

SISTEM AVANSAT DE ÎNCĂRCARE WIRELESS DE MARE PUTERE UTILIZÂND TRANSFORMATOR ELECTRONIC PENTRU VEHICULE ELECTRICE

Valeriu BOSTAN¹, Tiberiu TUDORACHE², Andrei MARINESCU³, Mihai SĂNDULEAC⁴
^{1,2,4} Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București
³ASTR, Craiova

valeriu.bostan@upb.ro¹, tiberiu.tudorache@upb.ro², andrei.marinescu@ieee.org³,
mihai.sanduleac@upb.ro⁴

Rezumat. Tranziția rapidă de la vehiculele clasice echipate cu motoare cu ardere internă, la Vehicule Electrice (VE) este însoțită în prezent de numeroase provocări atât de ordin tehnic, cât și de ordin economic. Una dintre acestea este cea referitoare la rețeaua de distribuție a energiei electrice care necesită modificări majore și investiții importante pentru a putea acomoda un număr tot mai mare de stații de încărcare pentru VE, de puteri instalate tot mai mari. O tehnologie promițătoare care ar putea avea o contribuție pozitivă în acest domeniu este transformatorul electronic (Solid State Transformer) care ar putea înlocui transformatoarele de distribuție clasice. Un SST este alcătuit din componente electronice de putere complexe și este mult mai flexibil decât transformatoarele clasice permițând reglarea cu ușurință și precizie a tensiunii și frecvenței în circuitul secundar indiferent de gradul de încărcare și de tipul sarcinii. Lucrarea de față se concentrează pe simularea numerică a unui sistem flexibil de încărcare wireless de mare putere care poate fi utilizat pentru VE grele și comerciale. Simulările efectuate au la bază modele numerice realizate în mediul Matlab/Simulink și permit estimarea comparativă a performanțelor sistemului de încărcare wireless studiat, atât în varianta cu transformator de distribuție clasic, cât și în varianta cu transformator electronic.

1. INTRODUCERE

Unul dintre principalele sectoare ce contribuie major la emisia de CO₂ la nivelul UE este cel al transporturilor, cu o cotă de peste 50 % din total [1]. Reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră în acest sector necesită o tranziție cât mai rapidă de la sisteme de transport bazate pe motoare cu ardere internă la sisteme bazate pe motorizare electrică [2]. O dată cu creșterea numărului de Vehicule Electrice (VE) în circulația urbană și interurbană, apar noi provocări tehnice și economice cum ar fi necesitatea dezvoltării accelerate de noi capacități de producere a energiei electrice din surse regenerabile pentru reducerea ponderii utilizării combustibililor fosili, respectiv necesitatea de creștere rapidă a numărului stațiilor de încărcare pentru VE.

În prezent, un interes deosebit îl prezintă dezvoltarea stațiilor de încărcare rapidă și ultrarapidă a bateriilor VE pentru a reduce timpul de încărcare specific în condițiile creșterii capacității bateriilor atât pentru VE ușoare cât și pentru autobuze și camioane electrice [3-4]. Stații de încărcare de acest tip, cu contact (de tip Plug-in), cu puteri de 100 kW până la 350 kW sunt deja implementate în multe țări (ex. SUA, China, UE) [5] și poartă denumirea generică eXtreme Fast Charging (XFC) [6]. Există însă mai multe limitări la aceste stații XFC printre care putem menționa:

- conectorul și cablul de alimentare de la stație până la VE este destul de greu chiar dacă se folosește răcirea forțată, cu lichid; de pildă în cazul unei stații de 200 kW la 400V [7-8], greutatea conectorului și a cablului de alimentare este prea mare pentru un șofer obișnuit, masa totală a acestuia fiind de peste 20 kg,

- realizarea contactelor cere măsuri speciale.

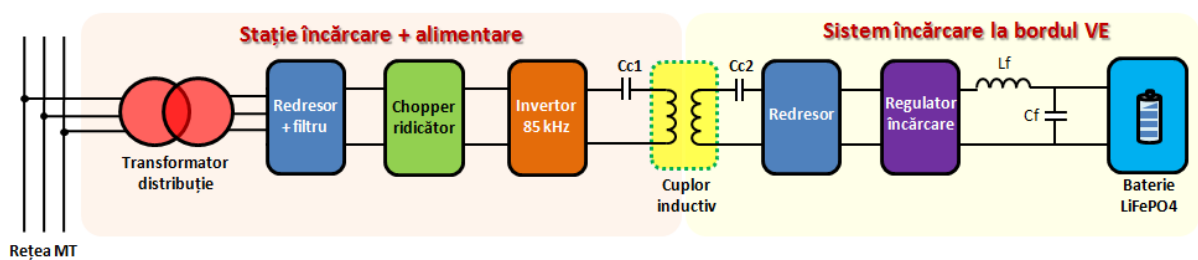
Prin creșterea tensiunii stațiilor de încărcare de tip XFC se poate reduce curentul de încărcare și prin urmare, se poate reduce masa conectorului și a cablului de alimentare de la stație până la VE. Crescând tensiunea de încărcare la 800 V se pot realiza stații sigure până la puteri nominale de 350 kW [9-10].

O alternativă la tehnologia de încărcare a bateriilor VE cu contact (Plug-in) este tehnologia de încărcare fără fir (wireless) care elimină complet cablul, asigură implicit izolarea galvanică între circuitul stației și cel al VE, este comodă și sigură în exploatare pentru șofer [11]. Cu toate acestea, sistemele de încărcare wireless au, de obicei, o eficiență și o densitate de putere mai mici în comparație cu sistemele de încărcare cu contact.

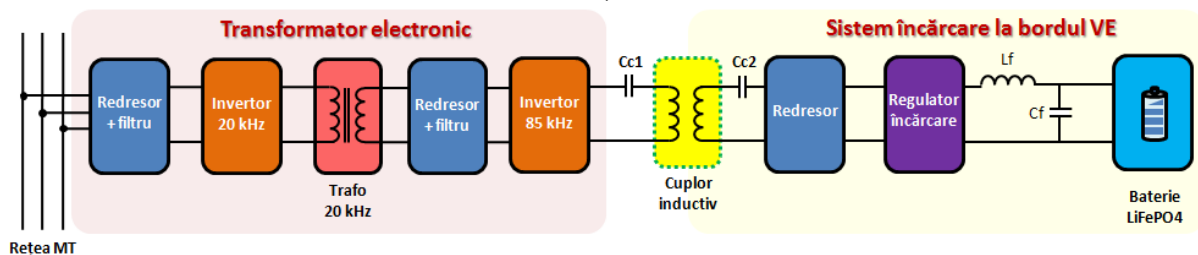
Stațiile wireless de încărcare rapidă denumite Wireless eXtreme Fast Charger (WXFC) nu mai sunt o fantezie [3], ci se află în curs de standardizare de către SAE prin publicația SAE J2954/2 care urmează să fie publicată în acest an [13]. Se prevăd în acest sens puteri de încărcare, în prima etapă, de până la 500 kW, cu alimentarea primară din rețeaua de MT care include surse regenerabile și înlocuirea transformatorului coborâtor de JF folosit până în prezent [3-4] cu un transformator electronic de tip SST [14-16] însoțit de numeroase avantaje (volum și masă reduse, flexibilitate superioară, randament bun la încărcări mai reduse, structură Modular Multi-Level Converter (MMC) realizată cu circuite SiC) [5, 17-21].

Studiul de față este concentrat pe analiza numerică a unui sistem de încărcare wireless ultrarapid (135 kW și 800 V) a bateriilor VE grele (autobuze și camioane electrice) prevăzut cu SST, Fig. 1a, realizată în comparație cu un sistem similar, dar echipat cu un transformator de distribuție clasic, Fig. 1b [3-4]. Calculele numerice sunt realizate pentru un sistem de încărcare wireless utilizând pachetul de programe Matlab/Simulink®.

Analiza numerică a fost efectuată în vederea estimării performanțelor algoritmilor de comandă implementați pentru controlul celor două configurații menționate mai sus (sistem echipat cu SST, respectiv sistem echipat cu transformator de distribuție clasic), respectiv pentru analiza comportamentului dinamic ale sistemelor considerate, în ansamblu.



a)



b)

Fig. 1. Topologiile studiate ale sistemelor de încărcare fără fir a bateriilor VE grele (WXFC systems); a) sistem clasic cu transformator de distribuție; b) sistem prevăzut cu transformator electronic (SST).

2. DESCRIEREA MODELELOR NUMERICE

2.1. Modelul Simulink al sistemului de încărcare wireless cu topologie clasică

Sistemul de încărcare wireless cu topologie clasică, destinat VE grele, analizat în lucrare este alcătuit dintr-un transformator de distribuție clasic, un redresor, un chopper ridicător, un invertor, cuplorul inductiv, un redresor și un regulator de încărcare a bateriei. Schema bloc a sistemului propus, realizată în Matlab/Simulink este prezentată în Fig. 2.

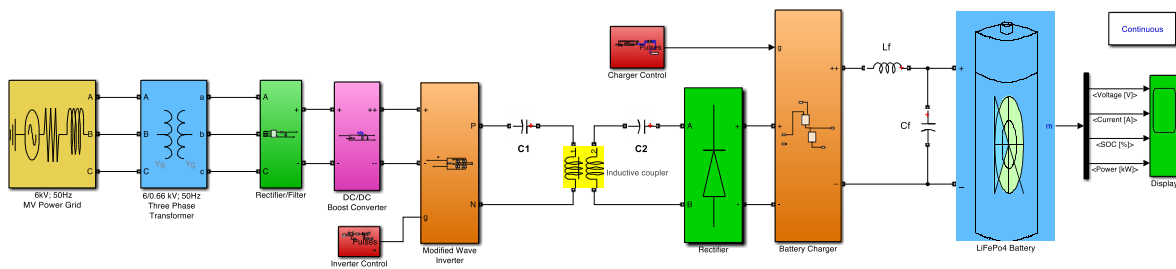


Fig. 2. Schema Matlab/Simulink a sistemului de încărcare wireless cu topologie clasică (sistem echipat cu transformator de distribuție), destinat VE grele.

2.2. Modelul Simulink al sistemului de încărcare wireless echipat cu transformator electronic

Sistemul de încărcare wireless echipat cu SST propus în lucrare este alcătuit dintr-un transformator electronic, cuplorul inductiv, un redresor și un regulator de încărcare a bateriei. SST este la rândul său compus dintr-un redresor, un invertor de medie frecvență (20 kHz), un transformator de medie frecvență (20 kHz), un redresor, și un invertor de de medie frecvență (85 kHz). Schema bloc a sistemului propus, realizată în Matlab/Simulink este prezentată în Fig. 3.

Transformatorul electronic alimentat din rețeaua de Medie Tensiune (MT) are o construcție modulară de tip MMC (Multilevel Modular Converter). Există două variante de sisteme WXFC și anume: ISOS (intrare serie/ieșire serie) sau ISOP (intrare serie/ieșire paralel). În acest studiu s-a ales varianta ISOS datorită tensiunii relativ mari necesare pentru alimentarea bobinei primare a cuplurului inductiv al sistemului de încărcare wireless.

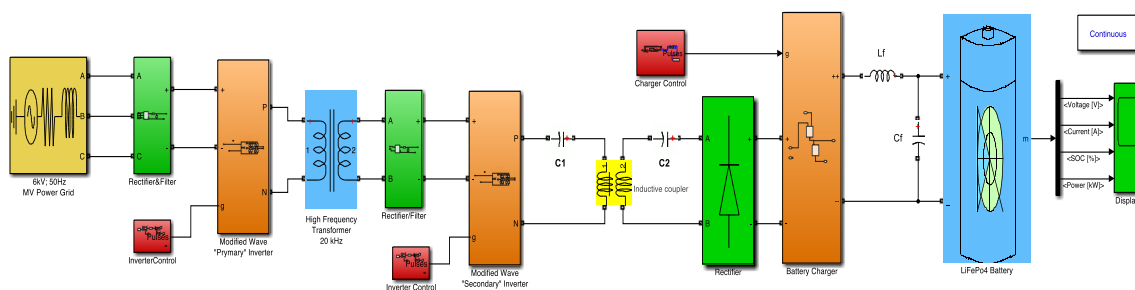


Fig. 3. Schema Matlab/Simulink a sistemului de încărcare wireless echipat cu transformator electronic (SST), destinat VE grele.

3. REZULTATE NUMERICE

3.1. Sistem de încărcare wireless cu topologie clasică

În urma simulărilor efectuate pentru o rată rapidă de încărcare (constanta de timp a bateriei a fost intenționat redusă pentru a permite ajustarea rapidă a algoritmilor de comandă), respectiv pentru o rată normală de încărcare a bateriei VE s-au obținut rezultatele numerice prezentate în Fig. 4 a) și Fig. 4 b) unde sunt afișate variațiile în timp ale tensiunii bateriei, ale curentului de încărcare, ale nivelului de încărcare (SOC - State Of Charge) și ale puterii injectate în baterie.

Datorită complexității ridicate a schemei electrice specifice sistemelor de încărcare wireless studiate, timpul total de calcul asociat unei simulări numerice de circa 0,1 sec. a fost unul foarte lung, de ordinul orelor, utilizând o tehnică de calcul de generație nouă.

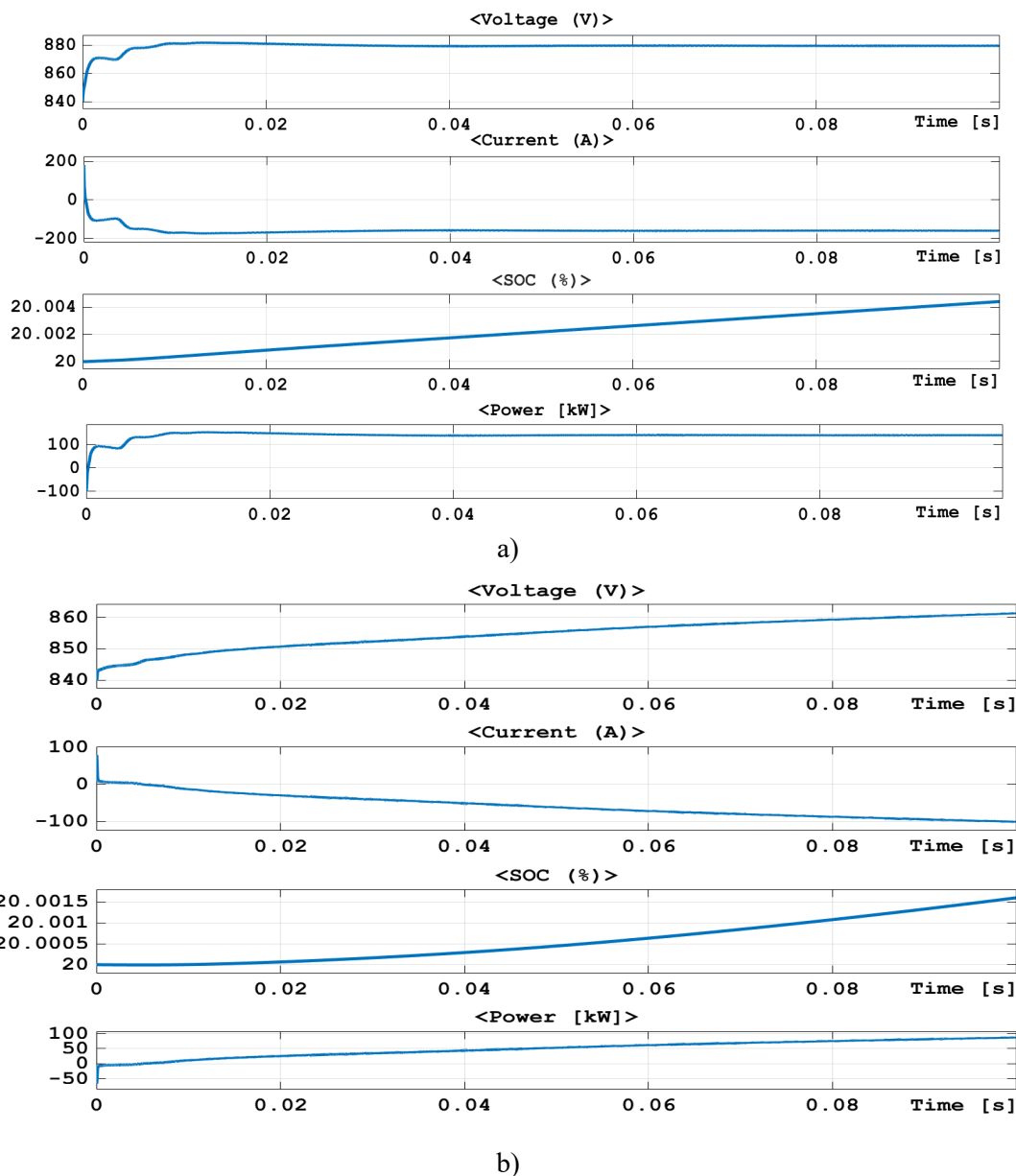
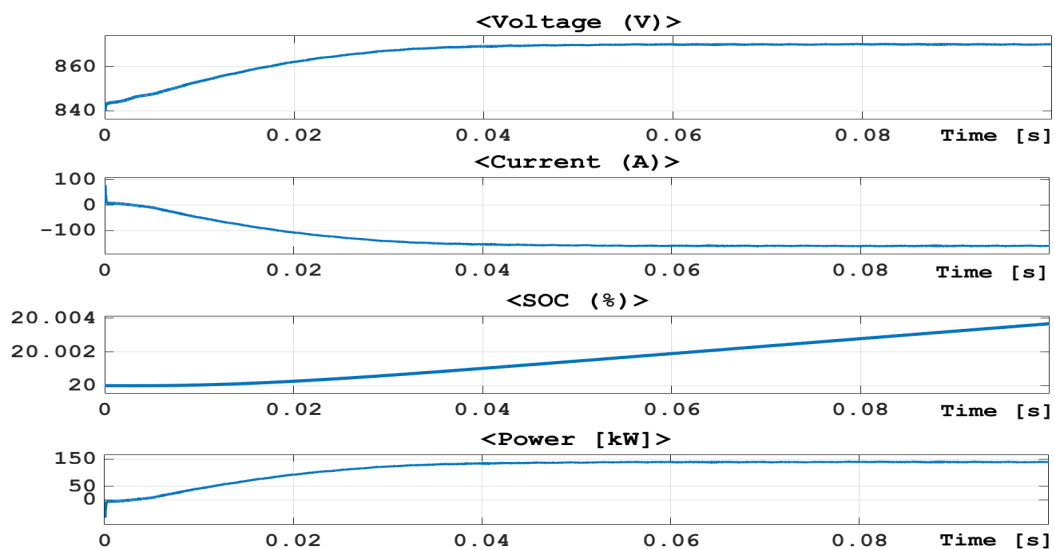


Fig. 4. Rezultatele numerice obținute pentru sistemul de încărcare wireless cu topologie clasică; a) simulare cu rată rapidă de încărcare; b) simulare cu rată normală de încărcare.

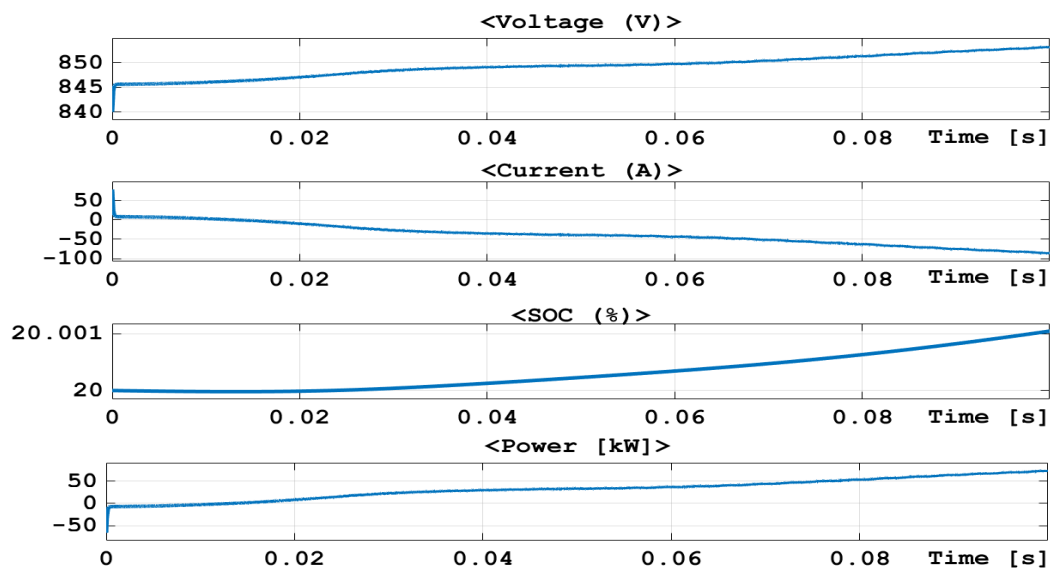
Rezultatele numerice prezentate în Fig. 4 a) evidențiază o funcționare robustă a algoritmului de comandă implementat, care permite limitarea și stabilizarea tensiunii de încărcare, respectiv a curentului și a puterii injectate, odată cu creșterea graduală a nivelului de încărcare a bateriei (SOC). Rezultatele din Fig. 4 b) indică creșterea lentă a tensiunii, curentului injectat și a puterii injectate în baterie simultan cu creșterea lentă a nivelului de încărcare a bateriei (SOC).

3.2. Sistem de încărcare wireless cu transformator electronic

S-au efectuat simulări numerice și pentru sistemul wireless de încărcare a bateriilor VE grele prevăzut cu transformator electronic, iar rezultatele numerice obținute pentru o rată rapidă de încărcare, respectiv pentru o rată normală sunt prezentate în Fig. 5 a) și Fig. 5 b) unde sunt afișate variațiile în timp ale tensiunii bateriei, ale curentului de încărcare, ale nivelului de încărcare (SOC) și ale puterii injectate în baterie.



a)



b)

Fig. 5. Rezultatele numerice obținute pentru sistemul de încărcare wireless cu transformator electronic; a) simulare cu rată rapidă de încărcare; b) simulare cu rată normală de încărcare.

Rezultatele numerice din Fig. 5 a) evidențiază ca și în paragraful anterior o funcționare corectă a algoritmului de comandă implementat, care asigură limitarea și stabilizarea tensiunii de încărcare, respectiv a curentului și a puterii injectate (deși cu o rată mai lentă față de cazul anterior), odată cu creșterea nivelului de încărcare a bateriei (SOC). Rezultatele din Fig. 5 b) evidențiază creșterea lentă a tensiunii, curentului injectat și a puterii injectate în baterie simultan cu creșterea lentă a nivelului de încărcare a bateriei (SOC).

4. CONCLUZII

În lucrarea de față se prezintă o analiză numerică comparativă a unor sisteme de încărcare wireless a bateriilor VE grele, echipate cu transformator de distribuție clasic, respectiv cu SST.

Prin simulare numerică, folosind pachetul de programe Matlab/Simulink s-a efectuat o estimare a performanțelor globale ale celor două sisteme analizate, respectiv s-a validat buna funcționare a algoritmilor de comandă implementați, în două variante de simulare și anume cu rată rapidă (pentru acordarea eficientă a reguletoarelor sistemelor de comandă), respectiv cu rată lentă. Rezultatele numerice au evidențiat evoluțiile în timp ale tensiunii la bornele bateriei, ale curentului și puterii injectate, respectiv ale stării de încărcare a acesteia, toate acestea fiind corespunzătoare din punct de vedere tehnic și funcțional.

În practica sistemelor wireless de încărcare de mare putere, folosirea unui transformator electronic (SST) în locul unui transformator inductiv de fabricație industrială are avantajul realizării simple și rapide a adaptării circuitului la condițiile impuse prin proiect.

CONFIRMARE

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XIX, ediția 2023

BIBLIOGRAFIE

1. *** Cars Cause Biggest Share of Transportation CO2 Emission, Available on: https://www.statista.com/chart/30890/estimated-share-of-co2-emissions-in-the-transportation-sector/?utm_source=Statista+Newsletters&utm_campaign=a9e6939db6-a9e6939db6-350635962, Accessed: Oct. 20.2023.
2. *** Fit for 55, Available on: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-cu-plan-for-a-green-transition/> Accessed on: Oct. 28.2023.
3. T. Tudorache, A. Marinescu, A. Vintila, *Inductive coupler for battery charging system of heavy electric vehicles*, Rev. Roum. Sci. Techn.-Électrotechn. et Énerg., **68**, 1, pp. 71-76, 2023.
4. T. Tudorache, V. Bostan, A. Marinescu, *Numerical Analysis of a Flexible Wireless High Power Charging System for Electric Vehicles*, Proc. of International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering, (ISFEE 2023), 2023.
5. H. Tu, H. Feng, S. Srdic and S. Lukic, *Extreme Fast Charging of Electric Vehicles: A Technology Overview*, in IEEE Transactions on Transportation Electrification, **5**, 4, pp. 861-878, Dec. 2019.
6. S. Srdic and S. Lukic, *Toward Extreme Fast Charging: Challenges and Opportunities in Directly Connecting to Medium-Voltage Line*, in IEEE Electrification Magazine, **7**, 1, pp. 22-31, March 2019.
7. *** Occupational Safety and Health Administration (OSHA), Available on: <https://www.osha.gov/> Accessed: Oct. 28.2023.
8. Ph. Machura, Q. Li, *A critical review on wireless charging for electric vehicles*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, **104**, April 2019, Pages 209-234.
9. S. Lovati, *Shifting the EV Bus to 800 V: Benefits and Design Challenges*, EETimes, pp.28-30, September 2022.
10. L. Ulrich, *800-Volt EV Charging: The Other Palliative for Range Anxiety*, IEEE Spectrum, April 04, 2022.
11. A. Calabro, B. Cohen, A. Daga, J. Miller, and F. McMahon, *Performance of 200-kW inductive charging system for range extension of electric transit buses*, in Proc. IEEE Transp. Electrification Conf. Expo. (ITEC). USA, pp. 19-21, Jun. 2019.
12. ***US Department of Energy (DOE), *Wireless Extreme Fast Charging for Electric Trucks (WXFC-Trucks)*, Available on: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/wireless-extreme-fast-charging-electric-trucks-wxfc-trucks>, Accessed: Nov. 01.2023.

13. *** SAE J2954/2 Wireless Power Transfer for Heavy-Duty Electric Vehicles, Surface Vehicle Information Report, pp. 82, December 2022.
14. J.E. Huber and J.W. Kolar, *Volume/Weight/Cost Comparison of a 1MVA 10 kV/400 V Solid-State Against a Conventional Low-Frequency Distribution Transformer*, in Proc. IEEE Energy Conv. Congress and Expo. (ECCE USA), Pittsburgh, PA, USA, 2014, pp. 4545–4552.
15. J.E. Huber and J.W. Kolar, *Solid-State Transformers: On the Origins and Evolution of Key Concepts*, in IEEE Industrial Electronics Magazine, 10, 3, pp. 19-28, Sept. 2016.
16. M.A. Awal et al., *Medium Voltage Solid State Transformer for Extreme Fast Charging Applications*, 2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Orlando, FL, USA, 2023, pp. 1528-1535,
17. W.V. Wang, *New Multilevel Converter Topologies for Wireless Power Transfer Systems*, Dissertation, pp.195, The University of Auckland, 2021.
18. M. Sanduleac, J.F. Martins, Irina Ciornei, Mihaela Albu, L. Toma, V.F. Pires, L. Hadjidemetriou and R. Sauba, *Resilient and Immune by Design Microgrids Using Solid State Transformers*, MDPI, Energies, pp. 19, 2018, 11(12), 3377
19. H. Feng, R. Tavakoli, O.C. Onar and Z. Pantic, *Advances in High-Power Wireless Charging Systems: Overview and Design Considerations*, in IEEE Transactions on Transportation Electrification, 6, 3, pp. 886-919, Sept. 2020.
20. S. Srdic, C. Zhang, X. Liang, W. Yu, and S. Lukic, *A SiC-based Power Converter Module for Medium-Voltage Fast Charger for Plug-in Electric Vehicles*, in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. and Expo. (APEC), Long Beach, CA, USA, 2016, pp. 2714–2719.
21. S. Srdic and S. Lukic, *Toward Extreme Fast Charging: Challenges and Opportunities in Directly Connecting to Medium-Voltage Line*, in IEEE Electrification Magazine, 7, 1, pp. 22-31, March 2019.