

SISTEME ELECTRICE DE TRANSPORT UTILIZATE ÎN CLĂDIRI NEREZIDENȚIALE - SCĂRI RULANTE, BENZI TRANSPORTOARE

Mihaela-Alexandra BRUNCHI¹, Aurel-Ionuț CHIRILĂ², Ioan-Dragoș DEACONU³
^{1,2,3}Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București, Facultatea de
Inginerie Electrică
mihaela_brunchi@yahoo.com¹, aurel.chirila@gmail.com²,
dragos.deaconu@gmail.com³

Rezumat. În cadrul acestui articol se prezintă diverse tipuri de instalații și echipamente specifice sistemelor de acționare electrică destinate transportului în cadrul clădirilor de tip nerezidențial, care au la bază mecanisme de tipul scărilor rulante și benzilor transportoare. Se analizează tipurile de mașini electrice specifice utilizate în aceste infrastructuri, având în vedere legătura dintre puterea acestora și destinația aplicației. Se compară diversele tipuri de mașini electrice rotative folosite în aceste sisteme, din punctul de vedere al eficienței energetice. De asemenea sunt incluse informații privind reglementări în vigoare privitoare la structura și configurația unor astfel de sisteme electrice.

1. INTRODUCERE

Scările rulante și benzile transportoare reprezintă soluții fiabile pentru transportul eficient al persoanelor în zonele cu trafic intens, precum stații de metrou, centre comerciale și aeroporturi. Independent de destinația aplicației, performanța instalațiilor depinde de sistemul de acționare, alegerea motorului influențând consumul energetic, nivelul de zgomot, costurile de mentenanță și durabilitate.

De-a lungul timpului tehnologia de acționare a evoluat, ducând la implementarea mai multor tipuri de sisteme de acționare cu diverse tipuri de motoare electrice, fiecare fiind optimizat în funcție de viteză, sarcină și modul de operare. Chiar dacă scările rulante și benzile transportoare au principii mecanice similare, din punct de vedere dinamic acestea diferă.

2. SISTEME DE ACȚIONARE

Sistemele de acționare ale scărilor rulante trebuie să asigure funcționarea continuă, cuplu ridicat la turații joase, consum energetic optim și fiabilitate. Performanța sistemelor de transport, nivelul zgomotului și costurile de exploatare sunt influențate în mod direct de alegerea motorului. Pentru acționarea sistemelor de transport sunt utilizate trei tipuri de motoare: motor asincron trifazat, motor sincron cu magneți permanenți și motorul de curent continuu, care este aproape înlocuit în stațiile de transport moderne [1],[2], unde sursa de energie este alternativă, în majoritatea cazurilor fiind vorba de rețeaua electrică națională.

Motorul asincron reprezintă soluția cea mai răspândită în aplicațiile de scări rulante datorită costului redus și al robusteții sale [3]. Aceste motoare oferă un cuplu potrivit la o turație joasă și sunt adecvate pentru transmisiile mecanice standard, precum reductoarele, lanțurile și roțile dințate. Integrarea acestora cu convertizoare de frecvență permit implementarea unor funcții moderne, cum ar fi pornirea lină, trecerea în modul stand by, sau reducerea vitezei în absența pasagerilor. [1] În ciuda acestor avantaje, motoarele asincrone în comparație cu

motoarele cu magneți permanenți au un randament mai scăzut și pierderi suplimentare datorate alunecării.

Motorul sincron cu magneți permanenți este tot mai des utilizat în aplicațiile moderne datorită eficienței ridicate, și a posibilității de a funcționa fără reductor, având un nivel redus al zgomotului. Principalele caracteristici avantajoase includ un randament ridicat cu cuplu mare la turație joasă. Acest tip de motoare au dimensiuni și greutate reduse, fiind compatibile cu sistemele de control vectorial, însă au un cost al investiției inițiale mai ridicat în comparație cu motoarele asincrone [4],[5].

Motorul de curent continuu reprezintă o tehnologie veche, care este înlocuită treptat. Motoarele de curent continuu au un cuplu mare la pornire, și au avantajul că dispun de un control ușor al turației, tensiunea având o variație ușoară. Dezavantajele utilizării unui astfel de motor sunt mai numeroase: este necesară o întreținere frecventă (înlocuirea periilor), au un randament redus, în cazul unei exploatări continue are o fiabilitate redusă, în timpul funcționării producând vibrații și zgomote mai mari. Datorită consumului ridicat aceste motoare sunt incompatibile cu cerințele actuale de eficiență energetică [1],[3].

2. METODE DE CONTROL

Performanța sistemelor de acționare folosite pentru scările rulante și benzile transportoare nu depinde doar de tipul de motor ales, ci și de metoda de pornire și control implementată. Metoda de pornire influențează în mod direct curentul de pornire și solicitarea rețelei electrice, șocurile mecanice asupra sistemelor de transmisie, consumul energetic pe durata exploatării, adaptabilitatea la condițiile variabile de sarcină, dar și funcționalități avansate (modul standby, monitorizează starea, diagnostichează preventiv).

În ultimele decenii, industria a cunoscut o tranziție progresivă de la metodele de pornire convenționale (de la contactoarele electromagnetice folosite pentru pornire directă) către soluții electronice avansate bazate pe semiconductoare de putere. Evoluția a fost susținută de reglementările tot mai stricte privind eficiența energetică, cerințele privind reducerea emisiilor de CO₂, și necesitatea integrării sistemelor de transport în sistemele de automatizare ale clădirilor (Building Management Systems) [6].

Soft starterul este un dispozitiv electronic prin intermediul căruia pornirea se realizează gradual, prin controlarea tensiunii aplicată motorului în momentul demarării, realizând o tranziție lină către regimul nominal de funcționare. Prin monitorizarea unghiului de amorsare al tiristoarelor (acesta variază între 0° și 180°) se ajustează valoarea tensiunii aplicate statorului motorului, realizând o creștere progresivă de la valoarea inițială (care reprezintă 30-40% din tensiunea nominală) la valoarea nominală completă [7].

Timpul de accelerare este configurat între 2 și 30 de secunde, în funcție de setările aplicației și de inerția sistemului mecanic. Rampa de accelerare poate fi liniară (aceasta se caracterizează prin creșterea constantă a tensiunii în timp) sau în formă de S (fiind definită printr-o accelerare lentă la început, apoi rapidă, apoi din nou lentă pentru controlul precis al vitezei nominale), asigurând confortul pasagerilor și reducând solicitările mecanice [8].

Pornirea directă a unui motor asincron printr-un contactor electromagnetice (metoda DOL), forțează rețeaua electrică, deoarece motorul absoarbe un curent de 6-8 ori mai mare decât cel normal, provocând scăderi de tensiune, care pot perturba funcționarea altor aparate din clădire. Utilizarea soft starterului protejează rețeaua electrică prin reducerea curentului de pornire [9]. De exemplu, în cazul unei scări rulante cu un motor de 11kW, care are un curent nominal de 20A, curentul de pornire este redus de la 120 – 160A cât este în cazul unei porniri directe, la 40 – 80A prin utilizarea soft starterului.

O pornire progresivă duce la eliminarea șocurilor mecanice bruște care acționează asupra lanțurilor de antrenare, a roților dințate, a cuplajelor elastice și a lagărelor, contribuind

astfel la creșterea duratei de viață a acestor componente și reducerea costurilor de mentenanță. Studiile demonstrează că solicitările dinamice ale transmisiei pot fi reduse cu 40 – 60% datorită pornirii progresive, prelungind durata de viață a componentelor [10].

Variatoarele de frecvență reprezintă soluția cea mai bună pentru controlul motoarelor electrice, deoarece permite reglarea simultană a tensiunii și a frecvenței de alimentare, asigurând controlul precis și continuu al vitezei, cuplului și accelerației motorului pe toată durata de funcționare [11].

Prin ajustarea continuă a vitezei motorului în funcție de cererea reală de transport este redus consumul energetic, astfel încât, în cazul scărilor rulante unde traficul este intermitent și este implementat modul standby cu viteză redusă (se scade frecvența de la 50 Hz la 5 – 10 Hz în lipsa pasagerilor) pot fi generate economii energetice cuprinse între 30% și 50% [12]. Variatoarele de frecvență asigură accelerări și decelerări controlabile prin configurarea rampelor de pornire și oprire, eliminând complet șocurile mecanice, oferind totodată confort pasagerilor.

În aplicațiile unde motorul funcționează periodic în regim de generator (atunci când scările rulante se află în coborâre cu sarcină sau în perioada de decelerare), energia mecanică poate fi convertită în energie electrică și gestionată în funcție de capacitățile variatorului de frecvență. Sistemele obișnuite utilizează rezistențe de frânare (choppere) care disipă energia sub formă de căldură. Aceasta reprezintă o soluție simplă dar ineficientă din punct de vedere energetic. Sistemele moderne cu rectificator activ (AFE – Active Front – End) permit returnarea energiei în rețeaua electrică, îmbunătățind eficiența totală a sistemului. De exemplu în stațiile de metrou adânci unde diferența de nivel este mare, energia recuperată poate reprezenta 10 – 20% din consumul total, justificând investiția suplimentară a sistemelor regenerative [13].

Protocoloale de comunicație (Modbus, PROFUBUS – DP, EtherNet/IP, BACnet, CANopen) permit integrarea variatoarelor de frecvență în sistemele de automatizare a clădirilor considerate inteligente (BMS) sau în platformele IoT (Internet of Things). Această conectivitate permite monitorizarea centralizată a parametrilor operaționali în timp real, implementarea strategiilor de optimizare energetică la nivelul mecanismelor, diagnostic de la distanță și mentenanță predictivă bazată pe analiza parametrilor monitorizați (deteriorarea lagărelor prin analiza spectrului vibrațiilor, degradarea izolației) [14].

3. REGLEMENTĂRI

Asemenea tuturor instalațiilor din clădiri, scările rulante și benzile transportoare se supun unor standarde naționale și internaționale. În România, cadrul principal îl reprezintă Legea nr. 64/2008, care vizează funcționarea în condiții de siguranță a instalațiilor de ridicat. Această legislație impune realizarea verificărilor tehnice inițiale și periodice obligatorii de către agenții de inspecție autorizați ISCIR (Inspecția de Stat pentru controlul Cazanelor, Recipientelor sub Presiune și Instalațiilor de Ridicat), menținerea documentației tehnice actualizate, și respectarea prescripțiilor tehnice specifice [15].

Prescripția tehnică PT R 8 din 2010 exemplifică cerințele de proiectare (metoda de calcul a structurii, dimensionarea sistemelor de siguranță, alegerea materialelor), fabricare (procesul de producție, controlul calității), instalare, autorizare, exploatare și întreținere pentru scările și trotuarele rulante [16].

La nivel european, cel care stabilește cerințele de securitate pentru funcționarea eficientă, modurile de operare la viteză redusă și managementul consumului în absența utilizatorilor este standardul SR EN 115 - 1 din 2017 actualizat prin A1 în 2020 [17]. Pentru modernizarea și eficientizare operațională, se aplică standardul SR EN 115-2 din 2010, care reprezintă cadrul pentru optimizarea energetică a instalațiilor existente [18]. Standardul internațional ISO 254745-3 din 2015 oferă metodologia pentru determinarea consumului de

energie, al claselor de eficiență energetică, condițiile în care se măsoară și estimează consumul anual în funcție de profilul de trafic [19]. Directivele Ecodesign (EU 640/2009 [20] și EU 1781/2019 [21]) sunt cele care impun utilizarea motoarelor cu eficiență ridicată cum sunt cele cuprinse în gama IE2 - IE4, contribuind la diminuarea pierderilor mecanice de acționare. Toate aceste normative au rolul de a asigura performanța energetică optimă a scărilor rulante și podurilor rulante, cât și siguranța operațională.

4. EFICIENȚA ENERGETICĂ A SISTEMELOR DE TRANSPORT

Scările rulante și trotuarele rulante sunt consumatori principali în infrastructura modernă urbană și comercială. Conform studiilor, o scară rulantă cu o înălțime de 6m care operează 16 ore/zi, timp de 365 de zile/an, consumă între 7.000 și 15.000 kWh anual, în funcție de fluxul de călători, eficiența sistemului de acționare implementat și strategiile de management energetic folosite [22].

Conform metodologiei ISO 254745 – 3, consumul energetic al unei scări rulante este determinat de mai mulți factori:

- Pierderile fixe, înregistrate când scara funcționează la viteza nominală fără pasageri. Aceasta include pierderile în motor (fier, mecanice, ventilație), pierderile din transmisie (în urmă frecării reductorului, din lagăre și a lanțului) și consumul sistemelor auxiliare (iluminarea treptelor și panourile de control).
- Pierderile datorate sarcinii utile, reprezintă energia necesară pentru transportul pasagerilor, aceasta fiind proporțională cu numărul de persoane, masa medie a pasagerului (75 kg greutatea standard), înălțimea parcursă și numărul de transporturi.
- Pierderile înregistrate în sistemul de acționare, determinate de eficiența motorului electric, a transmisiei mecanice, și pierderile înregistrate de sistemul de control.
- Consumul sistemelor auxiliare, compus din iluminarea treptelor, panourile de control și semnalizare, sistemele de monitorizare și comunicație.

Distribuția specifică a pierderilor pentru o scară cu motor din clasa energetică IE2, cu transmisie standard, fără modul standby, cu un regim de operare de 16 ore/zi dintr-o zonă cu trafic moderat înregistrează pierderi fixe 45%, pierderi datorate sarcinii utile 35%, pierderi datorate sistemului de acționare de 15 % și auxiliare de 5%. Această distribuție demonstrează că majoritatea energiei este consumată independent de transportul pasagerilor, reprezentând principala țintă pentru măsurile de eficientizare energetică.

4. STRATEGII DE OPTIMIZARE A CONSUMULUI ENERGETIC

4.1 Sisteme de control

Implementarea variatoarelor de frecvență cu funcții de management energetic permite realizarea unor strategii de economisire adaptate profilului de utilizare:

- Modul standby cu viteză redusă, reprezintă soluția ideală pentru zonele cu trafic intermitent, această funcție reduce automat viteza scării la 10 – 30% din viteza nominală atunci când senzorii de prezență nu detectează pasageri pentru o perioadă de 30 – 120 de secunde. În momentul detectării unui pasager, VFD accelerează scara la o viteză nominală în aproximativ 1 – 3 secunde [12].
- Oprirea automată în perioadele de inactivitate prelungită și estimată (în intervalul 22:00 - 06:00 în clădirile de birouri, 23:00 – 5:00 la metrou), scara poate fi oprită complet, eliminând consumul. Repornirea în momentul detectării pasagerului poate dura 3 – 8 secunde în funcție de tipul motorului și setările VFD [23].

- Operarea sincronizată a mai multor scări, implică multiple scări conectate în serie sau paralel, unde sistemele de control permit optimizarea consumului prin:
 - Oprirea selectivă în perioadele cu trafic redus, de exemplu pot fi utilizate doar două din patru scări paralele, pasagerii fiind redirecționați.
 - Inversarea dinamică pentru echilibrarea fluxului duce la reducerea aglomerației și crește capacitatea de transport.
 - Pornirea coordonată prin detectarea pasagerilor în punctul de acces la grupul de scări și pornirea anticipată doar a scărilor necesare pe traseul pasagerului (urmărire prin camere).

Pentru implementarea sistemelor de control inteligent este necesară utilizarea unei infrastructuri centralizate (PLC, rețea de comunicație industrială Ethernet,/ PROFINET, software SCADA pentru monitorizare și configurare.

4.2 Eficiența sistemului de acționare

Reglementările Ecodesign impun utilizarea motoarelor cu clasă de eficiență IE3 sau IE4, în locul motoarelor standard cu încadrare energetică IE 1 sau IE 2 deoarece pierderile din motor sunt reduse cu 15 – 35%. De exemplu pentru un motor de 11kW care funcționează 5000 de ore/an un motor încadrat în clasă energetică IE1 cu un randament $\eta = 85\%$, are o pierdere energetică de 9.705 kWh/an, comparativ cu un motor încadrat în clasa energetică IE3 care are un randament de 91,5% și înregistrează pierderi energetice de 5110 kWh/an. Pentru aceeași durată de funcționare.

Fața de motoarele IE3, motoarele cu magneți permanenți fără reductor au un randament de aproximativ 93 -96%, generând astfel economii semnificative.

5. ANALIZĂ COMPARATIVĂ

Pentru a evalua cantitativ performanța configurațiilor au fost realizate simulări prin intermediul programului MATLAB.

Parametrii comuni ai simulărilor:

- Înălțime scară rulantă 6m.
- Viteza nominală $v = 0.5 \text{ m/s}$.
- Înclinare 30° .
- Lățime treaptă $L = 1\text{m}$.
- Masa medie per pasager de 75 kg.
- Orar zilnic de funcționare: 16h/zi,
- Funcționare continuă: 365 zile/an,

Pentru clădirea de birouri:

- Trafic concentrat în intervalul 8:00-10:00, când am considerat perioada de vârf cu 200 de pasageri/oră,
- în intervalul 12:00-14:00 – 150 de utilizatori/oră;
- între orele 17:00-19:00 – 180 de călători/oră,
- în restul zilei 30-80 de călători/oră.

Pentru stația de metrou:

- în intervalul 06:00 – 10:00 – 350 de pasageri/oră,
- în perioada 10:00 – 22:00 – 150 de călători pe oră.

Pentru centrul comercial s-a folosit o medie zilnică de 120 de pasageri/oră.

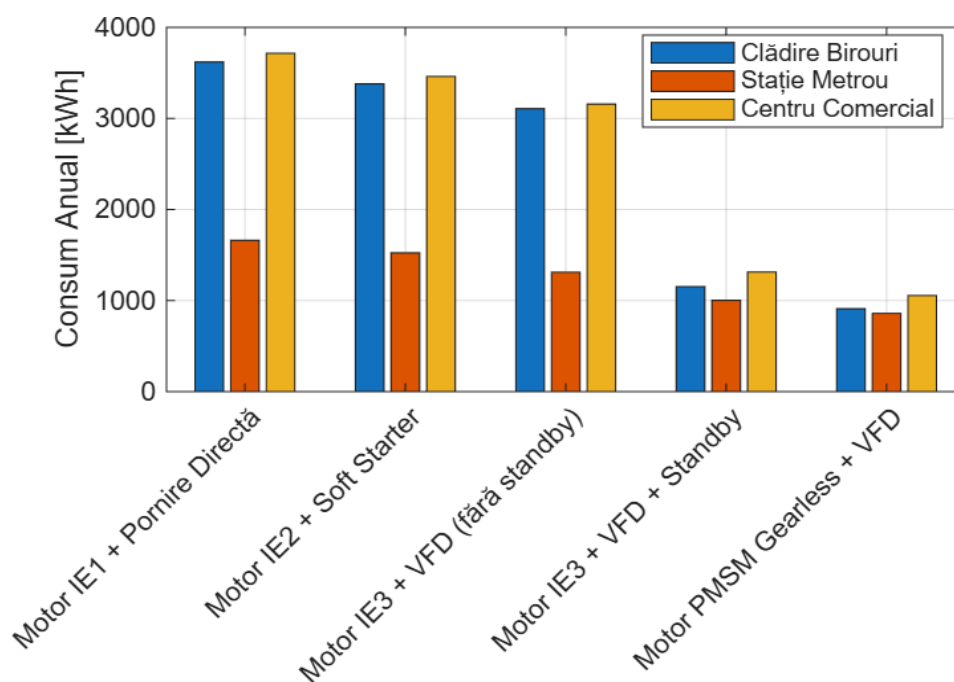


Fig. 1 – Consum energetic anual.

În Fig. 1 este prezentată o analiză comparativă a consumului energetic pe durata unui an, pentru cinci configurații de acționare electrică, și trei aplicații diferite: clădire de birouri, stație de metrou și centru comercial. Rezultatele confirmă necesitatea integrării variatoarelor cu frecvență cu motoarele de înaltă eficiență, cele încadrate în5 clasa de eficiență energetică IE3 sau cele cu magneți permanenți.

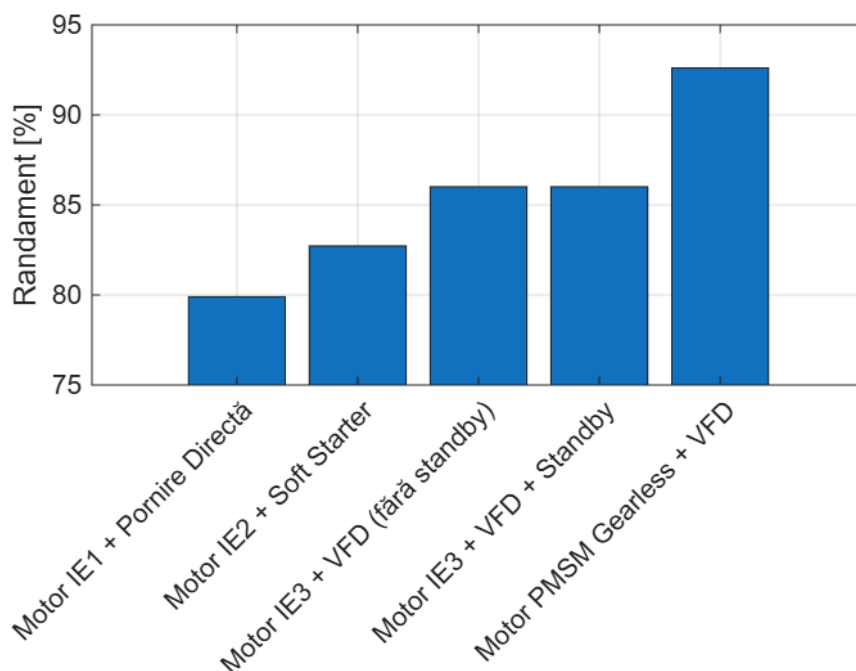


Fig. 2 – Randamentul global al sistemului.

Graficul din Fig. 2 evidențiază tranziția de la acționările convenționale (motor IE! Cu pornire directă) la tehnologia cu magneți permanenți fără reductor, și creșterea randamentului global prin eliminarea pierderilor mecanice datorate transmisiei directe și controlul precis prin intermediul VFD.

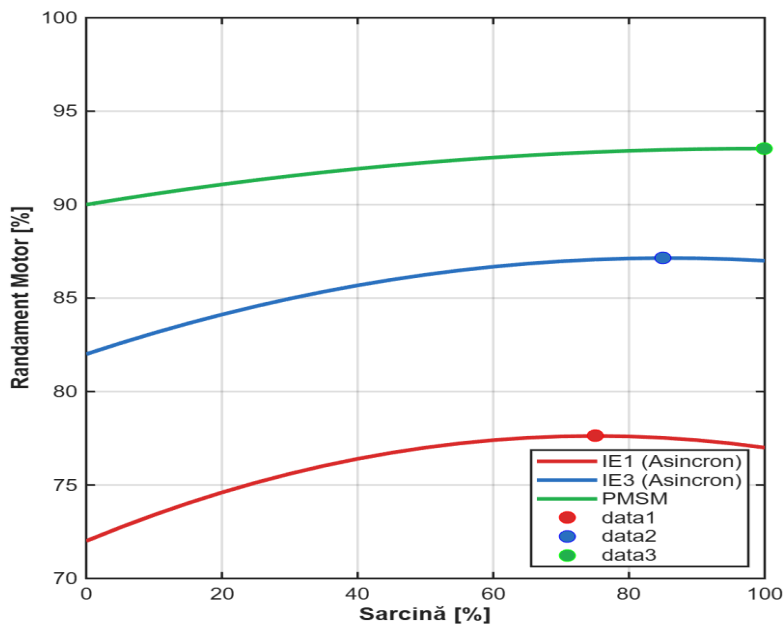


Fig. 3 – Randament motor în funcție de sarcină.

Figura 3 prezintă randamentul pentru trei tipuri de motoare în funcție de gradul de încărcare, evidențiind comportamentul specific al fiecărei tehnologii. Motorul IE 3 este util atunci când regimul de sarcină este constant (între 75-100%), iar cel cu magneți permanenți pentru o sarcină variabilă (20-100%).

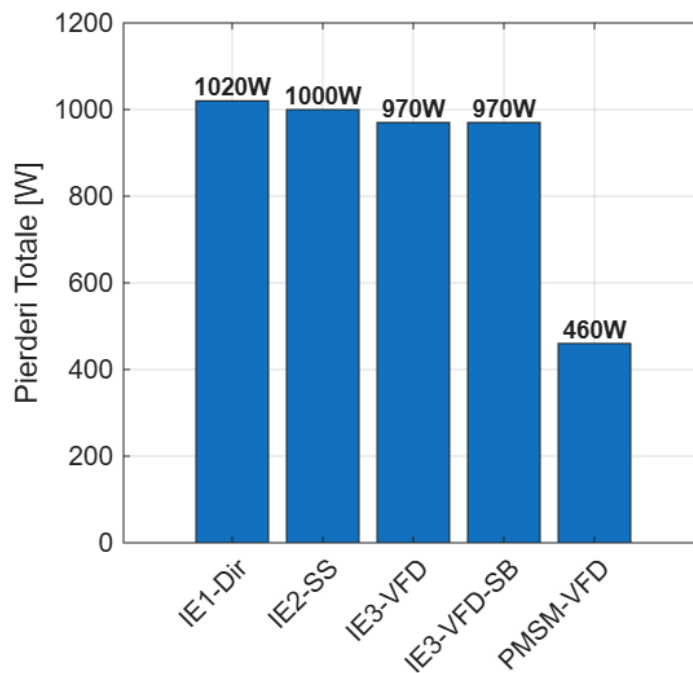


Fig. 4 – Pierderi totale.

Graficul din Fig. 4 evidențiază eficiența sistemelor moderne și necesitatea de a investi în sistemele de acționare al sistemelor de transport pentru a susține o clădire eficientă energetic.

4. CONCLUZII

Analiza comparativă a sistemelor de acționare pentru trotuarele mobile și scările rulante au demonstrat că eficiența energetică depinde de integrarea dintre tipul de motor, metoda de control și strategiile de optimizarea energetică adaptate pentru fiecare profil de utilizare.

Din punct de vedere tehnologic, rezultatele simulărilor demonstrează eficiența configurației motoarelor PMSM gearless cu VFD, ajungând la un randament global de 92,5% și pierderi de 460W/an, reprezentând o diminuare a pierderilor de 55% față de sistemele convenționale cu pornire directă, unde pierderile reprezintă 1020W. Această performanță este rezultatul eliminării pierderilor din rotor, a cutiei de viteze și a angrenajelor dintre motor și sarcina utilă, dar și a controlului vectorial al fluxului magnetic.

Din perspectiva aplicațiilor consumul energetic variază în funcție de profilul de trafic: în clădirile de birouri sunt utilizate funcțiile standby și oprire automată, înregistrând reduceri de 65% prin implementarea VFD, comparativ cu stațiile de metrou și centrele comerciale unde sunt necesare sisteme cu un randament ridicat pe toată durata utilizării.

Confirmare

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XXI, ediția 2025.

BIBLIOGRAFIE

1. Airport Escalators and Moving Walkways—Cost-Savings and Energy Reduction Technologies, ACRP Report 117.
2. L. Tükenmez Ergene, A. Polat, H. Bakhtiarzadeh, *Design of a Permanent Magnet Synchronous Motor Used in Elevators*, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, **33**, 2, pp. 757 - 770, 2013.
3. V. I. Vlachou, T. S. Karakatsanis și A. G. Kladas, *Energy Savings in Elevators by Using a Particular Permanent-Magnet Motor Drive*, Energies, **16**, 12, 2023.
4. G. Zhang , G. Wang ,N. Zhao , D. Xu, *Permanent magnet synchronous motor drives for gearless traction elevators*, Springer, 2022.
5. Fraunhofer ISI, Ecodesign Preparatory study 2021
6. ***https://www.energyefficiencymovement.com/wp-content/uploads/2023/01/ABB_EE_2022-03-WhitePaper_Top-Industrial-Efficiency.pdf
7. ***https://cache.industry.siemens.com/dl/files/364/93038364/att_838012/v1/manual_3RW44_PCS7_library_v80sp1_en-US.pdf.
8. Softstarter Handbook 1SFC132060M0201, ABB Motors and Generators, 2010. Online: <https://library.e.abb.com/public/6b4e1a3530814df0c12579bb0030e58b/1SFC132060M0201.pdf>.
9. 519 – 2022 -IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems, 2022 online: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9848440>.
10. Bearing damage and failure analysis, SKF. Online: https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/093168a92d25cc46/pdf_preview_medium/093168a92d25cc46_pdf_preview_medium.pdf
11. N. Mohan, T.M. Undeland, W.P. Robbins, Power Electronics, Converters, Applications and Design, John Wiley & Sons, 1995.
12. T. Tukia, S. Uimonen, M.-L. Siikonen, C. Donghi, M. Lethonen, *High – resolution modeling of elevator power consumption*, Journal of Building Engineering, **18**, pp. 210 – 219, 2018.
13. G.M. Gotor, Z.G.T. Hoko, G.B. Zulu, *Regenerative braking and energy recovery in hight vertical lift*, American Journal of Sciences and Engineering Reaserch , **8**, 4, 2025.
14. Standard ASHRAE 135 BACnet – A data Communication Protocol for Building Automation and Control Networks, 2024.
15. Legea nr. 64/2008, Monitorul Oficial al României nr. 399, 2015
16. Prescripția tehnică PT R 8 – 2010, Scări rulante și trotuare rulante, Monitorul Oficial al României, Partea I, nr 634 bis, 2010.
17. SR EN 115 – 1:2017, Siguranța scărilor rulante și a trotuarelor rulante – Partea 1: Construcție și instalare, 2017.

18. SRN 115 – 2:2010, Siguranța scărilor rulante și a trotuarelor rulante – Partea a 2 – a: Reguli pentru îmbunătățirea siguranței scărilor rulante și a trotuarelor rulante existente, 2010.
19. ISO 25745 – 3:2015 Performanța energetică a ascensoarelor, scărilor rulante și trotuarelor rulante, Partea a 3 -a: Calculul energetic și clasificarea scărilor rulante și a trotuarelor rulante, 2015.
20. Regulamentul (CE) nr. 640/2009 de implementare a Directivei 2005/32/CE a Parlamentului European și a Consiliului în ceea ce privește cerințele de proiectare ecologică pentru motoarele electrice, 2009.
21. Regulamentul (UE) 2019/1781 al Comisiei din 1 octombrie 2019 de stabilire a cerințelor în materie de proiectare ecologică aplicabile motoarelor electrice și variatoarelor de viteză în temeiul Directivei 2009/125/CE a Parlamentului European și a Consiliului, de modificare a Regulamentului (CE) nr. 641/2009 cu privire la cerințele de proiectare ecologică aplicabile pompelor de circulație fără etanșare independente și pompelor de circulație fără etanșare integrate în produse și de abrogare a Regulamentului (CE) nr. 640/2009 al Comisiei, 2019.