



Rezumatul Tezei de Doctorat

**Alimentarea cu Energie Electrică a
Marilor Orașe, Utilizând Configurații
Multiterminale cu Convertoare
Modulare Multinivel MMC-HVDC**

de

Ioan – Cătălin Damian

Departamentul de Sisteme Electroenergetice
Universitatea POLITEHNICA din București

Coordonat de

Mircea Eremia, Professor Emeritus



**CUPRINSUL TEZEI**

Cuprins.....	5
Lista de Figuri.....	8
Lista de Notatii.....	12
Mulțumiri.....	13
Abstract.....	14
Rezumat.....	14
INTRODUCERE GENERALĂ.....	15
1. PREZENTARE GENERALĂ A VSC-HVDC.....	18
1.1. Istoria Transportului la t.c.....	18
1.2. CSC-HVDC versus VSC-HVDC.....	21
1.3. Analiza Diferitelor Tipuri de Tehnologii VSC-HVDC.....	22
1.3.1. Convertorul cu Două Niveluri.....	22
1.3.2. Convertorul cu Diodă Legată la Pământ.....	23
1.3.3. Convertorul cu Condensator Flotant.....	25
1.3.4. Convertorul Modular Multinivel.....	26
2. DESCRIERE DETALIATĂ A CONVERTORULUI MMC-HVDC.....	28
2.1. Structura Submodulelor convertorului MMC-HVDC.....	28
2.1.1. Circuitul Semi-Punte.....	28
2.1.2. Circuitul Punte-Întregă.....	30
2.1.3. Stiva cu Circuit Dublu.....	31
2.1.4. Circuitul cu Condensator Flotant.....	32
2.1.5. Circuitul cu Neutrul Comun.....	32
2.1.6. Circuitul cu Cinci Niveluri, Conectat în Cruce.....	33
2.2. Instalații de referință MMC-HVDC pentru Transportul Energiei în Format Nod-la-Nod sau Multiterminal.....	34
2.2.1. Proiectul Trans Bay Cable.....	35
2.2.2. Nan'ao.....	35
2.2.3. Zhoushan.....	36
2.2.4. Interconectorul Nemo.....	37
2.2.5. Proiecte HVDC Viitoare.....	38
2.3. MMC-HVDC Hibrid.....	38
3. MODELAREA MMC-HVDC.....	42
3.1. Modelul cu Valori Medii (AVM).....	42
3.1.1. Reprezentarea în Zona de t.a. a AVM.....	43
3.1.2. Reprezentarea în Zona de t.c. a AVM.....	48
3.2. Modelul Detaliat Echivalent (DEM).....	49
3.2.1. DEM pentru MMC-HVDC cu SM Semi-Punte.....	49
3.2.2. DEM pentru MMC-HVDC cu SM Punte-Întregă.....	52
3.2.3. DEM pentru MMC-HVDC cu SM Stivă cu Circuit Dublu.....	54
3.3. Modelul de Regim Permanent.....	57
3.3.1. Modelul rețelei la t.a.....	58
3.3.1.1. Rețeaua la t.a.....	58
3.3.1.2. Interfața t.a./t.c. (Convertor HVDC).....	58
3.3.2. Rețeaua la t.c.....	60
3.3.3. Calcule de Regim Permanent prin Metoda Secvențială.....	60
3.3.3.1. Calcule pentru Rețeaua de t.a.....	62



3.3.3.2. Calcule pentru Rețeaua de t.c.	65
4. CONTROLUL MMC-HVDC.....	71
4.1. Controlul Nivelului Superior.....	71
4.1.1. Transformarea Clarke și Park	71
4.1.2. Ecuațiile pentru Puterea Activă și pentru Puterea Reactivă în sistemul (dq0).....	74
4.1.3. Modele pentru Proiectarea Regulateorilor Convertoarelor MMC-HVDC.....	76
4.1.4. Proiectarea Buclei Interne pentru Controlul MMC-HVDC	78
4.1.5. Proiectarea Buclelor Externe de Putere Activă și de Putere Reactivă pentru Controlul MMC-HVDC	82
4.1.6. Proiectarea Buclelor Externe de Tensiune Continuă pentru Controlul MMC-HVDC	84
4.2. Controlul Nivelului Inferior.....	85
4.2.1. Modulația în Durată a Impulsurilor	85
4.2.2. Tehnici de Echilibrare a Tensiunii Condensatoarelor	89
5. REȚEA MMC-HVDC MULTITERMINALĂ	90
5.1. Planificarea Dezvoltării unei Rețele Multiterminale MMC-HVDC.....	90
5.2. Operarea unei Rețele Hibrade HVAC-HVDC.....	91
5.3. Protecția unei Rețele HVDC.....	95
5.3.1. Detectarea și Localizarea Defectelor într-o Rețea la t.c.	96
5.3.2. Întreruperea Defectelor	97
5.4. Strategii Speciale pentru Controlul unei Rețele Multiterminale MMC-HVDC	99
6. ALIMENTAREA MARILOR ORAȘE FOLOSIND MMC-HVDC MULTITERMINAL	102
6.1. Factori din Europa și Romanian care Determină Implementarea Rețelelor MMC-HVDC ce Alimentează Marile Orașe.....	102
6.2. Proiecte în Lume și Perspective.....	105
6.2.1. Proiectul Zhoushan.....	106
6.2.2. Proiectul KunLiuLong.....	106
6.2.3. Interconectorul EuroAsia.....	107
6.3. Proiecte și Perspective în România.....	107
7. STUDIU DE CAZ.....	111
7.1. Simulări de Regim Permanent.....	112
7.1.1. Scenariu 1 – Regimul Permanent al unui Sistem Hibrid	115
7.1.2. Scenariul 2 – Regimul Permanent în Timpul Întreruperii Convertorului B1	117
7.1.3. Scenariul 3 – Regimul Permanent în Timpul Întreruperii Convertorului B1 și a Modificării Consemnului Convertorului DC/DC	119
7.1.4. Scenariul 4 – Regimul Permanent în Timpul Modificării Modulului de Control al Convertorului B1.....	121
7.2. Simulări de Regim Dinamic pentru o Legătură MMC-HVDC	123
7.2.1. Calculul Coeficienților PI și Întocmirea Diagramei Bode	125
7.2.2. Buclele de Control pentru Invertor și Redresor	129
7.2.3. Transformata Park Directă și Inversă	130
7.2.4. Simulări.....	131
7.2.4.1. Scenariul 1.1 - Legătură Cigre HVDC cu Două Terminale	133
7.2.4.2. Scenariul 1.2 - Legătură Cigre HVDC cu Două Terminale	135
7.2.4.3. Scenariul 2.1 - Rețea HVDC cu Două Terminale între București and Cernavodă, Submodule Punte-Întregă	136
7.2.4.4. Scenariul 2.2 - Rețea HVDC cu Două Terminale între București and Cernavodă, Submodule Punte-Întregă	139
7.2.4.5. Scenariul 3.1 - Rețea HVDC cu Trei Terminale între Cernavodă, București and Târnița	140



7.2.4.6. Scenariul 3.2 – Rețea HVDC cu Trei Terminale între Cernavodă, București and Tarnița, Schimbarea Direcției de Circulație a Puterilor	143
8. CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE	145
8.1. Concluzii	145
8.2. Contribuții Personale	146
8.3. Perspective	147
Bibliografie	148
Anexă 1	155

REZUMAT

Obiectivul acestei teze provine dintr-o necesitate reală, având în vedere că sistemele electroenergetice actuale devin din ce în ce mai încărcate din cauza creșterii cererii de energie, atât din partea consumatorilor industriali, a celor de birouri, cât și a celor rezidențiali. Într-o cercetare publicată de *Administrația SUA pentru Informații Energetice* în 2017 [1], pot fi aduse mai multe observații. Prima subliniază o creștere estimată cu 28% a consumului energiei electrice la nivel global, până în 2040. A doua concluzie din acest studiu arată că sursele regenerabile vor deține o parte semnificativă din mix-ul total de energie, ceea ce va determina, de asemenea, noi provocări. Un posibil răspuns la creșterea încărcării rețelelor electrice la tensiune alternativă este implementarea de noi rețele de tensiune continuă (HVDC), care permit fluxuri masive de energie într-un mod economic și extrem de controlabil.

Un alt punct de inflexiune care stimulează în continuare dezvoltarea rețelelor HVDC este atenția crescândă asupra condițiilor de mediu. Mai precis, în ultimii 10 ani, au existat numeroase inițiative de reducere a numărului de centrale ce utilizează combustibili fosili, în favoarea surselor regenerabile, cum ar fi centralele fotovoltaice sau turbinele eoliene. Câteva exemple de astfel de inițiative sunt [2] [3]: *Conferința ONU privind Dezvoltarea Durabilă (2012)*, *Summit-ul ONU pentru dezvoltare durabilă (2015)*, *Acordul verde al Uniunii Europene (2019) etc.* Proliferarea surselor regenerabile aduce, de asemenea, mai multe probleme noi. Prima problemă se referă la poziționarea acestor centrale, care se află, cel mai adesea, în regiuni îndepărtate, departe de zonele de consum. A doua problemă provine din natura intermitentă a acestor resurse, din cauza condițiilor meteorologice (nori, furtună, secetă, vreme extremă perturbatoare etc.). În astfel de cazuri, HVDC poate transporta energia într-un mod eficient, de la generare la zone de consum, în parametri operaționali strict controlați, fie în configurația convertorului sursă de tensiune (VSC), fie a convertorului sursă de curent (CSC).

În regiunea Uniunii Europene, cel mai mare factor declanșator al schimbărilor de mediu este Acordul Verde, care oferă o foaie de parcurs cu acțiuni privind utilizarea eficientă a resurselor și reducerea poluării [4]. Mai mult, acesta oferă un cadru pentru finanțarea semnificativă a tuturor acțiunilor care pot asigura că UE va fi neutră din punct de vedere climatic până în 2050. În acest sens, o mare parte din fondurile disponibile sunt direcționate către sectorul energetic în general și modernizarea rețelelor electrice în special. Prin urmare, acordul verde asigură finanțarea adecvată pentru proiecte speciale, cum ar fi legăturile HVDC sau rețelele HVDC, care sunt deosebit de scumpe și au o durată mare de recuperare a investiției (mai mult de 10 ani). Prin urmare, cea mai mare barieră în implementarea rețelelor HVDC, care este costul ridicat al investiției, poate fi acum depășită cu ușurință prin utilizarea granturilor prevăzute în Acordul Verde.

Transportul energiei electrice utilizând convertoare VSC-HVDC este unul dintre cele mai dinamice domenii de cercetare datorită progreselor semnificative cu privire la materialele necesare construcției diferitelor componente, îmbunătățirilor sistemelor de control (de exemplu, sisteme SCADA mai rapide și mai eficiente, senzori cu o precizie mai mare etc.), precum și o experiență mai bună în ceea ce privește funcționarea legăturilor / rețelelor HVDC. Toate aceste aspecte favorizează extinderea tehnologiei, având în vedere că există acum peste 80 de proiecte HVDC, care sunt planificate să fie finalizate în următorii 15 ani. În prezent este arătat un mare interes pentru topologia convertorului modular multinivel (MMC), care este o evoluție a VSC-HVDC clasic.

Obiective principale

Punctul principal al acestei teze îl constituie un subiect de mare interes, care provine din necesitatea alimentării orașelor mari (care sunt cel mai adesea situate departe de zonele de generare) cu o cantitate mare de energie electrică, din resurse regenerabile, prin linii electrice aeriene și subterane pe distanțe mari. Acest lucru poate fi realizat printr-o rețea HVAC costisitoare, dar există limitări semnificative în ceea ce privește stabilitatea tensiunii. Prin urmare, soluția cea mai probabilă este utilizarea unui sistem de transport HVDC (în configurație cu două sau mai multe terminale). În prezent, există puține rețele VSC-HVDC care alimentează orașe mari, iar majoritatea se află în China. Prin urmare, această teză folosește oportunitatea de a analiza un astfel de scenariu pentru regiunea europeană, cu un accent puternic pe o soluție pentru alimentarea capitalei României folosind tehnologia MMC-HVDC. Principalele obiective ale tezei sunt:

- Să efectueze o analiză aprofundată cu privire la tehnologia de ultimă oră MMC-HVDC;
- Să efectueze o analiză a modelelor de regim permanent și regim dinamic;
- Identificarea celor mai bune tehnici de control pentru MMC-HVDC;
- Identificarea rețelelor multiterminale MMC-HVDC existente, care alimentează orașele mari;
- Să descopere limitările actuale ale rețelelor HVDC multiterminale și modalitățile posibile de a le depăși;
- Să evalueze toți pașii privind dezvoltarea MMC-HVDC în format multiterminal;
- Să studieze toate caracteristicile operaționale ale MMC-HVDC în format multiterminal;
- Identificarea factorilor legislativi existenți pentru dezvoltarea MMC-HVDC;
- Extinderea conceptului de alimentare a orașelor mari folosind MMC-HVDC multiterminal;
- Să efectueze simulări de regim permanent și dinamic, pe un sistem de referință;
- Extinderea simulărilor dinamice la un posibil sistem MMC-HVDC multiterminal aplicabil pentru România.

Structura tezei

Această teză este structurată în 8 capitole și conține informații consistente care sunt prezentate în aproximativ 170 de pagini.

Primul capitol al acestei teze oferă o prezentare generală a VSC-HVDC. Mai precis, arată avantajele și dezavantajele acestei tehnologii, în comparație cu CSC-HVDC. Mai mult, prezintă tipurile de VSC, precum și structura și principiile de funcționare. În cele din urmă, oferă exemple cu privire la proiectele existente.

Al doilea capitol se concentrează pe HVDC modular-multinivel, care este un tip special de convertor VSC-HVDC, cu un potențial ridicat. În plus, se face o detaliere din punct de vedere al structurii, iar avantajele și dezavantajele sale sunt subliniate. Mai precis, fiecare tip de submodul este prezentat cu atenție, luând în considerare toate aspectele legate de tensiunea de ieșire, pierderile și comportamentul în timpul unui defect. Mai mult, același capitol prezintă o varietate de proiecte MMC-HVDC existente, cu două sau mai multe terminale, cu scopul de a crea o imagine completă cu privire la valorile nominale maxime (de exemplu, pentru tensiune, putere etc.). Mai mult, sunt oferite câteva exemple cu privire la viitoarele instalații și tendințele în dezvoltarea rețelelor MMC-HVDC. În cele din urmă, un anumit context este dat cercetărilor în curs cu privire la topologiile hibride MMC-HVDC.

În cel de-al treilea capitol, se discută modelarea MMC-HVDC, luând în considerare faptul că anumite reprezentări sunt aplicabile numai în cazuri specifice. Ca atare, se oferă o viziune extinsă asupra modelului detaliat echivalent și a modelului cu valori medii, care asigură o analiză dinamică de succes asupra comportamentului convertoarelor MMC-HVDC. Mai mult, toate aspectele legate de modelele de regim permanent sunt prezentate în detaliu, pentru a sublinia în continuare flexibilitatea și eficiența operațională a MMC-HVDC.

Al patrulea capitol oferă informații despre controlul MMC-HVDC, cu toate aspectele relevante legate de controlul direct sau vectorial, de nivelurile de control, de modulația în durată a impulsurilor, de echilibrarea condensatoarelor etc. Acest subiect este foarte important deoarece influențează performanța oricărui convertor. În acest capitol, este furnizată o tehnică eficientă de acordare a parametrilor PI, care se bazează pe criteriul *modulus optimum*. Ca atare, această tehnică se aplică buclelor de control interne și externe ale convertorului.

Multiterminal MMC-HVDC este discutat în capitolul al cincilea. Acest tip de rețea, care traversează în prezent bariera dintre concept și realitate, are o multitudine de subiecte ce trebuie abordate. În primul rând, se oferă o perspectivă mai cuprinzătoare asupra nivelului actual al tehnologiei, precum și asupra tuturor aspectelor legate de dezvoltarea și funcționarea rețelei HVDC multiterminale. În al doilea rând, se acordă atenție deosebită protecțiilor într-o astfel de rețea: utilizarea întrerupătoarelor de curent alternativ, utilizarea întreruptoarelor de curent continuu și utilizarea topologiilor speciale ale convertorilor.

Tema centrală a acestei teze, care este conceptul de alimentare a orașelor mari, folosind MMC-HVDC, este detaliată în capitolul șase. În plus, sunt discutați toți factorii legislativi (în special Acordul Verde al Uniunii Europene) și sunt date câteva exemple cu privire la instrumentele financiare existente care pot asigura un plan de afaceri pentru proiectele de dezvoltare a MMC-HVDC multiterminale. Pentru a sublinia toate aspectele, sunt date câteva exemple de alimentare a orașelor mari: proiectul Zoushan, KunLiuLong și interconectorul EuroAsia. În plus, sunt identificate unele propuneri și concepte anterioare românești, în domeniul HVDC, și sunt prezentate unele puncte de vedere cu privire la posibile implementări ale rețelelor MMC-HVDC în România.

Capitolul șapte conține studiul de caz, în care sunt abordate mai multe scenarii cu aplicabilitate în România. Primul scenariu discută o legătură HVDC cu două terminale între Cernavodă (care este o mare zonă de generare, formată dintr-o centrală nucleară, precum și din numeroase surse regenerabile) și București (care consumă aproximativ 15% din producția totală de energie a României), care utilizează o combinație de linii electrice aeriene și subterane. Apoi, scenariul este extins în continuare, într-o nouă configurație cu un terminal suplimentar, situat lângă Tarnița (care este o centrală hidroelectrică planificată, de 1000 MW). Toate scenariile sunt abordate folosind simulări dinamice, luând în considerare condițiile realiste.

Capitolul final este orientat spre stabilirea concluziilor și perspectivelor, precum și spre sublinierea tuturor aspectelor originale ale acestei teze.

Rezumând, subiectul acestei teze, „*Alimentarea cu Energie Electrică a Marilor Orașe, Utilizând Configurații Multiterminale cu Convertoare Modulare Multinivel MMC-HVDC*” este de mare interes din cauza creșterii gradului de conștientizare cu privire la protecția mediului (în contextul rețelelor HVAC deja saturate). În această teză, se oferă o abordare originală a subiectului, prin prezentarea tuturor limitărilor existente și prin aplicarea conceptului unei legături / rețele HVDC ipotetice românești. Mai mult, studiul de caz subliniază toate aspectele teoretice și devine o platformă de lansare pentru scenarii inovatoare care sunt adaptate la



potențialele exemple din România. Toate elementele unice sunt promovate în continuare în diferite lucrări, adresate către conferințe și reviste naționale și internaționale: [41] [42] [43] [44] [45] [65] [84] [113] [114] [115].



CUVINTE CHEIE

Tranzistor Bipolar, Transportul Energiei la Tensiune Continuă, Rețea Multiterminală, Control Vectorial, Modulus Optimum, Modulația în Durată a Impulsurilor, Acordarea Regulatelelor, Transformata Park, Modelul Detaliat Echivalent, Modelul cu Valori Medii.

**BIBLIOGRAFIE**

- [1] *International Energy Outlook 2017*, U.S. Energy Information Administration, 2017.
- [2] "UN Documentation: Environment," The United Nations Library, [Online]. Available: <https://research.un.org/en/docs/environment/conferences>. [Accessed 1 August 2020].
- [3] "The European Green Deal, Brussels, Dec. 2019.," Communication from the Commission to the European Parliament, The European Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions, Brussels, 2019.
- [4] "A European Green Deal: Striving to be the first climate-neutral continent," [Online]. Available: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en. [Accessed 2 August 2020].
- [5] A. Small, "When Cities Went Electric," Bloomberg, [Online]. Available: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-03-15/the-war-of-currents-was-waged-in-cities>. [Accessed 2 August 2020].
- [6] N. Hawkins, *Hawkins Electrical Guide: A.C. motors, transformers, converters, rectifiers*, New York: T. Audel & Company, 1917.
- [7] A. Lesnicar and R. Marquardt, "An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range," *IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, Vol 3*, 2003.
- [8] S. Bernet, "State of the Art and Developments of Medium Voltage Converters – An Overview," in *International Conference on Power Electronics*, Warsaw, 2005.
- [9] B. Andersen, H. Baerd, H. Borgen, N. Dhaliwal, A. A. Edris, M. Hyttinen, S. Irokawa, É. Joncquel, J. Jyrinsalo, W. Litzenberger, C. Pincella, F. Schettler, K. Sørbrink, M. Takasaki, N. A. Vovos and D. Woodford, VSC Transmission - Working Group B4.37, Cigre, April 2005.
- [10] K. Sharifabadi, L. Harnefors, H. P. Nee, S. Norrga and R. Teodorescu, *Design, Control and Application of Modular Multilevel Converters for HVDC Transmission Systems*, Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, 2016.
- [11] T. Meynard and H. Foch, "Multi-level conversion: High voltage choppers and voltage-source inverters," in *Proceedings of the 23rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1992.
- [12] E. Solas, G. Abad, J. A. Barrena, S. Aurtenetxea, A. Carcar and L. Zajac, "Modular Multilevel Converter with Different Submodule Concepts - Part I: Capacitor Voltage Balancing Method," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 10, pp. 4525-4535, 2013.
- [13] A. Nami, L. Wang and F. Dijkhuizen, "Five level cross connected cell for cascaded converters," in *ABB corporate research*, 2010.
- [14] U. Gnanarathna, A. Gole and R. Jayasinghe, "Efficient Modeling of Modular Multilevel HVDC Converters (MMC) on Electromagnetic Transient Simulation Programs," in *IEEE Transactions On Power Delivery*, vol. 26, no. 1, January 2011.
- [15] R. Marquardt, "Modular Multilevel Converter: An universal concept for HVDC Networks and extended DC-Bus Applications," *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA*, pp. 502-507, Sapporo, 2010.
- [16] J. Qin, M. Saeedifard, A. Rockhill and R. Zhou, "Hybrid Design of Modular Multilevel Converters for HVDC Systems Based on Various Submodule Circuits," *IEEE Transactions on Power Delivery*, February 2015.
- [17] V. Hoffman and M. M. Bakran, "Four-level MMC Cell Type with DC Fault Blocking Capability for HVDC," in *PCIM Europe*, Nuremberg, 2017.
- [18] Y. Xue, Z. Xu and G. Tang, "Self-Start Control With Grouping Sequentially Precharge for the C-MMC-Based HVDC System," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 1, pp. 187-198, 2014.



- [19] R. Rizana, A. Dekka, B. Wu and M. Perez, "Control of HVDC Transmission System Based on MMC with Three-Level Flying Capacitor Submodule," in *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Seville, 2015.
- [20] A. Nami, L. Wang, F. Dijkhuizen and A. Shukla, "Five Level Cross Connected Cell for Cascaded Converters," in *EPE'13 ECCE-Europe*, 2013.
- [21] "Trans Bay Cable Project Website," [Online]. Available: <http://www.transbaycable.com/operations.html>. [Accessed 1 November 2018].
- [22] "TBC Company Project Presentation," [Online]. Available: www.ewh.ieee.org/r6/san_francisco/pes/pes_pdf/TransBayCable2014.pdf. [Accessed 1 November 2018].
- [23] "Black Start Upgrade for the San Francisco Bay Cable," [Online]. Available: <https://www.modernpowersystems.com/features/featureblack-start-upgrade-for-the-san-francisco-bay-cable-6245877/>. [Accessed 1 November 2018].
- [24] H. Rao, "Architecture of Nan'ao Multi-terminal VSC-HVDC System and Its Multi-functional Control," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 1, no. 1, March 2015.
- [25] "The Nan'ao project web page," [Online]. Available: <http://www.rxpe.co.uk/corporate/news/multi-terminal-vsc-hvdc/>. [Accessed 1 November 2018].
- [26] "World First Five-Terminal VSC-HVDC Transmission Project," [Online]. Available: http://www.nrec.com/en/public/doc_resources/2014/09/10/10/540fb4af446fb.pdf. [Accessed 1 November 2018].
- [27] "Case Study - World's First 5-Terminal VSC-HVDC Links," [Online]. Available: http://www.nrec.com/en/public/doc_resources/2017/12/27/12/5a43236268c7f.pdf. [Accessed 1 November 2018].
- [28] L. Yingyi, H. Xiaoming, Z. Jing and S. Weizhen, "China Upgrades Capacity to the Zhoushan Islands," [Online]. Available: <https://www.tdworld.com/digital-innovations/china-upgrades-capacity-zhoushan-islands>. [Accessed 1 November 2018].
- [29] "Siemens Reference Projects - Nemo Link," [Online]. Available: <https://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/hvdc/references.htm#nemo-link-united-kingdom-belgium/map>. [Accessed 1 November 2018].
- [30] T. Schyvens, "HVDC applied in real projects: Nemo and ALEGrO," in *Electric Energy Systems - University Enterprise Training Partnership (EES-UETP)*, Leuven, 2018.
- [31] "Nemo Link Project Overview," [Online]. Available: <http://www.nemo-link.com/the-project/overview/>. [Accessed 1 November 2018].
- [32] G. Buigues, V. Valverde, A. Etxegarai, P. Eguía and E. Torres, "Present and future multiterminal HVDC systems: current status and forthcoming developments," in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'17)*, Malaga, Spain, 2017.
- [33] M. Haeusler, "HVDC Solutions for Integration of the Renewable Energy Resources," Siemens, September 2017. [Online]. Available: http://regridintegrationindia.org/wp-content/uploads/sites/3/2017/09/5C_5_GIZ17_081_presentation_Marcus_Haeusler.pdf. [Accessed 1 November 2018].
- [34] T. Liu, J. Liu and S. Du, "A Novel Capacitor Voltage Balancing Method for an Improved MMC Circuit with Three-Level Middle Modules," in *IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC)*, Taipei, 2015.
- [35] L. Zhang, J. Qin, D. Shi and Z. Wang, "Efficient Modelling of Hybrid MMCs for HVDC Systems," in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Cincinnati, 2017.
- [36] V. Hoffman and M. M. Bakran, "Optimized Design of a Hybrid MMC and Evaluation of Different MMC Topologies," in *EPE'16 ECCE Europe*, Karlsruhe, 2016.



- [37] J. J. Jung, J. H. Lee and S. K. Sul, "Asymmetric Mixed Modular Multilevel Converter Topology in Bipolar HVDC Transmission Systems," in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Cincinnati, 2017.
- [38] R. Wachal, A. Jindal, S. Denetiere, H. Saad, O. Rui, S. Cole, M. Barnes, L. Zhang, Z. Song, J. Jardini, J. C. Garcia, F. Mosallat, H. Suriyaarachich, P. Le-Huy, A. Totterdell, L. Zeni, S. Kodsi, T. Deepak, P. Thepparat, T. Beddard, J. Velasquez, S. D'Arco, A. Morales, Y. Kono, T. K. Vrana and Y. Yanh, "Guide for the Development of Models for HVDC Converters in a HVDC Grid," Working Group B4.57, Cigre, December 2014.
- [39] M. Eremia, C. C. Liu and A. A. Edris (Eds.), *Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS and Artificial Intelligence*, Hoboken, New Jersey: IEEE and Wiley Publishing Press, 2016.
- [40] E. Solas, G. Abad, J. Berrena, A. Carcar and S. Aurtenetxea, "Modelling, Simulation and Control of Modular Multilevel Converter," in *Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC*, Ohrid, 2010.
- [41] **I. C. Damian**, "A Comprehensive Approach to the Modelling and Control of a High Voltage Direct Current Modular Multilevel Converter," in *10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, March 2017.
- [42] **I. C. Damian**, M. Eremia and M. Sănduleac, "Fault Analysis of a High Voltage Direct Current Link Using Detailed Equivalent Models for Modular Multilevel Converters," in *8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, Cluj, May 2019.
- [43] **I. C. Damian**, M. Eremia and L. Toma, "Advanced Control of a Modular Multilevel High Voltage Direct Current Converter," in *International Conference on Energy and Environment (CIEM)*, Bucharest, October 2017.
- [44] **I. C. Damian**, M. Eremia and A. Ianțoc, "Detailed Modelling and Control of a Multiterminal High Voltage DC Network," in *11th International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, Iași, October 2020.
- [45] **I. C. Damian**, M. Eremia and L. Toma, "Detailed Modelling and Control of a Modular Multilevel Converter with Full-Bridge Submodules in a Multi-Terminal High Voltage DC Network," in *55th International Universities Power Engineering Conference*, Torino, September 2020.
- [46] R. Marquardt, "Modular Multilevel Converter Topologies with DC-Short Circuit Current Limitation," in *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, The Shilla Jeju, Korea, 2011.
- [47] Y. Xue and Z. Xu, "On the Bipolar MMC-HVDC Topology Suitable for Bulk Power Overhead Line Transmission: Configuration, Control and DC Fault Analysis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, 2014.
- [48] M. Eremia (Ed.), *Electric Power Systems: Electric Networks*, București: Editura Academiei Române, 2006.
- [49] J. Beerten, S. Cole and R. Belmans, "Generalized Steady-State VSC MTDC Model for Sequential AC/DC Power Flow Algorithms," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no 2, May 2012.
- [50] G. Asplund, K. Eriksson, H. Jiang, J. Lindberg, R. Palsson and K. Svensson, "DC Transmission Based on Voltage Source Converters," *ABB Power Systems AB Sweden*, 2000.
- [51] N. Chaudhuri and B. Chaudhuri, *Multi-terminal Direct-Current Grids*, Wiley & Sons, 2014.
- [52] D. Jovcic and K. Ahmed, *High Voltage Direct Current Transmission*, Wiley & Sons, 2015.
- [53] M. Gul, N. Tai, W. Huang, M. H. Nadeem, M. Ahmad and M. Yu, "Technical and Economic Assessment of VSC-HVDC Transmission Model: A Case Study of South-Western Region in Pakistan," *Electronics*, vol. 8, no. 1305, 2019.
- [54] K. Ralph, "Power Electronics Exercise: Space Vector," Technische Universitat Munchen, Munchen, 2012.



- [55] [Online]. Available: <https://theses.lib.vt.edu/theses/available/etd-031899-12402/unrestricted/APPENDIXES.PDF>.
- [56] [Online]. Available: http://www.motor-design.com/cmsAdmin/uploads/induction_motor_modelling.pdf.
- [57] [Online]. Available: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/Refframe.pdf>.
- [58] T. Furuhashi, S. Okuma and Y. Uchikawa, "A Study on the Theory of Instantaneous Reactive Power," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 37, no. 1, 1990.
- [59] F. Z. Peng and J. S. Lai, "Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-phase Power Systems," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 45, no. 1, 1996.
- [60] Y. Levron, J. Belikov and D. Baimel, "A Tutorial on Dynamics and Control of Power Systems with Distributed and Renewable Energy Sources Based on the DQ0 Transformation," *Applied Science*, vol. 8, no. 1661, 2018.
- [61] Y. Amirnaser and I. Reza, *Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control and Applications*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.
- [62] R. Reginatto and R. Ramos, "On Electrical Power Evaluation in dq coordinates under Sinusoidal Unbalanced Conditions," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 5, pp. 976-982, 2013.
- [63] M. Zama, *Modeling and Control of Modular Multilevel Converters (MMCs) for HVDC Applications*, Grenoble: PhD Thesis, Université Grenoble Alpes, 2017.
- [64] Y. Levron and J. Belikov, *Lecture 2: The Direct-Quadrature-Zero (DQ0) Transformation*, <https://a-lab.ee/projects/dq0-dynamics>.
- [65] **I. C. Damian** and M. Eremia, "HVDC Link Detailed Model and Control Design," *University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin, Series C, Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 82, no. 4, 2020.
- [66] W. S. Levine, *The Control Handbook*, Jaico Publishing House, CRC Press and IEEE Press, 1999.
- [67] K. J. Astrom and T. Hagglund, *PID Controllers*, Instrument Society of America, 1995.
- [68] G. M. Dimirovski (Ed.), *Complex Systems: Relationships between Control, Communications and Computing*, Springer, 2016.
- [69] S. Preitl and R. E. Precup, "An Extension of Tuning Relations after Symmetrical Optimum Method," *Elsevier-Automatica*, pp. 1731-1736, 14 April 1999.
- [70] C. Bajracharya, *Control of VSC-HVDC for Wind Power*, Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2008.
- [71] S. Debnath, J. Qin, B. Bahrain, M. Saeedifard and P. Barbosa, "Operation, Control, and Applications of the Modular Multilevel Converter: A Review," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 1, 2015.
- [72] G. Konstantinou and V. Agelidis, "Performance Evaluation of Half-Bridge Cascaded Multilevel Converters Operated with Multicarrier Sinusoidal PWM Techniques," *IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.*, pp. 3399-3404, 2009.
- [73] V. Richard, *Motor Control Electronics Handbook*, New York: McGraw-Hill, 1998.
- [74] Y. Deng, Y. Wang, K. H. Teo and R. G. Harley, "A Simplified Space Vector Modulation Scheme for Multilevel Converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016.
- [75] M. Moranchel, F. Huerta, I. Sanz, E. Bueno and F. J. Rodriguez, "A Comparison of Modulation Techniques for Modular Multilevel Converters," *Energies*, vol. 9, p. 1091, 2016.
- [76] S. Prashanth, M. Santhosh and I. Rahul, "Space Vector Modulation Algorithm for Multi Level Inverter," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 4, no. 3, 2013.
- [77] M. Saeedifard and R. Iravani, "Dynamic Performance of a Modular Multilevel Back-to-Back HVDC System," *IEEE Transactions On Power Delivery*, vol. 25, no. 4, October 2010.



- [78] J. Peralta, H. Saad, S. Denrietier, J. Mahseredjian and S. Nguefeu, "Detailed and Averaged Models for a 401-Level MMC-HVDC System," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, 2012.
- [79] H. Ergun, *HVDC Grid Planning*, Leuven, Belgium: EES-UETP Presentation, May 28 – June 1, 2018 .
- [80] H. Ergun, J. Beerten and V. H. Dirk , "Building A New Overlay Grid For Europe," in *Proc. IEEE PES General Meeting PES GM 2012*, San Diego, USA, Jul. 22–26, 2012.
- [81] D. V. Hertem, O. Gomis-Bellmunt and J. Liang, *HVDC Grids for Offshore and Supergrid of the Future*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.
- [82] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. V. Cutsem and V. Vittal, "Definition and Classification of Power System Stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 2, May 2004.
- [83] M. Eremia and M. Shahidehpour (Eds.), *Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control*, Hoboken, New Jersey: Wiley & IEEE Press, 2013.
- [84] B. Puşcaş and **I. C. Damian**, "Cyber Security in Smart Grid – Fundamentals and Experimental Applications," in *CIGRE Regional South-East European Conference (RSEEC)*, Bucharest, October 2020.
- [85] J. Beerten, Modeling and control of DC grids, Ph.D. dissertation, University of Leuven (KULeuven), May 2013.
- [86] A. Egea-Alvarez, J. Beerten, D. Van Hertem and O. Gomis-Bellmunt, "Primary and secondary power control of multiterminal HVDC grids," in *AC and DC Power Transmission (ACDC 2012), 10th IET International Conference*, Dec. 2012.
- [87] J. A. Ansari, C. Liu and S. A. Khan, "MMC-Based MTDC Grids: A Detailed Review on Issues and Challenges for Operation, Control and Protection Schemes," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 168154-168165, 2020.
- [88] W. Leterme, "HVDC Technology and HVDC Grids - HVDC Grid Protection," in *EES-UETP*, Genk, 2018.
- [89] K. Tahata, "HVDC Circuit Breakers for HVDC Grid Applications," in *11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission*, Birmingham, 2015.
- [90] A. Mokhbordoran, A. Carvalho, H. Leite and N. Silva, "A Review on HVDC Circuit Breakers," in *3rd Renewable Power Generation Conference (RPG 2014)*, Naples, 2014.
- [91] "A breakthrough of HVDC circuit breaker in China: application and commercial services," *HVDC News China*, 30 January 2017. [Online]. Available: <https://hvdcnewschina.blogspot.com/2017/01/a-breakthrough-of-hvdc-circuit-breaker.html>. [Accessed June 2020].
- [92] M. Callavik, A. Blomberg, J. Hafner and B. Jacobson, "The Hybrid HVDC Breaker - An innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids," ABB Grid Systems Technical Paper, 2012.
- [93] A. Hassanpoor and J. Häfner, "ABB Power Grids Hybrid HVDC Breaker - Full-Scale Test: A Breakthrough Towards HVDC Grid Realization," ABB, Ludvika, 2020.
- [94] T. Nakajima and T. Irokawa, "A Control System for HVDC Transmission by Voltage Sourced Converters," in *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings*, Edmonton, 1999.
- [95] D. Van Hertem, O. Gomis_Belmunt and A. J. Liang, *HVDC Grids for Offshore and Supergrid of the Future*, Hoboken, New Jersey: IEEE Press and John Wiley & Sons, 2016.
- [96] S. Tagliapietra, "The EU Energy, Climate and Environmental Policies: An Overview," 27 March 2017. [Online]. Available: <http://www.tepsa.eu/download/Lecture-Simone-Tagliapietra.pdf>. [Accessed 15 August 2020].



- [97] European Environment Agency, "Share of renewable energy in gross final energy consumption in Europe," European Environment Agency, 19 December 2019. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/renewable-gross-final-energy-consumption-4/assessment-4>. [Accessed 15 August 2020].
- [98] European Commission, "Communication from the Commission to the European Parliament and the Council—European Energy Security Strategy," *European Commission Technical Report*, 2014.
- [99] European Commission, "EU budget for 2021-2027: Commission Welcomes the Provisional Agreement on Funding for the Environment and Climate Action," European Commission, 13 March 2019. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/news/eu-budget-2021-2027-commission-welcomes-provisional-agreement-funding-environment-and-climate_en. [Accessed 15 August 2020].
- [100] "CEF Energy," European Commission, [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/inea/connecting-europe-facility/cef-energy>. [Accessed 15 August 2020].
- [101] European Commission, "Financing the green transition: The European Green Deal Investment Plan and Just Transition Mechanism," European Commission, 14 January 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/regional_policy/en/newsroom/news/2020/01/14-01-2020-financing-the-green-transition-the-european-green-deal-investment-plan-and-just-transition-mechanism. [Accessed 15 August 2020].
- [102] Administrația Fondului pentru Mediu, "Programe de Finanțare," Administrația Fondului pentru Mediu, [Online]. Available: https://www.afm.ro/programe_finantate.php. [Accessed 15 August 2020].
- [103] "Zhoushan 500 kV Power Transmission Project Enters Operation," China Daily, [Online]. Available: http://zhoushan.chinadaily.com.cn/2019-01/18/c_317388.htm. [Accessed 15 August 2020].
- [104] "World's Largest VSC HVDC Converter Order," RXHK, [Online]. Available: https://www.rxhk.co.uk/corporate/news/worlds-largest-vsc-hvdc-converter-order/?ccm_paging_p_b236=3. [Accessed 15 August 2020].
- [105] G. Li, J. Liang, T. Joseph, T. An, J. Lu, M. Szechtman, B. R. Andersen and A. Q. Zhuang, "Feasibility and Reliability Analysis of LCC DC," *Energies*, pp. 742-759, 2019.
- [106] "EuroAsia at a glance," [Online]. Available: <https://euroasia-interconnector.com/at-glance/>. [Accessed 15 August 2020].
- [107] ABB, "HVDC Light - It's Time to Connect," [Online]. Available: <https://library.e.abb.com/public/285c256c03cd4e168eaae9834ad05c90/PRINTPOW0038%20R7%20HR.pdf>. [Accessed 15 August 2020].
- [108] *Regional Transmission Network Development: Implications for Trade and Investment - Turkey Romania Undersea Cable (Feasibility Study Support)*, Bucharest: Transelectrica, 2013.
- [109] "Moldova-Romania Power Systems Interconnection Project," Moldoelectrica, [Online]. Available: https://www.moldelectrica.md/ro/pages/mold_rom_project_en. [Accessed 15 August 2020].
- [110] M. Ungureanu, A. Cilic, C. Diaconu, D. Ilișiu, L. Toma and M. Eremia, "Network Strengthening by HVDC Technology in the Romanian Power System in the Context of Large Wind Capacities Development," in *HVDC and Power Electronics to Boost Network Performance, Cigre Colloquium*, Brasilia, 2013.
- [111] Transelectrica, "Planul de Dezvoltare a RET," 5 August 2020. [Online]. Available: https://media.hotnews.ro/media_server1/document-2020-08-20-24242130-0-planul-dezvoltare-retelei-electrice-transport-perioada-20202029.pdf. [Accessed 22 August 2020].



- [112] Transelectrica, "Starea Sistemului Național în Timp Real," Transelectrica, 21 August 2020. [Online]. Available: https://www.transelectrica.ro/widget/web/tel/sen-harta/-harta_WAR_SENOperareHartaportlet. [Accessed 21 August 2020].
- [113] **I. C. Damian**, M. Eremia and L. Toma, "Modelling and Control of a Novel East-European Multiterminal High Voltage DC Network," in *4th International Conference on Power and Energy Engineering (ICPEE)*, Xiamen, November 2020.
- [114] **I. C. Damian**, M. Eremia and M. Sănduleac, "A Cost Effective Boost Converter for a Hybrid Low- Voltage Neighbourhood Network," in *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, Iași, October 2018.
- [115] **I. C. Damian**, M. Eremia and A. Ianțoc, "A Novel Multiterminal High Voltage DC Network in the Black Sea Region," in *International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering*, Bucharest, November 2020.