

SUBSTAȚII DE TRACȚIUNE

1. CONCEPȚIA GENERALĂ A UNUI SISTEM DE TRACȚIUNE ELECTRICĂ

Vehiculele electrice cu alimentare de la linia de contact (vehicule neautonome, la care sursa de energie nu este pe vehicul) necesită o serie de instalații care formează un *sistem de tracțiune electrică*. În Figura 1 se prezintă principalele echipamente ale unui sistem de tracțiune electrică. *Instalațiile de producere, transport și distribuție* a energiei electrice sunt constituite din: centrale electrice CE (hidrocentrale, termocentrale, centrale nucleare, eoliene), stații de transformare ridicătoare de tensiune SRT și liniile electrice aeriene de înaltă tensiune LIT (110 kV, 220 kV, 400 kV) pentru transportul energiei electrice la mare distanță. De menționat că aceste instalații nu sunt specifice tracțiunii electrice.

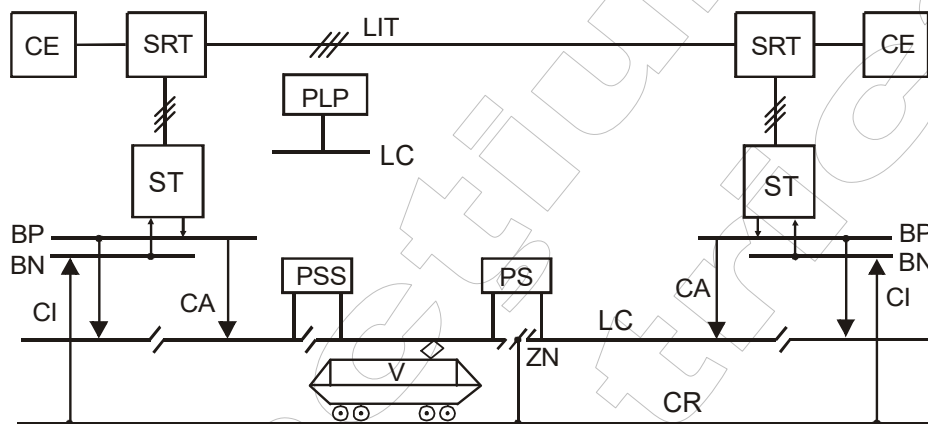


Fig. 1. Schema generală a unui sistem de tracțiune electrică.

Substațiile de tracțiune ST realizează racordarea la sistemul național electroenergetic de înaltă tensiune sau la sistemul electroenergetic propriu al căii ferate, precum și adaptarea parametrilor energiei electrice (tensiune, curent, frecvență) la valorile standardizate necesare la linia de contact LC.

Linia de contact LC este o rețea electrică aeriană montată deasupra căii de rulare și de la care vehiculul preia energia prin intermediul unui captator sau culegător de curent. De notat că unele vehicule sunt alimentate printr-o șină de contact, situată la nivelul solului. Alimentarea se face în curent continuu sau curent alternativ la diverse tensiuni și frecvențe.

Calea de rulare CR este metalică (din șine) pentru vehiculele feroviare, tramvaie și metrouri, având în același timp și rol de întoarcere a curentului la substația de tracțiune. Pentru unele vehicule calea de rulare poate fi și din beton sau asfalt (troleibuze) sau poate fi mixtă (pentru unele metrouri).

Cablurile de alimentare CA sunt linii electrice aeriene, care realizează legătura între barele de joasă tensiune ale substațiilor de tracțiune (barele pozitive BP) și linia de contact.

Zona neutrală ZN reprezintă o zonă de separare a porțiunilor liniei de contact alimentate de la diferite faze ale sistemului electroenergetic.

Posturile de secționare PS permit conectări sau secționări longitudinale ale liniei de contact între două substații de tracțiune, în acest fel limitând zona pe care se poate manifesta un defect.

Secționarea longitudinală se poate efectua suplimentar și în posturi de subsecționare PSS, amplasate între substații și posturile de secționare. În plus, în cazul căilor de rulare duble, PS și PSS realizează și legarea în paralel a liniilor de contact de pe cele două căi, ceea ce îmbunătățește nivelul tensiunii în catenară prin micșorarea căderilor de tensiune. Dacă nu există posturile PSS, legarea în paralel se face prin posturile de legare în paralel PLP. *Cablurile de întoarcere* CI asigură închiderea circuitului electric. Ele fac legătura între calea de întoarcere a curentului (șine) și partea de joasă tensiune a substației de tracțiune (la barele negative BN). *Vehiculul electric* V preia energia de la linia de contact prin intermediul captatorului, energie pe care o transformă în energie mecanică la obada roților motoare, ceea ce asigură deplasarea vehiculului.

În cazul *vehiculelor autonome*, sistemul prezentat anterior se regăsește – cu anumite reduceri – chiar pe vehicul. Astfel, pe un vehicul diesel-electric există un motor diesel cuplat cu un generator de c.c. sau c.a. (care constituie “centrala electrică”), energia electrică fiind apoi furnizată direct motoarelor de tracțiune. Astfel, nu mai sunt necesare stațiile ridicătoare de tensiune SRT, liniile electrice LIT, substațiile de tracțiune substații de tracțiune, în acest fel limitând zona pe care se poate ST, linia de contact LC, posturile de secționare PS, cablurile de alimentare CA și cele de întoarcere CI, ceea ce face ca randamentul global al sistemului de tracțiune diesel-electric să fie mai mare decât cel al sistemului electric. Astfel randamentul global al sistemului de tracțiune electric, luând în considerare ca punct de plecare centralele electrice și ca punct final roțile motoare ale locomotivei, variază între 15% și 30%, în timp ce la o locomotivă diesel-electrică variază între 24% și 33%.

Sistemele de tracțiune electrică realizate până în prezent sunt următoarele:

- ✓ Sistemul trifazat de frecvență feroviară, (nu s-a dezvoltat datorită dificultăților mari de captare bifazată);
- ✓ Sistemul de tracțiune în curent continuu;
- ✓ Sistemul de tracțiune în curent alternativ monofazat de joasă frecvență (16 2/3 Hz, 15 kV);
- ✓ Sistemul de tracțiune în curent alternativ monofazat de frecvență industrială (50 Hz, 25 kV).

2. SISTEMUL DE TRACȚIUNE ÎN CURENT CONTINUU

STCC este sistemul în care linia de contact este alimentată în curent continuu, fiind utilizat atât în tracțiunea electrică urbană cât și în tracțiunea electrică feroviară. Schema de principiu este prezentată în Figura 2.

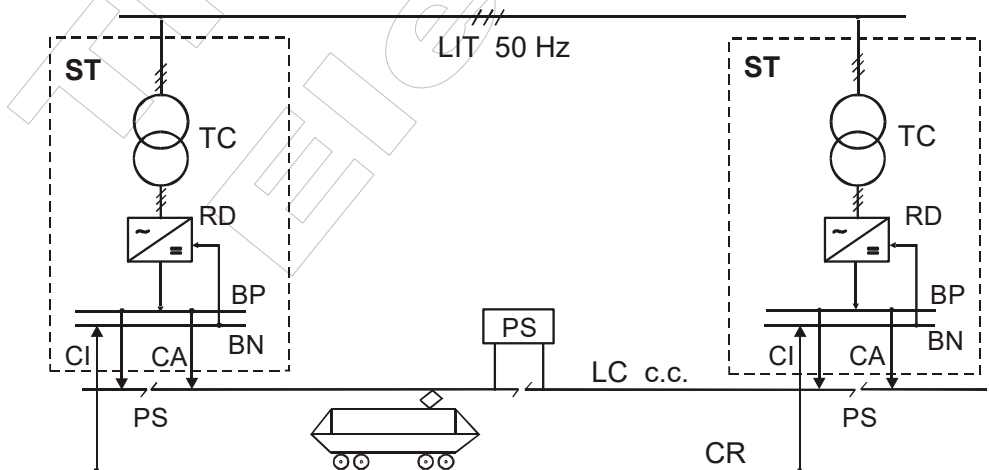


Fig. 2. Sistemul de tracțiune în c.c.

Substațiile de tracțiune sunt alimentate de la liniile de înaltă tensiune ale sistemului energetic trifazat de 110 kV sau 220 kV și 50 Hz. În substații are loc reducerea nivelului tensiunii trifazate printr-un transformator coborâtor TC la valori convenabile precum și convertirea curentului alternativ trifazat în curent continuu. Pentru un grad sporit de siguranță în alimentarea cu energie, în substații există în general două grupuri de forță, unul fiind în funcțiune iar celălalt fiind rezervă.

Tensiunile standardizate la linia de contact sunt de **750 V** în *tracțiunea urbană* și de **1500V** și **3000V** în *tracțiunea feroviară și suburbană*. Limitarea la 3000 V este impusă de condițiile de construcție a motoarelor de c.c. care nu pot fi construite rațional la tensiuni mai mari de 1,5 kV. Cu toate acestea, încă mai există sisteme de tracțiune urbană cu tensiunea la linia de contact de 600 V. Variațiile de tensiune în raport cu tensiunea nominală la linia de contact (admise de publicația CEI nr. 38) sunt cuprinse între -33% și +20%.

Introducerea vehiculelor cu frânare recuperativă a reprezentat un pas important către creșterea eficienței energetice a sistemelor de transport. Frânarea recuperativă este posibilă dacă pe traseul vehiculului care frânează există cel puțin un vehicul în regim de tracțiune care preia energia recuperată în sistem, altfel energia respectivă fiind pierdută în regim de frânare reostatică. Pentru a elimina această situație, substația de tracțiune poate fi echipată cu invertoare (Figura 3). Astfel linia de contact este alimentată de la redresor, iar când puterea recuperată depășește cerințele vehiculelor de pe traseu, inverterul este activat automat și va transfera energia în sistemul de c.a. de înaltă tensiune. Desigur, acest sistem presupune o investiție suplimentară importantă, ceea ce necesită un studiu economic atent.

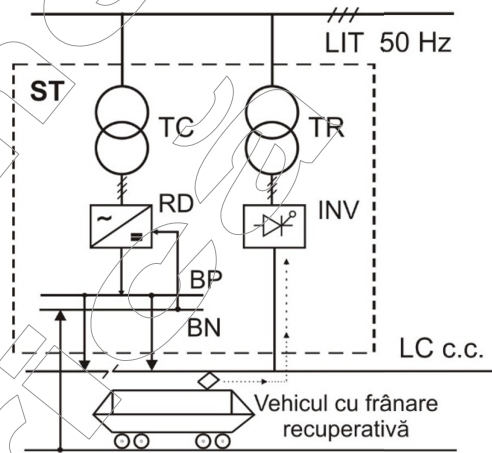


Fig. 3 Substație de tracțiune pentru recuperare de energie.

3. SISTEMUL DE TRACȚIUNE ÎN CURENT ALTERNATIV MONOFAZAT DE FRECVENȚA INDUSTRIALĂ (50 HZ)

Este sistemul în care linia de contact este alimentată în curent alternativ monofazat cu frecvența de 50 Hz și la tensiunea de 25 kV fiind utilizat doar în tracțiunea electric feroviară, fiind dezvoltat începând cu anii '50. Schema de principiu este prezentată în Figura 4.

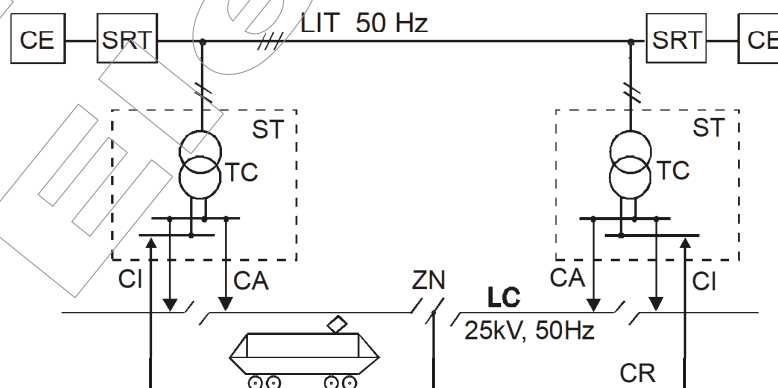


Fig. 4. Sistem de tracțiune în c.a. monofazat de 50 Hz.

Substația de tracțiune este formată din transformatoare coborâtoare de tensiune TC alimentate de la sistemul energetic național. Deoarece sistemul de tracțiune este un consumator monofazat, racordarea sa la sistemul trifazat introduce nesimetrii de curent și tensiune.

Pentru diminuarea acestora, transformatoarele din substații se conectează în montaje Scott, în V/V sau se realizează conectarea ciclică a transformatoarelor monofazate la cele 3 faze.

Deoarece tensiunile distribuite nu sunt în fază, pe linia de contact se prevăd zone neutrale ZN legate la pământ, care asigură separarea sectoarelor vecine, acestea fiind conectate la alte faze. În acest caz alimentarea bilaterală nu va mai fi posibilă, însă se pot lega în paralel cele două linii de contact ale unei căi duble, de o parte și de alta a zonei neutrale. În prezent este cel mai utilizat sistem de tracțiune electrică (fiind și sistemul utilizat în România în transportul feroviar); acesta s-a impus datorită simplității în construcție și de conectare a substațiilor la sistemul energetic trifazat de 50 Hz și după punerea la punct a locomotivei electrice monofazat - continuu cu redresoare. Variațiile admise de tensiune în raport cu tensiunea nominală la linia de contact sunt cuprinse între -24% și +10%. Sistemul de c.a. monofazat de frecvență industrială prezintă unele avantaje:

- substațiile se conectează ușor la sistemul trifazat de 50 Hz, au o construcție simplă iar echipamentul utilizat este în mare parte similar cu cel pentru sistemul energetic național;
- distanțele dintre substații sunt mari (50 - 80 km); firul de contact are secțiune redusă (150- 200 mm²), deci cheltuielile de investiții sunt mai mici iar catenara este mai ușoară.

Dezavantajele sistemului sunt:

- locomotiva electrică este complexă;
- linia de contact influențează liniile aeriene de telecomunicații din apropiere;
- introduce nesimetrii în sistemul trifazat, ceea ce influențează negativ consumatorii trifazați din zonă.

În comparație cu alți consumatori, calea ferată electrificată în curent alternativ monofazat este un consumator ce încarcă nesimetric sistemul energetic. Locomotivele electrice au o putere instalată de peste 5MW, la efectele produse de nesimetria sarcinii adăugându-se și efectele produse de armonicile superioare de curent cauzate de consumatorul deformant. Nesimetriile în rețeaua trifazată au ca efect o circulație de curenți inverși în sistemul electroenergetic care produc pierderi suplimentare de energie. În sistemul trifazat apar nesimetrii de tensiune, deci consumatorii din apropiere vor fi alimentați cu un sistem nesimetric de tensiuni, ceea ce duce la funcționări necorespunzătoare ale consumatorilor (de exemplu reducerea sarcinii utile pentru motoare), și la încălziri suplimentare (chiar și la nivelul generatoarelor din centralele electrice).

În continuare se prezintă 3 modalități de diminuare a nesimetriilor cauzate de locomotivele electrice alimentate în curent alternativ monofazat:

- Substația de tracțiune cu transformator monofazat ;
- Substația de tracțiune cu transformatoare în montaj Scott ;
- Substația de tracțiune cu transformatoare monofazate conectate în V.

3.1. Substația de tracțiune cu transformator monofazat

O astfel de soluție utilizează cel mai simplu transformator monofazat, este simplă din punct de vedere constructiv și comodă în exploatare. Pentru reducerea disimetriilor în sistemul energetic, substațiile se leagă ciclic la cele trei faze ale sistemului după cum se observa în fig. 5. Aceasta face imposibilă funcționarea în paralel a substațiilor prin alimentarea bilaterală a tronsoanelor liniei de contact și din acest motiv pierderile de tensiune în linia de contact sunt mult mărite.

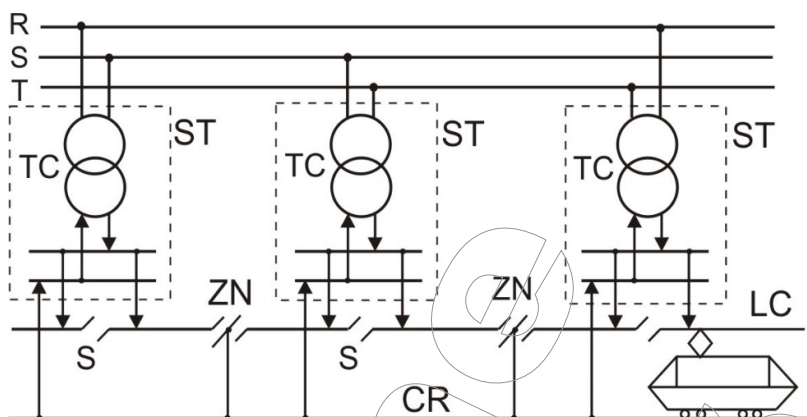


Fig. 5. Legarea ciclică a substațiilor.

3.2. Substația de tracțiune cu transformatoare în montaj Scott

Prin intermediul schemei Scott (fig. 6) se obține în secundarul transformatorului un sistem bifazat de tensiuni defazate cu 90° electrice. În acest scop se utilizează două transformatoare monofazate cu raport de transformare diferit. Se obișnuiește a se denumi: „bază” transformatorul cu raport de transformare N_1/N_2 și „înălțime” transformatorul cu raportul $\frac{\sqrt{3}N_1}{2N_2}$.

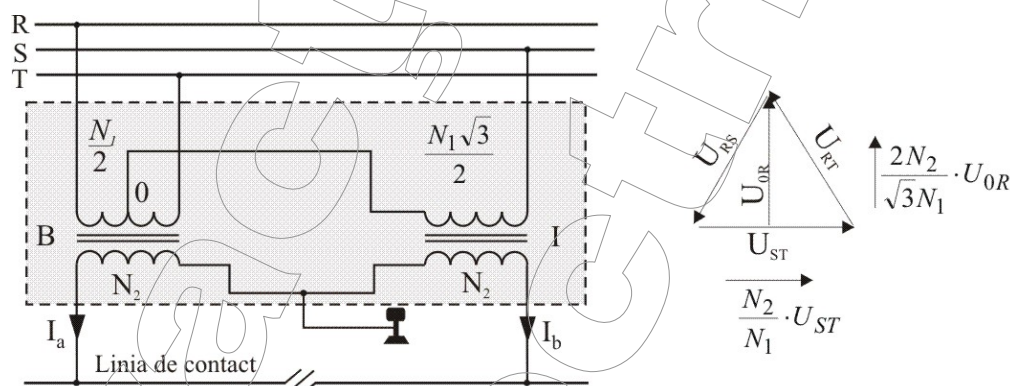


Fig. 6 Substație cu transformatoare în montaj Scott.

Sistemul bifazat de tensiuni impune ca linia de contact să fie secționată în fața substației prin intermediul unei „zone neutre”. Disimetriile produse de această schemă în sistemul energetic sunt nule doar în cazul încărcării egale a celor două secundare ($I_a = I_b$). Deoarece această condiție nu poate fi îndeplinită în condițiile tracțiunii electrice, simetrizarea completă apare întâmplător.

3.3. Substația de tracțiune cu transformatoare monofazate conectate în V

Se realizează cu două transformatoare identice conectate ca în figura 7. Această soluție ameliorează eficient disimetriile de tensiune introduse de sarcina monofazată de tracțiune, dar disimetriile de curent sunt similare soluției cu transformatoare trifazate. Conectarea ciclică la fazele sistemului energetic a substațiilor succesive permite echilibrarea completă a sarcinilor monofazate prin intermediul a 3 substații. Soluția prezintă și posibilitatea funcționării în paralel a substațiilor învecinate. Alte avantaje: utilizarea unor transformatoare monofazate de construcție normală, necesitatea unui singur transformator de rezervă pentru cele două în funcțiune (rezervă de 50%), lipsa curenților de egalizare, posibilitatea reglajului tensiunii sub sarcină separat pe fiecare transformator.

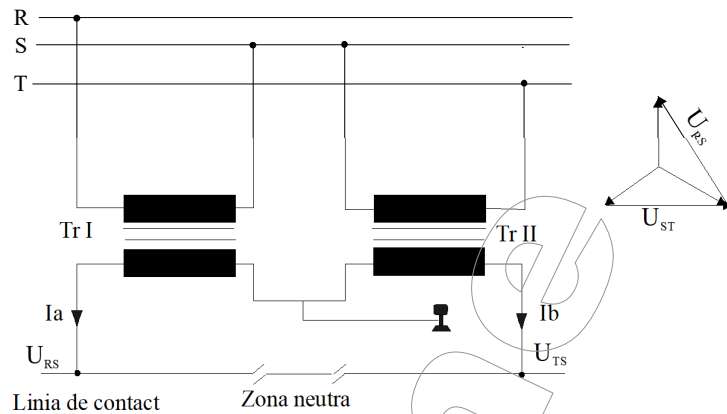


Fig. 7. Substație cu transformatoare în montaj în V.

4. Influența sarcinii monofazate asupra sistemului electroenergetic trifazat.

Determinarea experimentală a nesimetriilor

Pentru determinarea nesimetriei în funcție de tipul substației, în laborator s-au modelat cele trei tipuri de substații prezentate folosindu-se 4 transformatoare, având tensiunea în primar 400V și în secundar 230V. Astfel, standul permite conectarea monofazată a transformatoarelor din substații, precum și conectarea Scott și în V. Schema de forță este prezentată în Figura 8, în care cele 4 transformatoare modelează substația de tip monofazat (ST1), substația în V (ST1 și ST2), și substația Scott (ST3, formată din două transformatoare). Alimentarea se face de la rețeaua trifazată de 400V (echivalentă rețelei trifazate de înaltă tensiune de 110kV de la care se alimentează substațiile reale). Conectarea schemei de forță se face prin întrerupătorul trifazat Q1. De la cele 3 substații astfel modelate se pot alimenta unul sau doi consumatori monofazați (Zona I, Zona II), modelând astfel alimentarea monofazată a liniei de contact pentru locomotive electrice. Prin intermediul comutatorului C2 substațiile pot fi conectate pe rând: ST1 (pentru monofazat), ST1 și ST2 (pentru montaj în V) și respectiv ST3 (pentru montaj în Scott).

Întrerupătorul Q2 permite alimentarea schemei de comandă, a semnalizărilor și a aparatelor de măsură. Consumatorii monofazați pot fi conectați pe două zone (Zona I, Zona II) care reprezintă conectarea locomotivelor monofazate la două secțiuni ale liniei de contact.

Pentru determinarea gradului de nesimetrie pentru fiecare tip de substație se determină 9 indacatori (puteri active) măsurate în regim monofazat corespunzător celor 3 tensiuni de linie U_{L1L2} , U_{L2L3} , și U_{L3L1} și curenților pe fiecare fază (I_{L1} , I_{L2} , I_{L3}), în regim dezechilibrat la mofificarea simetriei rețelei.

Astfel, standul permite măsurarea puterilor în monofazat pentru conexiuni între cele 3 faze și pentru curenții de pe fiecare fază, rezultând Tabelul 1 (matricea) 3x3 necesar pentru calculul nesimetriilor. Puterile sunt măsurate de Power Logic 5320, conexiunile între faze fiind asigurate de o cheie voltmetrică CV, iar curenții sunt conectați de comutatorul C1 prin intermediul unui transformator de curent T4.

Pentru determinarea experimentală a nesimetriei pentru cele 3 tipuri de substații se fac următoarele operații: se închid Q1 și Q2 (de pe stand);

- comutatorul (C2) conectează mai întâi substația de tip Monofazat (se aprinde pe panou lampa corespunzătoare M (Fig. 10).
- cheia voltmetrică (CV) cuplează pe rând cele 3 tensiuni de linie, iar comutatorul (C1) cuplează pe rând, corespunzător fiecărei tensiuni de linie, curenții prin cele 3 faze (rezultă 3x3 puteri active măsurate în monofazat). Cu ajutorul Power Logic 5320 se măsoară cele 9 puteri active, citirile trecându-se într-un tabel de forma (unde a,b,c ... sunt indicațiile wattmetrului):

Tabel 1 – Substația de tip monofazat

Curenți Tensiuni	I_{L1}	I_{L2}	I_{L3}
U_{L1L2}	a	b	c
U_{L2L3}	d	s	f
U_{L3L1}	g	h	i

În continuare, comutatorul (C2) conectează substația în V (se aprind lămpile M și V de pe panou, corespunzător substațiilor ST1 și ST2 din schema de forță) și se vor face aceleași măsurători, trecute într-un tabel (Tabel 2) similar celui de sus.

În continuare, comutatorul (C2) conectează substația de tip Scott și se vor face aceleași măsurători folosind software-ul corepunzător contorului de putere Power Logig (IONSetup) și vor fi trecute într-un tabel (Tabel 3) similar celui de sus.

Pentru fiecare măsurătoare, în tabel se trec valorile având în vedere și semnul indicațiilor. Analiza indicațiilor wattmetrului monofazat în rețeaua trifazată în regim dezechilibrat arată că între acestea există următoarele relații fundamentale, ce reies din condiția închiderii triunghiului curenților și tensiunilor:

$$\begin{cases} a + b + c = 0 \\ d + e + f = 0 \\ g + h + i = 0 \end{cases} \quad (1) \quad \text{și} \quad \begin{cases} a + d + g = 0 \\ b + e + h = 0 \\ a + f + i = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Pentru un sistem trifazat:

$$\begin{cases} P = 3U' I' \cos \varphi' \\ Q = 3U' I' \sin \varphi' \end{cases} \quad \text{unde } U' \text{ este valoarea eficace a tensiunii directe de faza.}$$

Cu indicele prim s-au notat componentele directe ale curenților și tensiunilor, iar cu φ' unghiul dintre aceste componente. Formulele care dau legătura între cele două puteri sunt:

$$\frac{P}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} Q = d + b \quad (3)$$

$$\frac{P}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} Q = i - d \quad (4)$$

Prin adunarea și scăderea relațiilor (3) și (4) se calculează puterile active și reactive. Datorită încărcării nesimetrice a sistemului, apare de asemenea și o putere nesimetrică, P_{nes} dată de relația $P_{nes} = 3U'I''$, unde I'' este o componentă inversă a curentului.

$$P_{nes} = \sqrt{M_1^2 + \frac{M_2^2}{3}}, \quad (5)$$

unde M_1 și M_2 sunt date de:

$$M_1 = g - f \quad (6)$$

$$M_2 = -2b - g - f \quad (7)$$

Se va determina gradul de disimetrie cu relația:

$$\delta_d = \frac{I''}{I'} = \frac{P_{nes}}{P_{ap}} = \frac{P_{nes}}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (8)$$

Mersul lucrării:

1. Se vor analiza diverse tipuri de substații de tracțiune (în c.c., în c.a. monofazat).
2. Se vor analiza cele trei tipuri de substații folosite pentru simetrizare (monofazat, în V, tip Scott).
3. Se va analiza schema de laborator care modelează cele 3 tipuri de substații de tracțiune.
4. Pe standul din laborator se vor cupla pe rând cele 3 tipuri de substații și se vor efectua măsurătorile corespunzătoare celor descrise mai sus.
5. Se va calcula gradul de nesimetrie pentru cele trei cazuri.
6. Se vor prezenta concluziile studiului.

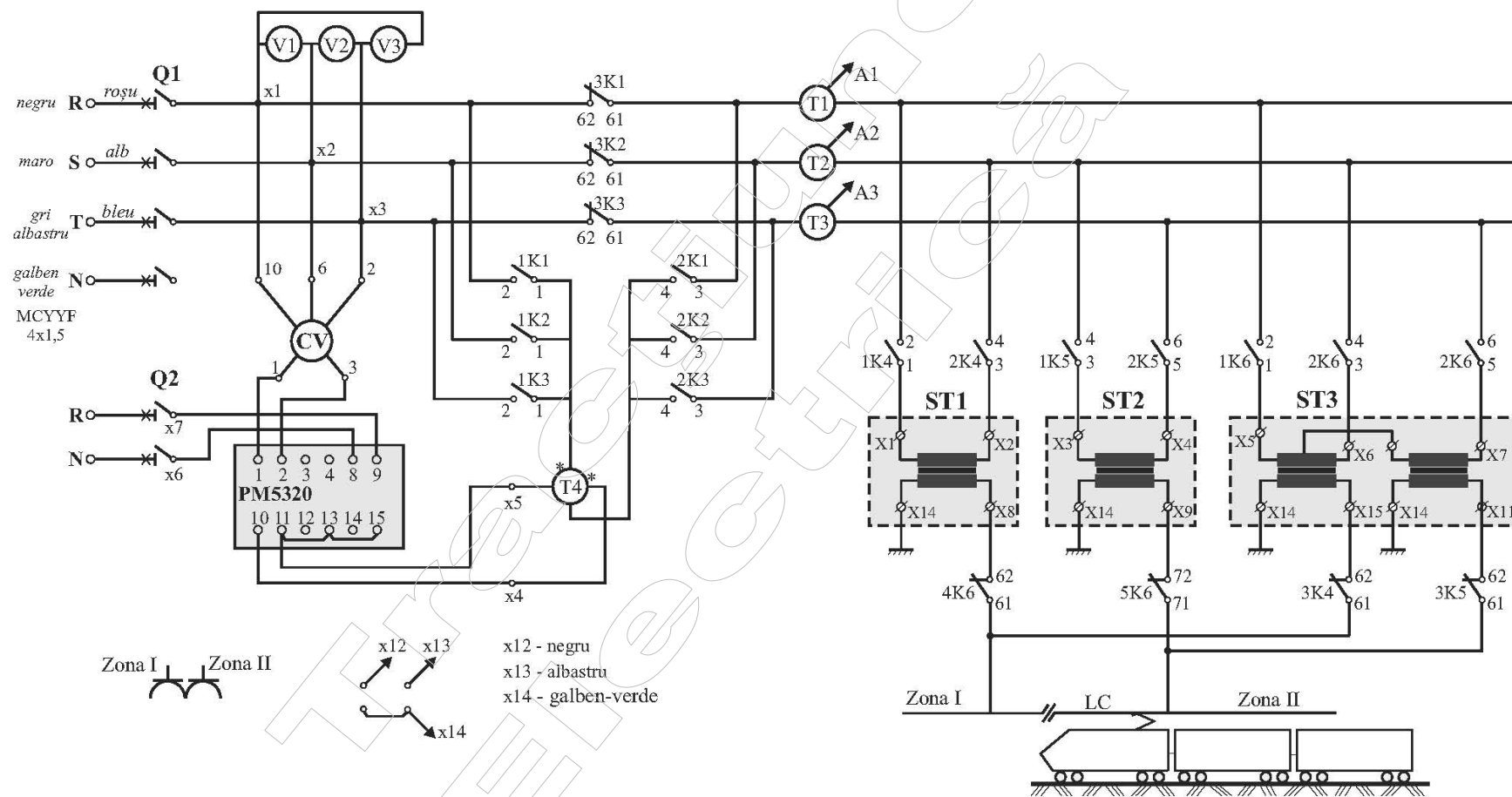


Fig. 8. Schema de forță a standului de laborator.

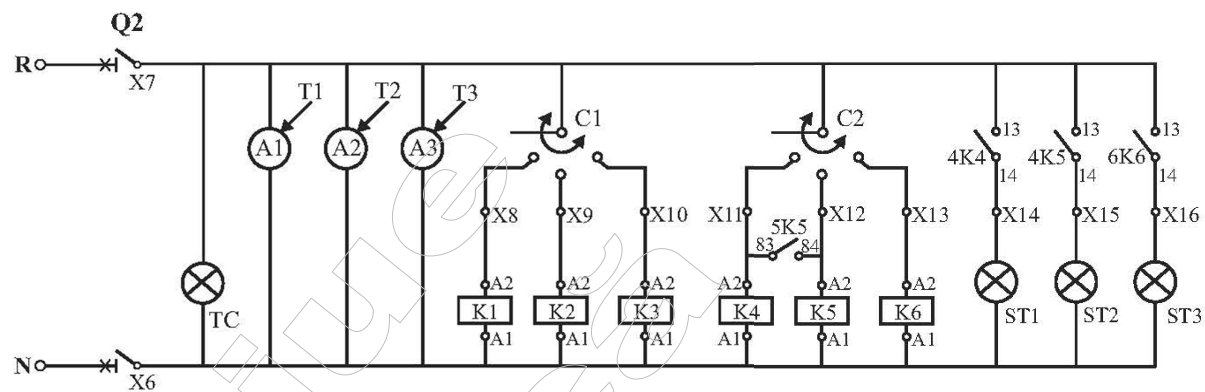


Fig. 9. Schema de comandă.

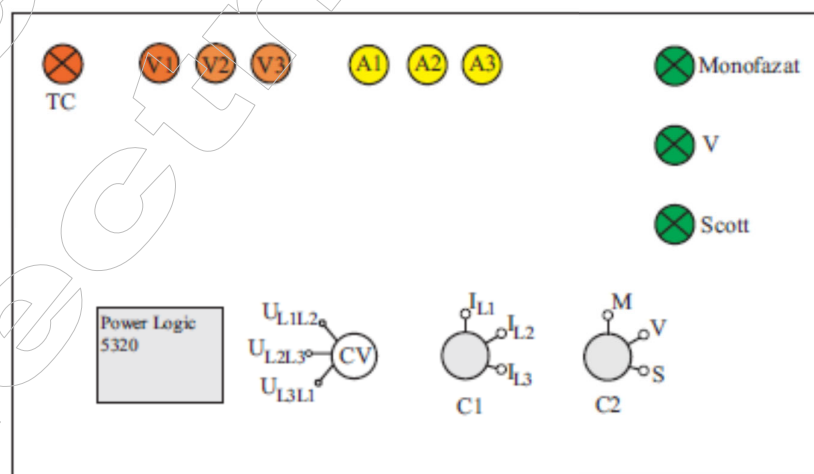


Fig. 10. Panou substații de tracțiune.