



UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI

ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ



REZUMAT EXTINS TEZĂ DE DOCTORAT

Metode Electrotehnice în monitorizarea sistemelor de conversie a energiei

Doctorand:

Ing. Ionuț – Marius MÎNDREANU

Conducător științific:

Prof. Dr. Ing. Alexandru–Mihail MOREGA

BUCUREȘTI
2025

Cuprins

1. Capitolul 1 – Aspecte teoretice de bază	4
1.1. Prezentarea temei de doctorat	4
1.2. Scopul tezei de doctorat	4
1.3. Conținutul tezei de doctorat	5
2. Capitolul 2 – Rețele electrice și regimuri de funcționare	6
2.1. Rețele electrice.....	6
2.1.1. Producerea, transportul, distribuția și utilizarea energiei electrice	6
2.1.2. Perturbații și nesimetrii	6
2.2. Transferul de putere în rețelele electrice	7
2.2.1. Definiția factorului de putere	7
2.2.2. Metode de optimizare a factorului de putere	7
3. Capitolul 3 – Monitorizarea fluxului de putere în sistemele de consum ale utilizatorului final	8
3.1. Măsurarea fluxului de putere	8
3.2. Cazuri studiate – măsurători, rezultate și discuții	8
3.2.1. Perturbări în rețeaua electrică pentru un consumator de tip clădire de birouri	8
3.2.2. Perturbări în rețeaua electrică pentru un consumator de tip complex rezidențial	9
4. Capitolul 4 – Evaluarea experimentală a efectelor dezechilibrului în rețele trifazate fără conductor neutru	10
4.1. Circuite experimentale	10
4.2. Cazuri studiate – măsurători, rezultate și discuții	10
4.2.1. Circuit experimental A	10
4.2.2. Circuit experimental B	11
5. Capitolul 5 – Platformă de laborator pentru demonstrarea teoriei puterii Țugulea aplicată pe modele de rețea cu conductor neutru	12
5.1. Circuite experimentale	12
5.2. Cazuri studiate – măsurători, rezultate și discuții	12
5.2.1. Circuit experimental A	13
5.2.2. Circuit experimental B	13
5.2.3. Simulare software	13
6. Capitolul 6 - Concluzii generale, contribuții personale și originale, perspective	15

6.1. Rezultate obținute	16
6.2. Contribuții originale	16
6.3. Lista lucrărilor publicate	17
6.4. Perspective	17
Bibliografie selectivă.....	18

Capitolul 1 - Aspecte teoretice de bază

Introducere

Sistemul electroenergetic (SEE) cuprinde instalații interconectate pentru producerea, transportul, distribuția și utilizarea energiei electrice, fiind esențial pentru economia modernă. Înțelegerea acestora progresează prin formularea legilor care descriu fenomenele naturale, iar măsurătorile precise sunt fundamentale pentru analiza acestora. Măsurarea corectă a mărimilor electrice este esențială în rețelele electrice, utilizând aparate de măsură care pot fi conectate direct sau indirect, în funcție de tensiunea electrică la care urmează a se efectua măsurarea electrică. Transformatoarele de măsură permit obținerea unor valori precise în rețelele de medie și înaltă tensiune, ajustând măsurătorile conform rapoartelor de transformare.

1.1 Prezentarea temei de doctorat

În cadrul tezei a fost verificată integral teoria componentelor puterilor de nesimetrie și reziduale (teoria acad. Andrei Țugulea), având în vedere că autorul acesteia a reușit verificarea experimentală a teoriei doar sub aspectul conservării puterilor de nesimetrie, puterile reziduale având ordinul de mărime comparabil cu clasa de exactitate a aparatelor de măsură. Deci, verificarea bilanțurilor puterilor reziduale nu s-a putut realiza de o manieră concludentă, așa cum rezultă din lucrarea „Criteria for the definition of the electric power quality and its measurement systems” de A. Țugulea, ETEP 1996 (<https://doi.org/10.1002/etep.4450060518>) [12]. În prezenta teză de doctorat, gradul de nelinearitate al consumatorilor utilizați a permis punerea în evidență a circulației de puteri reziduale active și reactive, prin verificarea bilanțurilor de puteri corespunzătoare acestora. Mai mult, s-a verificat practic ipoteza demonstrată teoretic, potrivit căreia receptoarele „mai deformante” sunt la originea generării puterilor reziduale, acestea fiind absorbite de receptoarele presupus a fi „lineare” și/sau „mai puțin deformante”.

Teza explorează în detaliu teoriile existente privind calculul puterii reactive, comparând modelele lui Fryze și Budeanu, și adresează provocările asociate cu aceste teorii în contextul rețelelor electrice moderne. De asemenea, sunt investigate metodele de măsurare a puterii și energiei electrice în rețele complexe, inclusiv prin aplicarea transformatoarelor de măsură și analiza echilibrului între componentele simetrice și nesimetrice ale fluxurilor de putere. Scopul principal este de a oferi soluții inovative care să îmbunătățească eficiența și fiabilitatea sistemelor electrice de conversie a energiei, prin utilizarea unor tehnici avansate de monitorizare și control al fluxurilor de putere.

1.2 Scopul tezei de doctorat

Scopul principal al tezei de doctorat este dezvoltarea și validarea unor metode avansate de monitorizare a fluxurilor de putere în rețelele electrice complexe, cu un accent deosebit pe analiza și optimizarea gestionării energiei în condiții de sarcini nelineare și dezechilibrate. Teza își propune să contribuie la îmbunătățirea acurateții măsurătorilor electrice prin compararea teoriilor existente, precum cele ale lui Fryze și Budeanu, și prin aplicarea teoriei puterii Țugulea, validând-o atât experimental, cât și prin simulări numerice. Această abordare integrată permite o mai bună înțelegere a comportamentului rețelelor electrice și a influenței componentelor simetrice și nesimetrice asupra fluxurilor de putere.

1.3 Conținutul tezei de doctorat

Teza de doctorat se structurează pe mai multe capitole esențiale, începând cu o cercetare bibliografică detaliată privind studiile și teoriile existente în domeniul monitorizării fluxurilor de putere în rețele electrice. În continuare, sunt prezentate perturbările care apar frecvent în rețelele electrice, accentuând impactul acestora asupra performanței și stabilității sistemului.

Un alt punct central al tezei este analiza teoriilor de calcul pentru puterea reactivă, cu o comparație între modelele lui Fryze și Budeanu. Ulterior, se trece la demonstrarea teoretică și experimentală a puterii Tugulea, unde este verificat bilantul de puteri într-o rețea, indiferent de perturbările care pot apărea. Aceste verificări confirmă validitatea teoriei, dar și complexitatea și dificultățile întâmpinate în analiza rețelelor perturbate.

Capitolul 2 - Rețele electrice și regimuri de funcționare

Sistemele energetice au evoluat semnificativ de-a lungul timpului, cu transformări tehnice și economice esențiale, iar funcționarea acestora este reglementată de legile fizicii. Rețelele electrice, clasificate în rețele de înaltă și joasă tensiune, au roluri specifice în infrastructura energetică și necesită strategii adecvate pentru a asigura continuitatea și calitatea energiei furnizate.

Dezvoltarea generării distribuite și a microrețelelor a schimbat structura tradițională a rețelelor de distribuție, permitând producția locală de energie, dar și creând noi provocări pentru stabilitatea rețelei. Aceste modificări necesită soluții avansate de monitorizare și control pentru a gestiona fluctuațiile surselor regenerabile și a îmbunătăți eficiența și stabilitatea rețelelor electrice.

2.1. Rețelele electrice

Rețelele electrice sunt sisteme complexe care asigură producerea, transportul, distribuția și utilizarea energiei electrice, având rolul esențial de a livra energia de la sursele de producție către consumatorii finali. Calitatea energiei electrice livrate este monitorizată printr-o serie de indicatori, precum tensiunea, frecvența, factorul de putere și distorsiunile armonice, care trebuie să respecte standardele stabilite pentru a garanta performanța și siguranța echipamentelor electrice ale utilizatorilor.

2.1.1. Producerea, transportul, distribuția și utilizarea energiei electrice

Necesarul de energie electrică al consumatorilor este asigurat de generatoarele de producere, care reglează continuu puterea activă și frecvența pentru a răspunde cerințelor fluctuante ale rețelei, menținând astfel o tensiune stabilă și o formă sinusoidală. Transferul energiei către consumatori se realizează prin stațiile de transformare și liniile electrice aeriene, care sunt concepute pentru a asigura continuitatea alimentării și pentru a preveni defecțiunile, chiar și în condiții de solicitări extreme ale rețelei.

Rețelele electrice sunt proiectate pentru a funcționa în buclă, asigurând o rezervă de energie pentru a proteja consumatorii în caz de defecțiune. Însă, apariția consumatorilor perturbatori, cum ar fi cei cu elemente neliniare sau dezechilibrate, poate influența negativ stabilitatea și calitatea livrării energiei electrice, creând fluctuații de tensiune și instabilități care trebuie gestionate prin soluții avansate de protecție și reglaj.

2.1.2. Perturbații și nesimetrii

Interferența electromagnetică reprezintă orice fenomen care poate afecta funcționarea echipamentelor electrice, poate perturba calitatea energiei electrice sau poate influența sănătatea organismelor vii. Aceste perturbări pot fi de diferite tipuri, cum ar fi semnalele de joasă frecvență, care se propagă prin conductoare, sau semnalele de înaltă frecvență, care se propagă prin aer. Ele pot include fenomenul de „flicker”, armonici, fluctuații de tensiune, căderi de tensiune sau chiar perturbări cauzate de trăsnete sau defecte ale echipamentelor de rețea. Aceste interferențe pot afecta nu doar fiabilitatea echipamentelor și stabilitatea rețelelor, dar și confortul utilizatorilor, generând disconfort fiziologic sau defecțiuni ale aparatelor electronice.

În plus, perturbările electromagnetice pot avea un impact semnificativ asupra calității serviciului de furnizare a energiei electrice. Parametrii de calitate, cum ar fi frecvența, amplitudinea tensiunii, supratensiunile tranzitorii și golurile de tensiune, sunt esențiali pentru menținerea unui sistem stabil și fiabil. Aceste interferențe pot fi cauzate de echipamente cu sarcini neliniare, dezechilibre de tensiune sau fluctuații rapide de tensiune din cauza echipamentelor industriale sau de sudură. Monitorizarea și controlul acestor perturbări sunt esențiale pentru asigurarea unei alimentări de calitate și prevenirea avariilor grave în rețelele electrice.

2.2. Transferul de putere în rețelele electrice

Monitorizarea factorului de putere este esențială pentru optimizarea performanței operatorilor energetici și pentru reducerea pierderilor de energie în rețea, iar gestionarea acestuia devine o prioritate, deoarece un factor de putere scăzut poate afecta stabilitatea rețelei și poate duce la penalizări financiare pentru consumatorii care generează pierderi adiționale.

2.2.1. Definirea factorului de putere

Factorul de putere (PF) reprezintă raportul dintre puterea activă și puterea aparentă într-un sistem electric, fiind un parametru esențial pentru evaluarea eficienței energetice. Un PF apropiat de 1 indică faptul că majoritatea energiei furnizate este transformată în energie utilă (activă), iar pierderile de energie reactivă sunt minime, ceea ce duce la o utilizare eficientă a energiei electrice. Acesta poate varia în funcție de forma undei (sinusoidală sau nesinusoidală) și de tipul sistemului (monofazat, trifazat, simetric sau nesimetric), iar gestionarea corectă a acestuia este importantă pentru menținerea unui sistem energetic stabil și eficient.

Un factor de putere scăzut indică faptul că doar o parte din energia furnizată este utilizată efectiv, restul fiind pierdut sub formă de energie reactivă. Aceste pierderi nu doar că reduc eficiența energetică, dar pot duce și la suprasolicitarea echipamentelor din rețea, crescând riscurile de defecțiuni și costurile operaționale.

2.2.2. Metode de optimizare a factorului de putere

Pentru îmbunătățirea factorului de putere, sunt necesare două abordări principale: analiza separată a puterii reactive și a regimului deformant al curentului, precum și analiza simultană a acestora. În prima abordare, se limitează distorsiunile curentului prin filtre pasive și se compensează puterea reactivă, iar în a doua abordare se utilizează filtre active pentru a corecta atât distorsiunile cât și defazajul curentului, obținând astfel o compensare unificată și o performanță mai bună a rețelei.

Capitolul 3 – Monitorizarea fluxului de putere în sistemele de consum ale utilizatorului final

3.1. Măsurarea fluxului de putere

Teoriile lui Budeanu și Fryze reprezintă două abordări fundamentale în analiza puterii reactive, fiecare având contribuții semnificative și limitări. Teoria lui Budeanu, deși influentă în definirea puterii reactive, a fost criticată pentru interpretarea incompletă a fenomenelor de putere, iar teoria lui Fryze a adus o înțelegere mai profundă prin descompunerea curentului în componente ortogonale. Totuși, ideea lui Fryze de a explica proprietățile puterii doar în domeniul timpului a fost abandonată, iar studiile au evidențiat atât avantajele, cât și limitările celor două teorii, în funcție de tipul de circuit și condițiile de operare.

În analiza circuitelor cu tensiuni și curenți nesinusoidali, teoriile lui Budeanu și Fryze oferă valori diferite ale puterii reactive, subliniind importanța unei definiții precise a puterii reactive în astfel de condiții. Diferențele între aceste valori reflectă limitările fiecărei teorii în aplicarea practică, iar perturbările din rețea și influențele consumatorilor pot afecta semnificativ măsurătorile puterii reactive. Teoriile respective sunt utilizate în mod diferit în funcție de cerințele de analiză și de tehnologiile aplicate pentru compensarea factorului de putere.

3.2. Cazuri studiate – măsurători, rezultate și discuții

Pentru a analiza impactul consumatorilor asupra calității puterii, au fost efectuate măsurători în teren pe două categorii distincte de consumatori, iar rezultatele obținute au fost comparate folosind teoriile lui Budeanu și Fryze. Echipamentul folosit pentru măsurători a fost un aparat de măsurare Checkmeter 2.3 genX, un dispozitiv portabil trifazat utilizat pentru calibrarea echipamentelor de măsurare și pentru obținerea unor măsurători precise ale tensiunii, curentului și puterii.

3.2.1. Perturbări în rețeaua electrică pentru un consumator de tip clădire de birouri

Un consumator de energie electrică de tip clădire de birouri este compus dintr-o varietate de echipamente electronice esențiale pentru desfășurarea activităților zilnice, cum ar fi calculatoare, imprimante și sisteme de iluminat. Aceste dispozitive sunt interconectate pentru a crea un mediu de lucru optim, iar consumul total de energie variază în funcție de numărul de echipamente utilizate și de tipul activităților desfășurate. În cadrul experimentului, s-a observat un spectru de armonici mult mai pronunțat, iar curentul pe a doua fază a fost cel mai afectat de distorsiuni, ceea ce indică o nesimetrie a consumului de energie. Factorul de distorsiune ridicat și prezența interarmonicilor sugerează o perturbare semnificativă a calității energiei electrice, cauzată de diverse echipamente electrice, precum calorifere electrice și aer condiționat.

3.2.2. Perturbări în rețeaua electrică pentru un consumator de tip complex rezidențial

Măsurătorile realizate în apropierea stației de transformare din complexul rezidențial au indicat o putere maximă simultană absorbită din rețeaua de distribuție de 99 kW, cu un comportament predominant inductiv al puterii reactive. Analizând spectrul armonic, s-a observat o prezență mult mai mare a inter-harmonicilor în comparație cu prima situație, sugerând că distribuitorul injectează intenționat inter-harmonici pentru a controla echipamentele din stația de transformare. Aceste inter-harmonici pot fi, de asemenea, generate de perturbările provocate de consumatorii din zonă. Un dispozitiv de măsurare a fost instalat la punctul de delimitare între client și distribuitor, asigurând o evaluare precisă a energiei utilizate. Analizând impactul consumatorilor asupra distorsiunii formelor de undă ale curentului și tensiunii, s-a constatat că echipamentele rezidențiale, cum ar fi electrocasnicele, au un impact mai redus asupra calității energiei electrice comparativ cu cele din mediul comercial. Totuși, monitorizarea atentă rămâne crucială pentru optimizarea consumului de energie și prevenirea fluctuațiilor de putere care ar putea afecta stabilitatea rețelei electrice.

Capitolul 4 – Evaluarea experimentală a efectelor dezechilibrului în rețele trifazate fără conductor neutru

În ultimii ani, echipamentele electronice de putere și sursele de energie alternativă au introdus noi provocări în gestionarea rețelelor electrice, punând presiune pe sistem din cauza dezechilibrelor și distorsiunilor armonice. Aceste regimuri dezechilibrate afectează eficiența energetică și stabilitatea rețelelor, provocând pierderi semnificative de energie.

Acest raport aplică teoria puterii Țugulea pe o platformă experimentală pentru a evalua impactul dezechilibrelor de fază și al neliniarității asupra rețelelor trifazate. Teoria permite separarea puterii active, reactive și de distorsiune, oferind o facturare corectă a energiei. Studiul contribuie la îmbunătățirea gestionării și eficienței energetice în fața noilor provocări tehnologice.

4.1. Circuite experimentale

Au fost propuse două modele pentru simularea fluxului de putere într-un circuit trifazat, cu scopul de a analiza comportamentul rețelelor electrice perturbate de componente neliniare. Circuit experimental A include un circuit experimental fără conductor neutru, cu un element neliniar pe prima fază a consumatorului perturbator unu și pe a treia fază a consumatorului perturbator doi, elementele neliniare fiind similare, dar cu unghiuri de conducție diferite. Acest model permite evidențierea distorsiunii inegale în curenți și tensiuni, aspecte esențiale pentru analiza dezechilibrelor și a fenomenelor de putere circulantă în rețeaua trifazată.

În circuit experimental B, configurația circuitului experimental este ușor modificată pentru a introduce mai multe elemente neliniare, două pe fazele 1 și 2 ale consumatorului perturbator unu și condensatori de valori diferite pe faza 3, în paralel. Pentru consumatorul echilibrat, sunt montați trei condensatori identici pe fiecare fază, eliminând astfel distorsiunile induse de elementele neliniare. Acest model oferă o complexitate suplimentară rețelei electrice și permite observarea mai detaliată a impactului acestora asupra stabilității și eficienței alimentării, cu scopul de a înțelege mai bine cum fluctuațiile de putere pot afecta performanța generală a sistemului.

4.2. Cazuri studiate – măsurători, rezultate și discuții

Experimentele au implicat utilizarea a patru analizatoare de rețea Janitza UMG 509-PRO pentru achiziționarea simultană a formelor de undă ale tensiunii și curentului în diferite puncte ale rețelei. De asemenea, pentru capturi de ecran ale formelor de undă și histogramelor corespunzătoare conținutului armonic, s-a folosit un analizator Chauvin Arnoux C.A 8336, care este utilizat pentru monitorizarea și analiza calității energiei electrice.

4.2.1. Circuit experimental A

Determinările măsurătorilor se realizează în trei puncte-cheie ale circuitului experimental. Aceste puncte includ bornele de conectare ale circuitului experimental, bornele

de conectare ale consumatorului perturbator unu și bornele de conectare ale consumatorului perturbator doi. Fiecare dintre aceste achiziții este esențială pentru analiza fluxurilor de putere într-un sistem trifazat, iar efectele perturbatoare ale consumatorilor neliniari sunt urmărite prin măsurători precise la fiecare punct de conectare.

Achizițiile de date, realizate succesiv la aceste puncte de măsurare, permit analiza detaliată a formei de undă a curentului și tensiunii, precum și a distorsiunilor armonice introduse de consumatorii neliniari. De exemplu, în prima achiziție, formele de undă ale curenților și tensiunilor măsurate la bornele circuitului experimental arată distorsiuni semnificative, mai ales în fazele 1 și 3, unde sunt amplasate elemente neliniare. Aceste distorsiuni sunt cuantificate prin indicatori precum distorsiunea armonică totală (THD), care are valori mai ridicate în fazele influențate de consumatorii neliniari. Aceste observații sugerează un impact considerabil asupra calității energiei electrice și eficienței sistemului, indicând necesitatea unor măsuri de filtrare sau corecție pentru reducerea acestor distorsiuni.

4.2.2. Circuit experimental B

În cadrul celui de-al doilea experiment, unde mai multe elemente neliniare sunt integrate pe fazele unu și doi ale consumatorului distorsionant unu, se observă o creștere semnificativă a distorsiunii formelor de undă, atât pentru curenți cât și pentru tensiuni. Valorile distorsiunii armonice totale (THD) sunt mult mai ridicate comparativ cu primul model, ceea ce subliniază impactul major al acestor elemente neliniare asupra circuitului. Parametrii de circuit – rezistențele și inductanțele – sunt diferite de cele ale consumatorului echilibrat, ceea ce permite observarea influenței acestora asupra comportamentului global al sistemului.

Achiziția datelor se face în trei puncte esențiale: la bornele circuitului experimental, la consumatorul perturbator unu (cu elementele neliniare) și la consumatorul echilibrat, care conține doar elemente liniare. Analiza distorsiunii armonice totale arată o intensificare a distorsiunii pe fazele unu și trei comparativ cu modelul anterior, iar acest lucru este în concordanță cu valorile ridicate de THD. Diferențele observate între formele de undă ale curenților și tensiunilor reflectă impactul substanțial al elementelor neliniare asupra calității energiei distribuite în rețea.

Capitolul 5 – Platformă de laborator pentru demonstrarea teoriei puterii Țugulea aplicată pe modele de rețea cu conductor neutru

Regimurile nesimetrice și distorsionate reprezintă provocări majore pentru eficiența energetică și stabilitatea sistemelor electrice. Dezechilibrele între faze și distorsiunile armonice pot conduce la pierderi considerabile de energie și pot pune o presiune suplimentară asupra echipamentelor din rețelele electrice. Astfel, gestionarea acestor regimuri devine esențială pentru asigurarea unei alimentări stabile și fiabile a consumatorilor, reducând impactul negativ al acestora asupra performanței globale a sistemelor electrice. Prin urmare, studierea acestor efecte devine crucială în vederea optimizării designului și operării rețelelor electrice moderne, pentru a preveni pierderile energetice și a îmbunătăți calitatea energiei furnizate.

Această lucrare își propune să exploreze impactul regimurilor deformante și nesimetrice asupra eficienței energetice printr-un circuit experimental. Folosind un fir neutru în configurația circuitului, se poate evalua cu precizie influența dezechilibrelor și distorsiunilor asupra sistemului, având în vedere rolul său în stabilizarea tensiunilor și reducerea efectelor adverse. Experimentul urmărește să evidențieze cum elementele neliniare și distorsiunile armonice influențează transferul de putere activă și reactivă, creând pierderi suplimentare și perturbând funcționarea stabilă a rețelelor electrice. Aceste observații vor contribui la o înțelegere aprofundată a modului în care regimurile nesimetrice și deformante afectează sistemele electrice, oferind perspective valoroase pentru îmbunătățirea gestionării energiei în infrastructurile electrice.

5.1. Circuite experimentale

În cadrul studiului privind importanța conductorului de nul într-un circuit cu sarcini electrice dezechilibrate și elemente neliniare, au fost propuse două modele experimentale distincte pentru a analiza comportamentul acestuia sub diverse condiții. În circuit experimental A, un consumator perturbator are instalate două elemente neliniare pe fazele unu și doi, în timp ce pe faza trei sunt montate condensatoare în paralel. Cel de-al doilea consumator este echilibrat, fără elemente neliniare, ceea ce pune în evidență circulația puterii electrice între consumatori din cauza dezechilibrului și armonicilor generate de elementele neliniare.

Circuit experimental B se concentrează pe două consumatori distorsionați, amândoi având elemente neliniare care introduc dezechilibre și armonici de ordin superior. Un element neliniar este montat pe prima fază a primului consumator, iar altul pe a treia fază a celui de-al doilea consumator, cu condensatoare adăugate pe faza trei a primului consumator și o bobină pe faza doi. Ambele modele permit studierea efectului acestor dezechilibre asupra performanței și eficienței circuitelor.

5.2. Cazuri studiate – măsurători, rezultate și discuții

Experimentele s-au bazat pe patru analizoare de rețea Janitza UMG 509-PRO, care au permis achiziția simultană a formelor de undă ale tensiunii și curentului în punctele critice ale rețelei, oferind o evaluare precisă a comportamentului circuitului în condiții de sarcini neliniare și dezechilibrate. Pentru analiza detaliată a armonicilor de ordin superior și generarea

histogramelor corespunzătoare, a fost utilizat un analizor de rețea Chauvin Arnoux C.A 8336, care a permis identificarea distorsiunilor armonice cauzate de elementele neliniare din rețea.

5.2.1. Circuit experimental A

Achiziția măsurătorilor pentru primul model experimental se realizează în trei puncte esențiale, selectate pentru a sprijini determinările și analiza fluxului de putere conform teoriei Țugulea. Primul punct de achiziție se află la bornele de conectare ale circuitului experimental la sursa trifazată, iar al doilea și al treilea punct sunt plasate la bornele consumatorilor perturbator și echilibrat. Aceste locații permit o monitorizare detaliată a variațiilor și efectelor curenților și tensiunilor în circuitul testat, oferind informații cruciale despre influența sarcinilor neliniare și echilibrate asupra rețelei electrice.

Măsurătorile efectuate la aceste puncte indică prezența unor distorsiuni semnificative ale curenților și tensiunilor, în special în apropierea consumatorului perturbator, unde elementele neliniare provoacă dezechilibre și distorsiuni armonice. Analiza formelor de undă și a armonicilor relevă un impact considerabil asupra fluxului de putere, iar valorile distorsiunii armonice reflectă diferențele în comportamentul rețelei, în funcție de configurația sarcinilor. Aceste măsurători sunt esențiale pentru înțelegerea interacțiunii dintre sarcini și pentru aplicarea corectă a teoriei Țugulea în evaluarea performanței rețelei electrice în condiții de dezechilibru și distorsiuni.

5.2.2. Circuit experimental B

În cazul modelului doi al circuitului experimental, unde elementele neliniare sunt distribuite individual pentru fiecare consumator, ambele grupuri de sarcini acționează ca surse perturbatoare. Aceasta creează o dinamică complexă în rețeaua electrică, în care fiecare consumator perturbator influențează tensiunile și curenții de alimentare, generând distorsiuni armonice semnificative. În această configurație, efectele combinate ale celor două surse perturbatoare sunt amplificate, iar formele de undă ale curentului și tensiunii sunt modificate în moduri distincte, în funcție de caracteristicile fiecărui consumator. Configurația oferă oportunitatea de a studia cum interacționează două surse perturbatoare într-un sistem trifazat și impactul cumulativ asupra rețelei electrice.

Un aspect important în analiza modelului doi este diferența semnificativă între parametrii componentelor utilizate pentru consumatorul perturbator unu și cei ai consumatorului perturbator doi. Aceste diferențe nu se limitează doar la valorile rezistențelor și inductanțelor, ci includ și variațiile unghiurilor de conducție ale elementelor neliniare, care au un impact major asupra comportamentului circuitului. Unghiurile de conducție diferite influențează modul în care fiecare consumator interacționează cu rețeaua, generând distorsiuni armonice specifice pentru fiecare fază. Această diversitate în parametrii de funcționare adaugă complexitate analizei, necesitând o evaluare detaliată a efectelor cumulate asupra performanței și stabilității circuitului, precum și asupra calității energiei electrice furnizate.

5.2.3. Simulare software

Metoda de rezolvare a problemei propuse se bazează pe o combinație între experimentele practice și simulările numerice, utilizând OrCAD X, un software avansat de analiză a circuitelor electrice. Această abordare combinată este esențială pentru validarea teoriei puterii Țugulea, aplicată pe modele de rețea cu conductor neutru în circuite

dezechilibrate și elemente neliniare. OrCAD PSpice, componenta de simulare a pachetului Cadence, permite o analiză detaliată a fenomenelor tranzitorii, distorsiunilor armonice și stabilității circuitelor electrice. Folosind acest software, este posibil să se simuleze comportamentul circuitelor în condiții variabile, obținând o confirmare a rezultatelor experimentale și o înțelegere mai profundă a efectelor neliniarităților asupra rețelelor electrice.

Simulările numerice sunt complementare experimentelor practice, deoarece permit obținerea unor rezultate suplimentare într-un mod rapid și controlat. În acest proces, se utilizează scheme electrice detaliate care includ sarcini electrice cu caracteristici diferite, ceea ce permite analiza precisă a influenței neliniarităților asupra distribuției curentului și tensiunii în circuit. De asemenea, caracteristicile tensiune-curent ale sarcinilor electrice sunt implementate în mediul de simulare, ceea ce permite obținerea unor rezultate corelate între măsurătorile experimentale și simulările numerice. Această abordare asigură o validare riguroasă a teoriei și oferă o bază solidă pentru înțelegerea comportamentului circuitelor electrice cu neliniarități și dezechilibre, subliniind aplicabilitatea teoriei puterii Tugulea în rețelele electrice reale.

Capitolul 6 - Concluzii generale, contribuții personale și originale, perspective

În rețelele electrice industriale, sarcinile neliniare, cum sunt motoarele de mare putere și echipamentele de sudură, generează armonici care distorsionează semnificativ forma unde de tensiune și curent. Aceste distorsiuni au un impact direct asupra eficienței energetice, conducând la pierderi semnificative și reducând stabilitatea sistemului. În plus, aceste armonici pot provoca supraîncălzirea echipamentelor, ceea ce nu doar scade durata lor de viață, dar poate duce și la defectarea prematură a componentelor. Astfel, eficiența rețelei este afectată, iar riscurile de întreținere și reparații suplimentare sunt mai mari, generând costuri suplimentare pentru operatori și consumatori.

În același timp, dezechilibrele de fază în rețelele electrice, cum ar fi abaterile de amplitudine sau unghiurile de 120° , agravează aceste probleme. Aceste nesimetrii nu doar că contribuie la distorsiuni, dar induc și pierderi de energie și reduc stabilitatea generală a rețelei. Aceste efecte perturbatoare subliniază necesitatea unui control mai strict al fluxului de putere, care să țină cont de aceste dezechilibre și neliniarități. Prin utilizarea unor metode avansate de măsurare și simulare, este posibilă optimizarea gestionării fluxurilor de putere, îmbunătățind performanța rețelelor electrice și prevenind defectarea echipamentelor conectate.

Tema tezei de doctorat se concentrează pe dezvoltarea și implementarea unor metode electrotehnice avansate pentru monitorizarea fluxurilor de putere în rețelele electrice, cu scopul de a optimiza gestionarea energiei electrice în condiții de sarcini complexe, neliniare și dezechilibrate. Cercetarea abordează analiza detaliată a fenomenelor electrice prin utilizarea atât a experimentelor practice, cât și a simulărilor asistate de calculator, punând un accent deosebit pe validarea teoriei puterii Țugulea. Această abordare contribuie la îmbunătățirea preciziei măsurătorilor și la dezvoltarea unor instrumente tehnice performante care pot sprijini monitorizarea în timp real a fluxurilor de energie.

O confirmare suplimentară atât a validității teoretice, cât și a rezultatelor experimentale a fost obținută prin realizarea bilanțului de puteri de simetrie, nesimetrie și reziduale, realizată prin simularea numerică a circuitelor fizic implementate în laborator, utilizând pachetul de programe Spice. Valorile efective ale tensiunilor și curenților furnizate de această simulare au permis dezvoltarea unui program de calcul capabil să descompună semnalele în serii Fourier (pentru armonicele superioare) și în componente simetrice (directă, inversă și, dacă este cazul, omopolară – pentru armonica fundamentală).

Pe baza acestor componente, au fost determinate puterile corespunzătoare teoriei componentelor simetrice, nesimetrice și reziduale, bilanțurile de puteri fiind verificate cu abateri de sub un procent în majoritatea cazurilor. Această validare atât teoretică, cât și practică a teoriei elaborate de acad. Andrei Țugulea deschide perspectiva unei măsurări corecte și a unei facturări echitabile a energiilor active și reactive la bornele consumatorilor trifazați. Prin înregistrarea exclusivă a componentelor corespunzătoare puterilor de simetrie absorbite de consumatorii linear-echilibrați, se elimină influența componentelor asociate puterilor de nesimetrie și reziduale.

Cea mai recentă ediție a standardului IEEE 1459-2010 dedicat “Definițiilor destinate măsurării energiei electrice în cazul regimurilor sinusoidale, nesinusoidale, echilibrate sau dezechilibrate” [23] evidențiază următoarea concluzie: „Nu există încă o teorie generalizată a puterii care să poată oferi o bază simultană pentru facturarea energiei, evaluarea calității energiei electrice, detectarea surselor majore de distorsiune a formei de undă și calcule teoretice pentru proiectarea echipamentelor de atenuare, cum ar fi filtrele active sau compensatorii dinamici.”

Așa cum s-a demonstrat în prezenta teză de doctorat, teoria componentelor simetrice, nesimetrice și reziduale, dezvoltată de acad. Andrei Țugulea, oferă un răspuns semnificativ la obiectivele menționate anterior în ceea ce privește energia activă. Aceeași afirmație este valabilă și pentru energia reactivă asociată puterii reactive Budeanu (QB), cu condiția ca aceasta să fie reintegrată în standardul menționat, care, în schimb, adoptă puterea nonactivă – definită ca radicalul diferenței pătratelor puterii aparente și celei active.

Spre deosebire de acest model, puterea reactivă Budeanu, având valori pozitive sau negative, poate indica sensul real al transferului de energie asociat elementelor de circuit cu capacitate de stocare. În plus, permite identificarea componentelor asociate dezechilibrelor și neliniarităților consumatorilor din rețea, componente ce pot fi înregistrate și facturate separat.

6.1. Rezultate obținute

Teoria puterii Țugulea, validată prin experiment și simulare, oferă o bază teoretică solidă pentru înțelegerea impactului asimetriilor fluxurilor de putere asupra rețelelor electrice. Studiile arată că aceste asimetrii pot provoca pierderi semnificative, ce duc la supraîncălzirea echipamentelor și creșterea costurilor operaționale. Aceste efecte subliniază necesitatea unor măsuri mai precise de control pentru a asigura stabilitatea și eficiența rețelelor electrice, în special în fața perturbărilor și dezechilibrelor.

Rezultatele experimentale și simulările efectuate confirmă validitatea teoriei, demonstrând că bilanțul de puteri rămâne consistent chiar și în condiții de dezechilibru și neliniarități. Compararea datelor măsurate cu cele obținute prin simulare software întărește veridicitatea concluziilor și arată cum metodele avansate de modelare pot sprijini optimizarea rețelelor electrice complexe. Astfel, abordarea combinată experimentală și numerică oferă un cadru eficient pentru gestionarea fluxurilor de putere și îmbunătățirea performanței rețelelor, având aplicații semnificative în analiza rețelelor electrice cu diverse configurații.

6.2. Contribuții originale

Cercetarea aduce contribuții semnificative în monitorizarea și gestionarea fluxurilor de energie în rețele electrice complexe, evidențiind efectele perturbărilor și dezechilibrelor. Printre realizările cheie se numără dezvoltarea unui model experimental pentru analiza cantităților de putere, care permite o monitorizare detaliată a fluxurilor de energie în rețele cu sarcini distorsionante. De asemenea, studiul compară formulele lui Fryze și Budeanu pentru calculul puterii reactive, clarificând impactul acestor diferențe asupra gestionării energiei reactive în rețelele din România [26,27].

Un alt punct important al cercetării este identificarea impactului armonicilor și dezechilibrelor asupra calității energiei electrice, oferind direcții pentru soluții de filtrare și echilibrare. Teoria puterii Țugulea a fost validată experimental și prin simulare numerică, demonstrând eficiența acesteia în evaluarea pierderilor de energie și în identificarea surselor de perturbare. Aceste contribuții teoretice și practice constituie un fundament valoros pentru îmbunătățirea performanței și stabilității rețelelor electrice, sprijinind dezvoltarea unor tehnologii de monitorizare și gestionare mai precise [24,25,27].

6.3. Lista lucrărilor publicate

- I. M. Mîndreanu**, A. M. Morega, Monitoring power flow in end-user consumption systems, 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), (2023).
- I. M. Mîndreanu**, R. M. Ciuceanu, I. V. Nemoianu, Experimental assessment of consumer unbalance and nonlinearity effects in three-phase networks without neutral conductor, Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., Vol. 69, 3, pp. 287–292, (2024).
- I. M. Mîndreanu**, R. M. Ciuceanu, I. V. Nemoianu, Demonstrating the symmetry and non-symmetry components balance in grids with neutral conductor, Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., Vol. 69, 4, pp. 413–418, (2024).
- I. M. Mîndreanu**, R. M. Ciuceanu, I. V. Nemoianu, Echilibrul fluxului de putere – Simulări și experimente în rețele electrice, Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., Vol. 70, 1, pp. xxx–xxx, (2025) DOI: 10.59277/RRST-EE.2025.70.1.9. (articol acceptat spre publicare, care urmează să apară în numărul 1 din 2025)

6.4. Perspective

Perspectivile viitoare ale cercetării se axează pe aprofundarea metodelor de monitorizare și control al fluxurilor de energie electrică, în special în contextul rețelilor complexe și al echipamentelor industriale cu sarcini neliniare. Printre direcțiile de dezvoltare se numără integrarea tehnologiilor de monitorizare avansate în rețele inteligente, care ar permite o gestionare rapidă și eficientă a perturbărilor, și utilizarea algoritmilor de inteligență artificială pentru automatizarea corecției dezechilibrelor în timp real. De asemenea, cercetările vor explora soluții de filtrare armonică activă și de echilibrare mai eficiente, precum și optimizarea tarifată energiei reactive pentru o utilizare mai eficientă a resurselor.

În plus, studiile viitoare vor aborda impactul dezechilibrelor asupra durabilității echipamentelor, contribuind la dezvoltarea de echipamente mai rezistente la perturbațiile rețelei. Un alt domeniu important va fi analiza impactului perturbărilor în rețelele hibride și sursele regenerabile de energie, cu scopul de a optimiza performanța acestora. Aceste cercetări vor sprijini dezvoltarea unor rețele electrice mai stabile, sustenabile și inteligente, capabile să răspundă provocărilor ridicate de perturbări și dezechilibre, asigurând o calitate constantă a energiei furnizate consumatorilor.

Bibliografie selectivă

- [1] C. I. Golovanov, “Măsurarea mărimilor electrice în sistemul electroenergetic”, Editura Academia Romana și Academia de Științe Tehnice din România, An 2009.
- [2] C.I. Mocanu, “Teoria circuitelor electrice”, Editura Didactică și Pedagogică.
- [3] I. Kereker, “Conectarea corectă a aparatelor electrice de măsură trifazate”.
- [4] C.I. Mocanu “Teoria câmpului electromagnetic”, Editura Didactică și Pedagogică.
- [5] R. Thankakan, E.-R.-S. Nadar, A novel DC-DC converter fed by PV source employing improved incremental conductance algorithm under partial shadow conditions, Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., 67, 2, pp. 145–150 (2022).
- [6] F. Amrane, A. Chaiba, B. François, Improved adaptive nonlinear control for variable speed wind-turbine fed by direct matrix converter, Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., 68, 1, pp. 58–64 (2023).
- [7] M. Burlacu, V. Năvrănescu, A.-I. Chirilă, I.-D. Deaconu, Optimal reactive power management for microgrids based on photovoltaic inverters using sine-cosine algorithm, Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. Et Énerg., 67, 2, pp. 117–122 (2022).
- [8] A. Țugulea, Considerations on the energy effects of distorting regimes (in Romanian), Energetica, XXXIV, 1, pp. 27 – 31 (1986).
- [9] A. Țugulea, Considerations regarding energy effects in the non-symmetrical harmonic regimes of three-phase networks (in Romanian), Energetica, XXXIV, 3, pp. 121 – 130 (1986).
- [10] A. Țugulea, C. Golovanov, The energy effects of non-symmetrical and distorting regimes of electric power systems. Measurement possibilities, ENERG, 3, pp. 130 – 159, 1987.
- [11] A. Țugulea, Power flows under non-sinusoidal and non-symmetric periodic and almost periodic steady states of electrical power system, Proc. of 6th Int. Conf. On Harmonics in Power Systems (ICHPS VI), Bologna, Italy, pp. 388 – 395 (1994).
- [12] A. Țugulea, Criteria for the definition of the electric power quality and its measurement systems, European Transactions on Electrical Power, 6, 5, pp. 357 – 363 (1996).
- [13] C. I. Budeanu, Puissances réactives et fictives, Institut Roumain de l’Énergie, 2 (1927).
- [14] R. M. Ciuceanu, I. V. Nemoianu, V. Mănescu (Păltănea), G. Păltănea, On Professor Țugulea’s visionary power theory: a review, recent advances and perspectives, Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., 63, 2, pp. 123 – 127 (2018).
- [15] P. M. Nicolae, I. D. Nicolae, M. Ș. Nicolae, Powers and Power Factor in Non-Sinusoidal and Non-Symmetrical Regimes in Three-Phase Systems, Energies, 15, 14, pp. 1–45 (2022).
- [16] B. D. H. Tellegen, A General Network Theorem, with Applications, Philips Res. Rep., 7, pp. 259 – 269 (1952).
- [17] I. V. Nemoianu, R. M. Ciuceanu, Non-symmetry and residual active and reactive powers flow in non-linear three-phase unbalanced circuits, Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., 60, 2, pp. 227 – 237 (2015).
- [18] I. V. Nemoianu, R. M. Ciuceanu, Characterization of non-linear three-phase unbalanced circuits powers flow supplied with symmetrical voltages, Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., 60, 3, pp. 355 – 365 (2015).
- [19] I. Șora, N. Golovanov, Electrothermic and Electrotechnology, vol. 1, Electrothermic (in Romanian), Ed. Tehnică, Bucharest (1977).
- [20] S. Czarnecki, “Budeanu și Fryze, două cadre pentru interpretarea proprietăților electrice ale circuitelor cu tensiuni și curenți nesinusoidali”, Inginerie Electrică, vol. 80, pp. 359-367, 1997.
- [21] C.I. Budeanu, Puteri reactive și fictive, Institutul Român de Energie, București, 1927.

- [22] S.W. Fryze, "Puterea reactivă și puterea aparentă în circuite electrice cu forme de undă nesinusoidale", ETZ, vol. 25, 26, 29, 1931.
- [23] *** IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," in IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000) , vol., no., pp.1-50, 19 March 2010, doi: 10.1109/IEEESTD.2010.5439063.
- [24] **I. M. Mîndreanu**, R. M. Ciuceanu, I. V. Nemoianu, Experimental assessment of consumer unbalance and nonlinearity effects in three-phase networks without neutral conductor, Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., Vol. 69, 3, pp. 287–292, (2024).
- [25] **I. M. Mîndreanu**, R. M. Ciuceanu, I. V. Nemoianu, Demonstrating the symmetry and non-symmetry components balance in grids with neutral conductor, Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., Vol. 69, 4, pp. 413–418, (2024).
- [26] **I. M. Mîndreanu**, A. M. Morega, Monitoring power flow in end-user consumption systems, 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), (2023).
- [27] **I. M. Mîndreanu**, R. M. Ciuceanu, I. V. Nemoianu, Echilibrul fluxului de putere – Simulări și experimente în rețele electrice, Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., Vol. 70, 1, pp. 53–56, (2025) DOI: 10.59277/RRST-EE.2025.70.1.9.