



Universitatea POLITEHNICA din București
Facultatea de Energetică
313 Splaiul Independenței, 060042 București, Romania
Tel: 0040 21 4029 433, Fax: 0040 21 3181015
<http://www.energ.pub.ro/>



TEZĂ DE ABILITARE

în Inginerie Energetică

**Reglajul și stabilitatea frecvenței în viitoarele
sisteme electroenergetice:
de la planificare la monitorizare
și control în timp real**

**Frequency regulation and stability in the
future power systems:
from planning to monitoring and real time
control**

Autor: Conf.dr.ing. Lucian TOMA

București, 2021

REZUMAT

Teza de abilitare prezintă realizările profesionale și direcțiile de dezvoltare personale specifice subiectului ales, respectiv *reglajul și stabilitatea frecvenței în sistemele electroenergetice*. Teza conține informații care sunt de natură să dovedească capacitatea autorului de a conduce activități de cercetare prin doctorat, de nivel foarte înalt, prin referire la experiența și realizările personale anterioare, desfășurate în cadrul Departamentului Sisteme Electroenergetice – Facultatea de Energetică – Universitatea POLITEHNICA din București, în special după susținerea tezei de doctorat, în anul 2010. Autorul este absolvent al Facultății de Energetică, în anul 2002, cu specializarea Electroenergetică, an în care a devenit cadru didactic în cadrul Departamentului Sisteme Electroenergetice. Domeniul pentru care se solicită abilitarea este Inginerie Energetică.

Primul capitol al tezei prezintă succint motivația alegerii subiectului tezei, precum și realizările profesionale care dovedesc capacitatea autorului de a aborda subiectul prezentat. *Reglajul și stabilitatea frecvenței* constituie o parte din profilul profesional al autorului în domeniul sistemelor electroenergetice, care include:

- i. Modelarea elementelor de rețea și calculul regimului permanent;
- ii. Modelarea pentru simulări dinamice;
- iii. Reglajul mărimilor electrice de stare în sistemele electroenergetice;
- iv. Analiza stabilității sistemelor electroenergetice;
- v. Analiza regimurilor de funcționare și soluții corective;
- vi. Piața de energie electrică;
- vii. Rețele electrice inteligente.

În teoria clasică, frecvența unui sistem electroenergetic este o mărime globală care este menținută la o valoare de referință prin acțiuni specifice de echilibrare în mod continuu între producție și consum. Orice dezechilibru de putere va rezulta într-o abatere pozitivă sau negativă a frecvenței în sistemul electroenergetic în raport cu valoarea de referință. Operatorul de sistem are responsabilitatea de a asigura echilibrul puterilor la orice moment de timp în conformitate cu procedurile de reglaj al frecvenței.

În sistemele electroenergetice interconectate, caracterizate printr-o inerție mare disponibilă în masele în rotație ale generatoarelor sincrone (turbo- și hidro-agregate), variațiile de frecvență cauzate de dezechilibrele de putere sunt reduse. Strategiile de control al frecvenței au fost dezvoltate și implementate în mod clasic pe baza unor fenomene specifice acestor condiții de funcționare. În sistemul electroenergetic interconectat ENTSO-E (zona continentală), un dezechilibru de putere, cum ar fi deconectarea unei centrale electrice, are un impact scăzut asupra frecvenței sistemului. Însă, pe măsură ce inerția mecanică disponibilă în generatoarele clasice se reduce, fenomenele legate de frecvență sunt mai intense și pot să conducă la instabilitate.

Ultimele două decenii au fost caracterizate de schimbări importante cu impact major asupra fenomenelor legate de dinamica și controlul frecvenței. Dintre acestea se menționează:

- Folosirea pe scară largă a electronicii de putere pe partea generatoarelor electrice conduce la scăderea constantei totale de inerție ceea ce cauzează oscilații mari de frecvență în cazul unor perturbații bruște (ex.: scurt-circuite, dezechilibre de putere etc.).
- Puterea produsă de centralele electrice eoliene și fotovoltaice depinde de sursa primară de energie (vânt sau soare), de multe ori imprevizibilă. Din motive economice, acestea sunt

de obicei exploatate la puterea maximă, rezultând o producție intermitentă. În aceste condiții, dezechilibrele de putere se modifică rapid cauzând fluctuații rapide de frecvență.

- Creșterea producției din surse regenerabile de energie, în aceste condiții, conduce la reducerea rezervei turnante disponibile în generatoarele clasice, ceea ce poate afecta securitatea sistemului electroenergetic.
- Evoluția semnificativă a tehnologiei bazate pe electronica de putere se remarcă și pe partea consumatorilor. Problemele asociate acestor tipuri de consumatori sunt cauzate de variația bruscă a puterii conectate/deconectate la/de la rețea. Prin comparație, în trecut, majoritatea consumatorilor erau caracterizați de modificări lente și de funcționare la o tensiune/ un curent aproximativ sinusoidale.

Securitatea unui sistem electroenergetic este foarte importantă nu numai pentru exploatarea corespunzătoare a sistemului electroenergetic dar și pentru sustenabilitatea economică a Uniunii Europene. Problemele specifice frecvenței pot conduce la o avarie extinsă la nivelul ENTSO-E. Istoria a arătat că, chiar în condițiile unor restricții stricte de operare în toate sistemele electroenergetice din cadrul ENTSO-E, avariile extinse se pot produce dintr-o multitudine de motive. Teza vine cu o serie de propuneri care fac obiectul activității curente de cercetare dar și în cadrul activităților viitoare de coordonare a studenților și doctoranzilor.

Expertiza profesională a autorului legată de subiectul tezei de abilitare este legată de mai multe proiecte de cercetare științifică sau de consultanță, dintre care se menționează:

- *Renewables in a Stable Electric Grid (RESERVE)*, H2020-LCE-2016-RES-CCS-RIA, Grant nr. 727481, 2016-2019 (**responsabil din partea UPB**).
- *Studiu privind realizarea unor automatizări de declanșare a grupurilor în regimuri critice de evacuare a puterii produse în zone cu dezvoltare accelerată a parcului de producție din surse regenerabile*, Contract de cercetare nr. C361/16.09.2014, în parteneriat cu Societatea Inginerie Sisteme S.A. pentru C.N. Transelectrica S.A., 2014-2015 (**responsabil din partea UPB**).

Capitolul se încheie cu descrierea a șapte direcții de cercetare specifice subiectului tezei, fiecare direcție fiind însoțită de prezentarea activităților realizate precum și de planurile de viitor.

În **Capitolul 2**, intitulat “**Aspecte generale privind reglajul și stabilitatea frecvenței**”, sunt prezentate principiile generale ale reglajului de frecvență în sistemele electroenergetice, respectiv structura și principiile nivelurilor ierarhice, de la răspunsul inerțial, la reglajul primar, iar apoi la reglajul secundar de frecvență. Explicațiile privind răspunsul inerțial sunt însoțite de prezentarea unor înregistrări din SEN care evidențiază perioade de timp în care este mobilizată energia cinetică disponibilă în masele în rotație, în special în grupurile nucleare. Descrierea nivelurilor de reglaj primar și secundar este, de asemenea, însoțită de simulări numerice care evidențiază comportamentul dinamic al diferitelor tipuri de centrale electrice. Necesitatea abordării acestui subiect este explicat și prin descrierea succintă a celor trei avarii majore din ENTSO-E (28 septembrie 2003, 4 noiembrie 2006 și 8 ianuarie 2021), prin care se scoate în evidență vulnerabilitatea sistemelor interconectate și necesitatea de implementare a unor noi soluții, eventual în contextul creșterii producției de energie electrică din surse regenerabile.

Înțelegerea comportamentului dinamic al unui sistem electroenergetic necesită cunoștințe vaste legate de modelarea și simularea sistemelor electroenergetice. Autorul a participat la scrierea a cinci cărți, dintre care patru, în limba engleză, au fost publicate la edituri de prestigiu. Dintre acestea, se menționează:

- Antonello Monti, Federico Milano, Ettore Bompard, Xavier Guillaud (editori), ș.a. – *Converter-Based Dynamics and Control of Modern Power Systems 1st Edition*, Elsevier Academic Press, 2021.

- Mircea Eremia, Mohammad Shahidehpour (editori), ș.a. – Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control, Wiley & IEEE Press, Power Engineering Series, Hoboken-USA, 2013.

Pentru a înțelege comportamentul dinamic al unui SEE din punct de vedere al frecvenței este necesară monitorizarea acesteia în cazul unor perturbații majore. În **Capitolul 3** sunt prezentate o serie de date colectate din SEN cu ajutorul unor dispozitive PMU, cu rată de raportare de 25 sau 50 de cadre pe secundă. Capitolul este completat cu aspecte legate de sistemele de măsurare pe arii extinse (WAMS) din ENTSO-E și din România. Planurile de viitor ale autorului includ extinderea către control și protecții (WAMCS). Rezultatele măsurătorilor din SEN scot în evidență necesitatea dezvoltării unor soluții de reglaj rapid al frecvenței.

În condițiile în care la orizontul de timp 2050, sistemul continental al ENTSO-E se va baza în mare parte pe entități de producție interfațate prin convertoare bazate pe electronică de putere, respectiv surse regenerabile de energie, ceea ce înseamnă un nivel foarte redus al inerției mecanice disponibilă, eventual în centrale hidroelectrice, sistemele de stocare a energiei vor juca un rol foarte important pentru stabilitatea și reglajul frecvenței. În acest context, în **Capitolul 4** se prezintă o sinteză a aplicațiilor sistemelor de stocare a energiei pentru reglajul frecvenței, aplicații pe care autorul le-a dezvoltat sau urmează să le dezvolte.

O parte dintre aplicațiile menționate la capitolul 4 sunt prezentate în detaliu în cadrul **Capitolului 5**, intitulat “Aplicații ale sistemelor de stocare a energiei pentru stabilitatea și reglajul frecvenței”. Autorul prezintă rezultatele simulărilor realizate pe două modele, respectiv sistemul test Kundur și modelul rețelei de transport al SEN, care vizează utilizarea sistemelor de stocare a energiei în baterii pentru reglajul primar și reglajul secundar al frecvenței. Dintre aplicațiile prezentate se menționează:

- Utilizarea bateriilor pentru stabilitatea și controlul frecvenței folosind ca date de intrare atât abaterea de frecvență cât și viteza de variație a frecvenței;
- Aplicarea tehnicilor de inteligență artificială (fuzzy logic) pentru controlul bateriilor în cadrul reglajului primar de frecvență;
- Controlul dinamic al unei centrale electrice virtuale (CEV), respectiv integrarea acesteia în bucla de reglaj secundar al frecvenței.

Capitolul 6, intitulat “Echilibrarea puterilor active într-o microrețea”, abordează problema planificării și controlului în timp real al unei microrețele, ca soluție de minimizare a dezechilibrelor de putere produse de sursele regenerabile de energie amplasate în rețelele electrice de distribuție. Pe măsură ce numărul acestor surse crește, necesitatea de a le coordona și de a le integra în cadrul unor unități dispecerizabile agregate este evidentă. Rezultatele simulărilor prezentate în teză au fost realizate pentru un amplasament real, în cadrul unui proiect de consultanță:

- *Smart Micro Grid Controller*, Contract de cercetare/consultanță nr.6 / 30.03.2020 (număr intern TEN05.20.01) pentru Societatea Inginerie Sisteme (director).

Una dintre cele mai complexe soluții de îmbunătățirea a siguranței în funcționare a sistemului interconectat ENTSO-E pentru orizontul de timp 2050 este dezvoltarea unei super-rețele electrice prin construirea unei rețele electrice la tensiune continuă HVDC în paralel cu rețeaua electrică existentă ce funcționează la tensiune alternativă. **Capitolul 7** prezintă diverse soluții prin care aceste rețele HVDC sunt folosite în cadrul reglajului de frecvență.

Teza de abilitare se încheie cu un capitol de **Concluzii Generale** în care se prezintă succint soluțiile propuse de autor pentru dezvoltarea unor aplicații specifice reglajului și stabilității frecvenței în sistemele electroenergetice.

ABSTRACT

This habilitation thesis presents the professional achievements and the development directions specific to the approached topic, i.e. the *frequency control and stability in power systems*. The thesis contains information that are intended to prove the capacity of the author to conduct doctoral research activities, at a very high level, by referring to the experience and the achievement of his personal achievements, within the Department of Electrical Power Systems – Power Engineering Faculty – University POLITEHNICA of Bucharest, mainly after the defense of the PhD thesis, in year 2010. The author is a graduate of the Power Engineering Faculty, in year 2002, with the specialization Electrical Power Systems, the year when he joined an academic staff member of the Department of Electrical Power Systems. The domain for which the habilitation is requested in Power Engineering.

The first chapter of the thesis briefly presents the motivation of choosing the thesis subject, as well as the professional achievements that support the capacity of the author to approach this subject. *The frequency control and stability* represent one of the author's preoccupations in the field of power systems, among which:

- viii. Modeling the network elements and steady state computation.
- ix. Modeling for dynamic simulations.
 - x. The control of the state quantities in power systems.
 - xi. Stability analysis in power systems.
- xii. Analysis of the operation states and corrective solutions.
- xiii. Electricity market.
- xiv. Intelligent electrical networks.

In the classical theory, the frequency of a power system is a global quantity that is maintained around a reference value by specific actions of continuous balancing between generation and load. Any power unbalance will result in a positive or negative frequency deviation in the power system with respect to the reference value. The system operator has the responsibility of maintaining the power balance at any time instant according to the technical codes for frequency control.

In the interconnected power systems, characterized by large inertia available in the rotational masses of the synchronous generators (turbo- and hydro-units), the frequency deviations caused by the power unbalances are small. The frequency control strategies were developed and implemented classically based on some specific phenomena specific to some operating conditions. In the ENTSO-E interconnected power system (the continental area), a power unbalance, such as the disconnection of a power plant, has a low impact on the system frequency. However, as the mechanical inertia available in the classical generators decreases, the frequency related phenomena are more intense, and they can lead to instability.

The last two decades have been characterized by important changes with a major impact on the phenomena specific to the frequency dynamics and the frequency control. Among these, it is mentioned:

- The large-scale application of power electronics will result in low total inertia constant which cause large oscillations in case of sudden perturbations (ex.: short-circuits, power unbalances, etc.).

- The power produced by the wind and photovoltaic power plants depend on the primary energy source (wind and sun), many times unpredictable. For economic reasons, these are usually exploited at the maximum power, resulting in intermittent generation. Under these conditions, the power unbalances are rapidly modified causing fast frequency fluctuations.
- The increased share of generation from renewable energy sources, in these conditions, lead to reduced spinning reserve available in classical generators, which can affect the power system security.
- The significant technological evolution based on power electronics is also seen on the load side. The specific problems associated with these types of loads are the sudden variation of the power connected/disconnected to/from the network. By comparison, in the past, most of the loads were characterized by slow variations and operation at almost sinusoidal voltage/current.

The security of a power system is very important not only for the appropriate operation of the power system but also for the economic sustainability of the European Union. The frequency specific problems can lead to a major blackout in ENTSO-E. The history showed that, even under strict operational constraints in all the interconnected power systems from ENTSO-E, the major blackouts can occur for multiple reasons. The thesis presents several proposals that are the object of the current preoccupations but also plans for future activities with the students.

The professional experience of the author related to the subject of the habilitation thesis is linked to several scientific research or consultancy projects, among which:

- *Renewables in a Stable Electric Grid* (RESERVE), H2020-LCE-2016-RES-CCS-RIA, Grant nr. 727481, 2016-2019 (**lead investigator of UPB**).
- *Study regarding realization of automation for unit shedding in critical conditions of evacuating the power produced in areas with rapidly developing renewable energy sources*, Research contract no. C361/16.09.2014 in partnership with S.I.S. S.A. for C.N. Transelectrica S.A., 2014-2015 (**lead investigator of UPB**).

The end part of the chapter presents seven research directions specific to the thesis subject, each direction including both the achievements and the future plans.

In **Chapter 2**, titled “**General aspects regarding the frequency control and stability**”, the main frequency control principles in power systems are presented, including the structure and the principles of the hierarchical levels, from the inertial response, to the primary control, then to the secondary frequency control. The explanations regarding the inertial response come together with the presentation of some records from the Romanian power system, which emphasizes the time intervals in which the kinetic energy available in the rotational masses is deployed, mainly in the nuclear units. The description of the primary and secondary frequency control levels includes also the results of the numerical simulations that emphasize the dynamic behavior of the various power plants. The necessity of approaching this subject is explained also by the brief description of the three major blackouts from ENTSO-E (28 September 2003, 4 November 2006, and 8 January 2021), that emphasizes the vulnerability of the interconnected power systems and the necessity to implement new solutions, in the context of increased share of generation from renewables.

Understanding the dynamic behavior of a power system requires appropriate knowledge related to modelling and simulation of power systems. The author has co-authored five books, among which four in English, published by recognized publishers. Two of them are mentioned here:

- Antonello Monti, Federico Milano, Ettore Bompard, Xavier Guillaud (editori), et al. – *Converter-Based Dynamics and Control of Modern Power Systems 1st Edition*, Elsevier Academic Press, 2021.

- Mircea Eremia, Mohammad Shahidehpour (editors), et al. – Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control, Wiley & IEEE Press, Power Engineering Series, Hoboken-USA, 2013.

In order to understand the dynamic behavior of a power system from frequency viewpoint, monitoring is during major perturbations is necessary. **Chapter 3** presents a series of data collected from the Romanian power system by means of PMU devices, with 25 or 50 reporting rates. The chapter is completed with aspects related to the wide area measurement systems (WAMS) from ENTSO-E and Romania. The future plans of the author include extension towards control and protection (WAMCS). The results of the measurements in the Romanian power system emphasizes the necessity to develop solutions for the fast frequency control.

Considering that for the 2050 time horizon, the ENTSO-E continental Europe will rely mainly on power electronic converters based generation, from renewable energy sources, which means a low level of the total mechanical inertia available in hydraulic power plants, the storage systems will play a very important role for the frequency stability and control. In this context, in **Chapter 4** a synthesis of the applications of the energy storage systems for the frequency control is presented, applications that the author has developed or will develop.

A part of the applications mentioned in chapter 4 are presented in detail in the **Chapter 5**, titled “Applications of the energy storage systems for frequency stability and control”. The author presents the results of the simulations performed on two models, i.e. the Kundur test model and the Romanian transmission system model, which emphasizes the use of battery energy storage systems for the primary and secondary frequency control. Some of these applications are:

- Deployment of batteries for frequency stability and control based on the frequency deviation and the rate of change of frequency as input data.
- Applications of artificial intelligence techniques (fuzzy logic) from the control of the batteries within the primary frequency control level.
- The dynamic control of a virtual power plant (VPP), and the integration of the VPP in the secondary frequency control loop.

Chapter 6, titled “Balancing the active powers in a microgrid”, presents the problem of planning and the real-time control of a microgrid, as a solution to minimize the power unbalances caused by the renewable energy storage systems located in the distribution networks. As the number of these sources is decreasing, the necessity to coordinate them and to integrate them into aggregated dispatchable units is obvious. The simulations presented in the thesis were performed for a real location, within a consultancy project:

- *Smart Micro Grid Controller*, consultancy/research contract no.6 / 30.03.2020 (internal number TEN05.20.01) for Societatea Inginerie Sisteme (director).

One of the most complex solutions to improve the operational safety of the ENTSO-E interconnected power system for the 2050-time horizon is the development of the super-grid by constructing a HVDC network in parallel with the existing electrical network that operates at alternating voltage. **Chapter 7** presents various solutions by which these HVDC grid are used within the frequency control.

The thesis is concluded with **General Conclusions** where the solutions specific to the frequency stability and control proposed by the author are briefly presented.