

CUPRINS

Aplicația 1 – Compunerea generală a sistemelor de tracțiune electrică.....	3
1.1 Introducere.....	3
1.2 Sisteme de tracțiune electrică cu vehicule electrice motoare neautonome.....	3
1.3. Sisteme de tracțiune electrică cu VEM autonome.....	9
Aplicația 2 – Substații de tracțiune electrică de curent continuu	11
2.1. Subansamblurile SSTE de c.c.	11
2.2. Măsuri de protecție a muncii în SSTE de c.c.	19
Aplicația 3 – Vehicule electrice motoare alimentate de la linie de contact de curent continuu (vehicule electrice urbane).....	20
3.1. Introducere.....	20
3.2. Vehicule electrice motoare cu aderență la calea de rulare neghidată și echipate cu mașini de tracțiune de c.c. cu colector și cu excitație serie.....	20
3.3. Testarea experimentală a regimului de tracțiune și frânare reostatică a MCC cu rezistență de pornire și frânare.....	27
3.4. VEM de tip troleibuz echipat cu motoare de c.c. cu colector și cu excitație serie, alimentate de la LC de c.c. prin VTC cu tiristoare GTO.....	32
3.5. Testarea experimentală a regimului de tracțiune a MCC cu VTC de un cadran.....	35
Aplicația 4 – Vehicule electrice motoare alimentate de la linie de contact de curent alternativ monofazat (vehicule electrice motoare pentru tracțiunea feroviară interurbană).....	38
4.1. Introducere.....	38
4.2. Locomotiva electrică românească LE-060-EA.....	39
4.3. Testarea experimentală a regimului de tracțiune și frânare reostatică a MCC alimentată prin autotransformator și redresor.....	50
Aplicația 5 – Vehicule electrice motoare echipate cu mașini de tracțiune asincrone trifazate.....	54

Tracțiune Electrică. Aplicații

5.1. Comanda și controlul VEM echipate cu mașini asincrone trifazate și inverter de tensiune.....	55
5.2. VEM de tip troleibuz echipat cu inverter de tensiune și mașină asincronă trifazată cu rotor în colivie	57
5.3. Testarea experimentală a regimului de tracțiune și frânare a mașinii asincrone alimentată printr-un inverter cu caracter de sursă de tensiune.....	60
Aplicația 6 – Problema de dinamica mișcării.....	64

Aplicația 1

COMPUNEREA GENERALĂ A SISTEMELOR DE TRACȚIUNE ELECTRICĂ

1.1. Introducere

Pe plan mondial, există o mare varietate de *sisteme de tracțiune electrică* (STE) realizate în acord cu destinația acestora (transportul urban, suburban sau interurban) și cu tehnologia disponibilă la momentul instalării lor.

În ultimele decenii, s-a înregistrat o extraordinară dezvoltare în domeniul tracțiunii electrice. Ea a fost determinată și însoțită de ritmul alert de dezvoltare a electronicii de putere și a microprocesoarelor, ceea ce a dus la schimbări fundamentale în proiectarea, realizarea și funcționarea sistemelor de tracțiune electrică. Datorită rapidității cu care s-au făcut aceste schimbări, se constată la momentul actual conviețuirea unui număr mare de sisteme de tracțiune de diferite generații.

Astfel, se poate face o clasificare a STE după tipul vehiculelor electrice, și anume: STE cu vehicule electrice autonome (de tip locomotive diesel-electrice, electromobile etc.) și STE cu vehicule electrice neautonome.

1.2. Sisteme de tracțiune electrică cu vehicule electrice motoare neautonome

În Fig. 1.1 se prezintă structura unui STE cu vehicule electrice motoare (VEM) neautonome. În schema de principiu se evidențiază două tipuri de instalații:

(i) instalații fixe:

- substații de tracțiune electrică (SSTE), semnificând instalații fixe pentru racordarea la sistemul electroenergetic de înaltă tensiune și adaptarea parametrilor energiei electrice la necesitățile tracțiunii electrice;

- fideri de alimentare (FA), reprezentând linii electrice aeriene de lungime redusă, care servesc la alimentarea cu energie electrică a liniei de contact de la SSTE;
- linie de contact/șină de contact, rețea electrică de c.c. sau c.a. care asigură transportul energiei electrice în lungul căii de circulație și de la care VEM își culege energia electrică prin intermediul unei prize de curent alunecătoare;
- posturi de secționare (PS), definind instalații fixe amplasate aproximativ la jumătatea distanței dintre două SSTE adiacente cu scopul secționării (sau conectării) longitudinale și transversale a LC din necesități de exploatare, întreținere și protecție;
- posturi de subsecționare (PSS), definind instalații fixe amplasate aproximativ la jumătatea distanței dintre o SSTE și un PS care permit secționarea (sau conectarea) longitudinală și transversală a LC;
- posturi de legare în paralel, care reprezintă instalații fixe cu rolul de a realiza, în cazul LC duble, legarea suplimentară în paralel a ramurilor LC, între SSTE și PS, când în schema generală a STE nu sunt prevăzute PSS;
- cale de rulare, constituind calea de circulație a VEM;
- fideri de întoarcere (FI), reprezentând cabluri sau linii electrice aeriene de racord între șina metalică feroviară sau ramura negativă a LC bifilare și circuitul de forță al SSTE.

(ii) instalații mobile, reprezentate de înseși VEM.

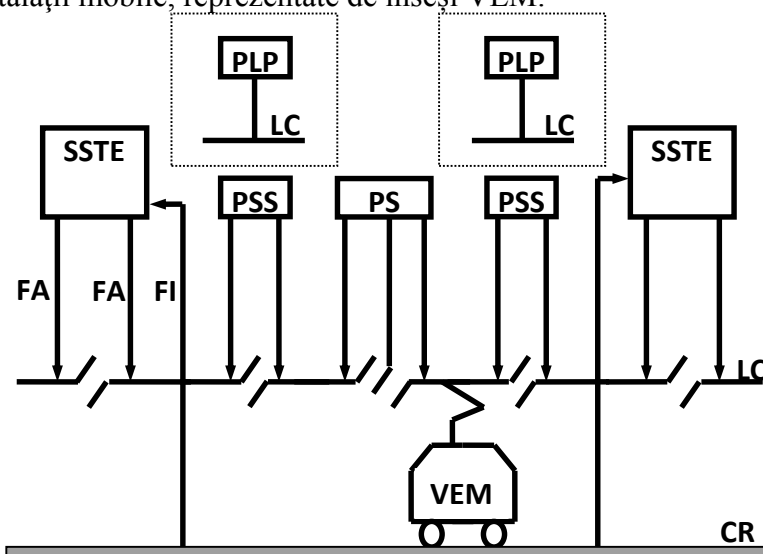


Fig. 1.1. Schema generală de principiu a unui STE cu VEM neautonome.

1.2.1. Alimentarea STE cu VEM neautonome

Alimentarea VEM presupune prezența de-a lungul căii de circulație (de rulare) a unei surse de alimentare, sigură, economică și ușor de accesat. În sistemele actuale se utilizează atât alimentarea în c.c., cât și alimentarea în c.a. monofazat, la diferite tensiuni și frecvențe, prima fiind mult timp considerată adecvată tracțiunii electrice, ce-a de a doua, mult mai fiabilă pentru distanțe mari și mai ieftină, introdusă recent. Alimentarea în c.c. este varianta preferată în tracțiunea electrică urbană, unde tensiunile necesare sunt mai reduse, dar există însă și sisteme de tracțiune electrică feroviară interurbană, care utilizează c.c. la 1.5 kV sau 3 kV. Dezavantajele alimentării în c.c. se referă la distanța redusă între stații (pentru a evita pierderile de putere) și la prezența perturbațiilor electromagnetice datorate c.c. de tracțiune de retur. Alimentarea în c.a. monofazat este varianta ideală pentru tracțiunea electrică feroviară interurbană, transportul și distribuția fiind mult mai ușor de realizat decât în c.c.

Transportul energiei de-a lungul căii de rulare se poate face prin intermediul unei rețele aeriene (mono- sau bifilare) sau printr-o a treia șină, situată la mică înălțime deasupra solului. Sistemele de c.a. monofazat folosesc întotdeauna rețele aeriene (LC monofilară), în timp ce sistemele de c.c. pot utiliza atât rețele aeriene (LC mono- sau bifilară), cât și cea de a treia șină (șina de contact). Ambele sisteme de alimentare necesită un captator de curent (de tip pantograf, patină, trolee etc.) atașat VEM.

În Fig. 1.2, se prezintă amplasarea șinei de contact în raport cu planul șinelor căii de rulare. Captatorul de curent în acest caz este o patină. Aceasta poate aluneca deasupra șinei (Fig. 1.3, a), pe partea laterală (Fig. 1.3, c) sau pe partea inferioară a acesteia (Fig. 1.3, d). Prima variantă este cea mai simplă, dar are o serie de dezavantaje legate de depunerea apei sau a zăpezii. Pentru reducerea efectelor negative se procedează la realizarea unui “acoperiș” pentru șina de contact (Fig. 1.3, b), expunerea acesteia fiind mai redusă. Cel mai bun contact este cel inferior (Fig. 1.3, d), la care partea șinei de contact pe care alunecă patina este protejată.

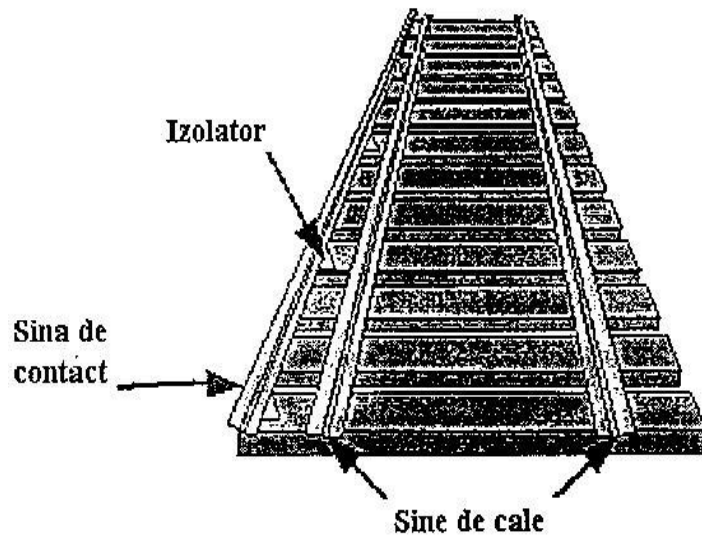


Fig. 1.2. Amplasarea șinei de contact.

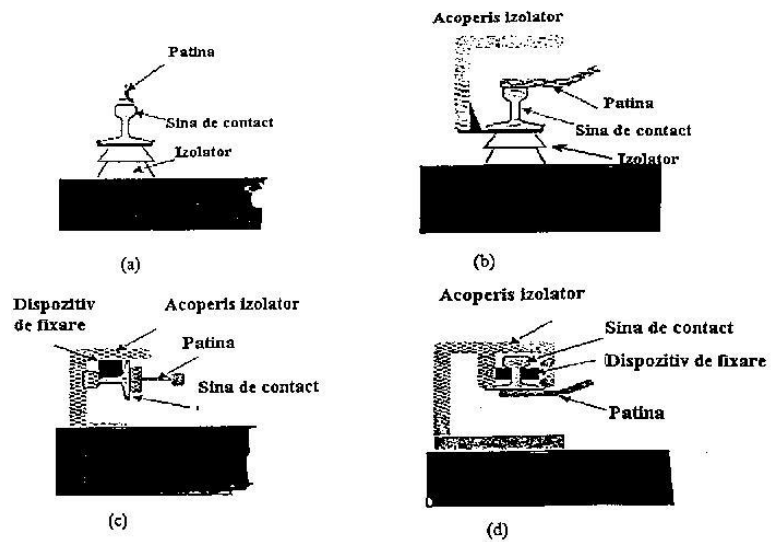


Fig. 1.3. Moduri de captare a curentului electric de tracțiune de la șina de contact (a, b, c, d).

În Fig. 1.4, se prezintă un sistem de alimentare de la LC, specific tracțiunii electrice feroviare interurbane. Figura evidențiază principalele elemente ale acestuia.

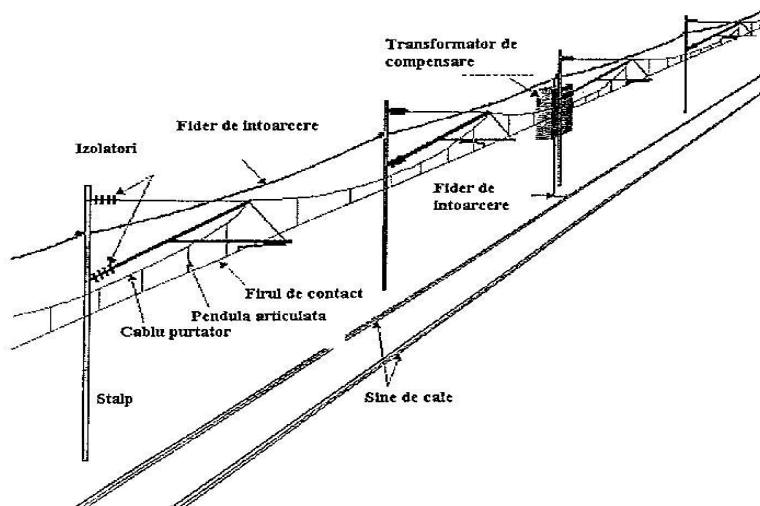


Fig. 1.4. Sistem de alimentare prin LC cu suspensie catenară (longitudinală).

Linia de contact necesită o structură și o susținere (suspensie), care să suporte mii de amperi, să asigure protecția la acțiunea mediului și să nu permită oscilații de amplitudine mare față de poziția inițială. Ținând cont de aceste cerințe, secțiunea transversală a firului de contact are o formă adaptată la fixarea ușoară în cleme și este executată din cupru electrolitic, oțel-cupru, oțel-aluminiu, cadmiu-cupru etc. În vederea realizării unui captaj cât mai bun al curentului electric de la LC, se impune păstrarea paralelismului dintre LC și calea de rulare în plan vertical și elasticitate mecanică redusă și cât mai uniformă pe întreaga deschidere a LC dintre punctele de susținere.

1.2.2. Sisteme de propulsie la VEM neautonome

Caracteristica mecanică elastică cu autoreglare de turație, cupluri mari la pornire și frânare, posibilitatea reglării în limite largi a turației etc. au determinat încă de la început utilizarea *mașinii de c.c. cu excitație serie* la propulsia VEM. Odată cu dezvoltarea electronicii de putere și a tehnicilor de comandă și control, s-a putut trece la introducerea *mașinii asincrone (de inducție) trifazate cu rotor în colivie* în echipamentul VEM, mașină mult mai fiabilă, mai ușor de întreținut, de gabarit mai redus la aceeași putere. Pe

lângă aceste două tipuri de mașini electrice de tracțiune la propulsia VEM se utilizează și mașini asincrone liniare, mașini cu reluctanță variabilă autocomutate electronic etc. Se prezintă în continuare câteva variante de sisteme de propulsie operaționale.

- VEM alimentate de la LC de c.c. :
 - echipate cu motor de tracțiune de c.c. serie și alimentat de la LC prin reostat de pornire/frânare (RPF) sau prin variator static de tensiune continuă (VTC) (Fig. 1.5, a și b); din această categorie fac parte vehiculele de transport urban (tramvaie, troleibuze, rame de metrou), locomotive electrice clasice pentru căi ferate electrificate în c.c., locomotive electrice de mină tradiționale;
 - echipate cu motor asincron trifazat de tracțiune (rotativ sau liniar) alimentat de la LC prin invertor trifazat de tensiune (IT) sau de curent (IC) (Fig. 1.5, c și d); astfel de VEM neautonome sunt vehiculele de transport urban și suburban din noua generație;

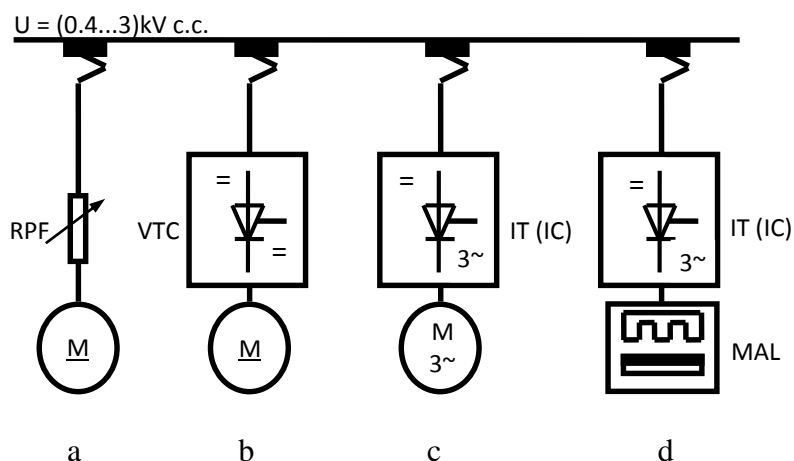


Fig. 1.5. Sisteme de propulsie la VEM alimentate de la LC de c.c.

- VEM alimentate de la LC de c.a. monofazat de frecvență joasă sau industrială:
 - echipate cu motor de tracțiune de tip serie monofazat cu colector și alimentat de la LC de c.a. monofazat de frecvență joasă prin transformator de tracțiune reglabil (Fig. 1.6, a); în

- această categorie intră locomotivele electrice tradiționale din Germania, Elveția, Austria;
- echipate cu motor de tracțiune de c.c. cu colector și cu excitație serie, alimentat de la LC de c.a. monofazat de frecvență industrială, prin transformator de tracțiune reglabil și redresor cu diode (RD) sau prin transformator de tracțiune și redresor cu tiristoare (RT) (Fig. 1.6, b și c); astfel de VEM neautonome sunt, de exemplu, locomotivele electrice clasice de tip mono-continuu;
 - echipate cu motor de tracțiune trifazat asincron liniar, alimentat de la LC de c.a. monofazat prin transformator de tracțiune și convertor static de frecvență (CSF) (Fig. 1.6, d și e); în această categorie se încadrează, de exemplu, locomotivele și ramele electrice neconvenționale, VEM pe pernă magnetică.

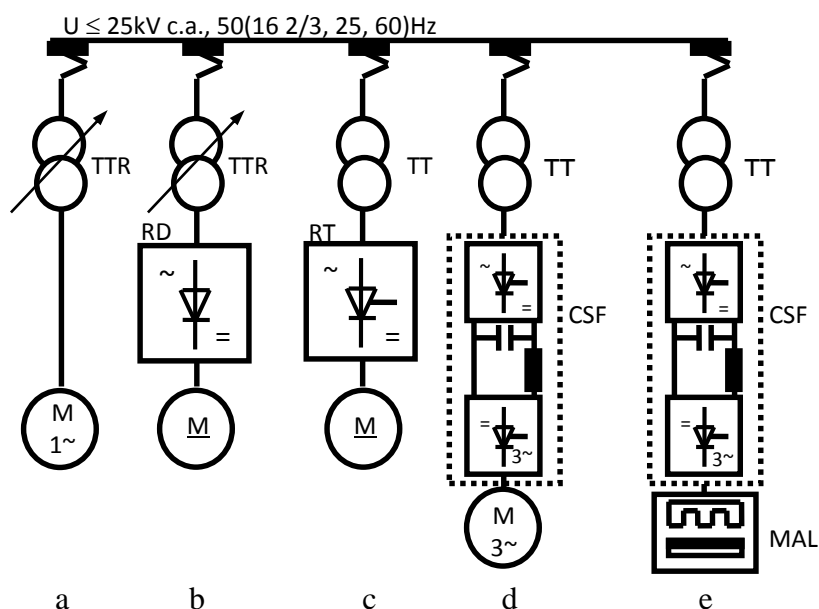


Fig. 1.6. Sisteme de propulsie la VEM alimentate de la LC de c.a.

1.3. Sisteme de tracțiune electrică cu VEM autonome

În cazul STE cu VEM autonome, sursa de energie electrică este îmbarcată pe VEM, astfel că, în structura generală a acestor STE nu mai sunt

necesare instalațiile fixe de electroalimentare. Ca urmare, se poate considera că, în acest caz, STE se rezumă doar la instalațiile mobile de tracțiune electrică (adică, VEM autonome) și la CR. În această accepțiune, principalele STE cu VEM autonome sunt: locomotivele diesel-electrice și locomotivele electrice de mină cu acumulatori, având CR ghidată, de tip feroviar, respectiv electromobilele, având CR neghidată (carosabil).

Elementele principale ale circuitului de forță al unui VEM autonom sunt:

- (i) sursa de energie electrică (SEE), reprezentând grup motor diesel (MD) - generator electric (de c.c. sau sincron trifazat), în cazul locomotivelor diesel-electrice, respectiv baterie de acumulatori, pilă de combustie etc., în cazul electromobilelor și al locomotivelor electrice miniere autonome;
- (ii) motorul electric (rotativ) de tracțiune electrică (MET), putând fi motor de c.c. cu colector și cu excitație serie sau separată, motor asincron trifazat cu rotor în colivie, motor sincron cu excitație prin magneți permanenți etc.;
- (iii) convertorul static (CS), interpus în circuitul de forță al VEM autonom ca dispozitiv electronic de adaptare între SEE și MET și reprezentând un VTC, RD sau RT, în cazul MET de c.c., respectiv un IT sau CSF, în cazul MET de c.a.

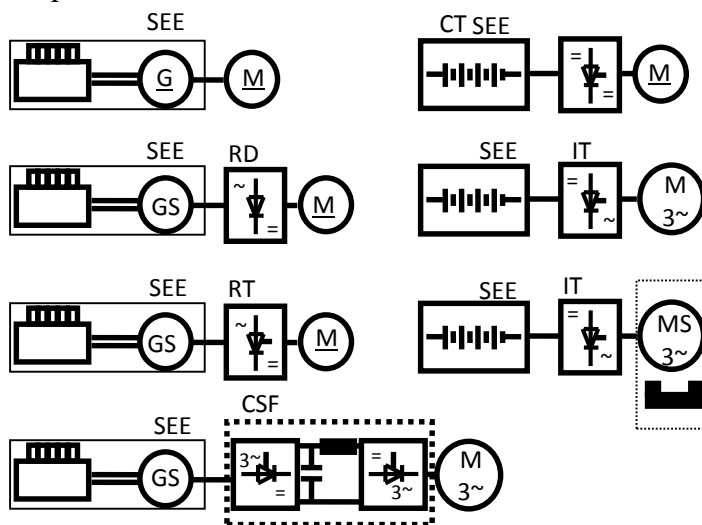


Fig. 1.7. Schema de principiu a circuitului electric de forță la tipurile operaționale de VEM autonome.

Aplicația 2

SUBSTAȚII DE TRACȚIUNE ELECTRICĂ DE CURENT CONTINUU

Substațiile de tracțiune electrică (SSTE) sunt instalații fixe pentru racordarea la sistemul electroenergetic de înaltă tensiune și pentru adaptarea parametrilor energiei electrice la necesitățile tracțiunii electrice.

SSTE de c.c. sunt utilizate în tracțiunea electrică urbană (subterană și de suprafață), precum și în cea feroviară interurbană electrificată în c.c. Acestea prezintă o structură modulară de tip interior și au în componență următoarele subansambluri: instalația de înaltă tensiune de c.a. trifazat, grupurile trafo-redresoare de putere, instalația barei pozitive, instalația barei negative și, eventual, grupul trafo-invertor neautonom de putere (Fig. 2.1). Acționarea unei SSTE de c.c. se poate face local (manual sau electric) sau de la distanță, dintr-un post de comandă centralizată sau prin telecomandă.

SSTE de c.c. prezintă o serie de avantaje, și anume:

- se racordează direct la rețeaua energetică de înaltă tensiune;
- prezintă un randament energetic ridicat la toate sarcinile și se pretează ușor la automatizare.

Ca principale dezavantaje:

- sunt complicate, costisitoare și exploatare anevoioasă;
- datorită valorilor mari ale curenților de tracțiune se impun distanțe mici între două substații adiacente (2-10km la tracțiunea electrică urbană, 14-40 km la tracțiunea electrică feroviară);
- datorită prezenței unor armonici parazite în tensiunea redresată de ieșire pot apărea perturbații electromagnetice și de zgomote în circuitele cuplate conductiv sau inductiv cu circuitul electric de tracțiune.

2.1. Subansamblurile SSTE de c.c.

Instalația de înaltă tensiune este destinată racordării substației la sistemul trifazat de înaltă tensiune de 6-10 kV, alimentând grupurile trafo-redresoare și serviciile auxiliare din substație. Posedă o structură celulară cuprinzând în principal:

- celule de linie, în număr de două, corespunzător celor doi fideri de alimentare, principal și de rezervă, de înaltă tensiune (SSTE fiind prevăzută, uzual, cu un racord dublu la rețeaua trifazată industrială de înaltă tensiune); în structura unei celule de linie sunt montate:

- sistem trifazat dublu de bare colectoare de înaltă tensiune;
- separatoare tripolare acționate de servomotor și prevăzute cu interblocaj electromecanic (Q1,2,9,10);
- întreruptoare de înaltă tensiune debroșabile (Q11,16);

- celule trafo, pentru alimentarea grupurilor trafo-redresoare de putere și, eventual, a grupului trafo-invertor neautonom de putere; au în plus în structura lor două transformatoare de măsură, de tensiune și de curent;

- celula de măsurare și de cuplă, cu echipament asemănător celulelor anterioare și servind la măsurări electrice în înaltă tensiune și la trecerea de pe un sistem de bare trifazate pe celălalt.

Grupurile trafo-redresoare de putere au rolul de a reduce nivelul tensiunii și de a modifica natura curentului. Se execută în număr de la două la patru, putând funcționa în diferite combinații după o schemă de automatizare prestabilită.

În Fig. 2.1, este prezentată schema unei stații cu două grupuri trafo-redresoare. Acestea sunt riguros identice (pentru a permite o interschimbabilitate totală) având fiecare în componență (Fig. 2.2):

- transformator trifazat de putere (T1, respectiv T2), coborâtor de tensiune (6-110 kV / 0.4-3 kV) cu răcire naturală în ulei sau în aer; transformatorul poate fi realizat cu una sau două înfășurări secundare după cum redresorul utilizat este cu 6 sau cu 12 pulsuri; în al doilea caz, cele două înfășurări secundare sunt defazate între ele cu 30 de grade electrice (una cu conexiune stea, cealaltă în triunghi, cu numărul de spire în raport de $1/\sqrt{3}$, pentru a produce aceleași tensiuni între faze);

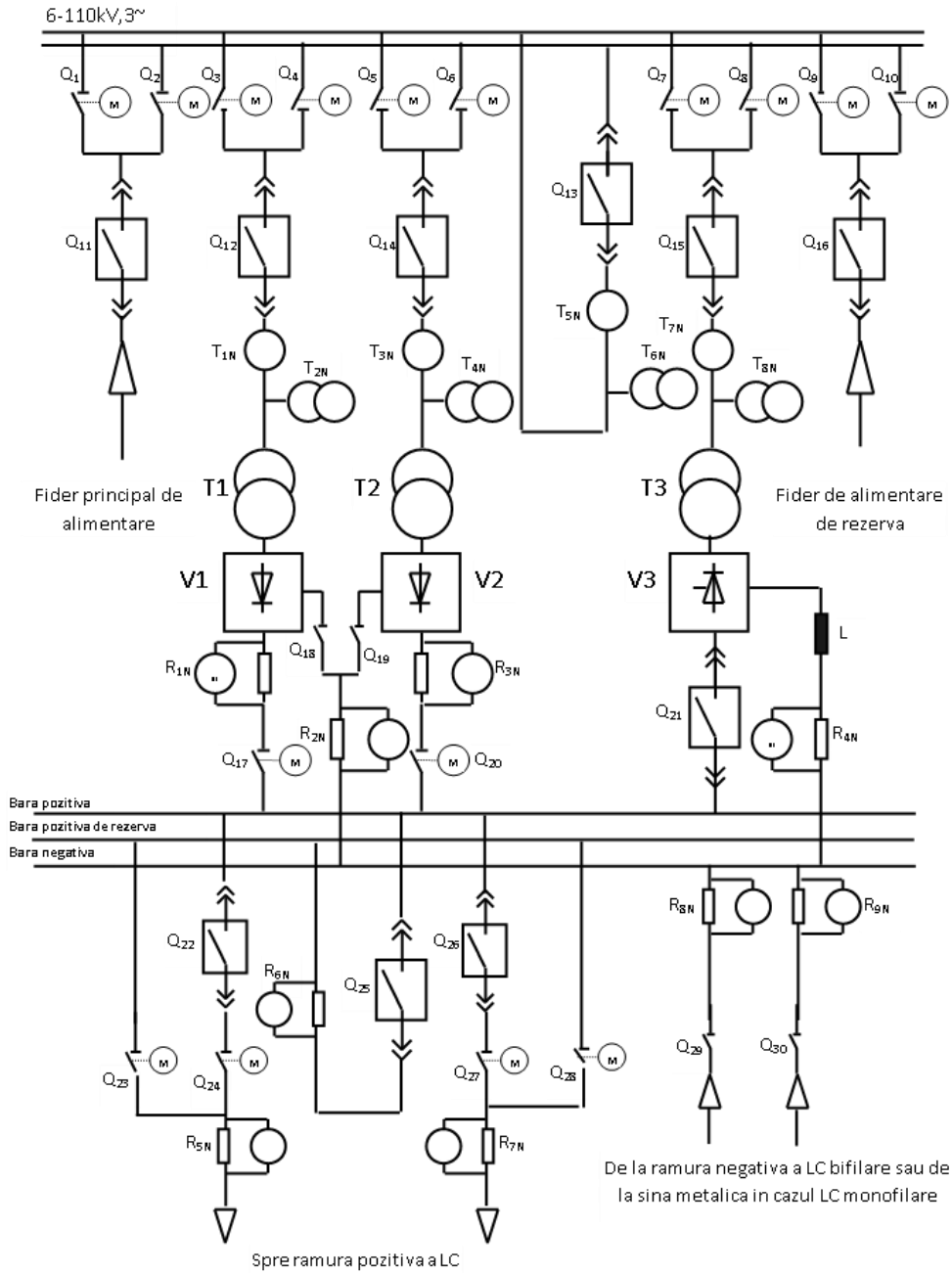


Fig. 2.1. Schema circuitelor primare ale unei SSTE de c.c.

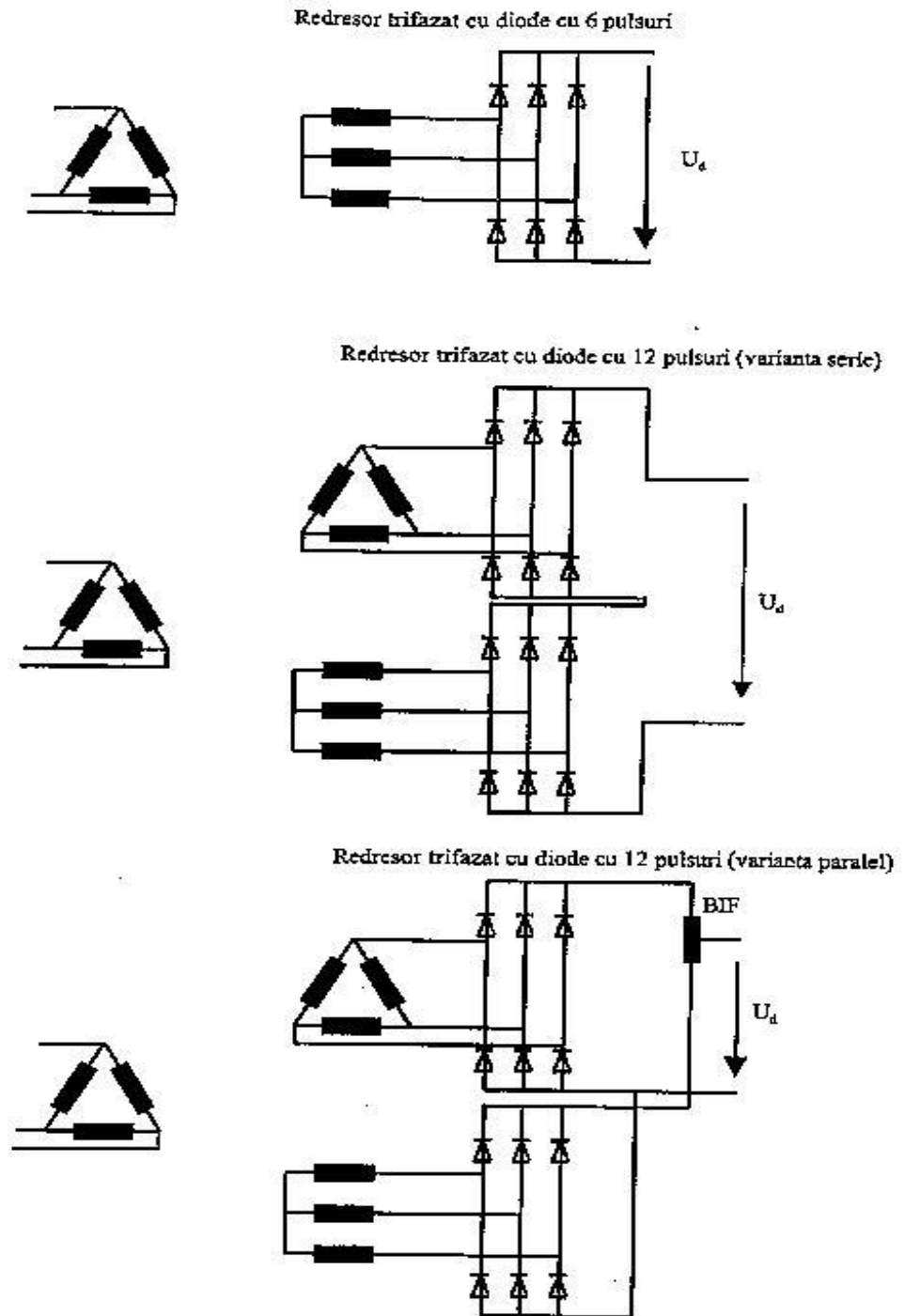


Fig. 2.2. Scheme electrice uzuale ale grupurilor trafo-redresoare de putere din SSTE de c.c.

- redresor necomandat în punte trifazată (V1, respectiv V2), echipat cu mai multe diode montate în paralel pe fiecare braț al punții. Schemele utilizate sunt cele cu 6 pulsuri (o singură punte trifazată) și cu 12 pulsuri (corespunzător unei perechi de punți trifazate, alimentate în c.a. de cele 2 înfășurări secundare ale transformatorului și montate pe partea de c.c. în serie sau în paralel, de obicei printr-o bobina de interfază (BIF) cu rolul de a absorbi diferența dintre tensiunile instantanee de ieșire ale celor 2 punți); se preferă redresoarele necomandate datorită unor avantaje:

- posedă un factor de putere superior redresoarelor în punte comandată sau semicomandată;
- pe partea de c.a. trifazat curenții de linie conțin numai componente armonice de ordinul $6k \pm 1$, respectiv $12k \pm 1$, $k = 1, 2, \dots$, deci curenții de linie au o formă de variație practic sinusoidală;
- pe partea de c.c., datorită prezenței numai a componentelor armonice pare ($6k$, respectiv $12k$) tensiunea redresată are pulsații reduse ca amplitudine.

Instalația barei pozitive are în componență:

- celule de conexiune redresor-bara pozitivă, cu rol de a asigura legarea polilor pozitivi ai punților redresoare de sistemul dublu de bare pozitive (principală și de rezervă) al substației; celula este echipată cu separatoare monopolară cu servomotor (Q17,20) și șunturi de măsurare în c.c. (R5N,R7N);
- celule de plecare (spre ramura pozitivă a LC) de pe sistemul dublu de bare pozitive, prevăzute cu separatoare monopolară cu servomotor, întreruptoare rapide de c.c. debroșabile (Q22) și șunturi de măsurare a c.c..

Observație: Avându-se în vedere rolul important pe care îl are celula de plecare în alimentarea cu energie electrică a unui tronson al rețelei de contact din transportul electric urban a fost realizată o variantă nouă de celulă, în care automatizarea circuitelor secundare de comandă, măsură, protecție și semnalizare se realizează cu ajutorul unui sistem electronic amplasat într-o unitate centrală din cadrul substației.

Datorită noii configurații a sistemului de automatizare s-a realizat un nou tip de celulă de plecare, CIP-20, având echipamentul de comutație

primară în întregime amplasat pe un cărucior mobil. Principalele caracteristici tehnice sunt:

- tensiunea nominală 825Vcc;
- curent nominal 1000A;
- clasa de suprasarcină V, conform CEI 146/73.

Echipamentul electric al celulei este împărțit în două categorii distincte:

a. Echipamentul de comutație primară care cuprinde :

- întreruptor ultrarapid de c.c. de 1250 A pentru protecția în principal a redresorului cu diode împotriva scurtcircuitelor;
- sunt de c.c.;
- traductor di/dt ;
- separator monopolar cu motor.

b. Echipamentul de comutație secundară, care este inclus în sistemul electronic de comandă și automatizare a celulei de plecare a substațiilor de tracțiune urbană tip SEA-CP-STU-d.

- celula de cuplă transversală, pentru trecerea pe bara de rezervă oricând este cazul, având o structură asemănătoare cu cele de plecare, mai puțin separatoarele monopolare cu servomotor.

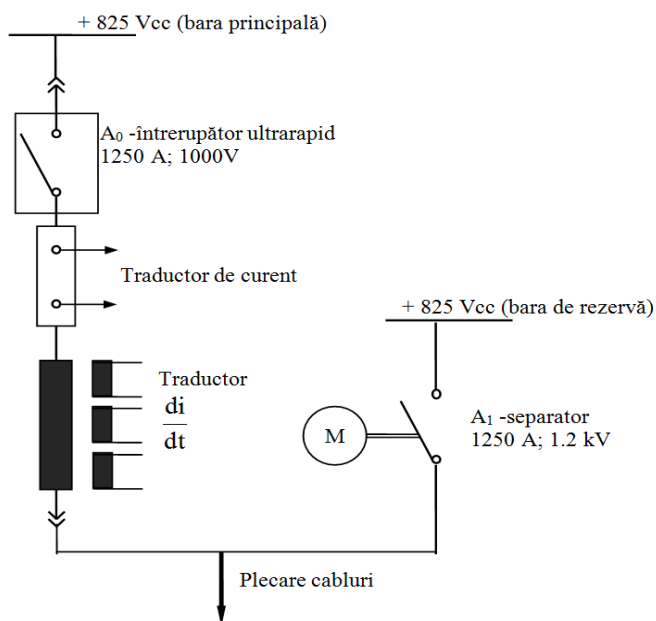


Fig. 2.3. Schema monofilară a celulei de plecare tip CIP-20

Instalația barei negative cuprinde:

- celule de conexiune redresor-bară negativă, destinată legăturii dintre polii negativi ai redresoarelor și bara negativă a SSTE; este echipată cu separatoare monopolare și un șunt general pentru înregistrarea curentului total pe bara negativă;
- celule de sosire, corespunzătoare ramurii negative a LC bifilare sau șinei metalice a căii de rulare, și având în componență separatoare monopolare și șunturi de măsură în c.c.

Prezența pe un tronson al LC de c.c. a unui VEM care frânează electric recuperativ impune, în absența unui alt VEM în regim de tracțiune care să preia energia recuperată prin frânare, transferul energiei recuperate în rețeaua trifazată industrială de alimentare. Datorită faptului că SSTE de c.c., echipate numai cu redresoare de putere necomandate, nu permit acest lucru, este necesară introducerea unui grup trafo-invertor neautonom de putere, conectat la o celulă trafo asemănătoare celor care alimentează grupurile trafo-redresoare de putere, format în principal din:

- transformator trifazat, coborât, similar cu cel de la grupul trafo-redresor, cu una sau două înfășurări secundare defazate cu 30 grade electrice între ele, după cum invertorul pe care îl deservește este cu 6 sau cu 12 pulsuri; raportul de transformare și tensiunea de scurtcircuit sunt astfel alese încât energia de frânare să fie transferată din rețeaua de c.c. în cea de c.a. trifazat numai când tronsonul de LC de c.c. în care a fost generată nu este receptiv;
- invertor neautonom de putere, în punte trifazată, montat în cruce cu redresoarele de putere; uzual, invertorul (V3) prezintă o schemă în punte trifazată cu 6 sau 12 pulsuri; funcționarea în regim de invertor este asigurată prin unghiul de comandă a tiristoarelor mai mare de 90° și prin curentul de circulație ce se stabilește între invertorul neautonom V3 și redresoarele de putere, ca urmare a diferenței dintre valorile instantanee ale tensiunilor celor două tipuri de convertoare statice, pe partea de c.c. (fig.2.4.); întrucât această diferență este sinusoidală, curentul de circulație este pulsatoriu și trebuie netezit prin introducerea unei bobine de reactanță L pe partea de c.c. a invertorului.

În regimul de tracțiune al VEM alimentate de la LC de c.c., redresorul de putere este parcurs atât de curentul de tracțiune (pentru

propulsia VEM), cât și de curentul de circulație, în timp ce prin invertorul neautonom trece numai curentul de circulație, care asigură funcționarea acestuia în regim de conducție neîntreruptă.

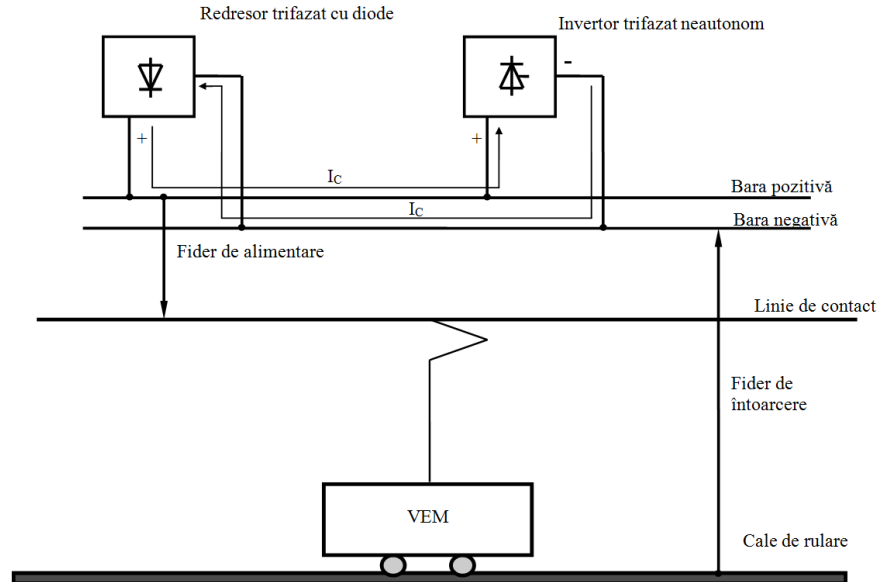


Fig. 2.4. Curentul de circulație stabilit între cele două tipuri de convertoare de putere din SSTE de c.c.

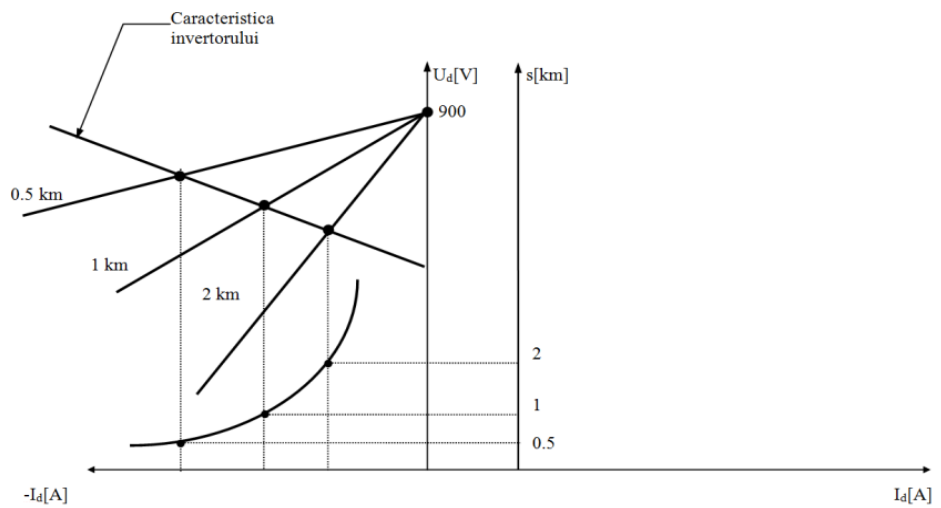


Fig. 2.5. Dependența curentului recuperat prin frânarea electrică a VEM de distanța acestuia față de SSTE de c.c.

În regimul de frânare electrică recuperativă al VEM alimentate de la LC de c.c., atâta timp cât LC poate absorbi energia de frânare, tensiunea crescândă în LC determină descărcarea redresorului necomandat din SSTE. Din momentul în care tensiunea continuă în LC depășește valoarea tensiunii de mers în gol a redresorului din SSTE, acesta se blochează, iar invertorul neautonom de putere preia curentul de sarcină, transferând energia de frânare din rețeaua de c.c. în rețeaua de c.a. trifazat. Energia recuperată prin frânare scade cu distanța dintre VEM și SSTE (Fig. 2.5).

2.2. Măsurile de protecție a muncii în SSTE de c.c.

În SSTE de c.c., atât pentru personalul de deservire, cât și pentru echipamentul existent este necesară asigurarea unei protecții coordonate și selective.

Protecția la scurtcircuite interne a redresoarelor de putere cu diode se realizează cu siguranțe fuzibile ultrarapide asociate fiecărei diode. Pe partea de c.a. scurtcircuitele și suprasarcinile anormale sunt eliminate de întrerupătoarele tripolare de î.t., iar pe partea de c.c. de întrerupătoarele ultrarapide de c.c. Se mai asigură o protecție suplimentară la suprasarcini anormale cu termistoare introduse în canalele de ventilație ale redresoarelor de putere. Pentru a împiedica alimentarea inversă a redresoarelor, în caz de defect, de la cele în funcțiune, se prevede fiecare redresor cu un releu de curent invers.

Protecția la supratensiuni se aplică, în principal, grupurilor trafo-redresoare (eventual trafo-invertor) de putere fiind realizată cu grupuri RC serie racordate la bornele fiecărui braț al punții, pentru protecția la supratensiuni de comutație sau între fazele înfășurării secundare a fiecărui transformator de putere și între bornele de c.c. ale redresoarelor pentru protecția la supratensiuni de manevră și la supratensiuni provenind din rețeaua trifazată de alimentare și din cea de c.c.

Pentru protecția împotriva atingerilor și punerilor la pământ accidentale se utilizează voltmetrul cu contact, care sesizează tensiunea între polul negativ al redresorului și pământ și releul maximal de curent, care sesizează curentul de defect între scheletul metalic al redresorului și pământ.

Aplicația 3

VEHICULE ELECTRICE MOTOARE ALIMENTATE DE LA LINIE DE CONTACT DE CURENT CONTINUU (VEHICULE ELECTRICE URBANE)

3.1. Introducere

În tracțiunea electrică urbană, alimentarea vehiculelor electrice motoare, se face de la linie de contact (LC) de c.c., la o tensiune de 600 sau de 750 Vcc. Avantajul unui control de viteză simplu a făcut ca motorul de c.c. cu colector și cu excitație serie să fie preferat de la început în echiparea vehiculelor electrice motoare. Odată cu apariția semiconductoarelor, pe de o parte, s-a trecut la alimentarea mașinilor de tracțiune prin variatoare de tensiune continuă (VTC), iar pe de altă parte, s-a înlocuit mașina de c.c. cu colector prin mașina de inducție trifazată cu rotor în colivie, alimentată prin convertoare statice de frecvență. Apariția tiristoarelor cu blocare pe poartă (GTO) a permis simplificarea schemelor de forță ale VTC, respectiv a invertoarelor trifazate.

În continuare, se vor prezenta două tipuri de vehicule electrice motoare specifice tracțiunii electrice urbane:

- troleibuz echipat cu mașini de tracțiune de c.c. cu colector și cu excitație serie, alimentate direct de LC și utilizând rezistențe de pornire și frânare;
- troleibuz echipat cu mașini de tracțiune de c.c. cu colector și cu excitație serie, alimentate de LC prin VTC cu tiristoare GTO;

3.2. Vehicule electrice motoare cu aderență la calea de rulare neghidată și echipate cu mașini de tracțiune de c.c. cu colector și cu excitație serie

3.2.1. Structura părții mecanice

Structura părții mecanice a VEM cu aderență la calea de rulare neghidată (carosabil) este prezentată în Fig. 3.1.

Subansamblurile componente sunt următoarele:

Tracțiune Electrică. Aplicații

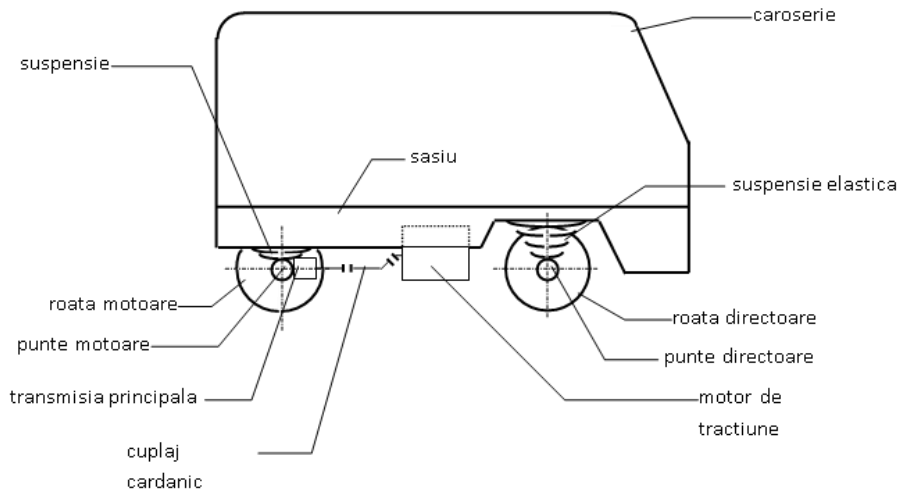


Fig. 3.1. Schema de principiu a părții mecanice a VEM cu aderență la CR neghidată (de tip rutier).

- aparatul de rulare, care se sprijină pe suportul nemetalic al căii de rulare (carosabil) și este alcătuit din roțile pneumatice, directoare (uzual, cele din față) și motoare (uzual, cele din spate), montate la capetele a două punți (de forma unor grinzi masive de oțel), cea de direcție (din față), respectiv motoare (cea din spate). Pe puntea din față este instalat mecanismul de direcție (cuprinzând volanul, angrenajul melc-rolă și sistemul de pârghii articulate) cu ajutorul căruia se realizează virarea roților din față, deci ghidarea VEM pe CR. Pe puntea motoare este instalată transmisia principală (cuprinzând angrenajul reductor, diferențialul mecanic și axele planetare), care permite turații diferite ale roților stânga-dreapta din puntea motoare, pentru evitarea uzurii pneurilor și a consumului exagerat de energie electrică.
- șasiul, reprezentând o construcție sudată, executată din laminate și profile de oțel, care suportă caroseria VEM și se leagă cu cele două punți prin suspensiile elastice, cu arcuri lamelare. De șasiu este suspendat motorul electric de tracțiune, de la arborele căruia cuplul este transmis la roțile motoare, uzual, printr-un cuplaj cardanic dublu și prin transmisia principală.

3.2.2. VEM de tip troleibuz echipat cu motoare de c.c. cu colector și cu excitație serie, alimentate direct de la LC de c.c.

Troleibuzele sunt vehicule electrice motoare alimentate de la linie de contact de curent continuu bifilară prin intermediul a doi captatori. În Fig. 3.2, se prezintă schema de forță simplificată a unui troleibuz. Echipamentul electric se compune din următoarele subsansambluri:

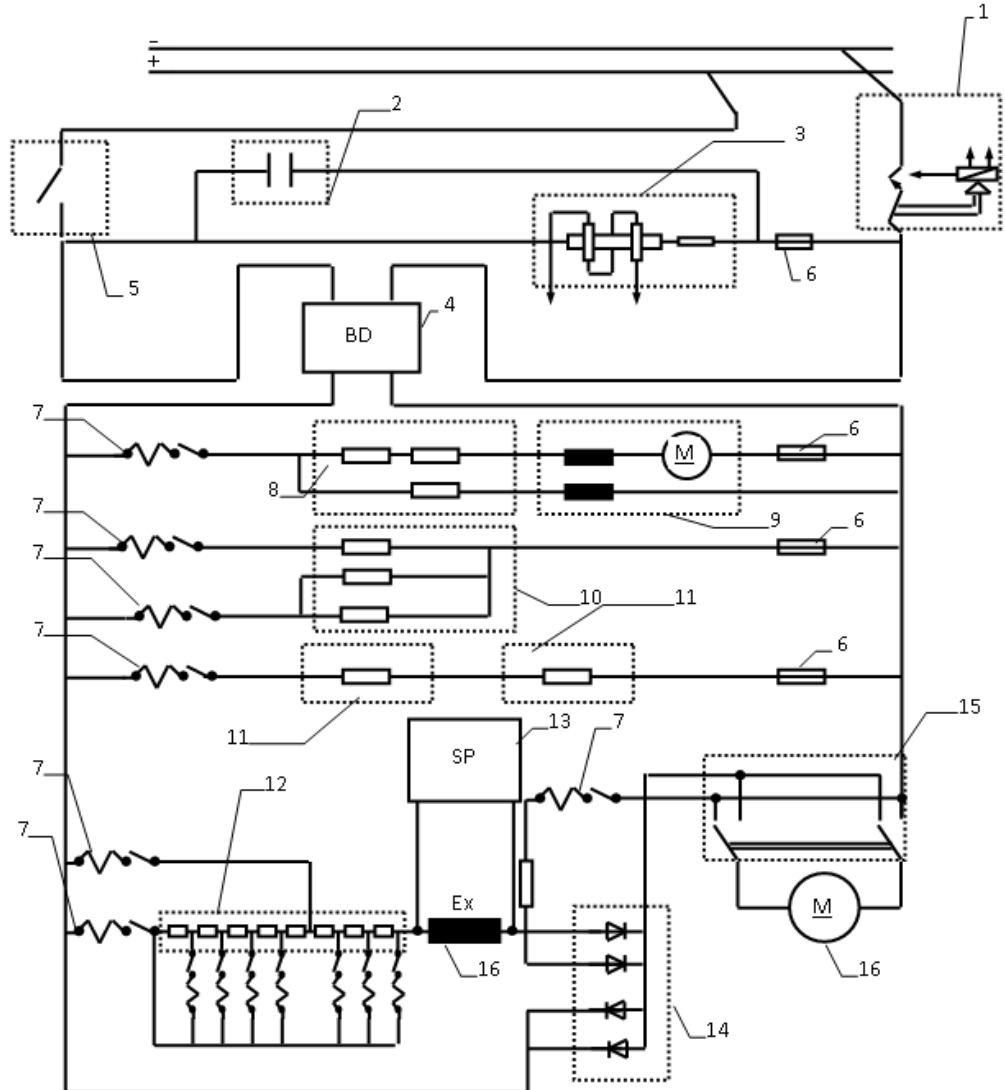


Fig. 3.2. Schema de forță, simplificată, a troleibuzului 212E.

- 1 - întreruptor principal;
- 2 - condensator filtraj 2 μ F/1600V;
- 3 - bloc de transformatoare de tensiune și curent;
- 4 - bloc de diode 1;
- 5 - contactor de linie;
- 6 - siguranțe fuzibile;
- 7 - comutator MTU;
- 8 - grup rezistente motor auxiliar;
- 9 - motor servicii auxiliare;
- 10 - aeroterma bord;
- 11 - aeroterma salon;
- 12 - reostate motor de tracțiune;
- 13 - sursa de preexcitație;
- 14 - bloc diode 2;
- 15 - comutator de sens;
- 16 - motor de tracțiune.

Întreruptorul principal este un disjunctoare cu acționare electromagnetice tip 315A-750Vcc, pentru tracțiune electrică urbană. Acest tip de disjunctoare cu acționare simplă este destinat să se instaleze pe vehiculele electrice cu rol de conectare-deconectare a circuitelor de tracțiune și cu rol de protecție la scurtcircuit a acestora.

Alimentarea bobinei de acționare determină închiderea contactelor, închizându-se astfel circuitul în care se afla racordat disjunctoare. Acesta va rămâne închis atâta timp cât curentul ce trece prin circuit nu depășește valoarea de reglaj și atâta timp cât tensiunea aplicată la bornele bobinei rămâne în limita prescrisă. Întreruperea alimentării bobinei de acționare, scăderea tensiunii sub limitele impuse sau apariția unui curent ce depășește valoarea de reglaj determină deschiderea disjunctoareului.

Blocul de diode 1, reprezentat de o punte monofazată redresoare cu câte două diode conectate în paralel pe fiecare braț, asigură menținerea polarității tensiunii de alimentare a circuitului de tracțiune a troleibuzului atât în cazul alimentării normale cât și în cazul modificării polarității tensiunii la colectoare sau montării incorecte a lor.

Motorul de servicii auxiliare este destinat antrenării grupului compresor, al alternatorului și pompei pentru servodirecție ale troleibuzului. Motoarele de acest tip se racordează la rețeaua de alimentare prin intermediul unei rezistențe de limitare a curentului de pornire (**grup**

rezistențe motor auxiliar). Motorul este un motor de curent continuu cu excitație mixtă, cu putere nominală de 7.5 kW, turație nominală de 1600 rot/min și curent nominal de 16.2 A la 600 Vcc alimentare, respectiv de 12.9 A la 750 Vcc alimentare. În circuitul înfășurărilor de excitație derivație se conectează o rezistență adițională.

Sursa de preexcitație asigură excitarea inițială a motorului la frânare, pentru trecerea de la regimul de motor la cel de generator. Elementele de baza ale acesteia sunt, după cum urmează: un invertor autooscilant cu tranzistoare, cu rol de a transforma tensiunea continuă de la intrare într-o tensiune alternativă, un transformator pentru separare galvanică și pentru adaptarea tensiunii de ieșire a invertorului la necesitățile sarcinii și un redresor bialternanță care asigură la ieșire tensiunea continuă. Sursa se conectează la bateria de 24 V a vehiculului.

Schema de comandă a troleibuzului asigură intrarea în funcțiune a sursei de preexcitație în următoarele condiții:

- vehiculul este în mers cu viteză mai mare de 5 km/h;
- se apăsă pe pedala de frână.

Reostatele motorului de tracțiune se folosesc la pornirea și frânarea motorului de tracțiune. Ele sunt formate din 24 de elemente rezistive fracționate în 2 baterii cu câte 12 elemente fiecare montate pe acoperișul troleibuzului la distanță de 80 mm.

Blocul de diode 2 este format din două grupe de diode legate în serie, fiecare grupă conținând două diode paralele, utilizate pentru cele două regimuri de funcționare ale vehicului (mers, respectiv frânare).

În fiecare grupă diodele paralele trebuie să aibă aceeași clasă de cădere a tensiunii directe sau clase direct apropiate.

Motorul de tracțiune este un motor de curent continuu cu excitație serie în clasa de izolație F, destinat acționării vehiculelor pentru tracțiunea urbană de tip TN 76. Alimentarea motorului se face direct de la linia de contact, tensiunea nominală a acesteia fiind egală cu tensiunea nominală a motorului. Caracteristicile motorului sunt următoarele:

- tensiune nominală;	750 V;
- putere nominală;	125 kW;
- curent nominal;	185 A;
- turație nominală;	1380 rot/min;
- curent max. de pornire;	320-350 A;
- grad de excitație minim;	0.4;
- grad de excitație nominal;	0.78;
- turația maximă;	3200 rot/min;
- greutatea motorului;	950 kg;

Tracțiune Electrică. Aplicații

- randamentul nominal; 0.9;
 - viteza max. la sarcină nominală; 60 km/h;
 - rampa max. la sarcină nominală; 12 %;
 - consumul specific de energie
- ciclul urban:
- la gol; 190 Wh/t km;
 - la sarcină nominală; 160 Wh/t km;
- decelerație medie:
- cu frână de serviciu; 5.5 m/s²;
 - cu frână de siguranță; 2.5 m/s²;
 - cu frână electrică în intervalul 40-10 km/h; 0.8 m/s²;
- nivelul de zgomot:
- interior salon; < 85 dB;
 - exterior; < 85 dB;
- timpul de demarare. <26 s pana la 50 km/h.

Motorul este de tip autoventilat, prin ventilatorul montat pe axul motorului, în interior. Filtrarea aerului se face cu ajutorul unui filtru uscat, format din site metalice.

Motoarele se execută pentru a putea funcționa în ambele sensuri de rotație. Sensul de rotație se modifică prin schimbarea sensului de circulație a curentului prin indus, față de sensul curentului prin excitație. Trecerea de la funcționarea în regim de motor la funcționarea în regim de generator cu excitație serie se realizează prin modificarea sensului de circulație al curentului în înfășurarea de excitație.

Reglarea turației motorului, ajuns pe caracteristica naturală se face prin slăbirea excitației, prin șuntarea excitației serie astfel încât curentul de excitație să fie mai redus decât cel prin indus. Șuntarea nu trebuie să ducă la reducerea curentului de excitație sub 40 % față de cel din indus.

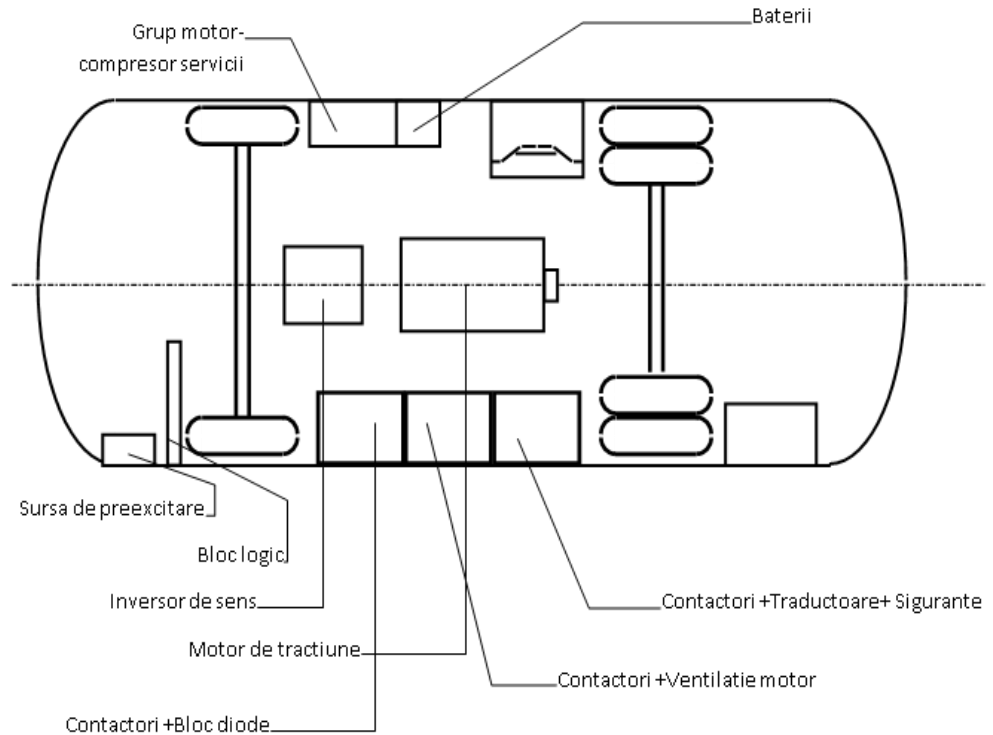


Fig. 3.3. Modul de amplasare a echipamentului electric pe troleibuz.

În Fig.3.3, se prezintă modul de amplasare a echipamentului electric pe troleibuz. Accesul la compartimentele care conțin echipamentul electric de forță și de comandă se face prin capacele laterale exterioare și interioare ale troleibuzului.

Echipamentul de acționare și comandă asigură funcționarea troleibuzului în două regimuri:

- regim de tracțiune (înainte și înapoi);
- frânare electrică.

Alegerea regimului de lucru se face prin intermediul pedalei de mers sau de frână, care acționează asupra controlerului de comandă. Contactele auxiliare ale acestuia închid, prin intermediul unor relee de comandă, contactorii pentru regimul de tracțiune, respectiv pentru regimul de frânare electrică.

Dispozitivul frânei electrice are în componență un bloc secvențial de comandă care asigură trecerea motorului de tracțiune în regim de generator, debitând pe reostatul de pornire-frânare în trepte. Comanda dispozitivului se

face prin intermediul unei pedale plasate în stânga volanului. Unghiul de apăsare a pedalei determină valoarea decelerației.

Frânarea electrică poate fi:

- frânare electrică cu recuperarea energiei în LC atunci când
 - LC are polaritate normală;
 - există alte troleibuze aflate în regim de tracțiune, care să preia energia de frânare.
- frânare electrică reostatică, în cazul în care nu sunt îndeplinite condițiile de mai sus.
- frânare electrică mixtă recuperativ-reostatică.

Trecerea de la un regim de frânare la altul se face automat, în cadrul aceluiași ciclu, fără efecte asupra dinamicii troleibuzului. Elementul care comandă ponderea tipurilor de frânare este valoarea tensiunii rețelei de alimentare furnizată de blocul de transductoare și prelucrată de blocul logic de comandă.

Blocul logic de comandă asigură modificarea valorii reostatului de pornire-frânare în funcție de poziția pedalei de mers sau de frână, condiționată de valoarea curentului prin motor și de valoarea tensiunii la bornele motorului.

3.3. Testarea experimentală a regimului de tracțiune și frânare reostatică a MCC cu rezistență de pornire și frânare

În Fig. 3.4 se prezintă schema electrică a mașinii de c.c., precum și modalitatea de dispunere a echipamentelor de testare și măsurare.

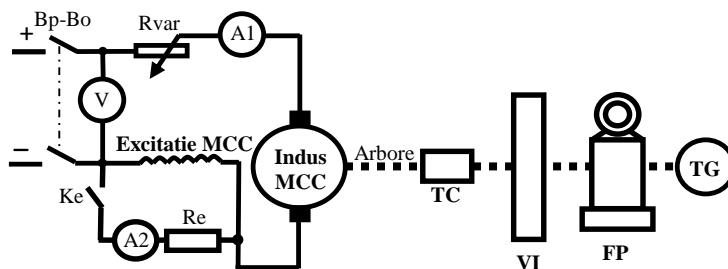


Fig. 3.4. Schema de montaj a echipamentelor de testare și măsurare.

Legenda:

Bp-Bo – Buton Pornit (verde) – Buton Oprit (roșu);

V – voltmetru;

A1, A2 – ampermetre;

Rvar – rezistor variabil;

MCC – mașina de curent continuu;

TC – traductor de cuplu;

VI – volant de inerție;

FP – frâna cu pulberi;

TG – tahogenerator.

În Fig. 3.5, este prezentată schema electrică de conexiune a echipamentelor de testare și măsurare utilizând unitatea LOGYCAP. Această unitate este interfața cu echipamentele de măsură și control. De asemenea, permite înregistrarea și afișarea mărimilor electrice și mecanice prin intermediul computerului.

Regimul de tracțiune

Înainte de alimentarea MCC de la sursa de tensiune continuă se vor îndeplini următoarele: Rvar trebuie reglat la valoarea maximă, iar ținând cont că MCC cu excitație serie trebuie să aibă o sarcină la arbore pentru a nu demara în gol, aceasta se va impune cu ajutorul frânei cu pulberi. Odată aceste condiții îndeplinite poate fi acționat butonul de pornire Bp pentru alimentarea MCC. Mașina se va roti, pentru început, cu o viteză mică. Pentru creșterea vitezei de rotație a MCC, până la valoarea nominală, se reduce treptat valoarea rezistenței înseriate cu acesta prin acționarea Rvar. În acest mod căderea de tensiune pe Rvar se va diminua permițând creșterea tensiunii la bornele MCC.

Se vor determina caracteristicile naturală și artificiale de turație $n=f(I)$, precum și caracteristicilor randamentului $\eta=f(P_2)$.

Pentru ridicarea caracteristicii naturale, Rvar se reduce până la scurtcircuitare, sarcina mecanică la arbore impunându-se astfel încât mașina să ajungă la turația nominală. Apoi, sarcina mecanică se crește, crescând curentul de excitație al FP, până MCC ajunge la curent nominal. Pentru ridicarea caracteristicilor artificiale se va proceda, în primul rând, la introducerea unei părți din Rvar în serie cu înfășurările mașinii. În acest mod se va studia comportamentul mașinii electrice alimentată la borne cu o tensiune inferioară celei din rețeaua de alimentare. Se vor efectua teste pentru două valori diferite ale Rvar.

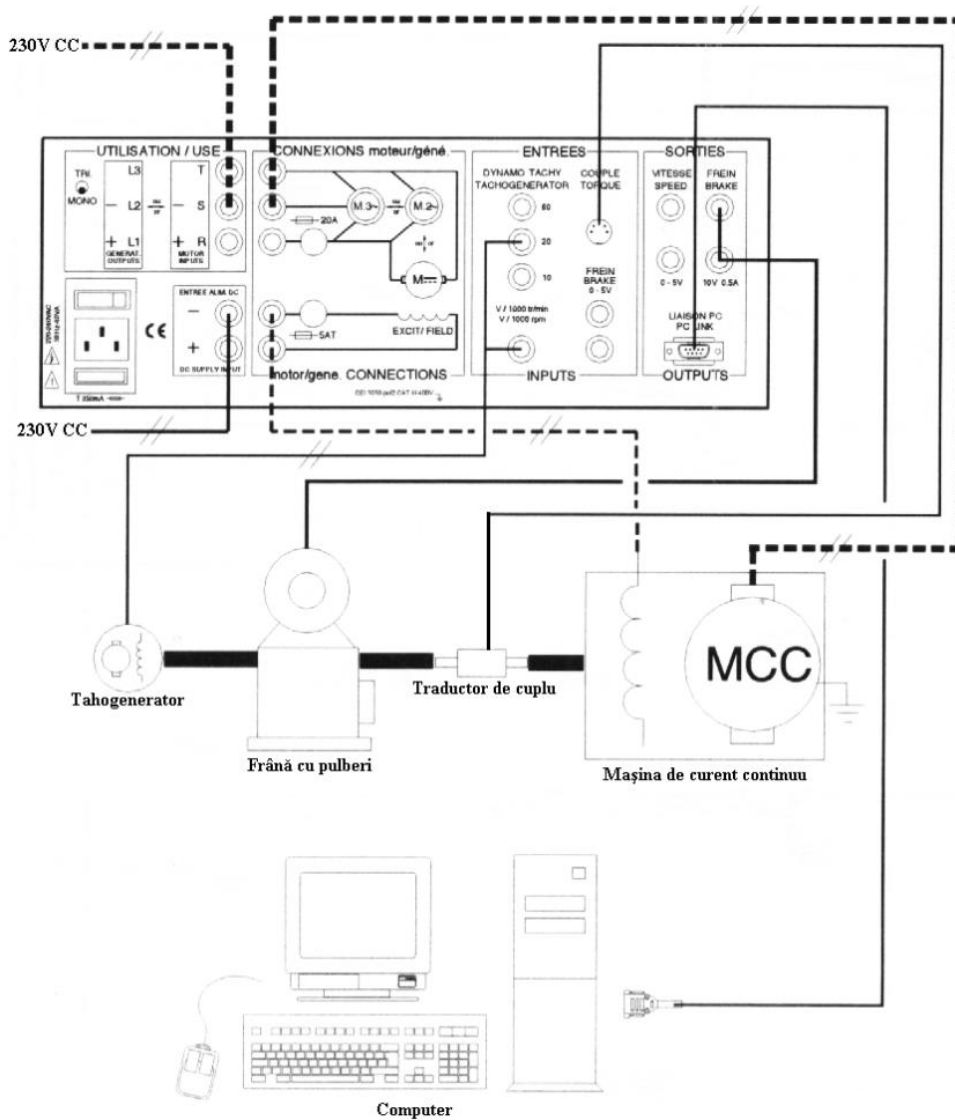


Fig. 3.5. Schema electrică de conexiune a echipamentelor de testare și măsurare.

În al doilea rând, pentru studierea regimului de funcționare a MCC cu flux slăbit, se va închide contactorul Ke pentru a reduce valoarea curentului de excitație. Astfel, se va obține o creștere a vitezei de rotație a MCC peste viteza de bază. Se efectuează și pentru acest caz două teste experimentale. Datele se notează în Tabelul 3.1.

Tabelul 3.1

Mărimi măsurate				Mărimi calculate			
U_{MCC} [V]	I_{MCC} [A]	M [Nm]	n [rot/min]	Ω [rad/sec]	P_1 [W]	P_2 [W]	η [%]
Caracteristica naturală							
Caracteristicile artificiale							

Viteza unghiulară rezultă din expresia:

$$\Omega = n \cdot \frac{\pi}{30} \tag{3.1}$$

Apoi, puterea utilă (mecanică) a motorului rezultă din relația:

Tracțiune Electrică. Aplicații

$$P_2 = M \cdot \Omega . \quad (3.2)$$

Puterea (electrică) absorbită de motor este dată de produsul tensiune-curent:

$$P_1 = U \cdot I . \quad (3.3)$$

Deci, randamentul mașinii rezultă din bilanțul puterilor, astfel:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 . \quad (3.4)$$

Regimul de frânare

Pentru a testa MCC în regim de frânare reostatică, este necesară, inițial, antrenarea volantului de inerție (cu ajutorul MCC în regim de motor sau cu o altă mașină electrică cuplată la axul ansamblului electromecanic), iar, apoi, trecerea MCC în regim de generator. Acest lucru se face prin inversarea polarității de conectare în circuit a înfășurării de excitație. Frânarea se face cu MCC având înfășurarea de excitație în serie cu înfășurarea indusă, dar, în acest caz, mașina nu mai este alimentată de la o sursa de energie, ci debitează pe o sarcină rezistivă. Această sarcină poate fi chiar Rvar. Singura modificare ce trebuie realizată în schema electrică este închiderea circuitului între + și -, după deconectarea mașinii de la rețea. Datele măsurate se notează în Tabelul 3.2, după care se trasează graficul $n=f(P_f)$.

Tabelul 3.2

U_f [V]	I_f [A]	P_f [W]	n [rot/min]

Puterea (electrică) disipată pe Rvar este dată de produsul tensiune-curent:

$$P_f = U_f \cdot I_f . \quad (3.5)$$

3.4. VEM de tip troleibuz echipat cu motoare de c.c. cu colector și cu excitație serie, alimentate de la LC de c.c. prin VTC cu tiristoare GTO

Dezvoltarea electronicii de putere a permis dezvoltarea unor sisteme de tracțiune mai avantajoase și mai fiabile prin introducerea în circuitul de forță al VEM, echipate cu mașini de tracțiune de c.c. cu colector și cu excitație serie, a variatoarelor de tensiune continuă. Pe lângă reducerea aparatajului electromecanic, această variantă aduce o serie întreagă de avantaje, printre care un demaraj mult mai lin, un consum redus și posibilitatea funcționării în regim de frânare electrică recuperativă a VEM. Odată cu apariția tiristoarelor GTO, schema VTC este mai simplă și cu gabarit mai redus, prin eliminarea tiristoarelor și circuitelor auxiliare de stingere.

În Fig. 3.6, se prezintă o schemă de forță de principiu a unui troleibuz echipat cu mașină de tracțiune de c.c. cu colector și cu excitație serie, alimentată de la LC de c.c. prin VTC cu tiristoare GTO. Schema conține un filtru de paraziti radio (FPR), un întrerupător ultrarapid (QL), un contactor de linie (CL), un filtru de rețea (LR+CF), punte redresoare cu diode și tiristoare de recuperare (BDDT), VTC cu tiristorul GTO T1 (VTC), dioda de regim liber (DRL), tiristor de frânare reostatică (TF) și bobina de netezire (LM).

În regimul de tracțiune, VTC este conectat în serie cu motorul de tracțiune. În perioada de conducție a VTC motorul este conectat la linia de contact (Fig. 3.7, a), iar în perioada de blocare a VTC curentul de tracțiune este preluat de dioda de regim liber (Fig. 3.7, b). La pornire tensiunea este de aproximativ 40 Vcc și crește apoi, automat, până la tensiunea rețelei, când motorul ajunge la turația nominală. Creșterea vitezei până la valoarea maximă se face slăbind fluxul de excitație prin închiderea contactorului CE. Viteza vehiculului este comandată prin apăsarea pedalei de accelerație. Circuitul de alimentare a motorului permite funcționarea în ambele sensuri, astfel, la mers înainte sunt închise contactoarele CM1 și CM2, iar la mers înapoi sunt închise contactoarele CM3 și CF1.

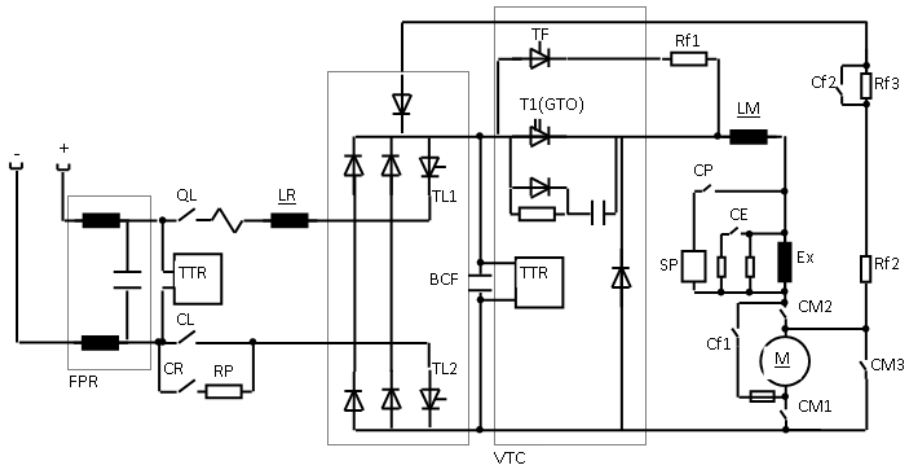


Fig. 3.6. Schema de forță de principiu a unui troleibuz echipat cu mașină de tracțiune de c.c. cu colector și cu excitație serie, alimentată de la LC de c.c. prin VTC cu tiristoare GTO.

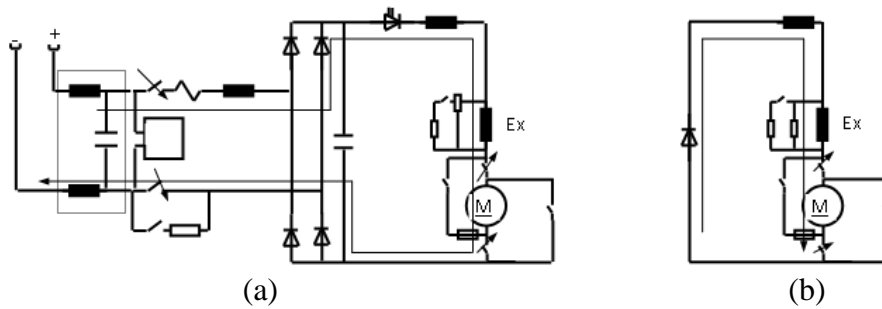


Fig. 3.7. Funcționarea în regim de tracțiune.

În funcție de receptivitatea LC, frânarea electrică poate fi o frânare reostatică, în situația în care LC nu poate prelua energia debitată de mașinile de tracțiune lucrând în regim de generator recuperativ, caz în care curentul de frânare circulă conform traseului din Fig. 3.8, a și b.

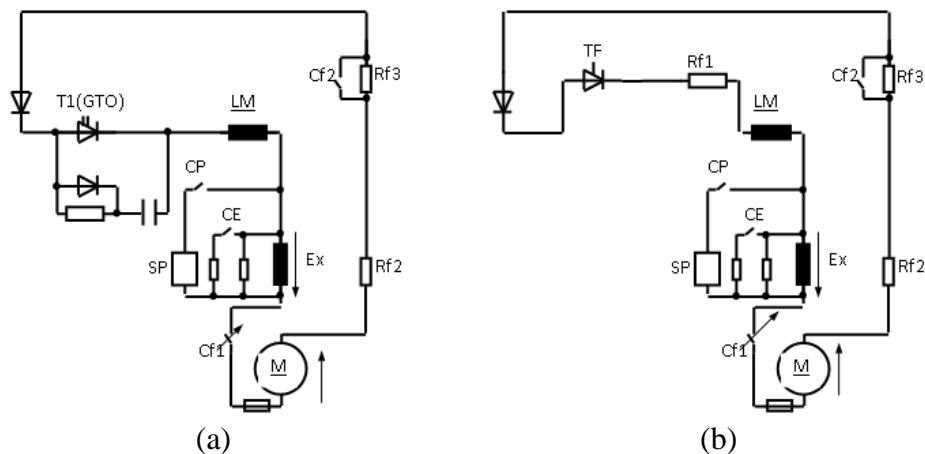


Fig. 3.8. Funcționarea în regim de frânare electrică reostatică.

În cazul în care LC este receptivă, în perioada de conducție a VTC mașina de tracțiune aflată în regim de generator se autoexcită (Fig. 3.9, a), pentru ca, în perioada de blocare a VTC, energia acumulată să fie debitată în LC (Fig. 3.9, b). Testarea receptivității LC se face prin măsurarea tensiunii pe condensatorul filtrului, comanda efectuându-se dintr-un bloc logic de comandă.

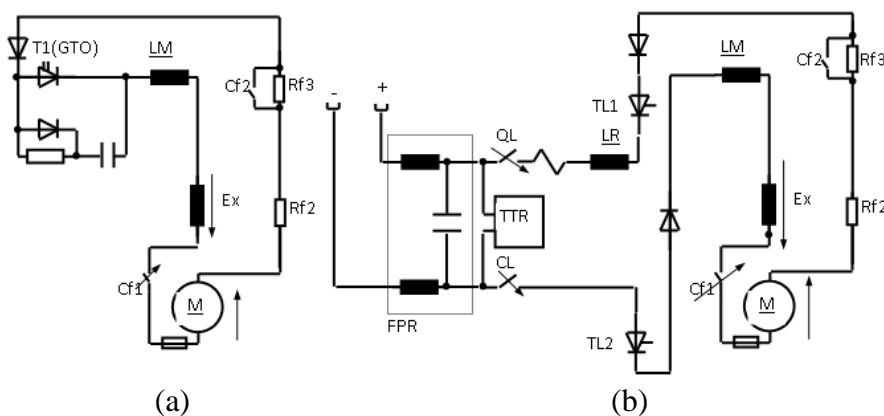


Fig. 3.9. Funcționarea în regim de frânare electrică recuperativă.

3.5. Testarea experimentală a regimului de tracțiune a MCC cu VTC de un cadran

În Fig. 3.10, se prezintă schema electrică a mașinii de curent continuu alimentată prin intermediul unui VTC de un cadran echipat cu un tranzistor IGBT.

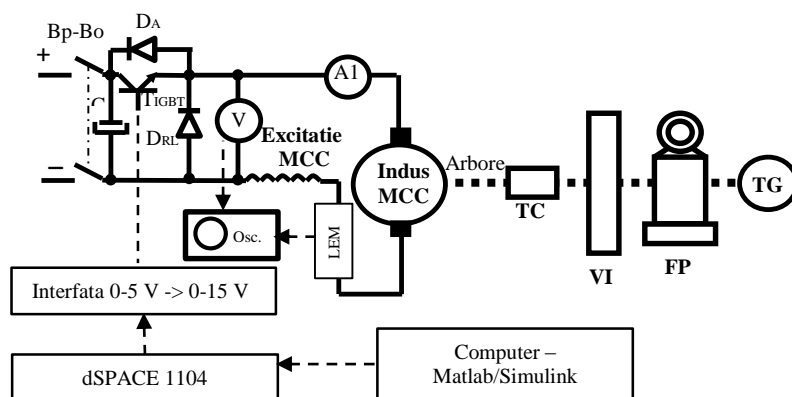


Fig. 3.10. Schema de montaj a echipamentelor de testare și măsurare.

Legenda:

Bp-Bo – Buton Pornit (verde) – Buton Oprit (roșu);

T_{IGBT} – tranzistor de putere de tip IGBT;

D_A – dioda în antiparalel;

D_{RL} – dioda de regim liber;

C - condensator;

V – voltmetru;

A1 – ampermetru;

MCC – mașina de curent continuu;

TC – traductor de cuplu;

VI – volant de inerție;

FP – frâna cu pulberi;

TG – tahogenerator;

Osc. – osciloscop.

Pentru testarea MCC în regim de tracțiune utilizând VTC de un cadran este necesară comanda tranzistorului IGBT pe bază. Controlul se va realiza utilizând un sistem de control de prototipaj rapid (SCPR) dSPACE 1104 sau dSPACE 1103. Schema de control este realizată în programul software Matlab/Simulink (Fig. 3.10). Controlul poate fi realizat în bucla deschisă, modificând strict durata relativă de conducție τ , care ia valori între 0 și 1 și poate fi calculată cu relația:

$$\tau = \frac{T_c}{T_e}, \quad (3.6)$$

unde T_c este timpul de conducție a T_{IGBT} , iar T_e este durata de tact a VTC (timpul de eșantionare).

Tensiunea efectivă U_{MCC} la bornele mașinii poate fi calculată cu relația:

$$U_{MCC} = \tau * U_a, \quad (3.7)$$

unde U_a este tensiunea continuă de alimentare.

Pentru demararea testului experimental se închide contactorul Bp – Bo, condensatorul C fiind astfel încărcat. Apoi, prin intermediul programului software ControlDesk (asociat SCPR), se modifică durata relativă de conducție τ pentru a modifica tensiunea efectivă de la bornele MCC și implicit viteza acesteia. Cu ajutorul FP se modifică încărcarea mecanică la arbore a MCC, mărimile măsurate fiind notate în Tabelul 3.3.

Cu ajutorul osciloscopului electronic se vor vizualiza formele de undă ale curentului și tensiunii aplicate MCC evidențiindu-se astfel modul de funcționare al VTC.

Pentru a face testarea experimentală și mai convivială, în locul comenzii numerice directe a τ , se poate folosi o pedală electrică, iar modificarea acestui factor prin intermediul pedalei, aduce și mai aproape de realitate modul de testare de laborator.

Tabelul 3.3

Mărimi măsurate				Mărimi calculate			
U_{MCC} [V]	I_{MCC} [A]	M [Nm]	n [rot/min]	Ω [rad/sec]	P_1 [W]	P_2 [W]	η [%]
$\tau = 0,25$							
$\tau = 0,50$							
$\tau = 0,75$							
$\tau = 1$							

Aplicația 4

VEHICULE ELECTRICE MOTOARE ALIMENTATE DE LA LINIE DE CONTACT DE CURENT ALTERNATIV MONOFAZAT (VEHICULE ELECTRICE MOTOARE PENTRU TRACȚIUNEA FERROVIARĂ INTERURBANĂ)

4.1. Introducere

În tracțiunea electrică feroviară interurbană, se folosesc următoarele sisteme de electrificare, enumerate în ordinea cronologică a apariției lor:

- sistemul curentului continuu, cu tensiunea de 1.5 kV, răspândit în Franța (parțial), Olanda, Japonia etc., respectiv de 3 kV, aplicat în Spania, Italia, Belgia, Polonia etc.
- sistemul curentului alternativ monofazat cu frecvență joasă de 16,7 Hz și tensiunea de 15 kV, utilizat în Germania, Elveția, Austria, Norvegia, Suedia, respectiv cu frecvență joasă de 25 Hz și tensiunea de 11 kV, aplicat parțial în SUA;
- sistemul curentului alternativ monofazat cu frecvență industrială (50 sau 60 Hz) și tensiunea de 25 kV, răspândit în țările care au trecut mai recent la electrificare feroviară interurbană: România, Ungaria, Bulgaria, Serbia, Portugalia, Danemarca etc., dar și în țările care își extind electrificarea feroviară pe linii de mare viteză: Franța, Anglia, Italia, Spania, Japonia, China, Coreea de Sud etc.

Acest din urmă sistem de electrificare feroviară interurbană s-a consacrat în ultimul timp datorită avantajelor tehnico-economice pe care le posedă comparativ cu celelalte sisteme.

Sistemele de electroalimentare în tracțiunea feroviară au determinat diferite tipuri operaționale de VEM neautonome. În continuare, se prezintă trei exemple de VEM neautonome pentru tracțiunea feroviară.

4.2. Locomotiva electrică românească LE-060-EA

4.2.1. Generalități

Locomotiva electrică românească a fost proiectată pentru alimentarea în curent alternativ monofazat, 50 Hz și 25 kV, la o putere de 5100 kW, distribuită pe cele 6 motoare de c.c. cu colector și cu excitație serie, de 850 kW fiecare.

Aparatul de rulare, care se sprijină pe CR, este alcătuit din 12 roți motoare, corespunzând la 6 osii motoare, distribuite câte trei pe fiecare din cele două boghiuri ale locomotivei. Acestea se sprijină pe aparatul de rulare prin intermediul suspensiei primare elastice, din arcuri lamelare. Fiecare osie motoare este antrenată de un motor de c.c. cu colector și cu excitație serie.

Șasiul locomotivei se sprijină pe boghiuri prin intermediul pivotului central și al suspensiei secundare cu arcuri, astfel încât să existe posibilitatea rotirii boghiului în plan orizontal față de cutie, pentru înscrierea mai ușoară în curbe a locomotivei.

Având în vedere principiul constructiv al părții mecanice a locomotivei electrice, formula osiilor pentru aceasta este $C'_o - C'_o$, ceea ce înseamnă că aparatul de rulare al locomotivei cuprinde 2 boghiuri, fiecare cu trei osii antrenate individual.

4.2.2. Schema circuitului de forță

Circuitul principal de forță al locomotivei electrice românești de c.a. monofazat, 50 Hz, 25 kV este prezentat în Fig. 4.1, unde s-au introdus notațiile:

- (1,2) pantografele (culeg curentul monofazat de la LC);
- (3,4) separatoare monopolare de acoperiș;
- (5) descărcător cu rezistență variabilă;
- (6) întreruptor automat principal (disjunctori);
- (7) transformator de curent pentru aparatele de măsură; de pe pupitrul de comandă;
- (8) separator cu cuțit de punere la pământ;

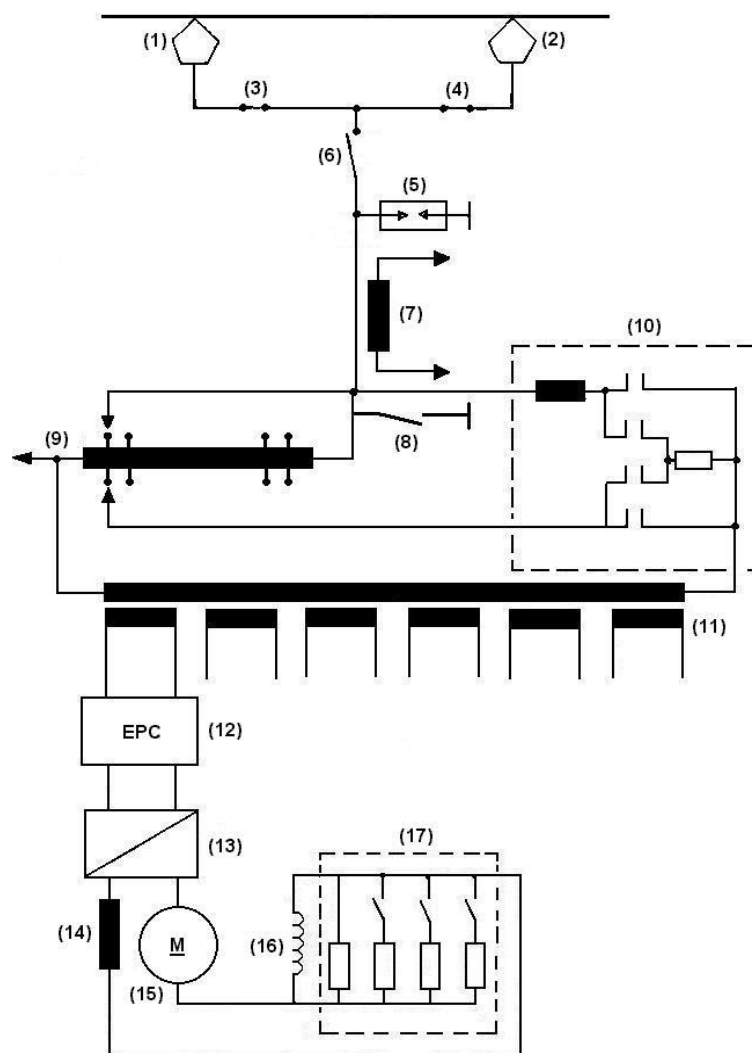


Fig. 4.1. Schema circuitului de forță al locomotivei mono-continue românești de 5100 kW.

- (9) transformator principal de alimentare cu 20 de prize în primar;
- (10) graduator;
- (11) transformator de tracțiune cu o înfășurare primară și 6 înfășurări secundare;
- (12) echipament de protecție și control;

- (13) redresor cu diode;
- (14) bobină de netezire;
- (15) indusul unui motor de tracțiune;
- (16) înfășurarea de excitație a unui motor de tracțiune;
- (17) circuit de șuntare a excitației.

Înterruptorul automat principal (disjunctorul) este aparatul care realizează întreruperea generală a circuitelor electrice ale locomotivei, asigurând protecția la suprasarcini și scurtcircuite. Poate fi comandat pentru conectare și deconectare de la distanță (de pe pupitrul de comandă). Permite deconectarea automată la suprasarcini, scurtcircuite sau în caz de defect. Constructiv se aseamănă cu întreruptoarele automate de c.a. de înaltă tensiune, folosite curent în electroenergetică. În momentul în care se produce un scurtcircuit, datorită creșterii rapide a curentului este necesară ruperea lui înainte de a ajunge la valoarea stabilizată, ceea ce impune folosirea unui aparat cu timp de declanșare foarte scurt.

Descărcătorul cu rezistență variabilă este prevăzut în echipamentul electric al locomotivei pentru protecția la supratensiuni atmosferice (care pot ajunge la sute de kV, cu durată de ordinul microsecundelor) și la tensiuni de comutație (cu valori mai reduse, dar de durată mai mare). Se montează în paralel între circuitul de forță și pământ.

Redresorul cu diode utilizează scheme care permit redresarea ambelor alternanțe. Schemele practice sunt cele cu punct median sau în punte monofazată (Fig. 4.2).

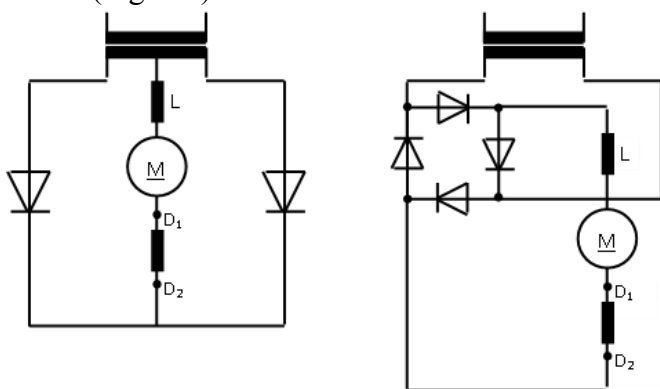


Fig.4.2. Scheme uzuale pentru redresoare bialternanță.

Tensiunea în secundarul transformatorului monofazat de tracțiune este sinusoidală:

$$u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t \quad (4.1)$$

și se aplică redresorului, la intrarea de c.a monofazat a acestuia; valoarea instantanee și forma tensiunii redresate (u_d) reprezintă o succesiune de semi-sinusoidale pozitive cu amplitudinea

$$U_{d \max} = \sqrt{2} * U_2 . \quad (4.2)$$

Tensiunea medie redresată rezultă:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t \, d(\omega t) = \frac{2}{\pi} \sqrt{2}U_2 . \quad (4.3)$$

Fenomenul de comutație (suprapunere anodică) ce apare la trecerea curentului de pe o diodă (respectiv braț al punții), care lucrează într-o alternanță, pe cealaltă diodă, care lucrează în cealaltă alternanță, are loc într-un interval de timp finit τ , care se exprimă prin valoarea unghiulară:

$$\gamma = \omega \tau . \quad (4.4)$$

Tensiunea medie redresată va fi, așadar,

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\gamma}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t \, d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 (1 + \cos \gamma) \quad (4.5)$$

$$\text{cu } \cos \gamma = 1 - \frac{2X_T I_2}{\sqrt{2}U_2 K_T^2} ; \quad (4.6)$$

$$\text{deci } U_d = 2\sqrt{2} \frac{U_2}{\pi} - \frac{2X_T I_2}{\pi K_T^2} , \quad (4.7)$$

unde

X_T - reactanța transformatorului văzută din primar;

K_T - raportul de transformare.

Forma de variație a tensiunii la ieșirea redresorului, cu considerarea unghiului de comutație, este prezentată în Fig. 4.3.

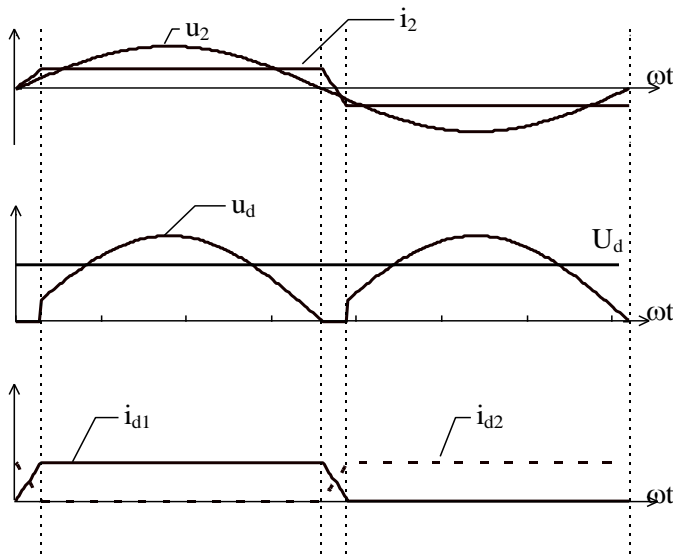


Fig. 4.3. Forma de variație a tensiunii redresate, luând în considerare unghiul de comutație.

Motoarele de tracțiune sunt motoare de curent continuu serie, în număr de 6, circuitul de alimentare simplificat al unui motor fiind prezentat în figura 4.4., pentru care se poate scrie:

$$u_d = e_m + R_d i_d + L_d \frac{di_d}{dt}, \quad (4.8)$$

unde

e_m – t.e.m. indusă dinamic a motorului de tracțiune;

R_d - rezistența ohmică echivalentă a circuitului de redresare;

L_d - inductanța echivalentă a circuitului de redresare (inductanța bobinei de netezire (sau a selfului de aplatizare) plus inductanța circuitului serie al motorului de tracțiune).

Ținând cont de faptul că $R_d i_d$ este neglijabilă în raport cu u_d , ecuația (4.8.) devine:

$$L_d \frac{di_d}{dt} = u_d - e_m \quad (4.9)$$

cu reprezentarea grafică din Fig. 4.5.

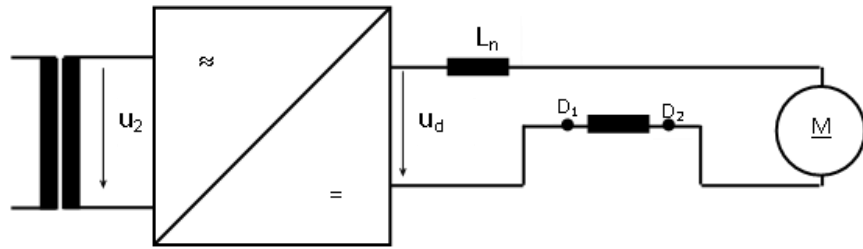


Fig. 4.4. Schema simplificată de alimentare a motorului de tracțiune de c.c. cu colector și cu excitație serie.

Din cronograma tensiunilor, se deduce cea a curentului i_d :

- în perioada în care $u_d > e_m$, selful de aplatizare înmagazinează energie;
- în perioada în care $u_d < e_m$, selful de aplatizare cedează energia înmagazinată.

Curentul prin ramura motorului va circula mereu în același sens; în punctele în care $u_d = e_m$, derivata se anulează și curentul va prezenta un maxim sau un minim.

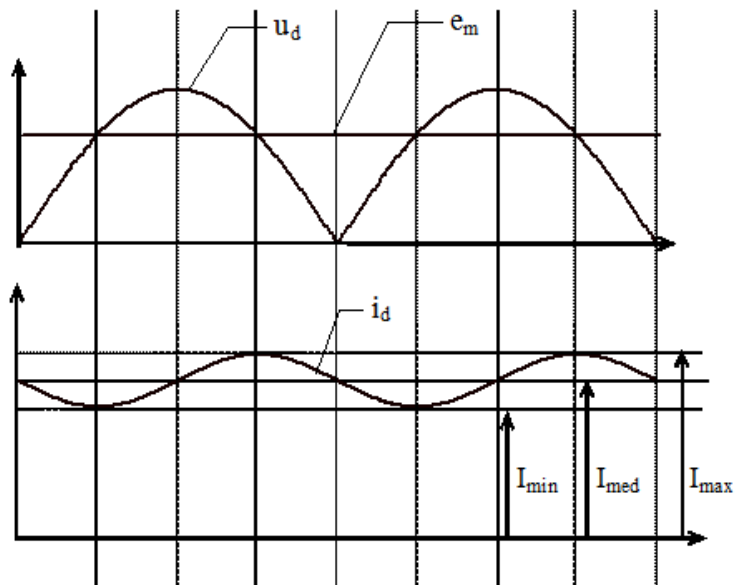


Fig. 4.5. Curentul ondulat de alimentare a motorului de tracțiune de c.c. cu colector și cu excitație serie.

În concluzie, curentul care trece prin motor este un curent ondulat, de aici și denumirea motorului de tracțiune al locomotivei de motor de curent ondulat. Ondulația nu depinde de valoarea curentului de sarcină, ci numai de valorile u_d și e_m și de forma curbelor de variație ale acestora.

Caracteristicile motoarelor de tracțiune de c.c. cu colector și cu excitație serie sunt:

- regim de durată;
- $P_n = 850 \text{ kW} (*6 = 5100 \text{ kW})$;
- $U_n = 770 \text{ V}$, corespunzător ultimei trepte a graduatorului;
- $I_n = 1180 \text{ A}$ ($I_{\max} = 2000 \text{ A}$);
- $n_n = 1100 \text{ rot/min}$ ($n_{\max} = 1920 \text{ rot/min}$).

4.2.3. Reglarea vitezei locomotivei electrice de c.a. monofazat 50 Hz, 25 kV

La locomotivele electrice de c.a. monofazat, reglarea vitezei se obține în limite largi numai prin variația tensiunii, pornind de la o valoare minimă până la valoarea ei nominală, iar pentru lărgirea domeniului de reglare, la ultima treaptă de tensiune, se mai aplică și câteva trepte de flux de excitație slăbit.

Pentru un transformator putem scrie:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} \quad (4.10)$$

de unde

$$U_2 = U_1 \frac{w_2}{w_1} \quad (4.11)$$

deci tensiunea de ieșire se poate regla prin variația numărului de spire ale înfășurărilor.

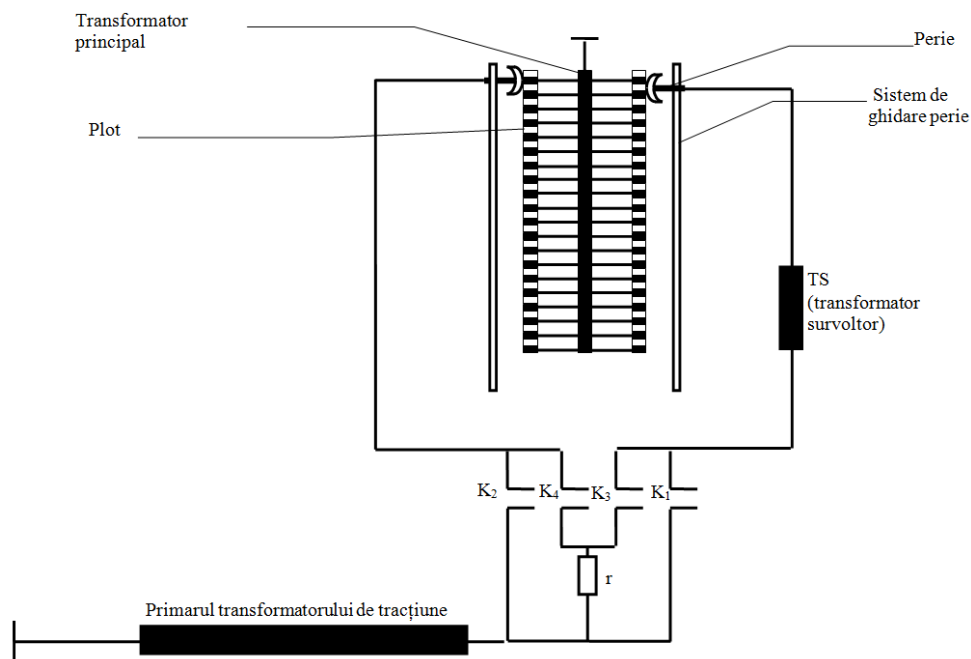


Fig. 4.6. Schema de conexiuni a graduatorului tip ASEA.

Dacă notăm:

$$k_1 = \frac{U_1}{w_1} = \text{const.}, \quad (4.12)$$

atunci:

$$U_2 = k_1 w_2 \quad (4.13)$$

și, deci, U_2 se reglează prin variația numărului de spire din înfășurarea secundară, acest tip de reglaj denumindu-se *reglaj pe joasă tensiune*.

Dacă notăm

$$k_2 = U_1 w_2 = \text{const.}, \quad (4.14)$$

atunci se poate scrie:

$$U_2 = \frac{k_2}{w_1}. \quad (4.15)$$

U_2 reglându-se prin variația numărului de spire al înfășurării primare, reglaj numit și *reglaj pe înaltă tensiune*.

Reglarea vitezei la locomotiva mono-continuu românească se face pe înaltă tensiune, utilizând un graduator de tip ASEA. Schema constructivă a acestuia este prezentată în Fig. 4.7 și are următoarele elemente componente:

- 4 contactoare de lucru și o rezistență de trecere, pentru realizarea treptelor de reglare;
- două ploturi fixate pe fiecare capăt al prizelor înfășurării primare, realizate prin alternanța unor zone conductoare fixate pe prize și zone izolante;
- două perii care alunecă pe cele două ploturi;
- o înfășurare suplimentară care aplică un salt de tensiune atunci când cele două perii se află pe aceeași priză.

Când peria p_2 vine în contact cu un plot aferent, de exemplu priza de tensiune n , tensiunea pe sarcină va fi

$$U_s = U_1 + n\Delta U_1 . \quad (4.16)$$

În momentul în care peria p_1 vine în contact cu plotul aceleiași prize n , tensiunea pe sarcină este

$$U_s = U_1 + n\Delta U_1 + \frac{\Delta U_1}{2} . \quad (4.17)$$

Se obțin astfel $2n$ trepte de reglare a vitezei prin graduator, la care se adăugă două-trei trepte de viteză prin șuntarea excitației.

În continuare, se prezintă modul de realizare a treptelor de reglare. Treapta 1 se obține cu peria p_1 pe porțiunea izolată și cu peria p_2 pe priza 1, K_2 și K_4 închise. Tensiunea pe sarcină este:

$$U_s = U_1 \quad (4.18)$$

Trecerea la treapta următoare se face prin două poziții intermediare:

- se deschide mai întâi K_4 , p_1 se deplasează pe priza 1, contactul făcându-se fără curent; se închide apoi K_3 , pentru limitarea curentului de scurt prin r ;

- se deschide K_2 , p_2 avansează pe porțiunea izolată, astfel încât :

$$U_s = U_1 + \frac{\Delta U_1}{2} \quad (4.19)$$

Întră, deci, în circuit TS, iar curentul are un salt ce depinde de saltul de tensiune dat de TS și de r .

Treapta a doua se obține prin închiderea lui K_1 , cu U_s dat de (4.19). Similar se realizează trecerea și la treptele superioare de reglare a vitezei.

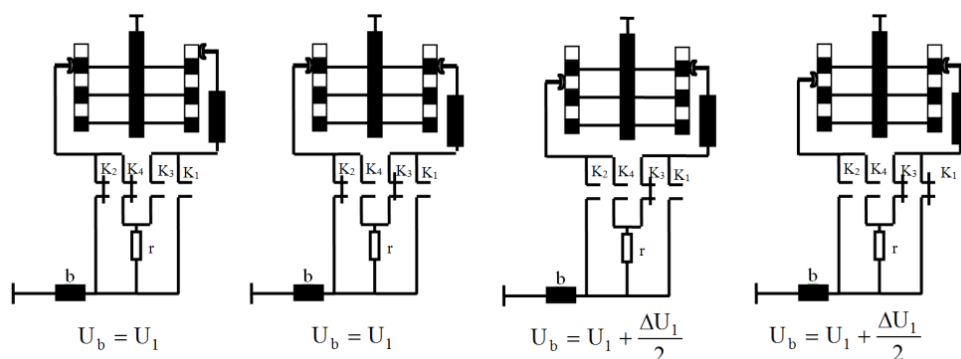


Fig. 4.7. Schema constructivă și etapele de comutare ale graduatorului.

4.2.4. Frânarea electrică la locomotiva de c.a. monofazat 50 Hz, 25 kV

Principiul frânării electrice la locomotiva de c.a. monofazat este următorul:

- de la motorul serie în regim de tracțiune se trece la generator cu excitație separată, în regim de frânare electrică;
- indusul fiecărui generator debitează pe o rezistență de frânare;
- excitațiile separate ale generatoarelor se înscriază între ele, iar alimentarea lor se poate face prin :
 - punte redresoare separată;
 - folosirea uneia din punțile redresoare aferente motoarelor de tracțiune.
- reglarea frânării se face prin variația curentului de excitație.

Schema de principiu a circuitului de frânare reostatica în regim de generator cu excitație separată este prezentată în Fig. 4.8. Modificarea curentului de excitație se realizează prin graduator.

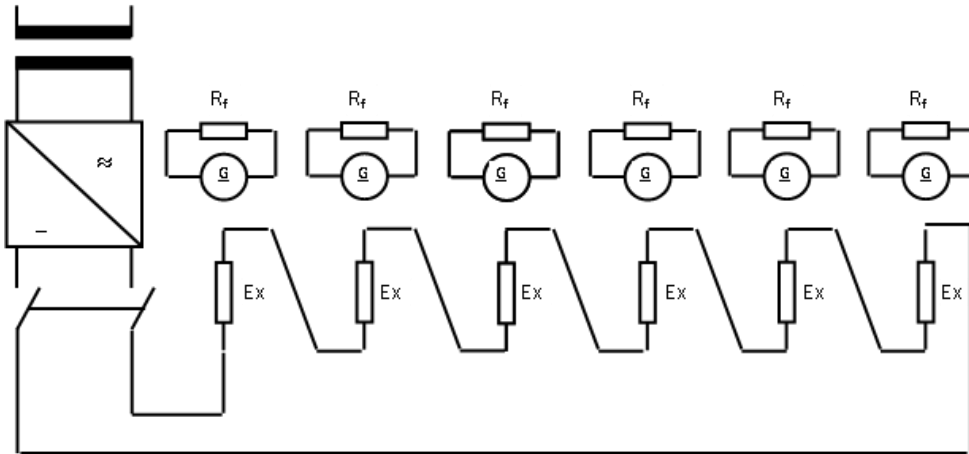


Fig. 4.8. Schema circuitului de frânare electrică reostatică la locomotiva mono-continuuă românească de 5100 kW.

Pentru trasarea caracteristicii de frânare, corespunzător circuitului din Fig. 4.8, se poate scrie ecuația de tensiune, în regim permanent:

$$E = k_e \Phi U = (r + R_f)I, \quad (4.20)$$

de unde

$$I = \frac{k_e \Phi U}{r + R_f} \quad (4.21)$$

sau

$$\Phi = \frac{(r + R_f)I}{k_e U}. \quad (4.22)$$

Cuplul de frânare are expresia

$$C_f = k\Phi I \quad (4.23)$$

care se mai poate scrie:

$$C_f |_{\Phi=const} = \frac{k k_e \Phi^2 U}{r + R_f} \quad (4.24)$$

sau

$$C_f |_{I=const} = \frac{k I^2 (r + R_f)}{k_e U} \quad (4.25)$$

Din ecuația (4.24), rezultă caracteristica $C_f / \phi = \text{const} = f(U)$ la flux constant (Fig. 4.9, a), care este o dreaptă, iar din ecuația (4.25) rezultă caracteristica $C_f / I = \text{const} = f(U)$, la curent constant (Fig. 4.9, b), care este o hiperbolă.

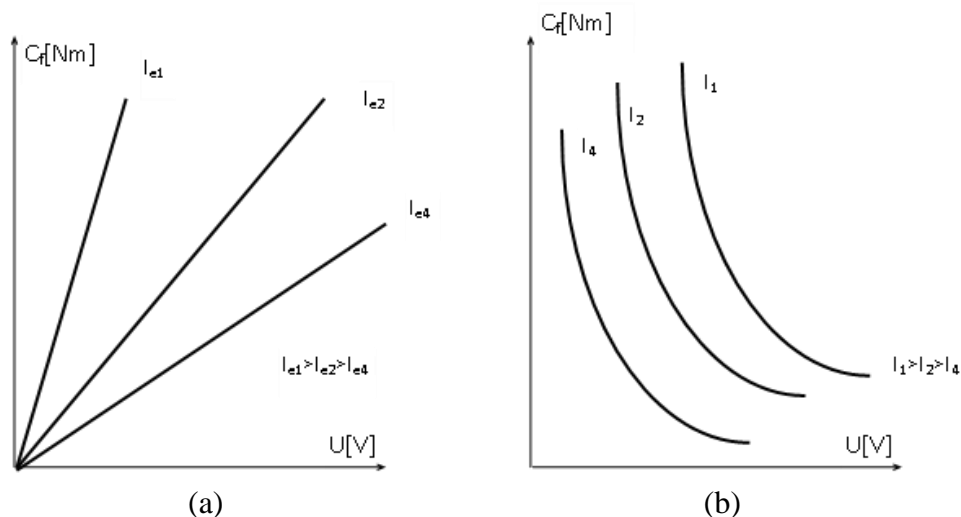


Fig. 4.9. Familia caracteristicilor de frânare electrică reostatică, la flux constant (a) și la curent constant (b).

4.3. Testarea experimentală a regimului de tracțiune și frânare reostatică a MCC alimentată prin autotransformator și redresor

Regimul de tracțiune

În Fig. 4.10 se prezintă schema electrică a mașinii de curent continuu alimentată prin intermediul unui autotransformator și a unui redresor.

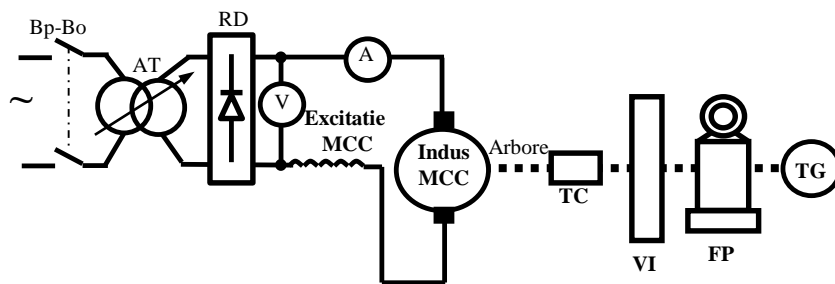


Fig. 4.10. Schema de montaj a echipamentelor de testare și măsurare (regimul de tracțiune).

Legenda:

Bp-Bo – buton pornit (verde) – buton oprit (roșu);

V – voltmetru;

A – ampermetru;

AT – autotransformator;

RD – redresor cu diode;

MCC – mașină de c.c. cu colector;

TC – traductor de cuplu;

VI – volant de inerție;

FP – frână cu pulberi;

TG – tahogenerator.

Deoarece în regim de tracțiune MCC funcționează cu excitație serie, trebuie prevăzută o sarcină mecanică pe arborele rotor, la tensiunea de alimentare nominală. Prin intermediul AT, se poate, însă, regla tensiunea de la zero la valoarea nominală, astfel încât riscul ca MCC să se supratureze în lipsa sarcinii mecanice este eliminat. După acționarea butonului de pornire Bp, prin intermediul AT, se poate crește tensiunea la bornele redresorului și, implicit, la bornele MCC, astfel că viteza mașinii va crește. Cu ajutorul frânei cu pulberi, se poate varia sarcina mecanică la arborele MCC.

Se determină caracteristicile turației $n=f(I)$ și randamentului $\eta=f(P_2)$, pentru mai multe valori ale tensiunii de alimentare a MCC. Datele se notează în Tabelul 4.1.

Viteza unghiulară rezultă din expresia:

$$\Omega = n \cdot \frac{\pi}{30} \quad (4.26)$$

iar, puterea utilă (mecanică) a MCC rezultă din relația:

$$P_2 = M \cdot \Omega \quad (4.27)$$

Puterea (electrică) absorbită de motor este dată de produsul:

$$P_1 = U \cdot I \quad (4.28)$$

Randamentul energetic al MCC se determină cu relația:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad (4.29)$$

Tabelul 4.1

Mărimi măsurate				Mărimi calculate			
U_{MCC} [V]	I_{MCC} [A]	M [Nm]	n [rot/min]	Ω [rad/sec]	P_1 [W]	P_2 [W]	η [%]
$U_{MCC}=U_{nom}$							
$U_{MCC}=U_{nom}*0.75$							
$U_{MCC}=U_{nom}*0.5$							
$U_{MCC}=U_{nom}*0.25$							

Regimul de frânare electrică reostatică

Pentru a testa MCC în regim de frânare electrică reostatică, este necesară trecerea MCC din configurația cu excitație serie în cea cu excitație derivație, conform schemei din Fig. 4.11.

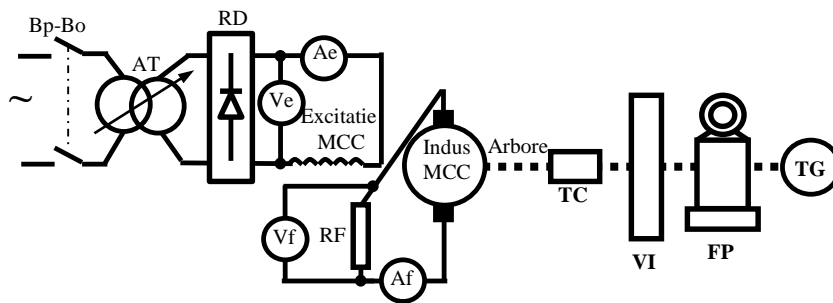


Fig. 4.11. Schema de montaj a echipamentelor de testare și măsurare (regimul de frânare).

În cazul funcționării MCC în regim de generator frânând reostatic, doar excitația mașinii este alimentată de la AT prin intermediul RD. Indusul MCC se conectează la o rezistență de frânare Rf.

Inițial, se procedează la antrenarea volantului de inerție (cu ajutorul MCC în regim de motor sau cu o altă mașină electrică cuplată la axul ansamblului electromecanic). Apoi, cu MCC în regim de generator, se frânează volantul de inerție până la oprirea acestuia. Datele măsurate se notează în Tabelul 4.2 și se trasează graficul $n=f(P_f)$.

Tabelul 4.2

U_f [V]	I_f [A]	P_f [W]	n [rot/min]

Puterea (electrică) disipată pe Rf este dată de produsul:

$$P_f = U_f * I_f . \quad (4.30)$$

Aplicația 5

VEHICULE ELECTRICE MOTOARE ECHIPATE CU MAȘINI DE TRACȚIUNE ASINCRONE TRIFAZATE

Schema bloc a echipamentului de acționare a unui VEM cu mașină asincronă (de inducție) și convertor static de frecvență, alimentat de la LC de c.c. este prezentată în Fig. 5.1. Convertorul static de frecvență (CSF) are în structura sa trei componente principale, și anume:

- convertorul de rețea;
- circuitul intermediar de c.c.;
- convertorul de mașină.

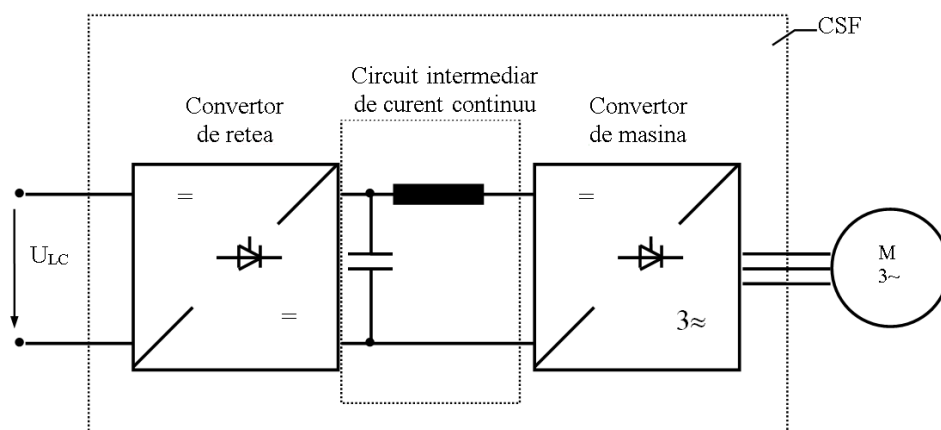


Fig. 5.1. Schema-bloc a circuitului de forță al VEM echipat cu mașină de tracțiune asincronă (de inducție) trifazată și CSF.

Convertorul de mașină este un invertor de curent sau de tensiune, în punte trifazată. În primul caz, în circuitul intermediar este necesară o bobină, în cel de-al doilea, un condensator. Convertorul de rețea, în cazul utilizării invertorului de curent, este un VTC și servește la modificarea valorii curentului din circuitul intermediar de c.c. În cazul utilizării invertorului de tensiune, convertorul de rețea poate lipsi, invertorul fiind conectat direct la LC de c.c. și dimensionat pentru întregul domeniu de variație a tensiunii de alimentare.

Dacă LC este de c.a. monofazat, în situația utilizării invertorului cu caracter de sursă de curent, este necesară folosirea unui redresor comandat în amonte de circuitul intermediar de c.c. pentru controlul curentului din acest circuit. Dacă însă invertorul folosit are caracter de sursă de tensiune, redresorul de rețea poate fi necomandat, realizat cu diode.

5.1. Comanda și controlul VEM echipate cu mașini asincrone trifazate și invertor de tensiune

Sistemul de acționare format din CSF și mașină asincronă trifazată cu rotor în colivie funcționează, până la viteza nominală a VEM, la flux constant în întrefier, ceea ce echivalează cu un regim de funcționare la cuplu electromagnetic constant. În domeniul de la viteză nominală la viteză maximă, funcționarea este la tensiune constantă, deci la flux slăbit, ceea ce pentru o valoare constantă a curentului de alimentare echivalează cu un regim de funcționare la putere constantă.

Analizând expresia vitezei rotorului mașinii asincrone de tracțiune,

$$\Omega[\text{rad / s}] = 2\pi n[\text{rot / s}] = \frac{2\pi f_1(1-s)}{p}, \quad (5.1)$$

rezultă că viteza se poate modifica prin intermediul frecvenței statorice f_1 , a numărului de perechi de poli p sau a alunecării s .

Cea mai eficientă metodă de modificare a vitezei motorului asincron trifazat de tracțiune o reprezintă modificarea frecvenței tensiunii de alimentare. Pentru a se evita saturarea miezului magnetic la frecvențe joase, modificarea vitezei se face modificând și valoarea tensiunii de alimentare concomitent cu frecvența acesteia. În acest fel, fluxul maxim pe pol și cuplul critic se mențin constante.

Modularea în durată (sau în lățime, PWM) a impulsurilor este procedeul prin care intervalele de conducție ale tiristoarelor invertorului se fragmentează după o anumită lege impusă. Tensiunea de alimentare a invertorului rămâne constantă. Variația tensiunii de ieșire a invertorului se obține ca urmare a variației impulsurilor de tensiune, conform cu legea de comandă dată. Vor avea loc modificări ale suprafețelor “tensiune-timp”, duratele impulsurilor de tensiune fiind modulate conform legii de variație a

unui semnal modulator (Fig. 5.2). Gama de variație a semnalului modulator se alege în funcție de gama de reglare dorită a turației motorului.

În Fig. 5.2, a, se prezintă o strategie de modulație PWM intersecitivă sinus-triunghi cu eșantionare regulată simetrică. Se observă, că eșantionarea undei modulator sinusoidale se realizează în fiecare perioadă a undei purtătoare triunghiulare. Această strategie de modelare prezintă următoarele caracteristici [1]:

- eșantionarea tensiunilor de referință se face la intervale regulate, corespunzătoare vârfurilor pozitive (negative) ale undei purtătoare;
- valoarea tensiunii de referință obținută în urma eșantionării este menținută constantă până la următoarea eșantionare;
- forma undei de referință rezultată reprezintă o aproximare în trepte a undei fundamentale sinusoidale;
- permite o implementare în timp real.

În Fig. 5.2, b, se prezintă principiul eșantionării asimetrice. În acest caz, unda modulator sinusoidală este eșantionată la fiecare semiperioadă a undei purtătoare triunghiulare, semnalul PWM rezultând asimetric față de unda purtătoare. Deși eșantionarea asimetrică presupune un efort suplimentar în ceea ce privește deducerea timpilor de comutație în comparație cu eșantionarea simetrică, avantajul principal al acesteia îl constituie semnalul de ieșire ce are un spectru de armonici ameliorat [1].

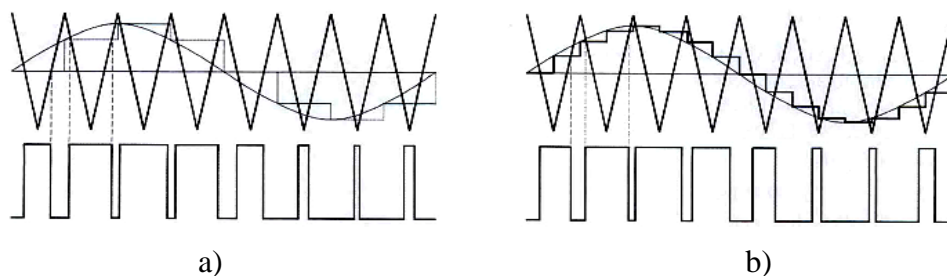


Fig. 5.2. Modulație PWM intersecitivă sinus-triunghi cu (a) eșantionare regulată simetrică; (b) eșantionare regulată asimetrică.

Prin fragmentarea intervalului de conducție a tranzistoarelor (de regulă, IGBT) se reduce conținutul în armonici joase al tensiunii de ieșire, reducerea fiind substanțială în cazul în care se folosește modularea în durată a impulsurilor după o lege sinusoidală, ceea ce face ca motorul să

funcționeze în condiții apropiate de cele corespunzătoare alimentării cu unda sinusoidală. Pentru a urmări modul în care se obține tensiunea de ieșire a convertorului în această situație, se consideră schema-bloc a acestuia, prezentată în Fig. 5.3, unde sunt evidențiate tensiunile de ieșire de fază și de linie.

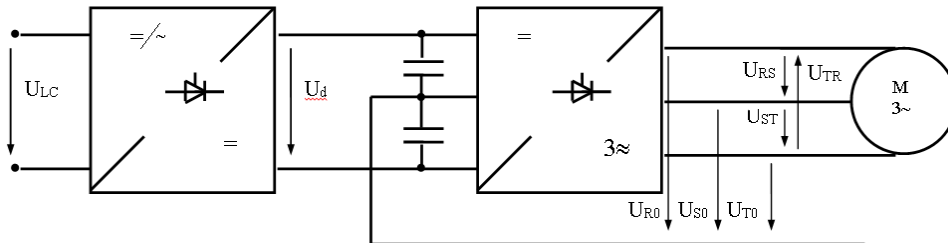


Fig. 5.3. Schema-bloc a CSF.

Tensiunile de fază sunt măsurate față de potențialul zero al punctului median al divizorului capacitiv. Fiecare braț al inverterului în punte trifazată se consideră ca un întreruptor ideal, care comută pe rând bara de plus, respectiv minus, a circuitului intermediar de c.c. de la intrarea sa. Astfel, au loc conducții alternate succesive ale comutatoarelor electronice de pe același braț.

5.2. VEM de tip troleibuz echipat cu inverter de tensiune și mașină asincronă trifazată cu rotor în colivie

În cele ce urmează, se prezintă o soluție tehnică dezvoltată de ICPE – SAERP București pentru circuitul de forță al troleibuzelor echipate cu mașini asincrone trifazate de tracțiune. Câteva astfel de troleibuze fabricate la ‘Astra Bus’ Arad, au fost puse în circulație în Municipiul Cluj-Napoca, urmând ca, în viitor, altele să fie achiziționate și date în exploatare (perioada de referință – februarie 2013).

În Fig. 5.4, este prezentată schema electrică de forță, simplificată, a unui troleibuz echipat cu mașină asincronă trifazată cu rotor în colivie, alimentată prin inverter de tensiune în punte trifazată. Echipamentul electric evidențiază următoarele componente principale:

DRVC – descărcător cu rezistență variabilă;
FPR(1,2,3), F2, F6 – siguranțe fuzibile;
LFPR(1,2) – bobine de filtrare;
CFPR – condensator de filtrare;
QL – întrerupător automat ultrarapid;
KL – contactor de linie;
SA – totalitatea serviciilor auxiliare;
LR – bobină de netezire;
TCL – traductor curent linie (folosit la contorizarea energiei consumate sau returnate în LC);
D(1,2,3,4) – bloc de diode (asigură polaritatea corectă);
TL(1,2) – tiristoare de recuperare;
TTF – traductor de tensiune filtru;
VF – tranzistor IGBT frânare;
DF – diode de frânare;
RF – rezistență de frânare;
V(1,2,3,4,5,6) – tranzistoare IGBT cu diode în antiparalel;
TIR, TIS, TIT – traductoare de curent;
M1 – mașină asincronă trifazată cu rotor în colivie.

Etajul de protecție și filtrare asigură, în primul rând, protecția echipamentelor electrice la curenți de scurtcircuit, prin siguranțele fuzibile FPR1 și FPR2. Descărcătorul cu rezistență variabilă asigură protecția la supratensiuni atmosferice și de comutație. Bobinele (LFPR1 și LFPR2) și condensatorul de filtrare (CFPR) reduc perturbațiile induse de dispozitivele semiconductoare.

Blocul SA înglobează generic toate serviciile auxiliare de la bordul troleibuzului (aer condiționat, încălzire, lumini, semnalizare, servodirecție, servofrână etc.)

Blocul de diode D1-D4 asigură alimentarea inverterului cu aceeași polaritate a tensiunii indiferent de modul de conectare a troleelor.

Tiristoarele TL1 și TL2 permit, atunci când sunt în conducție, returnarea energiei electrice în LC de c.c., la frânarea electrică recuperativă a troleibuzului. Evident, frânarea se poate efectua doar dacă polaritatea LC de c.c. la nivelul troleelor este cea corectă.

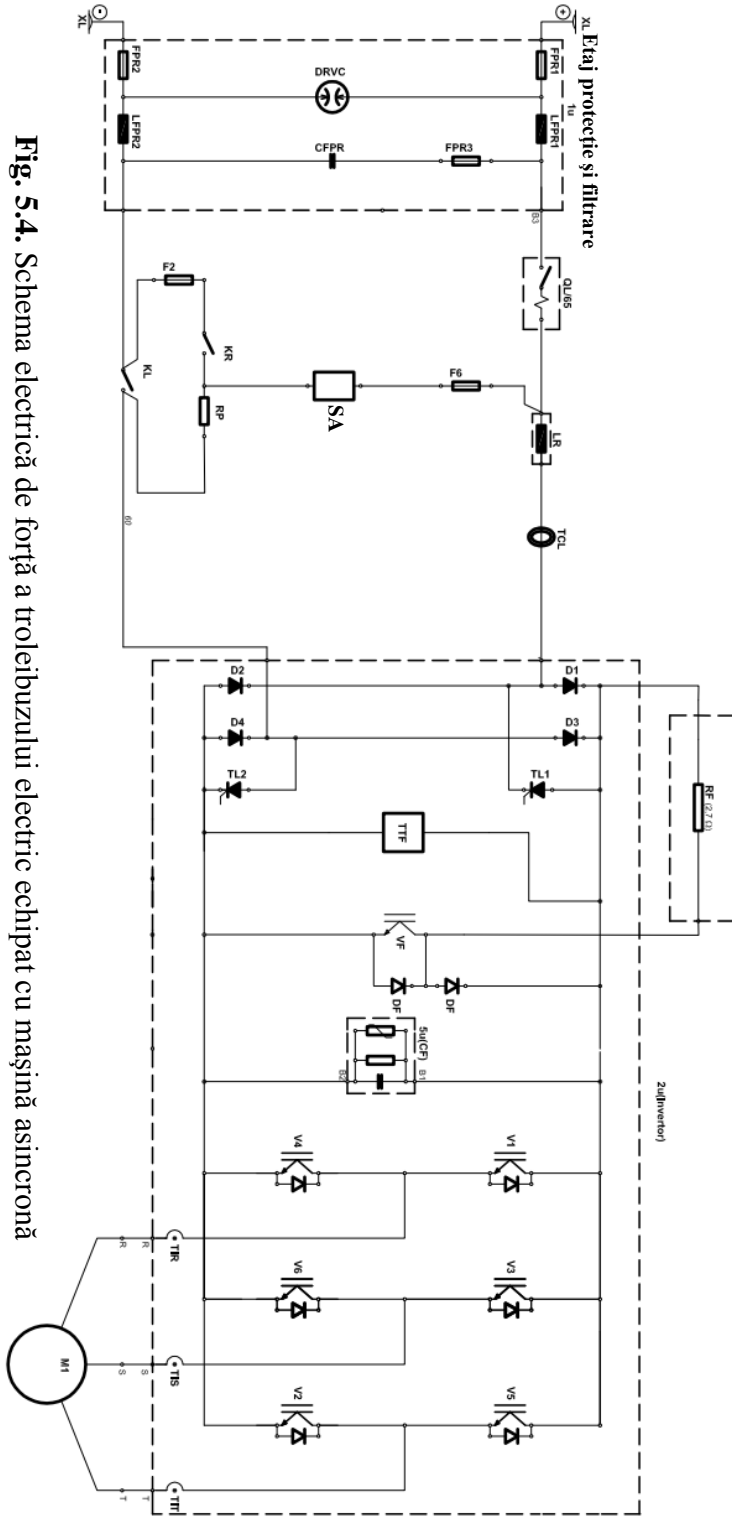


Fig. 5.4. Schema electrică de forță a troleibuzului electric echipat cu mașină asincronă

Frânarea electrică reostatică poate fi realizată prin simpla comandă a **tranzistorului VF**, care va permite intrarea în circuit a **blocului de rezistențe RF**.

Condensatorul de filtrare CF are montate în paralel un set de 2-3 rezistențe care să permită descărcarea lui, atunci când circuitul de forță nu este alimentat (pentru securitatea personalului de intervenție la avarii sau verificări).

Tranzistoarele de putere IGBT (V1-V6), alături de diodele în antiparalel, compun inverterul propriu-zis. Acestea sunt comandate, astfel încât la bornele mașinii asincrone, amplitudinea și frecvența tensiunii statorice să poată fi reglate în limite largi.

5.3. Testarea experimentală a regimului de tracțiune și frânare a mașinii asincrone alimentată printr-un inverter cu caracter de sursă de tensiune

În Fig. 5.5, se prezintă schema de montaj utilizată pentru studiul controlului mașinii asincrone trifazate (MA) prin intermediul unui inverter de tensiune.

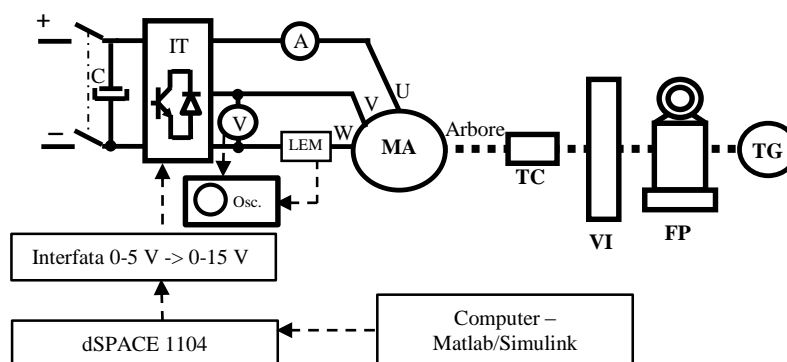


Fig. 5.5. Schema de montaj a echipamentelor de testare și măsurare.

Legenda:

- Bp-Bo – Buton Pornit (verde) – Buton Oprit (roșu);
- V – voltmetru;
- A – ampermetru;
- C – condensator;
- IT – inverter de tensiune;

LEM – traductor de curent LEM;
Osc. – osciloscop;
MA – mașină asincronă trifazată cu rotor în colivie;
TC – traductor de cuplu;
VI – volant de inerție;
FP – frână cu pulberi;
TG – tahogenerator.

Pentru testarea MA utilizând IT, este necesară comanda pe grilă a celor 6 tranzistoare IGBT. Comanda se realizează utilizând un sistem de prototipare rapidă a controlului (SCPR) dSPACE 1104 sau dSPACE 1103. Schema de control este dezvoltată în Matlab/ Simulink. Există mai multe tipologii de control a MA, dintre care cele mai întâlnite sunt: controlul scalar, controlul vectorial și controlul direct de cuplu și flux (DTFC). Pentru simplitate, pe platforma experimentală se implementează controlul scalar ($U/f=ct.$).

Controlul este realizat în buclă deschisă, modificând strict coeficientul (factorul) de comandă α , care ia valori între 0 și 1. Valoarea 0 corespunde valorilor nule pentru tensiune și implicit pentru frecvență, iar valoarea 1 corespunde valorilor nominale ale tensiunii și frecvenței aplicate înfășurărilor de fază statorice ale MA.

Regimul de tracțiune

Pentru demararea testului experimental, se închide contactorul Bp – Bo, condensatorul C fiind astfel încărcat. Apoi, prin intermediul programului ControlDesk (asociat SCPR), se modifică factorul de comandă α , pentru modificarea amplitudinii și frecvenței tensiunii statorice aplicate MA și, implicit, a vitezei rotorice. Cu ajutorul FP se modifică sarcina mecanică la arbore a MA, mărimile măsurate fiind notate în Tabelul 5.1. Puterea activă P_1 se măsoară cu ajutorul unui analizor conectat la cele trei faze statorice ale MA. Se determină caracteristicile $\eta=f(P_2)$, $n=f(P_2)$ și $I=f(P_2)$.

Tabelul 5.1

Mărimi măsurate					Mărimi calculate		
U_{MA} [V]	I_{MA} [A]	M [Nm]	n [rot/min]	P_1 [W]	Ω [rad/sec]	P_2 [W]	η [%]
$\alpha = 0,25$							
$\alpha = 0,50$							
$\alpha = 0,75$							
$\alpha = 1$							

Cu ajutorul osciloscopului electronic se vizualizează formele de undă ale curentului (pentru o fază statorică) și ale tensiunii (între faze) aplicate MA, evidențiindu-se, astfel, modul de funcționare al IT.

În locul comenzii numerice directe a coeficientului α , se poate folosi o pedală electrică, ceea ce aduce testarea de laborator mai aproape de realitatea practică.

Regimul de frânare electrică

Pentru testarea regimului de frânare electrică, este necesară, inițial, antrenarea volantului de inerție (cu MA, în regim de motor sau cu o altă mașină electrică cuplată la axul ansamblului electromecanic), iar apoi trecerea MA în regim de generator, prin impunerea unei alunecări negative ($s < 0$), adică a unei viteze a câmpului magnetic învârtitor (determinată prin comanda IT) inferioară celei rotorice. Datorită particularităților rețelei electrice de c.c. din laborator, este necesară disiparea energiei electrice recuperate pe o rezistență montată la bornele circuitului de c.c. Datele măsurate se notează în Tabelul 5.2 și se trasează graficul $\underline{n}=f(P_f)$. Puterea de frânare se măsoară cu ajutorul aceleiași analizor de energie conectat la cele trei înfășurări de fază statorice ale MA.

Tabelul 5.2

P_f [W]	n [rot/min]

[1] <http://ep.etc.tuiasi.ro/site/Tehnici%20M.I.D/LAB1-2>

Aplicația 6

PROBLEME DE DINAMICA MIȘCĂRII

Problema 1

Pe o porțiune de cale de rulare ghidată cu declivitatea de $i=25\%$ și raza de curbă $\rho_c=300$ m, circulă un tren electric automotor. Locomotiva electrică, având o masă proprie de $m_l=120$ t, tractează o remorcă de $m_r=600$ t și se deplasează cu viteza constantă de $v=80$ km/h. Să se determine forța de tracțiune a trenului electric și puterea dezvoltată de acesta, precum și coeficientul de aderență necesar. Să se determine, de asemenea, coeficientul de aderență necesar și prin formula empirică propusă de Curtius și Kniffler.

Se dă: $f_{rp}=2,5+0,25*10^{-3}*v^2$ - forța specifică de rezistență principală;

$f_{rc}=750/\rho_c$ - forța specifică de rezistență în curbă;

$$\text{formula lui Curtius-Kniffler: } \Psi = 0,161 + \frac{7,5}{3,6v + 44} \cdot$$

Problema 2

Pe o porțiune de cale de rulare ghidată cu declivitatea de $i=25\%$ și raza de curbă $\rho_c=300$ m, circulă un tren electric automotor. Locomotiva electrică, având o masă proprie de $m_l=120$ t, tractează o remorcă de $m_r=600$ t și se deplasează plecând din repaus cu o accelerație de $a=1$ m/s² pentru a atinge în final viteza de deplasare de 80 km/h. Să se verifice dacă acest lucru este posibil.

Se dă: $f_{rp}=2,5+0,25*10^{-3}*v^2$ - forța specifică de rezistență principală;

$f_{rc}=750/\rho_c$ - forța specifică de rezistență în curbă;

$\xi=1,1$ - coeficientul global de inerție.

Problema 3

Pe o porțiune de cale de rulare ghidată cu declivitatea de $i=15\%$ și raza de curbă $\rho_c=190$ m, circulă un tren electric automotor cu masa totală $m_r=600$ t. Cât de mari trebuie să fie forța de tracțiune a trenului electric și puterea totală dezvoltată de acesta pentru ca la viteza de 45 km/h să mai aibă încă o accelerație de $a=0,2$ m/s² ?

Se dă: $f_{rp}=2,5+0,25*10^{-3}*v^2$ - forța specifică de rezistență principală.

Problema 4

Fie o rama electrică de metrou cu masa totală de $m_t=90$ t care în condiții nominale are o accelerație de $a=1,2$ m/s² până la viteza de $v_1=v_N=36$ km/h. Până la viteza maximă $v_2=v_{max}=80$ km/h, forța de tracțiune scade conform hiperbolei de putere constantă. Forța de rezistență la înaintare a vehiculului electric se neglijează.

Cât este forța de tracțiune normală F_{tN} și puterea totală normală P_{tN} dezvoltată de vehicul?

Să se determine timpii t_1 și t_2 , după care sunt atinse vitezele v_1 respectiv v_2 .

Să se determine drumul parcurs de vehicul în timpii t_1 respectiv t_2 .

Se cunoaște că soluția ecuației diferențiale de ordinul I $v \frac{dv}{dt} = K$ este de

forma $v = \sqrt{2Kt + c}$.

Se dă: $\xi=1,11$ - coeficientul global de inerție.