ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Γεώργιος Α. Μπαρζεγκάρ-Ντοβόμ, Θεόφιλος Α. Παπαδόπουλος
Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
e-mail: thpapad@ee.duth.gr

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια παρουσιάζεται αυξημένο ενδιαφέρον σχετικά με τη μοντελοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς των φορτίων στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), κυρίως όσον αφορά προβλήματα μελέτης ευστάθειας τάσης και συχνότητας. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση μίας ολοκληρωμένης διαδικασίας για την επεξεργασία δυναμικών αποκρίσεων από μετρήσεις, προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα των σημάτων που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη δυναμικών μοντέλων φορτίου. Αρχικά, παρουσιάζεται η μαθηματική αναπαράσταση του δυναμικού μοντέλου που υιοθετήθηκε και περιγράφονται οι διατάξεις που υλοποιήθηκαν για την καταγραφή των δυναμικών αποκρίσεων. Στη συνέχεια, εξετάζεται η αποδοτικότητα των διάφορων μεθόδων επεξεργασίας που εφαρμόστηκαν και αξιολογούνται τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Τέλος, συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και δίνονται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Λέξεις-Κλειδιά: δυναμικές αποκρίσεις, επεξεργασία μετρήσεων, μοντελοποίηση δυναμικής συμπεριφοράς φορτίων, συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

Abstract

Over the last few decades, dynamic load modelling in power systems has drawn a renewed research interest, mainly regarding voltage and frequency stability studies. Scope of this paper is to propose a comprehensive methodology for the processing of measured dynamic responses in order to improve the quality of the measured signals for the derivation of load models. Initially, the mathematical formulation of the adopted dynamic load model is presented, whereas the implemented configurations to obtain the necessary dynamic responses are briefly described. Next, the efficiency of different processing techniques is examined and the corresponding results are evaluated. Finally, the remarks of this paper are summarized and some proposals for further research are highlighted.

Keywords: dynamic load modelling, dynamic responses, measurement processing, power systems

1. Εισαγωγή

Η ακριβής αναπαράσταση των δυναμικών χαρακτηριστικών των φορτίων των ΣΗΕ αποτελεί ένα γνωστό και εκτενώς εξεταζόμενο θέμα έρευνας εδώ και δεκαετίες, καθώς είναι ιδιαίτερα σημαντικό όσον αφορά στην ορθή λειτουργία των ΣΗΕ και στην εφαρμογή διάφορων στρατηγικών ελέγχου, όπως επισημαίνεται και στη σχετική τεχνική αναφορά της

ομάδας εργασίας της CIGRE, C4.605 (2013). Τα τελευταία χρόνια παρουσιάζεται έντονα ανανεωμένο το ενδιαφέρον στην ερευνητική αυτή περιοχή, εξαιτίας της αυξανόμενης διείσδυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) καθώς και νέων τύπων φορτιών, τα οποία πλέον συνδέονται στο σύστημα μέσω ηλεκτρονικών ισχύος.

Υπάρχουν γενικά διάφορες τεχνικές για τη μοντελοποίηση των φορτίων στα ΣΗΕ. Ωστόσο, εξαιτίας της αυξανόμενης διαθεσιμότητας μονάδων παρακολούθησης και καταγραφής τόσο στο σύστημα μεταφοράς όσο και στο σύστημα διανομής των ΣΗΕ, π.χ. καταγραφείς διαταραχών συχνότητας (Frequency Disturbance Recorders – FDRs), μετρητές φασιθετών (PMUs – μPMUs) κ.α., η έρευνα έχει επικεντρωθεί κυρίως σε τεχνικές που στηρίζονται στη χρήση μετρήσεων (measurement – based load modelling).

Τα μοντέλα φορτίου τα οποία δημιουργούνται με τη χρήση μετρήσεων μπορούν να προσομοιώσουν το στοχαστικό χαρακτήρα της μεταβολής του φορτίου και την ακριβή συμπεριφορά του κατά τη διάρκεια διαταραχών. Όμως, η ακρίβεια στη μοντελοποίηση των φορτίων, χρησιμοποιώντας μετρήσεις, εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την αποτελεσματικότητα των τεχνικών επεξεργασίας που εφαρμόζονται στα δεδομένα. Παρ' όλα αυτά, όπως επισημαίνεται και από τους Hasan et al. (2015), λίγες μόνο σχετικές εργασίες αναφέρονται στη βιβλιογραφία σε αντίστοιχες μεθόδους για την επεξεργασία δυναμικών αποκρίσεων από μετρήσεις, ενώ οι περισσότερες εστιάζουν κυρίως σε περιπτώσεις που αφορούν στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας (steady – state).

Η εφαρμογή των τεχνικών επεξεργασίας ενδέχεται να επηρεάσει σημαντικά την αποδοτικότητα των μοντέλων φορτίου που αναπτύσσονται, καθώς και την ακρίβεια των εκτιμώμενων παραμέτρων τους. Αναφέρονται χαρακτηριστικά ο ρυθμός δειγματοληψίας ανάληψης των δεδομένων (sampling rate), το μήκος του παραθύρου σήματος (window size), η εφαρμογή τεχνικών κανονικοποίησης των δεδομένων (normalization), κ.α.

Στο άρθρο αυτό παρουσιάζονται εγγενείς προκλήσεις και προβλήματα που αφορούν στην επεξεργασία των δυναμικών αποκρίσεων για την ανάπτυξη δυναμικών μοντέλων φορτίου στο επίπεδο του δικτύου διανομής των ΣΗΕ από μετρήσεις. Σκοπός της εργασίας είναι η παρουσίαση μίας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για την ανακατασκευή και την επεξεργασία των δυναμικών αποκρίσεων από μετρήσεις προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα και η αξιοπιστία των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μοντέλων φορτίου στα ΣΗΕ.

2. Μοντέλο εκθετικής επαναφοράς

Στην παρούσα εργασία για τη μελέτη της δυναμικής απόκρισης των φορτίων χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο εκθετικής επαναφοράς (exponential recovery load), το οποίο έχει προταθεί από τους Karlsson και Hill (1994).

Το μοντέλο εκθετικής επαναφοράς υπάγεται στην κατηγορία των δυναμικών μοντέλων και περιγράφει, έπειτα από μία βηματική μεταβολή της τάσης, την απόκριση της ενεργού και άεργου ισχύος του φορτίου ως μη – γραμμικές συναρτήσεις της τάσης, όπως φαίνεται στις (1) και (2),

$$P_d(t) = \left(P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{a_s} - P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{a_t} \right) (1 - e^{-t/T_p}) + P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{a_t}, \quad (1)$$

$$Q_d(t) = \left(Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\beta_s} - Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\beta_t} \right) (1 - e^{-t/T_q}) + Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\beta_t}, \quad (2)$$

όπου T_p και T_q δηλώνουν τις σταθερές χρόνου της επαναφοράς του φορτίου, α_s και β_s είναι οι εκθέτες της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας της ενεργού και άεργου ισχύος, αντίστοιχα, ενώ α_t και β_t είναι οι εκθέτες της μεταβατικής κατάστασης. Τέλος, οι παράμετροι V_0, P_0 και Q_0 είναι οι τιμές της τάσης, της ενεργού και άεργου ισχύος πριν τη διαταραχή. Η ταυτοποίηση των παραμέτρων πραγματοποιείται εφαρμόζοντας το μοντέλο εκθετικής επαναφοράς στις μετρήσεις και χρησιμοποιώντας τη μη – γραμμική μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (non – linear least squares), όπως έχει παρουσιαστεί από τους Papadopoulos et al. (2017).

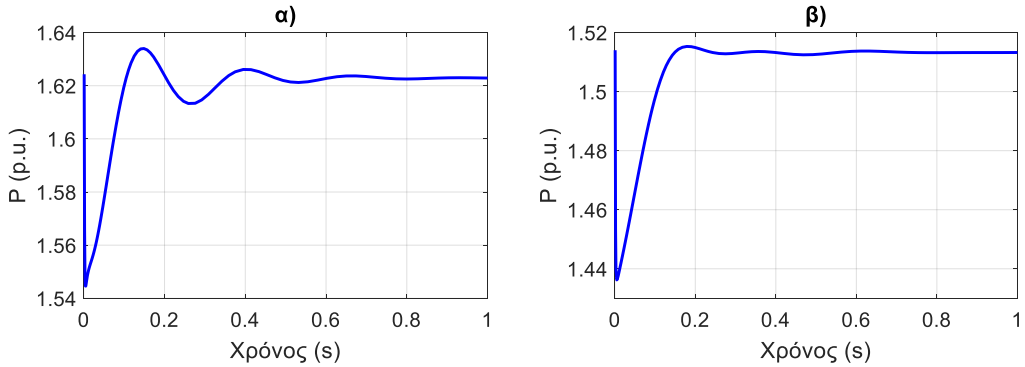
3. Περιγραφή των πειραματικών διατάξεων

Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση των διάφορων τεχνικών επεξεργασίας στην εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου φορτίου χρησιμοποιήθηκαν προσομοιώσεις δυναμικών αποκρίσεων στο πρότυπο δίκτυο IEEE 68-bus, καθώς και μετρήσεις σε μια εργαστηριακή διάταξη χαμηλής τάσης (ΧΤ) στο Πανεπιστήμιο του Strathclyde στη Γλασκώβη της Σκωτίας.

3.1 Πρότυπο δίκτυο IEEE 68-bus

Σύμφωνα με τους Kontis et al. (2018), υλοποιήθηκε στο λογισμικό NEPLAN το πρότυπο δίκτυο IEEE 68-bus, το οποίο αποτελείται από 68 ζυγούς, 16 σύγχρονες γεννήτριες, 19 μετασχηματιστές και 35 στατικά φορτία, ενώ το στατικό φορτίο του Ζυγού #39 αντικαταστάθηκε με 200 επαγωγικούς κινητήρες διαφόρων χαρακτηριστικών.

Με τη βοήθεια της μεθόδου Monte Carlo (MC) εξετάστηκαν διαφορετικές συνθέσεις φορτίου, όπου σε κάθε περίπτωση η διείσδυση κάθε τύπου κινητήρα στο ολικό φορτίο μεταβάλλεται τυχαία. Προκλήθηκαν 100 διαταραχές τάσης μέσω της αλλαγής των θέσεων του μεταγωγέα υπό φορτίο (On Load Tap Changer) του μετασχηματιστή στο Ζυγό #39, μεταξύ των ορίων -0.1 p.u. έως 0.1. p.u. Οι δυναμικές αποκρίσεις της τάσης, ενεργού και άεργου ισχύος καταγράφηκαν στο Ζυγό #39 με ρυθμό δειγματοληψίας 1000 δείγματα ανά δευτερόλεπτο (samples per second – sps) και ενδεικτικά αποτελέσματα παρατίθενται στο Σχήμα 1 για δύο χαρακτηριστικές μελέτες περίπτωσης (ΜΠ).

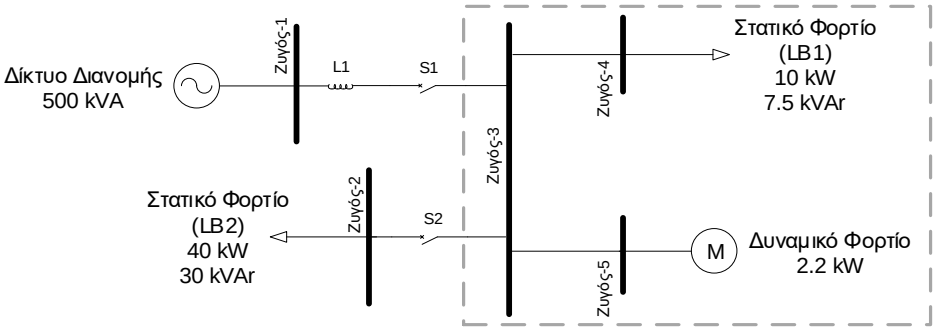


Σχήμα 1: Αντιπροσωπευτικά στιγμιότυπα από τις προσομοιώσεις MC στο δίκτυο IEEE 68-bus. Ο κύριος τύπος κινητήρων είναι α) αντλίες (ΜΠ1), β) ίδιος αριθμός από αντλίες, μικρούς και μεγάλους βιομηχανικούς κινητήρες στο μείγμα του φορτίου (ΜΠ2)

Προκειμένου να ανταποκρίνονται οι προσομοιώσεις όσο το δυνατόν σε πραγματικές μετρήσεις, προστέθηκε σε αυτές λευκός θόρυβος (white Gaussian noise), θεωρώντας διαφορετικά επίπεδα σήματος – προς – θόρυβο (signal – to – noise ratio – SNR) από 5 έως 30 dB.

3.2 Εργαστηριακή διάταξη δικτύου χαμηλής τάσης

Η εργαστηριακή διάταξη ΧΤ είναι 400 V, 50 Hz και φαίνεται στο Σχήμα 2. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε αναφέρονται από τους Papadopoulos et al. (2017).



Σχήμα 2: Τοπολογία εργαστηριακής διάταξης δικτύου ΧΤ

Το εξεταζόμενο φορτίο αποτελείται από μια συστοιχία παθητικών στοιχείων (static bank) και από έναν επαγωγικό κινητήρα, τα οποία αντίστοιχα αποτελούν το στατικό και το δυναμικό τμήμα του συγκεντρωτικού φορτίου. Η συστοιχία περιλαμβάνει 64 βαθμίδες ρύθμισης (64-step variable resistance), ενώ οι ονομαστικές τιμές του ωμικού και του επαγωγικού της τμήματος είναι 10 kW και 7,5 kVAr, αντίστοιχα. Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά του επαγωγικού κινητήρα είναι 2,2 kW, 50 Hz, 400 V, με συντελεστή ισχύος 0,87 επαγωγικό, ενώ είναι συνδεδεμένος με έναν οδηγό (drive) μεταβλητής συχνότητας.

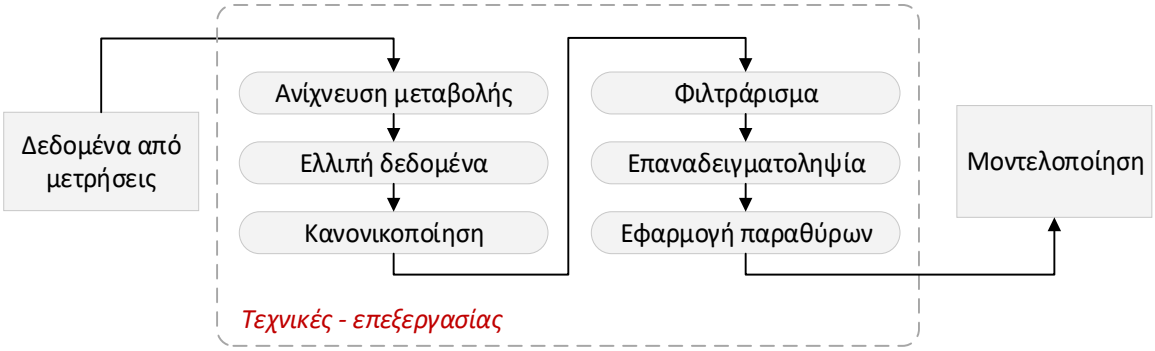
Το στατικό φορτίο (LB2) του Ζυγού #2 έχει ισχύ πολύ μεγαλύτερη του εξεταζόμενου φορτίου με ονομαστικά χαρακτηριστικά 40 kW, 30 kVAr με 256 βαθμίδες ρύθμισης. Η χρήση του έγκειται στη δημιουργία τεχνητών διαταραχών κατά τη σύνδεση του ή αποσύνδεση του από το ζυγό με αποτέλεσμα να προκαλούνται ανάλογες μεταβολές της τάσης στο ζυγό μέτρησης (Ζυγός #3) και κατ' επέκταση μεταβολές στην ενεργό και άεργο ισχύ του φορτίου. Πραγματοποιήθηκαν 29 δοκιμές, με διαφορετική σύσταση φορτίου τόσο όσον αφορά στο στατικό όσο και στο δυναμικό μέρος. Για όλες τις περιπτώσεις, το LB2 συνδέεται και αποσυνδέεται διαδοχικά τρεις φορές λαμβάνοντας τις εξής τιμές: 3020 W, 4983 W, 7097 W με συντελεστή ισχύος 1, προκαλώντας ως εκ τούτου σε κάθε δοκιμή 6 διαταραχές.

Οι μετρήσεις των αποκρίσεων τάσης, συχνότητας καθώς και της ενεργού και άεργου ισχύος καταγράφηκαν με ρυθμό δειγματοληψίας 500 δείγματα ανά δευτερόλεπτο (500 sps).

4. Προτεινόμενη μεθοδολογία επεξεργασίας δυναμικών αποκρίσεων

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία για την επεξεργασία των δυναμικών αποκρίσεων φορτίου από μετρήσεις και περιλαμβάνει διάφορες τεχνικές, των οποίων η εφαρμογή προηγείται της διαδικασίας εκτίμησης των παραμέτρων του μοντέλου φορτίου.

Στόχος των τεχνικών αυτών είναι η βελτίωση της ποιότητας των σημάτων, εξαιτίας πιθανής παραμόρφωσης από θόρυβο, υπερβολικό ή ελλιπή αριθμό δειγμάτων, κ.α. Η κάθε μια από τις τεχνικές εξετάζεται στη συνέχεια στις επιμέρους υποενότητες.



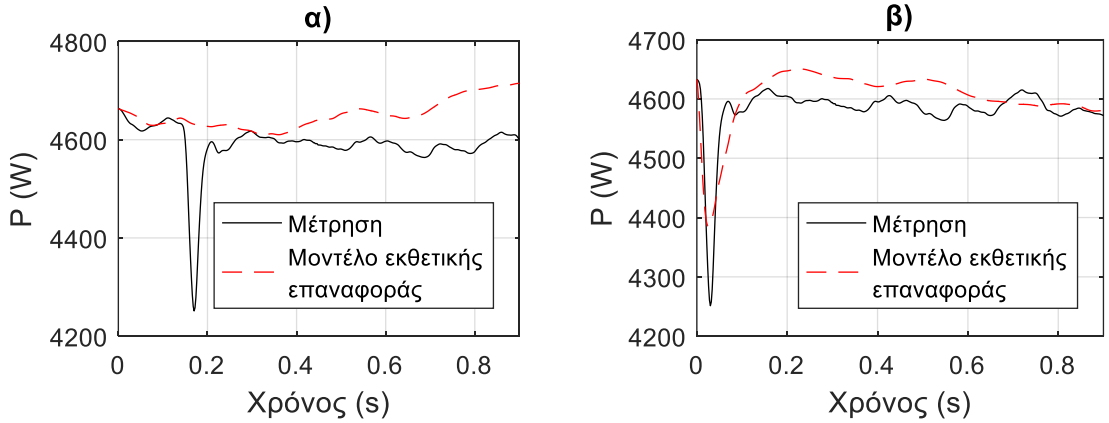
Σχήμα 3: Προτεινόμενη μεθοδολογία επεξεργασίας δυναμικών αποκρίσεων φορτίου

4.1 Ανίχνευση μεταβολής και απόκτηση δεδομένων

Το πρώτο στάδιο της προτεινόμενης διαδικασίας είναι η ανίχνευση δυναμικών αποκρίσεων κατά την εκδήλωση κάποιου συμβάντος (event detection). Σύμφωνα με τον Messina (2015) η ανίχνευση και ο χαρακτηρισμός των δυναμικών αποκρίσεων στα δεδομένα που μετρούνται είναι εν γένει μία περίπλοκη διαδικασία. Στην πράξη, ο εξωτερικός θόρυβος καθώς και ο θόρυβος που εισάγεται κατά τη μέτρηση, μπορούν να οδηγήσουν σε ψευδείς συναγερμούς και εσφαλμένες αποφάσεις λειτουργίας.

Για να εξαχθεί το αρχικό σημείο έναρξης της διαδικασίας απόκτησης των δεδομένων χρησιμοποιείται μία ρουτίνα ανίχνευσης. Η έναρξη του συμβάντος μπορεί να προσδιοριστεί παρακολουθώντας τη μεταβολή της τάσης (*dV/dt*), μέσω της οποίας ενεργοποιείται η καταγραφή των δεδομένων ισχύος για περαιτέρω επεξεργασία.

Στο Σχήμα 4 αναλύεται η διαδικασία ανίχνευσης συμβάντων κατά την εφαρμογή της σε μια απόκριση της εργαστηριακής διάταξης ΧΤ, όπου το φορτίο αποτελείται μόνο από στατικό μέρος (2.2 kW, cosφ = 1). Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4α η επιλογή μιας μικρής τιμής κατωφλίου (threshold) έναυσης της καταγραφής μέσω του όρου *dV/dt*, παρουσιάζει πολύ μεγάλη ευαισθησία στις διαταραχές, με αποτέλεσμα να οδηγεί σε αστοχία της διαδικασίας καθώς ενεργοποιείται λανθασμένα για μικρές διαταραχές. Αντίθετα, επιλέγοντας μεγαλύτερες τιμές του *dV/dt*, η διαδικασία καταγραφής των δεδομένων μπορεί να μην ενεργοποιηθεί. Έτσι, κατόπιν συστηματικής διερεύνησης, για την εξεταζόμενη εργαστηριακή διάταξη επιλέχθηκε κατώφλι έναυσης *dV/dt* ίσο με 1%. Με τον τρόπο αυτό, η καταγραφή του συμβάντος πραγματοποιείται επιτυχώς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4β, όπου συγκρίνεται η μετρούμενη δυναμική απόκριση με την αντίστοιχη προσομοίωση που προκύπτει από το μοντέλο εκθετικής επαναφοράς.

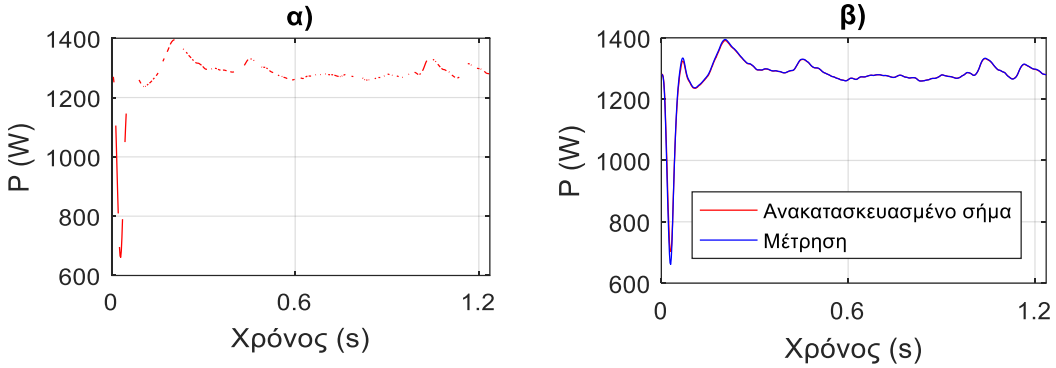


Σχήμα 4: α) Εσφαλμένη έναρξη καταγραφής δεδομένων, β) ανίχνευση δυναμικής απόκρισης

4.2 Διόρθωση κακών/ελλιπών δεδομένων

Ένα από τα σημαντικότερα στάδια της προτεινόμενης μεθοδολογίας για την επεξεργασία των μετρήσεων είναι η διόρθωση κακών/ελλιπών δεδομένων (bad/limited data). Ως τώρα, στη σχετική βιβλιογραφία δεν έχουν γίνει συστηματικές μελέτες για την ανάλυση της φύσης και την αντιμετώπιση του προβλήματος των κακών/ελλιπών δεδομένων.

Στο Σχήμα 5α παρουσιάζεται μία διαταραχή της εργαστηριακής διάταξης ΧΤ, στην οποία αφαιρέθηκε με τυχαίο τρόπο το 40% των δεδομένων. Με τη βοήθεια ενός αυτοπαλινδρομικού μοντέλου (autoregressive model) δεύτερης τάξης είναι εφικτό να αντικατασταθούν τα ελλιπή δεδομένα του σήματος, χρησιμοποιώντας εκτιμήσεις που προέρχονται από τα εναπομείναντα δεδομένα.



Σχήμα 5: α) Δυναμική απόκριση με ελλιπή δεδομένα, β) σύγκριση ανακατασκευασμένου σήματος με μέτρηση

Σε αυτή την περίπτωση, προκειμένου να εξεταστεί η αξιοπιστία του ανακατασκευασμένου σήματος πραγματοποιήθηκαν 100 προσομοιώσεις MC, όπου κάθε φορά αφαιρείται το 40% των καταγραφών με τυχαίο τρόπο ενώ για κάθε προσομοίωση υπολογίζεται το νέο σήμα χρησιμοποιώντας το προτεινόμενο αυτοπαλινδρομικό μοντέλο. Στο Σχήμα 5β παρουσιάζεται το τελικό ανακατασκευασμένο σήμα που προκύπτει λαμβάνοντας τον μέσο όρο όλων των αποκρίσεων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις MC.

Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε σε διάφορες μετρήσεις της εργαστηριακής διάταξης για διαφορετικά ποσοστά ελλιπών δεδομένων προκειμένου να μελετηθεί η αξιοπιστία της. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται ενδεικτικά για την περίπτωση της άεργου ισχύος, από τις προσομοιώσεις MC της συγκεκριμένης διαταραχής, η μέση τιμή του συντελεστή προσδιορισμού R^2, ο οποίος ορίζεται στην (3):

$$R^2 = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(y[n]-\hat{y}[n])^2}{\sum_{i=1}^{N}(y[n]-\bar{y})^2}\right)\times 100, \qquad (3)$$

όπου, $y[n]$ η πραγματική απόκριση, η $\hat{y}[n]$ εκτιμώμενη, $\bar{y}$ η μέση τιμή και N ο συνολικός αριθμός δειγμάτων.

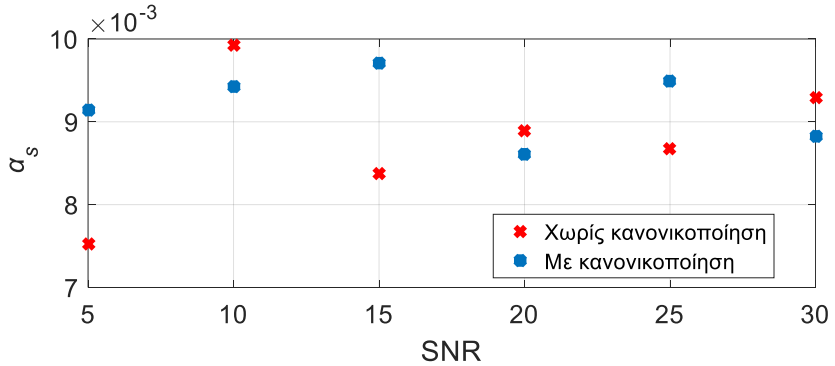
Αξίζει να σημειωθεί πως όσο αυξάνεται η τάξη του αυτοπαλινδρομικού μοντέλου τόσο το ανακατασκευασμένο σήμα τείνει να ταυτιστεί καλύτερα με τη πραγματική μέτρηση. Επίσης, για ποσοστά ελλιπών δεδομένων άνω του 60% η ακρίβεια του ανακατασκευασμένου σήματος σε σχέση με τη μέτρηση είναι μικρή. Όμως, η παραπάνω ανάλυση καταδεικνύει πως για μικρό ποσοστό ελλιπών δεδομένων αλλά και για λόγους υπολογιστικής απλότητας ένα αυτοπαλινδρομικό $2^{ης}$ τάξης κρίνεται ικανοποιητικό.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα δείκτη R^2 της άεργου ισχύος σε σχέση με το επί τοις εκατό ποσοστό κακών/ελλιπών δεδομένων της απόκρισης

Μοντέλο	(%)					
	80	60	40	30	20	10
1ης τάξης	23,64	88,24	98,65	99,61	99,77	99,98
2ης τάξης	35,09	90,31	98,43	99,40	99,77	99,94
3ης τάξης	39,85	90,50	98,26	99,51	99,76	99,95

4.3 Κανονικοποίηση μετρήσεων

Στη παρούσα υποενότητα εξετάζεται η επίδραση της τεχνικής κανονικοποίησης των μετρήσεων. Σύμφωνα με την Navarro (2002), παρόλο που οι ταυτοποιημένες παράμετροι σταθερής και μεταβατικής κατάστασης, που προέρχονται από τις πραγματικές μετρήσεις, οδηγούν σε σωστή μοντελοποίηση της διαταραχής σε κάθε περίπτωση, οι τιμές τους αποκλίνουν σε σχέση με τις αναμενόμενες. Για τον λόγο αυτό για την κανονικοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν ως βασική τιμή ισχύος και τάσης οι τιμές: S_B = 100 MVA και V_B = 21 kV, αντίστοιχα. Ως αποτέλεσμα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6 για τη ΜΠ2 του δικτύου IEEE 68-bus, οι ταυτοποιημένες παράμετροι χρησιμοποιώντας κανονικοποιημένες αποκρίσεις (normalized responses) παρουσιάζουν μικρότερη διασπορά σε σχέση με την περίπτωση που χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις χωρίς την εφαρμογή της μεθόδου κανονικοποίησης. Επίσης, για υψηλές τιμές SNR, δηλαδή για χαμηλά επίπεδα θορύβου, οι διαφορές των ταυτοποιημένων παραμέτρων για τις δύο περιπτώσεις (εφαρμογή-μη εφαρμογή κανονικοποίησης) δεν είναι μεγάλες. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως για την στατιστική αξιολόγηση της ακρίβειας της εκτίμησης του μοντέλου φορτίου πραγματοποιήθηκαν 100 προσομοιώσεις MC για κάθε διαφορετικό επίπεδο SNR.

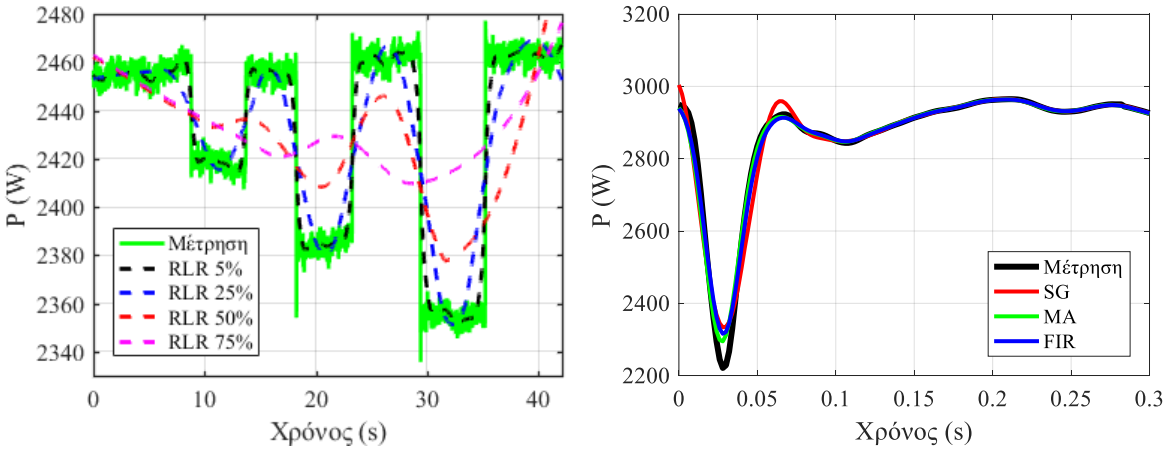


Σχήμα 6: Ταυτοποιημένες τιμές της παραμέτρου α_s για διαφορετικά επίπεδα SNR

4.4 Φιλτράρισμα αποκρίσεων

Προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα των μετρήσεων, δηλαδή να αυξηθεί το επίπεδο SNR, όπως έχει προταθεί από τους Papadopoulos et al. (2017), εξετάστηκαν τέσσερις μέθοδοι φιλτραρίσματος: α) η εφαρμογή ενός χαμηλοπερατού Finite Impulse Response (FIR) φίλτρου, β) το φίλτρο Savitzky – Golay (SG), γ) η εύρωστη τοπική παλινδρόμηση (robust local regression - RLR) και δ) το φίλτρο κινητού μέσου όρου (moving average - MA). Η αποδοτικότητα των μεθόδων αξιολογείται σύμφωνα με τη διατήρηση της αιχμηρότητας (sharpness) και της ομαλότητας (smoothness) του σήματος.

Στο Σχήμα 7α παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο από τις διαθέσιμες αποκρίσεις ενεργού ισχύος της εργαστηριακής διάταξης, εφαρμόζοντας το φίλτρο RLR, θεωρώντας διαφορετικά μεγέθη παραθύρων, εκφρασμένα ως ποσοστό του συνολικού αριθμού των καταγεγραμμένων δεδομένων. Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε προέκυψε πως η μέθοδος RLR μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά μόνο όταν λαμβάνονται υπόψιν μεγάλα παράθυρα δεδομένων. Επομένως, η χρήση τους περιορίζεται για εφαρμογές μόνιμης κατάστασης ή/και για αργές μεταβολές φορτίου.



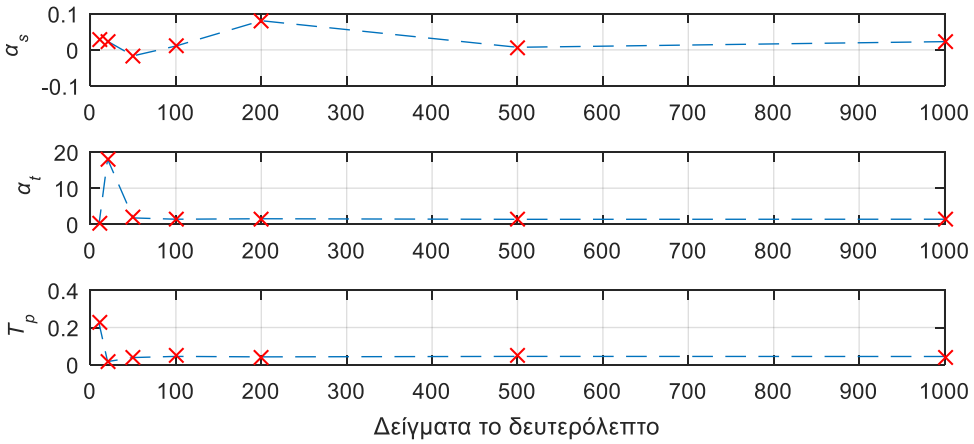
Σχήμα 7: α) Φιλτράρισμα μετρήσεων με τη μέθοδο RLR θεωρώντας διαφορετικά μεγέθη παραθύρων, β) σύγκριση μεθόδων Savitzky – Golay, Moving Average και FIR κατωπερατού φίλτρου

Αντίθετα, στο Σχήμα 7β φαίνεται πως οι υπόλοιπες τρείς μέθοδοι βελτιώνουν ικανοποιητικά τη δυναμική απόκριση. Από τις μεθόδους που εξετάστηκαν, προτείνεται η εξάλειψη του θορύβου με χρήση χαμηλοπερατού FIR φίλτρου, διότι οι παράμετροι του φίλτρου μπορούν να προσδιοριστούν ευκολότερα, καθώς η συχνότητα αποκοπής του μπορεί να εκτιμηθεί με την ανάλυση του φάσματος του σήματος και στη συνέχεια, ανάλογα με την εφαρμογή, να προσδιοριστεί η τάξη του φίλτρου.

4.5 Επαναδειγματοληψία σήματος

Με την εφαρμογή της επαναδειγματοληψίας (resampling) στο σήμα, ο αρχικός ρυθμός δειγματοληψίας μπορεί να μειωθεί (down – sampling) ή να αυξηθεί (up – sampling/interpolation). Για να αξιολογηθεί η σημασία της εφαρμογής της τεχνικής επαναδειγματοληψίας στην ακρίβεια της μοντελοποίησης του φορτίου, θεωρήθηκε η ΜΠ1 του IEEE 68-bus σε διαφορετικά επίπεδα θορύβου, όπου για κάθε επίπεδο θορύβου εξετάστηκαν 100 προσομοιώσεις MC. Συγκεκριμένα, καθώς ο αρχικός ρυθμός δειγματοληψίας είναι ήδη υψηλός (1000 sps) σε σχέση με την ικανότητα μέτρησης των σύγχρονων μετρητικών οργάνων, μελετήθηκαν μικρότεροι ρυθμοί δειγματοληψίας από 10 έως 500 sps.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8, υψηλοί ρυθμοί δειγματοληψίας δεν επιφέρουν σημαντική μεταβολή στις τιμές των ταυτοποιημένων παραμέτρων του μοντέλου φορτίου. Ως εκ τούτου, ικανοποιητική ακρίβεια στον καθορισμό των παραμέτρων του δυναμικού μοντέλου φορτίου μπορεί να επιτευχθεί για ρυθμούς δειγματοληψίας 50 με 100 sps.



Σχήμα 8: Τιμές παραμέτρων ενεργού ισχύος της ΜΠ1 για διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας και για λόγο SNR 5 dB

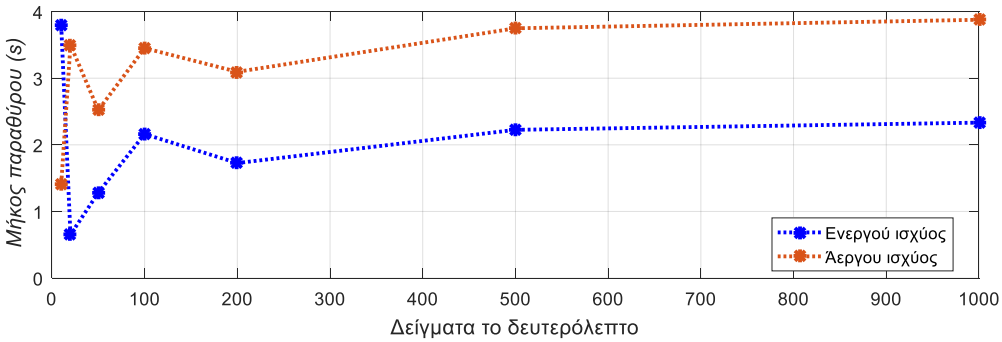
4.6 Εφαρμογή παραθύρων

Τέλος, καθώς έχει καθοριστεί ο ρυθμός δειγματοληψίας, εξετάζεται η επιλογή του βέλτιστου μήκους του παραθύρου σήματος (windowing), με την οποία απορρίπτονται δεδομένα τα οποία πιθανώς δεν συμβάλουν στη βελτίωση της ακρίβειας του μοντέλου, π.χ. δεδομένα στη νέα μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Το μικρότερο απαιτούμενο παράθυρο για την επεξεργασία της απόκρισης καθορίζεται μέσω μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας, η οποία διακόπτεται όταν η μεταβολή του δείκτη αξιολόγησης του μέσου απολύτου ποσοστού σφάλματος (mean absolute percentage error – MAPE) του εκτιμώμενου σήματος με την αντίστοιχη μέτρηση ξεπεράσει μία τιμή ανοχής, ήτοι 10^{-3}. Το μέσο απόλυτο ποσοστό σφάλματος ορίζεται στην (4).

Η διαδικασία περιγράφεται ως εξής: αρχικά και για δεδομένο ρυθμό δειγματοληψίας, υπολογίζονται από το καταγεγραμμένο σήμα οι σταθερές χρόνου T_p και T_q, του μοντέλου εκθετικής επαναφοράς. Στη συνέχεια, θεωρούνται παράθυρα σήματος με μήκος πολλαπλάσια των σταθερών χρόνου, δηλ. $2 \cdot Tp$ και $2 \cdot Tq$ κτλ., για την ενεργό και άεργο ισχύ, αντίστοιχα. Όταν η μεταβολή του όρου MAPE τόσο της απόκρισης της ενεργού όσο και της άεργου ισχύος είναι μικρότερη της επιλεγμένης τιμής ανοχής, τότε η διαδικασία διακόπτεται.

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{n=1}^{N} \left| \frac{(y[n] - \hat{y}[n])}{y[n]} \right|, \tag{4}$$



Σχήμα 9: Βέλτιστο μήκος παραθύρου για διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται σε δευτερόλεπτα το βέλτιστο μήκος του παραθύρου για διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας της απόκρισης για την ΜΠ1, θεωρώντας SNR ίσο με 5 dB. Αξίζει να αναφερθεί, πως το αρχικό μήκος της καταγεγραμμένης απόκρισης είναι 10 s. Επίσης, οι τιμές των παραμέτρων T_p και T_q για τον αρχικό ρυθμό δειγματοληψίας (1000 sps) είναι 0,044 s και 0,073 s, αντίστοιχα. Από την ανάλυση προκύπτει πως αφού προσδιοριστεί ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι δυνατόν να καθοριστεί ο ελάχιστος αριθμός δειγμάτων που είναι αναγκαίος για την ακριβή μοντελοποίηση της δυναμικής απόκρισης.

5. Συμπεράσματα – Πρόταση

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη παρούσα έρευνα είναι τα εξής:

- Η λανθασμένη ανίχνευση δυναμικών αποκρίσεων μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες αποφάσεις λειτουργίας.
- Για την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου από ελλιπή δεδομένα μετρήσεων, η συμπλήρωση μη διαθέσιμων τιμών με εκτιμώμενες δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν οι μη διαθέσιμες τιμές δεν ξεπερνούν το 60% του συνολικού αριθμού των δειγμάτων.
- Με την εφαρμογή της τεχνικής της κανονικοποίησης οι τιμές των ταυτοποιημένων παραμέτρων του μοντέλου εμφανίζουν μικρότερη μεταβλητότητα.
- Έχοντας ως κριτήριο την αιχμηρότητα και την ομαλότητα των αποκρίσεων εφαρμόζοντας τις τεχνικές φιλτραρίσματος που εξετάστηκαν, η χρήση του χαμηλοπερατού φίλτρου FIR κρίνεται ως η καταλληλότερη.
- Με τη βοήθεια της προτεινόμενης τεχνικής καθορισμού του μήκους του παραθύρου σήματος για δεδομένο ρυθμό δειγματοληψίας, μπορεί να επιτευχθεί ο ελάχιστος αριθμός δειγμάτων που είναι απαραίτητος για την ακριβή μοντελοποίηση της δυναμικής απόκρισης.

Ως πρόταση για περαιτέρω έρευνα προτείνεται να εξεταστούν διεξοδικότερα οι περιορισμοί και τα προβλήματα που εισάγονται από τις υφιστάμενες μετρητικές υποδομές όπως π.χ. η απώλεια επικοινωνίας των μονάδων μέτρησης (PMUs κτλ.) ή η αποστολή δεδομένων από τα διάφορα κανάλια των PMUs με διαφορετικούς ρυθμούς αναφοράς (reporting rate) και διαφορετική καθυστέρηση (latency).

6. Βιβλιογραφία

CIGRE WG C4.605 Report, "*Modelling and aggregation of loads in flexible power networks*", 2013.

Hasan Kazi N., Milanović Jovica V., Turner Paul, Turnham Victoria, "*A Step – by – Step Data Processing Guideline for Load Model Development Based on Field Measurements*", IEEE Eindhoven PowerTech, 2015, Eindhoven, The Netherlands.

Karlsson D., Hill D. J., "*Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems*", IEEE Trans. Power Syst., vol.9, no.1, pp. 157-166, 1994.

Kontis E. O., Papadopoulos T. A., Chrysochos A. I., Papagiannis G. K., "*Measurement – Based Dynamic Load Modeling Using the Vector Fitting Technique*", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no. 1, pp. 338 – 351, Jan. 2018.

Messina Arturo Roman, "*Wide – Area Monitoring of Interconnected Power Systems*", The Institution of Engineering and Technology, IET Power and Energy Seriers 77, 2015.

Navarro I. R., "*Dynamic load models for power systems*", Ph.D. dissertation, Dept. Ind. Elect. Eng. Autom., Lund Univ., Lund, Sweden, 2002.

Papadopoulos T. A., Barzegkar - Ntovom G. A., Nikolaidis V. C., Papadopoulos P. N., Burt G. M., "*Online parameter identification and generic modeling derivation of a dynamic load model in distribution grids*", 12th IEEE Power and Energy Society, PowerTech Conference, 2017, Manchester.