



REZUMAT

DEZVOLTAREA DE METODE AVANSATE DE ANALIZĂ ȘI MODELARE NUMERICĂ, APLICATE ÎN INGINERIA SISTEMELOR ENERGETICE

TEZA DE ABILITARE

Din 2001 sunt membru al corpului didactic din Universitatea Politehnica din București, dezvoltându-mi activitatea academică la Facultatea Energetică. În prezent, sunt conferențiar la Departamentul Sisteme Electroenergetice.

Teza "Dezvoltarea de metode avansate de analiză și modelare numerică aplicată în ingineria sistemelor energetice" prezintă sintetic principalele rezultate științifice și realizări profesionale, precum și activitatea mea de cercetare efectuată după obținerea diplomei de doctorat în anul 2005, la Politecnico di Torino, Italia (nr. 68/10.06.2006), și confirmată prin Ordinul Ministrului Educației Naționale (nr. 11428/16.01.2006).

Teza de abilitare a fost împărțită în 6 secțiuni. Prima secțiune (A) prezintă performanța contextului de cercetare și modul integrator de abordare. Secțiunea (B) prezintă direcțiile și abilitățile de cercetare a candidatului și capitolul (C) prezintă rezultatele obținute de candidat după susținerea tezei de doctorat, pe direcțiile de cercetare prioritare. Rezultatele științifice publicate după ce a obținut titlul de doctor sunt rezumate în lucrarea referindu-se la aceste publicații (rezultatele nu sunt reproduse în teză). Aceste realizări sunt prezentate în contextul general al realizărilor științifice semnificative și sunt documentate prin referire la publicații (fiecare referință poate fi verificată (a se vedea Tabelele A1, A2)). Toate contribuțiile originale sunt prezentate în contextul al stării actuale din domeniul de inginerie electrică.

Teza de abilitare prezintă sintetic diferitele rezultate obținute în domeniul sistemelor de energie electrică, și urmărește trei domenii principale de cercetare, în care am contribuit din 2005 până în prezent, și anume:

C1. Dezvoltarea de metode avansate de analiză și dedicat instrumente dedicate identificării și anticipării problemelelor de calitate a energiei electrice

C2. Dezvoltarea tehnicilor de analiză a influenței generării distribuite asupra sistemelor electrice de distribuție

C3. Dezvoltarea de instrumente analitice pentru evaluarea problemelor de eficiență energetică aplicate la domeniul de utilizare a energiei electrice



Pentru primul domeniu de activitate (C1), efortul de cercetare a fost concentrat inițial în construirea și identificarea tuturor parametrilor de calitate (PQ) și evaluarea individuală a impactului acestora asupra exploatării sistemelor electrice de energie. Au fost luate în considerare cele mai recente rezultate în acest domeniu.

Baza mea de cunoștințe a fost validată de teza mea Post-Doctorală axată pe subiectul evaluării calității energiei electrice în sistemele electrice avansate, folosind tehnici de inteligență artificială, și, de asemenea, susținută de 70 lucrări în acest domeniu, precum și de și contribuția mea ca director/membru pe finalizarea proiectelor de cercetare obținute prin Concursuri naționale/internațional sau cu industria

Am abordat diverse teme, cum ar fi evaluarea completă a funcțiilor densitate de probabilitate ale unui set de indici de fiabilitate aplicate rețelelor electrice de distribuție care conțin surse de generare distribuită. Analiza fiabilității a presupus cumularea unor zone ale sistemului analizat în câteva rețele echivalente, fiecare dintre ele conținând componente care face obiectul aceleiași întreruperi în caz de defect. Interesul pentru funcția de densitate de probabilitate este legată de posibilitatea de identificare al anumitor informații, cum ar fi coada de probabilitate. Aceasta ar putea fi utilă pentru definirea indicatorilor suplimentari, precum probabilitatea de depășire a unei anumite valori, important pentru reglementarea piețelor competitivă de energie electrică și pentru diverse scheme de calcul a penalizărilor.

De asemenea, am analizat evaluarea funcțiilor densitate de probabilitate ale timpului până la defectare (timpul scurs între două defecte permanente succesive), timp de reanclanșare (durata necesară efectuării unei anclanșări manuale după un defect), durata totală a serviciului de repunere în funcțiune și timpul echivalent și ponderat de repunere în funcțiune, pentru un sistem de distribuție a energiei electrice în zone urbane mari. Evaluările au fost realizate prin diverse teste statistice de tipul *goodness-of-fit*, folosind seturi de date reprezentând defecte ce s-au produs într-o perioadă de timp de observare pe un sistem de distribuție urban real.

În ceea ce privește operatorii de distribuție ai energiei electrice, am abordat arhitectura de măsurare pentru un Operator al unui sistem distribuție (OSD) și anticipat evoluțiile determinate de implementarea soluțiilor de tip rețea inteligentă. Aplicațiile principale de măsurare din nodurile OSD sunt legate de control, monitorizare și protecție, domeniile de aplicare a acestor măsurători fiind aceea de a stabili transferul de energie și calitatea acestei energii. Rețelele inteligente, care sunt în curs de dezvoltare, vor conduce la realizarea de măsurători avansate, care vor determina fluxuri importante de date, precum și nevoia pentru o precizie sporită. Avantajul determinat de adoptarea arhitecturii universale de măsurare (UMA) a fost prezentat din perspectiva măsurărilor calității energiei electrice. De asemenea, am dezvoltat un instrument de evaluare al performanței activității DSO, care s-a bazat pe indicatori precum pierderi în sistemele de transport și distribuție a energiei electrice. În urma realizării activității de cercetare, am propus o metodă de analiză a pierderilor de putere și energie pentru regimul sinusoidal și dezechilibrat pentru rețele electrice de distribuție.



În ceea ce privește calitatea energiei electrice, activitatea de cercetare s-a concentrat și pe caracterizarea dezechilibrului produs de un sistem fotovoltaic (PV) conectat la rețea, prin evidențierea a trei tipologii de dezechilibre, și anume dezechilibre structurale, dezechilibre la umbrire parțială, și dezechilibre mixte. Rezultatele obținute pot fi utile pentru a promova schimbări în standardele actuale pentru a ține cont de dependența de componentele de dezechilibru pe distorsiuni armonice în formularea indicatorilor de dezechilibru. Activitatea mea de cercetare a abordat, de asemenea, introducerea conceptelor de bază pentru evaluarea caracteristicilor de dezechilibru și distorsiuni armonice în cazul general al unui sistem electric de distribuție ce funcționează dezechilibrat și cu forme de undă distorsionate, în cadrul specific bazat pe componente simetrice (SCB). Pornind de la formele curbilor măsurate pe un fider de distribuție de joasă tensiune real, a fost demonstrat cum indicatorul distorsiunea totală a fazei (TPD) a introdus în cadrul SCB oferă rezultate echivalente cu utilizarea indicatorilor ponderați ai distorsiuni armonice totale, presupunând ca ponderi valorile rădăcinii medii pătrate a curenților de fază (RMS).

O altă problemă de cercetare abordată în activitatea mea a fost optimizarea controlului tensiunii în sistemele electrice de distribuție în prezența generării distribuite. A fost prezentată o nouă abordare bazată pe optimizare bazată pe programare evolutivă pentru atribuirea variabilelor controlului tensiunii. Această problemă a fost legată în mod natural cu problema evaluării impactului generării distribuite asupra calității energiei electrice din sistemele electrice de distribuție existente, din punct de vedere al fiabilității. Evaluarea fiabilității a fost realizată apoi atât pentru sisteme electrice de distribuție tradiționale, cât și pentru sisteme electrice de distribuție care conțin generarea distribuită, prin utilizarea diferitelor tipuri de analiză. În special, reprezentarea în momentul de repunere în funcțiune utilizându-se funcția densității de probabilitate (PDF) Gamma a prezentat avantajul-cheie al simplificării tratării numerice de a distribuției de probabilitate, permițând utilizarea expresiei analitice a funcțiilor caracteristice ale PDF-urilor, oferind astfel posibilitatea, pentru operatorii sistemului de distribuție pentru a evalua analitic PDF-urile locale și globale ale indicilor de fiabilitate într-un mod rapid, chiar și în cazul PDF-uri cu formă multi-modale.

Am proiectat un cadru conceptual pentru analiza impactului major al prezenței generării distribuite asupra profilului tensiunii și pierderilor din sistemele electrice de distribuție. Au fost prezentate rezultatele exemplelor numerice construite pe baza unui sistem de distribuție real situat într-o zonă rurală, cu număr și tipuri diferite de sarcini și surse locale de generare. Scopul acestui domeniu de cercetare a fost o evaluare completă a PDF unui set de indici de fiabilitate aplicate sistemelor de distribuție a energiei electrice. Metoda Monte Carlo (MCM) este eficientă pentru identificarea nu numai a mediei și varianței, dar întreaga PDF a diferiților indici de fiabilitate.

Dispozitivele electrice de uz casnic moderne și eficiente energetic sunt controlate electronic și, în general, într-un sistem trifazat, ele constituie o sarcină dezechilibrată și neliniară. Am analizat perturbațiile de calitate a energiei electrice produse în rețelele de distribuție de funcționarea



echipamentelor electrice eficiente energetic. Funcționarea acestora poate provoca probleme de calitate a energiei electrice în rețelele de joasă tensiune cu un anumit accent asupra sarcinilor neliniare care funcționează cu curent distorsionat în sistemul de alimentare cu energie electrică.

În cadrul celui de-al doilea domeniu de activitate (C2), activitatea mea s-a concentrat în identificarea componentelor generării distribuite, în ceea ce privește tehnologiile și individuale și evaluarea impactului acestora asupra exploatării rețelelor electrice. Pentru o mai bună reprezentare a acestor probleme, a fost luată în considerare condiția actuală a sistemelor de generare distribuită.

Baza de cunoștințe este validată de teza mea Post-Doctorală pe subiectul evaluării calității energiei electrice în sistemele electrice avansate, folosind tehnici de inteligență artificială, și, de asemenea, de 28 de lucrări în acest domeniu și a contribuției sale ca director / membru la finalizarea proiectelor de cercetare obținute prin Concursuri Național/internațional sau cu industria.

În cadrul schimbării de paradigmă de la rețelele electrice tradiționale la rețele inteligente, am abordat diverse teme de cercetare, printre care influența generării distribuite asupra rețelelor de distribuție a energiei electrice. A fost cercetată dezvoltarea și integrarea crescândă a dispozitivelor de generare distribuită a energiei în sistemele electrice de distribuție tradiționale, proces care produce aspecte foarte dificile de funcționare normală atât pentru clienții, cât și operatorilor de rețea. Abordarea a fost dublă, astfel încât să cuprindă investigarea atât a calității energiei electrice și a eficienței energetice pe de-o parte, precum și provocările tehnice pentru rețelele electrice pe de altă parte.

Pentru partea academica a activității mele, am construit materiale utile atât pentru studenții ce studiază în programele de licență, cât și programele de master, care conțin diferite lucrări de laborator. Toate au fost inspirate din sisteme electrice reale, pentru a oferi o mai mare integrare a părții teoretice cu cea practică.

Impactul generării distribuite asupra sistemelor de distribuție electrică a fost evaluat din punct de vedere al profilului curbelor de consum, care se dovedesc a fi de o importanță primordială pentru funcționarea eficientă a rețelelor inteligente. Urmând această cale, am prezentat noile evoluții pentru a grupa șabloane de sarcini utilizând un set inițial de centroizi specificat în conformitate cu un model de centroidul definit de utilizator. A fost ilustrat modelul algoritmului original *Ant Colony Clustering* (EPACC), subliniindu-se caracteristicile și parametrii săi, cu evoluția procesului iterativ până la stabilizare. Această perspectivă este diferită față de cea utilizată în lucrările anterioare, unde nu s-a specificat niciun model de centroid inițial. Pe baza rezultatelor, proprietățile claselor-client apar prin observarea caracteristicilor seturilor agregate din fiecare cluster.

Am au investigat, de asemenea, unele obiective-cheie, cum ar fi definirea modelului matematic de calcul al energiei specifice orare, identificarea grupurilor țintă pentru utilizatorii care au dezvoltat profile de consum, definirea a două tipuri semnificative de încărcare și evaluarea impactului utilizării profilului de consum pe utilizatorii de energie electrică.



De punct de vedere al funcționării rețelei de energie electrică, am efectuat evaluarea comportamentului sistemelor de distribuție, care s-a dovedit a fi o sarcină deosebit de dificilă, datorită complexității răspunsului sistemului de distribuție la defecte. Au fost identificate și incluse în modelul de fiabilitate totală aspectele privind sistemul de insularizare, care au un impact major asupra fiabilității rezultatelor. Rezultatele analizei de fiabilitate au fost prezentate cu ajutorul unui sistem de testare de calcul funcția densitate de probabilitate a indicilor de fiabilitate, folosind o tehnică rapidă și eficientă, bazate pe funcții caracteristice.

O altă perspectivă, care a fost luată în considerare a fost revizuirea completă a sectorului rețelelor de energie electrică la un sistem mai inteligent, în care consumatorii devin *prosumeri*. Stocarea energiei este o componentă vitală a rețelelor inteligente, concepute pentru a îmbunătăți fiabilitatea rețelelor electrice de transport și distribuție, facilita integrarea generatoarelor de energie regenerabilă și permite tranzacționare aprovizionării cu energie electrică la distanțe mari. În acest cadru, am analizat problemele ridicate de capacitatea, prețurile și fiabilitate bateriilor. A fost efectuată o analiză generală, care vizează identificarea cu precizie starea actuală de sisteme de stocare. Evaluare a rețelelor electrice inteligente a continuat cu o simulare analitică ale comportamentului microrețelelor, cu ajutorul unor măsurări practice efectuate *in situ*, pentru a obține informații fiabile despre mediul de funcționare de tip *prosumer*.

Au arătat că ca urmare a modificărilor apărute în rețelele electrice de distribuție, există tendința de orientare spre utilizatori, nu numai la sistemele de putere. Echilibrul de putere și serviciile auxiliare furnizate de sistemele de stocare în rețeaua de distribuție reprezintă două aspecte ale problemei care trebuie să fie tratate în mod corespunzător, ținând seama de parametrii tipici ai rețelei electrice de distribuție. A fost conceput un exemplu pornind de la un sistem electric de distribuție real, în scopul de a crea un aranjament de posibile probleme și soluții pentru sisteme de stocare a energiei electrice care să asigure serviciile auxiliare.

De asemenea, am analizat puterea calitate perturbările produse în rețelele de distribuție de eficiente energetic funcționarea electrice interne, cu un accent mare pe sistemele de iluminat. Astfel, am dezvoltat un cadru de evaluare pentru sisteme de iluminat care pot fi utilizate pentru optimizarea atât a calității energiei electrice, cât și a eficienței energetice pentru sisteme de iluminat. A fost evaluată influența diodelor care emit lumină (LED) asupra parametrilor de PQ, cu scopul de a se realiza o mai bună înțelegere a sistemelor de iluminat inteligent viitoare.

Al treilea domeniu de activitate (C3) a concentrat eforturile mele de cercetare pe trei niveluri principale de tensiune: joasa tensiune, medie tensiune și înaltă tensiune. Punctul de focalizare al analizei a fost stabilit pentru consumatorii de joasă și medie tensiune, în care acestea sunt concentrate Marea majoritate de echipamente electrice și sisteme predispuse la studii de evaluare a eficienței. A fost luată în considerare starea actuală a cercetării în domeniu pentru acest subiect.

Cunoștințele științifice sunt validate de 26 lucrări în acest domeniu și a contribuției sale ca director / membru pe finalizarea proiectelor de cercetare obținute prin Concursul Național/internațional sau cu industria.



Am abordat problema integrării unui bazin de surse de energie regenerabile (RES) în sistemele electrice de putere tradiționale ca mijloace convenționale generații susținută de stocare generice pentru aplicații de stabilitate grilă. Prin urmare, scopul final de a analiza rețelele electrice de distribuție a fost, în primul rând, să creeze instrumente practice și, în al doilea rând, să urmărească o operațiune economică prin minimizarea pierderilor de energie în sistemele de distribuție, astfel încât sistemul poate fi operat într-o manieră sigură și eficientă din punct de vedere al operatorului de rețea. Aceste instrumente practice pot veni în sprijinul operatorilor de distribuție pentru a se conforma cu cerințele tehnice și operaționale ale viitoarelor rețele de distribuție inteligente. Acesta oferă un accent deosebit pe metodologiile și instrumentele de analiză a funcționării unui mix de resurse selectate în aplicațiile microrețelelor. Aspectele-cheie considerate au fost disponibilitatea energiei surselor și rezervele, exploatarea complementă din diferite surse de energie, rolul stocării, precum și efectele posibilei conexiuni a microrețelelor la sistemele electroenergetice. Metodologia a luat în considerare probabilitatea de funcționare a generatoarelor, care funcționează la limita minimă a puterii, fapt ce a fost tratat ca un risc și, prin urmare, asociat unei valoare mai mari.

În ceea ce privește consumatorii de energie electrică finală, am abordat modelul sarcinii electrice (EPACC), care furnizează informații utile despre cum se împart utilizatorii pe baza formei reale a curbei de sarcină. Rezultate din procedura de cluster au fost folosite apoi pentru a grupa clienții în clase, prin identificarea unui set adecvat de atributele care descriu fiecare clasă într-un mod ce evită suprapunerile. Instrumentele elaborate, testate pe modele de sarcină, pot fi aplicate, de asemenea, în cazul în care sarcinile și sursele de generare locale sunt conectate la utilizatorii finali.

M-am ocupat cu analiza de agregare a modelelor energetice orare pentru asistarea introducerii unei abordări bazate pe profile de sarcină în reglementarea piețelor de energie electrică. Aplicațiile numerice legate de validarea pe piața reală a datelor pentru distribuitorii și furnizorii de energie electrică au fost prezentate și discutate pentru cele opt regiuni în care este împărțit sistemul electric de distribuție de pe teritoriul României.

Am abordat problema de creștere a eficienței energetice a echipamentelor electrice moderne prevăzute cu dispozitive electronice de comandă și control, ceea ce transformă utilizatorii de energie electrică în utilizatori inteligenți. Am dezvoltat un model matematic folosit pentru a calcula componentele simetrice în funcție de încărcarea rețelelor electrice de distribuție de joasă tensiune.

Am considerat că cercetările efectuate împreună cu colegii mei au avut scopuri riguroși stabiliți, cu obiective centrale. În viitor, voi da o importanță deosebită colaborării pe teme orientate cele trei direcții principale de cercetare și voi transfera rezultatele obținute spre industriile de profil. Cred cu tărie că cercetările viitoare, puse în practică împreună cu grupurile de cercetare cu care am lucrat în strânsă legătură în ultimii ani, se vor ridica la nivelurile ridicate așteptate.

Dezvoltarea domeniului de cercetare (C1) va fi efectuată prin urmărirea unei serii de seturi de soluții potrivite PQ pentru diferite sisteme izolate, aflate în prezent la nivelul de cercetare în majoritatea țărilor. Evoluțiile cercetării în domeniul PQ în sisteme de energie electrică pot fi



împărțite în patru categorii principale, cum ar fi operatorii sistemelor de distribuție, utilizatorii, sistemele măsurare și bazele de date, precum și standardizarea internațională.

Dezvoltarea domeniului de cercetare (C2) va fi efectuată luând în cont curent schimbările fundamentale în gestionarea și funcționarea generării distribuite (DG) și a rețelele electrice, precum și acceptarea graduală a insulelor și micronețelelor, a stocării, *prosumerilor* și a tehnologiilor de ultimă oră în curs de dezvoltare și a diversificării piețelor de energie electrică.

Dezvoltarea domeniului de cercetare (C3) vor fi concentrate pe trei direcții principale, cum ar fi eficiența energetică, soluții tehnice individualizate și standardizarea internațională. Ca o viziune pentru viitor, politica energetică este orientată să asigure alimentarea neîntreruptă cu energie, nivel economic și de mediu ridicate, durabilitate a sectorului și a calității serviciilor energetice, și să contribuie la crearea locurilor de muncă, la valoarea adăugată regională și la competitivitatea economiei regionale.

Activitatea mea de academică va fi dezvoltată alternativ cu activitatea de cercetare științifică, pentru a găsi soluții la provocările multiple din prezent și din viitor. În plus, este necesar să se armonizeze cu practicile europene, dovedite a fi de succes până în prezent, pentru a oferi studenților instruirea necesară, oportunități de a construi flexibil, adaptabil curriculei individuale cerute de piața forței de muncă, chiar și în timpul anilor de studiu.

Obiectivele generale propuse pentru dezvoltarea carierei mele sunt consolidarea și dobândirea de noi cunoștințe tehnice de specialitate, modernizarea predării cu suport IT, popularizarea bunelor practici. Alte ținte sunt dezvoltarea competențelor de cercetare printr-o permanentă informare și formare pentru munca în echipă, utilizarea eficientă a resurselor și utilizarea rezultatelor cercetării, îmbunătățirea abilităților de comunicare, capacitatea proactivă de rezolvare a conflictelor, construirea unei strânse colaborări cu colective din alte universități, atât în interiorul și în afara României, precum și o creștere a vizibilității internaționale pentru rezultatele propriei activități de cercetare.

De la începutul activității mele universitare, în 2006, am îndrumat aproximativ 145 de studenți de tezele de diplomă și disertație, într-un număr tot mai mare în fiecare an. Am realizat, de asemenea, activități de cercetare cu studenți străini, provenind din Franța și Italia. De asemenea, m-am implicat în activitatea de cercetare, a unor doctoranzi. Aceste activități au fost finalizate cu articole pentru Buletinul Științific UPB (în prezent în curs de evaluare), precum și în conferințe naționale și internaționale.