



ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea: Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor

Ing. Alexandru Florian POPOV

**Soluții moderne de adaptare a parametrilor energiei
electrice la necesitățile tracțiunii electrice feroviare folosind
sistemele SCADA.**

**Modern solutions for adapting the electrical energy
parameters to the needs of electric railway traction using
SCADA systems.**

REZUMAT / ABSTRACT

Conducător științific

Prof. dr. habil. ing. Aurel FRATU

BRAȘOV, 2022



D-lui (D-nei)

COMPONENȚA

Comisiei de doctorat

Numită prin ordinul Rectorului Universității Transilvania din Braşov

Nr. din

PREȘEDINTE:	Prof.dr.ing.Delia UNGUREANU
CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:	Prof.dr.habil.ing.Aurel FRATU
REFERENȚI:	Prof.dr.ing.Theodor BORANGIU
	Prof.dr.ing.Gheorghe MANOLEA
	Prof.dr.ing.Sorin-Aurel MORARU

Data, ora și locul susținerii publice a tezei de doctorat: 08.09.2022, ora 10.00,
sala V-III-9

Eventualele aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vor fi transmise
electronic, în timp util, pe adresa alexandru.popov@unitbv.ro

Totodată, vă invităm să luați parte la ședința publică de susținere a tezei de
doctorat.

Vă mulțumim.

CUPRINS

LISTA DE FIGURI.....	6 / -
LISTA DE TABELE.....	10 / -
1. INTRODUCERE (NECESITATE, SCOP, OBIECTIVE).....	11 / 5
1.1 IMPORTANȚA ȘI ACTUALITATEA TEMEI	11 / 5
1.2 OBIECTIVELE CERCETĂRII DOCTORALE	12 / 5
1.3 PREZENTAREA CAPITOLELOR TEZEI.....	13 / 6
2. STADIUL ACTUAL AL SISTEMELOR ELECTRONICE DESTINATE CONTROLULUI INSTALAȚIILOR FIXE DE TRACȚIUNE ELECTRICĂ.....	15 / 8
2.1 INTRODUCERE.....	15 / 8
2.2 SISTEME CLASICE DE COMANDĂ ȘI CONTROL	16 / 8
2.2.1 Sistemul USILOG	16 / 8
2.2.2 Sistemul QNX.....	22 / 11
2.3 SISTEME DE CONTROL ÎN TIMP REAL DE TIP SCADA.....	24 / 13
2.3.1 Sistemul PACIS (<i>Protection Automation and Control integrated Solutions</i>)	24 / 13
2.3.2 Sistemul SIMATIC (<i>Siemens-Automatic</i>).....	26 / 13
2.3.3 Controlul sistemului de tracțiune electric feroviar cu ajutorul sistemului Simatic SCADA.....	28 / 15
2.4 CONCLUZII	31 / 17
3. DEZVOLTAREA ȘI IMPLEMENTAREA APLICAȚIILOR DE TIP SCADA ÎN SISTEMUL DE TRACȚIUNE ELECTRIC FEROVIAR.....	33 / 18
3.1 INTRODUCERE.....	33 / 18
3.2 PROIECTAREA ȘI IMPLEMENTAREA APLICAȚIILOR SCADA PENTRU TRANSPORTUL FEROVIAR	34 / 18
3.2.1 Componentele unui sistem SCADA.....	34 / 18
3.2.2 Funcțiile sistemului SCADA	35 / 18
3.2.3 Configurația sistemului SCADA	36 / 19
3.2.4 Unitatea terminală comandată de la distanță (RTU)	37 / 19
3.2.5 Caracteristicile sistemelor SCADA	42 / 19
3.3 IMPLEMENTAREA SCADA ÎN COMANDA DE LA DISTANȚĂ A SEPARATORILOR STEF.....	42 / 19
3.3.1 Comanda de la distanță a separatorilor prin sistem SCADA pentru o stație de triaj a trenurilor – studiul de caz 1	42 / 19
3.3.2 Comanda echipamentelor electrice folosind rețele GSM pentru comunicare – studiul de caz 2. Încălzirea macazului.....	47 / 21
3.4 IMPLEMENTAREA SCADA ÎN POSTURILE DE ALIMENTARE ȘI TRANSFORMARE	50 / 21
3.5 IMPLEMENTAREA SISTEMULUI SCADA ÎN PUNCTELE DE DISPECERIZARE A INSTALAȚIILOR IFTE.....	52 / 23
3.5.1 Interfața om-mașină.....	53 / -
3.6 CONCLUZII	55 / 24
4. TELEGESTIUNEA ENERGIEI ELECTRICE FOLOSITĂ ÎN SISTEMUL DE TRACȚIUNE ELECTRIC FEROVIAR UTILIZÂND SISTEMUL SCADA.....	57 / 25
4.1 TELEGESTIUNEA ENERGIEI ELECTRICE. MĂSURI DE EFICIENȚĂ ENERGETICĂ.....	57 / 25
4.2 ALGORITM DE CALCUL PENTRU STABILIREA NECESARULUI DE ENERGIE ELECTRICĂ PENTRU UN TRONSON DE CALE FERATĂ.....	58 / 25
4.3 METODE DE OPTIMIZARE A CONSUMULUI DE ENERGIE ELECTRICĂ PENTRU SISTEMUL DE TRACȚIUNE ELECTRIC FEROVIAR.....	62 / 27
4.3.1 Optimizarea prin metoda punctului interior	65 / 28
4.3.2 Eficientizarea consumului de energie electrică prin rețele inteligente cu ajutorul frânării regenerative.....	66 / 29
4.3.3 Optimizarea consumului de energie electrică cu ajutorul SCADA.....	68 / 30
4.4 APLICAȚII SCADA PENTRU MONITORIZAREA CONSUMULUI DE ENERGIE ELECTRICĂ ÎN TIMP REAL	69 / 30
4.5 STUDIU DE CAZ PE TRONSONUL DE CALE FERATA ELECTRIFICATĂ BRAȘOV-PREDEAL.....	74 / 31
4.6 CONCLUZII	79 / 33

5. CONTROLUL FUNCȚIONĂRII ÎN PARALEL A TRANSFORMATORILOR DE PUTERE DIN SUBSTAȚIILE DE TRACȚIUNE ELECTRICĂ.....	81 / 34
5.1 NECESITATEA FUNCȚIONĂRII ÎN PARALEL A TRANSFORMATOARELOR	81 / 34
5.2 CONDIȚII DE CUPLARE ÎN PARALEL A TRANSFORMATOARELOR.....	82 / 34
5.3 ALGORITM PENTRU CUPLAREA ÎN PARALEL A TRANSFORMATORILOR DE PUTERE DIN STE-URI	84 / 35
5.4 PROTECȚIA TRANSFORMATOARELOR DE PUTERE DIN SUBSTAȚIILE DE TRACȚIUNE ELECTRICĂ	90 / 36
5.5 SOLUȚII MODERNE DE DIAGNOZĂ ȘI PROTECȚIE A TRANSFORMATORILOR DE PUTERE DIN SUBSTAȚIILE DE TRACȚIUNE ELECTRICĂ	97 / 37
5.6 AUTOMATIZAREA FUNCȚIONĂRII ÎN PARALEL A TRANSFORMATORILOR DE PUTERE DIN STE-URI UTILIZÂND SISTEMUL SCADA	105 / 38
5.7. CONCLUZII	113 / 40
6. COMPENSAREA PUTERII REACTIVE ÎN SISTEMUL DE TRACȚIUNE ELECTRIC FERROVIAR, UTILIZÂND CARACTERISTICILE ÎN V ALE MAȘINII SINCRONE CONTROLATE DE SCADA	115 / 41
6.1. INTRODUCERE.....	115 / 41
6.2. NECESITATEA COMPENSĂRII FACTORULUI DE PUTERE ÎN STEF.....	116 / 41
6.3. COMPENSAREA PUTERII REACTIVE CU AJUTORUL MAȘINII SINCRONE	117 / 41
6.4. REACȚIA INDUSULUI, DIAGrame DE FAZORI	121 / 42
6.5. REGIMUL DE COMPENSATOR SINCRON.....	126 / 43
6.6. SISTEME DE EXCITAȚIE ALE MOTORULUI SINCRON MONOFAZAT	129 / 43
6.7. REGLAREA CURENTULUI DE EXCITAȚIE	130 / 43
6.8. SCHEME EFECTIVE CU MICROCONTROLERE PENTRU COMANDA CIRCUITELOR DE EXCITAȚIE.....	131 / 44
6.9. MODELAREA UNGHIIULUI INTERN AL COMPENSATORULUI SINCRON ÎN MATLAB/SIMULINK	134 / 45
6.10. MENȚINEREA UNGHIIULUI INTERN NUL FOLOSIND SISTEMUL SCADA	146 / 47
6.11. COMPENSAREA PUTERII REACTIVE ÎN STE	149 / 48
6.12. CONCLUZII	150 / 49
7. REZILIENȚA SISTEMULUI DE TRACȚIUNE ELECTRIC FERROVIAR CA INFRASTRUCTURĂ CRITICĂ.....	152 / 50
7.1 INTRODUCERE.....	152 / 50
7.2 CLASIFICAREA INFRASTRUCTURILOR CRITICE FERROVIARE	153 / 50
7.3 INSTALAȚII CRITICE FERROVIARE CARE CONCURĂ LA SIGURANȚA CIRCULAȚIEI TRENURILOR ȘI APARTIN DE RAMURA INFRASTRUCTURĂ	153 / 50
7.3.1 Instalațiile SCB.....	153 / -
7.3.2 Instalațiile IFTE.....	155 / -
7.3.3 Instalațiile TTR.....	157 / -
7.4 MĂSURILE DE SECURITATE PE LOCOMOTIVE – IMPLEMENTAREA SISTEMULUI SCADA.....	159 / 50
7.5 REDUNDAȚA – ASPECTE TEORETICE	160 / 51
7.5.1 Formele de implementare a redundanței.....	160 / 51
7.5.2 Sisteme M-din-N redundante:	160 / 51
7.5.3 Clasificarea structurilor funcționale din punct de vedere al redundanței	161 / 52
7.6 REDUNDAȚA INSTALAȚIILOR CRITICE FERROVIARE	162 / 52
7.6.1 Redundanța instalațiilor SCB.....	162 / 52
7.6.2 Redundanța instalațiilor IFTE.....	163 / 52
7.6.3 Redundanța sistemului de comunicație TTR.....	163 / 52
7.7 REDUNDAȚA SISTEMULUI SCADA	164 / 52
7.7.1 Redundanța sistemului SCADA în cazul utilizării rețelelor TCP/IP.....	166 / 53
7.8 MENȚINANȚA SISTEMELOR INTELIGENTE CU MARE RĂSPUNDERE FUNCȚIONALĂ ÎN TRANSPORTUL FERROVIAR.....	167 / 53
7.8.1 Managementul mentenanței sistemelor inteligente cu mare răspundere funcțională.....	170 / 53
7.8.2 Evaluarea calității mentenanței sistemelor inteligente cu mare răspundere funcțională.....	172 / 53
7.8.3 Implicarea SCADA în asigurarea mentenanței preventive: reducerea potențialului defecțiunilor neașteptate. Studiu de caz pentru Districtul de Energoalimentare Brașov/Regionala de transport feroviar Brașov	173 / 53
7.9 CONCLUZII	188 / 54
8. CONCLUZII	189 / 55
8.1 CONCLUZII GENERALE	189 / 55
8.2 CONTRIBUȚII ORIGINALE.....	189 / 55
8.3 DISEMINAREA REZULTATELOR	190 / 56
8.4 DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	191 / 57
BIBLIOGRAFIE	192 / 57

ANEXE	201 /
ANEXA 1. SECVENȚA CODULUI SCRIS ÎN PROGRAMUL MPLAB X PENTRU CONTROLUL PIC18F4550.....	201 / -
ANEXA 2: TABEL EXCEL CU PARAMETRII ANALIZAȚI ȘI STOCAȚI DIN ORĂ ÎN ORĂ PENTRU 31 DE ZILE	205 / -
ANEXA 3: FIȘIERUL SCRIPT MATLAB PENTRU BLOCUL „CALCULAȚI UNGHIUL INTERN”	217 / -
ANEXA 4: SECVENȚĂ COD SURSĂ PENTRU SCADA - SCRIS ÎN VISUAL C++	219 / -
ANEXA 5. REZUMAT	228 / 59

1. INTRODUCERE (NECESITATE, SCOP, OBIECTIVE)

1.1 Importanța și actualitatea temei

Această teză de doctorat a avut ca scop dezvoltarea, proiectarea și implementarea unor soluții moderne de adaptare a parametrilor energiei electrice furnizată de către substațiile de tracțiune electrică sistemului de tracțiune electric feroviar, găsirea unor soluții de optimizare a consumului de energie electrică, precum dezvoltarea și implementarea unor concepte noi pentru creșterea stabilității sistemului de tracțiune electric feroviar.

O metodă importantă pentru atingerea performanței optime a sistemului de tracțiune electric feroviar este **digitalizarea** sistemului de comandă și control a instalațiilor fixe și mobile de tracțiune electrică, prin dezvoltarea unor sisteme de telecontrol și telegestiune în timp real. În lucrarea de față se va insista asupra sistemelor de tip SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) – sisteme care sunt utilizate pentru monitorizare, control și achiziția de date.

De asemenea, este de menționat faptul că sistemul de tracțiune electric feroviar face parte dintr-o categorie de infrastructuri numite **infrastructuri critice**, care prezintă o serie de caracteristici (unicitate, importanță vitală, vulnerabilitate) ce fac din mentenanța adecvată a acestora o problemă de siguranță națională.

1.2 Obiectivele cercetării doctorale

Obiectivul principal (OP) al cercetării îl constituie adaptarea parametrilor energiei electrice furnizați de către instalațiile fixe de tracțiune electrică la necesitățile sistemului de tracțiune electric feroviar prin folosirea sistemelor SCADA.

Obiective specifice:

OS1. Monitorizarea funcționării instalațiilor fixe de tracțiune electrică și controlul în timp real a parametrilor energiei electrice. Pentru realizarea obiectivului este necesară realizarea următoarelor activități:

- digitalizarea sistemelor de comandă și control a instalațiilor fixe de tracțiune electrică;
- dezvoltarea și implementarea aplicațiilor de tip SCADA în controlul și monitorizarea parametrilor electrice furnizați de către instalațiile fixe de tracțiune electrică sistemului de tracțiune electric feroviar.

OS2. Dezvoltarea unor soluții pentru asigurarea parametrilor energiei electrice necesare sistemului de tracțiune electric feroviar. Pentru realizarea obiectivului este necesară realizarea următoarelor activități:

- monitorizarea parametrilor energiei electrice în timp real utilizând sistemul SCADA;
- dezvoltarea unui program pentru menținerea nivelului de tensiune pe secundarul transformatorilor de putere și pe fiderii de alimentare;
- aplicarea sistemelor de telegestiune controlate prin sistemul SCADA pentru respectarea prognozelor de consum și eliminarea penalităților.

OS3. Dezvoltarea unor soluții tehnice privind controlul fluxului de putere electric necesar sistemului de tracțiune electric feroviar. Pentru realizarea obiectivului este necesară realizarea următoarelor activități:

- asigurarea rezervei de putere activă prin cuplarea în paralel a transformatorilor de putere, cu adaptarea la creșterea sarcinii utilizând SCADA;
- compensarea puterii reactive necesară funcționării sistemului de tracțiune electric feroviar, cu ajutorul mașinii sincrone controlate de sisteme de tip SCADA, în substațiile de tracțiune electrică;

OS4. Dezvoltarea unor soluții de reziliență a sistemului de tracțiune electric feroviar ca infrastructură critică. Acest obiectiv se va realiza prin:

- definirea infrastructurii critice și implementarea măsurilor de securitate prin digitalizare;
- implementarea redundanței la nivelul instalațiilor critice feroviare, la nivel hardware, software, informațional și temporal.

1.3 Prezentarea capitolelor tezei

Teza de doctorat este compusă din 8 capitole:

Capitolul întâi, cu titlul **“Introducere (necesitate, scop, obiective)”** face o introducere în problemele sistemului de tracțiune electric feroviar, prezintă necesitatea abordării acestui subiect, obiectivele propuse și o descriere succintă a capitolelor din teza de doctorat.

Capitolul al doilea, cu titlul **“Stadiul actual al sistemelor electronice destinate controlului instalațiilor fixe de tracțiune electrică”** descrie stadiul actual al cercetărilor și al realizărilor în domeniu, identifică și dezvoltă soluții de digitalizare a sistemelor de comandă și control a instalațiilor fixe de tracțiune electrică.

Capitolul al treilea, cu titlul **“Dezvoltarea și implementarea aplicațiilor de tip SCADA în sistemul de tracțiune electric feroviar”** prezintă modalități de proiectare și implementare a sistemului SCADA în controlul IFTE, componentele, principalele funcții și implementarea la diferite niveluri ale sistemului de tracțiune electric feroviar. Prezintă soluții pentru comanda de la distanță a separatorilor care deservește liniile de cale ferată, precum și o soluție de control pentru echipamentele aflate în situația în care nu pot beneficia de suport fizic pentru transmisia informațiilor.

În capitolul al patrulea, cu titlul **“Telegestiunea energiei electrice folosită în sistemul de tracțiune electric feroviar utilizând sistemul SCADA”** se prezintă procedura optimă pentru monitorizarea și evaluarea necesarului de energie electrică pentru funcționarea sistemului de tracțiune electric feroviar utilizând sistemul SCADA, un algoritm de calcul pentru stabilirea consumului de energie electrică pentru tronsonul de cale ferată Brașov-Predeal. De asemenea, analizează potențialul sistemului SCADA de a monitoriza și optimiza consumul de energie electrică în timp real pentru transportul electric feroviar.

Capitolul al cincilea, cu titlul **“Controlul funcționării în paralel a transformatorilor de putere din substațiile de tracțiune electrică”** prezintă necesitatea și avantajele funcționării în paralel a transformatoarelor din substațiile de tracțiune electrică. Se dezvoltă un algoritm pentru realizarea cuplării în paralel, procedura protejării transformatoarelor utilizând sistemul SCADA, soluții moderne de diagnoză și de automatizare a funcționării în paralel a transformatoarelor de putere din STE.

Capitolul al șaselea, cu titlul **“Compensarea puterii reactive în sistemul de tracțiune electric feroviar, utilizând caracteristicile în V ale mașinii sincrone controlate de SCADA”** tratează compensarea factorului de putere utilizând caracteristicile în V ale mașinii sincrone controlate de SCADA cu scopul de scădere a sarcinii electrice pe transformatorul aflat în funcțiune în substația de tracțiune electrică.

Capitolul al șaptelea, cu titlul **“Reziliența sistemului de tracțiune electric feroviar ca infrastructură critică”** argumentează necesitatea administrării și proiectării infrastructurii feroviare ca infrastructură critică și propune pentru acest scop implementarea redundanței în sistemul de tracțiune electric feroviar. Se asigură toleranța la defecte a sistemului ceea ce contribuie la creșterea cost-eficacitate și la evitarea incidentelor precum coliziunile între trenuri.

Capitolul al optulea, cu titlul **“Concluzii”** conține concluziile finale, realizările și contribuțiile originale. De asemenea, sunt prezentate direcțiile viitoare de cercetare identificate precum și diseminarea rezultatelor.

2. STADIUL ACTUAL AL SISTEMELOR ELECTRONICE DESTINATE CONTROLULUI INSTALAȚIILOR FIXE DE TRACȚIUNE ELECTRICĂ

2.1 Introducere

Telemecanica este știința care are drept obiect de studiu telecomanda și telecontrolul mecanismelor electrice cu ajutorul unor dispozitive de acționare, aflate la distanță foarte mare de punctul de comandă. Controlul poziției și a stării unor echipamente aflate la o distanță foarte mare de punctul de dispecerizare se transmite prin diferite căi de comunicații cu fir sau fără fir.

Sisteme clasice de comandă și control

2.1.1 Sistemul USILOG

Sistemul de comutație USILOG folosește semnale normalizate, reprezentate de două stări de comutare distincte, numai în anumite cazuri durata de timp, succesiunea în timp sau amplitudinea sunt hotărâtoare pentru interpretarea semnalelor.

În circuitele de comutare sunt definite două stări ale semnalelor binare: nivel de semnal "0" și nivel de semnal "1" care, în raport cu starea elementului de comutare corespunde celor două stări în care se poate găsi tranzistorul: saturat pentru semnal "0" și blocat pentru semnal "1". Toate echipamentele electrice introduse în sistemul USILOG vor fi definite de aceste două stări (închis-deschis, conectat-deconectat), pentru nivel de semnal "1" respectiv "0".

Structura sistemului USILOG cuprinde:

- a) Instalația de telecomandă

Funcționarea sistemului de telemecanică de tip USILOG pentru comanda și supravegherea instalațiilor IFTE este de tipul post la post, pentru fiecare punct de telecomandă de pe teren avem atribuit un post la sediul central de dispecerizare. În figura 1 este reprezentată schema de funcționare a instalației de telecomandă și telesemnalizare de tip USILOG.

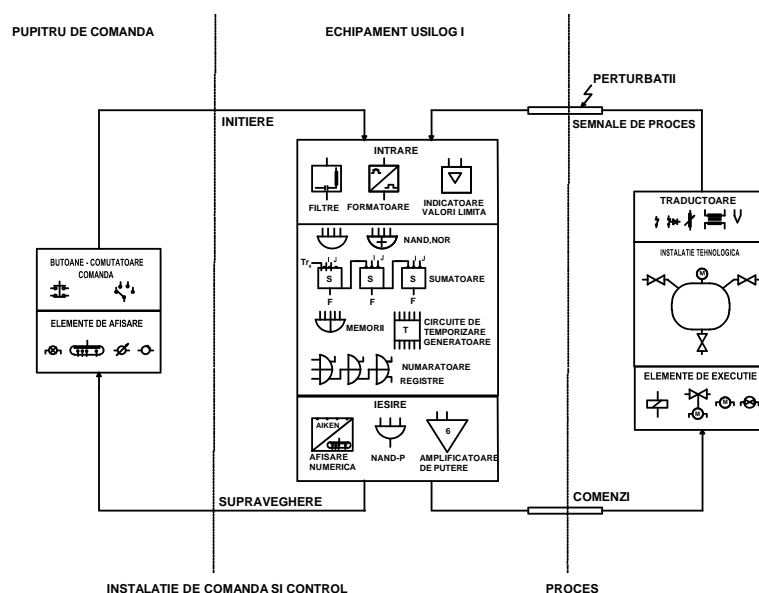


Figura 1. Schema de funcționare a sistemului USILOG

Transmisia comenzilor și a semnalizărilor se face pe fire de cupru de telefonie. Fiecărui post i se atribuie o frecvență pentru recepția comenzilor și o frecvență pentru emisia semnalizărilor. Metoda de calcul a frecvențelor atribuite posturilor pe o linie se face după următoarea formulă:

$$F_c = (120 * c + 300) \text{ Hz}; \quad (1)$$

unde c este numărul canalului.

Deoarece banda de frecvență folosită este banda vocală, care este limitată la 3400Hz, respectând ecartul stabilit de formula de mai sus, se pot atribui pe o linie de telecomunicație maxim 24 de frecvențe.

Telecomanda instalațiilor IFTE cu ajutorul sistemului USILOG se face unidirecțional de la postul central spre postul local după schema reprezentată în figura 2.

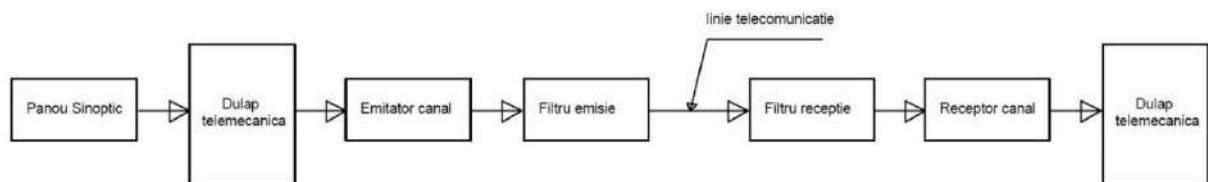


Figura 2. Schema de transmisie a telecomenzii prin sistemul USILOG

Cheile de comandă montate pe panoul sinoptic au dublu rol, ele realizează comanda dispozitivelor instalate în posturile locale și afișează poziția în care se află echipamentul la un moment dat, pe panoul sinoptic.

Prin acționarea cheii de comandă se formează un cod (din contactele care se închid și cele care rămân deschise pe timpul acționării) care este introdus în dulapul de telemecanică. Pentru fiecare comandă se formează un cod unic compus din:

- etapa de sincronizare (Es);
- codul de comandă (Cx);
- etapa de acționare (Ea).

Pentru sincronizarea posturilor locale cu posturile centrale, fiecărui post i se atribuie o secvență de cod unică formată din 6 biți (exemplu „111010”), care reprezintă partea de sincronizare a postului central cu postul de pe teren.

Codul binar de comandă Cx este reprezentat în figura 3 a– pentru un post local echipat pentru 24 telecomenzi și b-pentru un post echipat cu 48 telecomenzi.

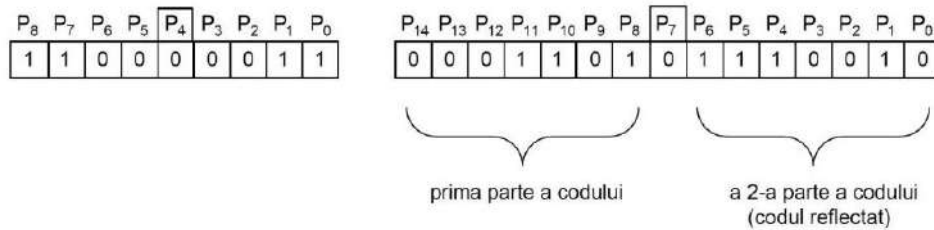


Figura 3. Forma codului binar de comandă pentru echipament cu 24 telecomenzi (a), respectiv pentru 48 telecomenzi (b)

Forma codului de telecomandă compus din etapa de sincronizare, etapa de comandă și cea de acționare este reprezentată în figura 4.



Figura 4. Forma completă a codului de acționare pentru sistemul USILOG

Semnalul de comandă astfel format intră în emițătorul de canal unde este transformat din semnal logic de 1 și 0, într-un semnal alternativ modulat în frecvență iar ieșirea semnalului din echipament în linia de transport se face prin placa filtru emisie.

La postul local, recepția se face printr-un filtru trece bandă, semnalul alternativ este introdus în placa receptor de canal unde se face reconversia semnalului analogic în semnal digital. Pe măsură ce fiecare bit informațional își ocupă poziția în registrele de deplasare, se fac verificările de securitate în ordinea următoare:

- se verifică etapa de sincronizare dacă corespunde cu secvența de sincronizare atribuită postului;
- eroarea numărare verifică ca numărul de biți din cod să fie complet ($p_8...p_0$);
- eroarea cod testează dacă prima și a doua parte de cod corespund (E_a și E_{ar});
- eroarea recepție testează dacă codul este reflectat după următoarea formulă:

$$\bar{E}_R = \bar{P}_0 \cdot \bar{P}_5 + P_0 \cdot P_5 + \bar{P}_1 \cdot \bar{P}_6 + P_1 \cdot P_6 + \bar{P}_2 \cdot \bar{P}_7 + P_2 \cdot P_7 + \bar{P}_3 \cdot \bar{P}_8 + P_3 \cdot P_8 \dots \dots \quad (2)$$

Toate aceste erori de formare sau transmisie sunt însumate și aplicate pe intrarea unui circuit NOR care formează operația nereușită (ON). Comanda este considerată finalizată odată cu atragerea releului de execuție care, printr-un contact auxiliar transmite la punctul DEF semnalizarea de telecomandă reușită.

b) Instalația de telesemnalizare

Telesemnalizarea instalațiilor IFTE cu ajutorul sistemului USILOG se face unidirecțional de la postul local spre postul central după schema reprezentată în figura 5.

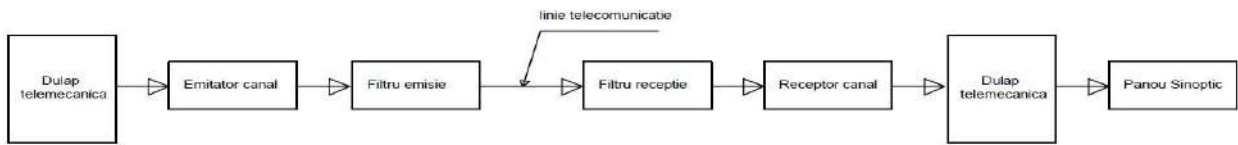


Figura 5. Schema bloc de funcționare a semnalizărilor USILOG

Transmisia telesemnalizărilor de la postul local la postul central se realizează ciclic, intervalul de interogare a unei informații depinde de numărul de echipamente conectate la instalație. Pentru un post local, forma semnalului transmis este reprezentat în figura 6.

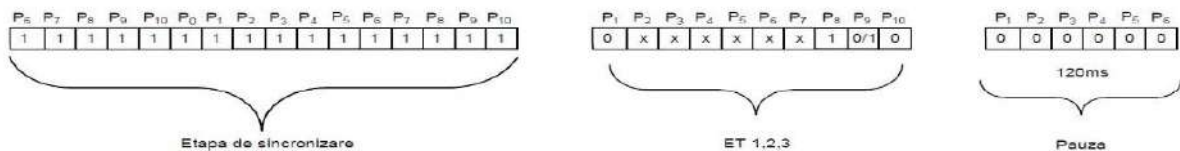


Figura 6. Forma completă a codului de telesemnalizare USILOG

Forma mesajului de telesemnalizare cuprinde etapa de sincronizare formată din ES1(5 biți) și ES2 (11 biți), etapele termen 1, 2, 3 și pauza de 120ms.

Informațiile culese din instalații sunt introduse în circuitul de semnalizare pe etapele termen ET1, ET2, ET3, unde se face incidența între pași, etape și informație. Durata unui ciclu de semnalizare complet pentru un post cu 24 telesemnalizări se calculează astfel:

$$16+3(1+10)+6=55 \text{ biți} \times 20\text{ms} \Rightarrow 1100\text{ms}=1,1\text{s.} \quad (3)$$

Pentru un post cu 96 telesemnalizări din STE-uri durata unui ciclu de semnalizare este de:

$$16+12(1+10)+6=154 \text{ biți} \times 20\text{s}=3008\text{ms} \approx 3\text{s.} \quad (4)$$

Rezultă că, pentru STE-uri informația se updatează din 3 în 3 secunde iar orice modificare a poziției unui echipament sau a stării unei instalații se va afișa cu o întârziere de aproximativ 3 secunde. Informațiile care nu persistă sau nu au ca durată minim 3 secunde nu pot fi afișate de această tehnologie.

2.1.2 Sistemul QNX

În România, din anul 2005, s-a încercat implementarea sistemului QNX în câteva puncte de dispecerizare, pentru controlul instalațiilor IFTE ca înlocuitor al panoului sinoptic și a sistemului USILOG. Arhitectura acestui sistem cuprinde:

- calculatorul cu sistemul de operare instalat în punctul de dispecerizare;
- placa de achiziție care realizează legătura între calculator și plăcile de canal;
- plăcile de canal pentru emisia și recepția semnalelor;
- linia de telecomunicație;
- dulapul de telemecanică (DTM) de la postul local.

Necesitatea de a folosi o parte din instalația de tip USILOG (plăci de canal și DTM-uri) pentru realizarea comenzii și semnalizării instalațiilor IFTE a dus treptat la renunțarea acestui sistem de control și implementarea sistemelor de tip SCADA.

În ultimii ani acestui sistem i s-a acordat din nou atenție pe plan internațional, compania MEN Mikro Elektronik GmbH, din Nuremberg, Germania a solicitat cercetătorilor să realizeze un proiect pentru traficul feroviar numit „Sistem automatic de protecție feroviară” care trebuia să asigure cerințele informatice specifice certificării „EN 50128 SIL 4”.

Proiectul realizat de compania MEN s-a numit MTCS (modular train control system). Funcția sistemului a fost de automatizare sistematizată pentru creșterea siguranței echipamentelor feroviare, care prin modularizarea propusă și atributele de încapsulare și de interfațare ale sistemului de operare QNX – MTCS oferă o platformă de dezvoltare rapidă a aplicațiilor de securizare a traficului feroviar.

Modularizarea în sistemul MTCS se bazează pe o proprietate a arhitecturii micro-kernel a lui QNX Neutrino, de a impune limite puternice între procesele software. Izolarea proceselor conduce la scăderea probabilității unei interacțiuni între acestea, de natură să afecteze performanța. QNX Neutrino mai prezintă și un nivel înalt de separare asigurat prin partiționarea adaptivă cu rol în alocarea resurselor CPU (Rosen L.2007).

În figura 7 este reprezentată interfața de lucru a sistemului de operare QNX Neutrino pentru MTCS.

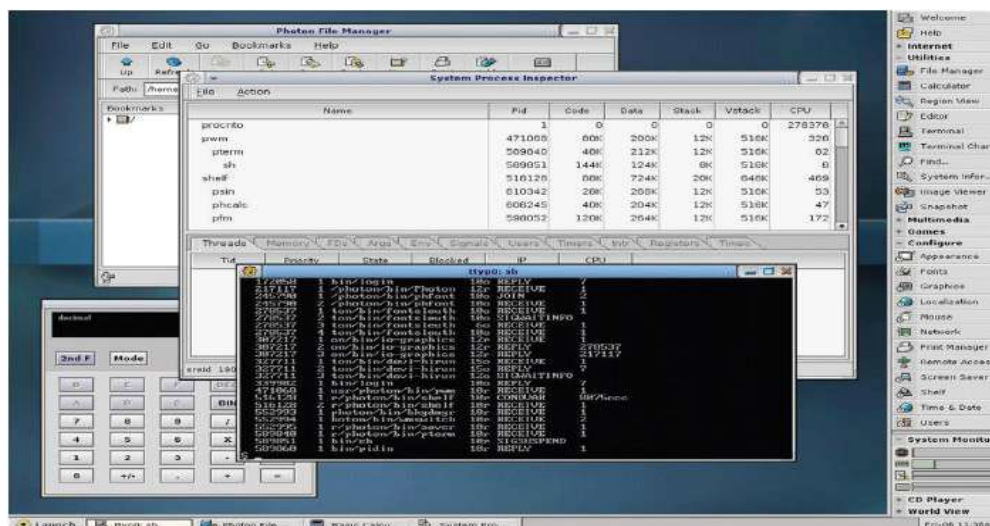


Figura 7. Interfața QNX-Neutrino

Interfața grafică a sistemului de operare s-a realizat cu Photon microGUI. Dezvoltarea acesteia s-a efectuat folosind Photon Application Builder având în vedere ușurința în folosire și versatilitatea crescută.

Partea hardware a MTCS a fost realizată pe un calculator de concepție proprie, numit F75P, pentru care s-a obținut certificare pentru fiecare componentă în parte. Conține trei procesoare Intel Atom E6XX/E600: două procesoare sunt conectate în schemă redundantă pentru procesarea semnalelor în vederea realizării controlului iar al treilea procesor este dedicat operațiilor I/O.

2.2 Sisteme de control în timp real de tip SCADA

2.2.1 Sistemul PACIS (Protection Automation and Control integrated Solutions)

PACIS este un sistem de control digital în timp real destinat automatizării sistemelor energetice echipate cu aparataj Schneider Electric.

În figura 8 este reprezentată interfața de control pentru o substație de tracțiune electrică în sistemul PACIS.

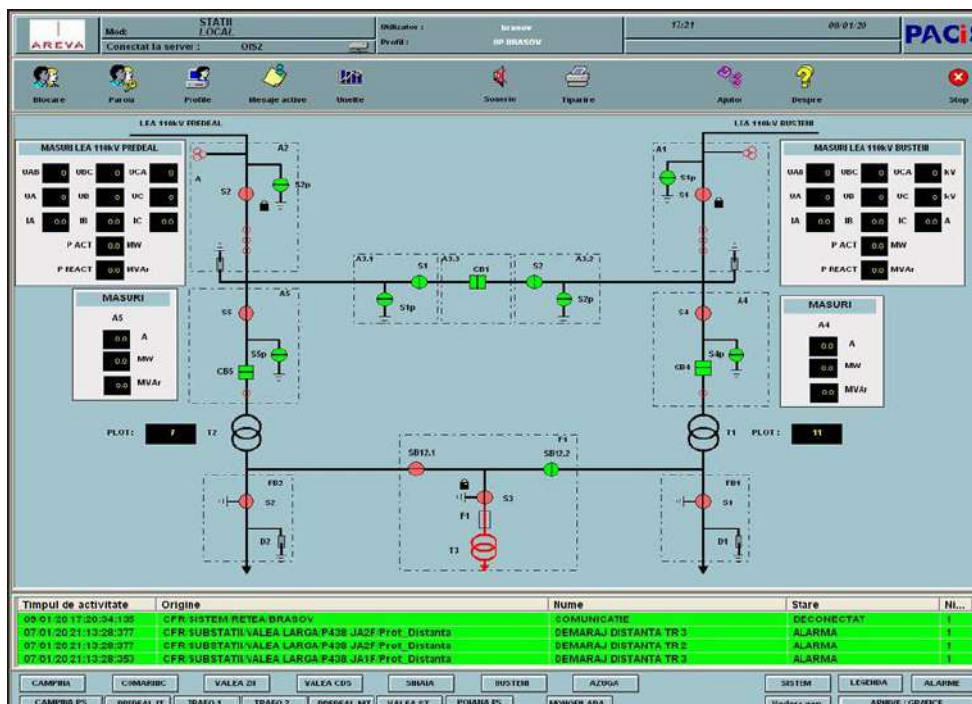


Figura 8. Interfața de control în sistemul PACIS

Sistemul PACIS este compus din două părți:

Partea hardware compusă din: dispozitive de acționare pentru întrerupătoare și separatoare (DAI/DAS), unități de comandă la distanță (RTU), relee de comandă și protecție, calculatoare de operare.

Partea software compusă din: sistemul de operare, interfața de control (HMI) și baza de stocare date cu softul aferent.

2.2.2 Sistemul SIMATIC (Siemens-Automatic)

Arhitectura sistemului SIMATIC SCADA conține: controlere programabile, interfețe HMI și sistemul de operare Win CC Step 7 care permite integrarea instalațiilor controlate în portalul de automatizare complet integrat TIA (Totally Integrated Automation). Această tehnologie web este de dată foarte recentă, este dezvoltată pentru a permite accesul la servicii de automatizare digitalizată, de optimizare a consumurilor de energie electrică și de planificare a lucrărilor de mentenanță la echipamentele și instalațiile care deservește STEF.

Software-ul STEP 7 are în componență o suită de aplicații și utilitare care se pot deschide separat sau pot porni automat la selectarea unei funcții. Folosește funcții suplimentare de diagnosticare și de gestionare a energiei electrice sporind flexibilitatea sistemului de management energetic. Cu ajutorul STEP 7 se pot configura, programa, testa și diagnostica controlerele tuturor generațiilor de PLC, bazate pe PC sau software (Ruben Crisan.2009).

În figura 9 sunt reprezentate aplicațiile regăsite în software-ul STEP 7.



Figura 9. Aplicații disponibile în programul STEP 7

SIMATIC Manager gestionează prin sistemul de control programabil (S7/M7/C7) întregul proiect de automatizare a instalațiilor. Instrumentele necesare pentru editarea datelor sunt afișate automat la lansarea programului în fereastra de lucru. În figura 10 este reprezentată fereastra Simatic Manager.

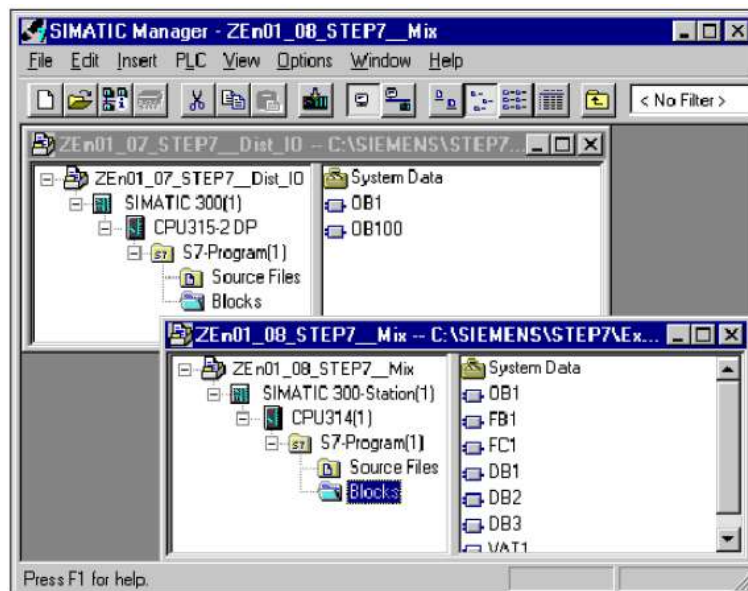


Figura 10. Fereastra Simatic Manager

Simatic Manager conține în baza de date biblioteca necesară proiectării unui sistem de automatizare, care se completează permanent cu noile echipamente dezvoltate de către cercetătorii Siemens.

2.2.3 Controlul sistemului de tracțiune electric feroviar cu ajutorul sistemului Simatic SCADA

Sistemul de tracțiune electric feroviar cuprinde:

- instalațiile mobile de tracțiune electrică;
- instalațiile fixe de tracțiune electrică.

Instalațiile mobile de tracțiune electrică sunt compuse din locomotive electrice (LE) cu puterea cuprinsă între 3400kW și 6400kW și rame electrice cu puterea de 615kW sau 1720kW.

Instalațiile fixe de tracțiune electrică sunt compuse din substații de tracțiune electrică, posturi de secționare, posturi de legare în paralel (PLP) și instalația liniei de contact. În figura 11 este reprezentată schema de alimentare a IFTE între două STE-uri adiacente pentru două fire de circulație.

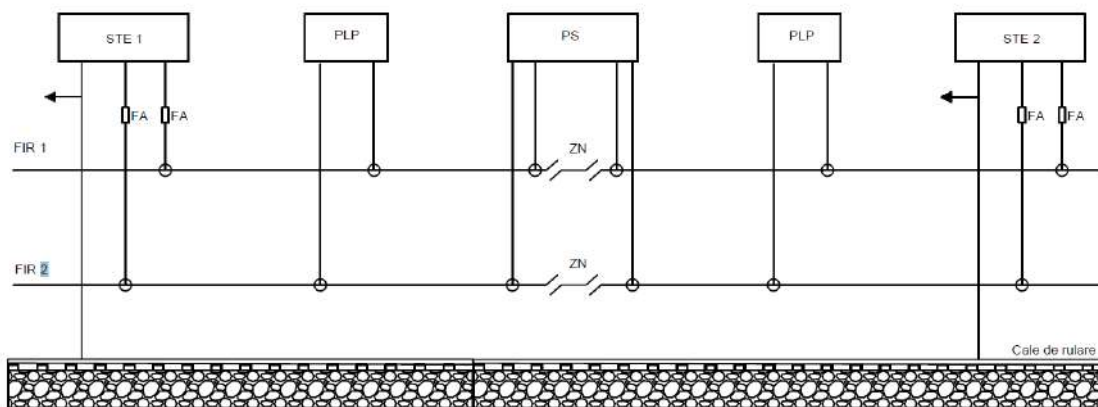


Figura 11. Schema de alimentare a LC cu două fire de circulație

Monitorizarea parametrilor energiei electrice la necesitățile STEF se poate face în sistem automatizat prin implementarea sistemului Simatic SCADA având configurația descrisă în figura 12.

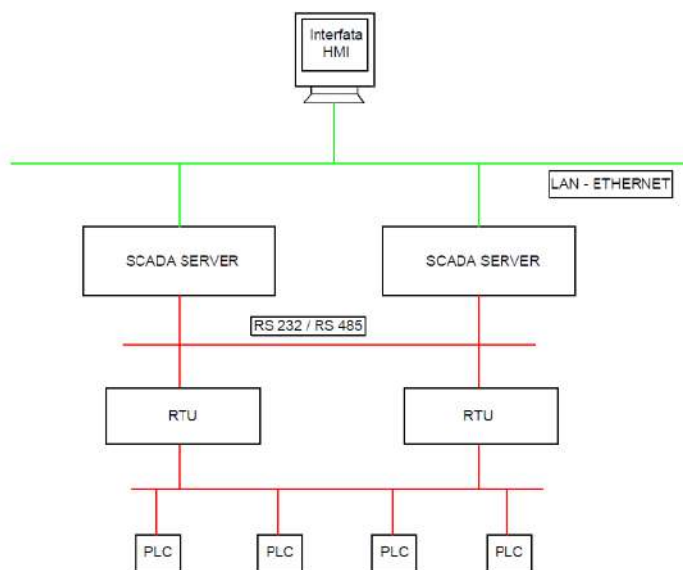


Figura 12. Configurația sistemului Simatic SCADA

Controlerele PLC-urilor compară permanent parametrii de referință ai energiei electrice cu parametrii colectați de pe tronsoanele de cale ferată, corectând abaterile în mod automat.

Interfața de operare în sistemul SIMATIC SCADA pentru o substație de tracțiune electrică este prezentată în figura 13 (Kleinmann et al., 2014).

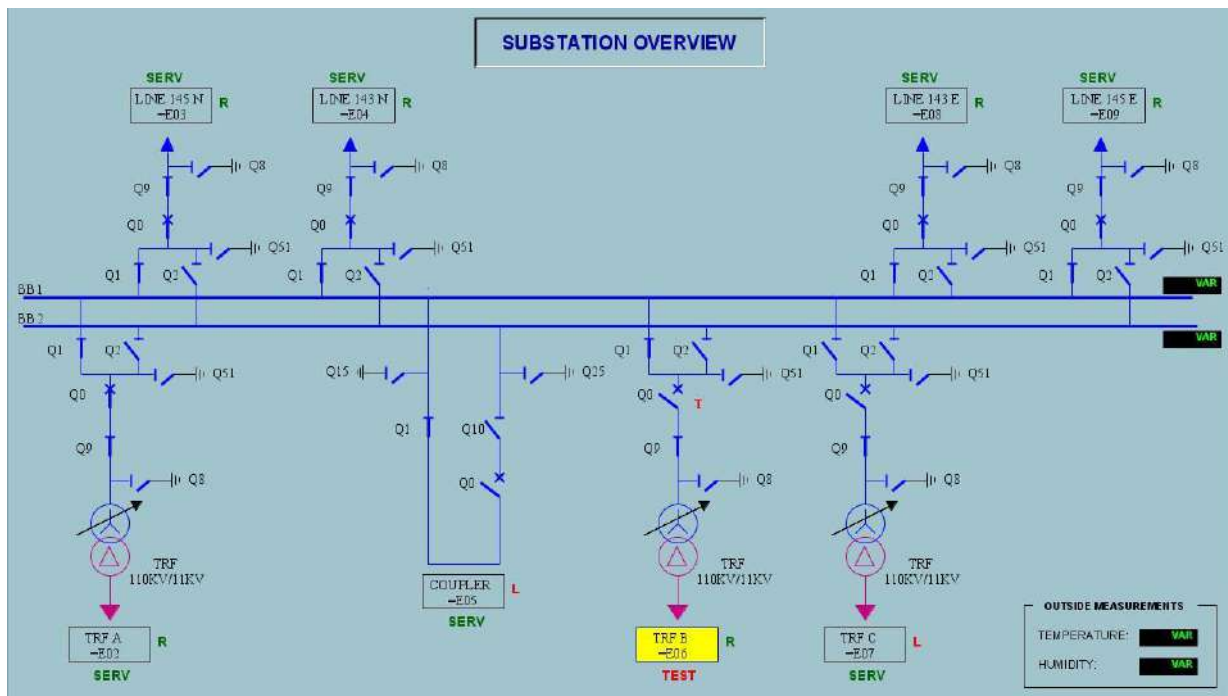


Figura 13. Interfața de operare pentru o STE

În figura 13 este prezentată schema generală a STE-ului cu aparatul controlat de sistemul SIMATIC SCADA, pentru operarea unui echipament de pe schemă, sau pentru citirea parametrilor de funcționare, este necesar să se deschidă fereastra de operare a echipamentului cu aparatajele care îl deservesc, acest lucru este reprezentat în figura 14.

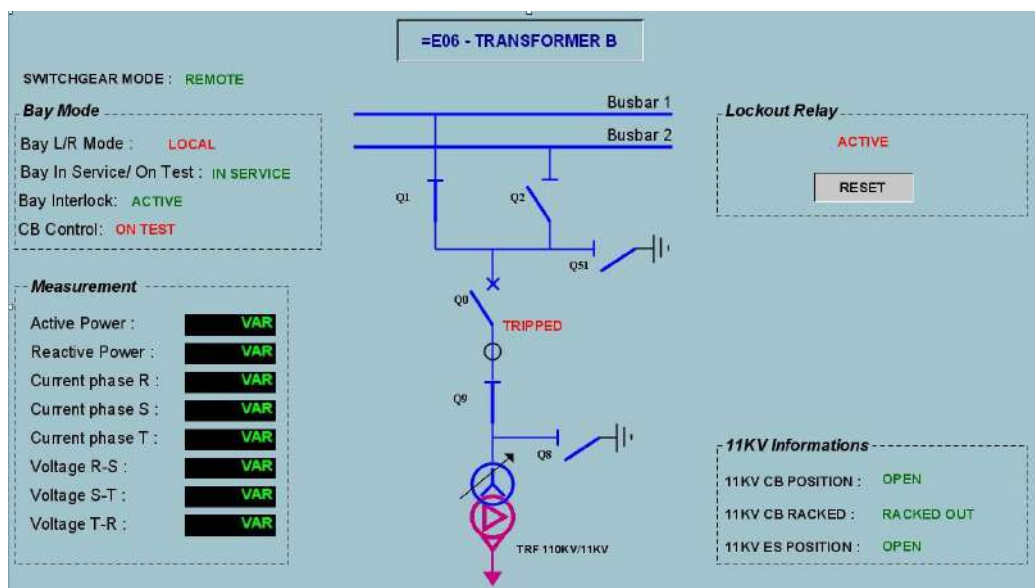


Figura 14. Interfața SIMATIC SCADA pentru controlul transformatorilor de putere

În interfața reprezentată în figura 14 se pot citi parametrii energiei electrice furnizați sistemului de tracțiune electric feroviar prin fiderii de alimentare Q_1 și Q_2 , se pot efectua manevre pentru punere în funcție sau retragere din funcție a transformatorilor de putere și a fiderilor de alimentare.

2.3 Concluzii

Pentru sistemul USILOG:

- funcționarea sistemului necesită utilizarea unui număr mare de echipamente și circuite fizice cu risc ridicat de defectare;
- apariția deselor erori de transmisie și recepție cauzate de ieșirea din bandă a plăcilor de canal;
- limitarea numărului maxim de posturi legate pe o linie de comunicație;
- lipsa criptării codurilor de comandă și a informațiilor transmise;
- viteza mică de transmisie;
- rata scăzută de refresh, interogarea teletestelor se face ciclic la un interval de timp cuprins între 2,8 și 6 secunde în funcție de numărul de echipamente supravegheate.

Sistemul QNX implementat în controlul instalațiilor IFTE are următoarele capacități:

- poziția elementelor de comutație poate fi urmărită pe monitor inclusiv în cazul avariilor;
- manevrarea din punctul DEF a tuturor elementelor de comutație echipate cu servo motor de acționare;
- generarea automată a jurnalului de evenimente;
- afișarea condițiilor de circulație survenite ca urmare a întreruperii alimentării unei porțiuni de LC;
- convorbirile operative pot fi înregistrate, stocate și redare ulterior.

Neajunsul acestui sistem a fost imposibilitatea la momentul implementării de a înlocui total echipamentele de tip USILOG.

Sistemele PACIS și SIEMENS-SIMATIC oferă:

- controlul total în timp real al instalațiilor IFTE;
- înlocuirea totală a instalației de telemecanică existentă de tip USILOG;
- conectarea la sistemele informatice folosite pentru dirijarea traficului feroviar;
- posibilitatea de a depista rapid avariile apărute și de a afișa schemele de separare cele mai eficiente;
- ajustarea automată a regimurilor de funcționare a echipamentelor;
- protecția echipamentelor și a instalațiilor IFTE;
- crearea automată a bazei de date și a jurnalelor de evenimente;
- interpretarea evenimentelor petrecute pentru a preveni producerea lor ulterioară.

3. DEZVOLTAREA ȘI IMPLEMENTAREA APLICAȚIILOR DE TIP SCADA ÎN SISTEMUL DE TRACȚIUNE ELECTRIC FERROVIAR

3.1 Introducere

Capacitatea sistemului SCADA de a rula pe majoritatea sistemelor de operare precum și interfața intuitivă pentru operatori a făcut ca acest sistem să fie implementat în foarte multe procese și puncte de dispecerizare a instalațiilor. SCADA oferă un sistem de telecomandă și telecontrol în timp real, cu un grad de fiabilitate și siguranță în funcționare foarte ridicat (Church, P et al 2017).

3.2 Proiectarea și implementarea aplicațiilor SCADA pentru transportul feroviar

Dezvoltarea și implementarea unui sistem SCADA adecvat pentru tracțiunea electrică feroviară se va face după modelul general al proiectării SCADA pentru majoritatea domeniilor de activitate, însă trebuie să se țină cont de aspectele particulare ale sistemului de transport feroviar.

3.2.1 Componentele unui sistem SCADA

Un sistem SCADA cuprinde: componente de măsurare, acționare și automatizare, componente hardware, software și componente de comunicație.

3.2.2 Funcțiile sistemului SCADA

Organizarea sistemului alcătuit din componentele de mai sus va ține cont de nevoia de a asigura următoarele funcții: achiziția date, comunicare, comandă la distanță, securitate, diagnoză, arhivare a datelor și simulare (Allen B.2005).

În figura 15 este reprezentată schematic distribuția componentelor în cadrul sistemului SCADA.

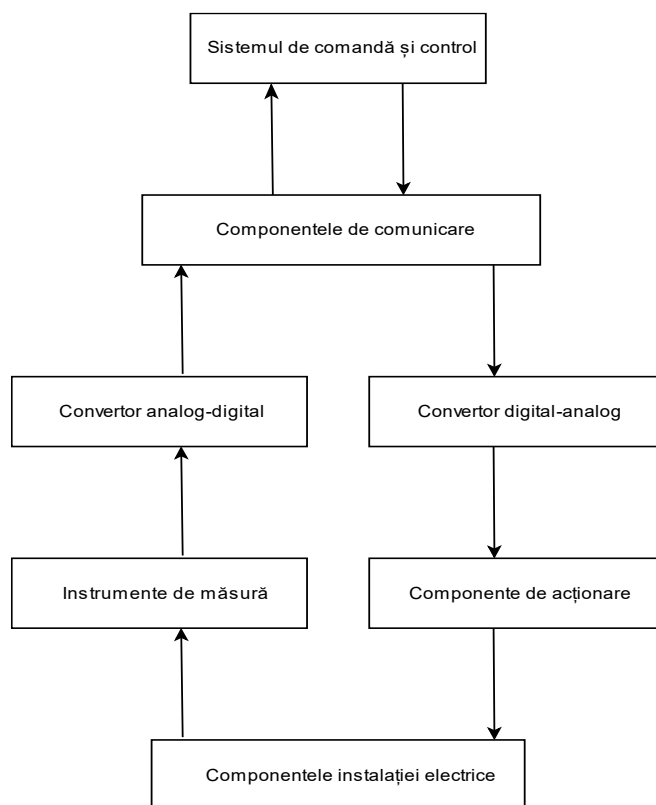


Figura 15. Componentele sistemului SCADA

3.2.3 Configurația sistemului SCADA

Sistemele SCADA sunt compuse din stații master (cu sau fără unități submaster) și din unități terminale RTU sau IED (intelligent electronic device).

3.2.4 Unitatea terminală comandată de la distanță (RTU)

RTU-urile sunt dispozitive parțial autonome care constituie interfața între sistemul SCADA și obiectele fizice care fac obiectul controlului de la distanță. Rolul lor este bidirecțional, ele putând efectua achiziția de date de la echipamente sau controlul echipamentelor, automat sau pe baza comenzilor primite de la nivelurile superioare.

3.2.5 Caracteristicile sistemelor SCADA

Următoarele caracteristici trebuie urmărite în dezvoltarea sistemului:

- deschiderea: reprezintă nivelul extinderii ulterioare pe care sistemul o poate suporta;
- integrabilitatea: reprezintă capacitatea sistemului de a conlucra cu alte sisteme;
- adaptabilitatea: reprezintă posibilitatea de a reconfigura sistemul în eventualitatea modificării condițiilor sau a cerințelor;
- toleranța la defectare: se asigură prin aplicarea redundanței;
- disponibilitatea: se realizează prin componenta modulară și redundantă, dar și prin posibilitatea autotestării și izolării componentelor defecte.

3.3 Implementarea SCADA în comanda de la distanță a separatorilor STEF

3.3.1 Comanda de la distanță a separatorilor prin sistem SCADA pentru o stație de triaj a trenurilor – studiul de caz 1

Aplicația a fost scrisă în limbajul C folosind programul MPLAB® X, secvența codului scris pentru microcontroler este reprezentată în anexa 1.

În figura 16 este reprezentată schema bloc de implementare a sistemului SCADA pentru telecontrolul separatorilor care deservește instalațiile de LC.

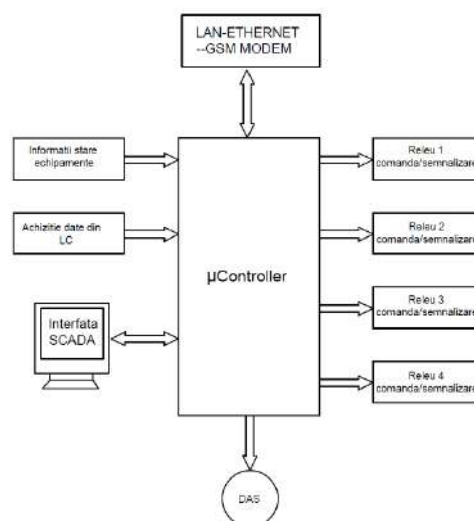


Figura 16. Schema bloc pentru telecontrolul separatorilor prin sistemul SCADA

Releele de comandă/semnalizare transmit comenzile și recepționează informațiile de stare ale DAS-urilor (dispozitive de acționare a separatorilor).

Sistemul bazat pe microcipul PIC18F4550 reprezintă unitatea RTU, este instalat în dulapul CDS aflat în biroul de mișcare al stației de cale ferată. La alegerea acestui tip de microcontroler s-a ținut cont de instrumentele de programare disponibile și de ușurința în utilizare și configurare (Parab J.S.2007).

În figura 17 este reprezentată interfața de comandă de la distanță a separatorilor prin sistem SCADA pentru o stație de triaj a trenurilor.

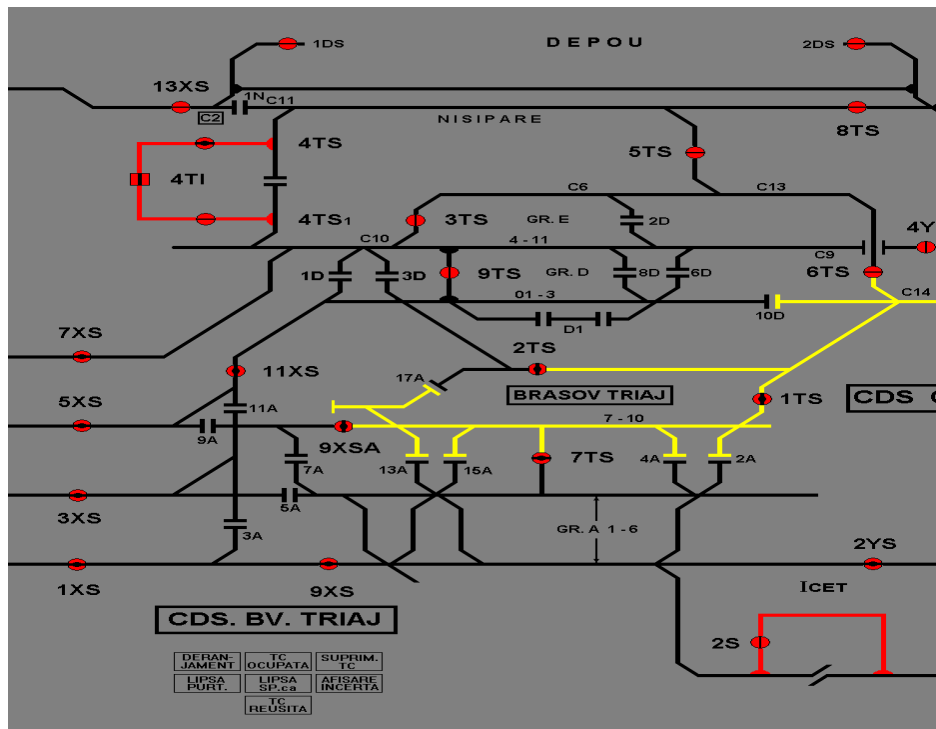


Figura 17. Interfață de comandă la distanță a separatorilor prin sistem SCADA

Interfața de comandă a fost realizată în programul Visual Studio 2017, este afișată pe ecranul LCD în punctul de dispecerizare. Schimbarea poziției unui separator se poate face direct de pe ecran dacă acesta este tactil sau prin apăsarea cu mouse-ul pe elementul telecomandat. Selectarea unui separator din interfață produce deschiderea unei ferestre de dialog ca în figura 18.

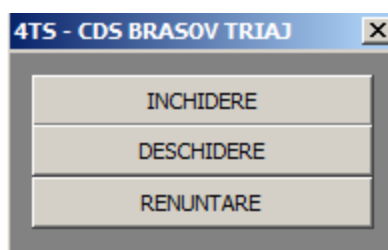


Figura 18. Fereastra de dialog afișată de SCADA pentru schimbarea poziției unui separator telecomandat

Din fereastra de dialog se selectează caseta dorită de comandă, aceasta acțiune produce deschiderea unei noi ferestre ca în figura 19.

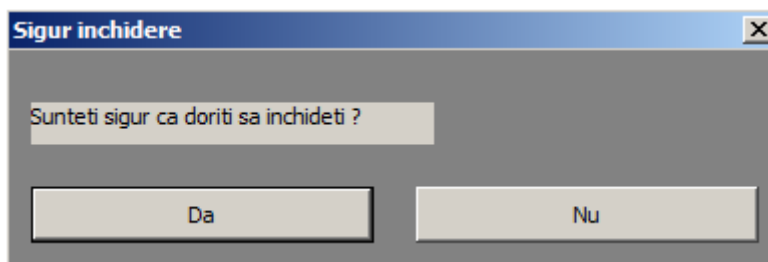


Figura 19. Fereastra afișată de SCADA pentru confirmarea comenzii unui separator

Dacă comanda este validată în caseta de confirmare, ea este transmisă separatorului în teren iar după încheierea manevrei se primește confirmarea de comandă reușită prin schimbarea stării de poziție a separatorului manevrat.

Aplicația dezvoltată a urmărit înlocuirea panoului sinoptic și a modulelor de comandă de la punctul DEF și de la postul local. Deoarece aplicația folosește pentru transmisia și recepția semnalelor modemurile sistemului USILOG se recomandă dezvoltarea în continuare a acestui studiu de caz pentru implementarea unor plăci de canal digitale cu performanțe superioare.

3.3.2 Comanda echipamentelor electrice folosind rețele GSM pentru comunicare – studiul de caz 2. Încălzirea macazului

Aplicația a fost dezvoltată și implementată pentru comanda circuitelor de alimentare cu energie electrică a încălzitoarelor de macaz din stațiile de cale ferată, în care nu se pot instala echipamente USILOG de telecomandă din cauza lipsei suportului fizic de comunicație (Golovash AN.2004). Schema bloc a aplicației este descrisă în figura 20.

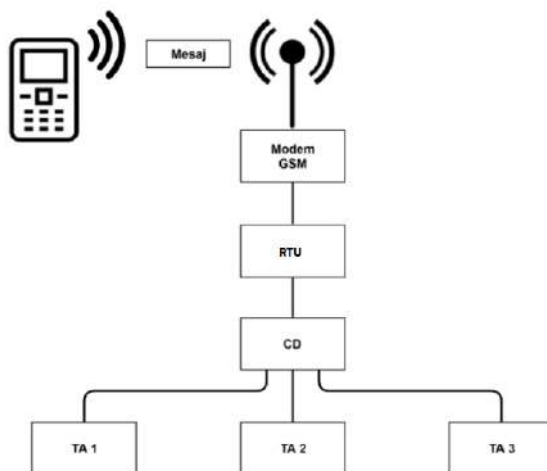


Figura 20. Schema bloc de telecomandă prin modem GSM

Realizarea acestui tip de transmisie se face bidirecțional între un dispozitiv de telefonie mobilă și un modem, folosind rețeaua de transmisie GSM (Pan Dai.2014).

La postul central de comandă este nevoie de un echipament de telefonie mobilă, de o cartelă conectată la un operator de telefonie mobilă, care să permită transmisia și recepția mesajelor de tip sms (serviciul de mesaje scurte).

Comanda este direcționată dintr-un terminal de telefonie mobilă sub forma unui mesaj scris (exemplu: 01 pentru ON și 10 pentru OF), este recepționată de către un modem GSM montat în postul local și

livrată sistemului de comandă la distanță (SCD) sub forma unui semnal electric. După efectuarea comenzii se primește pe telefon un mesaj de confirmare (Yatang G.2010).

Unitatea de comandă la distanță (RTU) conține: un microcontroller pe 8 biți, un modem GSM, un regulator de tensiune, un modul de conectare serială RS232, un optocuplor și un relee de comandă, montate pe un cablaj realizat în programul ExpressPCB. În figura 21 este reprezentată schema de conexiune a componentelor SCD-ului (ARC Electronics.2019).

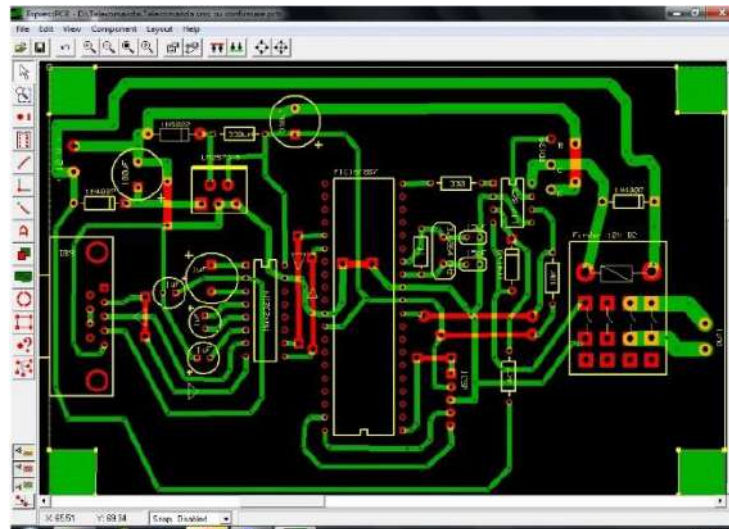


Figura 21. Schema de montare a componentelor SCD

Microcontrolerul ales este de tip PIC16F887, cu tehnologie nanoWatt, care permite o configurare ușoară. Sarcina microcontrolerului este de a realiza comunicarea între terminalul de telefonie mobilă și modemul GSM Maestro 100 printr-un port serial la o viteză de 300 de biți pe secundă (Thabit S, et al.2014).

Programarea PIC16F887 a fost realizată cu programatorul PICKit 2. Programul a fost scris în limbajul C, iar Integrated Development Environment (IDE) utilizat a fost MPLAB v8.10. Compilarea programului a fost făcută cu compilatorul HI-TECH PIC C Lite 9.60. Fișierul hexadecimal (.hex) generat de compilator a fost scris în memoria programului PIC16F887A cu programatorul PICKit 2 de la MPLAB IDE v8.10.

În figura 22 este prezentat codul scris pentru aceasta aplicație

```

1:18 void main() void {
1:19 {
1:20 OPTION = 0x00000011; // configurarea generala de 8 biti pentru I/O de I/O.
1:21 WDTCON = 0x00000011; // configurarea watchdog Timer-con pentru a nu se reseteaza (Se reseteaza la 1s100ms).
1:22 TRISA = 0x00000001;
1:23 TRISB = 0x00000001; // RB0, RB1, RB2, RB3, RB4, RB5 pentru selectie de pin de iesire
1:24 TRISC = 0x00000000; // configuratie IN/OUT ca input din.
1:25 TRISD = 0x00000000; // configuratie IN/OUT ca input din.
1:26 TRISE = 0x00000000; // configuratie port E ca output din cu pin ca output din for relay control
1:27 TRISF = 0; TRISG = 0; TRISH = 0; // RB pin de intrare pentru citirea starii releului
1:28
1:29 // deschide functiile analogice.
1:30 ANSEL = 0x00;
1:31 ANSEL = 0x00;
1:32
1:33 delay(10);
1:34
1:35 citesteEESCH(); // citeste din EESCH ultima comanda si returneaza awgure releului
1:36
1:37 if( stareaRelu == 0x00 )
1:38 {
1:39 RB1 = 0; // deschide releul
1:40 }
1:41 else
1:42 {
1:43 RB1 = 1; // inchide releul
1:44 }
1:45
1:46 citeste();
1:47
1:48 delay(1000);
1:49
1:50 // citeste starea de la telefon si se conecteaza la un server GSM
1:51
1:52 conectareGSM(); // conectare la modemul GSM sa se conecteze la server la adresa telefonului de comandare.
1:53
}
}

```

Figura 22. Codul de configurare al microcontrolerului

În cazul unei avarii sau a unei întreruperi a tensiunii de alimentare, pentru a cunoaște ultima valoare setată a releului, se face citirea memoriei EEPROM, iar cu valoarea citită se restabilește poziția avută de releu înainte de producerea evenimentului (Fratu M.2013).

3.4 Implementarea SCADA în posturile de alimentare și transformare

Pentru introducerea controlului posturilor de alimentare și transformare în sistemul de comandă centralizat SCADA este necesară modificarea posturilor existente pe diferite nivele de echipare în funcție de controlul total sau parțial dorit.

În punctul de dispecerizare este necesară dezvoltarea unei aplicații de tip SCADA, care va genera interfața grafică de control pentru punctul DEF cu echipamentele și posturile integrate în sistem. Interfața de control pentru posturile de alimentare și transformare este reprezentată în figura 23 (Scholl MV.2016).

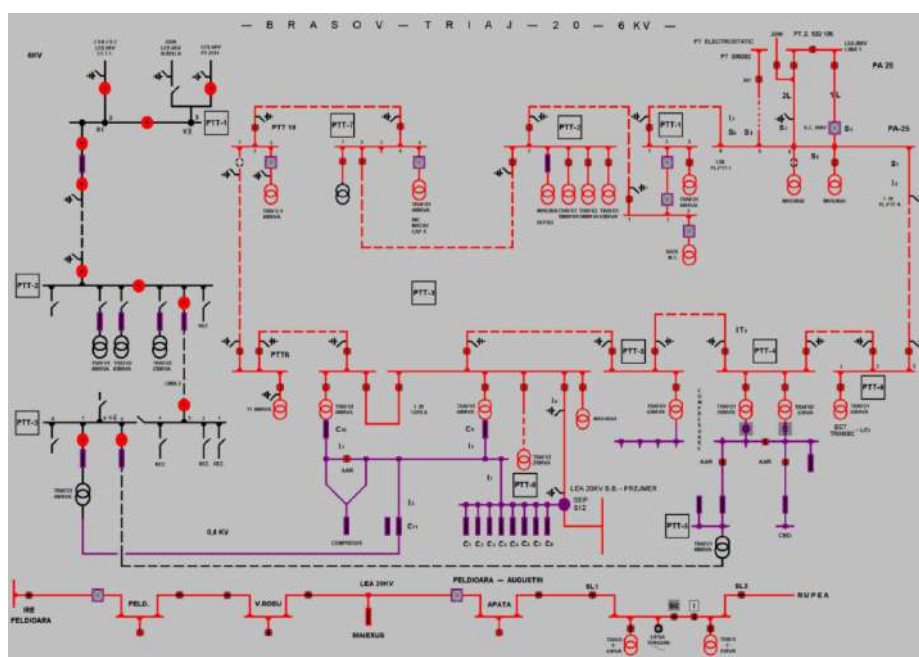


Figura 23. Interfața SCADA pentru operațiunile la posturile de transformare și de alimentare

Pe această interfață operatorul poate executa comenzi pentru schimbarea stării unui echipament, poate analiza parametrii de stare ai instalațiilor și poate corecta parametrii energiei electrice furnizată consumatorilor.

3.5 Implementarea sistemului SCADA în punctele de dispecerizare a instalațiilor IFTE

Pentru a dezvolta și implementa un sistem SCADA într-un punct de dispecerizare este necesară parcurgerea următoarelor etape:

- se alege softul de proiectare a sistemului SCADA din softurile disponibile CitectSCADA, WinCC Explorer, Genesis 32, etc. La alegerea softului de proiectare se ține cont de caietul de sarcini impus de furnizorul de energie, în cazul nostru punctul de dispecerizare;
- se dezvoltă un sistem de comandă și control de tip SCADA ținând cont de cerințele instalațiilor deservite;

- se introduce comanda și controlul echipamentelor aflate pe teren în RTU sau PLC-uri pentru conectarea la terminalul SCADA;
- se instalează serverul de operare cât mai aproape de punctul de dispecerizare pentru a facilita intervenția în caz de avarie a echipamentului;
- se instalează în punctul de dispecerizare interfața de comandă și control.

3.6 Concluzii

Înlocuirea sistemelor de comandă și control existente în punctele de dispecerizare cu sisteme de tip SCADA aduce următoarele avantaje:

- crește viteza de manevrare a echipamentelor de comutație;
- asigură un grad sporit de siguranță;
- interfața oferă informații cu privire la manevrele executate, starea în care se află tronsoanele și liniile de cale ferată electrificată;
- sistemul afișează parametrii energiei electrice furnizați STEF în timp real;
- se asigură securitatea informațiilor prin criptarea semnalelor trimise și recepționate în punctul de dispecerizare;

Comanda prin modem-uri GSM prezintă următoarele avantaje:

- posibilitatea efectuării de comenzi dintr-un punct de comandă centralizat aflat la mare distanță;
- precizie și fiabilitate ridicată;
- economie financiară prin renunțarea la cablurile de comandă;
- preț de cost scăzut, rezultat din simplitatea tehnologică;
- posibilitatea de a fi introdus în sisteme complexe de comandă și supraveghere;
- posibilitatea de instalare rapidă, de rezervă pentru alte sisteme de comandă, de înlocuire a sistemelor existente pe perioada defectărilor.

Acest sistem se pretează și pentru a comanda iluminatul de siguranță în gările care nu mai au personal de deservire operativă.

4. TELEGESTIUNEA ENERGIEI ELECTRICE FOLOSITĂ ÎN SISTEMUL DE TRACȚIUNE ELECTRIC FERROVIAR UTILIZÂND SISTEMUL SCADA

4.1 Telegestiunea energiei electrice. Măsurile de eficiență energetică

Telegestiunea energiei electrice pentru STEF reprezintă activitatea de colectare, transmitere și prelucrare a datelor referitoare la consumul de energie electrică la nivelul substațiilor de tracțiune electrică, operatorilor de transport feroviar și posturilor de transformare alimentate din LC (Z.Hu et al.2015).

4.2 Algoritm de calcul pentru stabilirea necesarului de energie electrică pentru un tronson de cale ferată

Definim tronsonul de cale ferată ca fiind distanța măsurată în km din punctul de injecție al unui fider de alimentare dintr-o STE și punctul de delimitare al zonei fider al unei STE adiacente. Lungimea unui tronson de cale ferată variază între 25 și 35km, este delimitat la capete de zonele neutre. În figura 24 este reprezentată schema de alimentare cu energie electrică a căii ferate (Nicola D. et al.2006).

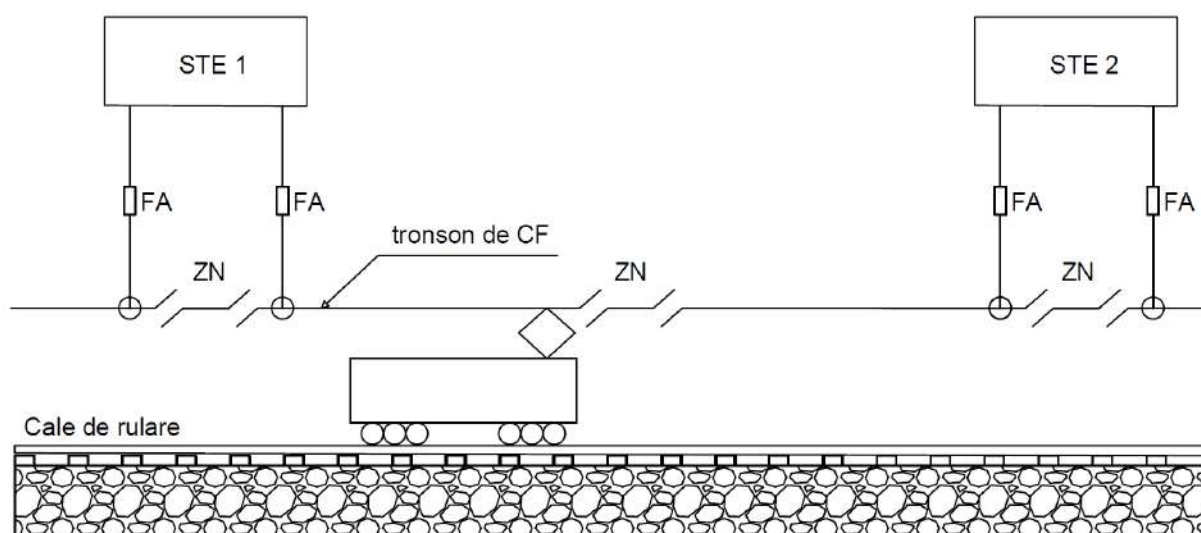


Figura 24. Schema de alimentare cu energie electrică a căii ferate, delimitarea tronsonului de cale ferată

Pentru stabilirea algoritmului de calcul trebuie luate în considerare următoarele aspecte: numărul trenurilor aflate în circulație pe tronson, panta tronsonului, viteza de circulație a trenurilor și restricțiile de viteză, factori care vor crește substanțial consumul de energie electrică necesar tracțiunii electrice feroviare (Calderaro V. et al.2014).

Modelul matematic al consumului de energie electrică pornește de la relația viteză-timp, respectiv de la relația distanță-timp. Curba distanță-viteză și curba viteză-timp este o diagramă care arată viteza instantanee a trenului de-a lungul ordonatei și timpul parcurs de-a lungul abscisei. Aceasta reprezintă variația vitezei la momente diferite după pornirea trenului. În curba viteză-timp, distanța parcursă în intervalului de timp este dată de suprafața dintre curbă și abscisă. De asemenea, accelerarea și decelerarea sunt date de pantă în orice punct de pe curbă spre abscisă (Steimel. et al.2012).

În figura 25 este reprezentată relația viteză-timp pentru un tren dat, cu cele patru componente distincte: perioada de accelerație, de mers cu viteză constantă, de mers inerțial și de frânare.

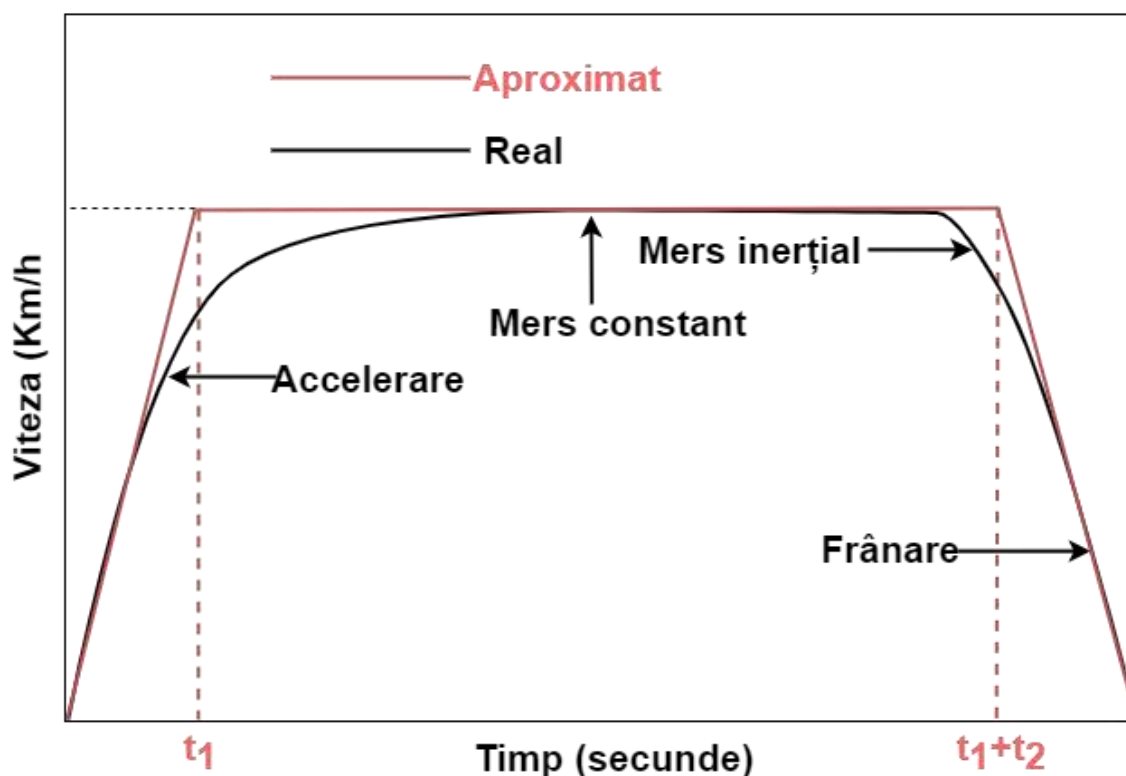


Figura 25. Curba tipică viteză-timp

Componentele distincte reprezentate de relația viteză-timp din figura 38 sunt descrise de următoarele perioade:

- perioada de accelerare – trenul este accelerat până la viteza maximă. Puterea absorbită în această perioadă este maximă;
- perioada de mers constant – trenul se deplasează cu viteză constantă, atinsă la sfârșitul perioadei de accelerare. În această perioadă puterea absorbită este constantă;
- perioada de mers inerțial – alimentarea motoarelor este întreruptă la sfârșitul perioadei de mers constant, trenul este lăsat să ruleze din cauza propriei inerții. Viteza trenului scade treptat din cauza rezistenței trenului;
- perioada de frânare – frânele sunt aplicate la sfârșitul perioadei de mers inerțial pentru a aduce trenul în repaus.

Se calculează pe baza curbei liniarizate viteză-timp energia electrică consumată pentru remorcarea trenului pe perioada t_1 în care accelerația este constantă și gradientul pozitiv.

$$E_{t_1} = \text{Forța} \cdot \text{Distanța} = Ft_1 \cdot 1/2 \cdot V_m \cdot t_1 \text{ (kWh)} \quad (5)$$

$$F_{t_1} = [m \cdot a \pm m \cdot g \cdot \sin \phi + m \cdot r] \quad (6)$$

F_{t1} -este efortul depus de sistemul de tracțiune pe durata lui t_1 datorită accelerației, gravitației și rezistenței la tracțiune.

V_m -este viteza maximă

Rezistența de tracțiune în N/Kg este notată cu r și este dată de ecuația:

$$r = K_1 + K_2 * V + K_3 * V^2 \quad (7)$$

K_1 , K_2 și K_3 se numesc coeficienți constanți Davis (Y.Song et al.2016)

Consumul de energie de la momentul t_1 la t_2 este notat cu E_{t2} și este dat de ecuația,

$$E_{t2} = F_{t2} * V_m * t_2 \quad (8)$$

În timpul vitezei constante, accelerația $a = 0$

Prin urmare, consumul de energie la viteză constantă este:

$$E_{t2} = (m * g * \sin\Phi + m * r) * V_m * t_2 \quad (9)$$

unde: t_2 este perioada de mers constant

Consumul total de energie este:

$$E_{\text{cons.tr.}} = E_{t1} + E_{t2} \quad (10)$$

Energia electrică necesară remorcării trenurilor pe tronsonul de cale ferată este:

$$E_{\text{total}} = \sum_{tr=1}^n E_{\text{cons.tr.}} \quad (11)$$

4.3 Metode de optimizare a consumului de energie electrică pentru sistemul de tracțiune electric feroviar

Ecuația consumului total de energie definit în relația (9) și (10) este considerată o funcție de optimizat în funcție de anumite constrângeri.

Optimizarea consumului de energiei electrică pentru tracțiune se face sub următoarele două constrângeri:

- Viteza maximă (V_m) atinsă de tren să nu depășească valoarea specificată;
- Distanța parcursă de tren (S) să fie constantă.

Din punct de vedere matematic, funcția obiectiv a problemei controlului optim se definește astfel:

$$\text{Min } F(X) = E = m * V_m \left[\left(\frac{a \pm g * \sin\Phi + r}{2} \right) * t_1 + (\pm g * \sin\Phi + r) * t_2 \right] \quad (12)$$

Constrângerile pot fi definite matematic astfel:

$$a * t_1 \leq V_m; \quad (13)$$

$$0,5 * a * t_1^2 + a * t_1 * t_2 = S \quad (14)$$

Se consideră problema generalizată definită în ecuația,

$$\text{Min } F(X) = 0 \text{ sub rezerva că } G(X) \leq 0 \text{ și } H(X) = 0 \quad (15)$$

Unde $G(X)$ reprezintă inegalitatea și $H(X)$ reprezintă constrângerile de egalitate.

Tabelul I. Date utilizate pentru calcule

Parametru	Valoare
m	213 tone
V_m	50 m/s.
$\sin\Phi$	$2 \cdot 10^{-3}$
r	$8,736 \cdot 10^{-2}$ N/kg

Ecuția de bază a funcției obiectiv (pentru consumul total de energie electrică), cele două constrângeri și datele din Tabelul I sunt introduse și rulate în programul de optimizare convențional al MATLAB. Se obțin valori optimizate a parametrilor corespunzătorii regiunii punctului optim de consum.

Tabelul II prezintă energia optimizată și parametrii corespunzătorii obținuți prin metoda de programare convențională.

Tabelul II. Parametrii optimizați prin metoda convențională

Parametru	Valoare
Accelerația "a" (m/s^2)	0.2
Timpul de accelerare "t1" (s)	250
Perioada de funcționare liberă "t2"(s)	1875
Consumul de energie (kWh)	680.6667

4.3.1 Optimizarea prin metoda punctului interior

Pentru a pune în aplicare această metodă, a fost creat un proiect în programul MATLAB care va cere utilizatorului valoarea accelerației, limita maximă a vitezei, limita superioară a timpului de accelerație (t_1) și perioada de mers constant (t_2). Valoarea optimă a consumului de energie și a vitezei este calculată și afișată în Tabelul III.

Tabelul III. Parametrii optimizați prin metoda punctului interior

Parametru	Gradient pozitiv	Gradient negativ	Gradient zero
Accelerația "a" (m/s^2)	0.2	0.3	0.1
Consumul de energie (kWh)	664.4953	444.9655	546.3243
Viteza (km/h)	32.4555	38.9867	31.8625

Rezultatele obținute definesc consumul de energie electrică maxim pentru gradientul pozitiv și minim pentru gradientul negativ. Valorile obținute prin metoda convențională și metoda punctului interior sunt prezentate în Tabelul IV.

Tabelul IV. Compararea rezultatelor metodelor de optimizare

Parametri	Metoda convențională	Metoda punctului interior
Consumul de energie (kWh) (Pentru gradient pozitiv)	680.6667 (valoare minimă) 707.2917 (valoare maximă)	664.4953
Viteza (m/s)	50	32.4555

Folosind metoda punctului interior de optimizare se obține o reducere a consumului de energie electrică cu 2,375% în comparație cu metoda convențională de optimizare (Dongre N. Et al.2018).

4.3.2 Eficientizarea consumului de energie electrică prin rețele inteligente cu ajutorul frânării regenerative

Schema bloc a unei rețele inteligente compusă din locomotiva electrică, linia de contact și substația de tracțiune electrică este reprezentată în figura 26.

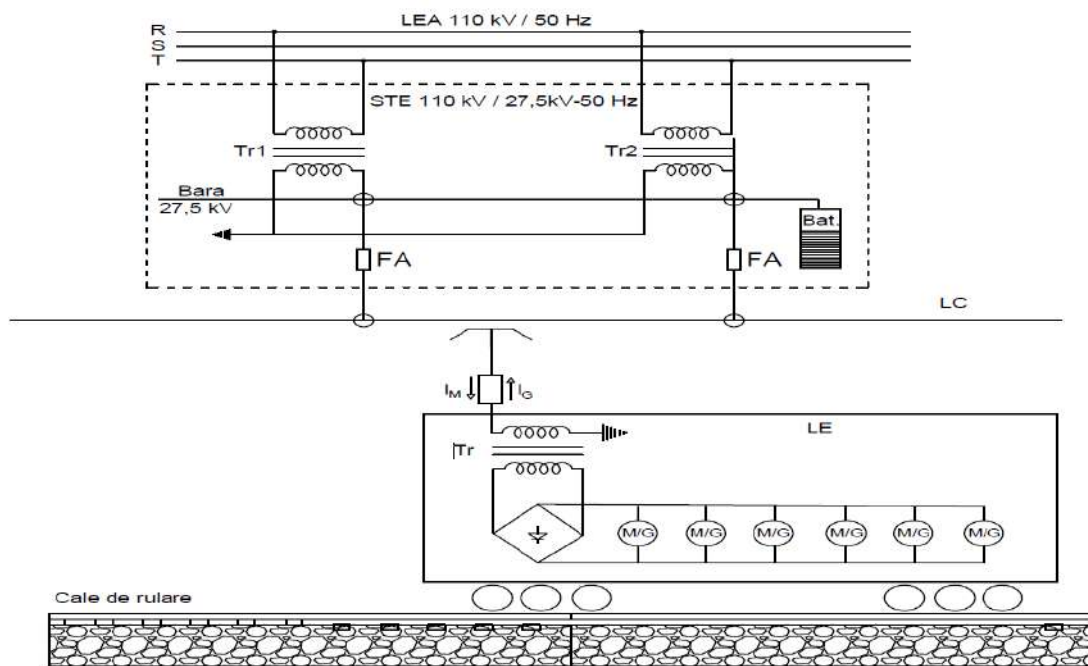


Figura 26. Schema unei rețele inteligente a STEF

Energia electrică produsă de motoarele locomotivei electrice aflate în regim de generator poate fi descarcată pe rezistențe pentru condiționarea aerului în vagoanele de călători remorcate, poate fi introdusă în LC și consumată de către locomotivele electrice aflate în regim de tracțiune pe tronsoanele adiacente de cale ferată sau poate fi întoarsă în substația de tracțiune electrică în regim contorizat unde va fi stocată și folosită pentru alimentarea serviciilor auxiliare.

4.3.3 Optimizarea consumului de energie electrică cu ajutorul SCADA

Procesul de optimizare a consumului de energie electrică necesar tracțiunii electrice feroviare prin sistemul SCADA cuprinde monitorizarea în regim permanent pe fiecare STE a consumul prognozat/realizat pe ore/zile/luni, crearea și trimiterea unor prognoze de consum cât mai exacte furnizorului pentru perioadele următoare bazate pe analiza valorilor de consum real înregistrate anterior (Fratu M. et al.2005). În figura 27 este reprezentată schema bloc de telegestiune a STE-urilor prin sistemul SCADA (Mandic et al.2011).

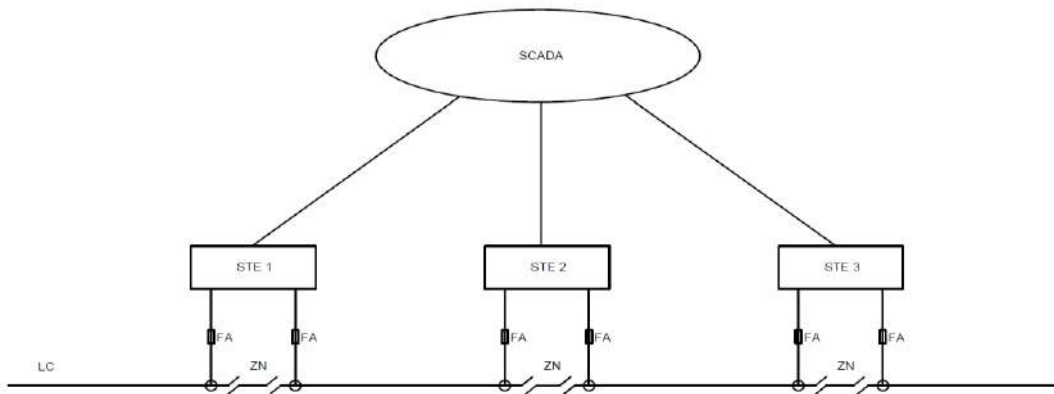


Figura 27. Schema bloc de telegestiune prin SCADA a STE-urilor

4.4 Aplicații SCADA pentru monitorizarea consumului de energie electrică în timp real

Sistemele SCADA pot efectua achiziția de date de la distanță, inclusiv datele care rezultă din monitorizarea consumului și a parametrilor energiei electrice (Gurban E. et al.2011). Funcția de achiziție de date va fi asigurată cu ajutorul unor echipamente de contorizare și monitorizare (contoare) care vor fi instalate la nivelul rețelei de distribuție (în stațiile de tracțiune) și la consumator (pe locomotivele electrice). Cerința principală este ca aceste echipamente să poată fi conectate digital la RTU sau analog, prin intermediul unui convertor analog-digital.

Schema de conectare a contorului Siemens SENTRON PAC3100 la consumator pe locomotivele electrice este reprezentată în figura 28.

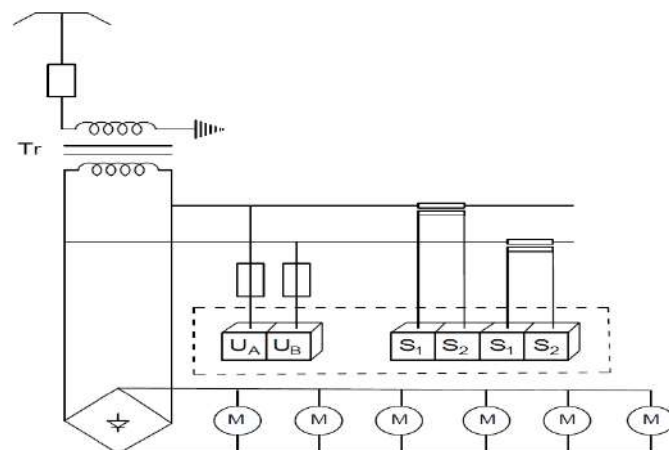


Figura 28. Schema de conectare a dispozitivului Sentron PAC 3100 la consumator

Pentru realizarea sistemului de telegestiune în substațiile de tracțiune electrică s-au instalat contoare Sentron PAC 3100 și automate programabile PLC model XBC-DR32H produse de firma SIEMENS.

În figura 29 este reprezentată structura sistemului de telegestiune și telecontrol pentru substațiile de tracțiune electrică.

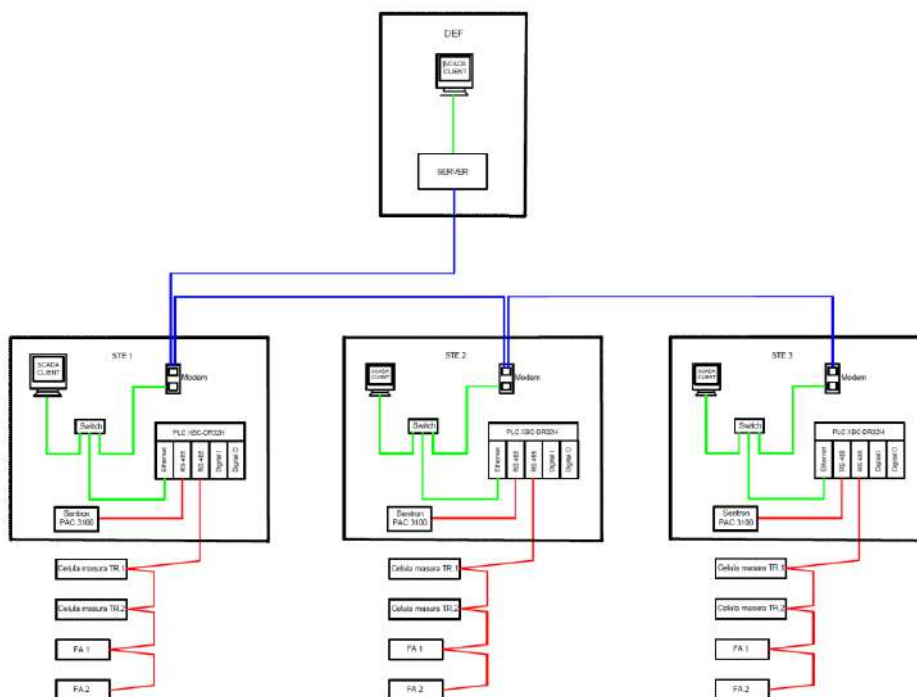


Figura 29. Structura sistemului de telegestiune implementat în STE-uri

Protocolul de comunicație pentru controlul PLC-urilor este Modbus RTU, este de tip master-slave, fapt ce permite conectarea în rețea a mai multor echipamente.

4.5 Studiu de caz pe tronsonul de cale ferată electrificată Brașov-Predeal

Obiectivele acestui studiu de caz sunt evaluarea parametrilor energiei electrice furnizată sistemului de tracțiune electric feroviar și estimarea necesarului de putere activă și reactivă pentru un tronson de cale ferată cu particularități deosebite.

Schema de alimentare cu energie electrică a tronsonului de cale ferată analizat este reprezentată în figura 30.

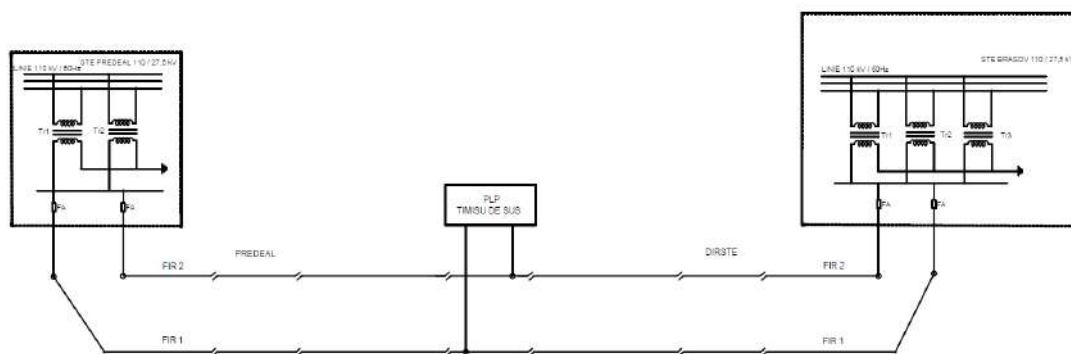


Figura 30. Schema de alimentare cu energie electrică a tronsonului de cale ferată Brașov – Predeal

Pentru realizarea acestui studiu s-au montat în cele două STE-uri în celula de măsură contoare de energie ALFA POWER PLUS (A1RLQ+) produse de firma Elster. În figura 31 este prezentat contorul Alpha Plus Meter:

ALPHA Plus® Meter



Figura 31. Contorul Alpha Plus Meter

Tabelul V arhivează valori pentru următorii parametri electrici:

- tensiunea pe fază și curentul pe fază;
- tensiunea pe fază și unghiurile de fază ale curentului de fază (măsurat la tensiunea de fază A);
- unghiul de fază al curentului măsurat pe fiecare fază;
- factorul de putere pe fază și unghiul factorului de putere;
- puterea aparentă, activă și reactivă pe fază (kW, kVAR și kVA);
- distorsiunea armonică totală pe fază atât pentru tensiune cât și pentru curent;
- frecvența sistemului.

Tabelul V. Înregistrarea valorilor monitorizate în STE Braşov

STE Braşov_Trafo1_110kV (V1+L_100.00 CT460.00)																							
Data/ora	Curentul pe faza R (A)	Curentul pe faza T (A)	Distorţione la armonice a curentului de pe faza R (%)	Distorţione la armonice a curentului de pe faza T (%)	Distorţione la armonice a tensiunii de pe faza R (%)	Distorţione la armonice a tensiunii de pe faza T (%)	Factor de putere total	Factorul de putere pe faza R	Factorul de putere pe faza T	Frecvenţa sistem [Hz]	Puterea activă pe faza R (kVA)	Puterea activă pe faza T (kVA)	Puterea reactivă pe faza R (kVAR)	Puterea reactivă pe faza T (kVAR)	Tensiunea pe faza R (kV)	Tensiunea pe faza T (kV)	Unghiul curentului pe faza R (grade)	Unghiul curentului pe faza T (grade)	Unghiul factorului de putere pe faza R (grade)	Unghiul factorului de putere pe faza T (grade)	Unghiul tensiunii pe faza R (grade)	Unghiul tensiunii pe faza T (grade)	
01.08.2021 00:00:00	80,32	0,02	3,43	0	1,47	0	0,88	0,80	1	50	7.325,18	0	5,493,89	0	114	114	36,870	60	36,9	36,870	0	0	60
01.08.2021 01:00:00	90,26	0,02	4,94	0	1,43	0	0,82	0,82	1	50	8.437,50	0	5.889,41	0	114	114	34,915	60	34,9	34,915	0	0	60
01.08.2021 02:00:00	69,19	0,02	5,74	0	1,55	0	0,88	0,88	1	50	6.932,11	0	3.741,56	0	114	114	28,358	60	28,4	28,358	0	0	60
01.08.2021 03:00:00	32,16	0,02	3,06	0	1,41	0	0,65	0,65	1	50	2.362,15	0	2.761,66	0	113	113	49,439	60	49,5	49,439	0	0	60
01.08.2021 04:00:00	20,58	0,02	2,54	0	1,67	0	0,60	0,60	1	50	1.402,20	0	1.869,60	0	114	114	53,130	60	53,1	53,130	0	0	60
01.08.2021 05:00:00	14,62	0,03	2,38	0	1,50	0	0,72	0,72	1	50	2.841,61	0	2.738,89	0	114	114	43,946	60	43,9	43,946	0	0	60
01.08.2021 06:00:00	90,18	0,03	2,36	0	1,53	0	0,80	0,80	1	50	8.745,04	0	6.104,78	0	113	113	36,870	60	36,9	36,870	0	0	60
01.08.2021 07:00:00	80,99	0,03	2,70	0	1,34	0	0,84	0,84	1	50	7.746,98	0	5.004,08	0	114	114	32,960	60	32,9	32,960	0	0	60
01.08.2021 08:00:00	90,32	0,02	2,38	0	1,47	0	0,84	0,84	1	50	8.497,31	0	5.489,72	0	112	112	32,960	60	32,9	32,960	0	0	60
01.08.2021 09:00:00	70,28	0,03	2,70	0	1,34	0	0,78	0,78	1	50	6.139,96	0	4.923,74	0	112	112	38,739	60	38,7	38,739	0	0	60
01.08.2021 10:00:00	56,69	0,02	2,45	0	1,57	0	0,78	0,78	1	50	4.944,58	0	3.964,94	0	112	112	38,739	60	38,7	38,739	0	0	60

STE Braşov_Trafo1_27.5kV						
Data/ora	Curentul (A)	Tensiunea (kV)	Factorul de putere	Frecvenţa [Hz]	Puterea activă (kVA)	Puterea reactivă (kVAR)
01.08.2021 00:00:00	317,264	28,50	0,80	50	7.233,62	5.425,21
01.08.2021 01:00:00	352,014	28,50	0,82	50	8.226,57	5.742,18
01.08.2021 02:00:00	269,49	28,50	0,88	50	6.758,81	3.648,02
01.08.2021 03:00:00	125,424	28,25	0,65	50	2.303,10	2.692,62
01.08.2021 04:00:00	79,95	28,50	0,60	50	1.367,15	1.822,86
01.08.2021 05:00:00	135,018	28,50	0,72	50	2.770,57	2.670,42
01.08.2021 06:00:00	351,39	28,25	0,80	50	7.941,41	5.956,06

STE Braşov_Fider1_27.5kV						STE Braşov_Fider2_27.5kV							
Data/ora	Curentul (A)	Tensiunea (kV)	Factorul de putere	Frecvenţa [Hz]	Puterea activă (kVA)	Puterea reactivă (kVAR)	Data/ora	Curentul (A)	Tensiunea (kV)	Factorul de putere	Frecvenţa [Hz]	Puterea activă (kVA)	Puterea reactivă (kVAR)
01.08.2021 00:00:00	79,316	28,50	0,80	50	1.808,40	1.356,30	01.08.2021 00:00:00	211,51	28,12	0,80	50	4.758,11	3.568,59
01.08.2021 01:00:00	88,004	28,50	0,82	50	2.056,64	1.435,54	01.08.2021 01:00:00	234,68	28,29	0,82	50	5.443,97	3.799,91
01.08.2021 02:00:00	67,373	28,50	0,88	50	1.689,70	912,00	01.08.2021 02:00:00	179,66	28,14	0,88	50	4.448,96	2.401,29
01.08.2021 03:00:00	31,356	28,25	0,65	50	575,77	673,16	01.08.2021 03:00:00	83,62	27,88	0,65	50	1.515,29	1.771,57
01.08.2021 04:00:00	19,988	28,50	0,60	50	341,79	455,72	01.08.2021 04:00:00	53,30	28,27	0,60	50	904,07	1.205,43
01.08.2021 05:00:00	33,755	28,50	0,72	50	692,64	667,61	01.08.2021 05:00:00	90,01	28,02	0,72	50	1.815,94	1.750,30
01.08.2021 06:00:00	87,848	28,25	0,80	50	1.985,35	1.489,02	01.08.2021 06:00:00	234,26	28,05	0,80	50	5.256,79	3.942,60
01.08.2021 07:00:00	78,878	28,50	0,84	50	1.888,33	1.219,74	01.08.2021 07:00:00	210,34	28,09	0,84	50	4.963,10	3.205,84

În figura 32 este reprezentată curba de sarcină lunară pentru energia activă și reactivă înregistrată pe transformatorul de 16MVA.

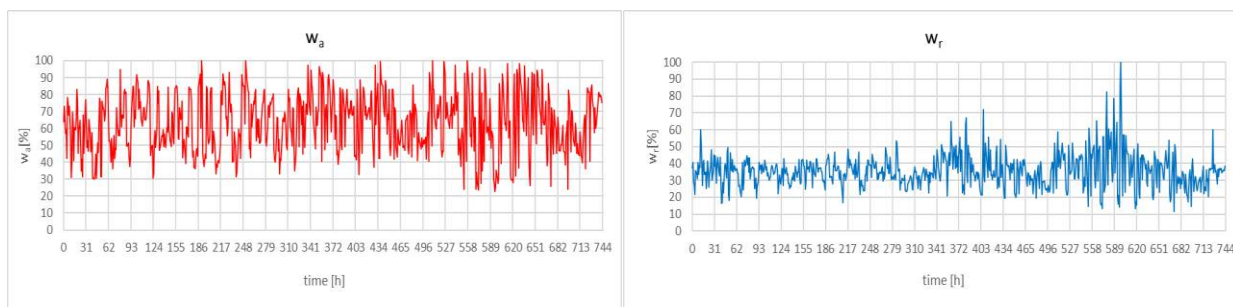


Figura 32. Curba de sarcină pentru 31 zile: a) energie activă; b) energie reactivă

Studiul de caz a oferit informații suplimentare echipei de proiectare pentru dezvoltarea soluțiilor optime de asigurare a parametrilor de energie electrică furnizați sistemului de tracțiune electric feroviar.

4.6 Concluzii

Dezvoltarea soluțiilor de optimizare a consumului de energie electrică pentru sistemul de tracțiune electric feroviar a demonstrat că, prin aplicarea metodei de optimizare a punctului interior se obține o economie de consum de energie electrică cu aproximativ 2,375% față de metoda clasică de optimizare. Dezvoltarea și implementarea rețelelor inteligente capabile să gestioneze energia electrică produsă prin frânarea regenerativă pe locomotivele electrice oferă o soluție suplimentară de eficientizare a consumului de energie electrică pentru STEF.

5. CONTROLUL FUNCȚIONĂRII ÎN PARALEL A TRANSFORMATORILOR DE PUTERE DIN SUBSTAȚIILE DE TRACȚIUNE ELECTRICĂ

5.1 Necesitatea funcționării în paralel a transformatoarelor

Pentru menținerea parametrilor energiei electrice livrați în linia de contact prin fiderii de alimentare, atunci când sarcina pe transformatorul aflat în funcție atinge limita maximă de funcționare este necesară cuplarea transformatorilor aflați în rezervă în substațiile de tracțiune electrică sau din substații adiacente și închiderea zonelor neutre (ZN) din posturile de secționare. În figura 33 este reprezentată schema de conectare în paralel a substațiilor de tracțiune electrică (Keenor G.2016).

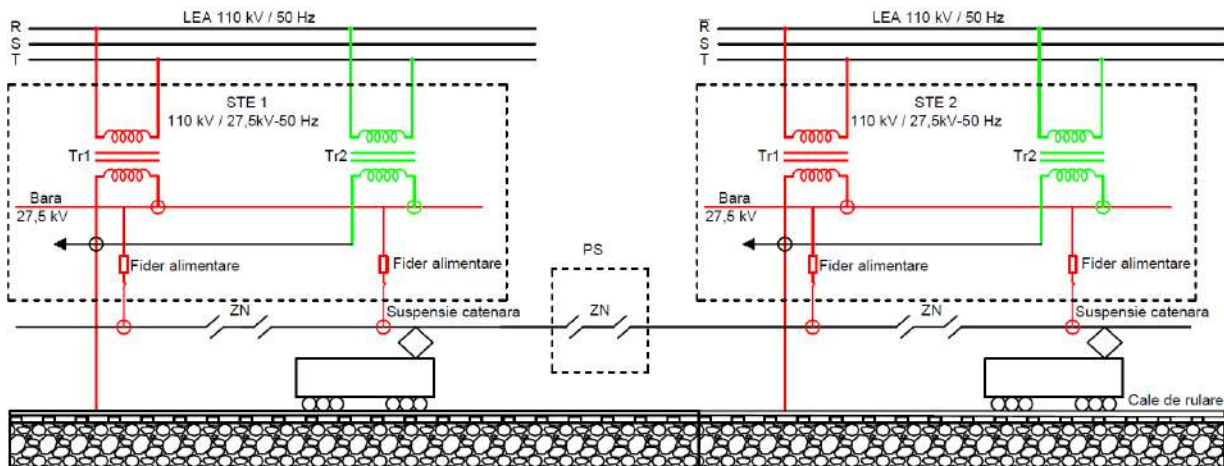


Figura 33. Schema de conectare în paralel a STE-urilor

Deoarece funcționarea în regim permanent a transformatorilor de putere cuplați în paralel prezintă mai multe dezavantaje ca de exemplu: crește nejustificat puterea de scurtcircuit pe tronson cu impact în cazul unui defect cu punere la pământ, crește consumul de energie pe transformatori din cauza funcționării într-un regim defectuos (permanent subîncărcați) este necesar ca sistemele SCADA implementate în STE-uri să controleze automat în funcție de consumul real cuplarea și decuplarea din paralel a transformatorilor de putere din STE-uri și din STE-urile adiacente.

5.2 Condiții de cuplare în paralel a transformatoarelor

Pentru buna funcționare în paralel a transformatorilor trebuie respectate următoarele condiții:

- Raportul de tensiune al tuturor transformatoarelor conectate trebuie să fie același;

$$K = \frac{U_{1T1}}{U_{2T1}} = \frac{U_{1T2}}{U_{2T2}} \quad (16)$$

- Curenții secundari să fie proporționali cu curenții nominali;

$$\frac{I_{1T1}}{I_{1T2}} = \frac{Z_{scT1}}{Z_{scT2}} = \frac{I_{2T1}}{I_{2T2}} \quad (17)$$

- Polaritatea tuturor transformatoarelor conectate trebuie să fie aceeași pentru a evita curenții circulanți în transformatoare.

$$U_{1T1} = U_{1T2} \quad (18)$$

- Secvența de fază identică, curenții înfășurărilor secundare vor fi în fază și vor fi însumați algebric. Dacă secvențele de fază nu sunt aceleași, atunci transformatoarele nu pot fi conectate în paralel.

$$\varphi_{T1} = \varphi_{T2} \quad (19)$$

$$I_s = I_{2T1} + I_{2T2} \quad (20)$$

- Impedanțele de scurtcircuit ar trebui să fie aproximativ egale (deoarece este dificil să obții practic impedanțe identice).

$$U_{T1} - U_{T2} = Z_{scT1} * I_{1T1} - Z_{scT2} * I_{1T2} \quad (21)$$

De asemenea, se recomandă ca puterile nominale ale transformatoarelor să nu difere mult între ele.

5.3 Algoritm pentru cuplarea în paralel a transformatorilor de putere din STE-uri

Algoritmul de cuplare în paralel a transformatorilor de putere urmărește evitarea apariției curenților de egalizare pe secundarul transformatorilor cuplați în paralel, curenți care vor fi reflectați în partea primară chiar și în lipsa sarcinii, precum și funcționarea lor într-un regim optim când sunt în sarcină.

Algoritmul cuprinde parcurgerea următoarelor etape:

- determinarea parametrilor de funcționarea ai transformatorilor.
- determinări experimentale pentru funcționarea în paralel a transformatorilor de putere.

Pentru punerea în funcțiune a transformatorilor de putere s-au făcut determinări experimentale ale caracteristicilor electrice pentru fiecare echipament aflat în stare rece. Rezultatele sunt prezentate în Tabelul VI.

Tabelul VI. Parametrii electrice măsurati pentru transformatorii de putere T1 si T2

Transformator 1- 110/27,5kV 16MVA										Δk%	Transformator 2- 110/27,5kV 16MVA									
Pozitie CP	U primar [V]	U secundar [V]	Kr calculat	I _p [A]	I _s [A]	R masurat [Ω]	Dif.Rm si Rf.	tg δ			Pozitie CP	U primar [V]	U secundar [V]	Kr calculat	I _p [A]	I _s [A]	R masurat [Ω]	Dif.Rm si Rf.	tg δ	
1	127622	33664,47	3,791	125,4	475,39	1,402	0,7		0	1	127622	33664,47	3,791	125,4	475,39	1,401	0,7			
2	125664	32623,05	3,852	127,3	490,36	1,371	0,7		0	2	125664	32623,05	3,852	127,3	490,36	1,372	0,7			
3	123706	31614,11	3,913	129,6	507,12	1,341	0,7		0	3	123706	31614,11	3,913	129,6	507,12	1,342	0,7			
4	121748	30620,72	3,976	131,4	522,45	1,311	0,7		0	4	121748	30620,72	3,976	131,4	522,45	1,312	0,7			
5	119790	29643,65	4,041	133,6	539,88	1,281	0,7		0	5	119790	29643,65	4,041	133,6	539,88	1,283	0,7			
6	117832	28683,54	4,108	135,8	557,87	1,25	0,7		0	6	117832	28683,54	4,108	135,8	557,87	1,248	0,7			
7	115874	27734,32	4,178	138,1	576,98	1,22	0,7		0	7	115874	27734,32	4,178	138,1	576,98	1,23	0,7			
8	113916	26803,76	4,25	140,5	597,13	1,19	0,7		0	8	113916	26803,76	4,25	140,5	597,13	1,19	0,7			
9	111958	25892,23	4,324	142,9	617,90	1,16	0,7		0	9	111958	25892,23	4,324	142,9	617,90	1,16	0,7			
10	110000	25000,00	4,400	145,5	640,20	1,128	0,7		0	10	110000	25000,00	4,400	145,5	640,20	1,128	0,7			
11	108042	23771,62	4,545	148,1	673,11	1,134	0,5	0,181	0	11	108042	23771,62	4,545	148,1	673,11	1,134	0,5		0,183	
12	106084	22927,17	4,627	150,8	697,75	1,104	0,5		0	12	106084	22927,17	4,627	150,8	697,75	1,104	0,5			
13	104126	22093,36	4,713	153,7	724,39	1,073	0,5		0	13	104126	22093,36	4,713	153,7	724,39	1,073	0,5			
14	102168	21280,57	4,801	156,6	751,84	1,043	0,5		0	14	102168	21280,57	4,801	156,6	751,84	1,043	0,5			
15	100210	20480,28	4,893	159,7	781,41	1,013	0,5		0	15	100210	20480,28	4,893	159,7	781,41	1,013	0,5			
16	98252	19693,73	4,989	162,8	812,21	0,983	0,5		0	16	98252	19693,73	4,989	162,8	812,21	0,983	0,5			
17	96294	18925,71	5,088	166,2	845,63	0,952	0,5		0	17	96294	18925,71	5,088	166,2	845,63	0,952	0,5			
18	94336	18169,49	5,192	169,6	880,56	0,922	0,5		0	18	94336	18169,49	5,192	169,6	880,56	0,923	0,5			
19	92378	17423,24	5,302	173,2	918,31	0,892	0,5		0	19	92378	17423,24	5,302	173,2	918,31	0,893	0,5			

Din tabelul de mai sus trebuie verificată îndeplinirea următoarelor condiții pentru punerea în funcțiune a transformatorilor de putere:

- capacitatea de izolație a înfășurărilor tg δ la punere în funcțiune trebuie sa fie ≤ 0,75%
- rezistența ohmică a înfășurărilor în curent continuu, R_{masurat} nu trebuie să difere cu mai mult de ±2% față de rezistența măsurată din fabrică la aceeași temperatură;

- diferența dintre rapoartele de transformare a celor două transformatoare calculată cu formula:

$$\Delta k\% = \frac{k_{T1} - k_{T2}}{\sqrt{k_{T1} * k_{T2}}} * 100\%, \quad (22)$$

să nu depășească 0,5% din valoarea medie geometrică a acestor rapoarte.

În concluzie, funcționarea optimă a transformatorilor după cuplarea lor în paralel are loc atunci când:

- tensiunile de scurtcircuit sunt egale sub aspectul modulului și al fazei;
- transformatorii sunt identici sau de puteri apropiate.

5.4 Protecția transformatoarelor de putere din substațiile de tracțiune electrică

Pentru protejarea transformatoarelor de putere împotriva defectelor apărute în interiorul lor sau la instalațiile adiacente, este necesară supravegherea funcționării lor prin următoarele protecții:

a) Protecția de gaze:

Este protecția de bază a transformatorilor împotriva defectelor interne, este realizată cu ajutorul releului de gaze Bucholtz care poate fi cu unul sau două flotoare.

Avantajele acestei protecții sunt simplitatea, sensibilitatea precum și posibilitatea de a comanda semnalizarea sau declanșarea în funcție de caracterul defectelor. În ambele situații proba gazelor constituie un indiciu al defectului din transformator, prin culoarea și inflamabilitatea lor.

b) Protecția de cuvă:

Protejează transformatorii de putere împotriva scurtcircuitelor care provoacă distrugerea izolației față de masă (cuvă sau miezul transformatorului).

Eficacitatea protecției contra scurtcircuitelor cu punere la pământ depinde de felul cum sunt rezolvate două probleme: izolarea cuvei față de pământ și alegerea transformatorului și a releului de curent (Moraru G.2001)

c) Protecția la suprasarcină:

Este o automatizare cu rol preventiv pe partea de 110 kV –realizată cu ajutorul unui releu maximal de curent, un releu de timp și un releu intermediar de comandă, care transmite un semnal optic și acustic la depășirea pragului de sarcină admis pe transformator.

d) Protecția maximală de curent cu blocaj la minimă tensiune

Acționează la o creștere a curentului în elementul protejat peste valoarea stabilită concomitent cu scăderea tensiunii sub pragul de reglaj. Folosirea blocajului la minimă tensiune oferă posibilitatea de a diferenția creșterile de curent datorate sarcinii de creșterile de curent datorate scurtcircuitelor.

e) Protecția diferențială

Are rol de protecție împotriva scurtcircuitelor interne sau la bornele transformatorului, din acest motiv poate fi considerată o completare a protecției de gaze, este bazată pe principiul comparării valorii și a sensului curenților pe faze, la atingerea pragului de acționare protecția comandă declanșarea întrerupătorilor din primarul și secundarul transformatorului.

Protecția diferențială acționează la apariția unor diferențe între curenții de la cele două capete ale zonei protejate.

5.5 Soluții moderne de diagnoză și protecție a transformatorilor de putere din substațiile de tracțiune electrică

Realizarea unui sistem de diagnoză și protecție modern presupune parcurgerea următoarelor etape:

- dezvoltarea sistemului de monitorizare;
- digitalizarea echipamentelor de monitorizare, protecție și control;
- configurarea sistemului de diagnosticare și setare a protecțiilor.

A) Dezvoltarea sistemului de monitorizare presupune stabilirea parametrilor ce trebuie colectați și înregistrați pentru sistemul de diagnosticare al funcționării transformatorului precum și pentru sistemul de telegestiune a energiei.

B) Digitalizarea echipamentelor de monitorizare și protecție.

Pentru monitorizarea sistemului de protecție și control s-au ales echipamentele MICOM P638, SEPAM T80 și TAPCOM 230.

Releul MICOM P638 are inclusă protecția diferențială specifică aplicațiilor de căi ferate care acoperă ca zonă celulele de 110kV și 27,5kV, cablurile de legătură pe partea primară și secundară a transformatorului de putere, inclusiv transformatorul de servicii interne.

Releul SEPAM T80 supraveghează următoarele funcții:

- protecția de gaze (releul Bucholtz);
- supratemperatura uleiului din transformator, în comutatorul de ploturi și conservator;
- temperatura din înfășurările transformatorului de putere - avertizare/declanșare;
- nivel minim de ulei – avertizare;
- presiune mărită în comutatorul de ploturi – declanșare.

Releele TAPCON 230 monitorizează nivelul tensiunii pe fiderii de alimentare și controlul automat pentru funcționarea în paralel a transformatorilor de putere;

Releul compară tensiunea livrată de către transformatorul de putere fiderilor de alimentare cu tensiunea de referință setată. Abaterile sunt ajustate în mod automat prin comutarea sub sarcină a comutatorului de ploturi pe poziția necesară menținerii nivelului de tensiune în parametri reglați.

C) Configurarea sistemului de diagnosticare și reglare a protecțiilor

Pentru configurarea sistemului de diagnosticare este necesară parcurgerea următoarelor etape:

- parametrizarea releelor descrise anterior;
- monitorizarea proceselor complexe (ex: analiza gazelor, descărcările parțiale, etc.);
- realizarea protocoalelor de comunicație dintre rele și între rele și sistemul superior de control SCADA.

5.6 Automatizarea funcționării în paralel a transformatorilor de putere din STE-uri utilizând sistemul SCADA

Pentru automatizarea funcționării în paralel a transformatorilor de putere se propune implementarea în substațiile de tracțiune electrică și în posturile de secționare a releului TAPCOM 230.

Implementarea acestui releu asigură următoarele funcții:

- se asigură reglajul automat al nivelului de tensiune livrat de către secundarul transformatorilor de putere sistemului de tracțiune electric feroviar;
- se asigură fluxul de putere suplimentar înregistrat pe tronsoanele de cale ferată pentru anumite intervale de timp.

Releul TAPCOM 230 poate asigura fluxul de putere suplimentar înregistrat pe tronsoanele de cale ferată prin următoarele moduri:

- conectarea întrerupătorilor Q_2 și Q_4 ai transformatorului T2 aflat în rezervă;
- conectarea întrerupătorului Q_{PS} din postul de secționare.

În figura 34 este descrisă schema de monitorizare a substațiilor de tracțiune electrică și a postului de secționare cu ajutorul releelor TAPCOM 230.

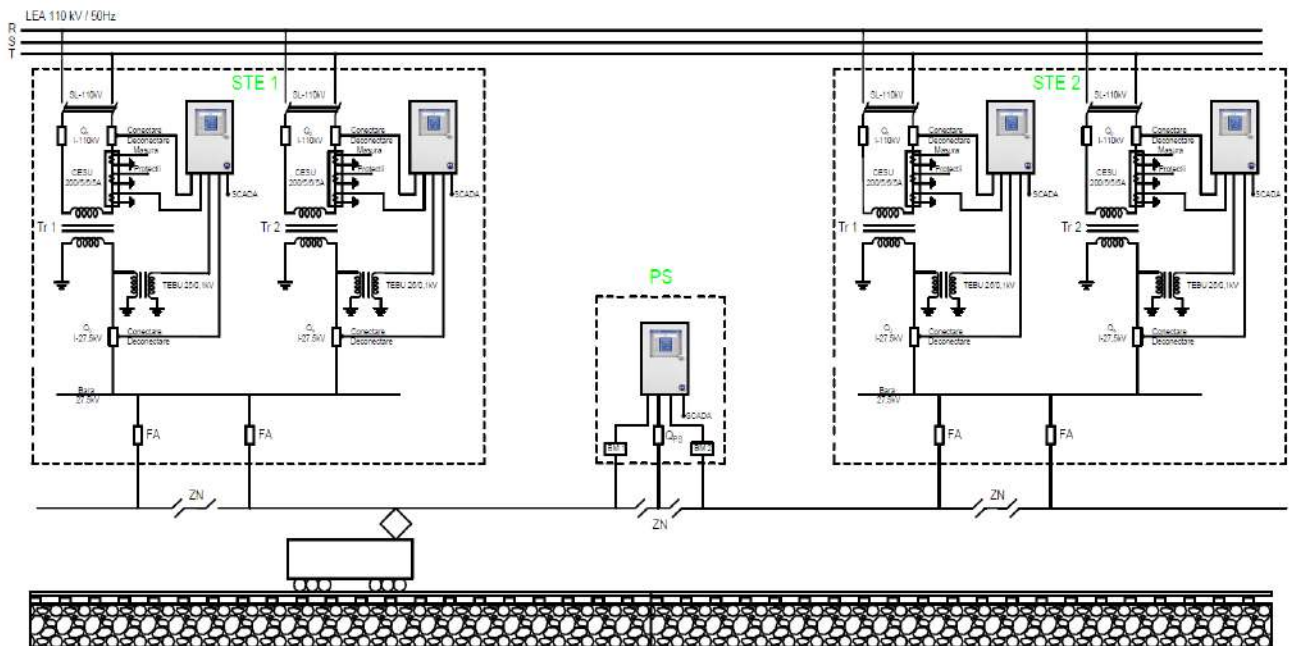


Figura 34. Schema de monitorizare a substațiilor de tracțiune electrică și a postului de secționare cu ajutorul releelor TAPCOM 230

Dezvoltarea programului pentru controlul releelor TAPCOM 230 și integrarea lor în interfața sistemului SCADA se realizează folosind limbajul Visual C++ oferit de către programul Visual Studio. Schema logică din figura 35 descrie principiul de funcționare a programului creat pentru monitorizarea nivelului de tensiune și automatizarea funcționării în paralel a transformatorilor de putere.

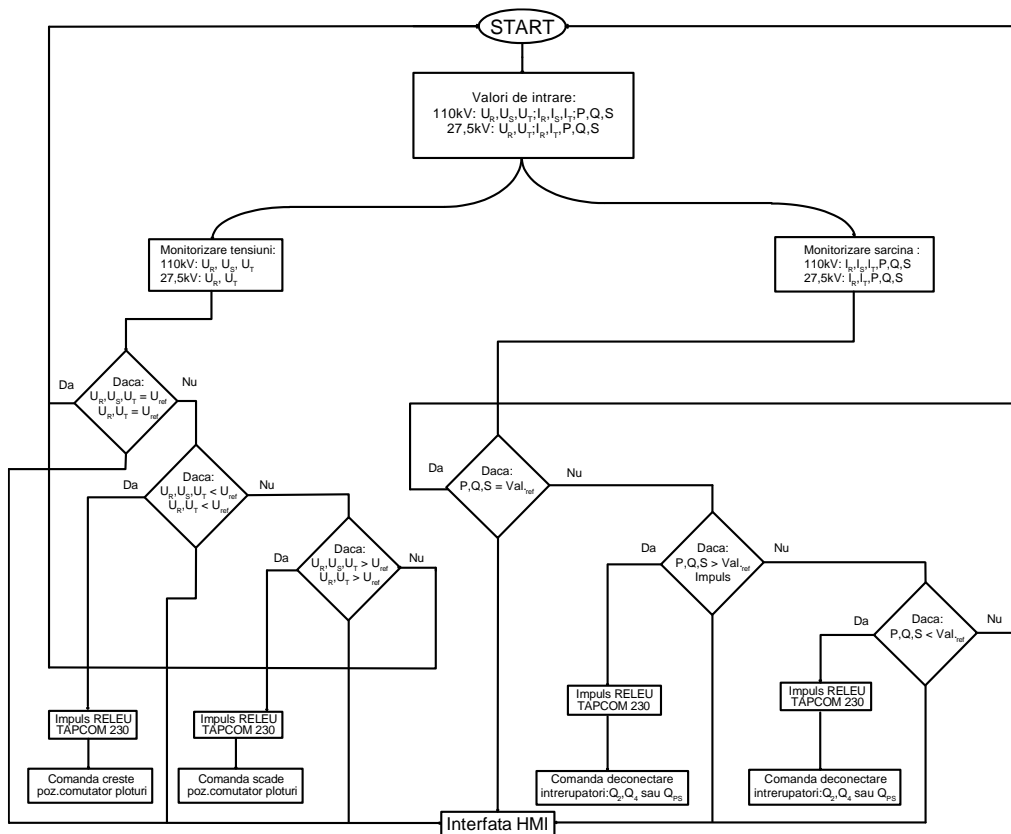


Figura 35. Schema logică de control pentru releul TAPCOM 230

Codul dezvoltat și prezentat integral în Anexa 4 creează un sistem de tip SCADA care asigură:

- monitorizarea și reglarea automată a nivelului de tensiune pe fiderii de alimentare;
- automatizarea funcționării în paralel a transformatorilor de putere din STE-uri.

Deoarece rularea programului s-a făcut fără erori, compilarea programului a generat executabilul Sinoptic.exe. La lansarea sistemului SCADA din executabilul Sinoptic.exe, se deschide interfața HMI din figura 36.

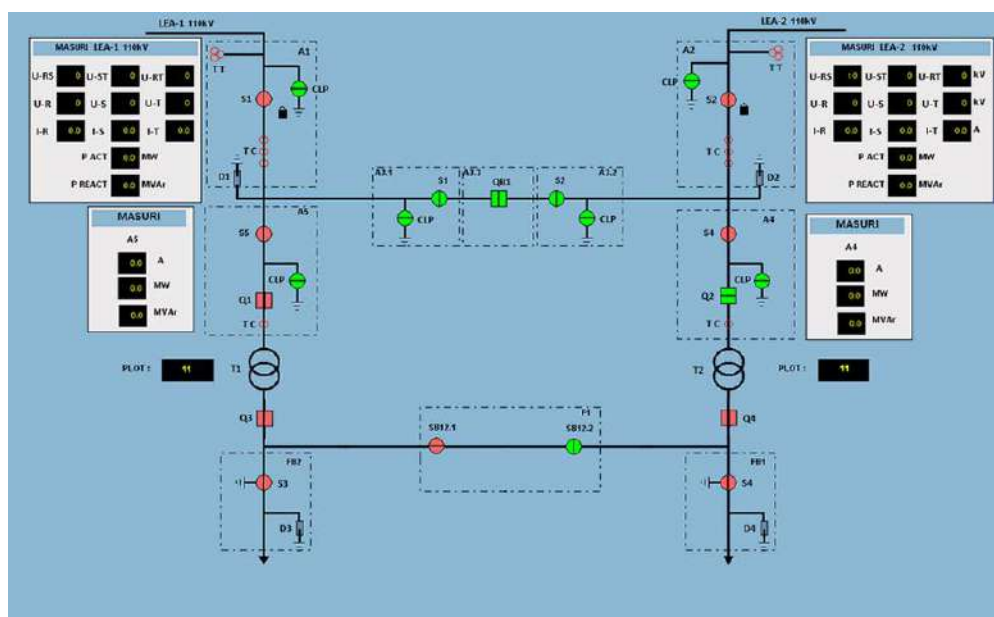


Figura 36. Interfața HMI proiectată în Visual C++ pentru controlul substațiilor de tracțiune electrică

La încărcarea interfeței HMI pe ecranul LCD sunt afișate echipamentele primare în schemă monofilară și parametrii de funcționare ai transformatorilor de putere (Setiawan A et al.2019).

5.7.Concluzii

Algoritmul de calcul dezvoltat în acest capitol verifică îndeplinirea condițiilor minime de cuplare în paralel a transformatorilor de putere, aduce următoarele beneficii:

- răspuns în timp real la solicitările apărute, ex: vârfuri de sarcină, defectări de echipamente;
- monitorizarea și controlul automat al echipamentelor;
- factor de putere bun și randament ridicat la funcționarea în paralel a transformatorilor de putere.

Determinările experimentale efectuate în STE Predeal au permis verificarea acestui algoritm, au facilitat dezvoltarea și implementarea unor soluții de optimizare a funcționării în paralel a transformatorilor de putere cu scopul de a eficientiza sistemul de tracțiune electric feroviar.

Dezvoltarea unui program în softul Visual C++ permite automatizarea funcționării în paralel a transformatorilor de putere, monitorizarea nivelului de tensiune livrat sistemului de tracțiune electric feroviar, precum și livrarea unui flux de putere suplimentar când acesta este solicitat.

Îmbunătățirea metodelor de monitorizare, diagnosticare și protecție a transformatorilor de putere constituie o temă de actualitate permanentă pentru cercetătorii acestui domeniu. Rezultatele obținute trebuie implementate pentru atingerea obiectivului urmărit și anume de mărire a duratei de viața a transformatorilor de putere instalați în substațiile de tracțiune electrice feroviare.

6. COMPENSAREA PUTERII REACTIVE ÎN SISTEMUL DE TRACȚIUNE ELECTRIC FERROVIAR, UTILIZÂND CARACTERISTICILE ÎN V ALE MAȘINII SINCRONE CONTROLATE DE SCADA

6.1. Introducere

România ca multe alte țări europene, a adoptat sistemul de tracțiune electric feroviar în curent alternativ monofazat de tensiune 27, 5kV și frecvență 50Hz. Energia electrică necesară funcționării STEF este furnizată de către transformatorii de putere ai substațiilor de tracțiune electrică dimensionați pentru o putere aparentă $S_n=16\text{MVA}$.

6.2. Necesitatea compensării factorului de putere în STEF

Tabelul VII descrie datele de consum și cost înregistrate în STE Predeal pe o perioadă de facturare de 31 zile.

Tabelul VII. Datele de consum înregistrate în STE Predeal pe perioada de facturare

State	Period	W_a [kWh]	W_r [kVAh]			Cost W_a [lei]	Cost W_r [lei]
			PF<0.65	0.65<PF<0.90	PF ≥ 0.90		
Normal day	02.07.2017 [24h]	134310.3	9680.00	94294.79	0.00	2770.82	6931.42
Maximum W_a	08.07.2017 [24h]	176644.26	0.00	73004.56	34858.11	3644.17	4102.86
Maximum W_r	25.07.2017 [24h]	146188.08	0.00	65647.47	77564.02	3015.86	3689.39
Month	31.07.2017 [744h]	5497071.04	26850.60	2121222.55	1138097.76	113404.58	123739.72

Folosind metodologia de calcul în vigoare la această dată (Ordinul ANRE nr.33.2014) pentru energia activă și cea reactivă au rezultat următoarele valori:

- energia activă consumată și facturată=113404,58 RON;
- energia reactivă facturată= 123739,72 RON.

În urma analizării costului energiei electrice consumată și facturată pe perioada studiată a rezultat că, pentru consumul a 549071,04kWh, costul de facturare a fost de 237144,3 RON, observându-se o dublare a prețului de cost pentru fiecare kWh de energie activă consumat de către STEF din cauza lipsei de compensare a energiei reactive consumată (Vitor A et al.2020).

6.3. Compensarea puterii reactive cu ajutorul mașinii sincrone

Mașina sincronă poate funcționa în regim de generator, motor, sau compensator sincron pentru producerea de putere reactivă. Regimul de funcționare al MS se poate schimba prin modificarea unghiului θ stabilit între tensiunea electromotoare indusă în înfășurarea statorică și tensiunea la bornele înfășurării statorice. Unghiul θ poate lua valori între 0 grade pentru funcționarea în gol și +/- 90 grade pentru sarcină maximă în regim de generator sau motor. Compensatoarele sincrone (CS) sunt motoare sincrone care funcționează în gol, construite special pentru a furniza numai putere reactivă, au rol asemănător cu bateriile de condensatoare dar cu avantajul că permit reglajul continuu al puterii reactive (A. E. ElGebaly et al.2019).

Puterea reactivă a CS se determină cu expresia:

$$Q=m*U*I*\sin\varphi; \quad (23)$$

unde m reprezintă numărul de faze al CS.

Folosirea MS în regim de compensator sincron de putere reactivă face posibilă introducerea sau absorbția de putere reactivă din sistem în funcție de curentul de excitație aplicat pe înfășurarea de excitație. Caracteristicile în "V" ale CS ne arată regimul de funcționare al mașinii sincrone în funcție de variația curentului de excitație.

Prin modificarea curentului de excitație obținem trei stări în care se poate afla CS la un moment dat:

- SUPRAEXCITAT-curentul I este capacitiv-CS introduce putere reactivă în sistem;
- OPTIM-curentul I este rezistiv-CS nu absoarbe/nu introduce putere reactivă în sistem;
- SUBEXCITAT- curentul I este inductiv-CS absoarbe putere reactivă din sistem.

În figura 37 curentul de excitație este determinat din caracteristica în V și caracteristica $\cos\varphi=f(I_{ex})$ a MS care funcționează în regim de compensator sincron.

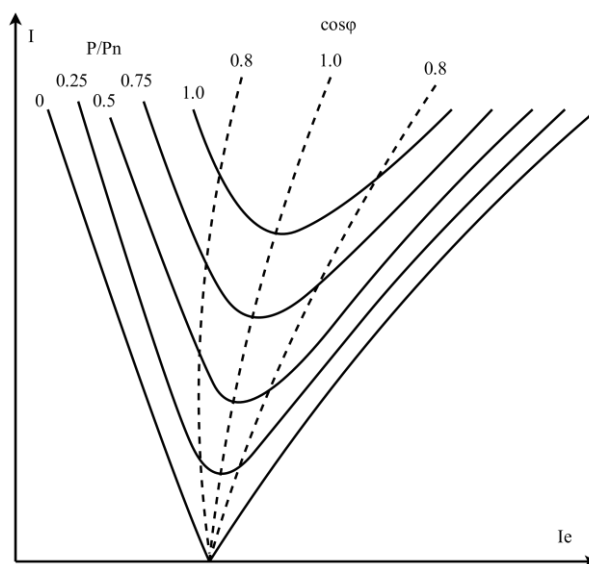


Figura 37. Caracteristicile în "V" ale compensatorului sincron

Caracteristicile în V ale CS sunt caracteristici de reglaj care ne indică în mod grafic dependența care se stabilește între curentul de sarcină I și curentul de excitație I_e la funcționarea CS în paralel cu sursa de alimentare a STEF.

6.4. Reacția indusului, diagrame de fazori

Abaterea câmpului magnetic de la forma sinusoidală ideală este cauzată de variația întrefierului și a fenomenului de reacție a indusului. Există trei tipuri de caracter al sarcinii: rezistiv, inductiv și capacitiv. Caracterul sarcinii influențează câmpul inductor al CS. În funcție de caracterul sarcinii, un defazaj se stabilește între axa câmpului magnetic inductor și cea a câmpului de reacție a indusului. Acest defazaj are capacitatea de a schimba forma câmpului rezultat (Maruthupandi P et al.2018).

6.5. Regimul de compensator sincron

În regimul de compensator sincron mașina sincronă îmbunătățește factorul de putere al rețelei, ea fiind capabilă să producă sau să absoarbă putere reactivă în funcție de necesitățile consumatorilor și de reglajul curentului de excitație (Paulo H.P.Silva et al.2018). Axul mașinii se învârtă în gol în acest regim de funcționare.

6.6. Sisteme de excitație ale motorului sincron monofazat

Sistemul de excitație pentru motorul sincron se alege în funcție de puterea mașinii și de condițiile de funcționare. Sistemul de excitație ales trebuie să realizeze o viteză mare de răspuns a motorului sincron la restabilirea parametrilor de funcționare ai rețelei.

Sisteme de excitație:

- cu mașina excitatoare, constă în montarea unui generator de curent continuu cu excitație separată sau derivație pe același ax al generatorului sincron;
- cu excitație statică prin punte redresoare monofazată. O fază a sistemului este redresată și aplicată periiilor rotorului;
- cu mașină excitatoare fără perii. Generatorul sincron este de construcție inversă, diodele sunt montate pe axul rotorului pe două discuri, legăturile redresorului cu înfășurările de excitație fiind fixe, se elimină sistemul de perii cu limitările sale.

Pentru a asigura o viteză mare de răspuns a MS la solicitările rețelei, sistemul de excitație ales se completează cu un sistem de reglaj automat care comandă curentul de excitație în funcție de mărimile de ieșire (putere, tensiune, curent, unghi intern) (Jerković Štil et al.2018).

6.7. Reglarea curentului de excitație

În figura 38 este reprezentată o schemă bloc de automatizare a controlului curentului de excitație.

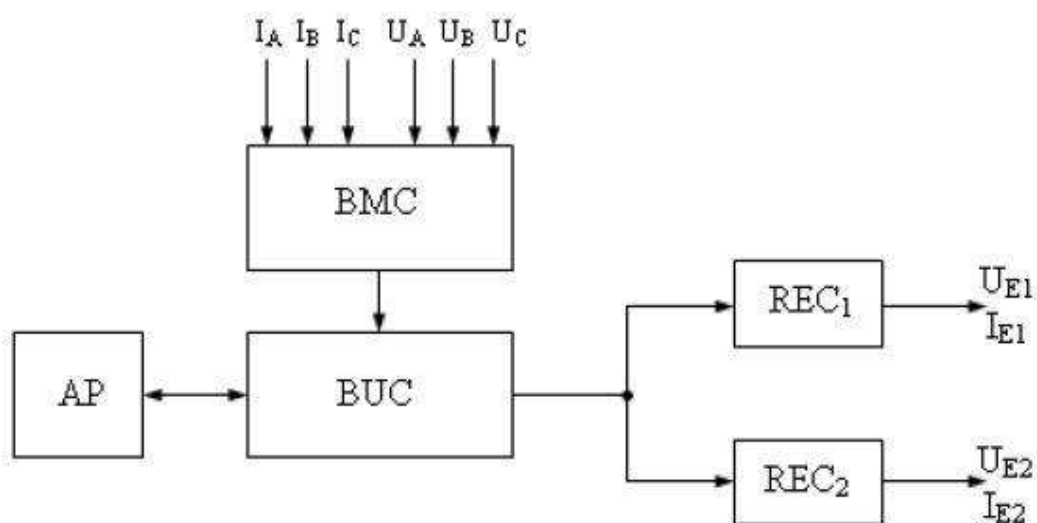


Figura 38. Schema bloc de automatizare a controlului curentului de excitație

BMC=bloc de măsură comun;

BUC=bloc de urmărire și control;

REC=redresor de alimentare a excitației;

AP=automat programabil.

Acest sistem este capabil să modifice curentul de excitație al MS pentru a menține factorul de putere din rețea la o valoare mai mare decât valoarea limită a factorului neutral (Sumina D. et al.2006).

6.8. Scheme efective cu microcontrolere pentru comanda circuitelor de excitație

În figura 39 este prezentată o schemă de comandă a circuitului de excitație pentru o mașină sincronă care funcționează în regim de compensator sincron pentru sistemul de tracțiune electric feroviar folosind microcontrolerul STM32F103x8 (Ranjan R et al.2017).

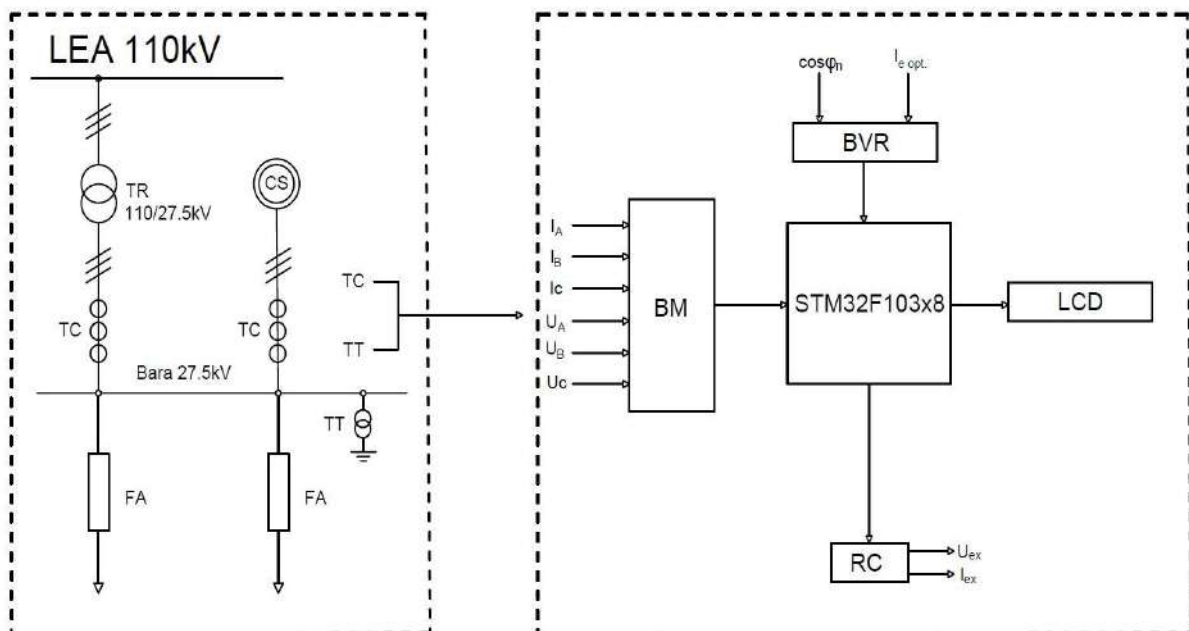


Figura 39. Schema electrică de control a CS cu microcontrolerul STM32F103X8

BVR-bloc valori de referință; BM-bloc de măsură; RC-redresor comandat.

Microcontrolerul STM32F103x8 calculează unghiul stabilit între tensiune și curent pe fiecare fază, îl compară cu valoarea unghiului nominal introdus în BVR iar dacă sunt diferențe MC ajustează valoarea tensiunii și a curentului de excitație livrat de redresorul comandat compensatorului sincron până se atinge condiția $\cos\varphi = \cos\varphi_n$.

Schema de control a compensatorului sincron cu microcontrolerul PSoC6.

În figura 40 este reprezentată schema de control a compensatorului sincron folosind microcontrolerul PSoC6 implementat în sistemul SCADA al unei substații de tracțiune electrică.

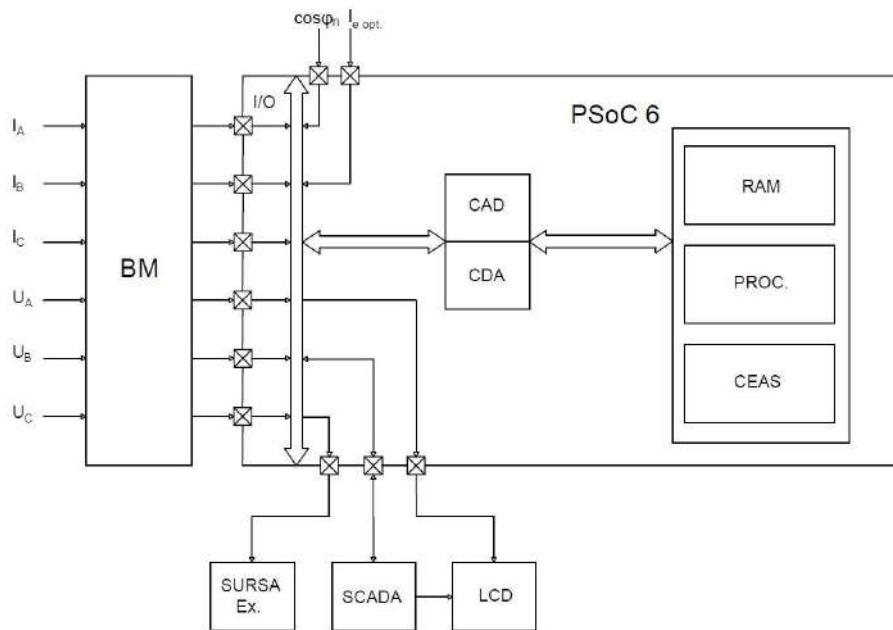


Figura 40. Schema electrică de control a CS cu microcontrolerul PSoC6 (Cypress.2021) .

Procesorul analizează valoarea curentă a factorului de putere, o compară cu valoarea factorului de putere neutral, iar dacă $\cos\varphi < \cos\varphi_n$ microcontrolerul crește valoarea curentului de excitație pe care sursa de alimentare a excitației îl livrează compensatorului sincron cu incrementul ΔI_e până când se realizează condiția $\cos\varphi = \cos\varphi_n$. Ciclul se încheie atunci când $\cos\varphi \geq \cos\varphi_n$.

6.9. Modelarea unghiului intern al compensatorului sincron în MATLAB/SIMULINK

Pentru modelarea unghiului intern al generatorului sincron cu poli înecați s-a ales un model de generator sincron existent în pachetul SimPowerSystems, parte a software-ului Matlab/Simulink reprezentat în figura 41 (Abdulhafed A.et al.2020).

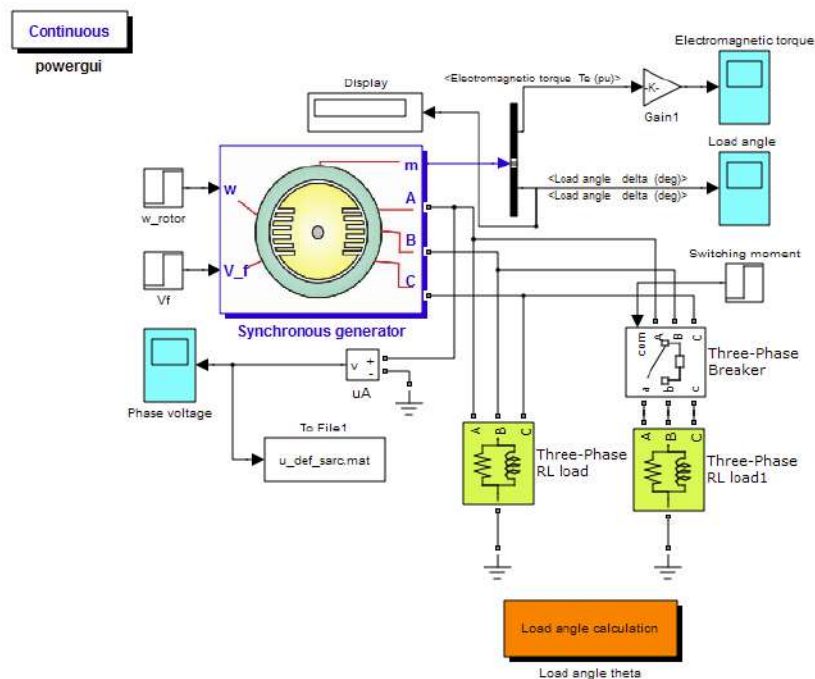


Figura 41. Modelarea unghiului intern al generatorul sincron

Pentru determinarea unghiului intern prin metoda propusă, se procedează astfel:

A) Se simulează funcționarea generatorului fără sarcină pe tot parcursul perioadei de simulare, prin setarea parametrilor blocului „Încărcare RL trifazată”. Rezultatele simulării (tensiunea de fază fără sarcină) sunt stocate în fișier

„u_def_gol.mat”.

B) Se simulează funcționarea generatorului în sarcină nominală pe tot parcursul perioadei de simulare prin setarea parametrilor blocului „Trifazat RL load1”. Rezultatele simulării (tensiunea de fază în sarcină nominală) sunt stocate în fișier

„u_def_sarc.mat”

C) După rularea simulării pentru cele două regimuri de funcționare, este apelată GUI făcând dublu clic pe blocul „Calculați unghiul intern”. Prin această operațiune procesul începe calcularea unghiului intern și prezentarea grafică în același sistem de coordonate a celor două tensiuni de fază: fără sarcină și pentru sarcină nominală.

Blocul „Calculați unghiul intern”, apelează fișierul script Matlab „unghi_intern.m”, a cărei structură este prezentată în anexa 3.

Prin folosirea acestei metode de calcul a unghiului intern obținem o valoare precisă a unghiului de defazare între tensiunea de fază fără sarcină u_{-gol} și tensiunea de fază sub sarcină u_{-sarc} într-un timp foarte scurt. Precizia și timpul scurt de calcul al acestei metode impun folosirea ei pentru modelarea unghiului intern de funcționare a generatorului sincron folosit pentru compensarea puterii reactive consumată de către STEF din substațiile de tracțiune electrice.

În figura 42 este reprezentată schema simplificată a platformei experimentale pentru modelarea unghiului intern a compensatorului sincron (Chen T at al.2016).

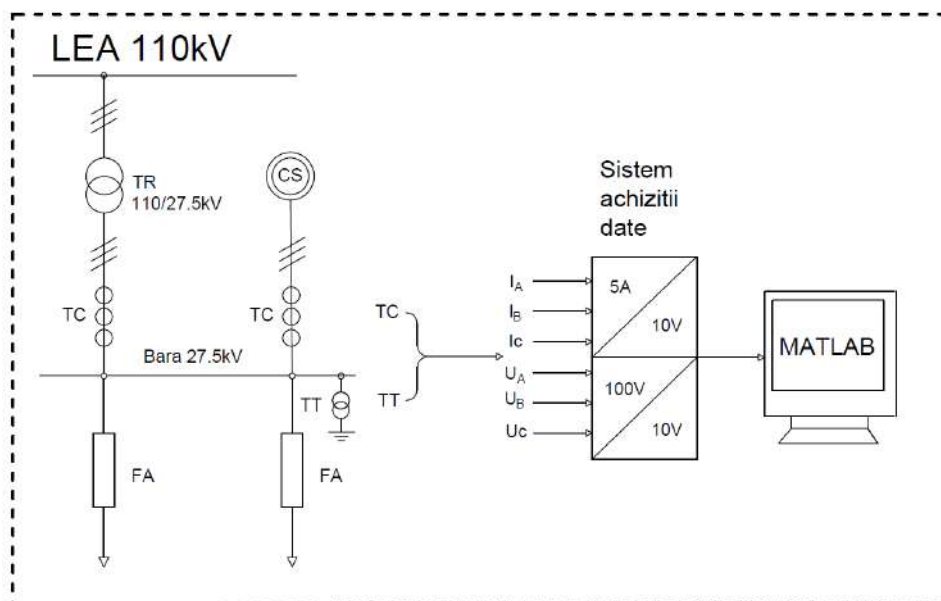


Figura 42. Schema simplificată a platformei experimentale pentru modelarea unghiului intern

Această structură permite vizualizarea formei de undă a curenților din stator, a cuplului electromagnetic dezvoltat de motorul sincron în regim de compensator, a curentului de excitație și a

vitezei de rotație. CS este în mod normal în regim optim de funcționare, pentru trecerea în alte regimuri de lucru (supra sau subexcitat) fiind utilizat un semnal treaptă la un cuplu rezistent foarte mic.

Caracteristica de funcționare a compensatorului sincron de a stabili tensiunea pe fiderii de alimentare ai STE se poate vedea din caracteristicile în V afișate în figura 43.

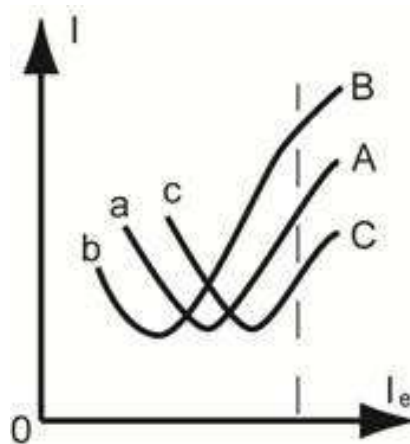


Figura 43. Caracteristica de funcționare a compensatorului sincron

Cele trei caracteristici reprezentate în figura de mai sus sunt:

a- nivel de tensiune nominal;

b- nivel de tensiune scăzut;

c- nivel de tensiune crescut.

6.10. Menținerea unghiului intern nului folosind sistemul SCADA

Schema logică din figura 44 (Biswas R. et al. 2015) descrie principiul de funcționare al sistemului SCADA pentru controlul compensatorului sincron.

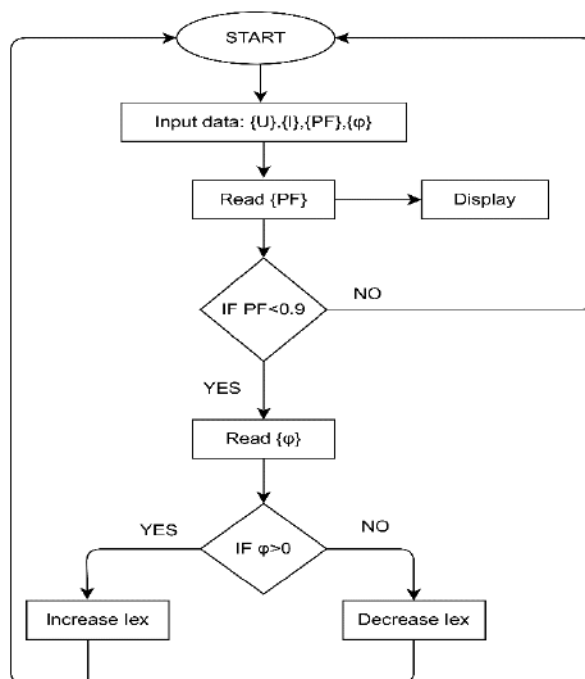


Figura 44. Schema logică de control a factorului de putere introdusă în sistemul SCADA

Implementarea monitorizării factorului de putere în sistemul SCADA care controlează substația de tracțiune electrică se face în limbajul Visual C++ cu ajutorul programului Visual Studio 2022.

La încheierea proiectului, programul Visual Studio generează executabilul SCADA.exe. Accesarea acestuia pornește sistemul SCADA cu controlul compensatorului sincron și a factorului de putere preluat, pe interfața HMI apar noile modificări de schemă și valorile parametrilor furnizați. Interfața proiectată în Visual Studio este reprezentată în figura 45.

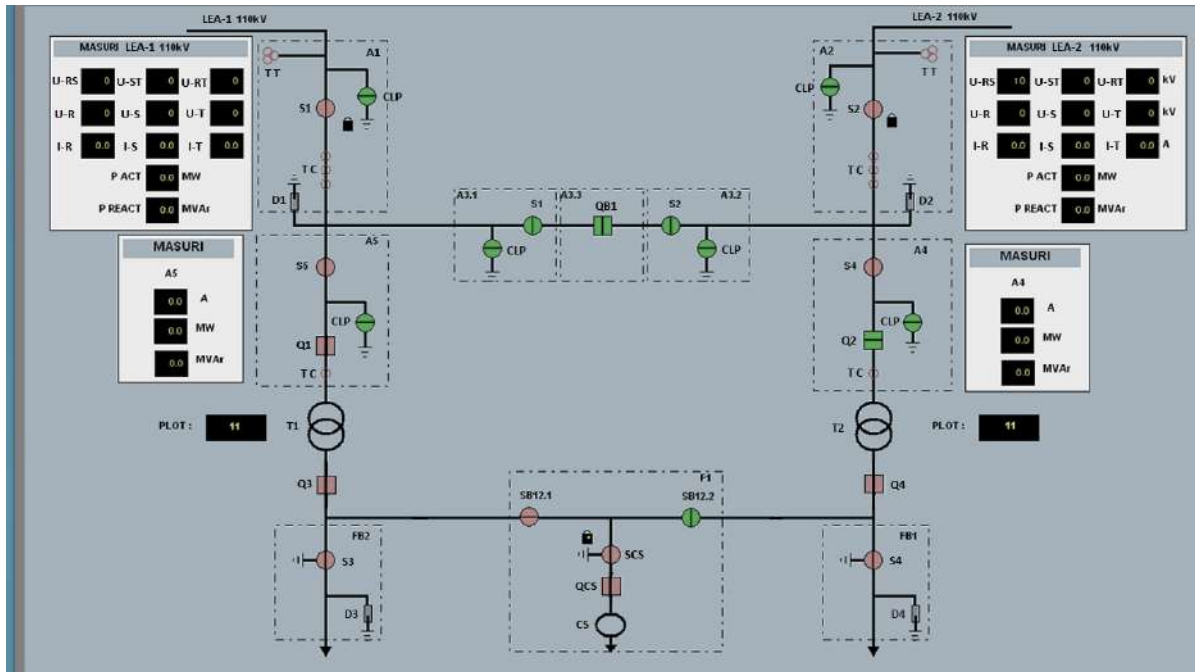


Figura 45. Schema monofilară a unei STE cu CS introdusă în sistemul SCADA

În figura 109 este afișată interfața afișată operatorului în punctul de dispecerizare de către sistemul SCADA, pentru o STE în care s-a montat un compensator sincron în paralel cu transformatorii de putere.

6.11. Compensarea puterii reactive în STE

Funcționarea STE-urilor la un factor de putere $\cos\phi \geq 0,9$ implică compensarea puterii reactive consumată de către STEF prin cuplarea în paralel cu transformatorii de putere ai STE a unui compensator sincron dimensionat la puterea aparentă furnizată de un transformator.

Pentru echilibrarea sarcinii absorbită din sistemul de distribuție și compensarea puterii reactive consumată de către sistemul de tracțiune electric feroviar se propune o schemă nouă pentru instalațiile fixe de tracțiune electrică (Chaneliere J.et al.2007).

În STE-uri se vor înlocui transformatorii bifazați existenți cu transformatori trifazați conectați pe partea secundară în paralel cu un compensator sincron de putere reactivă. Această modificare necesită echipament de legătură și comutație suplimentar pentru faza nefolosită până acum de STEF.

Schema monofilară simplificată a unei STE echipată cu transformatori trifazați și compensator sincron este reprezentată în figura 46.

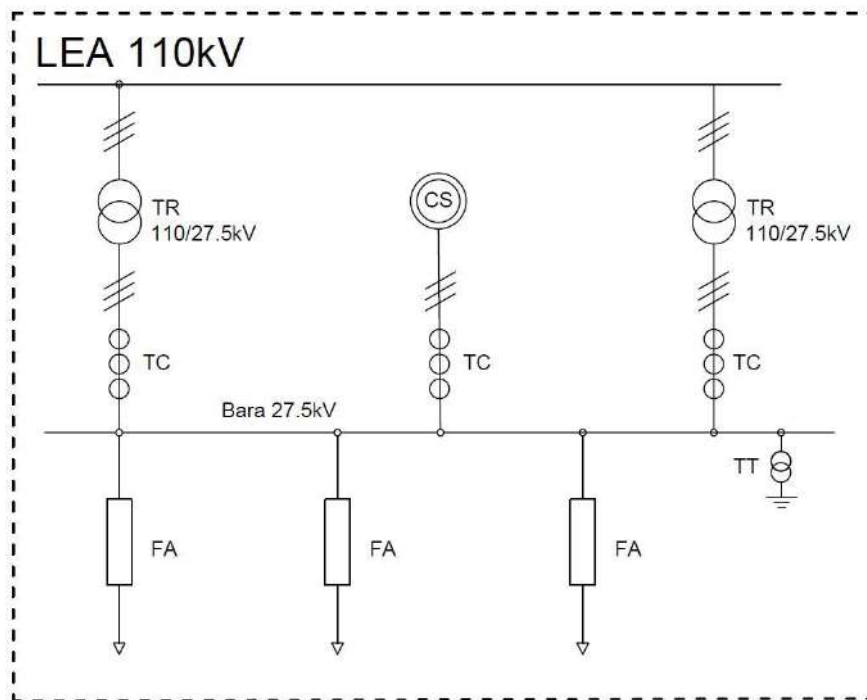


Figura 46. Schema monofilară a unei STE cu CS cuplat în paralel cu transformatorii de putere

6.12. Concluzii

Cercetarea efectuată pe parcursul a 31 zile într-o stație de tracțiune electrică a evidențiat necesitatea compensării puterii reactive consumată de către STEF.

Schema propusă în acest capitol de înlocuire a transformatorilor de putere bifazați cu transformatori de putere trifazați conectați în paralel cu compensatoare sincrone, în stațiile de tracțiune electrică, aduce următoarele îmbunătățiri sistemului de tracțiune electric feroviar:

- sarcina consumată din SEN se echilibrează pe cele trei faze ale sistemului;
- crește disponibilul de putere aparentă pe transformatorul aflat în funcție în STE;
- permite menținerea unui transformator în STE în rezervă permanent;
- permite proiectarea noilor STE-uri având un singur transformator de putere trifazat și un CS;
- permite creșterea distanței de amplasare a STE-urilor adiacente;
- scade numărul necesar de STE-uri pentru alimentarea STEF.

Codul scris în programul Visual C++ pentru controlul CS prin sistemul SCADA monitorizează: compensarea factorului de putere, permite controlul continuu în timp real a parametrilor energiei electrice furnizată STEF, asigură un flux de putere crescut pe aceeași secțiune a instalației fixe de tracțiune electrică, stabilizează nivelul de tensiune pe toată zona alimentată de STE, și implicit facilitează furnizarea energiei electrice la parametri ceruți de către materialul rulant al STEF.

Prin adoptarea soluției propuse în acest capitol și anume de compensare a factorului de putere cu ajutorul CS controlat de SCADA, factura de energie electrică ar scădea cu aproximativ 51%.

7. REZILIENȚA SISTEMULUI DE TRACȚIUNE ELECTRIC FERVIAR CA INFRASTRUCTURĂ CRITICĂ

7.1 Introducere

Creșterea securității sistemului de tracțiune electric feroviar, în cazul țărilor în curs de dezvoltare și care se află în mijlocul unor profunde transformări politice, economice, sociale și culturale, reprezintă un obiectiv principal de cercetare.

Pentru menținerea infrastructurilor critice în siguranță este necesară efectuarea analizei de risc și de vulnerabilitate la date stabilite, sau ori de câte ori se constată că instalațiile nu mai răspund prompt la solicitările sistemelor cu care interacționează (Nicolae S.2012).

7.2 Clasificarea infrastructurilor critice feroviare

Infrastructura critică feroviară reprezintă cea mai importantă resursă logistică de transport din țara noastră, dezvoltarea infrastructurii trebuie privită din perspectiva necesității dezvoltării, eficientizării și modernizării sistemului de transport feroviar.

Infrastructura critică feroviară a fost clasificată în următoarele ramuri:

- transportul feroviar de călători;
- transportul feroviar de mărfuri;
- infrastructura feroviară.

7.3 Instalații critice feroviare care concură la siguranța circulației trenurilor și aparțin de ramura Infrastructură

Infrastructura feroviară este alcătuită din trei ramuri care concură la siguranța circulației și anume:

- SCB (semnalizare, centralizare, bloc), sunt instalațiile care dirijează circulația trenurilor;
- IFTE (instalații fixe de tracțiune electrică), sunt instalații care asigură alimentarea cu energie electrică a liniei de contact și a instalațiilor aferente acesteia, în cazul tracțiunii electrice;
- TTR (telefonie, telegrafie, radio) sunt echipamentele necesare comunicațiilor.

Pentru circulația trenurilor în condiții de siguranță vom face câte un studiu de caz pe fiecare ramură în parte, arătând măsurile de securitate care se impun și modul de îmbunătățire a acestora (Arion S.2009).

7.4 Măsurile de securitate pe locomotive – implementarea sistemului SCADA

Procesul de modernizare a locomotivelor trebuie să urmărească în primul rând asigurarea măsurilor de securitate minime obligatorii, în al doilea rând modernizarea trebuie să cuprindă implementarea sistemului SCADA pentru introducerea LE în sistemul de telegestiune al energiei electrice și pentru trecerea la circulația de mare viteză.

7.5 Redundanța – aspecte teoretice

Redundanța reprezintă utilizarea unui surplus de elemente în cadrul unui sistem, cu scopul de a menține sistemul în stare de funcționare chiar și în cazul apariției unor defectări. Este o condiție esențială pentru obținerea toleranței la defecte a sistemelor.

7.5.1 Formele de implementare a redundanței

Există patru forme de implementare a redundanței:

- hardware;
- software – fiabilitatea software este mai scăzută decât a sistemelor hardware;
- informațională;
- temporală.

7.5.2 Sisteme M-din-N redundante:

Se definește conceptul de sistem M-din-N redundant ca sistemul care are în compoziție un număr de module N, fiind nevoie de cel puțin M module pentru menținerea în funcțiune. Altfel spus, când numărul de module funcționale este mai mic decât M, sistemul încetează să mai funcționeze.

Fiabilitatea sistemului M-din-N se poate exprima prin următoarea formulă:

$$R_{M_din_N}(t) = \sum_{i=M}^N C_N^i R^i(t) [1 - R(t)]^{N-i} \quad (24)$$

Dacă aplicăm relația de mai sus unei substații de tracțiune electrică echipată cu 3 transformatoare de putere din care 2 sunt necesare a fi funcționale pentru menținerea în funcțiune a sistemului și notăm cu:

M - numărul de transformatoare necesare pentru menținerea în funcțiune a sistemului;

N - numărul de transformatoare din sistem;

R(t) - fiabilitatea unui transformator

Prin dezvoltarea binomului relația de mai sus devine:

$$R_{M_din_N}(t) = 3R^2(t) - 2R^3(t) \quad (25)$$

În funcție de starea fizică a transformatoarelor-noi sau reparate și de condițiile de mentenanță și fiabilitate dând valori lui R(t) vom obține:

$$\text{pentru } R(t)=0,3 \rightarrow R_{M_din_N} = 3R^2(t) - 2R^3(t) = 3 \cdot 0,3^2 - 2 \cdot 0,3^3 = 0,27 - 0,054 = 0,21 \quad (26)$$

$$\text{pentru } R(t)=0,5 \rightarrow R_{M_din_N} = 3R^2(t) - 2R^3(t) = 3 \cdot 0,5^2 - 2 \cdot 0,5^3 = 0,75 - 0,25 = 0,50 \quad (27)$$

$$\text{pentru } R(t)=0,8 \rightarrow R_{M_din_N} = 3R^2(t) - 2R^3(t) = 3 \cdot 0,8^2 - 2 \cdot 0,8^3 = 1,92 - 1,024 = 0,89 \quad (28)$$

Se observă din calculele efectuate că, pentru sisteme tehnice constituite din module, cu cât este mai mare fiabilitatea fiecărui modul cu atât se obțin sisteme redundante mai fiabile iar atunci când fiabilitatea transformatoarelor scade, se reduc și avantajele redundanței.

7.5.3 Clasificarea structurilor funcționale din punct de vedere al redundanței

Structurile funcționale se clasifică, din punct de vedere al modului de conectare a componentelor, în:

- structuri neredundante de tip serie;
- structuri redundante de tip: derivație (paralel), mixt (serie-paralel, paralel-serie) sau logică majoritară, formate din elemente logice de tip și/sau.

7.6 Redundanța instalațiilor critice feroviare

În instalațiile critice feroviare, pentru creșterea gradului de siguranță în exploatare este necesară introducerea elementelor redundante în cazul următoarelor categorii de sisteme sau instalații:

- în instalațiile SCB;
- în instalațiile IFTE;
- în sistemul de comunicații TTR;
- în sistemul SCADA.

7.6.1 Redundanța instalațiilor SCB

Introducerea instalațiilor SCB în sistemul SCADA asigură redundanța echipamentelor de comandă și semnalizare. Pupitrul de comandă al IDM devine un echipament redundant pentru interfața HMI a sistemului SCADA. În acest fel se elimină riscul pierderii controlului pe circuitele de cale din cauza arderii becurilor de pe pupitrul de control. Comanda prin relee a poziției schimbătoarelor de cale devine o instalație redundantă pentru microcontrolerele PLC-urilor care, pe lângă gradul sporit de siguranță și fiabilitate, oferă și o reducere a consumului de energie electrică.

7.6.2 Redundanța instalațiilor IFTE

Sistemul SCADA gestionează sursele de alimentare a instalațiilor fixe de tracțiune electrică. La depășirea sarcinii sau la ieșirea din parametrii a sursei de bază, sistemul este capabil să înlocuiască sau să completeze sursa de bază cu surse redundante disponibile în sistemul de alimentare la momentul respectiv.

7.6.3 Redundanța sistemului de comunicație TTR

Redundanța informației apare din predictibilitatea și convenționalitatea mesajelor folosite în STEF. Generarea automată a mesajelor, repetarea lor de către sistemul SCADA până la primirea unei confirmări precum și verificarea concordanței între mesajul transmis și cel recepționat asigură un grad ridicat de securitate a dispozițiilor date respectiv primite.

7.7 Redundanța sistemului SCADA

Redundanța sistemului SCADA reprezintă un surplus de echipamente hardware și software necesare pentru menținerea în funcțiune a sistemului.

În instalațiile critice ale STEF sistemul SCADA implementat trebuie să conțină echipamente redundante capabile să înlocuiască sau să completeze echipamentele aflate în stare de defect sau în funcțiune dar care sunt depășite de anumite situații (Lopez I.et al.2015).

În figura 47 este reprezentat un sistem SCADA cu echipamente redundante.

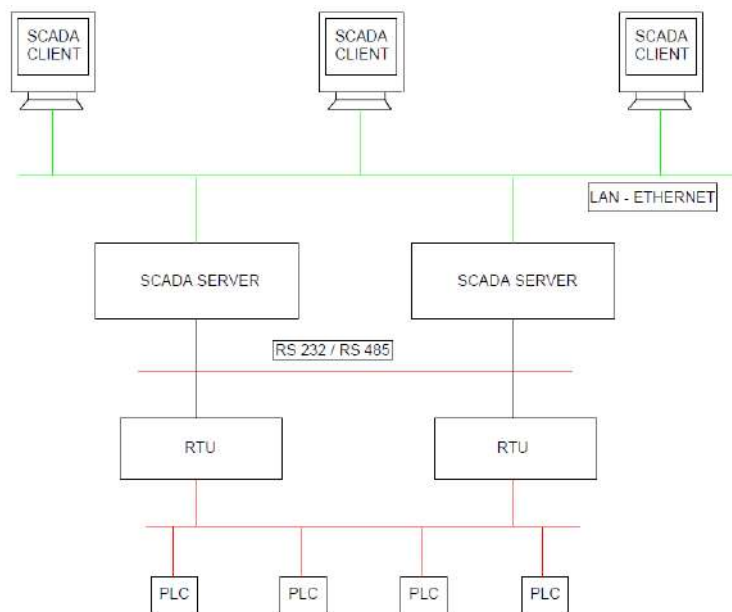


Figura 47. Sistem SCADA redundent

Serverul SCADA scanează toate subsistemele și colectează datele folosind protocolul MODBUS RTU

7.8 Mentenanța sistemelor inteligente cu mare răspundere funcțională în transportul feroviar

Mentenanța productivă totală (TPM) este un concept al programului de mentenanță al firmei și are ca scop asigurarea unei creșteri permanente a productivității, ridicând totodată moralul angajaților și satisfacția lor (Buciuman I.2016).

7.8.1 Managementul mentenanței sistemelor inteligente cu mare răspundere funcțională

Managementul mentenanței sistemelor inteligente cu mare răspundere funcțională presupune procesul de coordonare al resurselor puse la dispoziție (umane, materiale, financiare și informaționale) pentru realizarea obiectivelor organizației responsabile cu mentenanța acestora (secția de întreținere a instalațiilor CT).

7.8.2 Evaluarea calității mentenanței sistemelor inteligente cu mare răspundere funcțională

În evaluarea calității mentenanței sistemelor inteligente cu mare răspundere funcțională se folosesc situații lunare, trimestriale, semestriale și anuale care cuprind numărul deranjamentelor apărute în perioada considerată, durata totală, durata medie, numărul trenurilor întârziate, total minute întârziere și o defalcare pe cauze a deranjamentelor înregistrate.

7.8.3 Implicarea SCADA în asigurarea mentenanței preventive: reducerea potențialului defecțiunilor neașteptate. Studiu de caz pentru Districtul de Energoalimentare Brașov/Regionala de transport feroviar Brașov

Acest studiu de caz oferă o analiză a mai multor filosofii de întreținere preventivă și discută strategiile de întreținere preventivă pentru echipamentele și instalațiile electrice supravegheate cu ajutorul sistemelor SCADA, precum și aplicațiile SCADA gestionate de către districtul de Energoalimentare a tracțiunii electrice feroviare Brașov.

Deoarece fiecare punct de dispecerizare are un set unic de circumstanțe și infrastructură, este responsabilitatea districtului care asigură mentenanța să-și atribuie în interior propriile niveluri de impact diferitelor defecțiuni potențiale și rezultate ale eșecurilor. Cu toate acestea, pentru toate districtele, există posibilitatea ca defecțiunile apărute în funcționarea sistemelor să provoace daune majore, materiale și financiare, materialului rulant, instalațiilor de energo alimentare și călătorilor.

Rezultă că evitarea unor astfel de defecțiuni cu impact ridicat este de preferat. Evitarea eșecurilor în primul rând necesită:

- bugetul adecvat și forța de muncă calificată disponibilă;
- un bun proiect inițial de sistem SCADA cu documentație aferentă;
- o tranziție de la reparații reactive la întreținere proactivă (preventivă).

Toate acestea necesită înregistrări permanente și organizate în baze de date ușor accesibile. Se anticipează că instrumentele software de management al activelor pot ajuta personalul districtului de întreținere în urmărirea și actualizarea înregistrărilor. Cu toate acestea, nu se cunoaște în prezent niciun district de întreținere care utilizează software specializat SCADA pentru urmărirea programelor de întreținere preventivă a instalațiilor fixe de tracțiune electrică, în ciuda utilizării comune în producție și în alte sectoare industriale.

7.9 Concluzii

Evaluarea rezilienței sistemului de tracțiune electric feroviar și a instalațiilor critice care îl deservește a evidențiat necesitatea cercetării și dezvoltării sistemelor de mentenanță și mentenabilitate implementate în sistemul de tracțiune electric feroviar.

Dezvoltarea și implementarea redundanței în sistemul de tracțiune electric feroviar și chiar în sistemul SCADA implementat asigură o creștere a siguranței în funcționare a instalațiilor critice feroviare, permite evitarea unor incidente precum coliziunile între trenuri și implicit a încrederii consumatorilor de servicii de transport pe calea ferată.

8. CONCLUZII

8.1 Concluzii generale

Această teză de doctorat a avut ca scop dezvoltarea și implementarea unor soluții moderne de adaptare a parametrilor energiei electrice furnizată de către substațiile de tracțiune electrică sistemului de tracțiune electric feroviar folosind sisteme de monitorizare și control de tip SCADA.

Obiectivele tezei au fost îndeplinite prin:

- dezvoltarea unor soluții de digitalizare a controlului instalațiilor fixe de tracțiune electrică, prin implementarea aplicațiilor de tip SCADA în monitorizarea și controlul parametrilor energiei electrice furnizați de substațiile de tracțiune electrică sistemului de tracțiune electric feroviar (OS1);
- cercetarea unor soluții de monitorizare și control a nivelului de tensiune pe secundarul transformatorilor de putere, prin dezvoltarea și implementarea sistemului de telegestiune controlat de sistemul SCADA la consumator pe locomotiva electrică și la furnizor în substația de tracțiune electrică (OS2);
- dezvoltarea unor aplicații de tip SCADA pentru automatizarea funcționării în paralel a transformatorilor de putere din substațiile de tracțiune electrică, prin implementarea sistemului SCADA în controlul sistemului de compensare a puterii reactive (OS3);
- prin conceperea unui model fiabilistic pentru o substație de tracțiune electrică în vederea stabilirii nivelului de siguranță și securitate la standardele actuale (OS4).

8.2 Contribuții originale

Cercetarea efectuată evidențiază următoarele contribuții originale în domeniu:

- dezvoltarea unui sistem de monitorizare și control a echipamentelor electrice prin modem GSM;
- dezvoltarea unei aplicații de tip SCADA pentru controlul separatorilor dintr-o stație de triaj a trenurilor;
- dezvoltarea unei aplicații software în programul Visual Studio 2022 pentru monitorizarea consumului de energie electrică în timp real;
- implementarea sistemului de telegestiune a energiei electrice pe locomotivele electrice și în substațiile de tracțiune electrică;
- dezvoltarea aplicației software în programul Visual Studio 2022 pentru automatizarea funcționării în paralel a transformatorilor de putere din substațiile de tracțiune electrică;
- conceperea și realizarea unei aplicații de tip SCADA pentru controlul substațiilor de tracțiune electrică și monitorizarea nivelului de tensiune pe secundarul transformatorilor de putere;
- conceperea și realizarea unui software pentru modelarea unghiului intern al compensatorului sincron, pentru controlul fluxului de putere reactivă din sistemul de tracțiune electric feroviar;
- conceperea unui model fiabilistic pentru o substație de tracțiune electrică în vederea stabilirii nivelului de siguranță și securitate la standardele actuale.

8.3 Diseminarea rezultatelor

Rezultatele cercetărilor efectuate în cadrul tezei de doctorat au fost diseminate prin publicarea următoarelor articole:

1.- Popov, A., Fratu, M.: *Using Synchrophasors To Monitor The Quality Of Electrical Energy In Electrical Traction Substations*, Bulletin Of The Transilvania University Of Brasov - vol. 10 (59) special issue no. 1 – 2018 series i - International Conference CIBv2018 Civil Engineering And Building Services- ISSN 2065-2127;

http://webbut.unitbv.ro/BU2018/Series%20I/Contents_I_CIB_BS.html

2.- Popov, A., Fratu, A., Lepadat, I., Helerea, E., Cojanu, V.: *Monitoring the Cost of Energy for Powering the Railway Electric Traction System*, 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj Napoca, Romania, 2019, pp. 1-6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8759724>

3.- Popov, A., Fratu, M.: *Funcționarea în paralel a transformatoarelor de MT care alimentează sistemul de tracțiune electric feroviar*, AGIR-Colocviul Creativitate-Inventică-Robotică-ediția XXIV, 11 iulie 2019. <https://www.agir.ro/buletine/3156.pdf>

4.- Popov, A., Fratu, M.: *Funcționarea în Paralel a Transformatoarelor de MT care Alimentează Sistemul de Tracțiune Electric Feroviar*, Conferința Tehnico-Științifică: Instalații pentru Construcții: Energie, Eficiență, Confort, Ediția a III-a, 2019-articol extins: ISSN2559-6985

https://www.aiiro.ro/upload/files/reviste/RI_05-2019.pdf -pagina 6

5.- Popov, A., Fratu, M.: *Critical SCADA Applications to Parallel Operation of Transformers in Railway Electrical Traction*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 789, International Conference CIBv2019 Civil Engineering and Building Services 1-2 November 2019, Brasov, Romania, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/789/1/012053>

6. – Popov, A., Bratu, D., Moraru, S.: *Remote Control of Railway Switch Heating Using GSM Modems*, The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati Fascicle IX, 2019, ISSN 2668-4748, e-ISSN 2668-4756, <https://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/mms/article/view/2770>

7.- Popov, A., Fratu, A., Fratu, M.: *Educational project on quantifying reliability in the railway transportation system using SCADA*, ICERI2020 Proceedings ISBN: 978-84-09-24232-0;doi: 10.21125/iceri.2020 https://iated.org/concrete3/paper_detail.php?paper_id=84043

<https://library.iated.org/view/POPOV2020EDU>

8.- Popov, A., Fratu, M.: *Reactive power compensation in the railway electrical traction system, using synchronous machines controlled by SCADA*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1138, International Conference Civil Engineering and Building Services (CIBv 2020) 5th-6th November 2020, Brasov, Romania, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1138/1/012038>

9.- Popov, A., Fratu, M.: *Calculation algorithm and method for optimizing electricity consumption for the railway traction system*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1757, International Conference Civil Engineering and Building Services (CIBv 2021) 5th-6th November 2021, Brasov, Romania, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1242/1/012030>

8.4 Direcții viitoare de cercetare

Cercetarea actuală se poate continua pe următoarele direcții:

- studierea posibilității de control prin modem GSM a mai multor echipamente electrice, implementarea acestui sistem în programele de operare de tip SCADA;
- studierea și determinarea necesarului de măsuri redundante pentru funcționarea în siguranță a instalațiilor critice feroviare;
- studierea posibilității de dezvoltare a unui sistem de comandă și control generalizat, în care să fie înglobate toate instalațiile, echipamentele și mijloacele de remorcare care concurează la funcționarea sistemului de tracțiune electric feroviar.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

Biswas, R., Mal, S.: Automatic power factor improvement using microcontroller 2015 Int. Conf. Work. Comput. Commun. IEMCON 2015 756–62,2015;

Buciuman, I.: Sisteme inteligente de transport în domeniul feroviar ERTMS/ETCS – principii tehnice și de funcționare ~ Railway Pro, București, 5-4 octombrie 2017

Buciuman, I.: Fiabilitatea sistemelor inteligente cu mare raspundere functionala. Revista Căilor Ferate Române, Nr.4/2020;

Fathima, F., Prabhakar, S.: Harmonics analysis on various traction transformers in co-phase traction system, Ain Shams Engineering Journal, 2016, pp. 627-638.

Feist, K., Markow, Z., Burt, C.: SCADA Preventative Maintenance: Reducing the Potential of Unexpected Failures. Presented at 12th International Conference on Irrigation and Drainage. USCID. Reno, NV, November 5-8, 2019;

Fratu, M., Fratu, A.: Application's development with SCADA system, Revista RECENT, ISSN 1582 – 0246, Vol.6., Nr.2 (14), pp. 35 - 40.2005;

Lopez, I., Aguado, M., Pinedo, C., Jacob, E.: SCADA Systems in the Railway Domain: Enhancing Reliability through Redundant MultipathTCP, IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, Las Palmas, 2015;

Jiang, D., Qian, X., Longbin, W., Guanyu, Z., Zijian, C., Xiang, L.: Research on excitation system of synchronous generator. Journal of Physics: Conference Series. 1607. 012040. 10.1088/1742-6596/1607/1/012040, 2020;

Dongre, N., Sindekar, A.: Optimization of Energy Consumption In Electric Traction System By Using Interior Point Method, IOSR Journal of Electrical and Electronics; Mar.-April 2018.

Saurabh, G., Priya, M., Rachana, G.: Tractive energy optimization in railway electric traction system, 1st IEEE International Conference on Power Electronics; Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES-2016).

Maksimov, N.M., Savosteenko, N.V., Semenova, K.D., Kiseleva, A.A., Panov, K.E.: Modeling a synchronous generator with an external rotor at constant magnets. SCIENTIFIC DEVELOPMENT TRENDS AND EDUCATION. 54. 10.18411/lj-09-2019-12,2019;

Marinescu, C., Sacerdoțianu, D., Hurezeanu, I., Lăzărescu, F., NICOLA, M., Vintilă, A., Roman, D., Nourăș, F., Pistol, P., Aciu, A.: Echipamente pentru monitorizarea și diagnoza stării tehnice a unităților de transformare -ICMET Craiova 2020.

Rezumat

Soluții moderne de adaptare a parametrilor energiei electrice la necesitățile tracțiunii electrice feroviare folosind sistemele SCADA

Teza de doctorat are ca scop proiectarea și implementarea unor soluții moderne de adaptare a parametrilor energiei electrice furnizată de către substațiile de tracțiune electrică sistemului de tracțiune electric feroviar, găsirea unor soluții de optimizare a consumului de energie electrică, precum și implementarea unor concepte noi pentru creșterea stabilității sistemului de tracțiune electric feroviar. Obiectivele tezei au fost atinse prin numeroase realizări și contribuții originale, printre care: 1) Studiul și sinteza performanțelor electrice privind stadiul actual al sistemelor de comandă și control a echipamentelor de comutație care deservește instalațiile de energoalimentare; 2) Studiul de caz efectuat pe tronsonul de cale ferată Brașov – Predeal cu scop de evaluare a parametrilor și a necesarului de energie electrică furnizată sistemului de tracțiune electric feroviar; 3) Proiectarea unui sistem de comandă și control a echipamentelor electrice prin modem GSM; 4) Proiectarea unor aplicații de tip SCADA pentru monitorizarea consumului de energie electrică în timp real, implementarea în sistemul de telegestiune a consumatorilor (locomotivele electrice) precum și a furnizorilor (substațiile de tracțiune electrică); 5) Proiectarea unei aplicații pentru automatizarea funcționării în paralel a transformatorilor de putere din substațiile de tracțiune electrică; 6) Proiectarea unui cod sursa în limbajul Visual C++ pentru realizarea unui sistem SCADA capabil să regleze automat nivelul de tensiune pe fiderii de alimentare, să asigure controlul funcționării în paralel a transformatorilor de putere și a compensatorului sincron din substațiile de tracțiune electrică; 7) Proiectarea unei secvențe de cod în limbajul Visual C++ pentru modelarea unghiului intern al compensatorului sincron, pentru controlul fluxului de putere reactivă.

Modern solutions for adapting the electrical energy parameters to the needs of electric railway traction using SCADA systems.

The doctoral thesis aims to design and implement modern solutions for adapting the parameters of electricity provided by electric traction substations to the electric traction system, finding solutions to optimize electricity consumption, as well as implementing new concepts for increasing stability of the electric rail traction system. The objectives of the thesis were achieved through numerous original achievements and contributions, including: 1) The study and synthesis of electrical performance on the current state of command and control systems of switching equipment serving power plants; 2) The case study carried out on the Brașov - Predeal railway section in order to evaluate the parameters and the electricity demand supplied to the railway electric traction system; 3) Design of a command and control system for electrical equipment via GSM modem; 4) Design of SCADA type applications for real-time monitoring of electricity consumption, implementation in the remote management system of consumers (electric locomotives) as well as suppliers (electric traction substations); 5) Design of an application to automate the parallel operation of power transformers in electric traction substations; 6) Design of a source code in the Visual C ++ language for the realization of a SCADA system capable of automatically regulating the voltage level on the power supply, to ensure the control of the parallel operation of the power transformers and the synchronous compensator in the electric traction substations; 7) Design a code sequence in Visual C ++ language to model the internal angle of the synchronous compensator, to control the reactive power flow.