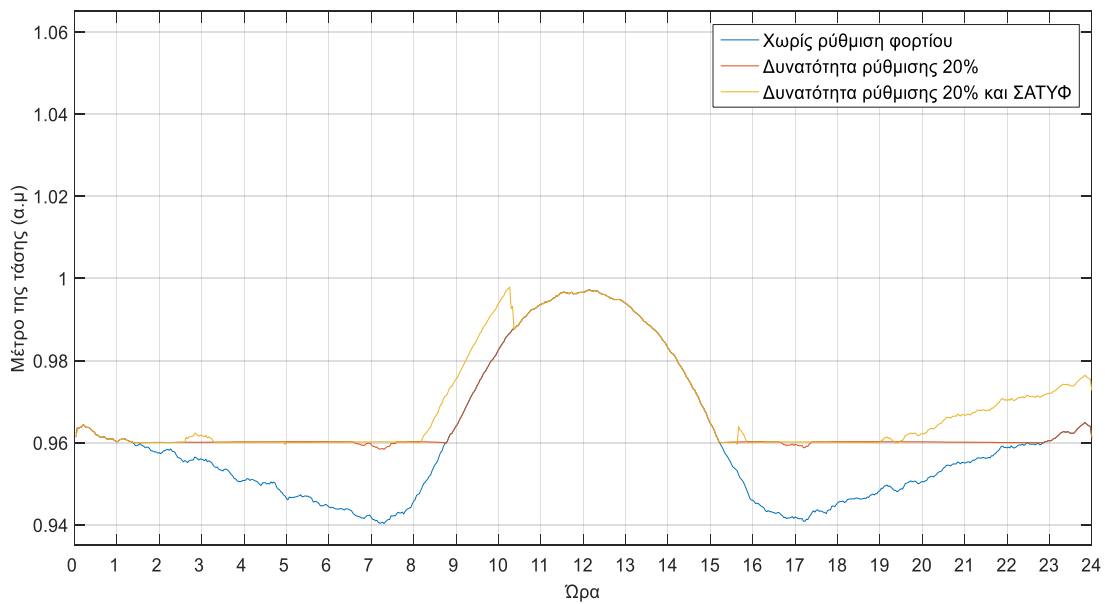
Στην περίπτωση αυτή αυξάνεται το δυνητικά ρυθμιζόμενο φορτίο από 10% σε 20%. Όπως φαίνεται από την τάση του ζυγού 61 (Σχήμα 6.60) και του ζυγού 118 (Σχήμα 6.61), που αποτελούσαν και στην προηγούμενη περίπτωση τους ζυγούς με τη μεγαλύτερη διακύμανση στις τιμές της τάσης, η μέθοδος καταφέρνει την πλήρη διόρθωση του προβλήματος.

Όσον αφορά την κυματομορφή των τάσεων, φαίνεται πως η τάση ακολουθεί ευθεία γραμμή στις περιοχές όπου ρυθμίστηκε. Αυτό είναι επιθυμητό αφού η τάση πρέπει να είναι όσο το δυνατόν σταθερή και εντός ορίων. Ωστόσο, στις προσομοιώσεις των προηγούμενων δικτύων χωρίς την χρήση του ΣΑΤΥΦ αυτό δεν συνέβη, παρότι θα μπορούσε να γίνει όταν το ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο ήταν της τάξης του 30%. Αντί αυτού, προτιμήθηκε μία μικρή απόκλιση στην τάση και ως υπήρχε περιθώριο για περαιτέρω ρύθμιση (Σχήμα 6.37 περίπτωση ρύθμισης χωρίς τη χρήση ΣΑΤΥΦ). Ο λόγος είναι η αλλαγή της παραμέτρου που αναφέρθηκε στην εισαγωγή έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ο συμψηφισμός των σφαλμάτων πρόβλεψης και εκτίμησης και να δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην τήρηση των ορίων της τάσης. Ο όρος αυτός θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από τον διαχειριστή του δικτύου για να αυξάνεται ή να ελαττώνεται η ένταση της ρύθμισης. Σημαντικό να σημειωθεί είναι πως ο όρος αυτός δεν επηρεάζει τη χρήση του ΣΑΤΥΦ άμεσα αλλά έμμεσα αφού περιορίζοντας το ρυθμίζσιμο φορτίο αναλαμβάνει μεγαλύτερη ευθύνη το ΣΑΤΥΦ.



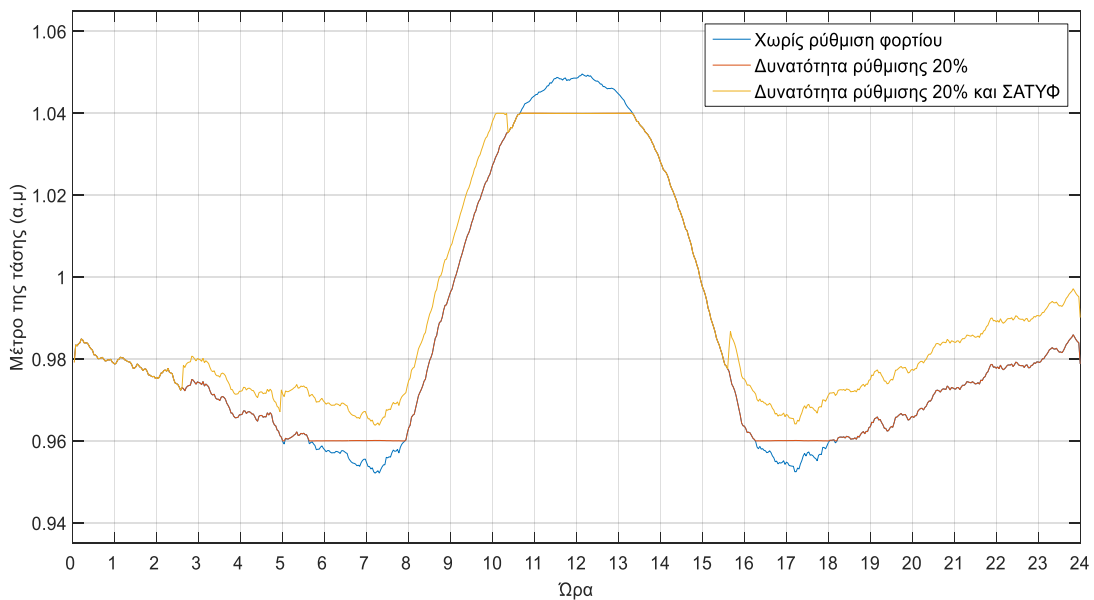
**Σχήμα 6.60:** Η τάση του ζυγού 61 του δικτύου 135 ζυγών, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας για 20% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.





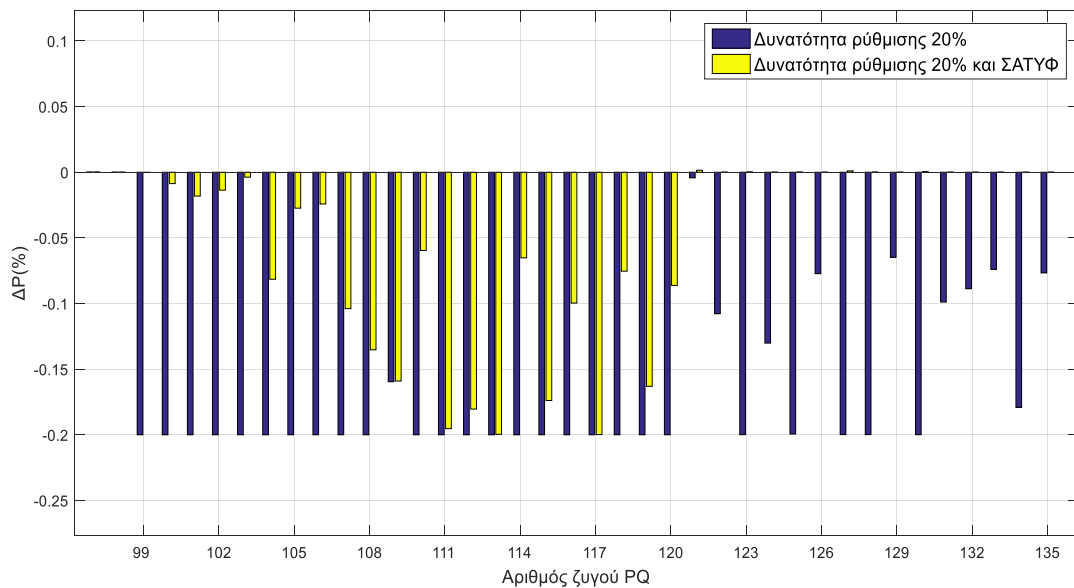
**Σχήμα 6.61:** Η τάση του ζυγού 118 του δικτύου 135 ζυγών, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας για 20% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

Το σκαλοπάτι της τάσης που εμφανίζεται στις 10:10 για τον ζυγό 118 οφείλεται σε αλλαγή λήψης του ΣΑΤΥΦ του Μ/Σ 2. Η αλλαγή αυτή έχει στόχο τη ρύθμιση της υπέρτασης που παρουσιάζει ο ζυγός 135 την ίδια χρονική στιγμή (Σχήμα 6.62)

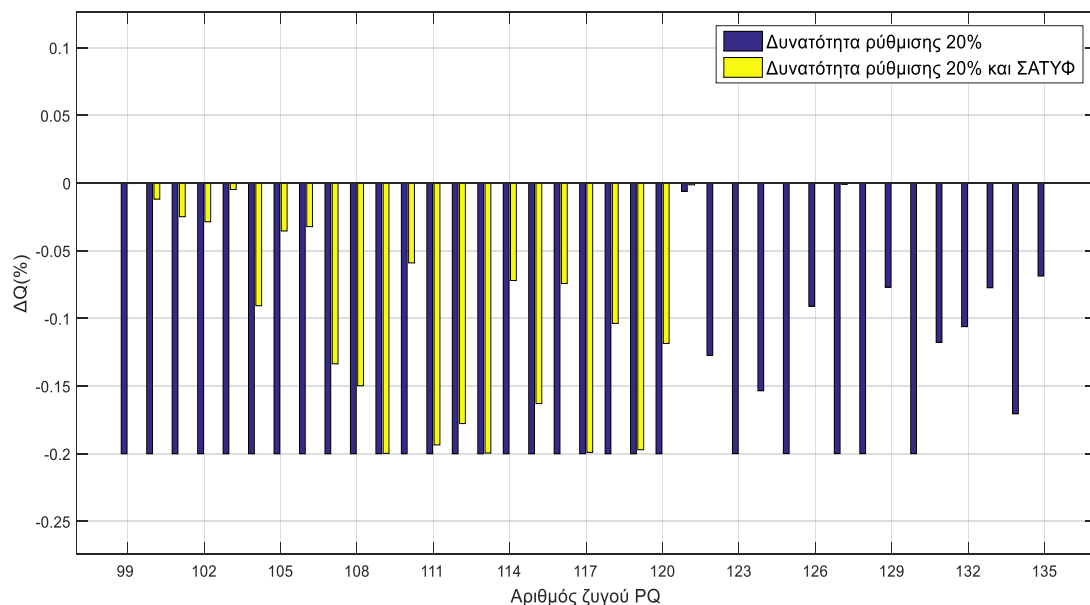


**Σχήμα 6.62:** Η τάση του ζυγού 135 του δικτύου 135 ζυγών, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας για 20% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

Οι αντίστοιχες ρυθμίσεις ενεργού (Σχήμα 6.63) και αέργου (Σχήμα 6.64) ισχύος για τους ζυγούς 63-135 επιβεβαιώνουν το γεγονός πως μόνο οι ζυγοί των προβληματικών γραμμών ρυθμίστηκαν και πως χωρίς τη χρήση του ΣΑΤΥΦ η δυνατότητα ρύθμισης ισχύος φορτίου φτάνει σε κορεσμό προκειμένου να διορθώσει πλήρως την τάση.

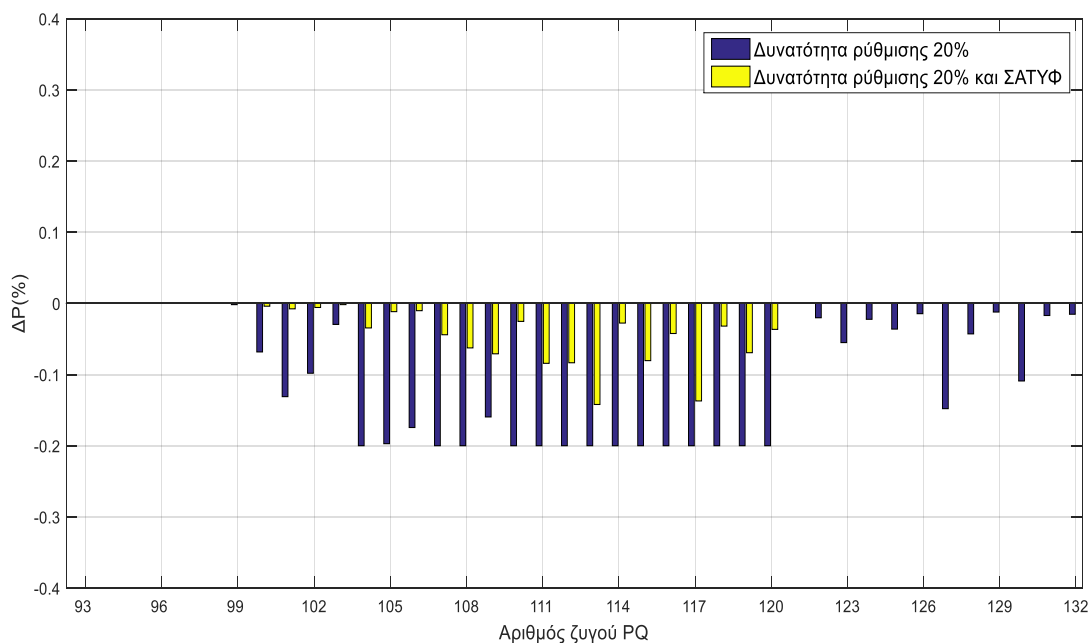


**Σχήμα 6.63:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) των ζυγών 99-135 κατά τις 07:15, για δίκτυο 135 ζυγών και 20% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.



**Σχήμα 6.64:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) των ζυγών 99-135 κατά τις 07:15, για δίκτυο 135 ζυγών και 20% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

Στα παραπάνω ραβδογράμματα παρατηρείται κορεσμός στην πιο ακραία περίπτωση ρύθμισης χωρίς ΣΑΤΥΦ. Στην περίπτωση Γ, το πλεονάζον ρυθμιζόμενο φορτίο δίνει τη δυνατότητα καλύτερης κατανομής της ρύθμισης, ωστόσο ο στόχος της τάσης έχει ήδη επιτευχθεί. Για σύγκριση των εντολών για μεταβολή ισχύος μεταξύ των στιγμών 07:15 και 05:54, δίνεται η ρύθμιση ενεργού ισχύος για την ώρα 05:54 (Σχήμα 6.65). Ο χρόνος εκτέλεσης του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι ίδιος με αυτόν της περίπτωσης Α.



**Σχήμα 6.65:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) των ζυγών 93-132 κατά τις 05:54, για δίκτυο 135 ζυγών και 20% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο.

#### 6.4.3 Περίπτωση Δ: Λειτουργία με μερική απόκριση φορτίου.

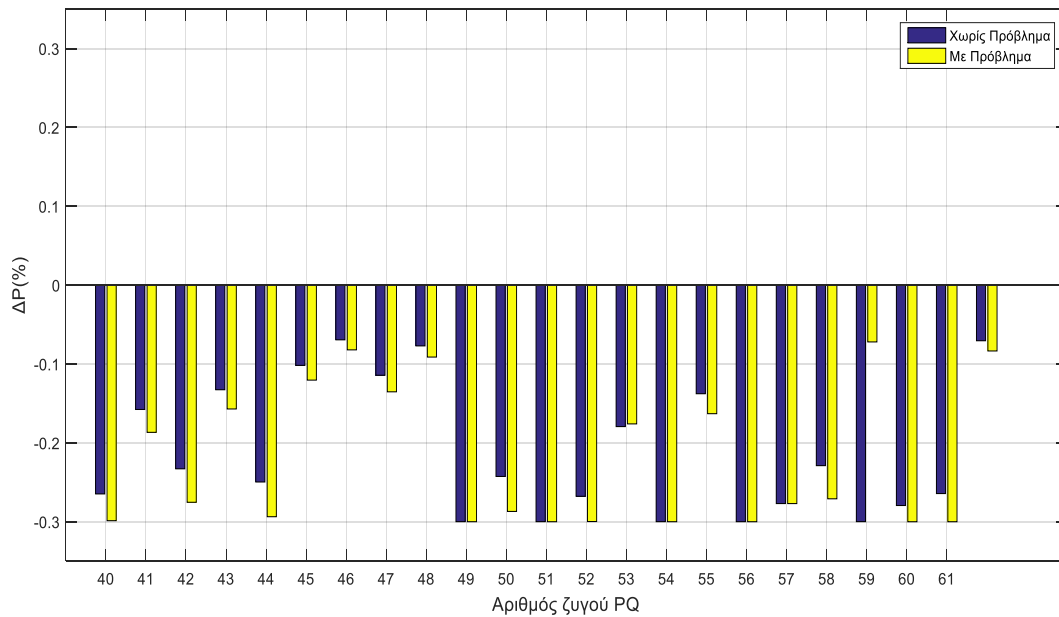
Στην περίπτωση αυτή προσομοιώθηκε το δίκτυο 135 ζυγών με δυνατότητα ρύθμισης 30% του φορτίου κάθε ζυγού. Προκειμένου να δοκιμαστεί η λειτουργία των συντελεστών προσαρμογής εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις. Πρώτα, θεωρήθηκε πως τη στιγμή μεγίστου φορτίου και τη στιγμή μέγιστης διανεμημένης παραγωγής, δύο ζυγοί που βρίσκονται στην ίδια γραμμή αναχώρησης από τον Υ/Σ σταμάτησαν να αποκρίνονται για λίγα λεπτά στην εντολή για ρύθμιση που υπολογίζεται από το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Κατά την άλλη περίπτωση θεωρήθηκε ότι οι 2 αυτοί ζυγοί δεν αποκρίνονται στις ρυθμίσεις για όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Για την πρώτη περίπτωση, θεωρείται πως οι ζυγοί 53 και 59 δεν ανταποκρίνονται από τις 07:10 έως τις 7:15 και από τις 11:56 έως τις 12:00. Στις 07:10 γίνεται αντιληπτή από τον ρυθμιστή του ζυγού η μη απόκριση του φορτίου, οπότε υπολογίζονται οι συντελεστές προσαρμογής για την επόμενη ρύθμιση. Οι συντελεστές, όπως ορίστηκαν στο κεφάλαιο 4, υπολογίζονται περίπου 0,2 και 0,17 αντίστοιχα για τους ζυγούς 59 και 53 και εξετάζεται η νέα κατανομή ρύθμισης ενεργού (Σχήμα 6.66) και αέργου ισχύος (Σχήμα 6.67) στις 07:12. Αντίστοιχα, δίνονται τα Σχήματα 6.68 και 6.69 για τις 11:58.

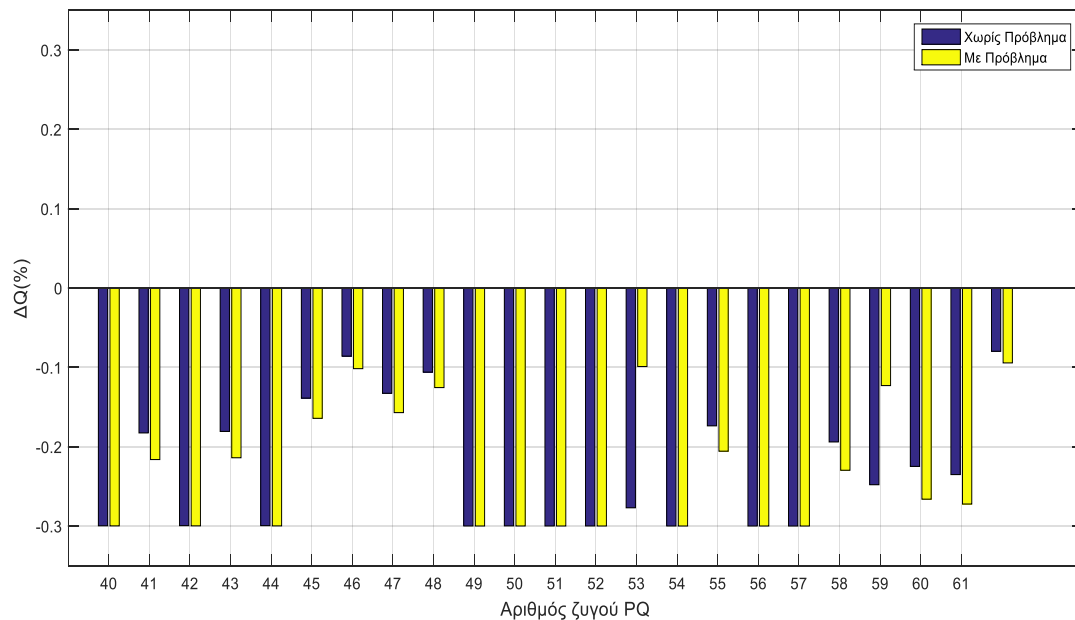
Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου στην ανακατανομή των ρυθμίσεων στην αμέσως επόμενη ρύθμιση μετά την εμφάνιση του προβλήματος φαίνεται από το γεγονός ότι η κυματομορφή της τάσης του ζυγού 61 δεν άλλαξε ουσιαστικά σε σχέση με την περίπτωση χωρίς πρόβλημα. Η γρήγορη απόκριση και επαναφορά των συντελεστών ευαισθησίας δεν επηρεάστηκε από την αλλαγή στο μέγεθος του δικτύου, αφού και αυτοί όπως και η μέθοδος ρύθμισης εξαρτώνται ουσιαστικά μόνο από τους ζυγούς της προβληματικής γραμμής.

Για την δεύτερη περίπτωση θεωρείται πως οι ζυγοί 53 και 59 δεν αποκρίνονται για όλη τη διάρκεια της ημέρας. Μελετάται η διαφορά στην ενεργό και άεργο ισχύ των ζυγών

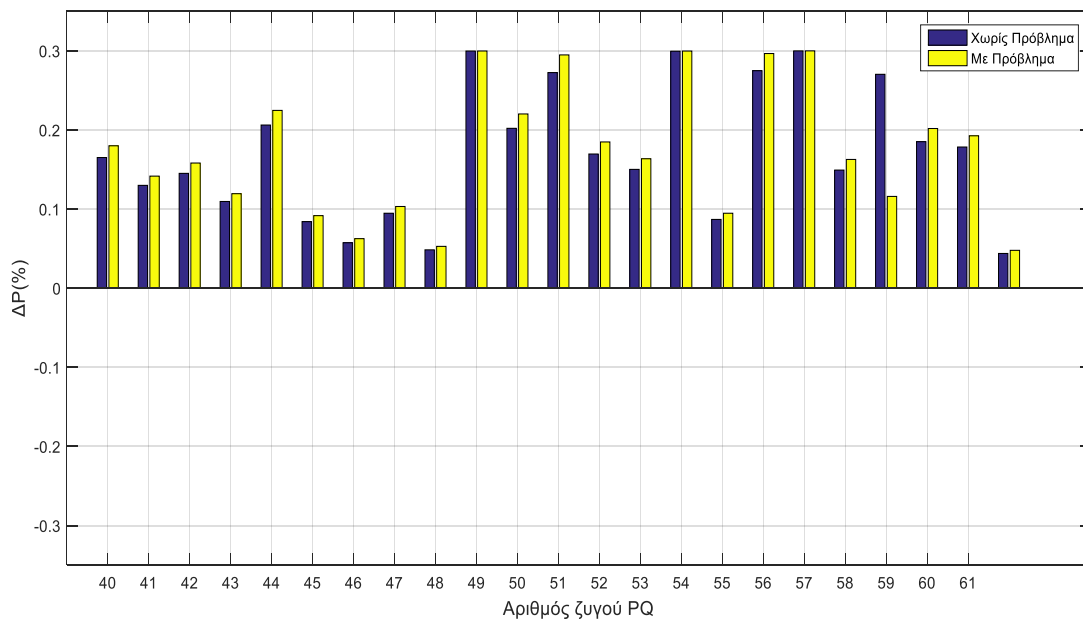
αυτών κατά την περίπτωση που χρησιμοποιούνται συντελεστές ευαισθησίας και στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιούνται (Σχήμα 6.70-6.73)



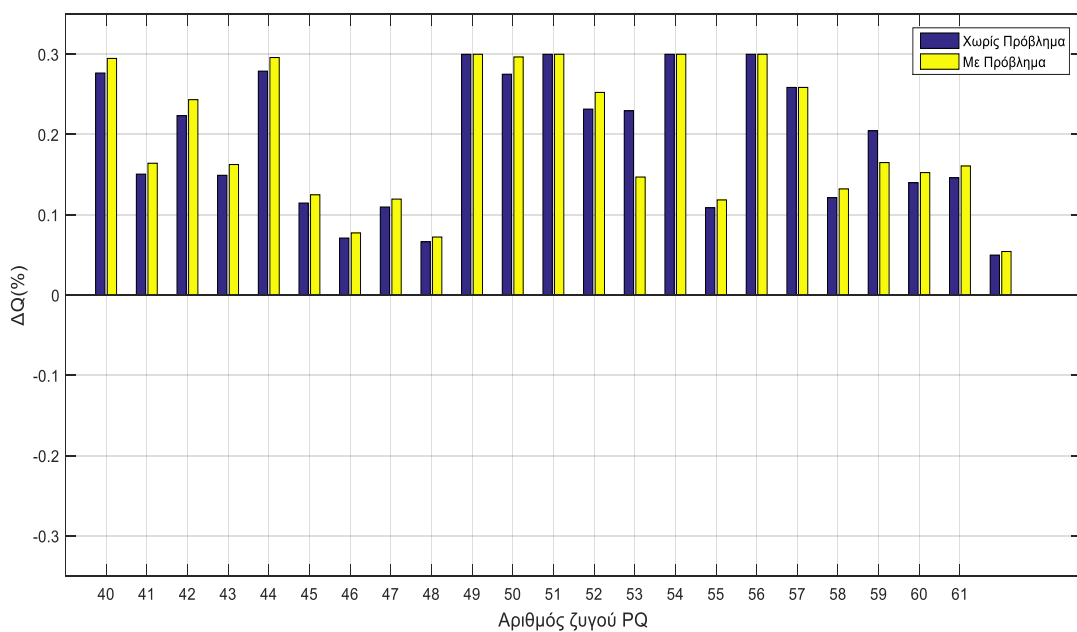
**Σχήμα 6.66 :** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) των ζυγών 40-62 κατά τις 07:12, για δίκτυο 135 ζυγών και 30% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο με πρόβλημα στους ζυγούς 53 και 59.



**Σχήμα 6.67:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης αέργου ισχύος (%) των ζυγών 40-62 κατά τις 07:12, για δίκτυο 135 ζυγών και 30% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο με πρόβλημα στους ζυγούς 53 και 59.



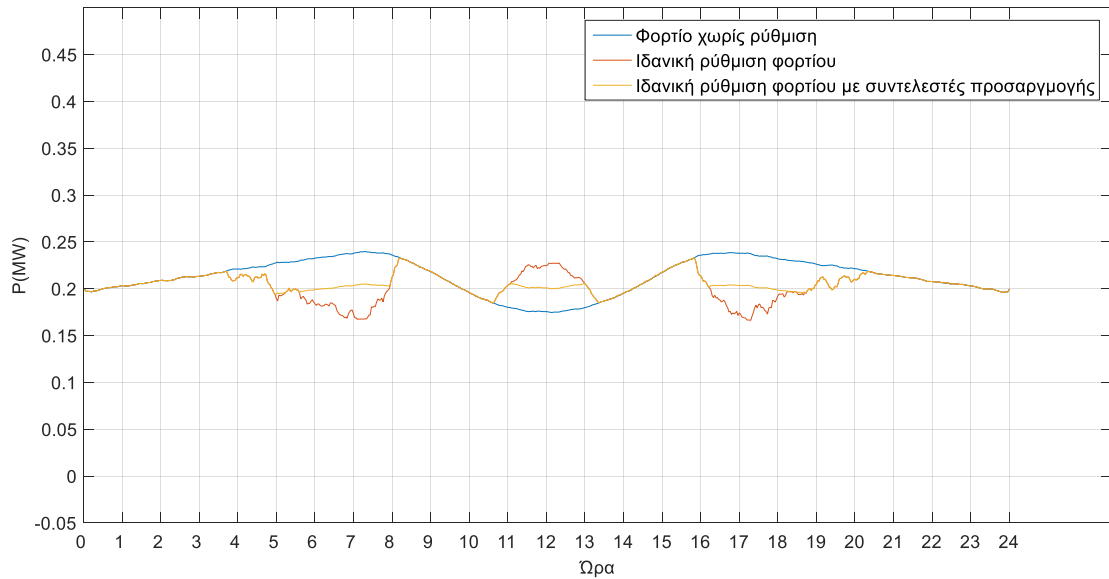
**Σχήμα 6.68:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης ενεργού ισχύος (%) των ζυγών 40-62 κατά τις 11:58, για δίκτυο 135 ζυγών και 30% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο με πρόβλημα στους ζυγούς 54 και 60.



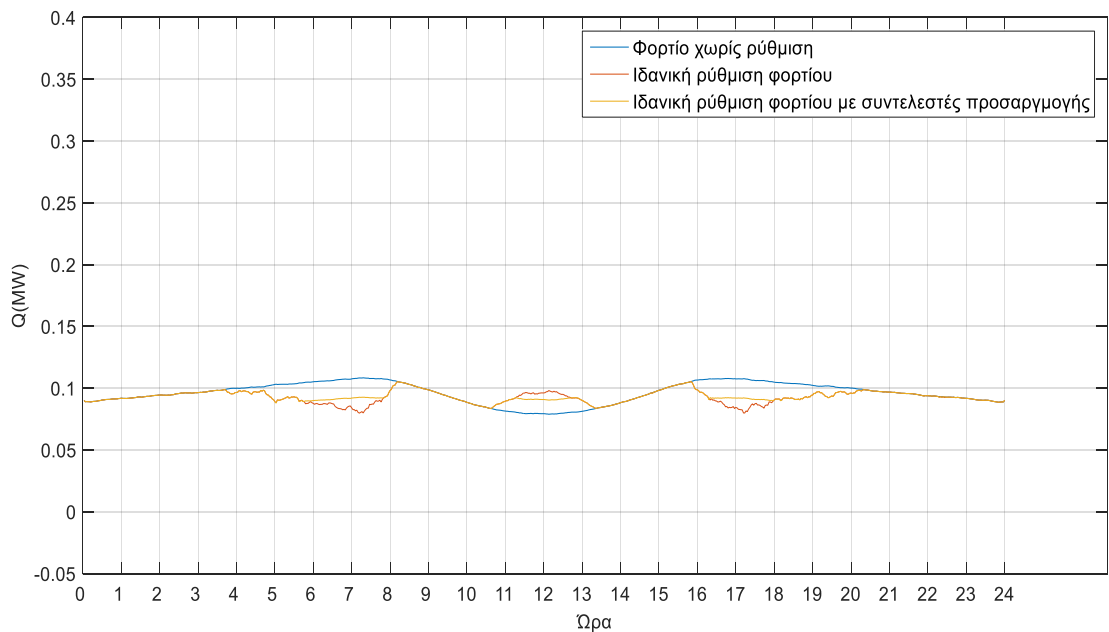
**Σχήμα 6.69:** Ραβδόγραμμα της ρύθμισης αέργου ισχύος (%) των ζυγών 40-62 κατά τις 11:58, για δίκτυο 135 ζυγών και 30% ελεγχόμενο ελαστικό φορτίο με πρόβλημα στους ζυγούς 53 και 59.

Όπως φαίνεται η ανακατανομή των ρυθμίσεων είναι αρκετά ομοιόμορφη. Όπως επιβεβαιώνεται στα σχήματα 6.68 και 6.69 η μέθοδος των συντελεστών προσαρμογής έχει

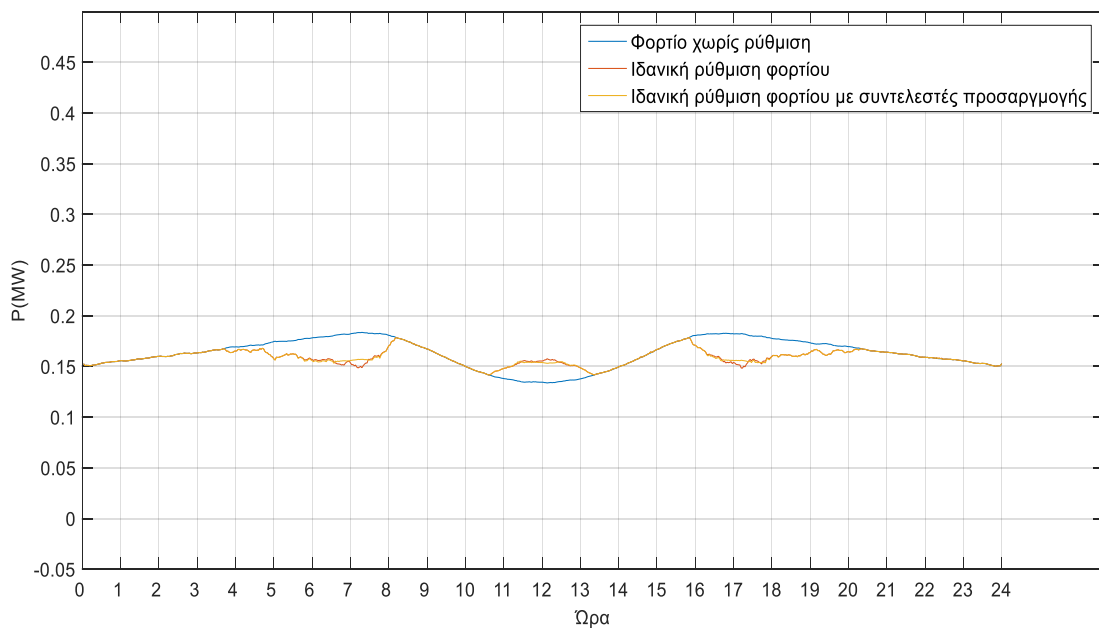
ανάλογα αποτελέσματα και στην περίπτωση ελαχίστου συνολικού φορτίου λόγω μέγιστης διανεμημένης παραγωγής.



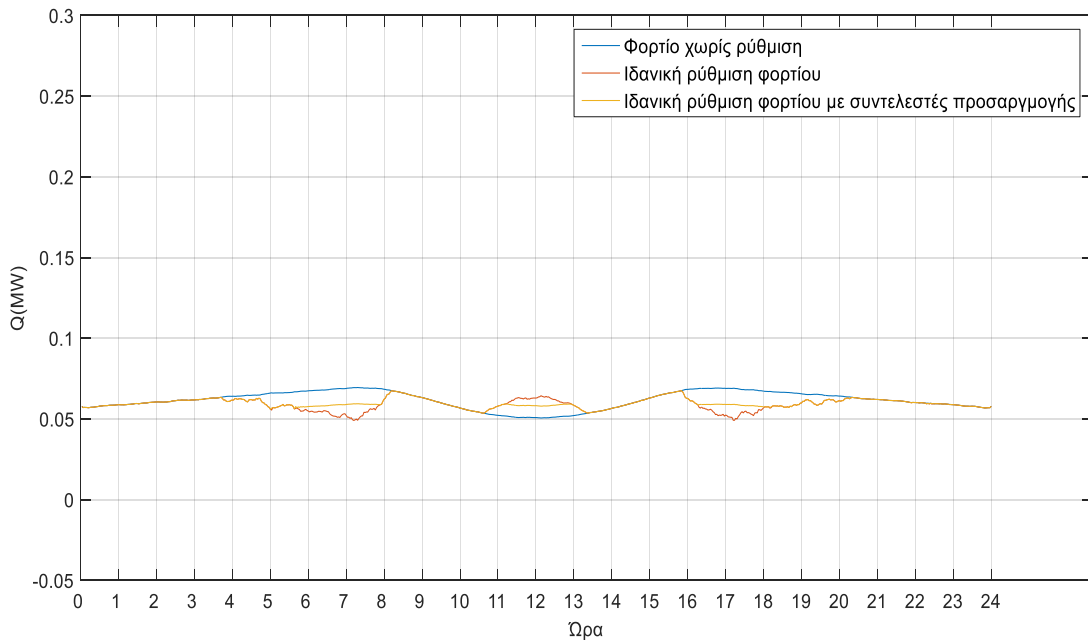
**Σχήμα 6.70:** Σύγκριση τιμής ενεργού ισχύος του ζυγού 59 για τη διάρκεια μίας μέρας για τις περιπτώσεις: κανονικής λειτουργίας (χωρίς ρύθμιση), λειτουργίας με ιδανική ρύθμιση ισχύος και για λειτουργία με μη απόκριση στην εντολή ρύθμισης και χρήση συντελεστών προσαρμογής.



**Σχήμα 6.71:** Σύγκριση τιμής αέργου ισχύος του ζυγού 59 για τη διάρκεια μίας μέρας για τις περιπτώσεις κανονικής λειτουργίας (χωρίς ρύθμιση), λειτουργίας με ιδανική ρύθμιση ισχύος και για λειτουργία με μη απόκριση στην εντολή ρύθμισης και χρήση συντελεστών προσαρμογής.

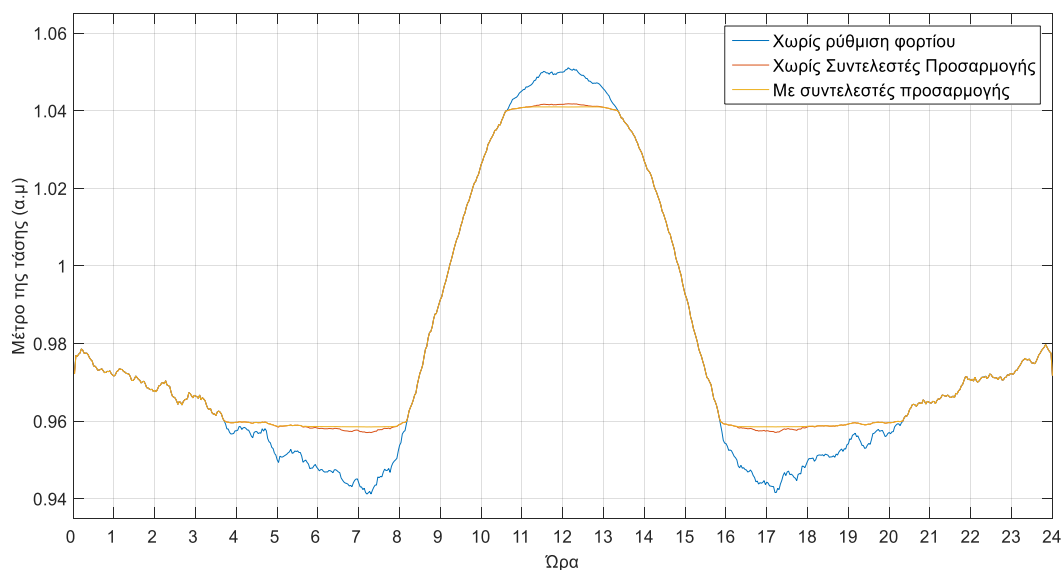


**Σχήμα 6.72:** Σύγκριση τιμής ενεργού ισχύος του ζυγού 53 για τη διάρκεια μίας μέρας για τις περιπτώσεις κανονικής λειτουργίας (χωρίς ρύθμιση), λειτουργίας με ιδανική ρύθμιση ισχύος και για λειτουργία με μη απόκριση στην εντολή ρύθμισης και χρήση συντελεστών προσαρμογής.



**Σχήμα 6.73:** Σύγκριση τιμής αέργου ισχύος του ζυγού 53 για τη διάρκεια μίας μέρας για τις περιπτώσεις κανονικής λειτουργίας (χωρίς ρύθμιση), λειτουργίας με ιδανική ρύθμιση ισχύος και για λειτουργία με μη απόκριση στην εντολή ρύθμισης και χρήση συντελεστών προσαρμογής.

Παρατηρείται πως για τον ζυγό 53, όπου η εντολή ρύθμισης ήταν ηπιότερη από αυτή του ζυγού 59, η διαφορά στην ισχύ δεν είναι τόσο μεγάλη για όλη τη διάρκεια της ημέρας (Σχήμα 6.72). Με τους συντελεστές προσαρμογής δίνεται περιθώριο ισχύος προς ρύθμιση ακόμα και όταν ο ζυγός δεν αποκρίνεται καθόλου. Αυτό συμβαίνει έτσι ώστε να μπορεί ο ζυγός να επανέλθει σταδιακά στις κανονικές ρυθμίσεις αν καταφέρει να επιτύχει κάποια στιγμή το ποσοστό αυτό. Αντίθετα, για τον ζυγό 59 όπου οι μεταβολές φορτίου είναι εντονότερες, παρατηρείται μεγάλη διαφορά στο φορτίο σε περίπτωση χρήσης των συντελεστών προσαρμογής. Η διαφορά στην τάση που θα πρόκυπτε αν ο διαχειριστής δεν λάμβανε υπόψη του αυτή τη μη εφαρμοζόμενη ρύθμιση ισχύος φαίνεται στο σχήμα 6.74 όπου αναπαρίσταται η τάση του ζυγού 61 που παρουσιάζει το μεγαλύτερο πρόβλημα τάσης.



**Σχήμα 6.74.:** Σύγκριση τιμής της τάσης (α.μ) του ζυγού 61 για τη διάρκεια μιας μέρας για τις περιπτώσεις: κανονικής λειτουργίας (χωρίς ρύθμιση), λειτουργίας με ρύθμιση χωρίς συντελεστές προσαρμογής και μη απόκριση των ζυγών 54 και 60 και για λειτουργία ρύθμισης με χρήση συντελεστών προσαρμογής και μη απόκριση των ζυγών 53 και 59.

Ας σημειωθεί πως σε πραγματικά δίκτυα, η εντολή του διαχειριστή σε κάθε ζυγό δεν αναμένεται να εκτελεστεί πλήρως διότι η απόκριση των χρηστών του δικτύου δεν είναι δεδομένη. Τα ελαστικά φορτία τα οποία μελετώνται, προκειμένου να ενταχθούν σε αυτό το πρόγραμμα απόκρισης χρηστών πρέπει να διαθέτουν ελεγκτή ο οποίος αποφασίζει για το αν και σε ποιο βαθμό θα εφαρμόσει τη ρύθμιση που του υποδεικνύεται, ανάλογα με την επιτακτικότητα της εντολής του διαχειριστή και τις ανάγκες του χρήστη. Ως εκ τούτου, σε κάθε ζυγό μπορεί να αναμένεται ένα σημαντικό ποσοστό σφάλματος μεταξύ της ιδανικής και της πραγματικής ρύθμισης, το οποίο μπορεί να περιοριστεί με την κατάλληλη χρήση των συντελεστών προσαρμογής.



## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

### **7.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ**

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα ρύθμισης της τάσης σε ΔΔΗΕ αξιοποιώντας τα διαθέσιμα προγράμματα απόκρισης ζήτησης. Παρουσιάστηκαν οι προδιαγραφές για τα όρια της τάσης και οι τρόποι ρύθμισης της. Οι κυριότερες μέθοδοι ρύθμισης της τάσης είναι οι ακόλουθες :

1. Ρύθμιση μέσω ρυθμιστών τάσης, δηλαδή Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ με ΣΑΤΥΦ ή αυτομετασχηματιστές ΜΤ/ΜΤ με ΣΑΤΥΦ.
2. Ρύθμιση τάσης με τη χρήση εγκάρσιων πυκνωτών τοποθετημένων σε ζυγούς του δικτύου ΧΤ, είτε σταθερούς (μη αποζεύξιμους) είτε αποζεύξιμους με δυνατότητα αυτόματης ζεύξης.
3. Ρύθμιση τάσης μέσω αλλαγής λήψης Μ/Σ διανομής (ΜΤ/ΧΤ).

Επιπλέον παρουσιάστηκε η ισχύουσα ορολογία που είναι χρήσιμη για τη ρύθμιση της τάσης με τις παραπάνω μεθόδους.

Τα ΔΔΗΕ που μελετήθηκαν είναι ακτινικά και συγκεκριμένα το δίκτυο 13 ζυγών του ΙΕΕΕ, ένα δίκτυο 83 ζυγών και ένα δίκτυο 135 ζυγών. Σε αυτά τα δίκτυα εφαρμόστηκε μία καινοτόμα μέθοδος ρύθμισης της τάσης μέσω της ρύθμισης ενός ποσοστού της κατανάλωσης ισχύος του φορτίου. Η μέθοδος αυτή μελετήθηκε επίσης σε συνδυασμό με τη χρήση του ΣΑΤΥΦ του Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ που θεωρείται πως υπάρχει στον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ κάθε δικτύου. Η χρήση της μεθόδου έχει σαν βασικό άξονα την αυξομείωση ενός ποσοστού του φορτίου (10% ή 20% ή 30%) ώστε η τάση κάθε ζυγού του δικτύου να βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων.

Ο έλεγχος του φορτίου επιτυγχάνεται μέσω της μετάδοσης ενός σήματος ελέγχου σε κάθε ζυγό που υποδεικνύει το είδος, το εύρος και την επιτακτικότητα της ρύθμισης. Το σήμα αυτό υπολογίζεται από τον διαχειριστή του δικτύου μέσω της επίλυσης ενός προβλήματος ελαχιστοποίησης της διακύμανσης της τάσης με την βοήθεια του λογισμικού GAMS. Στο λογισμικό αυτό θεωρούνται ως δεδομένα η τάση, η ενεργός και άεργος ισχύς κάθε ζυγού καθώς επίσης οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης των ζυγών του δικτύου, τα όρια διακύμανσης, το ποσοστό του δυνητικά ρυθμιζόμενου φορτίου και η παρούσα λήψη του ΣΑΤΥΦ. Επιπλέον, σαν είσοδο δίνονται και δύο συντελεστές οι οποίοι επιβαρύνουν ή ενθαρρύνουν τη χρήση του ΣΑΤΥΦ. Αυτό συμβαίνει διότι είναι επιθυμητή η περιορισμένη χρήση του ΣΑΤΥΦ για μείωση του κόστους συντήρησης και αντικατάστασης του μηχανισμού.

Η χρήση του ΣΑΤΥΦ γενικά επιβαρύνεται εκθετικά από τον αριθμό των αλλαγών λήψης που έγιναν τις τελευταίες 8 ώρες αλλά η επιβάρυνση αυτή αντισταθμίζεται από τον

αριθμό των ζυγών που επιθυμούν ρύθμιση. Για παράδειγμα αν 8 στους 13 ζυγούς χρειάζονται ρύθμιση, θα χρησιμοποιηθεί το ΣΑΤΥΦ και ως χρησιμοποιήθηκε ξανά τις προηγούμενες ώρες. Με τη χρήση του ΣΑΤΥΦ αποφεύγεται ο κορεσμός του σήματος ελέγχου του φορτίου και γενικά επιτυγχάνεται αποτελεσματικότερη και αποδοτικότερη ρύθμιση τάσης.

Η μετάδοση του σήματος μέσα από τις γραμμές του ηλεκτρικού ρεύματος γίνεται αντιληπτή μόνο από τις συσκευές οι οποίες διαθέτουν τον κατάλληλο ελεγκτή. Αυτός το επεξεργάζεται μαζί με τις μετρήσεις για την κατάσταση λειτουργίας της συσκευής και της επιθυμητής κατάστασης που την θέτει ο χρήστης και αποφασίζει για το κατά πόσο θα εφαρμόσει τη ρύθμιση. Ο αριθμός των συσκευών αυτών ποικίλει από ζυγό σε ζυγό και έτσι το ποσοστό του ρυθμίσιμου φορτίου σε κάθε ζυγό διαφέρει. Για λόγους απλότητας και καλύτερης εποπτείας της λειτουργίας της μεθόδου θεωρήθηκε οριζόντιο ποσοστό σε όλους τους ζυγούς για την παρούσα εργασία.

Οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης οι οποίοι δίνονται ως είσοδοι στο προαναφερθέν πρόβλημα βελτιστοποίησης υπολογίστηκαν με τις δύο μεθόδους που περιεγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3. Αρχικά έγινε ο υπολογισμός των συντελεστών ευαισθησίας της τάσης ως προς την μεταβολή της ενεργού και την μεταβολή της αέργου ισχύος με τη χρήση του ιακωβιανού πίνακα του συστήματος. Κατόπιν προσομοίωσης των δικτύων 13 ζυγών IEEE, 33 ζυγών, 70 ζυγών, 83 ζυγών και 135 ζυγών με την βοήθεια του λογισμικού MATLAB και της βιβλιοθήκης συναρτήσεων MATPOWER, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχοι ιακωβιανοί πίνακες. Στην συνέχεια οι πίνακες αυτοί αντιστράφηκαν και έτσι προέκυψαν δύο κατάλληλοι υποπίνακες οι οποίοι περιέχουν τους συντελεστές ευαισθησίας της τάσης κάθε ζυγού ως προς την επιμέρους μεταβολή ενεργού ισχύος όλων των ζυγών και αντίστοιχα για την επιμέρους μεταβολή αέργου ισχύος όλων των ζυγών.

Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού των συντελεστών ευαισθησίας, είναι η λεγόμενη αναλυτική μέθοδος η οποία περιεγράφηκε εκτενώς στο Κεφάλαιο 3. Με τη χρήση της μεθόδου αυτής υπολογίστηκαν οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης ως προς τη μεταβολή ενεργού ισχύος και ως προς τη μεταβολή της αέργου ισχύος καθώς επίσης οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης ως προς τη μεταβολή της τάσης του υποσταθμού. Διαπιστώθηκε μικρή απόκλιση τιμών από τη μέθοδο υπολογισμού μέσω ιακωβιανού πίνακα. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων, διότι είναι αποδοτικότερη υπολογιστικά και επειδή όπως αναφέρθηκε παραπάνω δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της ευαισθησίας κάθε ζυγού ως προς τη μεταβολή της τάσης του υποσταθμού που ουσιαστικά είναι η εξάρτηση της τάσης κάθε ζυγού από τις αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ.

Για την προσομοίωση δημιουργήθηκε ένα σύνολο συναρτήσεων στο περιβάλλον λογισμικού MATLAB. Αρχικά χρησιμοποιούνται κάποιες συναρτήσεις του MATLAB ώστε να εισαχθεί στην προσομοίωση το μοντέλο του δικτύου που περιγράφεται σε υπολογιστικό φύλλο excel. Έπειτα το μοντέλο αυτό προσομοιώνεται μέσω του λογισμικού MATPOWER και υπολογίζονται όλα τα στοιχεία του δικτύου. Δημιουργούνται, μέσω ξεχωριστής συνάρτησης, οι δύο ημερήσιες καμπύλες φορτίου που θα εφαρμοστούν στους ζυγούς του δικτύου που θα προσομοιωθεί για τη διάρκεια μίας μέρας. Σε αυτό το σημείο ξεκινά η προσομοίωση για τη διάρκεια μίας ημέρας. Αφού υπολογιστούν μέσω ειδικής συνάρτησης οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης μέσω της αναλυτικής μεθόδου και προσαρμοστούν οι τιμές της ισχύος των ζυγών με βάση τις καμπύλες διάρκειας, προσομοιώνεται το δίκτυο για να αποκτηθούν οι τιμές της τάσης. Έπειτα, οι τιμές αυτές μαζί με τα υπόλοιπα απαραίτητα δεδομένα που προαναφέρθηκαν δίνονται σε μία συνάρτηση που εξυπηρετεί την επικοινωνία MATLAB –GAMS. Συγκεκριμένα χρησιμοποιεί τη βιβλιοθήκη GDXMRW για να κάνει

εγγραφή και ανάγνωση σε ένα αρχείο με κατάληξη .gdx το οποίο είναι προσπελάσιμο από το GAMS. Αφού λυθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης γίνεται ξανά προσομοίωση με χρήση των κατάλληλων ρυθμίσεων που υπέδειξε η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης και αποκτώνται οι νέες τιμές της τάσης των ζυγών. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλη τη διάρκεια της μέρας που ισοδυναμεί με 720 επαναλήψεις αν θεωρηθεί πως η ρύθμιση τάσης γίνεται κάθε δύο λεπτά. Στην περίπτωση που εξετάζεται η χρήση των συντελεστών προσαρμογής, εφαρμόζεται η διαφορά στην ισχύ των προβληματικών ζυγών και καλείται ξεχωριστή συνάρτηση η οποία τους υπολογίζει. Έπειτα δίνονται ως δεδομένα στο GAMS το οποίο προσαρμόζει τα όρια κάθε ισχύος όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων διαπιστώθηκε πως η μέθοδος παρουσιάζει σταδιακά βελτιωμένα αποτελέσματα με την αύξηση του ποσοστού του ελεγχόμενου φορτίου των ζυγών. Η βελτίωση της ρύθμισης παρατηρείται να είναι αναλογική του ποσοστού και δεν υπάρχουν μη αναμενόμενες αποκλίσεις ανάμεσα στις περιπτώσεις Α, Β και Γ όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 6. Τα κυριότερα συμπεράσματα από τη χρήση της μεθόδου είναι τα εξής :

1. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου δεν αλλάζει με την αλλαγή του μεγέθους του δικτύου, δεδομένου ότι αυτό είναι ακτινικό. Αυτό συμβαίνει διότι σε ένα ακτινικό δίκτυο οι συντελεστές ευαισθησίας της τάσης μεταξύ ζυγών που δεν συνδέονται άμεσα ή έμμεσα μέσω κοινού κόμβου (όχι του Υ/Σ) είναι μηδενικοί. Όπως είναι αναμενόμενο η αλλαγή στην ισχύ ενός ζυγού δεν μπορεί να επηρεάσει την τάση ενός ζυγού μίας εντελώς ξένης γραμμής του ίδιου Υ/Σ. Έτσι η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί από πολύ μικρά έως πολύ μεγάλα δίκτυα με την ίδια απόδοση και αποτελεσματικότητα.
2. Δεδομένου ότι το δίκτυο είναι ακτινικό, η ρύθμιση του φορτίου μπορεί να λειτουργήσει επικουρικά στη χρήση του ΣΑΤΥΦ. Αυτό μπορεί να συμβεί σε περιπτώσεις όπου υπάρχει σχετικά μεγάλη διαφορά τάσης μεταξύ των γραμμών. Για παράδειγμα, αν ένα ΔΔΗΕ αντιμετωπίζει συνολικά πρόβλημα πτώσης τάσης ενώ κατά εξαίρεση μία γραμμή με μεγάλη διείσδυση διανεμημένης παραγωγής διατηρεί σχετικά υψηλή τάση, η αλλαγή της λήψης του ΣΑΤΥΦ για τη διόρθωση της πτώσης τάσης στο δίκτυο ενέχει την πιθανότητα να παρουσιαστεί υπέρταση στον ζυγό αυτό. Στην περίπτωση αυτή το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη μέθοδο ρύθμισης του φορτίου, είτε αυξάνοντας το φορτίο στον ζυγό αυτό είτε ρυθμίζοντας συνδυαστικά το φορτίο σε όλο το δίκτυο για την μείωση της συνολικής διακύμανσης.
3. Η μέθοδος όπως διαπιστώθηκε παρουσιάζει και μία δευτερεύουσα χρησιμότητα. Στις περιπτώσεις όπου γίνεται χρήση του ΣΑΤΥΦ και ρύθμιση φορτίου ταυτόχρονα γίνεται εξομάλυνση της τάσης, αφού ο έλεγχος του φορτίου συμβαίνει σε πραγματικό χρόνο. Στην παρούσα εργασία η ρύθμιση έχει συχνότητα δύο λεπτών. Αυτό συμβαίνει για τη μείωση του χρόνου προσομοίωσης ολόκληρης της μέρας σε περίπου 20-25 λεπτά. Στην πραγματικότητα όμως η συχνότητα μπορεί να είναι έως και λίγα δευτερόλεπτα. Για την τεκμηρίωση αυτού αναφέρεται ότι ο χρόνος επίλυσης αποκλειστικά του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι περίπου 0,5 δευτερόλεπτα και ο χρόνος υπολογισμού των συντελεστών ευαισθησίας είναι εξίσου μικρός αφού πρόκειται για επίλυση γραμμικού συστήματος. Αντίθετα, ο κύριος όγκος υπολογιστικού χρόνου αφορά την επαναλαμβανόμενη προσομοίωση του δικτύου πράγμα που

δεν θα ισχύει σε πραγματικό δίκτυο όπου θεωρείται πως τα στοιχεία του δικτύου θεωρούνται γνωστά. Αυτό εικάζεται ότι ισχύει διότι μπορεί να τρέχουν παράλληλα αλγόριθμοι πρόβλεψης και εκτίμησης κατάστασης ή ακόμα είναι πιθανό το δίκτυο να έχει προηγμένα συστήματα εποπτείας και μετρήσεων πραγματικού χρόνου. Ως αποτέλεσμα, η ρύθμιση του φορτίου μπορεί να συμβαίνει με συχνότητα λίγων δευτερολέπτων λειτουργώντας επικουρικά για την καταστολή φαινομένων σχετικά γρήγορων μεταβολών τάσης.

4. Παρατηρώντας τη δυνατότητα ρύθμισης της τάσης μέσω ελέγχου ενός μέρους του φορτίου διαπιστώνεται πως αυτή η μέθοδος μπορεί να αποτελέσει τη βασική μέθοδο ρύθμισης σε περιπτώσεις που η διακύμανση της τάσης είναι μικρή. Στην πραγματικότητα η απόκλιση της τάσης των περισσότερων γραμμών στα ΔΔΗΕ δεν ξεπερνά το  $\pm 5\%$  άρα με μικρές μεταβολές του φορτίου μπορεί να περιοριστεί περαιτέρω η χρήση του ΣΑΤΥΦ.

Για τα παραπάνω συμπεράσματα πρέπει να σημειωθεί πως ο έλεγχος για παράδειγμα του 30% του φορτίου ενός ζυγού, είναι μία εξαιρετικά σπάνια περίπτωση όπου τα ελαστικά φορτία αποτελούν ένα μεγάλο ποσοστό της συνολικής ισχύος του ζυγού και αυτά ανταποκρίνονται πλήρως. Τα μεγαλύτερα ποσοστά ελαστικών φορτίων αναμένεται να βρίσκονται σε ανεπτυγμένες περιοχές με σχετικά ακραίες καιρικές συνθήκες. Για παράδειγμα σε ένα δίκτυο που σε κάθε σπίτι λειτουργούν μία ή περισσότερες συσκευές θέρμανσης ή ψύξης το συνολικό φορτίο αυτών των συσκευών είναι μεγάλο. Το ελεγχόμενο φορτίο μπορεί να αυξηθεί επίσης σε περιπτώσεις μεγάλης διείσδυσης οικιακών μπαταριών ή ηλεκτρικών οχημάτων. Δεδομένου ότι οι αγορές αυτές μεγαλώνουν διαρκώς, αναμένεται η μέθοδος αυτή να είναι υλοποιήσιμη στο μέλλον.

## 7.2 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η μέθοδος που μελετήθηκε σε αυτήν την εργασία είναι αρκετά πρωτοποριακή και σχετικά σύνθετη. Για τον λόγο αυτό έγιναν διάφορες παραδοχές οι οποίες αφήνουν περιθώριο για μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας.

Μία πρώτη επέκταση αφορά την μοντελοποίηση και προσομοίωση του ελεγκτή των συσκευών ελαστικού φορτίου ώστε να μπορούν να συνδεθούν με το υπόλοιπο πρόγραμμα. Με αυτή την επέκταση θα δοθεί μία πιο ρεαλιστική μορφή στο ελεγχόμενο φορτίο κάθε ζυγού το οποίο κατά μία μετέπειτα επέκταση θα ποικίλει σε ποσοστό ανά ζυγό και δεν θα συμπεριφέρεται ομοιόμορφα. Ακόμα θα μπορούσε να αναθεωρηθεί το ποσοστό της ελεγχόμενης αέργου ισχύος σε κάθε ζυγό συνυπολογίζοντας τις πραγματικές δυνατότητες που προσφέρουν οι αποξεδύσιμοι εγκάρσιοι πυκνωτές. Μετά την υλοποίηση των παραπάνω, ξεκινώντας από μικρότερα ποσοστά ελεγχόμενου φορτίου θα ελεγχθεί καλύτερα η λειτουργία της μεθόδου. Έπειτα, μπορούν να σχεδιαστούν ελεγκτές που θα ρυθμίζουν με ανάλογο τρόπο άλλα φορτία όπως οι οικιακές μπαταρίες και τα ηλεκτρικά οχήματα.

Μια ακόμα σημαντική επέκταση είναι η μελέτη της μεθόδου σε μη ακτινικά δίκτυα. Για να συμβεί αυτό πρέπει είτε να υπολογιστούν οι κατάλληλοι συντελεστές ευαισθησίας. Η αναλυτική μέθοδος αποτελείται από ένα σύστημα εξισώσεων που έχει αποδεδειγμένα μοναδική λύση μόνο για ακτινικά δίκτυα. Ως εκ τούτου, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μία διαφορετική μέθοδος, είτε να αποδειχθεί η μοναδικότητα της λύσης της αναλυτικής μεθόδου και για μη ακτινικά δίκτυα αν αυτό είναι εφικτό. Το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της

---

διακύμανσης της τάσης των ζυγών ενός ΔΔΗΕ τότε θα μπορούσε να επιλυθεί και για μη ακτινικά δίκτυα χωρίς επιπλέον αλλαγές.



**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2001, pp. 5-16.
- [2] M. Delfanti, M. Merlo, G. Monfredini, V. Olivieri, M. Pozzi, and A. Silvestri, “Hosting dispersed generation on italian MV networks: Towards smart grids,” in *2010 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Sept. 2010, pp. 1–6.
- [3] K. Christakou, “Real-time optimal controls for active distribution networks: from concepts to applications,” Ph.D. dissertation, Dept. Information and communications, Univ. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 2015.
- [4] M.H. Albadi and E.F. El-Saadany, “A summary of demand response in electricity markets,” *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 11, pp.1989–1996, 2008.
- [5] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας*, ΕΜΠ, Αθήνα, 1994.
- [6] Π. Σ. Γεωργιάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, ΕΜΠ, Αθήνα, 2015, pp. 216-222 .
- [7] “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems,” *CENELEC EN 50160t*, 2001.European Standard, Brussels, 1999–2010.
- [8] Ε. Ν. Διαλυνάς, *Σχεδιασμός συστημάτων παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με κριτήρια αξιοπιστίας*, Εκδόσεις Τσότρας, Αθήνα, 2013.
- [9] ΔΕΗ, “Οδηγία διανομής Νο 31 : Ρύθμιση τάσεως των δικτύων Μ.Τ. εις δίκτυα διανομής,” 1973.
- [10] K. Christakou, J.-Y. Le Boudec, M. Paolone, and D.-C. Tomozei, “Efficient computation of sensitivity coefficients of node voltages and line currents in unbalanced radial electrical distribution networks,” *IEEE Trans. Smart Grids*, vol. 4, no. 2, pp. 741–750, Jun. 2013.
- [11] Α. Μπακόπουλος, Ι. Χρυσοβέργης, *Εισαγωγή στην Αριθμητική Ανάλυση*, ΕΜΠ, Αθήνα, 2009, pp. 162-168.
- [12] J. Peschon, D. Piercy, W. Tinney, and O. Tveit, “Sensitivity in power systems,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol PAS-87, pp. 1687–1696, Aug. 1968.
- [13] D. Shirmohammadi, H. Hong, A. Semlyen, and G. Luo, “A compensation based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 2, pp. 753–762, May 1988.
- [14] A. Wood and B. Wollenberg, *Power Generation, Operation and Control*, vol 2. New York: Wiley, 1996.
- [15] M. Begovic and A. Phadke, “Control of voltage stability using sensitivity analysis,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 7, no. 1, pp. 114–123, Feb. 1992.
- [16] J. Bandler and M. El-Kady, “A unified approach to power system sensitivity analysis and planning, part i: family of adjoint systems,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits*

- Syst.*, 1980, pp. 681–687.
- [17] J. Bandler and M. El-Kady, “A new method for computerized solution of power flow equations,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-101, no. 1, pp. 1–10, 1982.
- [18] J. Bandler and M. El-Kady, “A unified approach to power system sensitivity analysis and planning, part ii: special class of adjoint systems,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, 1980, pp. 688-692.
- [19] L. Ferreira, “Tellegen’s theorem and power systems new load flow equations, new solution methods,” *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 37, no 4, pp. 519–526, Apr 1990.
- [20] R. Gurram and B. Subramanyam, “Sensitivity analysis of radial distribution network-adjoint network method,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 21, no. 5, pp. 323–326, 1999.
- [21] H. Chiang and M. Baran, “On the existence and uniqueness of load flow solution for radial distribution power networks” *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 37, no. 3, pp. 410–416, 1990.
- [22] M. H. Albadi and E. F. El-Saadany, “A summary of demand response in electricity markets,” *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 78, pp. 1989-1996, 2008.
- [23] J. Taneja, D. Culler, and P. Dutta, “Towards cooperative grids: Sensor/actuator networks for renewables integration,” in *Proc. 1<sup>st</sup> IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun. (SmartGridComm)*, 2010, pp. 531–536.
- [24] S. Koch, J. Mathieu, and D. Callaway, “Modeling and control of aggregated heterogeneous thermostatically controlled loads for ancillary services” in *Proc. 17th Power Syst. Comput. Conf. (PSCC2011)*, Stockholm, Sweden, 2011, pp. 1–7.
- [25] S. Backhaus, N. Sinitsyn, S. Kundu, and I. Hiskens, “Modeling and control of thermostatically controlled loads,” *Los Alamos National Laboratory (LANL), Tech. Rep.*, 2011.
- [26] K. Christakou, D.-C. Tomozei, J.-Y. Le Boudec, and M. Paolone, “GECN: Primary voltage control for active distribution networks via real-time demand-response,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 622–631, Mar. 2014.
- [27] S. Sarri, M. Paolone, R. Cherkaoui, A. Borghetti, F. Napolitano, and C. Nucci, “State estimation of active distribution networks: Comparison between WLS and iterated kalman-filter algorithm integrating PMUs”, in *Proc. 3rd IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. (ISGT) Eur. Conf.*, 2012.
- [28] Enrique Castillo, Antonio J. Conejo, Pablo Pedregal, Ricardo Garcia, and Natalia Alguacil, *Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science*, John Wiley & Sons, Inc, Chapter 10, 2002.
- [29] “Gams documentation center” [online], διαθέσιμο: <https://www.gams.com/latest/docs/> προσπελάστηκε τον Σεπτέμβριο 2017.
- [30] “Bomin – Open Source for the Operations Research” [online], διαθέσιμο: <https://projects.coin-or.org/Bonmin>, προσπελάστηκε τον Σεπτέμβριο 2010.
- [31] “GAMS documentation- BONMIN and BONMINH” [online], διαθέσιμο: [https://www.gams.com/latest/docs/S\\_BONMIN.html](https://www.gams.com/latest/docs/S_BONMIN.html), προσπελάστηκε τον Σεπτέμβριο 2017.
- [32] “The Language of Technical Computing”, [online], διαθέσιμό: <https://www.mathworks.com/help/matlab/>, προσπελάστηκε τον Σεπτέμβριο 2017.
- [33] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, “Matpower: Steady-



- State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 12–19, Feb. 2011.
- [34] “A MATLAB Power System Simulation Package”, [online], διαθέσιμο: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>, προσπελάστηκε τον Σεπτέμβριο 2017.
- [35] C. E. Murillo-Sánchez, R. D. Zimmerman, C. L. Anderson, and R. J. Thomas, “Secure planning and operations of systems with stochastic sources, energy storage and active demand,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 2220–2229, Dec. 2013.
- [36] S. Dirkse, M. C. Ferris and J. Ramakrishnan. (July 11 2014). *GDXMRW: Interfacing GAMS and MATLAB*. [online]. Διαθέσιμο: <http://pages.cs.wisc.edu/~ferris/matlab/gdxmrw.pdf>
- [37] “Distribution Test Feeders” [online], διαθέσιμο: <https://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/> προσπελάστηκε τον Μάιο 2017.
- [38] C. T. Su, C.F. Chang, J. P. Chiou, “Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm,” *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 75, no. 23, pp. 190–199, Aug. 2005.
- [39] M. A. N. Guimaraes and C. A. Castro, “Reconfiguration of distribution systems for loss reduction using tabu search,” in *15th Power System Computation Conference - PSCC*, Aug. 2005, vol. 1, pp. 1–6.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

**Πίνακας 1:** Στοιχεία ζυγών του δικτύου 13 ζυγών.

bus i	type	Pd (MW)	Qd (MVar)	Gs	Bs	area	Vm	Va	baseKV	zone	Vmax	Vmin
1	3	0	0	0	0	1	1	0	20	1	1,06	0,94
2	1	0,18	0,07	0	0	1	1	0	20	1	1,06	0,94
3	1	0,21	0,11	0	0	1	1	0	20	1	1,06	0,94
4	1	0,21	0,09	0	0	1	1	0	20	1	1,06	0,94
5	1	0,1782	0,04675	0	0	1	1	0	20	1	1,06	0,94
6	1	0,1925	0,0132	0	0	1	1	0	20	1	1,06	0,94
7	1	0,2475	0,0902	0	0	1	1	0	20	1	1,06	0,94
8	1	0,1298	0,044	0	0	1	1	0	20	1	1,06	0,94
9	1	0,1463	0,0715	0	0	1	1	0	20	1	1,06	0,94
10	1	0,22	0,0825	0	0	1	1	0	20	1	1,06	0,94
11	1	0,154	0,066	0	0	1	1	0	20	1	1,06	0,94
12	1	0,1375	0,0715	0	0	1	1	0	20	1	1,06	0,94
13	1	0,352	0,1386	0	0	1	1	0	20	1	1,06	0,94

**Πίνακας 2:** Στοιχεία γραμμών του δικτύου 13 ζυγών.

f_bus	t_bus	R(p.u.)	X(p.u.)	b(p.u.)	rateA	rateB	rateC	ratio	angle	status	angmin	angmax	Length (km)	type
1	2	0,0323758	0,0978898	0	0,00	0	0	0	0	1	-360	360	6,1	3
2	3	0,0174225	0,0278813	0	0,00	0	0	0	0	1	-360	360	1,5	3
3	4	0,0197455	0,0315988	0	0,00	0	0	0	0	1	-360	360	1,7	3
2	5	0,021972	0,022392	0	0,00	0	0	0	0	1	-360	360	1,6	3
5	6	0,0185389	0,0188933	0	0,00	0	0	0	0	1	-360	360	1,35	3
2	7	0,0355603	0,1075183	0	0,00	0	0	0	0	1	-360	360	6,7	3
7	8	0,019756	0,010668	0	0,00	0	0	0	0	1	-360	360	1,6	3
8	9	0,019756	0,010668	0	0,00	0	0	0	0	1	-360	360	1,6	3
7	10	0,0178523	0,0181935	0	0,00	0	0	0	0	1	-360	360	1,3	3
10	11	0,009632	0,009765	0	0,00	0	0	0	0	1	-360	360	1,4	3
7	12	0,0159225	0,0481425	0	0,00	0	0	0	0	1	-360	360	3	3
10	13	0,01946	0,007427	0	0,00	0	0	0	0	1	-360	360	2,8	3

**Πίνακας 3:** Ισχύεις ζυγών δικτύου 83 ζυγών.

bus i	Pd (MW)	Qd (MVar)	bus i	Pd (MW)	Qd (MVar)	bus i	Pd (MW)	Qd (MVar)	bus i	Pd (MW)	Qd (MVar)
1	0,003	0,001	22	0,053	0,021	43	0,038	0,010	64	0,226	0,062
2	0,103	0,051	23	0,053	0,021	44	0,106	0,039	65	0,226	0,065
3	0,303	0,201	24	0,053	0,011	45	0,226	0,065	66	0,562	0,226
4	0,373	0,211	25	0,073	0,031	46	0,604	0,226	67	0,146	0,064
5	0,223	0,101	26	0,103	0,061	47	0,151	0,049	68	0,257	0,044
6	1,103	0,601	27	0,103	0,051	48	0,058	0,017	69	0,302	0,116
7	0,403	0,221	28	0,700	0,311	49	0,053	0,028	70	0,166	0,065
8	0,303	0,111	29	0,203	0,100	50	0,302	0,071	71	0,183	0,047
9	0,453	0,201	30	0,130	0,045	51	0,151	0,052	72	0,604	0,291
10	0,303	0,161	31	0,803	0,350	52	0,604	0,194	73	0,151	0,049
11	0,300	0,100	32	0,233	0,110	53	0,377	0,097	74	0,323	0,108
12	1,030	0,510	33	0,203	0,101	54	0,377	0,113	75	0,356	0,108
13	0,803	0,401	34	0,803	0,350	55	0,377	0,097	76	0,906	0,448
14	0,703	0,350	35	0,123	0,061	56	0,151	0,026	77	0,226	0,058
15	0,070	0,035	36	0,123	0,061	57	0,052	0,016	78	0,800	0,347
16	0,303	0,151	37	0,100	0,053	58	0,130	0,065	79	0,302	0,116
17	0,503	0,251	38	0,093	0,043	59	0,453	0,136	80	0,561	0,270
18	0,703	0,350	39	0,083	0,030	60	0,047	0,020	81	0,151	0,045
19	1,000	0,401	40	0,123	0,041	61	0,151	0,032	82	0,377	0,116
20	0,303	0,151	41	0,273	0,131	62	0,123	0,057	83	0,302	0,116
21	0,403	0,211	42	0,163	0,031	63	0,151	0,058			

Πίνακας 4: Ισχύεις ζυγών δικτύου 135 ζυγών.

bus i	Pd (MW)	Qd (MVar)	bus i	Pd (MW)	Qd (MVar)	bus i	Pd (MW)	Qd (MVar)
1	0,001	0,0001	46	0,309	0,144	91	0,080	0,034
2	0,048	0,019	47	0,203	0,101	92	0,087	0,037
3	0,043	0,017	48	0,236	0,100	93	0,030	0,012
4	0,087	0,035	49	0,040	0,020	94	0,074	0,031
5	0,311	0,124	50	0,109	0,046	95	0,232	0,098
6	0,149	0,059	51	0,044	0,011	96	0,142	0,060
7	0,239	0,095	52	0,073	0,031	97	0,030	0,012
8	0,062	0,025	53	0,158	0,060	98	0,076	0,032
9	0,125	0,050	54	0,069	0,029	99	0,140	0,065
10	0,140	0,056	55	0,142	0,066	100	0,051	0,022
11	0,117	0,046	56	0,050	0,020	101	0,060	0,025
12	0,249	0,099	57	0,051	0,029	102	0,080	0,022
13	0,291	0,116	58	0,151	0,075	103	0,500	0,230
14	0,304	0,121	59	0,207	0,094	104	0,064	0,034
15	0,215	0,086	60	0,180	0,075	105	0,251	0,114
16	0,199	0,079	61	0,172	0,091	106	0,313	0,133
17	0,080	0,045	62	0,227	0,116	107	0,080	0,034
18	0,100	0,044	63	0,040	0,022	108	0,051	0,022
19	0,080	0,036	64	0,294	0,117	109	0,045	0,026
20	0,030	0,015	65	0,083	0,033	110	0,202	0,086
21	0,231	0,113	66	0,083	0,033	111	0,061	0,026
22	0,060	0,029	67	0,104	0,041	112	0,046	0,019
23	0,231	0,113	68	0,176	0,070	113	0,036	0,017
24	0,121	0,059	69	0,083	0,033	114	0,157	0,067
25	0,050	0,024	70	0,218	0,087	115	0,040	0,020
26	0,057	0,028	71	0,023	0,009	116	0,150	0,074
27	0,365	0,178	72	0,070	0,037	117	0,050	0,026
28	0,070	0,032	73	0,073	0,029	118	0,070	0,030
29	0,125	0,061	74	0,406	0,162	119	0,032	0,014
30	0,057	0,028	75	0,060	0,028	120	0,061	0,026
31	0,020	0,010	76	0,100	0,042	121	0,050	0,027
32	0,085	0,042	77	0,143	0,060	122	0,095	0,046
33	0,075	0,036	78	0,096	0,041	123	0,050	0,024
34	0,397	0,194	79	0,300	0,127	124	0,123	0,060
35	0,065	0,031	80	0,141	0,060	125	0,078	0,038
36	0,181	0,089	81	0,280	0,119	126	0,145	0,071
37	0,242	0,118	82	0,087	0,037	127	0,021	0,010
38	0,075	0,037	83	0,244	0,103	128	0,075	0,037
39	0,060	0,025	84	0,248	0,105	129	0,228	0,111
40	0,035	0,012	85	0,045	0,026	130	0,036	0,017
41	0,086	0,043	86	0,090	0,038	131	0,249	0,122
42	0,040	0,015	87	1,000	0,482	132	0,317	0,155
43	0,118	0,050	88	0,458	0,194	133	0,334	0,163
44	0,063	0,027	89	0,385	0,163	134	0,249	0,122
45	0,172	0,073	90	0,049	0,027	135	0,450	0,222