

**Conf. Dr. Ing. Mihai SANDULEAC**

**TEZĂ DE ABILITARE**

**Sisteme electroenergetice hibride AC/DC pentru viitoarele orașe și comunități inteligente reziliente și cu emisii scăzute de carbon, bazate pe sisteme SCADA, FACTS/FACDS și microrețele.**

**2020**

## Rezumat al tezei de abilitare

### **Sisteme electroenergetice hibride AC/DC pentru viitoarele orașe și comunități inteligente reziliente și cu emisii scăzute de carbon, bazate pe sisteme SCADA, FACTS/FACDS și microrețele**

Această lucrare prezintă motivația și justificarea intenției de a conduce lucrări de cercetare care să pregătească studenți doctoranzi în domenii de actualitate care sunt strict necesare pentru societate în următoarea perioadă și pentru care doresc să contribui în explorarea unor noi soluții științifice și practice. În condițiile acceptării - în sfârșit, a realității că schimbările climatice reprezintă un serios pericol global, reducerea emisiilor în aer a gazelor de seră - în special CO<sub>2</sub>, respectiv de a ajunge la o neutralitate față de acestea până în anul 2050, eforturile autorului din ultima vreme au fost în bună măsură legate de această problematică. În acest sens autorul a explorat găsirea de soluții adecvate, bazate pe ultimele realizări tehnice și științifice, pentru a ajuta la atingerea țelurilor de neutralitate față de emisiile de CO<sub>2</sub>, în condițiile păstrării unui nivel civilizată de funcționare a societății în ansamblu.

Teza de abilitare prezintă aspecte importante ale activității autorului legate de probleme științifice și tehnologii ce reprezintă verigi necesare pentru a avansa către decarbonarea sistemului energetic, având în acest sens o preocupare constantă pentru acele aspecte moderne care să permită o abordare holistică și o bază solidă pentru următorii pași în cercetarea viitoare, inclusiv în activitatea de îndrumare doctorală. În acest demers autorul se va sprijini și fructifica ideile rezultate în special din articolele susținute la conferințe sau publicate în reviste, dar și în lucrările de laborator și din alte acțiuni specifice activității didactice.

Teza se concentrează în jurul problemelor specifice energiei viitorului, inclusiv a viitoarelor orașe și comunități inteligente, pentru care sunt necesare sisteme electroenergetice flexibile, respectiv rețele electrice hibride îmbinând arhitecturile clasice în t.a. cu unele la t.c. Noile soluții sunt abordate prin luarea în considerație a celor mai importante aspecte, cum ar fi soluțiile de tip informatic (IT) și de comunicație - ca sprijin pentru o "digitalizare" ridicată a domeniului energetic, contorizarea inteligentă, piețele de energie și de servicii energetice, aplicațiile electronicii de putere, creșterea rezilienței și imunității energetice, sustenabilitatea și organizarea către economii circulare la nivel local.

În acest context, soluții noi bazate pe microrețele, sisteme FACTS și FACDS, transformatoare statice (engl. *Solid State Transformers - SST*) și sisteme de urmărire și control de tip SCADA, DMS și EMS reprezintă tehnologii importante ce trebuie investigate și dezvoltate.

*Direcțiile de dezvoltare a carierei* urmează să abordeze câteva domenii, care se pot grupa după cum urmează:

1. Arhitecturi energetice reziliente în cadrul orașelor inteligente (*Smart Cities*);
2. Prosumatori și comunități energetice locale (*Energy communities*);
3. Sisteme SCADA EMS/DMS și contorizare inteligentă (*Smart metering*);
4. Servicii energetice în contextul accelerării digitalizării în sinergie cu domeniul ICT (*Information and Communication Technologies*);
5. Aplicații ale electronicii de putere în dispozitivele FACTS/FACDS și în cadrul rețelelor hibride t.a.-t.c. (*AC/DC*);
6. Platforme demonstrative și aplicații software cu caracter didactic și pentru cercetări în domeniul electroenergetic;
7. Abordări holistice ale tranziției către o economie cu neutralitate față de emisiile de CO<sub>2</sub> (pentru a servi implementării politicii europene "*Green Deal*").

Aceste domenii sunt prezentate succint și în figura 1.

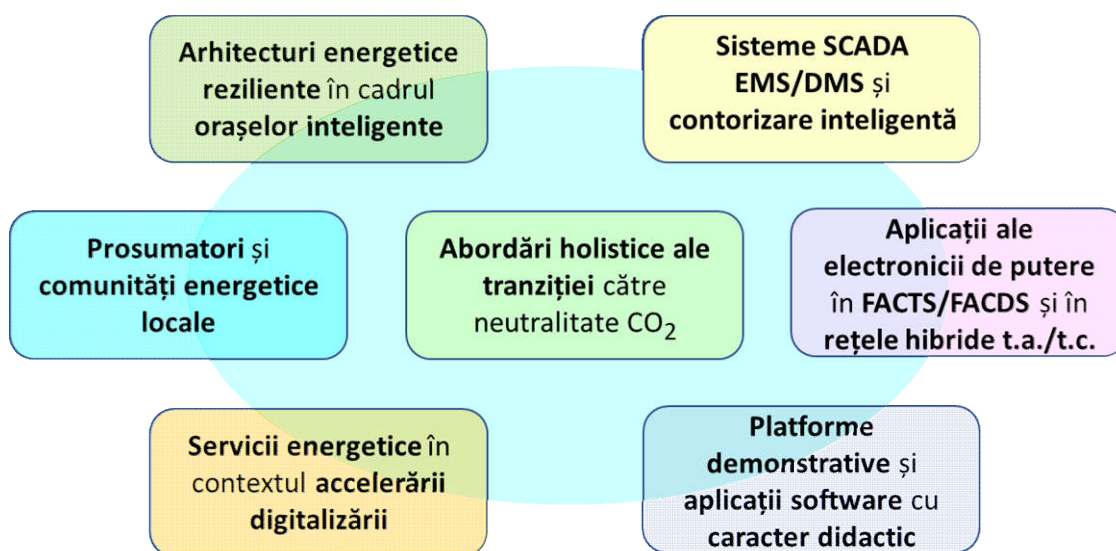


Figura 1 – Direcțiile de dezvoltare a carierei organizate în 7 domenii principale

Teza de abilitare ia în considerație aceste domenii atât pe baza rezultatelor cercetării de până acum cât și a planurilor de viitor.

În primul capitol, se prezintă pe scurt *problematica schimbărilor climatice* și contextul internațional de acceptare a necesității unor eforturi "fără precedent", având ca obiectiv, în conformitate cu IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), de a asigura limitarea încălzirii globale la 1,5°C printr-o tranziție rapidă în toate domeniile, inclusiv în cel al energiei, al infrastructurii urbane și al industriei. Aceste tranziții vor necesita măsuri fără precedent până acum, cu reduceri drastice de emisii, cu un portofoliu larg de soluții și cu suportul unor mari eforturi investiționale<sup>1</sup>. Acest capitol descrie motivația pentru a contribui la atingerea acestui țel important pentru societate și prezintă pe scurt câteva din dificultățile trecerii la noua paradigmă a neutralității față de emisiile de carbon, cum ar fi: problema echilibrării generare-consum în sisteme cu pondere mare a surselor regenerabile, problema scăderii inerției mecanice - cu influență asupra stabilității sistemului EE clasic, adecvanța în condițiile unei preponderențe a surselor cu caracter stocastic, accesibilitatea noilor soluții și dificultăți în accelerarea tranziției. În acest context se analizează aspecte cu impact transformator al domeniului energetic, care să ducă la schimbări de paradigmă și a modelelor de afaceri tradiționale (Business as Usual - BAU), cum ar fi: tehnologii noi pentru celulele fotovoltaice (de exemplu cele construite pe bază de perovskit), inovații importante în domeniul stocării energiei electrice, tehnologii noi în electronica de putere - de exemplu tehnologiile siliciu-carbon (SiC) sau de tip galiu-natriu (GaN), noi arhitecturi energetice - incluzând microrețele și hibridizare t.a. - t.c., precum și digitalizarea avansată a activităților energetice.

Capitolul 2 cuprinde unele preocupări legate de utilizarea diverselor *tehnologii ce înlesnesc tranziția către sisteme electroenergetice cu neutralitate față de emisiile de CO<sub>2</sub>*. Unul din aceste subiecte a fost în legătură cu introducerea contoarelor inteligente și diversele aplicații ale acestora, inclusiv în scopul sprijinirii funcționalităților specifice noilor rețelele inteligente. În acest sens, un rol special l-au avut contoarele cu funcții separate (engl. *Unbundled Smart Meters - USM*), în care autorul a propus o sistematizare care ulterior a fost dezvoltată și utilizată împreună cu diverse echipe de specialiști în mai multe proiecte europene. Tehnologiile digitale aplicate în sisteme electroenergetice, în special securitatea și confidențialitatea datelor, au reprezentat de asemenea preocupări importante. Problematika *Serviciilor tehnologice de sistem și măsurarea acestora cu contoare inteligente* a reprezentat un alt domeniu de interes, din care au rezultat diverse aplicații care au fost prezentate în diverse articole. De asemenea, o alta tematica ce a fost dezvoltata se refera la utilizarea electronicii de putere, ca facilitator al unor tehnologii avansate care să deservească noile provocări din electroenergetică.

---

<sup>1</sup> "Pathways limiting global warming to 1.5°C with no or limited overshoot would require rapid and far-reaching transitions in energy, land, urban and infrastructure (including transport and buildings), and industrial systems (high confidence). These systems transitions are unprecedented in terms of scale, but not necessarily in terms of speed, and imply deep emissions reductions in all sectors, a wide portfolio of mitigation options and a significant upscaling of investments in those options"

În capitolul 3 sunt grupate contribuții ale autorului privind *noile entități și arhitecturi, în special în legătură cu orașele și comunitățile inteligente*. Astfel, s-au propus noi arhitecturi energetice, prin combinarea rețelelor la t.a. și la t.c., realizând soluții hibride, utilizarea dispozitivelor FACTS și extinderea utilizării lor în rețele de distribuție prin dispozitive adaptate - de tip FACDS. Autorul a realizat diverse analize privind utilizarea microrețelelor și a prosumatorilor. Aceste eforturi au fost ghidate și de noile cerințe privind cercetarea rezilienței energetice, specifice orașelor și comunităților inteligente. În acest context se înscrie și preocuparea legată de gradul în care un oraș inteligent ar putea să își asigure energia electrică pe baza producției locale și zonale distribuite, astfel încât să își îmbunătățească reziliența energetică. Secțiunea pune în evidență și implicarea în activitatea de standardizare, prin oportunitatea de a fi, din anul 2018, membru al comitetului tehnic ASRO/CT 397 - Dezvoltare sustenabilă a infrastructurilor inteligente din cadrul orașelor și comunităților.

Capitolul 4 se referă la contribuții ale autorului privind *atenuarea efectelor rezultate din penetrarea pe scară largă a surselor regenerabile*, cu consecințe asupra nivelului de tensiune și de congestii de rețea, respectiv echilibrarea producției cu consumul prin utilizarea unor echipamente de stocare a energiei electrice.

În capitolul 5 sunt descrise unele realizări constând din *platforme demonstrative și aplicații software* care să sprijine procesul educațional și de cercetare. Este de subliniat și dezvoltarea de platforme demonstrative și soluții open-source, ca abordări de principiu care să permită dezvoltarea incrementală, pe proiecte variate și cu diverși contributory, pentru a asigura o continuitate durabilă a cunoștințelor dobândite în timp. Dintre acestea, sunt menționate:

- platforma demonstrativă a unei centrale virtuale (VPP), pentru care există și o lucrare de laborator pentru studenții masteranzi;
- mediul integrat de analiză a regimurilor permanente în rețele electrice de distribuție și de integrare a unor bucle de tip Hardware In the Loop, de tip open-source și numit GridMonK, realizat în cea mai mare parte de autor și utilizat în lucrări de laborator, în proiecte europene și pentru elaborarea de articole;
- aplicația open-source OSiMe de simulare a funcționării unui contor de energie electrică modern, utilizată în special în cadrul lucrărilor de laborator;
- aplicație open-source pentru analize a undelor de curent și tensiune precum și a unor mărimi derivate, utilizată în special în cadrul lucrărilor de laborator.

Capitolul 6 este destinat "*principalelor direcții de dezvoltare viitoare*". Acestea presupun în primul rând aprofundarea direcțiilor actuale, la care se adaugă unele noi, cum ar fi realizarea cuplării sinergetice între sectoare (în special între sectorul electric și cel al gazului metan și al hidrogenului) și aspecte detaliate ale problematicii de creștere a rezilienței instalațiilor energetice. De asemenea, sunt prezentate proiecte de realizare de noi

instalații pilot, aplicații software și demonstratoare experimentale, care să fie utilizate ca bază pentru diversele activități de cercetare asociate studiilor doctorale dar și pentru proiecte europene.

Se va lua în considerație realizarea de aplicații cu scop didactic, respectiv destinate cercetării, folosind dotări noi cum ar fi:

- stația de încărcare a vehiculelor electrice la o putere de până la 11 kW (tip 2);
- noul laborator SCADA, care reproduce echiparea tipică a unor dulapuri de comandă-control și protecție din stații electrice ale operatorului de transport și de sistem Transelectrica S.A.;
- hub-ul tehnologic ce este în curs de realizare pe proiectul european H2020 WEDISTRICK, ce va conține un ansamblu de microrețele și de soluții hibride t.a. și t.c.,

acestea fiind utile pentru a dezvolta diverse aplicații hardware și software, precum și platforme experimentale, cum ar fi:

- aplicație de dispecer SCADA-EMS destinată microrețelor și comunităților energetice specifice orașelor inteligente;
- dispozitive de înregistrare a evoluției proceselor electroenergetice, în scopul analizei dinamice a microrețelelor și pentru a compara evoluția reală cu cea obținută prin simulări;
- dispozitive de injecție curenți și tensiuni în circuitele secundare ale echipamentelor SCADA și de protecție ale laboratorului SCADA sau ale altor echipamente ce sunt utilizate în instalațiile SEN, care să permită simulări de regimuri permanente cu adăugarea de extensii de tip "Hardware in the Loop" (HIL);
- platformă experimentală care să permită explorarea tehnologiilor de tip Real-time Simulator (RTS), pentru înțelegerea și implementarea prin calcule paralele rulate pe platforme puternice de procesare a semnalelor (cum ar fi platforme bazate pe procesoare complexe de tip Xilinx Spartan), a unor algoritmi utilizați în calculul regimurilor permanente și/sau dinamice din SEE;
- studii experimentale care să pună în evidență capacitatea bateriilor de ultimă generație (în special cele bazate pe litiu) și a supracondensatoarelor în a realiza servicii tehnologice de sistem cu răspuns rapid pentru rețelele mari și/sau pentru microrețele, inclusiv legate de realizarea inerției sintetice;
- experimente practice ale utilizării electronicii de putere legată de noile dispozitive larg utilizate în instalații, cum ar fi invertoare și convertoare, ca suport pentru domeniul FACTS/FACDS precum și pentru cel al stocării de energie și al transportului electric, care reprezintă discipline pe care le predau (cursurile "Tehnologii avansate în sistemele electroenergetice: FACTS și IA" și "Sisteme de stocare a energiei și transport electric");

- alte experimente, vor fi realizate în funcție de fondurile suport ce pot fi atrase, care să permită realizarea de demonstratoare ale unor concepte (de tip "proof-of-concept"), pentru transformatoare statice (Solid State Transformer) și legături la t.c. de medie tensiune (peste 1 kV) între microrețele funcționând la t.a.

Activitățile urmează să aibă în vedere creșterea experienței în studiu experimental prin proiecte full open-source (hardware și software) și prin încurajarea colaborării între studenții doctoranzi în vederea realizării unor proiecte complexe, bazate pe sinergii, prin împărțirea în proiecte dedicate, mai simple, dar care sunt compatibile și pot fi combinate în etape ulterioare de cercetare-dezvoltare.

În ultimul capitol se prezintă diverse aspecte ale carierei care atestă *capacitatea autorului de a coordona echipe de cercetare*. În continuare sunt prezentate câteva din activitățile care au solicitat coordonarea unor echipe de cercetare:

- în cadrul *Institutului de Cercetare și Modernizare în Energetică ICEMENERG*, am condus diverse lucrări de cercetare, iar după parcurgerea unor etape, am devenit șeful *Laboratorului de Sisteme Electroenergetice*, coordonând un colectiv de aproximativ 20 membri;

- În cadrul firmei private *TELECOMM*, am asigurat coordonarea din punct de vedere științific a unei echipe care s-a ocupat de realizarea de echipamente românești de tip SCADA și protecții numerice destinate instalațiilor din SEN, acestea fiind concepute în totalitate în firmă și necesitând ample activități de cercetare-dezvoltare; printre activitățile pe care le-am coordonat au fost realizarea echipamentelor TRINET - destinate analizei armonice a undelor de tensiune și curent din rețele electrice, CDR - osciloperturbograf destinat înregistrării defectelor în rețele electrice, DIPA - protecție numerică de distanță și HELIOS - platformă software de tip SCADA destinată conducerii stațiilor electrice din rețeaua de distribuție;

- În cadrul firmei private *ECRO*, am participat la coordonarea și realizarea unui sistem de contorizare de tip AMR ce a integrat aproximativ 1000 de contoare; la un sistem de contorizare inteligentă de aproximativ 250 puncte de măsurare în cadrul orașului Pitești; la dezvoltarea unei platforme de tip Smart Grid care a realizat o centrală virtuală implementată la CCCP Brazi și având legătură directă cu platforma SCADA a Dispecerului energetic național;

- În cadrul *Centrului Român al Energiei (CRE)*, autorul a coordonat o propunere de dezvoltare a unui concept de Smart City pentru orașul Sibiu, adresând sisteme energetice multi-flux, conștientizare energetică și servicii energetice pentru diverși actori din energie;

În ceea ce privește *proiectele cu finanțare europeană*, am coordonat activitatea de cercetare în cadrul a trei proiecte europene:

- FENIX (2005-2009), aparținând programului european FP6;
- NOBEL GRID (2015-2018), din cadrul programului european Horizon 2020;
- Storage4Grid (2016-2020), din cadrul programului european Horizon 2020, fiind responsabil tehnic al proiectelor în ansamblul lor (la nivel de consorțiu) pentru două proiecte europene:

- NOBEL GRID (2015-2018)
- Storage4Grid (2016-2020).

În cadrul proiectului NOBEL GRID am coordonat realizarea primului contor USM de tip industrial, cu aprobare MID (Measuring Instruments Directive), dar și a unor contoare USM folosind componente existente pe piață.

- am fost implicat în activități de cercetare în colaborare cu Centrul Român al Energiei și cu parteneri externi, coordonând realizarea de aplicații specifice în cadrul proiectelor cu finanțare europeană SUCCESS, NRG5 și WISEGRID, toate folosind contorul în arhitectură USM, pentru a demonstra noi funcționalități necesare în cadrul paradigmei Smart Grid;

- particip în acest moment, ca responsabil pe partea electrică, în cadrul proiectului european în derulare WEDISTRICT (2019-2023), coordonând o echipă de cercetare care se ocupă de diverse dezvoltări tehnologice cu caracter experimental; în cadrul acestei activități se vor realiza în cadrul Facultății de energetică - printre altele, microrețele ce pot funcționa on-line sau off-line, cu caracteristici de reziliență energetică, utilizând de asemenea soluții hibride t.a. și t.c.

În cadrul proiectelor menționate am avut și am sarcina să coordonez echipe de cercetare care să realizeze obiective specifice fiecărui proiect.

Legat de *capacitatea de a organiza și gestiona activități didactice, de explicare și facilitare a învățării și cercetării*, se pot menționa următoarele:

- realizarea a două îndrumare de laborator legate de disciplinele predate:

- Îndrumarul de laborator „*Elemente de utilizare avansată a contoarelor de energie electrică în sisteme electroenergetice*”, autori Mihai Sănduleac și Lucian Toma;
- Îndrumarul de laborator "*Rețele de distribuție de joasă tensiune ale viitorului: analiza funcționării rețelelor cu programe de calcul open-source*", autor Mihai Sănduleac.

- realizarea unui curs nou "*Sisteme de stocare a energiei și transport electric*" predat la domeniul de masterat "*Energetica orașelor inteligente*" (MS14);

- realizarea suportului de curs "*Tehnologii digitale și sisteme SCADA în sisteme electroenergetice*", predat în cadrul domeniului de masterat "*Monitorizarea și controlul sistemelor electroenergetice*" (MS2);

- adaptarea cu elemente noi a suportului de curs "*Sisteme pentru conducerea rețelelor electrice de distribuție*" predat în cadrul domeniului de masterat "*Eficiență energetică*" (MS4);

- participare la realizarea suportului de curs pentru "*Tehnologii avansate în sistemele electroenergetice: FACTS și IA*" predat în cadrul domeniului de masterat "*Monitorizarea și controlul sistemelor electroenergetice*" (MS2);

- coordonarea proiectelor de diplomă pentru șapte studenți, cu următoarele subiecte: 1. "Sistem de conversie t.c./t.a. cu funcționalități STATCOM. Demonstrarea conceptului cu montaj experimental", 2019; 2. "Studiul scenariilor de producție și consum ale prosumatorilor interconectați", 2019; 3. "Microsistem de reziliență energetică", 2019; 4. "Mașinile electrice și stațiile de încărcare ale acestora", 2020; 5. "Stocarea energiei electrice într-un Sistem Electroenergetic"; 6. "Viziuni despre fezabilitatea unui prosumator, analize și soluții"; 7. "Stocarea energiei într-o comunitate de case", 2020.

- coordonarea proiectelor de dizertație pentru patru studenți, în derulare;

- participarea în comisia de îndrumare pentru cinci studenți doctoranzi;

- realizarea de programe software de tip open-source care să faciliteze procesul didactic și de cercetare: 1. VIFES, program didactic și de cercetare pentru simularea cu facilități HIL a centralelor virtuale; 2. GridMonK, program didactic utilizat în corelație cu programul de calcul al regimurilor permanente OpenDSS realizat de EPRI; 3. OSIME, program de simulare a funcționării contoarelor inteligente; 4. MQTT-Client, program didactic de analiza și utilizare a mesageriei de tip publish-subscribe utilizând mesaje MQTT; 5. Program open-source pentru analiza undelor de curent și tensiune precum și a unor mărimi derivate;

- realizarea ca autor principal și/sau în co-participare cu alți autori a următoarelor cărți de specialitate legate de cursurile predate de autor:

-

- *Dispozitive FACTS: Concepte și aplicații în electroenergetică*, editura AGIR, 2017, ISBN: 978-973-720-682-4, 2017, autori: Mircea Eremia, Mihai Sănduleac, Lucian Toma, Constantin Bulac, Alisa Manoloiu

- *Tehnologii digitale și sisteme SCADA pentru conducerea sistemelor electroenergetice*, București, Politehnica Press, 2019, ISBN 978-606-515-870-2, autor: Mihai Sănduleac

- realizarea ca autor principal și/sau în co-participare cu alți autori de capitole ale unor cărți de specialitate:

- "Engineering the future", capitol 20 - *Energy and information*, SCIYO, 2010, ISBN 978-953-307-210-4, autori: Paul Borza, Mihai Sănduleac, Ana Maria Mușat, Marius C. Carp

- 2) *Pathways to a Smarter Power System*, Academic Press, Elsevier, cap. 4: "Smart Meters and Advanced Metering Infrastructure", Elsevier 2019, DOI: 10.1016/B978-0-08-102592-5.00004-1, ISBN 987-08-102592-5, p. 89-114, autori: Joao F. Martins, Anabela Goncalves Pronto, Vasco Delgado-Gomez, Mihai Sanduleac

- 3) *Space Infrastructures: From Risk to Resilience Governance*, capitolul "Addressing Cyber-Security and Privacy in a Multi-Actor Energy Environment

*Using Unbundled Smart Meter Architecture*", IOS Press, NATO Science for Peace and Security Series - D: Information and Communication Security, 2020, 978-1-64368-072-9 (print) | 978-1-64368-073-6 (online), p. 131-144, autori: Mihai Sănduleac, Mihai Macarie, Cătălin Chimirel, Paul Lăcătuș

De asemenea, alături de cadre didactice și specialiști români și străini care au participat la diverse proiecte de cercetare am realizat studii ce au fost diseminate în articole apărute în reviste și la conferințe IEEE.