UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI

ȘCOALA DOCTORALA DE ENERGETICĂ

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

STUDIEREA EFECTULUI DE CALITATE A PUTERII PE RELEE DIGITALE ÎN TIMPUL TRANZITORIU ÎN SISTEMUL DE ENERGIE ELECTRICĂ ȘI DE GESTIONARE A ACESTORA

STUDYING THE EFFECT OF POWER QUALITY ON DIGITAL RELAYS DURING TRANSIENTS IN THE ELECTRICAL POWER SYSTEM AND THEIR MANAGEMENT

Author: **Ing. Feras MAHFOUD**
Conducător de doctorat: **Conf. dr. ing. George Cristian LAZAROIU**

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte		De la	
Conducător de doctorat	Conf. dr. ing. George Cristian LĂZĂROIU	De la	Universitatea POLITEHNICA din București
Refernt	Prof.dr.ing. NICOLAE GOLOVANOV	De la	Universitatea POLITEHNICA din București
Referent	Prof.dr.ing. MIHAI GAVRILAȘ	De la	Universitatea TEHNICĂ GHEORGHE ASACHI din Iași
Referent	Prof.dr.ing. RADU PENTIUC	De la	Universitatea ȘTEFAN CEL MARE din Suceava

București
2020

MULȚUMIRI

În primul rând, aș dori să-i mulțumesc Domnului prof. George Cristian LAZAROIU pentru susținerea sa în cadrul cercetării mele doctorale, pentru sfaturile sale continue și prețioase, pentru că m-a înțeles și pentru că m-a învățat multe lucruri pe care le-am folosit în cercetarea mea.

Mulțumesc dragii mele soții, care a fost alături de mine și m-a susținut foarte mult și tuturor membrilor familiei mele: tata, mama, frații și tuturor celorlalți membri ai familiei; pentru dragostea și sprijinul lor moral. Rugăciunile lor au fost un mare sprijin pentru mine în toate etapele vieții mele, astfel încât aprecierea și recunoștința mea este mai profundă față de familia mea.

Aș dori să dedic această lucrare sufletului fratelui meu „Rami", care este prezent în mintea mea tot timpul.

Aș dori să îi mulțumesc dr. Ing. Radu Porumb, pentru că m-a susținut în efectuarea unor măsurători la ferma fotovoltaică din Bărăgan și a colaborării cu mine, în special în probleme de calitate a energiei electrice.

Aș dori să-i mulțumesc profesorului GUZUN BASARAB, care m-a sprijinit în primii doi ani de studii doctorale și nu a putut continua cu mine din cauza condițiilor dificile de sănătate rezultate din moartea singurului său fiu.

Aș dori să-i mulțumesc doamnei Paula Turcan pentru amabilitatea sa, care mi-a furnizat toate detaliile și informațiile referitoare la conferințe și evenimente și m-a sfătuit în perioada dificilă de tranziție pe care am experimentat-o.

Aș dori să-i mulțumesc si domnului prof. Univ. dr. ing. Nicolae Golovanov, care mi-a oferit ajutorul, în special în perioada de tranziție dintre profesorul GUZUN BASARAB și domnului prof. George Cristian LAZAROIU care mi-a oferit o mulțime de sfaturi valoroase ce contribuit la corectarea acestei teze.

Aș dori, de asemenea, să mulțumesc domnului prof. Dr. ing. Virgil Dumbrava care a urmat această cercetare cu mare interes și mi-a oferit toate sfaturile necesare pentru succesul acestei teze. În cele din urmă, aș dori să mulțumesc personalului de la Universitatea POLITEHNICA din București, inclusiv colegilor mei, profesorilor și doctoranzilor.

CUPRINS

TABLE OF FIGURES **3**
INTRODUCERE **5**
1. FUNDAL 5
2. OBIECTIVE 7
3. REZULTATUL TEZEI 7
CAPITOLUL 1. ..... **9**
CALITATE DE PUTERE **9**
1.1. INTRODUCERE 9
1.2. DEFINIȚII ȘI CLASIFICAREA CALITĂȚII DE PUTERE 9
1.3. ANALIZAREA DATELOR DE CALITATE A PUTERII DE PROGRAMUL APLICAȚIILOR PC-urilor 9
1.3. MĂSURĂRI PRACTICE A CALITĂȚII DE PUTERE 10
1.4. CONCLUZIE 13
CAPITOLUL 2. ..... **14**
RELEELE DIGITALE DE PROTECTIE A SISTEMELOR DE PUTERE **14**
2.1. INTRODUCERE 14
2.2. STRUCTURA RELAȚIEI DIGITALE 14
2.3. FILTRE DIGITALE FOLOSITE IN RELEELE DIGITALE 14
2. 3.1. Filtrele Digitale - releul cu un element 14
2.4. DISCUTII SI CONCLUZII 19
CAPITOLUL 3 ..... **20**
CALCULUL SCURTCIRCUITELOR PENTRU SISTEMUL DE PUTERE STUDIAT **20**
3.1. INTRODUCERE 20
3.2. SISTEMUL DE ALIMENTARE ELECTRICĂ A COMPANIEI DE RAFINERIE BANIAS ȘI SISTEMUL ELECTRIC SIRIAN 20
3.3. CALCULUL SCURTCIRCUITULUI CONFORM IEC 60909 20
3.3.1. Linia de cablu de 66 kV este conectată 20
3.4. DISCUȚII REZULTATE 22
CAPITOLUL 4. ..... **23**
EVALUAREA ȘI VERIFICAREA SETĂRILOR RELEELOR DE PROTECȚIE PENTRU SISTEMUL DE PUTERE STUDIAT **23**
4.1. INTRODCERE 23
4.2. VERIFICAREA PERFORMANȚEI SISTEMULUI DE RELEE ÎN DIFERITE CAZURI DE DEFECȚIUNI 23
4.2.1. Scurtcircuit trifazat pe linia de cablu 66 Kv 23
4.3. CONCLUZIE 28
CAPITOLUL 5. ..... **29**
EFECTUL CALITATII SLABE A PUTERII IN RELEELE DIGITALE **29**

5.1. INTRODUCERE 29
5. 2. EFECTUL ARMONICILOR PRIVIND PERFORMANŢA RELEE DIGITALE 29
5.2.1. Efectul armonicului și saturației transformatorului de putere asupra răspunsului releelor de supracurent 31
5.3. Îmbunătățirea performanței de protecție diferențiala prin defecte externe asociate cu o saturatie a transformatorului de curent 36
5.3.1. INTRODUCERE 36
5.3.2. TESTUL RELEELOR DE PROTEȚIE DIFERENȚIALA SUB EFECTULUI SATURAȚIE PRIN UTILIZAREA PROGRAMUL EMTP-ATP 36
5.4. Concluzii 42
CAPITOLUL 6. 44
ALGORITM AVANSAT PENTRU DETECTAREA ŞI CORECTAREA CURENTILOR SECUNDARI A TRANSFORMATORULUI DE CURENT 44
6.1. INTRODUCERE 44
6.2. DESCRIEREA METODEI 44
6.3. FORMAREA UNUI MODEL MATEMATIC PENTRU UNDA SINUSOIDALA IN ACORD CU METODA DIFERENTEI INAPOI A LUI NEWTON 45
6.4. EROAREA METODEI DE ESTIMARE 46
6.5. DETECTAREA INCEPUTULUI DE SATURATIE CT 49
6.6. DETECTAREA SFARSITULUI DE SATURATIE CT 49
6.7. RECONSTRUCTIA CURENTULUI CORECTAT (CURENTUL PRIMAR) 50
6.8. VERIFICAREA ALGORITMULUI PROPUS 50
6.9. EFECTIVITATEA ALGORITMULUI PROPUS 51
CAPITOLUL 7. CONCLUZII 52
7. 1. CONTRIBUȚII ORIGINALE 52
7.2. LUCRĂRI VIITOARE 54
LISTA PUBLICATILOR 55
REFERINȚE 57

TABLE OF FIGURES

Fig. 1. 1. Exemplu de semnal de tensiune și perturbații 9
Fig. 1. 2. Curba CBEMA pentru susceptibilitatea echipamentelor 10
Fig. 1. 3. Abateri de frecvență 11
Fig. 1. 4. Fluctuație de tensiune 11
Fig. 1. 5. Forma de undă la supra-tensiune 12
Fig. 1. 6. Distorsiune armonică totală 12
Fig. 1. 7. Puncte de scurgere 13

fig. 2. 1. Schema bloc de funcționare tipică a unui releu digital 14
Fig. 2. 2. Semnal de intrare și amplitudinea acestuia rezultată cu ajutorul filtrelor Fourier în cazul 2 17
Fig. 2. 3. Semnal de intrare și amplitudinea rezultată prin intermediul filtrelor Fourier 17

Fig. 3. 1. Monofilara sistemului energetic studiat 20

Fig. 4. 1. Distributia releelor pentru diferite elemente ale sistemului de putere studiat 23
Fig. 4. 2. Caracteristica parcelei R-X a releului Distanță_ AFA03 26
Fig. 4. 3. Releu de supracurent a parcelei AFA 03 26
Fig. 4. 4. Timpul de supracurent a releului parcelei AFA 03 27
Fig. 4. 5. Timpul de supracurent a releului parcelei BBA03 27
Fig. 4. 6. Timpul de supracurent a releului parcelei _ BBA02 28

Fig. 5. 1. Schema cu o singură linie a sistemului electric de alimentare conectat 30
Fig. 5. 2. Caracteristica parcelei R-X a releului Distanță_ _PPHama 30
Fig. 5. 3. Caracteristica parcelei R-X a releului de distanță _AFA03 31
Fig. 5. 4. Curba de magnetizare a 1BAT 10 32
Fig. 5. 5. Curba de magnetizare a 2BAT 10 32
Fig. 5. 6. Diagrama de supracurent a parcelei AFA02 33
Fig. 5. 7. Diagrama de supracurent a parcelei AFA03 33
Fig. 5. 8. Curba de magnetizare a 2BAT 10 34
Fig. 5. 9. Diagrama de supracurent a parcelei AFA02 35
Fig. 5. 10. Diagrama de supracurent a parcelei AFA03 35
Fig. 5. 11. Sistem de alimentare testat cu programul EMTP-ATP 36
Fig. 5. 12. Reprezentarea sistemului de alimentare în cazul unei defecțiuni interne prin utilizând EMTP-ATP .. 37
Fig. 5. 13. Curentul diferential, trece in faza (A) 37
Fig. 5. 14. Curentul diferential, trece in faza (B) 38
Fig. 5. 15. Curentul diferential, trece in faza (C) 38
Fig. 5. 16. Reprezentarea sistemului de alimentare în cazul unei defecțiuni externe 39
Fig. 5. 17. Curentul diferențial, care trece în faza (A) 39
Fig. 5. 18. Curentul diferențial, care trece în faza (B) 40
Fig. 5. 19. Curentul diferențial, care trece în faza (C) 40
Fig. 5. 20. Reprezentarea sistemului de alimentare în cazul unei defecțiuni externe 41
Fig. 5. 21. Curentul diferențial, trece în faza (A) 41
Fig. 5. 22. Curentul diferențial, trece în faza (B) 42
Fig. 5. 23. Curentul diferențial, trece în faza (C) 42

Fig. 6. 1. Valorile reale măsurate și valorile estimate ale curenților secundari CT 45
Fig. 6. 2. Estimare folosind primul derivat 47
Fig. 6. 3. Estimare folosind a doua derivată 47
Fig. 6. 4. Estimare folosind a treia derivată 48
Fig. 6. 5. Estimare folosind a patra derivată 48
Fig. 6. 6. Estimare folosind a cincea derivată 49
Fig. 6. 7. Curentul corectat prin aplicarea algoritmului propus 51

INTRODUCERE

Cea mai importantă caracteristică a sistemelor de alimentare este continuitatea furnizării de energie electrică catre instrumentele de investiții în mod fiabil. Această fiabilitate este asigurată în primul rând de așa-numitele sisteme de protecție, a căror funcție principală este de a detecta cât mai repede pană electrică și de a izola dispozitivul defect din sistemul de alimentare [35], [62], [92].

Sistemul de protecție nu include numai releele, dar include și transformatoarele de curent. Prin urmare, funcționarea corectă a dispozitivelor de protecție depinde de performanța transformatoarelor de curent în cazuri tranzitorii [151], [152].

Când transformatorul de curent intră în saturație în timpul perturbațiilor sistemului de alimentare, amplitudinea curentului secundar va scădea și forma de undă va fi denaturată [157], [158]. Aceste distorsiuni pot duce la o pierdere a coordonării în sistemul de protecție și incapacitatea dispozitivului de protecție de a izola elementul deteriorat cât mai repede posibil, poate duce uneori la o funcționare greșită a unității de protecție în afara zonei protejate sau în afara ariei sale de funcționare și, prin urmare, au loc repercursiuni grave asupra întregului sistem electric [112], [142], [153].

În mod similar, prezența armonicilor în rețeaua electrică duce la numeroase probleme pentru elementele sistemului de alimentare în general și în special pentru sistemul de protecție, care are implicații grave asupra performanței sistemului de protecție și capacitatea acestuia de a izola defecțiunile care apar. Toate aceste efecte anterioare se încadrează la rubrica „Calitatea puterii” [187].

Releele digitale sunt relee multifuncționale, care înlocuiesc releele electromecanice și statice datorită avantajelor acestor relee, indiferent de costul economic, performanța și dimensiunea acestora [14], [133]. În ciuda tuturor acestor avantaje, releele digitale suferă de multe probleme care rezultă din influența multor efecte, în special efectul unei calități slabe a puterii, care este subiectul acestei cercetări.

1. FUNDAL

Calitatea slabă a puterii este definită ca o abatere de tensiune, curent și frecvență de la valorile lor nominale, această abatere poate fi văzută ca o denaturare a formei de undă și a amplitudinii semnalului, [2], [10], [18].

Există multe resurse pentru o calitate slabă a energiei, aceste perturbații se pot datora surselor armonice de curent și tensiune, operațiilor dinamice și defecțiunilor [5], [13].
Calitatea semnalului de intrare joacă un rol important în comportamentul corespunzător al releelor de protecție.

Releele digitale utilizează semnalul digital ca semnal de intrare la filtrul digital, în timp ce releele convenționale utilizează semnalul analog ca semnale de intrare, fără a se transforma într-o altă formă [37].

Acest semnal de intrare este procesat de filtrul digital, iar luarea deciziei se face după compararea valorilor calculelor rezultate cu valorile prestabilite [40], [92], [96], [107].
Filtrul digital poate fi considerat ca centru decizional pentru releele de protecție, există multe tipuri de filtru digital și fiecare filtru are propriul algoritm și ecuațiile matematice. Cele mai

populare filtre utilizate în aplicațiile de protecție sunt filtrul Fourier, precum și unele dintre filtrele mai puțin utilizate, cum ar fi filtrul Cosine, filtrul IIR, filtrul Kalman și filtrul Walsh [39], precizia și viteza sunt cele mai importante criterii pentru testarea performanța acestor filtre [42], [82], [84], [85], [88], [89].

Unii cercetători au încercat să furnizeze mai multe studii pentru examinarea efectelor diferitelor perturbații asupra performanței acestor filtre independent de sistemul de alimentare. În plus, cercetările lor nu au oferit o idee cuprinzătoare despre efectele reciproce ale diferitelor elemente ale sistemului de alimentare și impactul său asupra performanței acestor filtre, dar cercetările lor au fost baza pentru viitoarele lucrări [82], [83].

Multe cercetări au studiat comportamentul diferitelor tipuri de relee digitale sub efectul perturbațiilor prin utilizarea diferitelor programe de simulare precum EMTP-ATP, MATLAB, etc. Unele dintre aceste programe, cum ar fi MATLAB, necesită programarea blocurilor de protecție, deoarece nu conțin blocuri gata făcute. Aceasta reduce posibilitatea de a manevra pentru multe teste și necesită mai mult timp pentru realizarea acestor blocuri [84], [86], [90]. Unele dintre noile programe de simulare, cum ar fi DigSILENT, oferă blocuri complete pentru toate dispozitivele de protecție pentru diverși producători și oferă posibilități de introduce a setările de protecție cu destula acuratețe [95].

Algoritmii de protecție folosesc algoritmi de măsurare pentru atenuarea componentelor non-fundamentale și pentru a estima componența de frecvență fundamentală cu o precizie ridicată pentru a detecta defecțiunile.

Principalele semnale de intrare pentru algoritmi de estimare sunt semnalele de curent și tensiune. Pentru a asigura precizia și viteza optimă a funcțiilor de protecție, semnalele de intrare trebuie să conțină numai componența de frecvență fundamentală [40], [82], [84], [86], [89], [92], [178].

În practică, semnalul de intrare este denaturat în funcție de condițiile de defecțiune, semnalele de defecțiune conțin, în general, frecvențe non-fundamentale, cum ar fi armonicele, decalarea DC-ului și zgomotele.

Algoritmul de măsurare produce erori datorate acestor semnale nedorite și aceste erori vor fi propagate în algoritmii succesivi folosiți și care pot duce la o funcționare greșită a dispozitivului de protecție.

În această teză, efectul semnalelor nocive a fost investigat prin programe de simulare precum MATLAP și digSILENT și EMTP-ATP. Multe cercetări au utilizat numeroase metode și algoritmi matematici pentru a estima și corecta componentele acestor semnale de inconvenient. În general, acuratețea acestor metode se bazează pe comparația dintre valoarea estimată a eșantionului și valoarea sa reală [162-178].

În această cercetare, a fost dezvoltat un algoritm special pentru detectarea distorsiunii și corectarea acesteia pentru undele secundare ale transformatorului de curent, bazată pe metoda diferenței înapoi a lui Newton. Acest algoritm și-a dovedit eficiența prin aplicarea undelor înregistrate prelevate de la un înregistrator de erori al unei stații de generare și distribuție a energiei electrice.

În aplicațiile releelor de protecție, este important să se verifice performanța releelor de protecție în stare de echilibru pentru a evalua performanța lor în stare tranzitorie.

2. OBIECTIVE

Obiectivul principal al tezei de cercetare este de a oferi o evaluare a efectelor calității slabe a puterii asupra performanței releelor digitale și de a sugera soluții matematice și practice, datorită importanței acestor protecții în menținerea stabilității sistemului electric în diferite perturbații.

Prin atingerea obiectivului principal, cercetarea atinge un set de obiective secundare care sunt rezumate după cum urmează:

- efectul diferiților parametri ai releelor digitale asupra performanței sale.
- efectul calității slabe a puterii, cum ar fi armonicele, abaterea frecvenței și saturația CT asupra algoritmilor de măsurare a releelor digitale precum filtrul Fourier și filtrul Walsh au fost investigate prin utilizarea MATLAB.
- Studiul efectului calității slabe a puterii asupra distanțelor, releele diferențiale și supracurent au fost investigate prin utilizarea DigSILENT și EMTP-ATP.

Obiectivul final al acestei teze este propunerea unei soluții practice pentru comportarea greșită a releelor diferențiale prin adăugarea elementului de varistor de oxid de metal la circuitul secundar al transformatoarelor de curent și dezvoltarea unui algoritm pentru corectarea curenților secundari ai transformatoarelor de curent în cazuri de saturație.

3. REZULTATUL TEZEI

Această teză este organizată în șapte capitole. Această introducere prezintă o explicație a conținutului tezei și această explicație este împărțită în:

- Introducere generală în definirea calitații de putere.
- Un studiu de referință pentru releele digitale.
- Un studiu de referință al efectului semnalelor nedorite asupra performanței diferitelor filtre digitale.
- O explicație a algoritmilor de măsurare folosiți în cercetările anterioare și a algoritmului dezvoltat utilizat în această teză.
- A fost menționat pachetul software utilizat pentru studiul efectului calității puterii asupra performanțelor releelor de protecție, pe lângă o explicație simplificată a soluțiilor propuse.

Capitolul I prezintă toate definițiile, clasificările și problemele legate de calitatea puterii. În cele din urmă, se face o comparație între măsurătorile practice și standardele referitoare la calitatea puterii.

Capitolul II Acest capitol analizează caracteristicile și formula matematică a unor filtre digitale care sunt utilizate în releele digitale, performanța acestor filtre a fost investigată prin aplicarea diferitelor unde de curent pe aceste filtre. Mai mult, acest capitol include o comparație a răspunsurilor între aceste filtre.

Capitolul III prezintă calcule de debit redus și calcule de scurtcircuit pentru un sistem de energie electrică care conține toate nivelurile de tensiune: joasă, medie și înaltă. Valorile rezultate vor fi utilizate în capitolul următor pentru calcularea setărilor releelor supracurent.

Capitolul IV prezintă calculele setărilor releelor utilizate (relee de distanta, relee de supracurent, relee de suprasarcina, relee de frecventa si relee de subtensiune). Toate aceste calcule sunt făcute în conformitate cu standardele internaționale și manualele de utilizare ale releelor folosite.

Capitolul V prezintă comportamentul releelor de distanță sub efectul armonicilor din rețea, și analizează, de asemenea, comportamentul releelor supracurent sub efectul curbei de magnetizare a transformatoarelor de putere care distorsionează formele de undă de curent și tensiune.

De asemenea, acest capitol prezintă un sistem de alimentare care este protejată prin utilizarea de protecție diferențială.

Acest studiu arată că protecția diferențială funcționează atunci când apare o defecțiune în afara zonei de protecție, deoarece saturația transformatoarelor de curent. O soluție practică se realizează prin adăugarea unui element neliniar (MOV) la circuitul secundar al transformatorului de curent. Această soluție practică propusă este realizată și investigată prin utilizarea programului EMTP-ATP.

Capitolul VI a sugerat un nou algoritm pentru detectarea și corectarea curentului secundar distorsionat datorită saturației CT, acest algoritm estimează eșantioanele de secțiune saturată în funcție de eșantioanele secțiunii nesaturate ale semnalului curent, metoda de estimare depinde de metoda diferenței înapoi a lui Newton.

Capitolul VII oferă un rezumat al rezultatelor și concluziilor obținute în timpul realizării acestui studiu. De asemenea, include o listă de lucrări viitoare care conține un set de sugestii pentru sugestii practice, în special posibilitatea dezvoltării și utilizării elementelor neliniare din releele convenționale și digitale, precum și dezvoltarea algoritmilor de măsurare și corecție folosiți pentru a obține performanțele optime ale relee de protecție.

CAPITOLUL 1.

CALITATE DE PUTERE

1.1. INTRODUCERE

Problemele legate de calitatea energiei pot provoca funcționarea defectuoasă sau oprirea proceselor și a echipamentelor, iar consecințele pot varia de la costuri energetice excesive până la întreruperea lucrărilor.

1.2. DEFINIȚII ȘI CLASIFICAREA CALITĂȚII DE PUTERE

Calitatea puterii este definită ca orice abatere de la tensiune, curent și/sau frecvență de la valoarea sa nominală, ceea ce duce la o funcționare defectuoasă a echipamentelor utilizatorului final. Fig.1.1 prezintă semnal de tensiune normală și semnale de tensiune cu perturbații în care:
(a) semnal nominal, de tensiune, (b) tranzitoriu oscilatoriu, (c) armonice, (d) crestături, (e) Sag, (f) umflare, (g) vârfuri și (h) întrerupere.

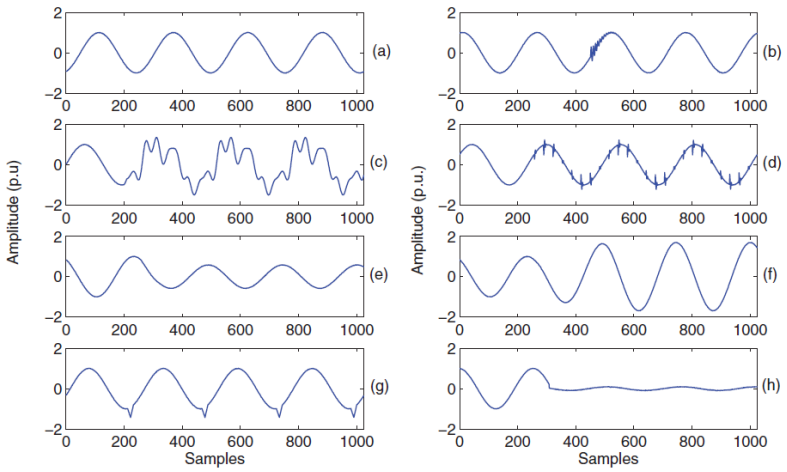


Fig. 1. 1. Exemplu de semnal de tensiune și perturbații

1.3. ANALIZAREA DATELOR DE CALITATE A PUTERII DE PROGRAMUL APLICAȚIILOR PC-urilor

Curbele de acceptare a puterii reglementează nivelul minim de PQ pe care echipamentele ar trebui să funcționeze corect atunci când energia furnizată se încadrează în standarde. Curbele cele mai utilizate sunt curba CBEMA și curba ITIC. Aceste curbe sunt împărțite în două regiuni, așa cum se arată în figura 1.2 și figura 1.3 [11], [14-21]:
-zona admisă: orice perturbare a tensiunii se află în acea zonă nu ar trebui să provoace deloc o defecțiune.
-zona interzisă: orice perturbare a tensiunii se află în acea zonă va provoca defecțiuni.

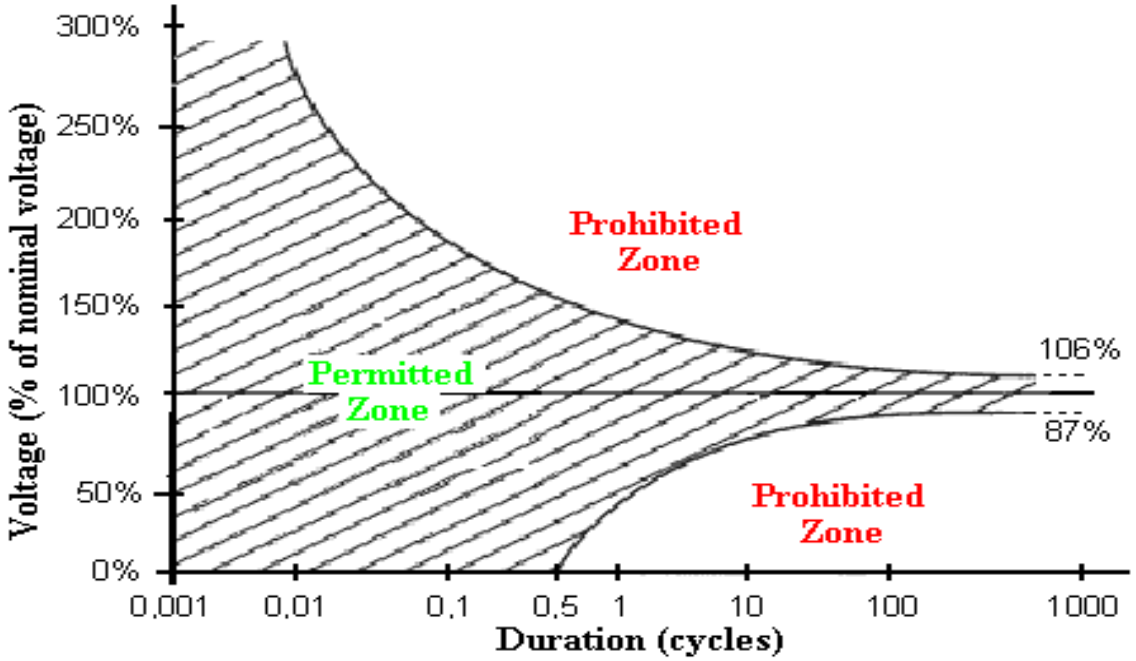


Fig. 1. 2. Curba CBEMA pentru susceptibilitatea echipamentelor

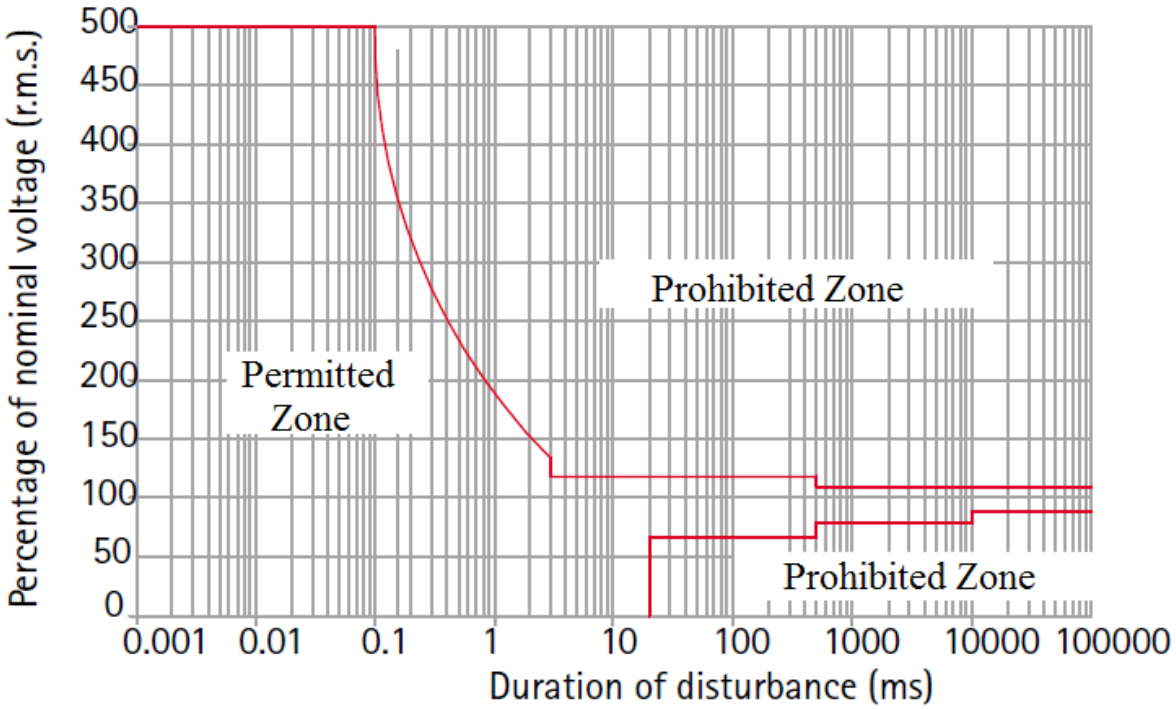


Fig. 1. 3. Curba ITI pentru susceptibilitatea echipamentelor

1.3. MĂSURĂRI PRACTICE A CALITĂȚII DE PUTERE

Am executat unele măsurători la ferma fotovoltaică BARAGAN folosind FLUKE SET timp de o săptămână; descărcând datele folosind versiunea 4.3.1 a software-ului Power Log. Aceste măsurători au fost înregistrate în perioada 12/12/2014 2:54:04 PM până la 19/12/2014 9:44:04 AM.

Cazul 1. Variații de frecvență de putere

Figura 1.4 prezintă abateri de frecvență, valoarea maximă a frecvenței este de 50.039Hz, valoarea minimă este de 49.952 Hz, iar aceste valori sunt în limitele acceptabile.

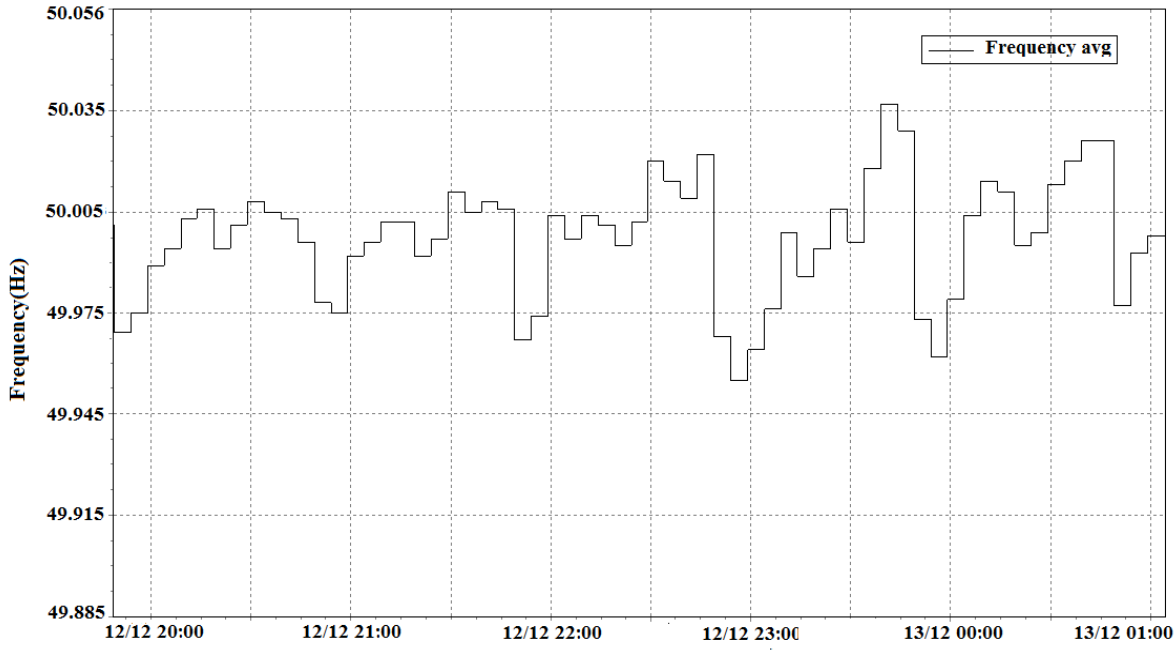


Fig. 1. 3. Abateri de frecvență

Cazul 2. Fluctuație de tensiune

Figura 1.5 prezintă fluctuații de tensiune, valoarea maximă a tensiunii pentru trei faze este de 0,330%, valoarea minimă de 0,125%, iar aceste valori sunt în limitele acceptabile.

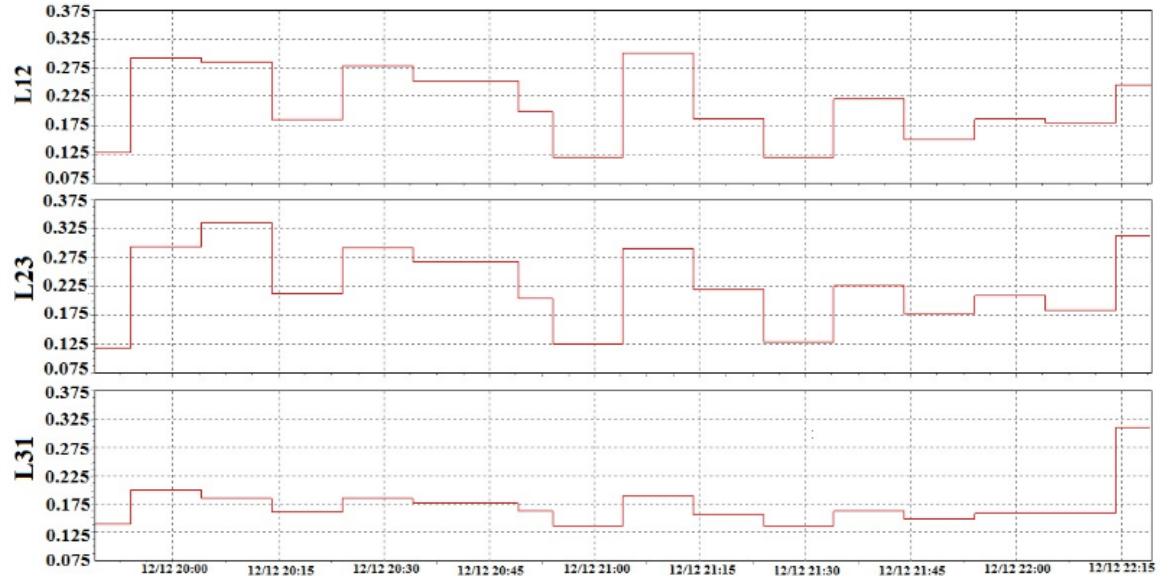


Fig. 1. 4. Fluctuație de tensiune

Cazul 3. Supra tensiune

Figura 1.6 prezintă o formă de undă a tensiunii înregistrată de 200ms, observăm că valoarea maximă a tensiunii este de 20950V și această valoare este în limitele acceptabile.

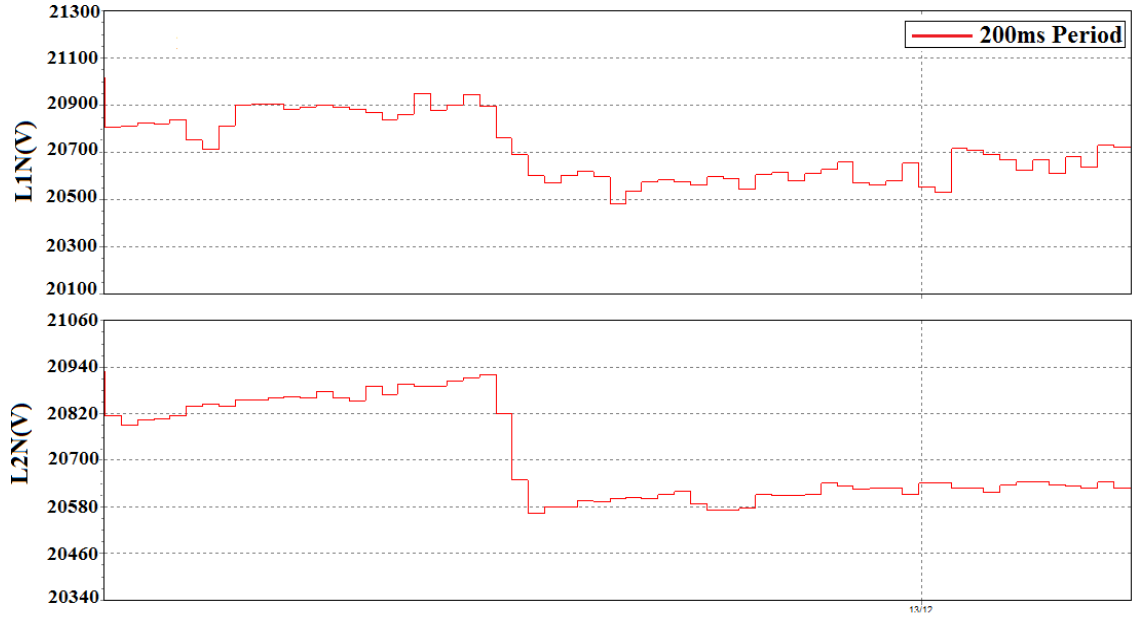


Fig. 1. 5. Forma de undă la supra-tensiune

Cazul 4. Armonicele

Figura 1.7 prezintă o distorsiune armonică totală în procente (THD%). Observăm că valoarea maximă a distorsiunii armonice totale este de 3,7% și această valoare se încadrează în limitele acceptabile.

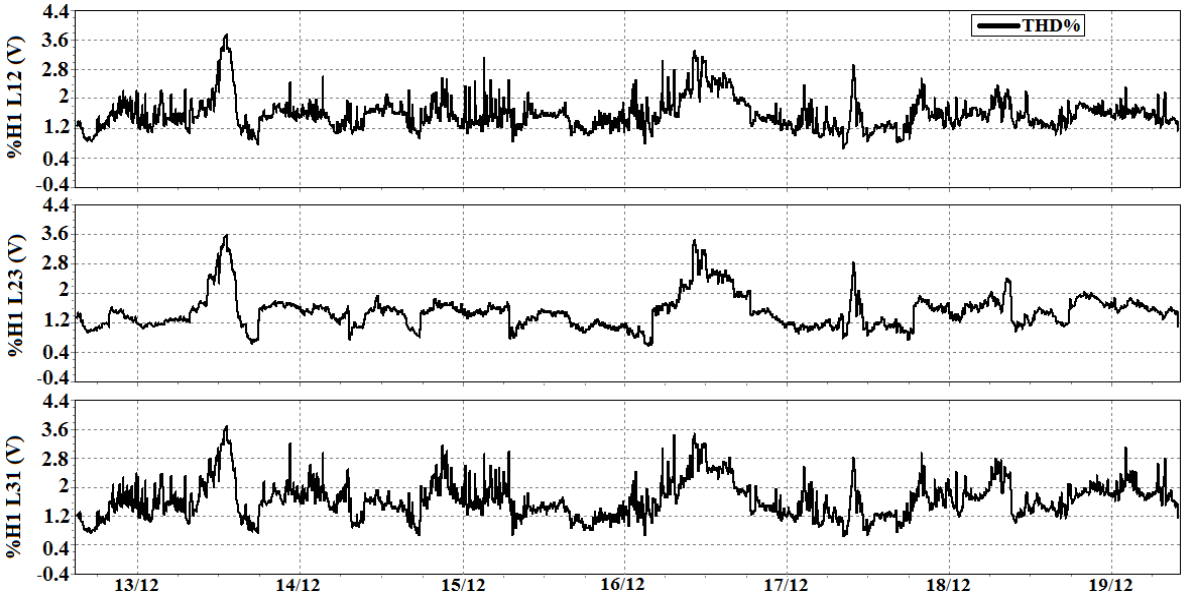


Fig. 1. 6. Distorsiune armonică totală

Cazul 5. Variaţia Tensiunii (Dips și Swells)

Figura 1.8 prezintă puncte de scurgere, remarcăm că există două puncte de scurgere și că punctele situate în zona permisă conform figura 2.3 și figura 1.8.

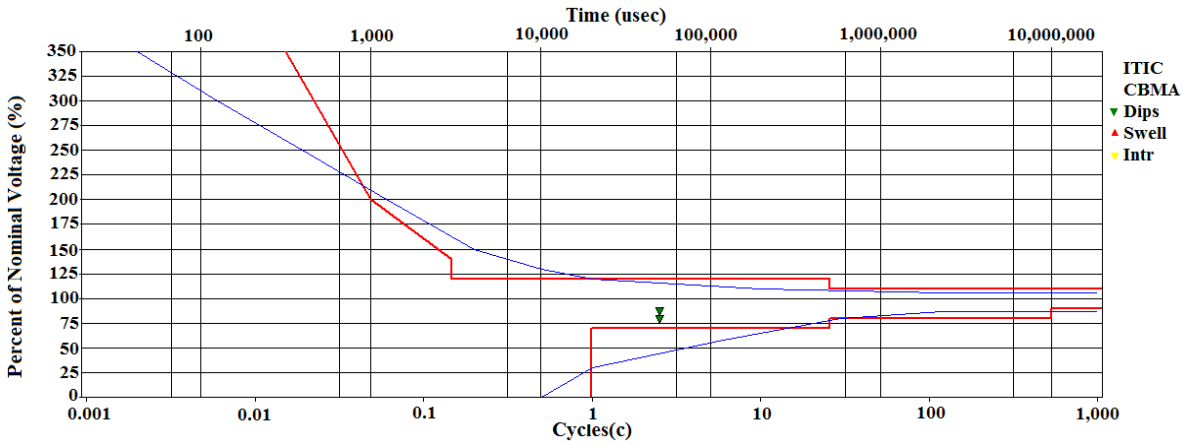


Fig. 1. 7. Puncte de scurgere

1.4. CONCLUZIE

- Instrumentele analitice beneficiază de un nivel crescut de monitorizare și caracterizare. Modelele trebuie îmbunătățite și instrumentele în sine ar trebui să devină mai ușor de utilizat.
- Calitatea energiei electrice din instalațiile industriale a devenit un domeniu important de îngrijorare datorită impactului său asupra costului energiei și a fiabilității rețelelor de alimentare și de exploatare a productivității în ansamblu.

CAPITOLUL 2.

RELEELE DIGITALE DE PROTECTIE A SISTEMELOR DE PUTERE

2.1. INTRODUCERE

Releele de protecție reprezintă o importanță deosebită în sistemele de energie electrică, ele sunt responsabile pentru orice defecțiune ce poate apărea în orice componentă a acestor sisteme începând de la generare, transport, distribuție și utilizare, după ce se simte defecțiune și defect, astfel încât acestea comandă întreruptoarelor să izoleze selectiv elementul defect.

2.2. STRUCTURA RELAȚIEI DIGITALE

Figura 2.1 prezintă structura principală a releului digital.

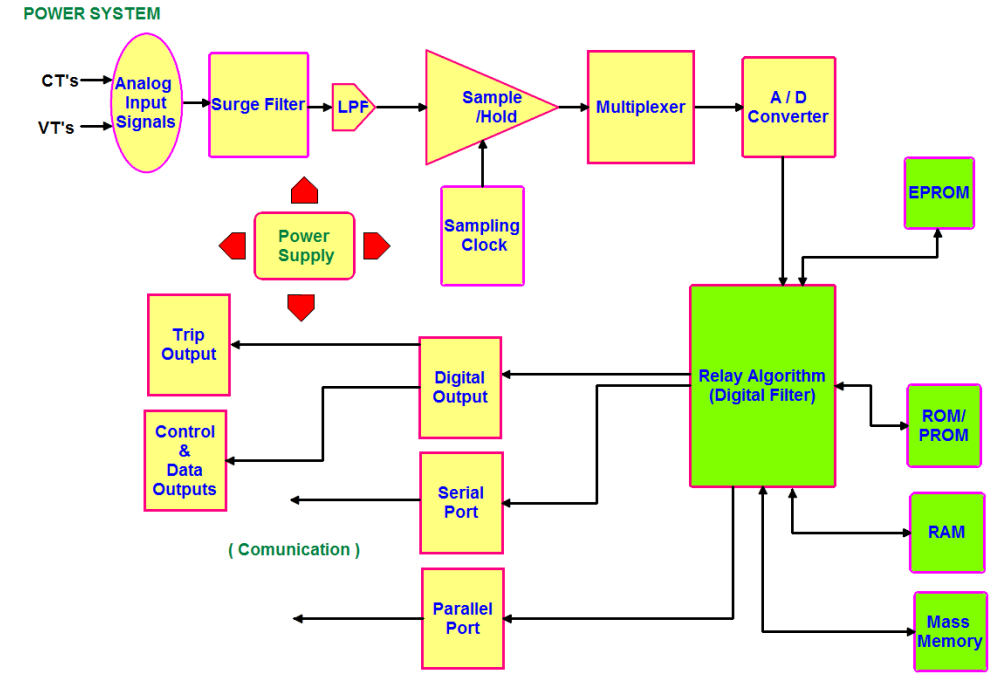


fig. 2. 1. Schema bloc de funcționare tipică a unui releu digital

2.3. FILTRE DIGITALE FOLOSITE IN RELEELE DIGITALE

Această secțiune analizează caracteristicile și formula matematică a unor filtre digitale care sunt utilizate în releele numerice.

2. 3.1. Filtrele Digitale - releul cu un element

Releul cu un element folosește doar un semnal de intrare fie curent, fie tensiune. Multe filtre binecunoscute folosesc un singur semnal de intrare pentru calcul, precum filtrele Fourier, Walsh și Kalman.

2.3.1.1. Filtrele Fourier

Filtrele Fourier sunt cele mai utilizate filtre în releele digitale. Componenta fundamentală poate fi calculată prin următoarele ecuații [35], [40], [81], [83], [84], [85], [86], [87], [88]:

$$\hat{Y}_S = \frac{2}{K}\sum_{K=1}^{K} y_k \, sin(k\theta) \qquad (2.4)$$

$$\hat{Y}_C = \frac{2}{K}\sum_{K=1}^{K} y_k \, cos(k\theta) \qquad (2.5)$$

$$\theta = \frac{2\pi}{k} = 2\pi\frac{f_0}{f_s} \qquad (2.6)$$

Unde:

$\hat{Y}_S$: componenta imaginară a semnalului de intrare yk;

$\hat{Y}_C$: componenta reală a semnalului de intrare yk;

θ: unghiul de frecvență fundamental între eșantioane [85];

k: numărul eșantioanelor pe ciclu;

f0: frecvența sistemului (50 sau 60 Hz);

fs: frecvența de eșantionare.

Amplitudinea filtrului Fourier este calculată prin ecuația:

$$|Y| = \sqrt{\left(\hat{Y}_S\right)^2 + \left(\hat{Y}c\right)^2} \qquad (2.7)$$

Pentru a analiza performanța acestui filtru, testăm numărul de semnale de intrare, ca în cazurile următoare:

Cazul 1: semnalul de intrare yi conține doar frecvența fundamentală.

$$y_i = 22 * sin(2\pi ft) \qquad (2.8)$$

Figura 2.2 afișează semnalul de intrare și ieșirea a filtrului Fourier (DFT).

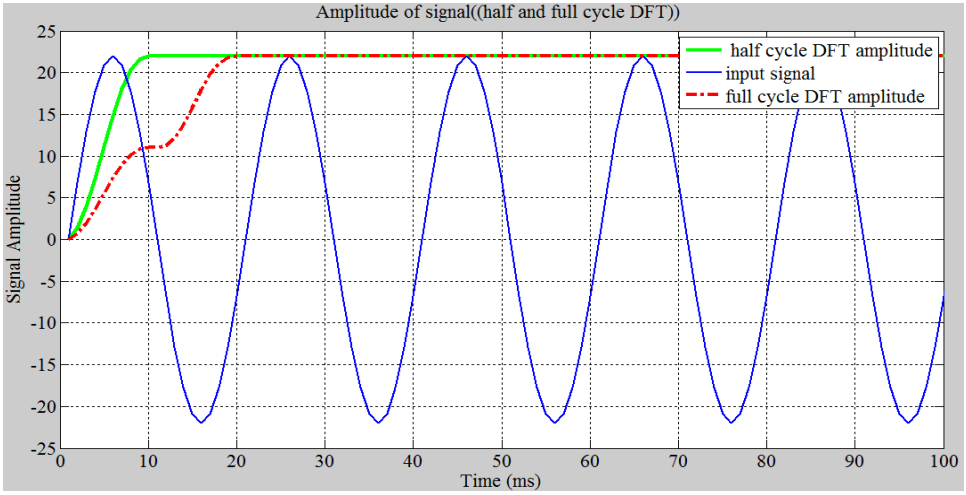


Fig. 2. 2. Semnalul de intrare și amplitudinea rezultată prin intermediul filtrului Fourier

Din figura anterioară, jumătatea ciclului filtrului are nevoie de mai puțin timp decât ciclul complet pentru a calcula amplitudinea semnalului de intrare, dar precizia este identică pentru ambele, aceste calcule se fac la frecvența fundamentală.

Cazul 2: semnalul de intrare conține doar armonice de ordin 1, 3, 5, 7, 9, 11 așa cum se arată în tabelul 2.1

Tabelul 2. 1 Conținutul armonicilor semnalului de intrare

Ordin armonica “n”	% of true RMS
1’fundamentală’	22
3	11
5	6
7	9
9	8
11	7

Figura 2.3 arată semnalul de intrare care conține armonice impare și amplitudinea semnalului de intrare (valoarea r.m.) după calcularea acestuia la jumătate / ciclu complet DFT.

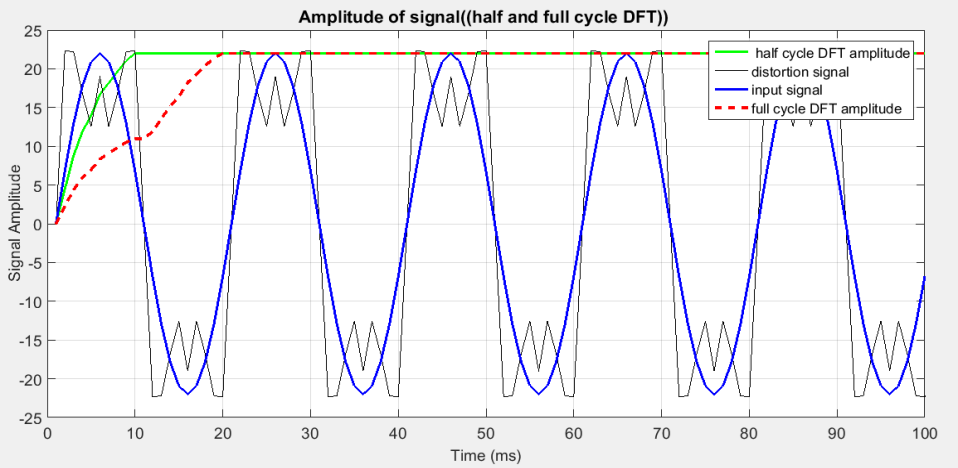


Fig. 2. 2. Semnal de intrare și amplitudinea acestuia rezultată cu ajutorul filtrelor Fourier în cazul 2

Din figura anterioară, se poate observa că DFT elimină toate armonicele impare, astfel încât amplitudinea semnalului este egală cu amplitudinea componentei fundamentale, iar performanța filtrului nu este afectată de prezența armonicilor impare.

Cazul 3: Uneori a apărut o ușoară deplasare a frecvenței fundamentale în comparație cu frecvența nominală (f = 50 Hz).

$$y_i = 22 * sin(2\pi f t) \qquad (2.9)$$

f=49.5 Hz

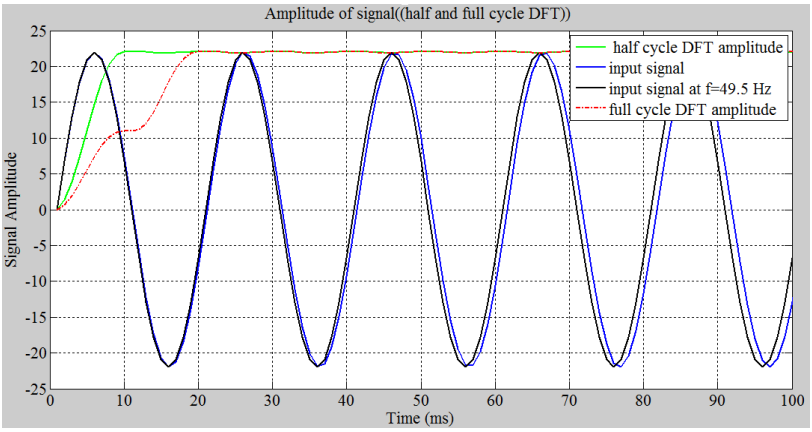


Fig. 2. 3. Semnal de intrare și amplitudinea rezultată prin intermediul filtrelor Fourier

Din figura 2.2, se poate observa clar că, în cazul schimbării frecvenței fundamentale, se vor produce ușoare modificări la ieșirea DFT (ciclu complet și semiciclu), iar aceste modificări sunt sporite odată cu creșterea schimbare de frecvență.

Cazul 4: Saturația transformatoarelor de curent

Figura 2.5 prezintă undele de curent descărcate de la înregistratorul de perturbații din Centrala termică Banias; unda înregistrată prezintă o saturație severă a transformatorului de curent.

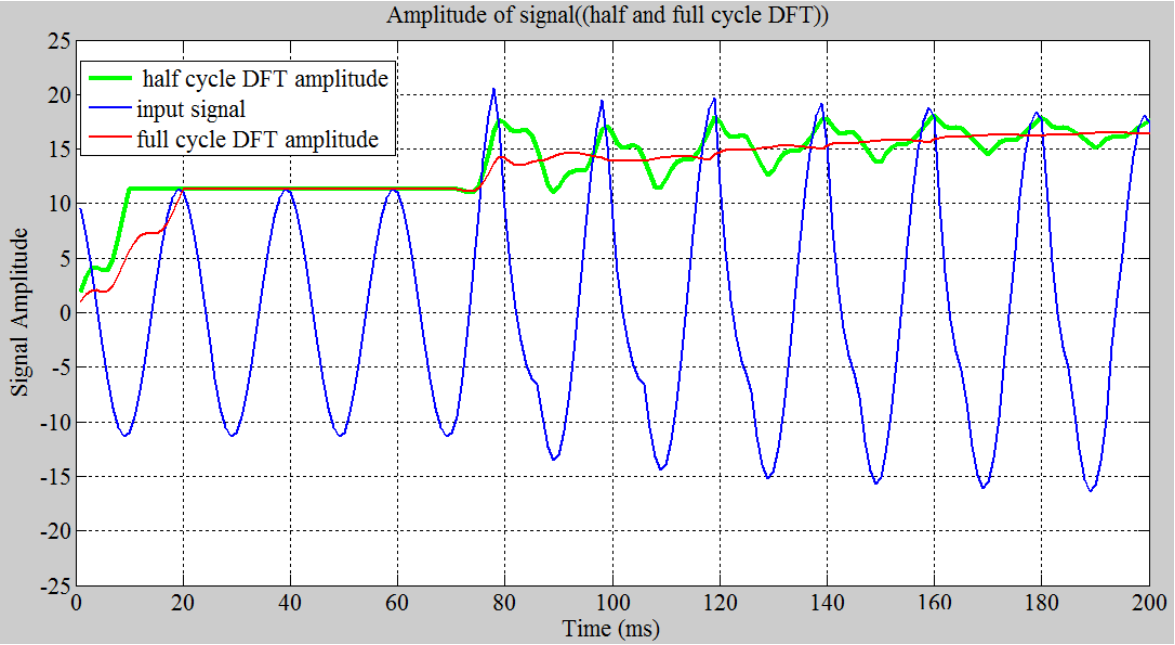


Fig. 2. 5. Curentul de undă saturat și amplitudinea acestuia prin utilizarea DFT

După cum s-a arătat, răspunsul ciclului complet DFT este mai bun decât ciclul DFT, dar precizia ciclului complet DFT este mai bună decât jumătatea ciclului DFT.

Cazul 5: Semnalul de intrare conține armonii impare și uniforme, așa cum se arată în figura 2.6. Toate încărcările neliniare, transformatorul de putere (cazul de saturație) și elementele electronice de putere sunt considerate surse principale de distorsiune a armonicilor.

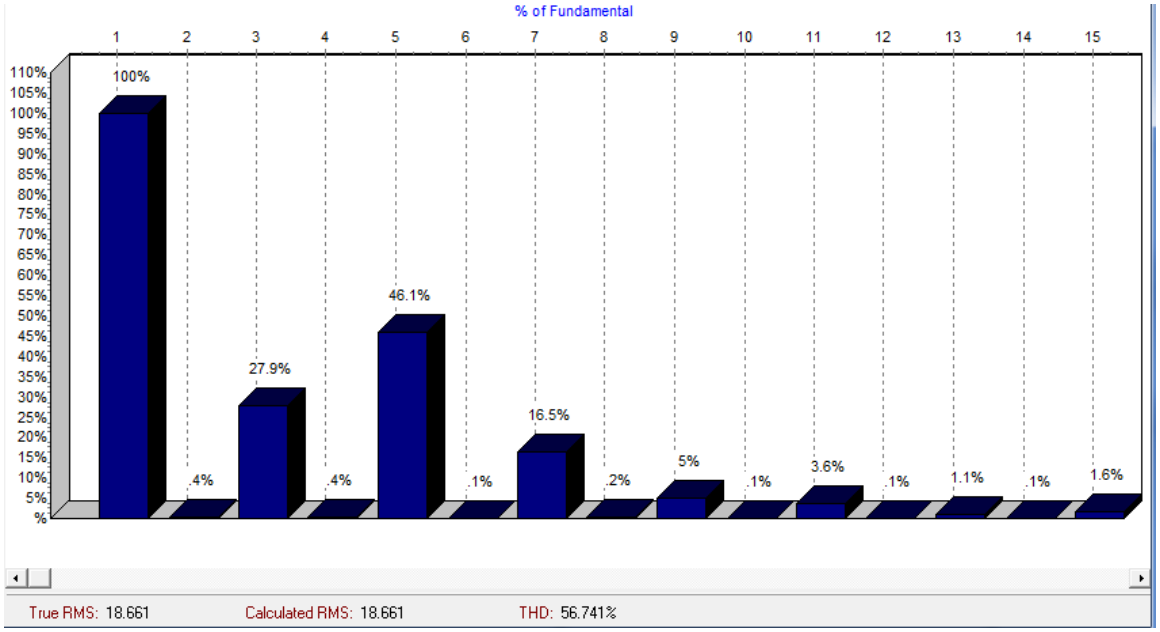


Fig. 2. 6. Analiza armonicilor semnalului de intrare prin utilizarea Micom S1 Agile

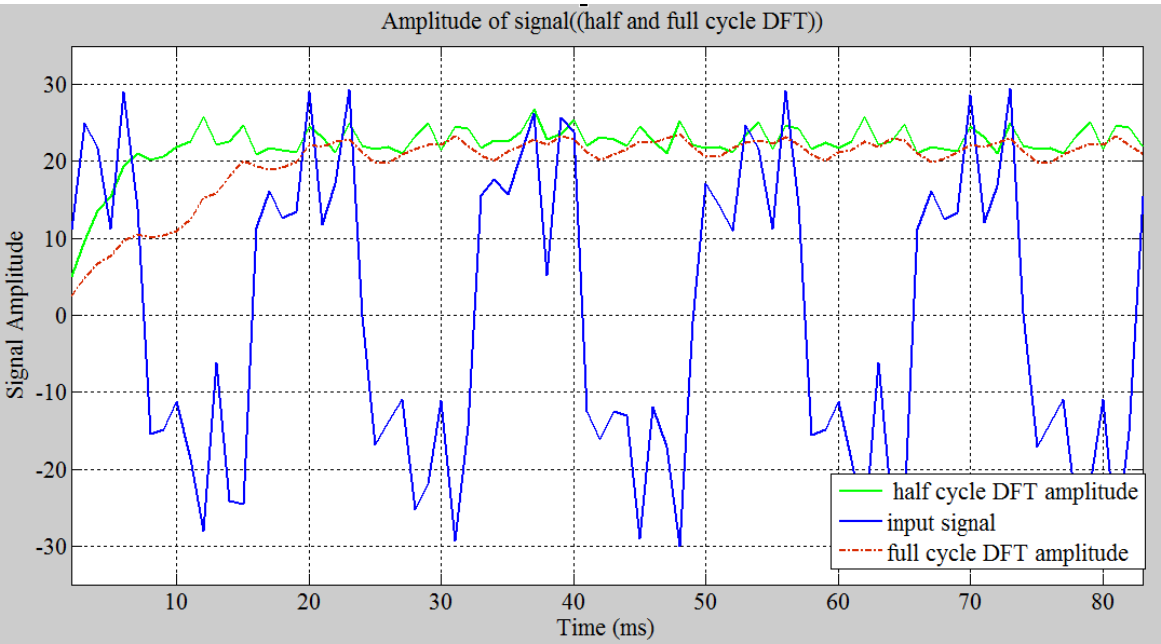


Fig. 2. 7. Semnalul de intrare și amplitudinea sa rezultată cu ajutorul filtrului Fourier

Performanța DFT este instabilă în aceste cazuri, astfel încât utilizarea filtrului anti-alianța este importantă pentru a atenua cât mai mult efectul armonicilor.

2.4. DISCUTII SI CONCLUZII

- Filtrele Fourier cu ciclu complet au o capacitate bună de a elimina Componentul DC și toate armonicile ordinelor întregi.
- DFT cu jumătate de ciclu îmbunătățește viteza releului în detrimentul preciziei, în timp ce DFT cu jumătate de ciclu îmbunătățește precizia releului în detrimentul vitezei.
- Opțiunea de alegere a oricăror filtre depinde de structurile sistemului de protecție și de considerentele economice.

CAPITOLUL 3

CALCULUL SCURTCIRCUITELOR PENTRU SISTEMUL DE PUTERE STUDIAT

3.1. INTRODUCERE

Pentru setarea releelor de protecție, trebuie să facem calcule în scurtcircuitele sistemului de energie studiat. În acest capitol vom face calcule de scurtcircuit la o parte a rețelei siriene, care conține toate nivelurile de tensiune; joasă, medie și înaltă. Acest calcul se va face utilizând software-ul Power Factory (DigSILENT).

3.2. SISTEMUL DE ALIMENTARE ELECTRICĂ A COMPANIEI DE RAFINERIE BANIAS ȘI SISTEMUL ELECTRIC SIRIAN

Fig. 3.1 afișează diagrama cu o singură linie a sistemului de energie studiat, DigSILENT sau software-ul fabricii electrice este utilizat pentru a realiza acest studiu.

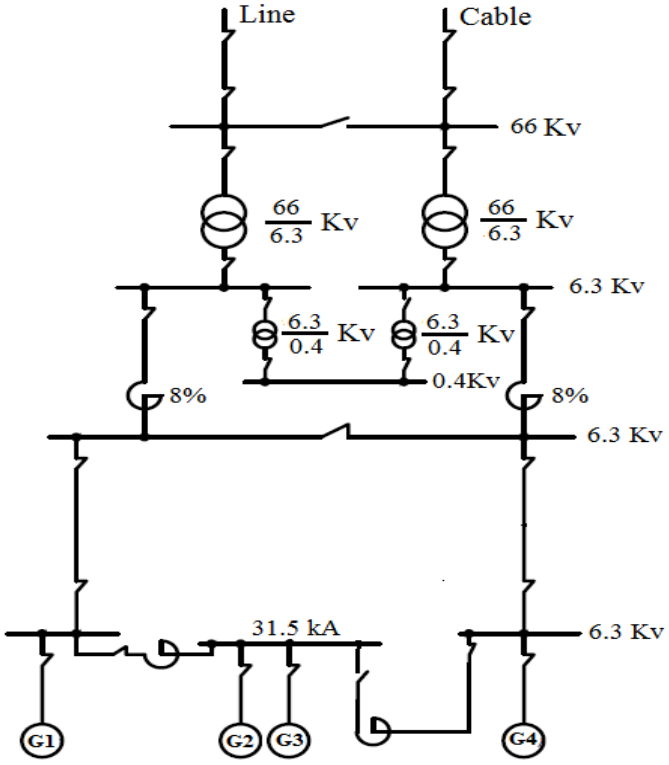


Fig. 3. 1. Monofilara sistemului energetic studiat

3.3. CALCULUL SCURTCIRCUITULUI CONFORM IEC 60909

3.3.1. Linia de cablu de 66 kV este conectată

Starea inițială:

- Un cablu de intrare de 66 kV este conectat.
- Cuplajul 66 kV este conectat, transformatoarele de remorcare 1BAT10 (35MVA) și 2BAT10 (35MVA) sunt activate.
- Reactoarele sunt luate în considerare între substație și stația principală.
- Patru generatoare care funcționează paralel, cuplurile stației principale sunt ON.
- Cuplajul substației este deschis.

3.3.1.1. Comparație între valorile maxime ale curentului de scurtcircuit în funcție de locația sa în sistem

Tabelul 3.1 conține valori maxime de scurtcircuit pe toate barele magistrale ale sistemului de alimentare, la care este conectată o linie de intrare de 66 kV.

Tabelul 3. 1 Comparații ale valorilor maxime de scurtcircuit

Name	Ik"	Sk"	ip	Ib	Sb	Ik	Ith
	kA	MVA	kA	kA	MVA	kA	kA
1BAT 6kV	43.19198	448.86	115.4611	42.26578	439.2389	43.19198	45.0112
2 BAT 6kV	39.91951	414.85	106.6397	39.00005	405.3004	39.91951	41.58045
AEA-W11	14.13055	1615.33	33.09405	14.02141	1602.863	14.13055	14.29719
AEA-W12	14.13055	1615.33	33.09405	14.02141	1602.863	14.13055	14.29719
BBA-1	30.29613	330.58	81.3857	28.4528	310.4747	30.29613	31.69449
BBA-2	29.28696	319.57	78.53089	27.44597	299.4882	29.28696	30.59211
BFT10	7.520071	5.210	20.27686	7.520071	5.210058	7.520071	7.894306
MS-A1	28.96103	316.02	75.96429	26.84474	292.9276	28.96103	29.86929
MS-B2	20.93285	228.41	54.83407	16.70357	182.2681	20.93285	21.57774
MS-C2	28.14387	307.10	73.87409	26.02764	284.0115	28.14387	29.03524

3.3.1.2. Comparație între valorile minime ale curentului de scurtcircuit în funcție de locația sa în sistem

Tabelul 3.2 conține valori minime de scurtcircuit pe toate barele magistrale ale sistemului de alimentare, la care este conectată o linie de intrare de 66 kV.

Tabelul 3. 2 Compararea valorilor de scurtcircuit

Name	Ik"	Sk"	ip	Ib	Sb	Ik	Ith
	kA	MVA	kA	kA	MVA	kA	kA
1BAT 6kV	35.18	365.69	92.91	34.44	357.99	35.189	36.39
2 BAT 6kV	32.56	338.42	85.90	31.82	330.77	32.561	33.67
AEA-W11 66kV	8.218	939.50	19.58	8.134	929.84	8.218	8.32
AEA-W12 66 kV	8.218	939.50	19.58	8.134	929.84	8.218	8.36
BBA-1	26.15	285.43	69.59	24.63	268.68	26.15	27.17
BBA-2	25.24	275.52	67.03	23.71	258.79	25.24	26.19
BFT10	6.794	4.707	18.31	6.794	4.707	6.794	7.131
MS-A1	25.15	274.51	65.32	23.38	255.15	25.15	25.85
MS-B2	18.98	207.16	49.69	15.43	168.47	18.98	19.56
MS-C2	24.41	266.39	63.44	22.63	247.02	24.41	25.09

3.4. DISCUȚII REZULTATE

Rezultatele anterioare ale simulării sunt necesare pentru a proiecta sistemul de protecție și capacitatea întrerupătorilor pentru fiecare secțiune a sistemului de alimentare studiat.

Din rezultatele de simulare, se observă pentru primul caz (liniile de intrare Tow 66 kV sunt conectate (PP Hama și PP Banias sunt conectate) că majoritatea valorilor curenților de scurtcircuit sunt în afara limitelor (40 kA și 31,5 kA) cu o valoare egală cu dublul valorii maxime acceptate, astfel încât acest caz este imposibil în aplicațiile practice.

Pentru cel de-al treilea caz (un cablu de intrare de 66 kV este conectat), se observă că unele valori ale curenților de scurtcircuit sunt în afara limitelor (40 kA și 31,5 kA), iar altele sunt în limite, astfel încât este foarte important să studiem cu exactitate protecția sistemului de alimentare pentru a evita daunele uriașe ale componentelor electrice ale sistemului de energie electrică în timpul diferitelor perturbații.

Aceste valori ale curenților minori de scurtcircuit vor fi utilizate în capitolul următor pentru proiectarea și setarea sistemului de releu de protecție.

CAPITOLUL 4.

EVALUAREA ȘI VERIFICAREA SETĂRILOR RELEELOR DE PROTECȚIE PENTRU SISTEMUL DE PUTERE STUDIAT

4.1. INTRODCERE

Releele de protecție (AFA01, AFA02, AFA03, AFA04, releul de distanta PPHama și releul de distanta PPBanias) sunt proiectate pentru protecția principalelor părți ale liniilor de 66 kV și bare (AEA-W11 și AEA-W12) și ale părții primare ale transformatoarelor de putere (1BAT10) și 2BAT10), intrări și ieșiri pentru liniile de 6,3 kV sunt protejate de releele BBA02, BBA03, BBA04 și BBA05. Figura 4.1 prezintă sistemul releului de protecție utilizat pentru sistemul de energie electrică al rafinăriei Banias - Siria.

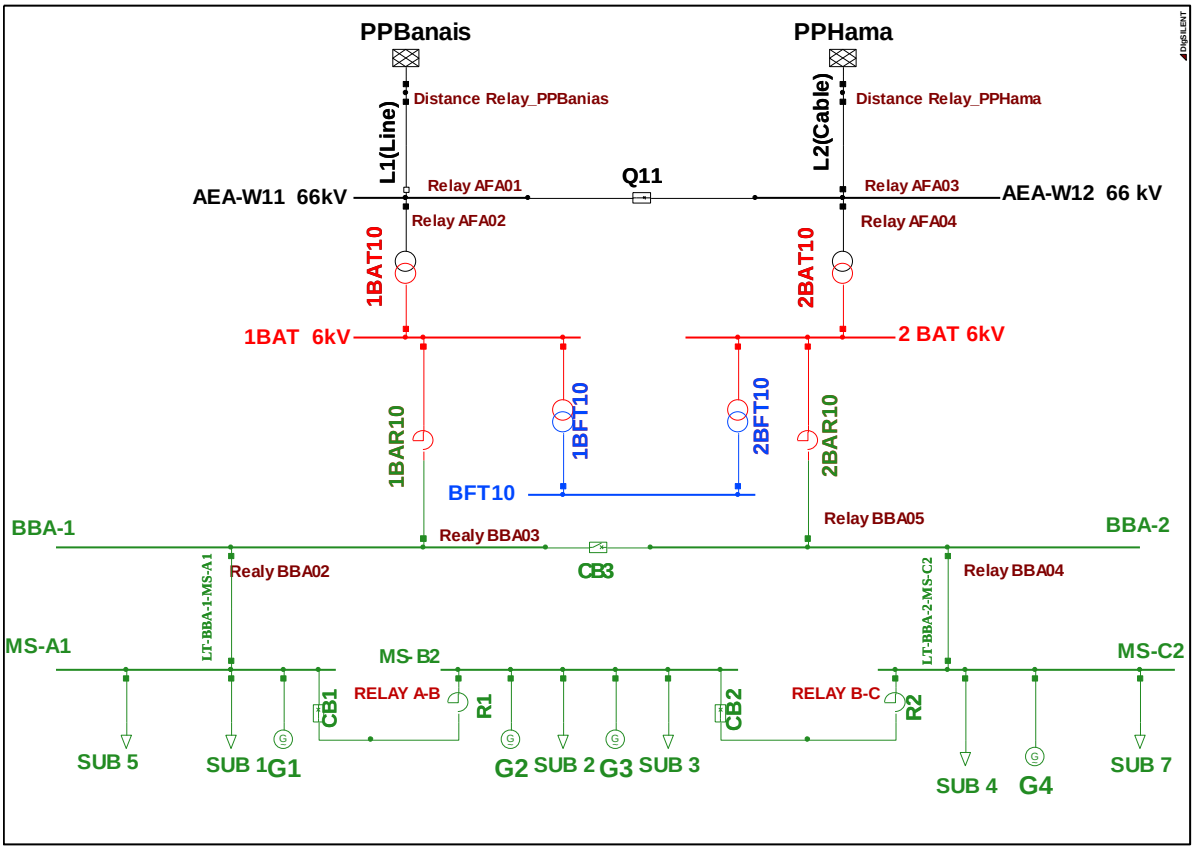


Fig. 4. 1. Distributia releelor pentru diferite elemente ale sistemului de putere studiat

4.2. VERIFICAREA PERFORMANŢEI SISTEMULUI DE RELEE ÎN DIFERITE CAZURI DE DEFECȚIUNI

4.2.1. Scurtcircuit trifazat pe linia de cablu 66 Kv

Alimentatorul PPHama și patru generatoare sunt conectate, sunt luate în considerare sistemele de excitație ale celor patru generatoare. Defectul este executat la linia de cablu dintre PPHama și Bus-Bar AEA-W12, la distanța de 3,23 Km față de locația Distanță Releu_AFA03, așa cum se arată în figura 4.2.

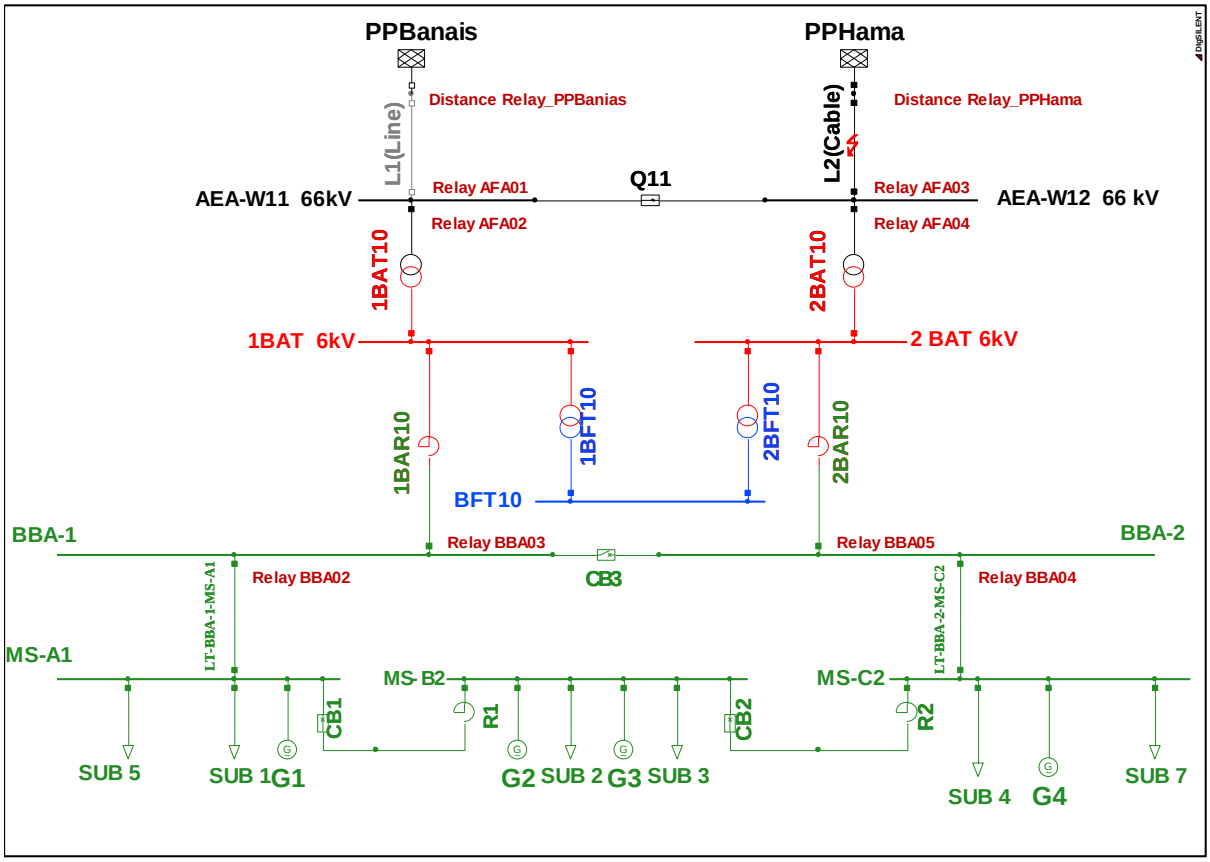


Fig. 4. 2. Defecțiune trifazată la distanță 3,32 Km față de Releul Distanței_PPHama

Dispozitivului Siemens SIPORTEC Modelul 7SA6125 (releu de distanță numerică) este utilizat pentru a simula Releul Distanță_PPHama și Releul Distanță_AFA03. Din figura 4.3 se observă că săgeata este situată în a patra zonă de impedanță, parametrii defecțiunii sunt: impedanța defectului z1 = 0.271pri.ohm și timpul de întârziere = 0.94s, acest răspuns este compatibil cu setările releului Distance_PPHama.

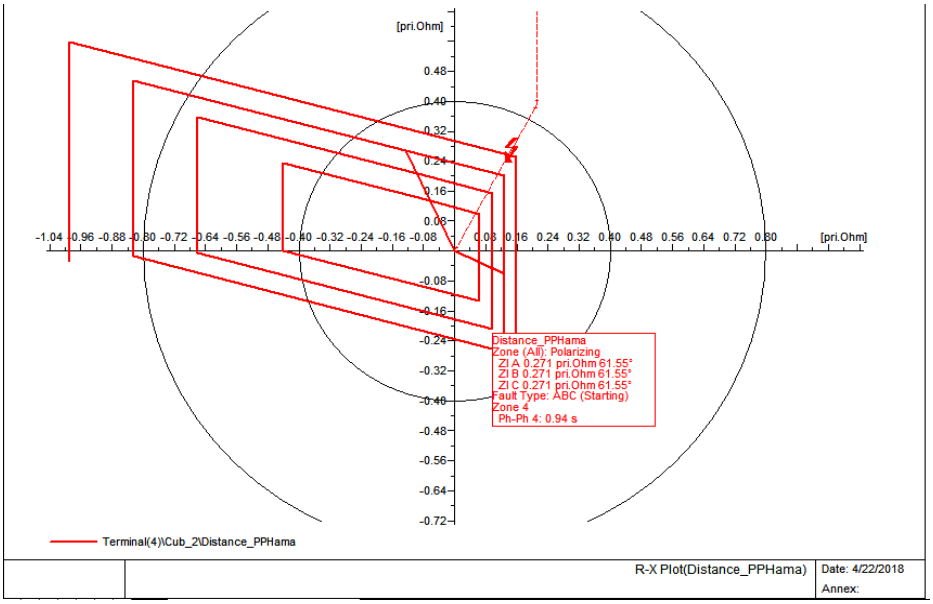


Fig. 4. 3. Caracteristica parcelei R-X a releului Distanță_PPHama

Din figura 4.4 se observă că defectul este situat în a doua zonă de impedanță, parametrii defecțiunii sunt: impedanța defectului z1 = 0.174pri.ohm și timpul de întârziere = 0.44s, acest răspuns este compatibil cu setările releului DistanțăAA003.

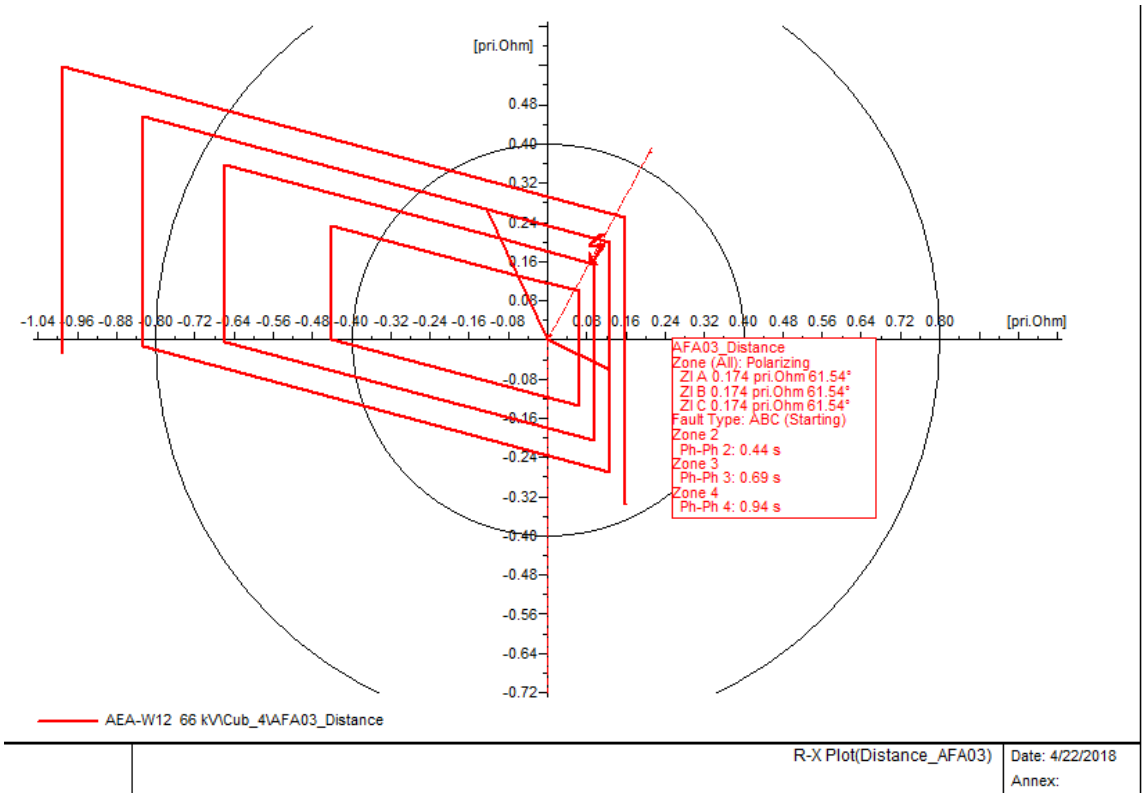


Fig. 4. 2. Caracteristica parcelei R-X a releului Distanță_ AFA03

Figura 4.5 arată că releul de supracurent AFA03 va funcționa la curent I = 1223 A și întârziere de timp t = 3.289 S.

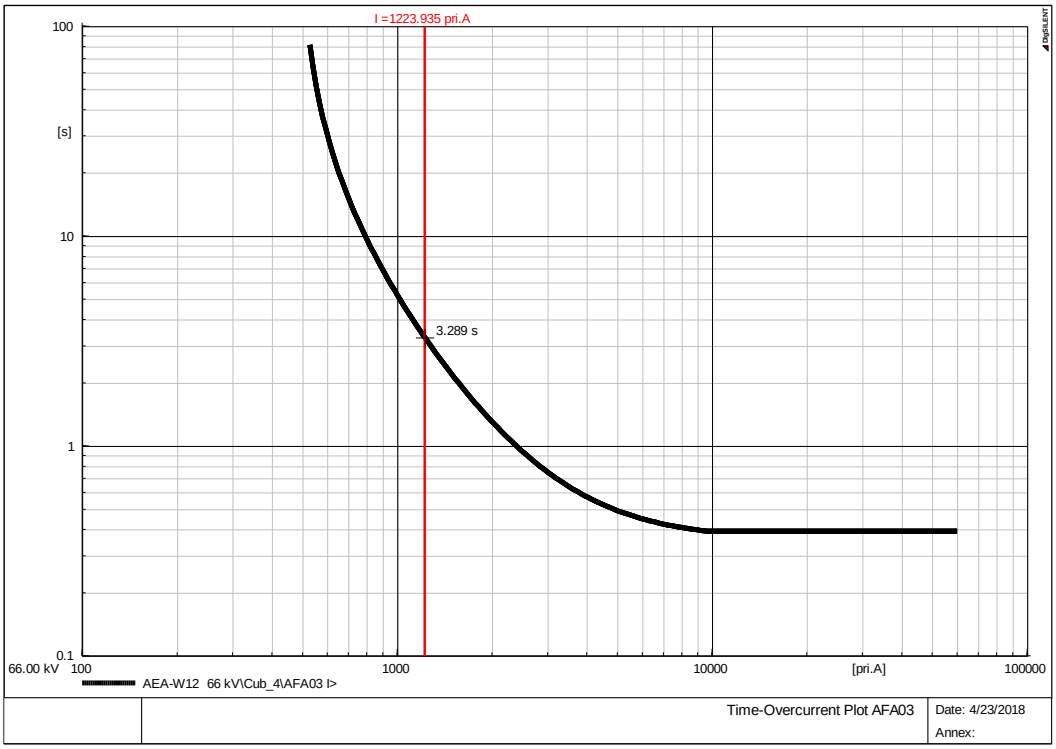


Fig. 4. 3. Releu de supracurent a parcelei AFA 03

Figura 4.6, arată că releul de supracurent AFA02 va funcționa la curent I = 584 A și întârziere de timp t = 7.265 S.

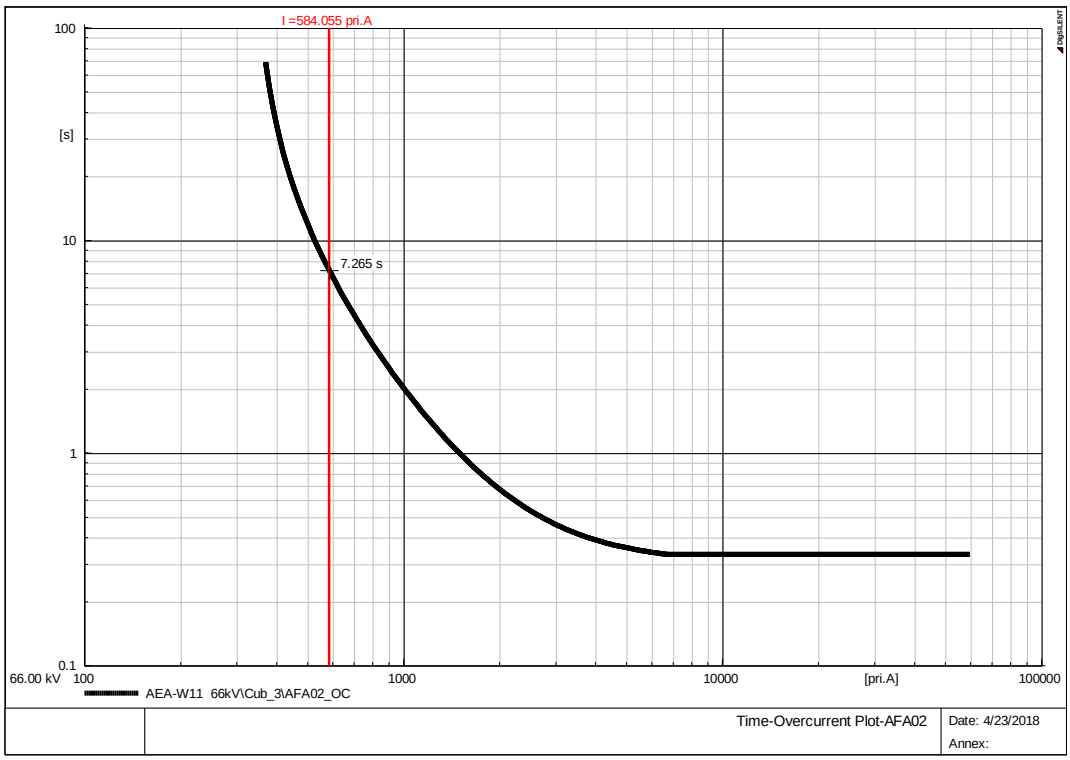


Fig. 4. 4. Timpul de supracurent a releului parcelei AFA 03

Figura 4.7 arată că releul de supracurent BBA03 va funcționa la curentul I = 6422 A și întârzierea de timp t = 5.880 S.

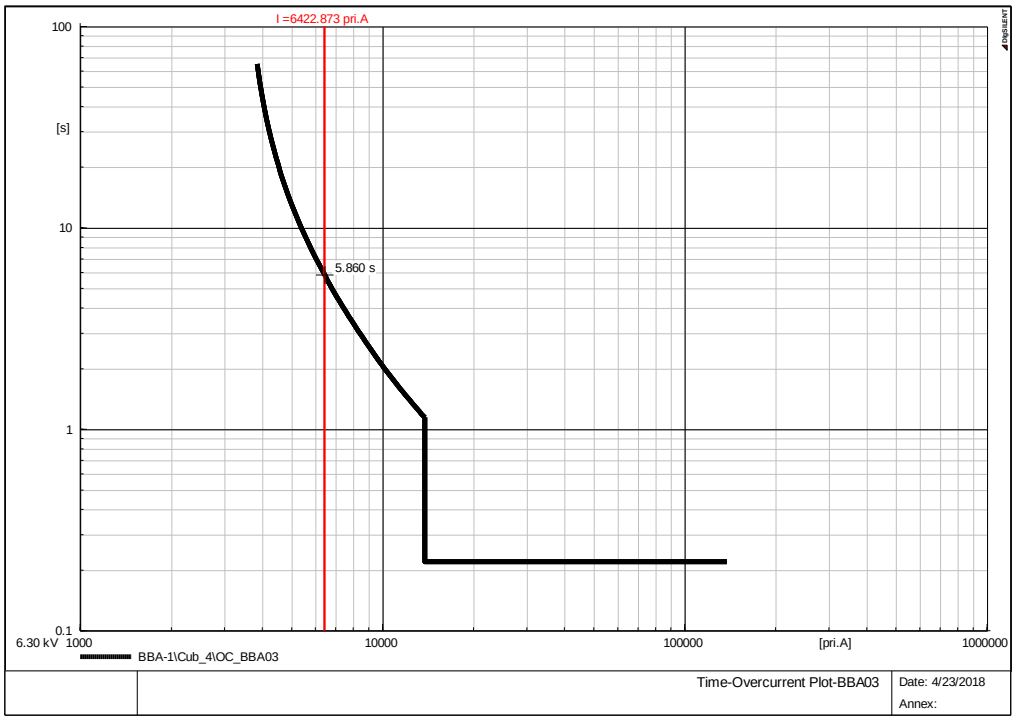


Fig. 4. 5. Timpul de supracurent a releului parcelei BBA03

Figura 4.8 arată că releul de supracurent BBA02 va funcționa la curentul I = 6422 A și întârzierea de timp t = 2.930 S.

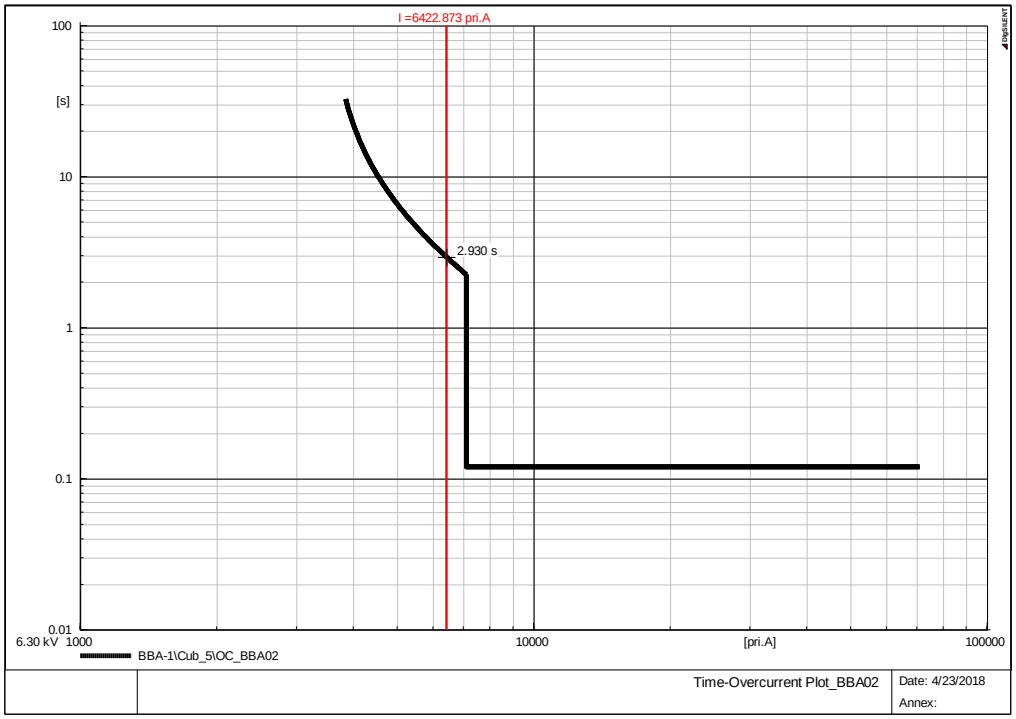


Fig. 4. 6. Timpul de supracurent a releului parcelei _ BBA02

În acest caz, putem vedea că Releul de distanța_AFA03 Siemens 7SA6125 va funcționa și va izola defectul, deoarece are cel mai mic timp de întârziere.

4.3. CONCLUZIE

Setările de protecție au fost calculate și testate prin efectuarea defecțiunilor din toate părțile sistemului electric.

După cunoașterea atentă a performanței sistemului de relee de protecție și a comportamentului acestuia sub efectul diferitelor defecțiuni, putem face un studiu atent al impactului calității slabe a puterii asupra sistemului de protecție prin compararea rezultatelor în ambele cazuri.

CAPITOLUL 5.

EFECTUL CALITATII SLABE A PUTERII IN RELEELE DIGITALE

5.1. INTRODUCERE

Efectul armonizării și saturației transformatoarelor de curent asupra releelor de distanță și ale releului de supracurent au fost cercetate în acest capitol. Acest studiu se va face folosind un program de simulare computer Factory DigSILENT 15.1 (PF).

Efectul saturației transformatorului de curent pe releele diferențiale se va face prin utilizarea sistemului electric cu trei capete. Acest studiu se va face folosind software-ul EMTP-ATP.

O soluție practică a fost sugerată și testată folosind EMTP-ATP, soluția practică se face prin adăugarea unui element de varistor de oxid de metal pe partea secundară a transformatorului de curent.

5. 2. EFECTUL ARMONICILOR PRIVIND PERFORMANŢA RELEE DIGITALE

Pentru a studia efectul armonicilor asupra releelor de distanță ale liniei de cablu (L2) din figura 5. 1, vom face simularea surselor armonice.

În DigSILENT, sursele armonice pot fi fie surse de curent, fie de tensiune [95]. Pentru a genera armonice, vom folosi următoarele surse în acest scop [95]:

- Sarcinile generale precum SUB 7, SUB 3 și SUB 5 vor fi modelate ca surse de curent armonice.
- Surse de tensiune.
- O parte din Sistemul general electric sirian precum PPHama sau PPBanias va fi modelată ca surse de tensiune armonică, în acest caz spectralul injecțiilor armonice pentru sursele de tensiune sunt introduse direct pe pagina elementului însuși prin tabelul de tensiune armonică/de calitate/putere.

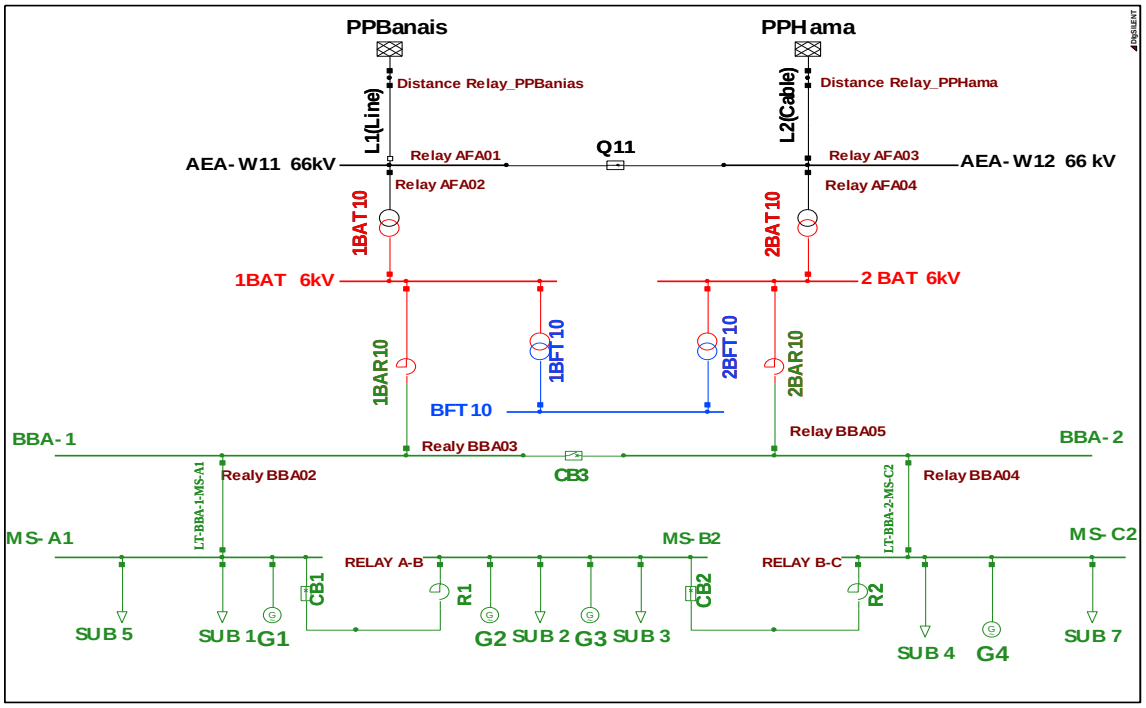


Fig. 5. 1. Schema cu o singură linie a sistemului electric de alimentare conectat

După executarea fluxului de încărcare armonică pentru toate frecvențele, vedem că releul de distanța PPHama va acționa în prima zonă și va trimite un semnal de întrerupere către întrerupătorul pentru a izola defectul, așa cum se arată în figura 5.2, de fapt nu avem nicio defecțiune, ci fluxul de armonice în sistemul electric de electricitate provoacă acest comportament greșit al releului la distanță.

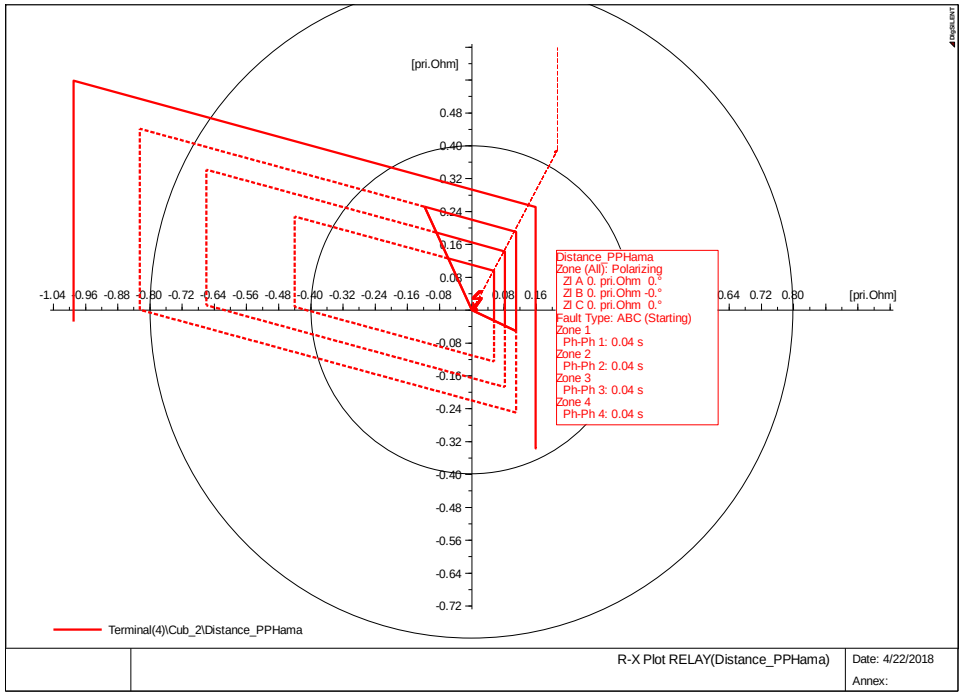


Fig. 5. 2. Caracteristica parcelei R-X a releului Distanță_ _PPHama

Din figura 5.3, se observă că releul de distanță_ AFA03 al liniei de cablu acționează ca și cum defectul este situat în zona 1 și trimite semnal de alarmă către întrerupătorului, cu alte cuvinte, figura 5.3 arată că releul poate raporta o locație greșită a defecțiunii în prezența distorsiunii armonice. Se poate observa că releul de distanță acționează incorect. Prezența armonicilor duce la măsurări incorecte de curent / tensiune și, prin urmare, erori în calculul cantităților fundamentale.

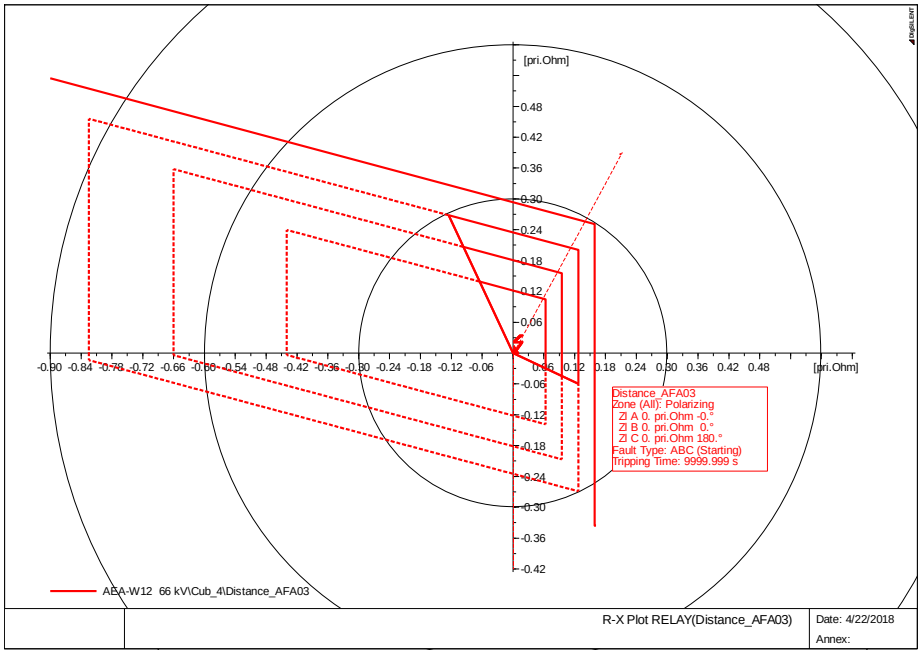


Fig. 5. 3. Caracteristica parcelei R-X a releului de distanță _AFA03

5.2.1. Efectul armonicului și saturației transformatorului de putere asupra răspunsului releelor de supracurent

În general, neliniaritățile nucleului transformatorului de putere sunt considerate o sursă majoră de armonice. De exemplu, această neliniaritate poate duce la creșterea mărimii curentului de intrare de la 10 la 15 ori mai mult decât curentul nominal, rezultând astfel un nivel ridicat de armonice care dăunează izolației [149], [150].

Vom face calculul debitului de putere în DigSILENT și vom analiza răspunsul releelor digitale. Figura 5.4 și figura 5.5, afișează curbele de magnetizare ale transformatorului de putere 1BAT10 și 2BAT10 după modificarea valorilor curente versus valorile de tensiune, pentru a verifica efectul saturației nucleului transformatorului asupra răspunsului releelor digitale.

Din următoarele două figuri, se poate vedea că se folosește aceeași curbă de magnetizare pentru ambele transformatoare 1BAT10 și 2BAT10.

În general, atunci când se produce saturația nucleului transformatorului, transformatorul va consuma un curent pentru a menține nivelul de tensiune în limite acceptabile.

În regiunea de saturație a curbei de magnetizare, se vede că o creștere mică a tensiunii de excitație va provoca o creștere mare a valorilor curente.

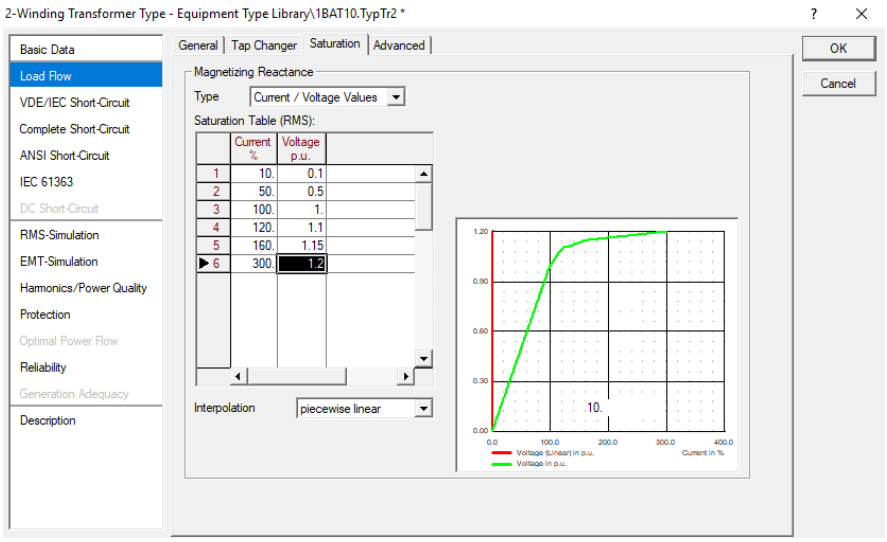


Fig. 5. 4. Curba de magnetizare a 1BAT 10

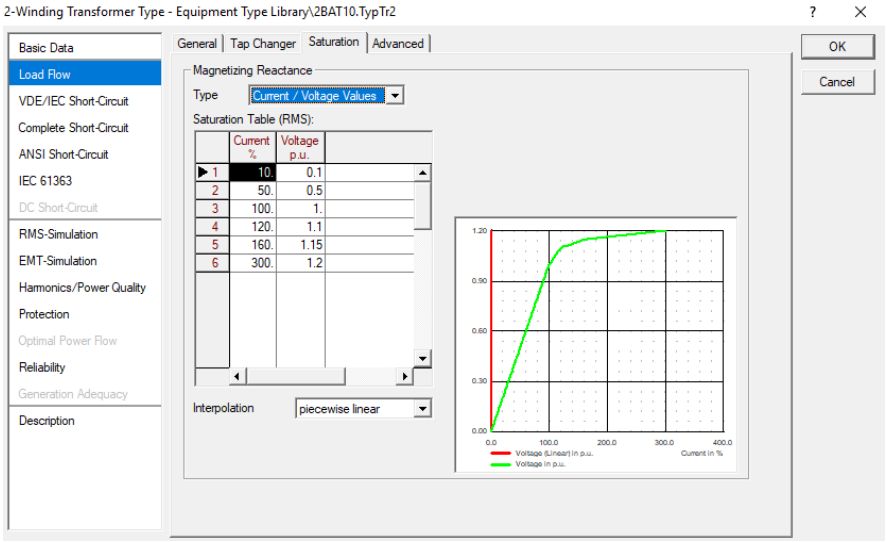


Fig. 5. 5. Curba de magnetizare a 2BAT 10

Din rezultatele de simulare prezentate în figura 5.6 și în figura 5.7, valorile de declanșare ale timpului și ale curentului s-au modificat după cum urmează:

- AFA03: I=867A & t= 7.665S.
- AFA02: I=429.83 A & t= 22.813 S.

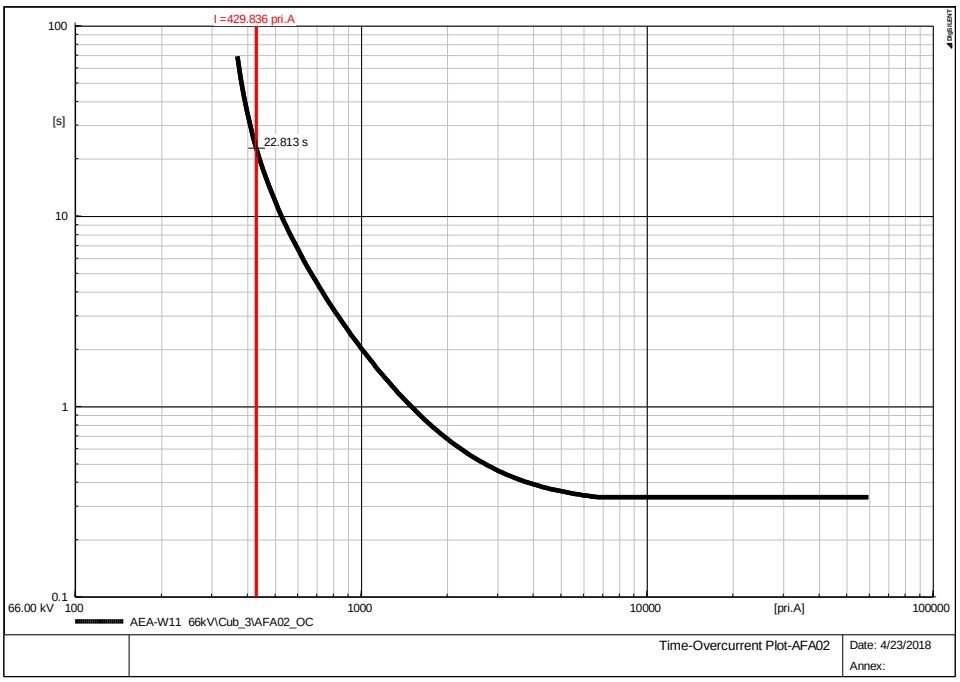


Fig. 5. 6. Diagrama de supracurent a parcelei AFA02

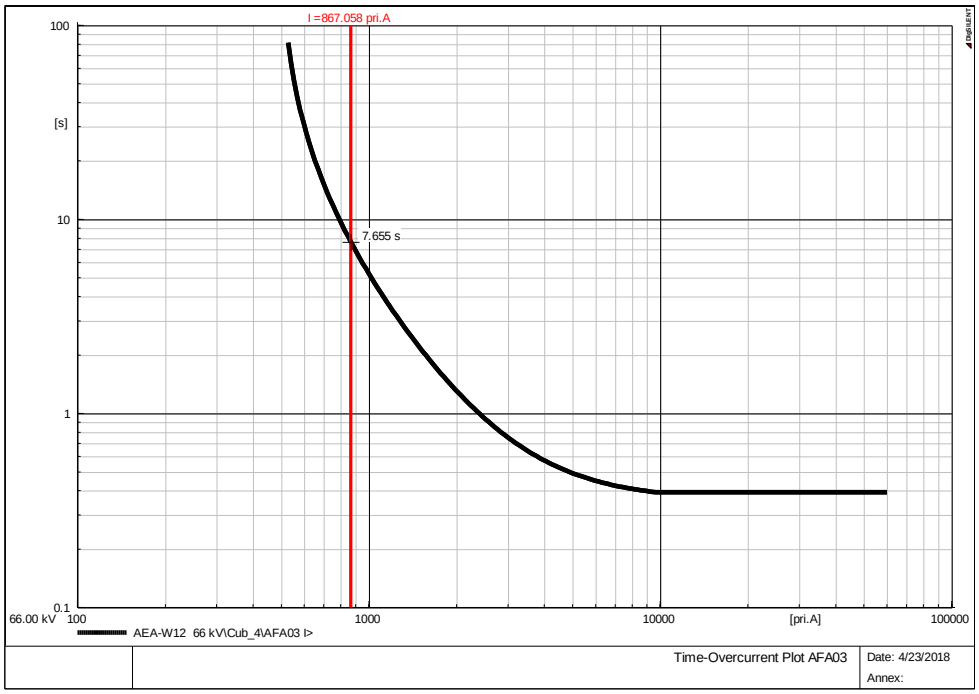


Fig. 5. 7. Diagrama de supracurent a parcelei AFA03

Din figurile 5.8, 5.9, 5.10 și 5.11, se poate observa că prin creșterea valorii tensiunii în punctul genunchiului curbei de magnetizare a transformatoarelor de putere vom evita răspunsul greșit al releelor de supracurent care sunt situate în partea de înaltă tensiune a acestor transformatoare.
Răspunsul greșit al releului de supracurent se întâmplă din cauza saturației transformatorului de putere și a surselor armonice din sistemul de alimentare.

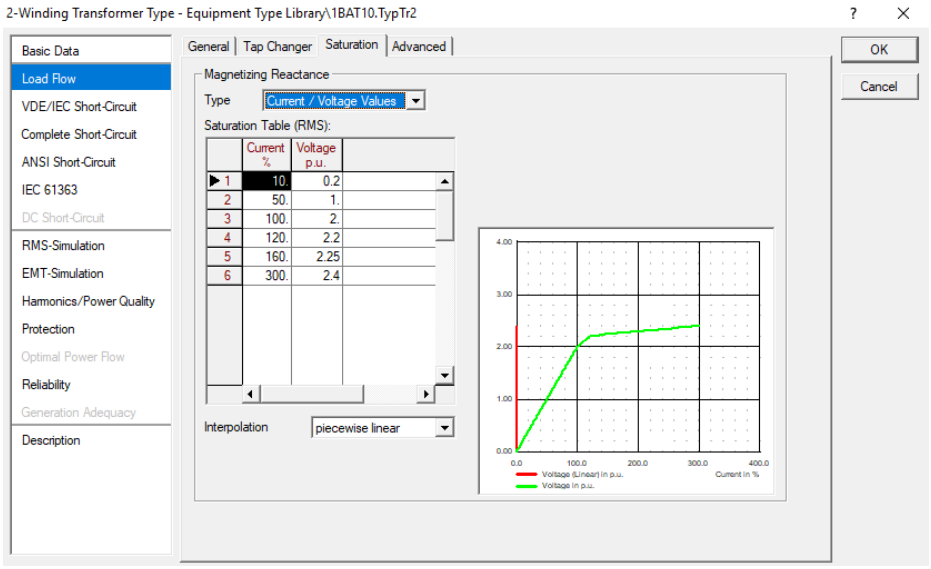


Fig. 5.8. Curba de magnetizare a 1BAT 10

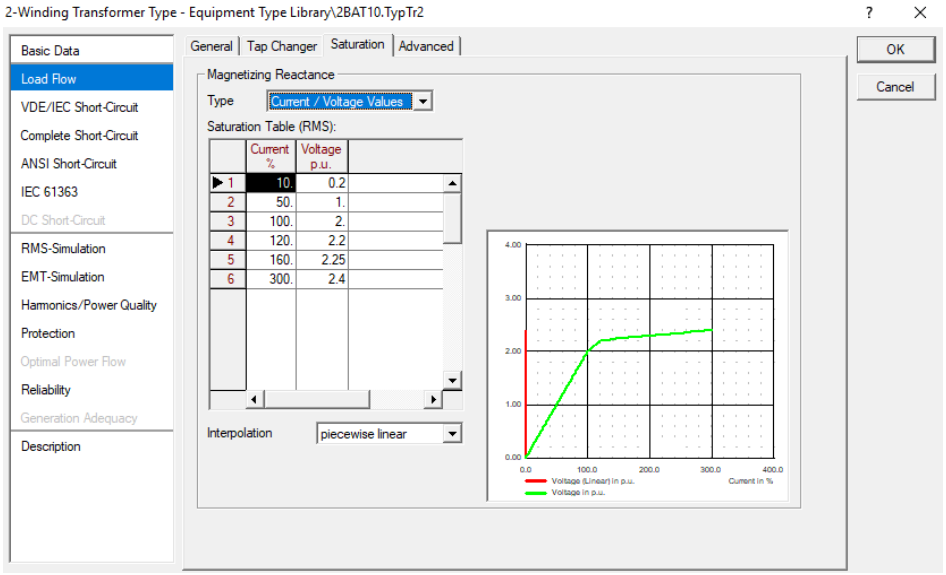


Fig. 5. 8. Curba de magnetizare a 2BAT 10

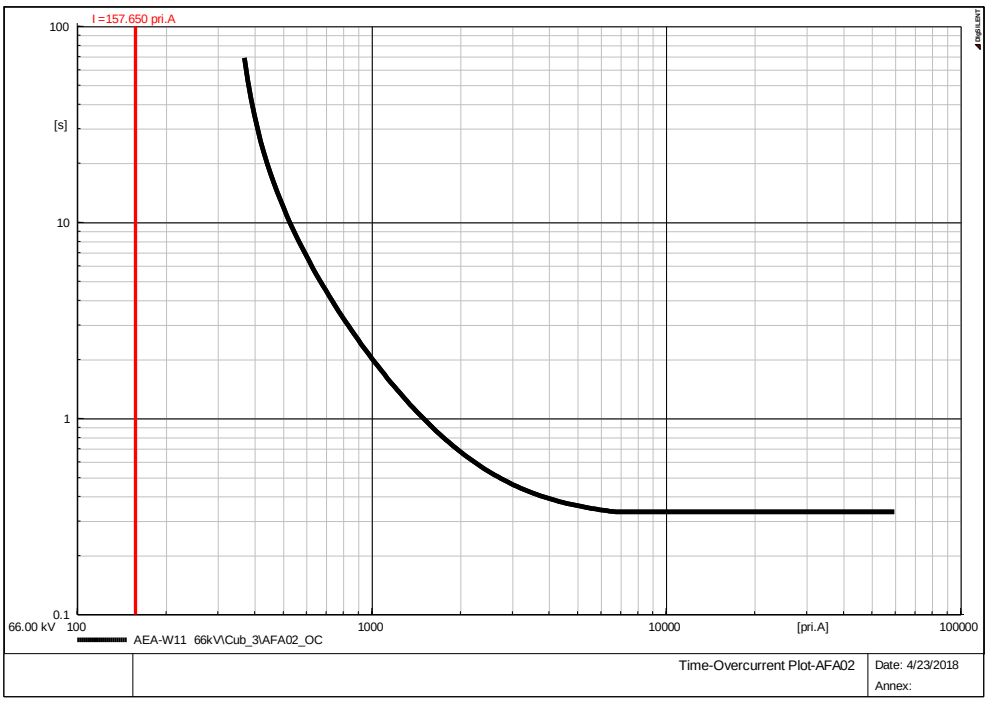


Fig. 5. 9. Diagrama de supracurent a parcelei AFA02

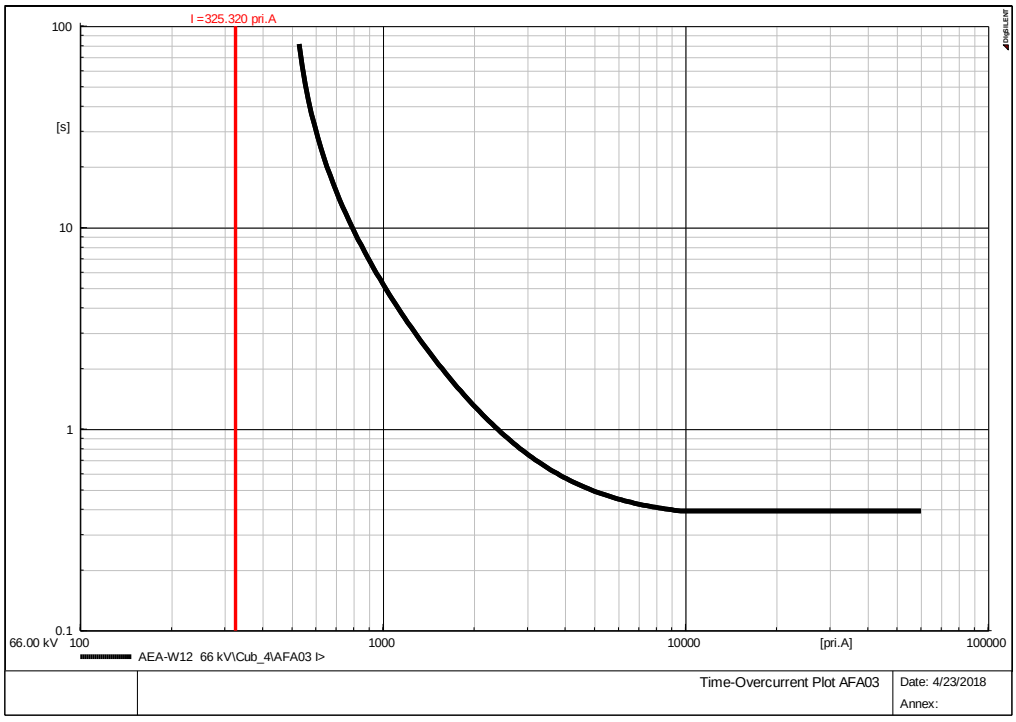


Fig. 5. 10. Diagrama de supracurent a parcelei AFA03

5.3. Îmbunătățirea performanței de protecție diferențiala prin defecte externe asociate cu o saturatie a transformatorului de curent

5.3.1. INTRODUCERE

Adăugarea unei componente neliniare (MOV) îmbunătățește stabilitatea protecției diferențiale atunci când defectul apare în afara zonei de protecție asociată cu saturația unui transformator de curent.

Această componentă (MOV) are o caracteristică neliniară între tensiune și curent, la o tensiune egală sau mai mare decât tensiunea de prag, trece un mare prin elementul MOV, care îmbunătățește stabilitatea transformatorului de curent și returnează punctul său de lucru. din regiunea neliniară până la zona liniară de pe curba de magnetizare cu o întârziere nano-timp [155], [156], evitând astfel saturația transformatorului de curent. Această soluție a fost verificată printr-o simulare computerizată prin utilizarea EMTP-ATP.

Soluția propusă este simplă și poate fi utilizată în sisteme de protecție diferențială din diferite generații.

5.3.2. TESTUL RELEELOR DE PROTEȚIE DIFERENȚIALA SUB EFECTULUI SATURAȚIE PRIN UTILIZAREA PROGRAMUL EMTP-ATP

Fig. 5.12, prezintă un sistem de alimentare care este modelat prin utilizarea programului EMTP-ATP format dintr-un sistem cu trei capete care este protejată prin utilizarea de protecție diferențială.

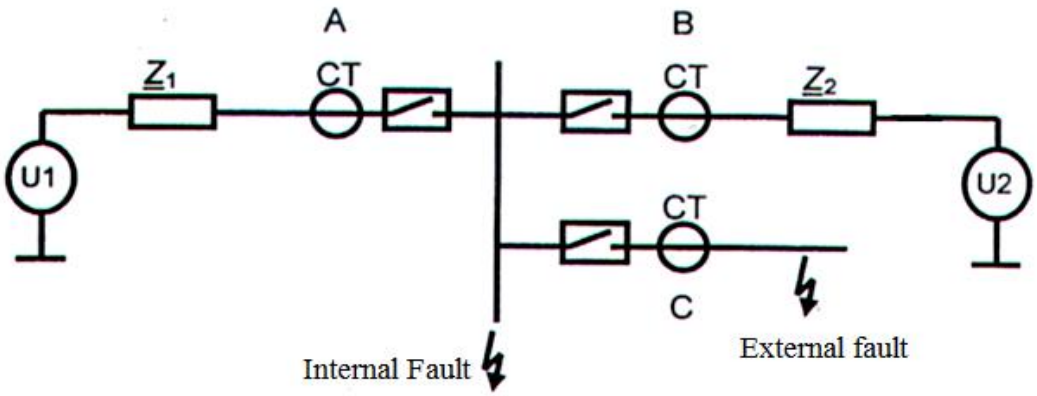


Fig. 5. 11. Sistem de alimentare testat cu programul EMTP-ATP

5.3.2.1. Scurtcircuit monofazat (1l-g) în zona protejată și prezența elementului MOV

Fig. 5.13, prezintă reprezentarea sistemului de alimentare în programul EMTP-ATP, în timp ce Fig. 5.14, Fig. 5.15 și Fig. 5.16 prezintă curenții de fază din releu.

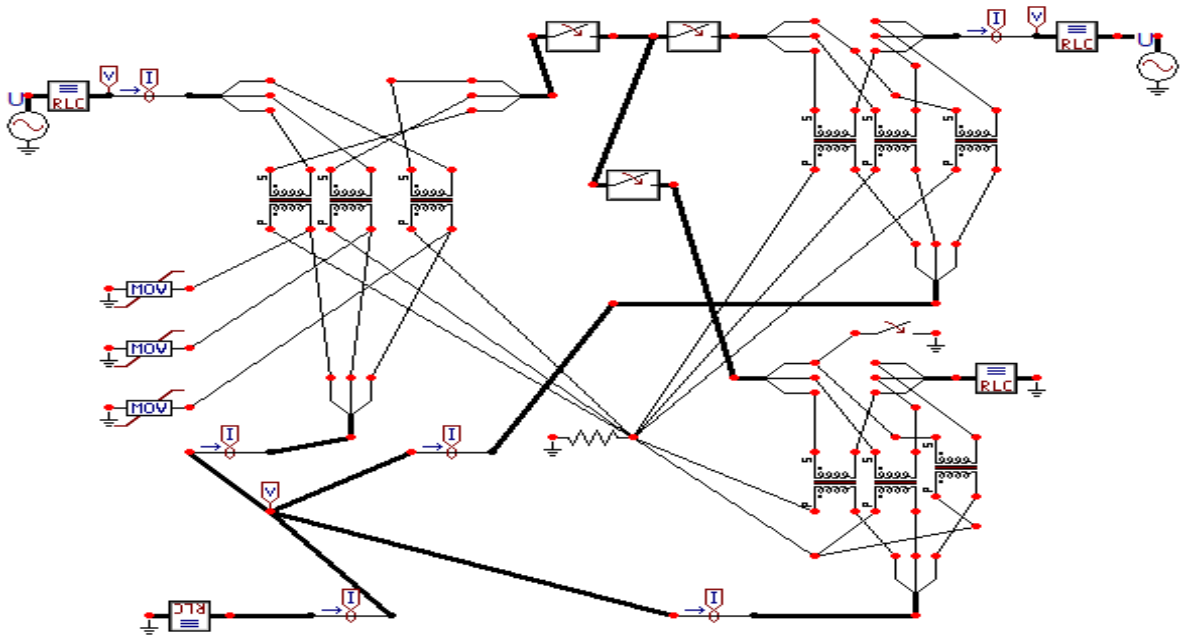


Fig. 5. 12. Reprezentarea sistemului de alimentare în cazul unei defecțiuni interne prin utilizând EMTP-ATP

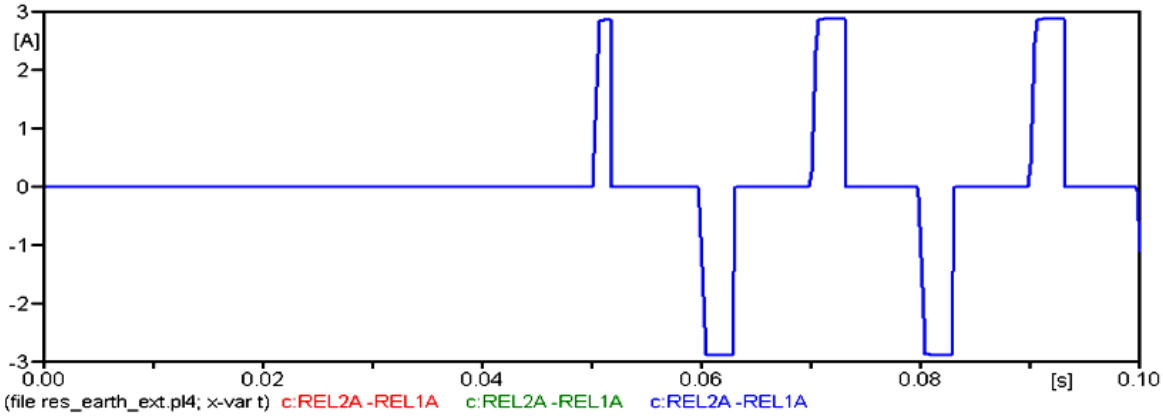


Fig. 5. 13. Curentul diferential, trece in faza (A)

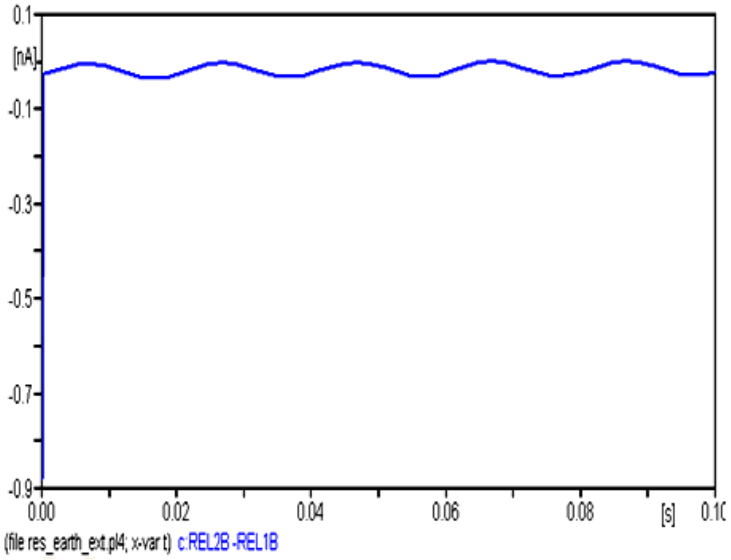


Fig. 5. 14. Curentul diferential, trece in faza (B)

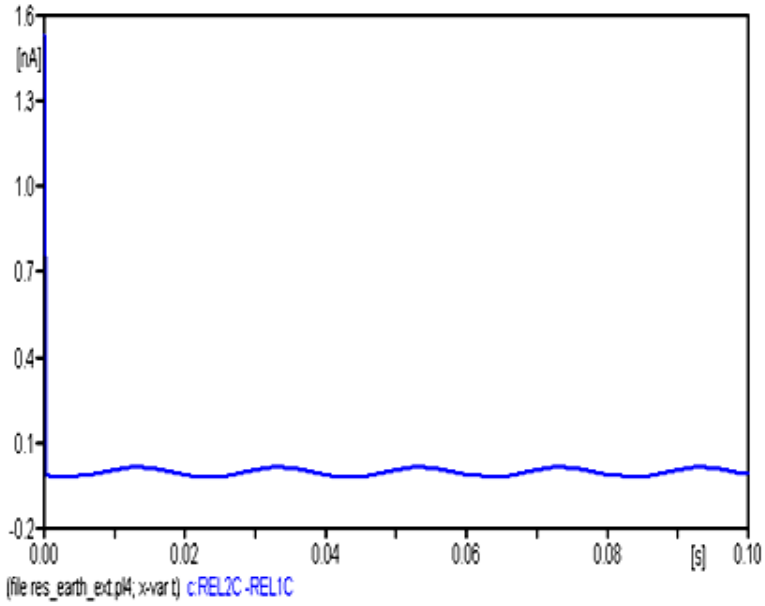


Fig. 5. 15. Curentul diferential, trece in faza (C)

Observăm din cele trei figuri anterioare, că, curentul diferențial al fazei A al releului este mai mare decât valoarea pragului de funcționare nominal al protecției diferențiale, ceea ce duce la un efort de protecție și declanșarea directă a defecțiunii, adică protecția diferențială funcționează corect aici.

5.3.2.2. O stare de defecțiune în afara zonei de protecție fără a utiliza elementul MOV

Fig. 5.17, reprezintă reprezentarea sistemului de alimentare fără utilizarea elementului MOV în programul EMTP-ATP, în timp ce Fig. 5.18, Fig. 5.19 și Fig. 5.20 arată curenții de fază din releu.

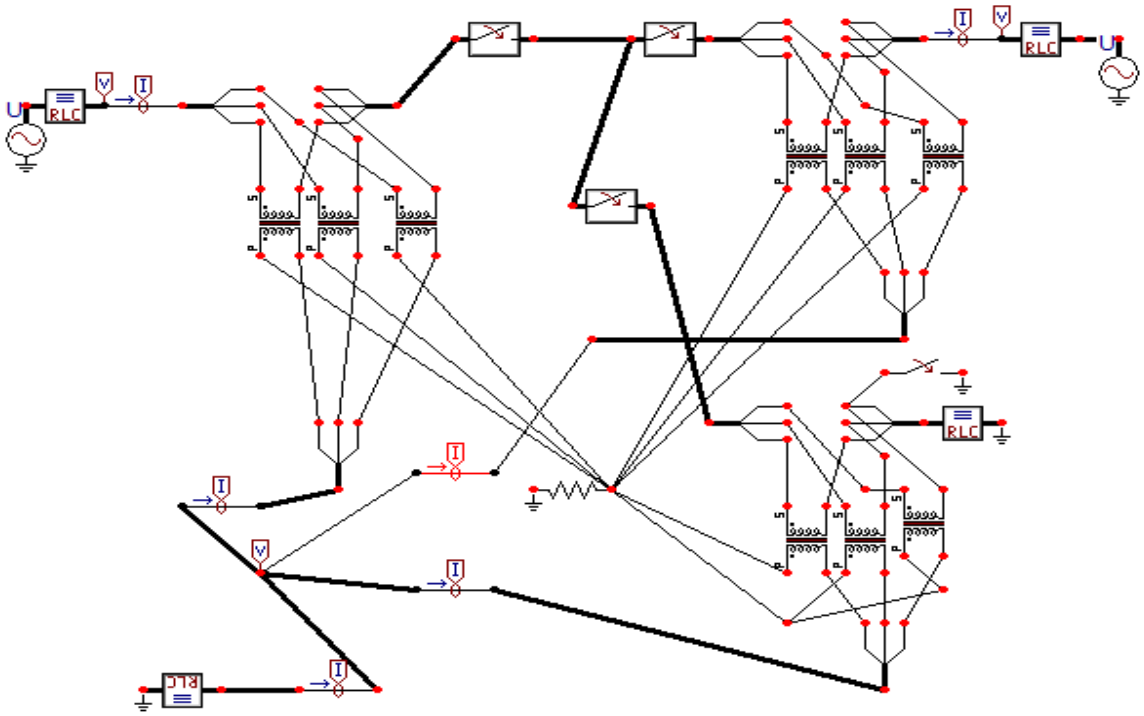


Fig. 5. 16. Reprezentarea sistemului de alimentare în cazul unei defecțiuni externe

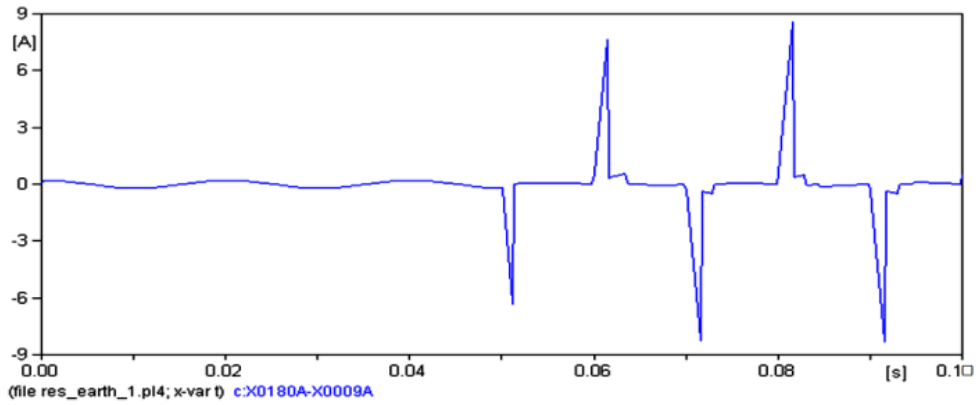


Fig. 5. 17. Curentul diferențial, care trece în faza (A)

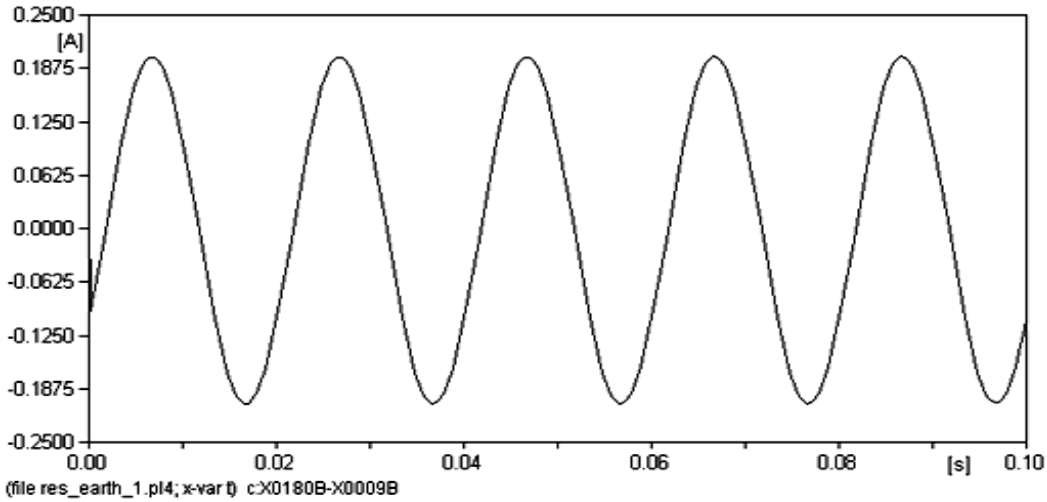


Fig. 5. 18. Curentul diferențial, care trece în faza (B)

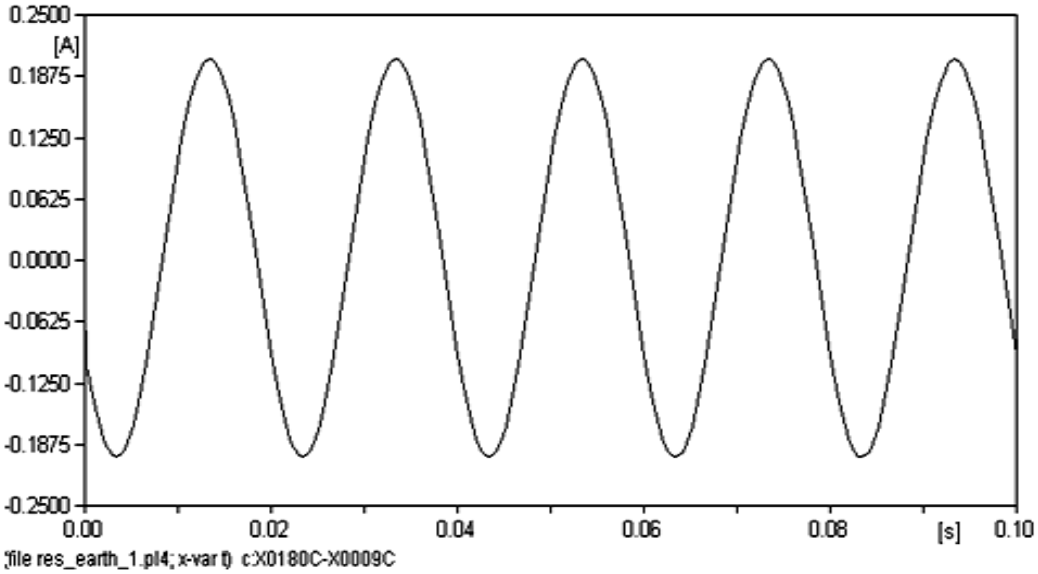


Fig. 5. 19. Curentul diferențial, care trece în faza (C)

Observăm din figurile anterioare, că, în condițiile unei defecțiuni în faza A de valoare 18 kA și în afara zonei de protecție, duce la saturația transformatoarelor de curent pe această fază și astfel trecerea unui curent de valoare 8,5A în releul de protecție diferențială din faza A care este mai mare decât valoarea operațională a releului diferențial, ceea ce duce la o funcționare greșită a acestei protecții.

5.3.2.3. O stare de defecțiune în afara zonei de protecție cu utilizarea elementului MOV

Fig. 5.21, arată reprezentarea sistemului de alimentare cu elementul MOV în programul EMTP-ATP, în timp ce Fig. 5.22, Fig. 5.23 și Fig. 5.24 arată curenții de fază din releu.

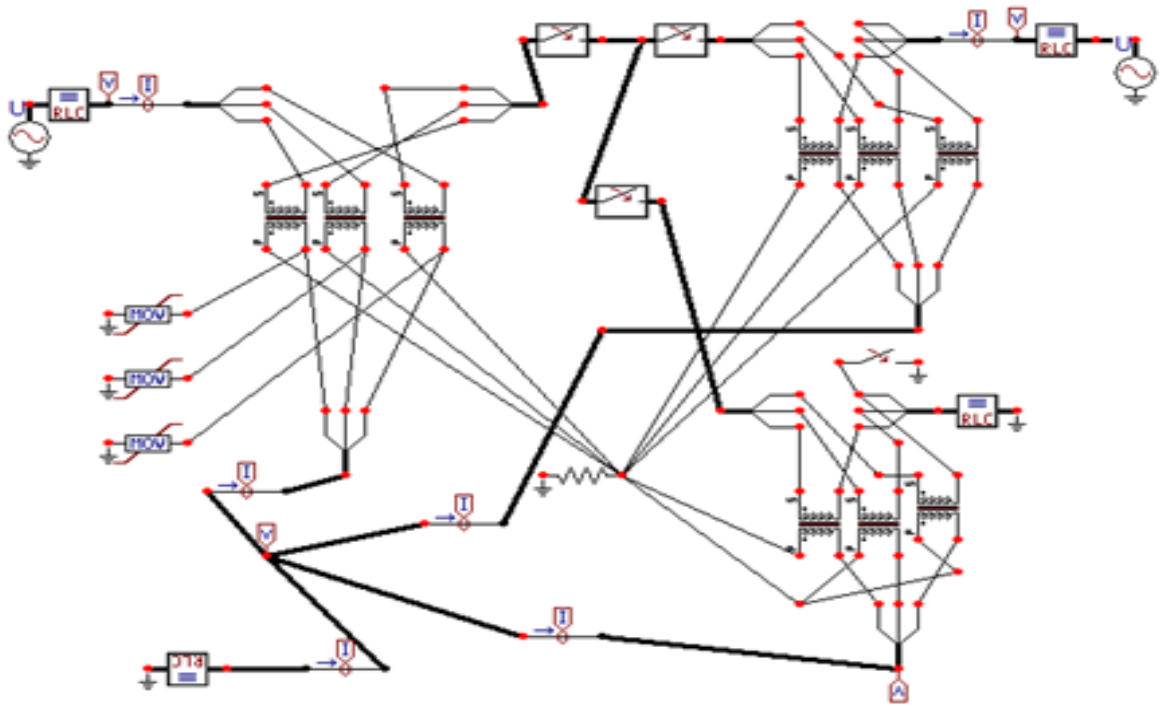


Fig. 5. 20. Reprezentarea sistemului de alimentare în cazul unei defecțiuni externe

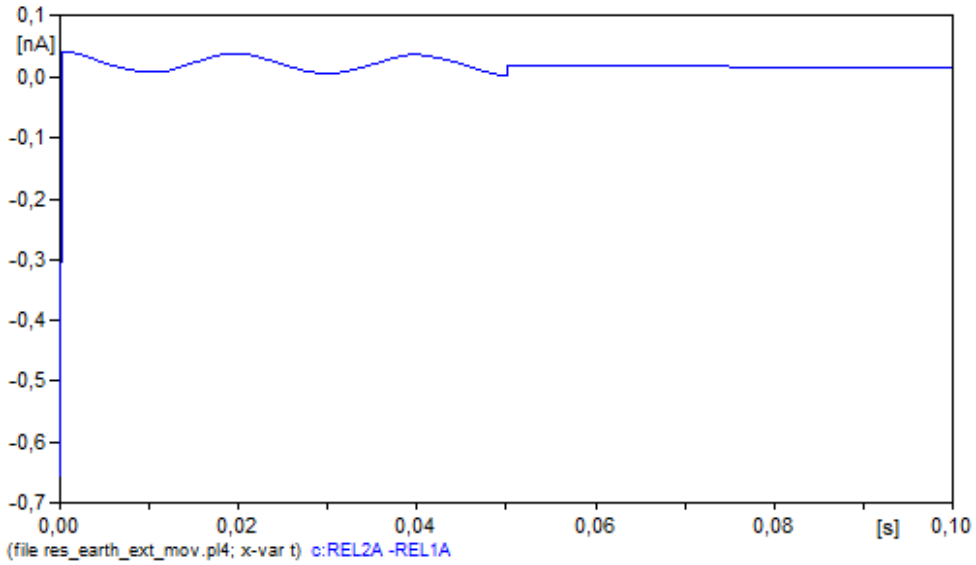


Fig. 5. 21. Curentul diferențial, trece în faza (A)

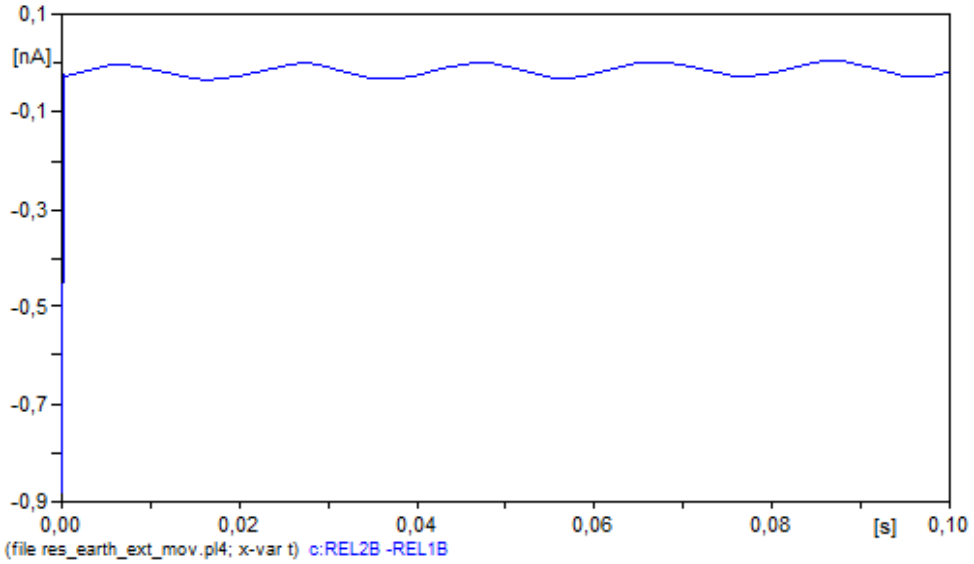


Fig. 5. 22. Curentul diferențial, trece în faza (B)

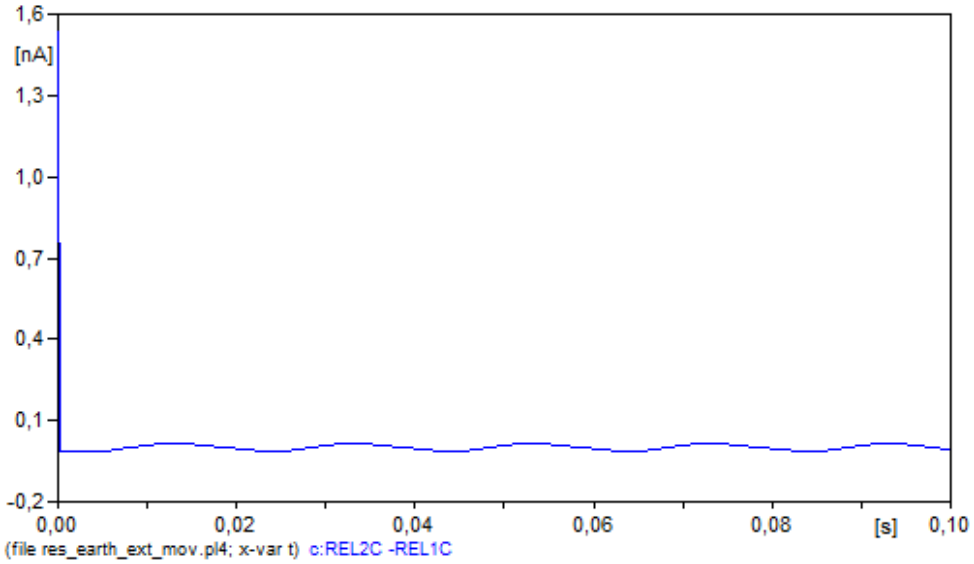


Fig. 5. 23. Curentul diferențial, trece în faza (C)

Fig. 5.22, arată că prin utilizarea elementului MOV, se face corectarea performanței transformatoarelor de curent pe faza afectată, evitând astfel efectul de saturație și menținând astfel dispozitivul de protecție stabil.

5.4. Concluzii

- Existența armonicelor în sistemul energetic trebuie analizate cu exactitate pentru a găsi cele mai bune soluții care evită aceste efecte asupra performanței releelor de distanță și ale releelor de subcurenti.

-Curba de magnetizare a transformatorului de putere trebuie să fie bine selectată pentru a ține cont de considerațiile tehnice și economice.

- Performanța de protecție diferențială poate fi îmbunătățită, atunci când apare o defecțiune în afara zonei de protecție asociate cu saturația în transformatorul curent, prin utilizarea elementului neliniar (MOV).

-Această soluție practică a fost testată și validată folosind EMTP-ATP.
-Soluția sugerată este simplă și poate fi adoptată pentru toate generațiile de relee diferențiale și, de asemenea, pentru generațiile viitoare de relee.

CAPITOLUL 6.

ALGORITM AVANSAT PENTRU DETECTAREA ŞI CORECTAREA CURENTILOR SECUNDARI A TRANSFORMATORULUI DE CURENT

6.1. INTRODUCERE

Sistemele de protecție necesită reproducerea curentului primar pe partea secundară a transformatorului de curent în funcție de raportul transformatorului. Am constatat că saturația transformatorului de curent duce la o funcționare greșită a protecției diferențiale în caz de defecțiuni în afara zonei de protecție. În plus, saturația transformatorului de curent duce la eșecul releelor de supracurent. Saturația duce, de asemenea, la erori la calculul impedanței releelor de protecție la distanță [161].

Saturația transformatoarelor de curent poate perturba activitatea sistemelor de protecție dacă nu se aplică un algoritm de detectare și corecție adecvat. Acest lucru necesită dezvoltarea algoritmilor de detectare și corecție care pot fi programate în dispozitive moderne de protecție digitală pentru a evita efectul de saturație.

6.2. DESCRIEREA METODEI

Algoritmul se realizează conform următoarelor etape:

- punctele de pornire ale saturației determinării, așa cum se arată în figura 6.1.
- determinarea punctelor finale ale saturației, figura 6.1.
- calculul valorilor estimate ale eșantioanelor în secțiunea saturată pe baza secțiunii nesaturate a formei de undă a curentului secundar.
- Calculul componentelor fundamentale și a componentelor dc pe baza secțiunii nesaturate a formei de undă a curentului secundar.
- reconstrucția curentului primar.

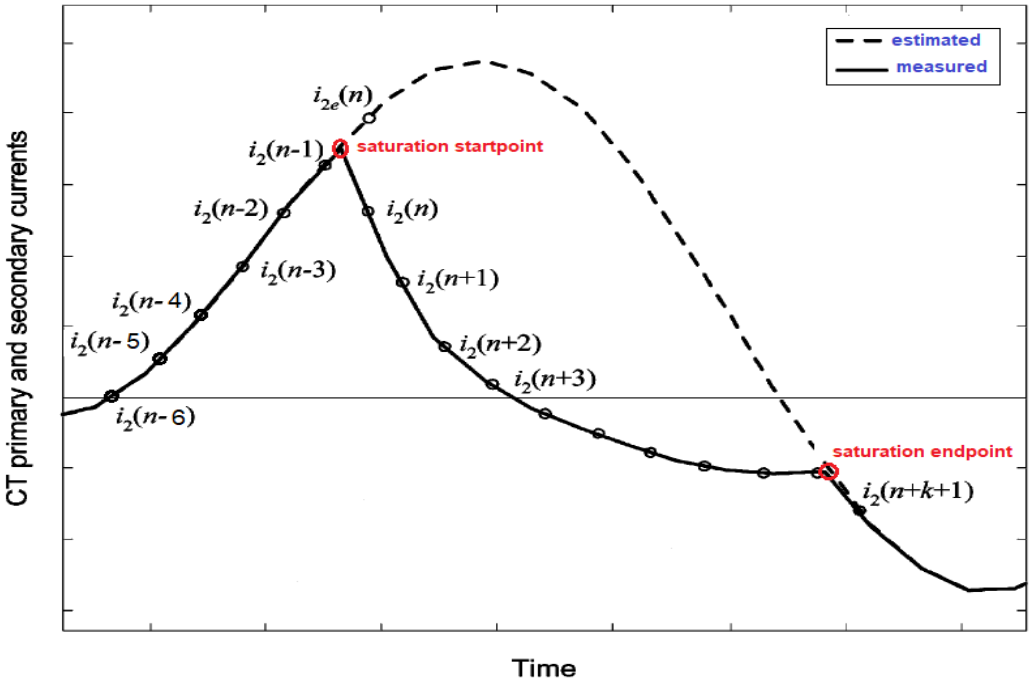


Fig. 6. 1. Valorile reale măsurate și valorile estimate ale curenților secundari CT

6.3. FORMAREA UNUI MODEL MATEMATIC PENTRU UNDA SINUSOIDALA IN ACORD CU METODA DIFERENTEI INAPOI A LUI NEWTON

Valoarea primului derivat din două eșantioane consecutive poate fi considerată aproximativ de aceeași valoare [164]:

$$\frac{\nabla\, i(n)}{T_S} \approx \frac{\nabla\, i(n-1)}{T_S} \tag{6.1}$$

$$\frac{[i(n)-i(n-1)]}{T_s} \approx \frac{[i(n-1)-i(n-2)]}{T_s}$$

T_S: Perioada de eșantionare

$$i(n) \approx 2 * i(n-1) - i(n-2) \tag{6.2}$$

Aceasta este valoarea estimată a eșantionului curent secundar pe baza a două probe anterioare consecutive (prima metodă derivată).

- **Metoda derivatei a doua:**

Valoarea derivatei a doua din două eșantioane consecutive, poate fi considerata de aproximativ de aceeași valoare [164]:

$$\frac{\nabla^2 i(n)}{T_S} = \frac{\nabla^2 i(n-1)}{T_S} \tag{6.3}$$

$$i(n) = 3 * i(n-1) - 3 * i(n-2) + i(n-3) \tag{6.4}$$

- **Metoda derivatei a treia:**

Valoarea derivatei a treia din două eșantioane consecutive, poate fi considerata de aproximativ aceeași valoare [164]:

$$\frac{\nabla^3 i(n)}{T_S} = \frac{\nabla^3 i(n-1)}{T_S} \tag{6.5}$$

$$i(n) \approx 4 * i(n-1) - 6 * i(n-2) + 4 * i(n-3) - i(n-4) \tag{6.6}$$

- **Metoda derivatei a patra:**

Valoarea derivatei a patra din două eșantioane consecutive, poate fi considerata aproximativ aceeași valoare [164]:

$$\frac{\nabla^4 i(n)}{T_S} = \frac{\nabla^4 i(n-1)}{T_S} \tag{6.7}$$

$$i(n) = 5 * i(n-1) - 10 * i(n-2) + 10 * i(n-3) - 5 * i(n-4) + i(n-5) \tag{6.8}$$

- **Metoda derivatei a cincea:**

Valoarea derivatei a cincea din două eșantioane consecutive, poate fi considerata aproximativ de aceeași valoare [164]:

$$\frac{\nabla^5 i(n)}{T_S} = \frac{\nabla^5 i(n-1)}{T_S} \tag{6.9}$$

$$i(n) = 6 * i(n-1) - 15 * i(n-2) + 20 * i(n-3) - 15 * i(n-4) + 6 * i(n-5) - i(n-6) \tag{6.10}$$

6.4. EROAREA METODEI DE ESTIMARE

Eroarea de estimare a metodei utilizate este calculată după următoarea formulă [172]:

$$\textbf{Eroarea} = \frac{|\textbf{magnitudinea estimată} - \textbf{magnitudinea reală}|}{\textbf{magnitudinea reală}} \times 100 \qquad (6.11)$$

Să presupunem că perioada de eșantionare este egală cu 1ms (20 eșantioane pe ciclu), iar curentul primar este dat de ecuația:

$$i_1 = e^{-25*t} + cos(\omega t \qquad (6.12)$$

Figura 7.2 prezintă curentul primar și curentul estimat folosind primul derivat și eroarea rezultată din metoda estimării.

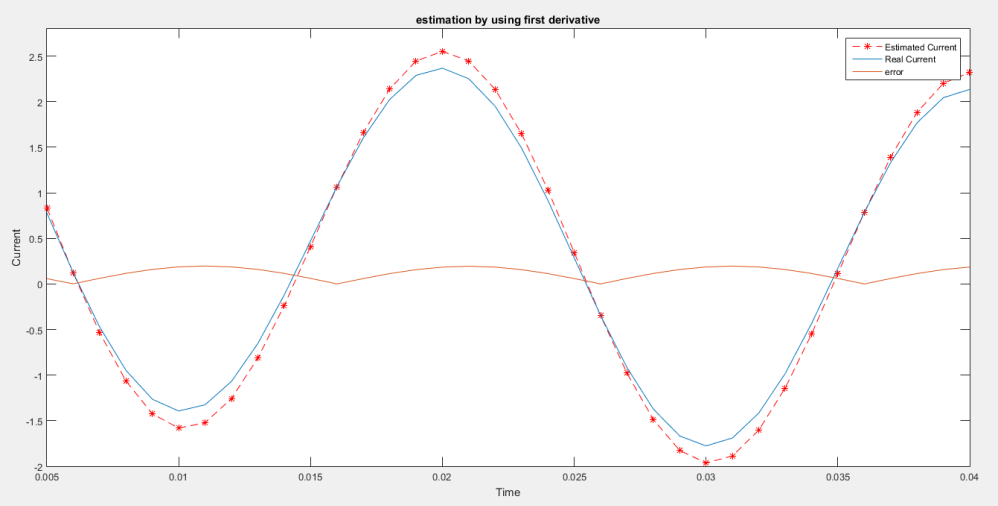


Fig. 6. 2. Estimare folosind primul derivat

Figura 6.3 prezintă curentul primar și curentul estimat prin utilizarea celui de-al doilea derivat și eroarea rezultată din metoda estimării.

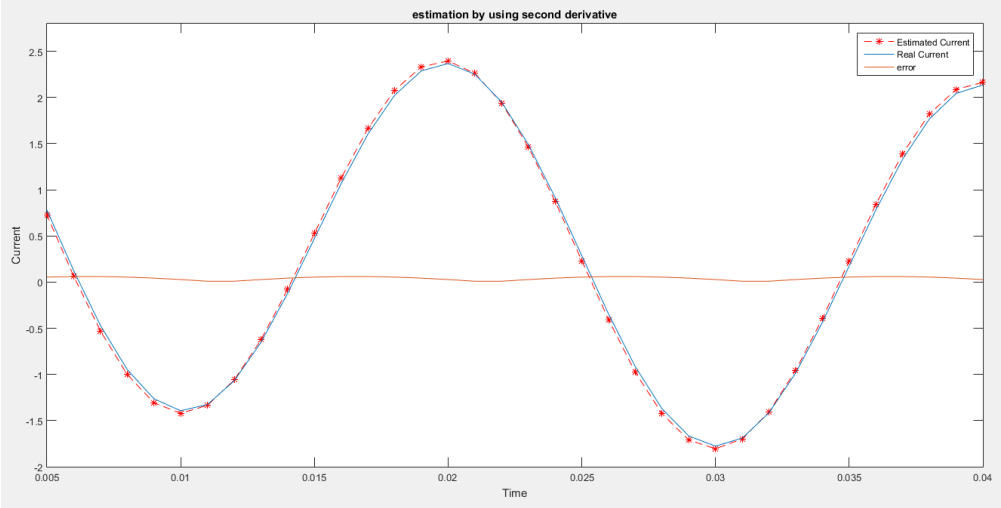


Fig. 6. 3. Estimare folosind a doua derivată

Figura 6.4 prezintă curentul primar și curentul estimat prin utilizarea celui de-al treilea derivat și eroarea rezultată din metoda estimării.

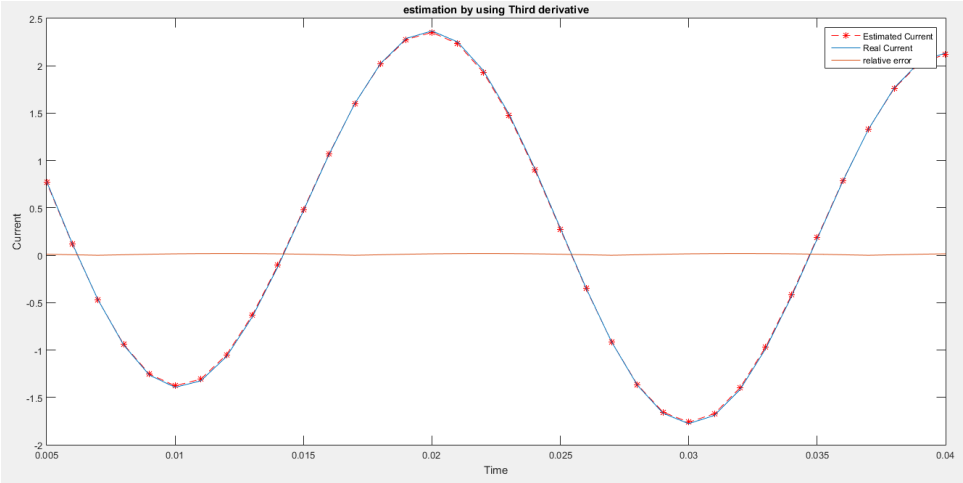


Fig. 6. 4. Estimare folosind a treia derivată

Figura 6.5 prezintă curentul primar și curentul estimat prin utilizarea celui de-al patrulea derivat și eroarea rezultată din metoda estimării.

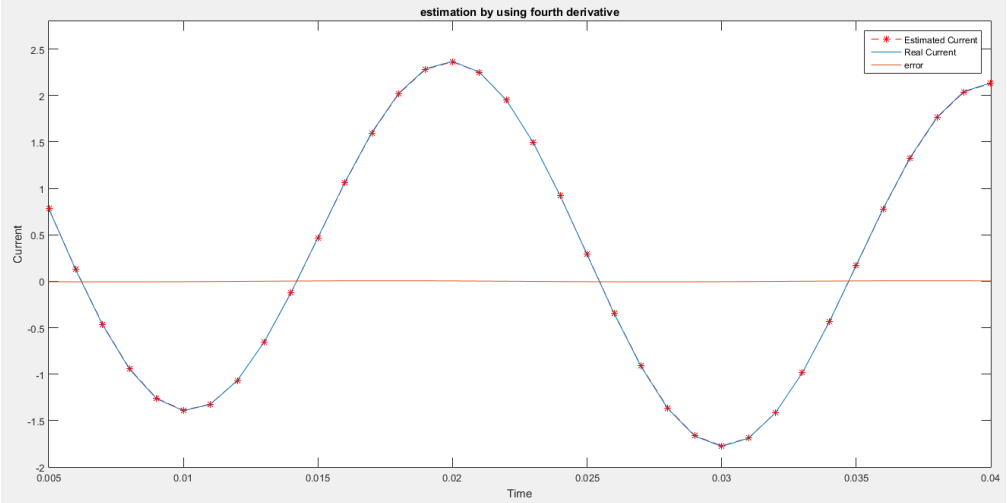


Fig. 6. 5. Estimare folosind a patra derivată

Figura 6.6 reprezintă curentul estimat prin utilizarea celei de a cincea derivata.

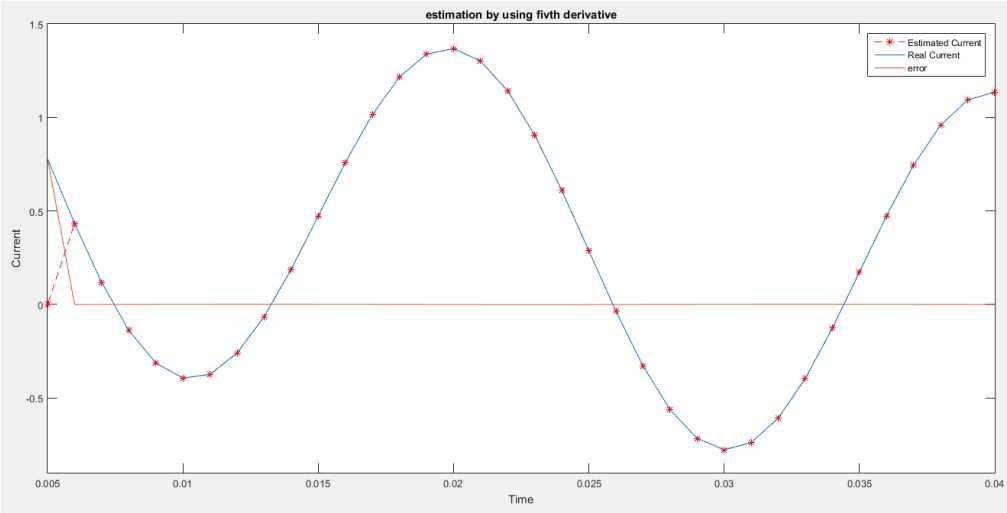


Fig. 6. 6. Estimare folosind a cincea derivată

Prin compararea preciziei metodelor anterioare de estimare, cu cât ordinea de estimare este mai mare, cu atât precizia este mai mare.

6.5. DETECTAREA INCEPUTULUI DE SATURATIE CT

Saturația este detectată atunci când valoarea absolută a valorii estimate a eșantionului de curent secundar bazat pe prima, a doua, a treia sau a patra metodă derivată sunt mai mari decât valoarea pragului [173], [174], [172], [175], [176], [163].

Caracteristica $\nabla^4 i(n)$

Criteriile pentru detectarea saturației CT sunt date de ecuația următoare

$$|\nabla^4 i(n)| > Th \tag{6.13}$$

Pragul propus pentru prima derivată este dat de ecuația următoare

$$T_h = k\sqrt{2I_{fmax}\left[2\sin\left(\frac{\pi}{N}\right)\right]^4} \tag{6.14}$$

6.6. DETECTAREA SFARSITULUI DE SATURATIE CT

Presupunând că începutul saturației s-a petrecut la jumătatea distanței dintre eșantioanele (n-1) și (n) conform figurii 6.1. Dacă ecuația (6.15) este satisfăcută, primul eșantion al părții noi nesaturate este n + k + 1 [171]:

$$sign\left[\frac{i_2(n-1)}{8}+\frac{i_{2e}(n)}{8}+\frac{3*i_2(n)}{4}+i_2(n+1)+\ldots..+i_2(n+k)\right]$$
$$\neq sign\left[\frac{i_2(n-1)}{8}+\frac{i_{2e}(n)}{8}+\frac{3*i_2(n)}{4}+i_2(n+1)+\ldots..+i_2(n+k)\right.$$
$$\left.+i_2(n+k+1)\right] \quad (6.15)$$

6.7. RECONSTRUCTIA CURENTULUI CORECTAT (CURENTUL PRIMAR)

Formula generală a curentului corectat este dată de ecuația următoare [177], [152], [178]:

$$i_C(n+h)=(I_0*e^{-2*\tau})*e^{-(h+2)*\tau}-I_1*cos[\gamma+(h+2)*\varepsilon] \quad (6.16)$$

Acest curent este calculat pentru valoarea de schimbare h între zero (pentru primul eșantion al părții saturate) și k (ultimul eșantion al părții saturate).
Unde:
I_0: amplitudinea componentei DC
τ: constantă de timp DC
I_1: amplitudinea frecvenţei fundamentale

Amplitudinea componenetului de frecvență fundamental este dată de formulă

$$I_1=\sqrt{\left(\frac{i_p(n-2)-i_p(n-3)}{2*sin\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}\right)^2+\left(\frac{i_p(n-2)+i_p(n-3)}{2*cos\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}\right)^2} \quad (6.17)$$

6.8. VERIFICAREA ALGORITMULUI PROPUS

Prin aplicarea algoritmului propus pe o undă de eroare descărcată din programul EMTP-ATP, am obținut curentul corectat în figura 6.7, care reprezintă rezultatul programului Matlab.

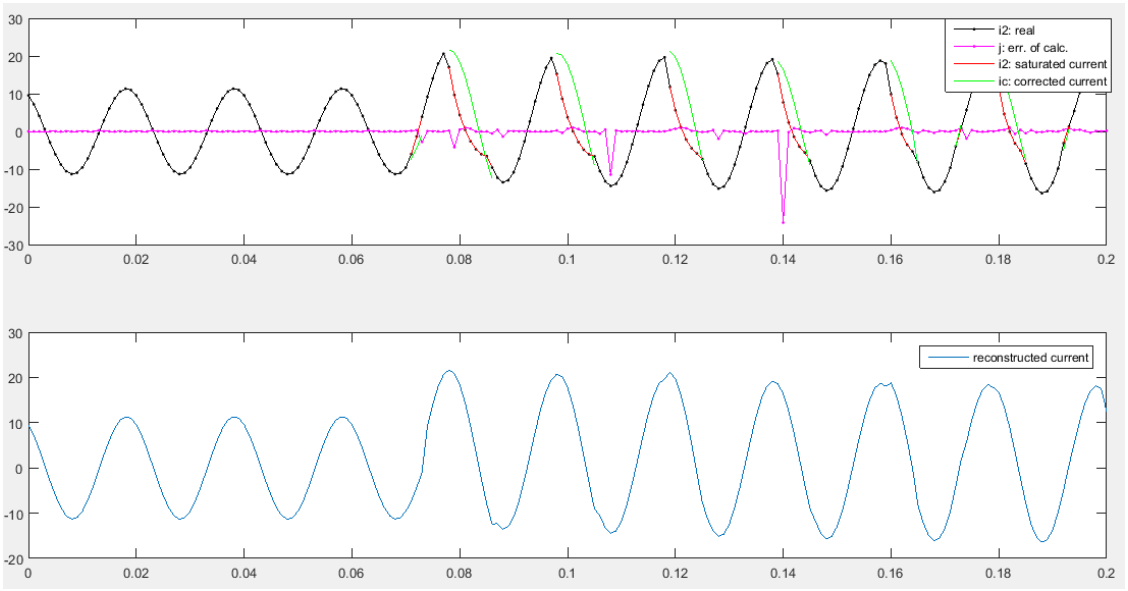


Fig. 6. 7. Curentul corectat prin aplicarea algoritmului propus

6.9. EFECTIVITATEA ALGORITMULUI PROPUS

Figurile 6.9 și 6.10 arată eficacitatea algoritmului dezvoltat în corectarea distorsiunii unui curent secundar în perioada de saturație. Din rezultatele MATLAB, am obținut rezultate excelente prin aplicarea algoritmului propus pe care l-am creat și scris m-file folosind MATLAB. Algoritmul este reușit și eficient în corectarea distorsiunii undei secundare a transformatorului de curent datorită saturației sale magnetice.

Această metodă depinde de valoarea fixă a celui de-al patrulea derivat și oferă o precizie bună folosind cinci probe din partea nesaturată. După testarea acestei metode în corectarea multor unde de eroare înregistrate, am descoperit că această metodă are performanțe bune de diferite tipuri de protecție.

CAPITOLUL 7. CONCLUZII

7. 1. CONTRIBUȚII ORIGINALE

Calitatea slabă a puterii poate afecta performanța releelor digitale în condiții stabile și tranzitorii. Acest lucru poate provoca deteriorarea unor elemente ale sistemului de alimentare și uneori poate duce la oprirea generală.

Algoritmii de măsurare pot fi considerați ca un element critic în performanța releelor digitale de protecție. Sarcina lor principală este de a estima componenta de frecvență fundamentală a semnalelor de intrare (curent și tensiune).

Viteza și precizia algoritmilor de măsurare au un rol important în realizarea releelor de protecție a funcțiilor lor.

Filtrul digital Fourier este considerat cel mai utilizat dintre algoritmii de măsurare în domeniul aplicațiilor de protecție.

În condiții de defectare, performanțele sale se modifică în funcție de prezența semnalelor nedorite în semnalul de intrare. Aceste semnale nedorite se amestecă cu componenta de frecvență fundamentală pentru a da semnale de intrare deformate.

Această lucrare de cercetare analizează impactul problemelor de calitate a puterii asupra performanțelor releelor digitale în rețele cu diferite niveluri de tensiune; joasă, medie și înaltă.

Un fenomen binecunoscut care a dominat eforturile multor cercetări anterioare, actuale și viitoare, și anume saturația transformatoarelor de curent și impactul acestora asupra performanței releelor de protecție.

În această cercetare, efectul saturației formelor de undă secundare a transformatorului curent a fost studiat pe diferite tipuri de relee. Din acest motiv, a fost dezvoltat un algoritm pentru detectarea și corectarea curentului secundar al transformatorului de curent și, astfel, corectarea performanței releelor care primesc semnalele de intrare de la aceste transformatoare de curent.

Principalele contribuții pentru teză sunt rezumate mai jos.

Capitolul 1 prezintă o prezentare simplă și clară a conceptului de calitate a puterii, precum și faptul că enumeră diferitele perturbații care apar în rețelele electrice și care sunt cauzele apariției lor și care sunt efectele lor asupra elementelor sistemului de alimentare.

Latura teoretică a conceptului de calitate a puterii a fost legată de partea practică prin executarea unui set de măsurători la ferma fotovoltaică Bărăgan prin utilizarea Fluke Test Set, aceste măsurători au fost comparate cu standardele internaționale pentru a decide dacă aceste valori sunt în limitele acceptabile sau nu.

Aceste măsurători, care pot dura până la câteva săptămâni sau mai mult, arată importanța sistemelor de afișare, monitorizare și înregistrare a sistemului de alimentare, în special în detectarea multor perturbații electrice, pe lângă găsirea de soluții adecvate la aceste probleme.

Capitolul 2 oferă un studiu detaliat atât al hardware-ului, cât și al softurilor releelor digitale. Următorul este un rezumat al studiului important furnizat de acest capitol, care poate fi utilizat în cercetările viitoare:

- Reconstrucția semnalului original depinde de rata de eșantionare, astfel încât selectarea ratei de eșantionare fs este foarte importantă pentru alegerea corectă a releelor digitale. Efectul ratei de eșantionare (fs) asupra semnalului reconstruit este testat prin utilizarea MATLAB. Rezultatele simulării arată că, ori de câte ori rata de eșantionare este mai mare, precizia va fi mai bună, dar nu foarte mare pentru a evita sarcina ridicată pentru procesarea digitală.

- Multe dintre componentele releului trebuie studiate cu atenție în timpul etapelor de proiectare, componentele evidențiate în acest capitol sunt filtrul anti-alianță, circuitul de reținere a probelor, multiplexorul și convertorul analog-digital.

- în acest capitol, performanța multor filtre digitale a fost studiata, această verificare s-a bazat pe o metodologie nouă, prin utilizarea diferitelor semnale de intrare reprezentând diferite tipuri de perturbații din surse multiple. Unele dintre aceste semnale au fost preluate de la rezultatele programelor de simulare ca program EMTP-ATP, iar altele au fost descărcate de la aparatele de înregistrare a erorilor centralei din rafinăria Banias. Ciclul complet al filtrului Fourier s-a dovedit a fi eficient în tratarea diferitelor cazuri comparativ cu celelalte filtre, dar s-a constatat că este nevoie de algoritmi suplimentari pentru a îmbunătăți performanța totală a releului digital.

Capitolul 3 reprezintă o parte a rețelei siriene. Acest sistem constă dintr-un set de încărcări electrice cu tensiuni diferite pentru o rafinărie de petrol românească din orașul Sirian Banias, iar aceste încărcări sunt alimentate prin intermediul a patru generatoare care funcționează în paralel și sunt conectate prin trei sisteme de bare și alimentatoare de remorcare provenite din rețeaua siriană.

Acest capitol prezintă fluxurile de putere și scurtcircuitul pentru toate componentele acestei rețele pentru diferite scenarii de funcționare. Acest studiu oferă o nouă viziune asupra importanței manevrelor operaționale și a impactului acestora asupra valorilor minime și maxime ale curenților de scurtcircuit și, prin urmare, a siguranței echipamentelor și a personalului.

Capitolul 4 arată necesitatea testării releelor de protecție în cazuri normale de defect, pentru a verifica fiabilitatea și disponibilitatea acestora de a funcționa corect în cazurile anormale de avarie.

Cazurile anormale de avarie includ cazuri în care curentul și unda de tensiune conțin raporturi ridicate de armonice și distorsiuni severe.

Capitolul 5 prezintă un set de rezultate practice și teoretice care nu pot fi ignorate și care pot fi utilizate pentru a proiecta orice sistem de alimentare și sistemul său de protecție, aceste rezultate pot fi rezumate după cum urmează:

- toate sursele de curent și tensiune armonică trebuie luate în considerare în timpul proiectării și investiției oricărui sistem de alimentare.
- Curba de magnetizare a miezului transformatorului de putere trebuie să fie atent selectată, astfel încât prezența armonicilor în rețea să nu afecteze serios comportamentul său și, în consecință, să reflecte acest efect asupra releelor de protecție care pot trimite semnalul către CB sa izoleze acest transformator de rețea, deși nu există nicio eroare reală. Deconectarea acestui transformator poate avea reflexe serioase asupra sistemului de alimentare general.

  Această cercetare a prezentat o metodologie clară pentru selectarea cu exactitate a curbei de magnetizare a transformatorului de putere care ține cont de considerentele de proiectare cat și cele economice.
- Acest capitol a propus o soluție practică pentru a evita actul de protecție diferențială în afara zonei protejate sub efectul saturației curentului transformatorului.
- Această propunere practică conduce la numeroase cercetări viitoare care studiază posibilitatea extinderii utilizării elementelor neliniare în domeniul aplicațiilor de protecție.
- Cercetarea a propus un algoritm avansat pentru detectarea și corectarea distorsiunii curenților secundari ai transformatoarelor de curent, datorită saturației magnetice a transformatorului de curent. Acest algoritm se caracterizează printr-o precizie mai bună în comparație cu mulți dintre algoritmii folosiți în același scop.

  Performanța acestui algoritm a fost verificată prin aplicarea undelor de curent reale descărcate de pe înregistratoarele de erori și undele preluate din programul EMTP-ATP.

7.2. LUCRĂRI VIITOARE

- efectul calității slabe a puterii asupra releelor digitale care nu au fost investigate în această teză, cum ar fi pâlpâirea și întreruperea, se va face în lucrările viitoare.
- Pentru a beneficia de rezultatele cercetării, în special de utilizarea componentei neliniare MOV pentru îmbunătățirea performanței releelor de protecție diferențială din sistemul electric, voi încerca să folosesc aceste rezultate în cercetările viitoare pentru a dezvolta utilizarea acestui element în alte tipuri de relee.
- Vreau să găsesc diversele posibilități pentru a limita efectul propagării perturbațiilor prin sistem și de la un nivel de tensiune la altul la performanța releelor de protecție.
- Una dintre lucrările viitoare va fi dezvoltarea algoritmului propus în această teză pentru a deveni un algoritm mai integrat și multifuncțional, de exemplu, cu un algoritm suplimentar pentru a bloca armonicele care pot afecta performanța releului digital.

LISTA PUBLICATILOR

[1] Basarab Dan GUZUN, Mahfoud FERAS and Porumb RADU, POWER QUALITY, Dorin Pavel conference, Sebeș, 2015.
[2] Feras MAHFOUD, Basarab Dan GUZUN, Lucian MÂNDREA and Hamad RAAD SALIH, ANALOG TO DIGITAL CONVERTER IN DIGITAL PROTECTIVE RELAYS, Dorin Pavel conference, Sebeș, 2016.
[3] Feras MAHFOUD, Damian TIMOFTE and Moutasem ALKHATIB, APROXIMAREA ECUAȚIEI DE REZOLVARE A SITUAȚIEI CABLURILOR ELECTRICE AERIENE UTILIZÂND METODA ITERATIVĂ ȘI PROGRAMAREA C++, , Dorin Pavel conference, Sebeș, 2016.
[4] Feras Mahfoud, George Cristian Lazaroiu, Tarek Kherbek and Tammam Hayder, Improvement of Differential Protection Performance by External Faults Associated with a Current Transformer Saturation, ciem 2017, 978-1-5386-3943-6/17/$31.00 ©2017 IEEE.
[5] Hamad RAAD SALIH, Basarab Dan GUZUN and Mahfoud FERAS, ENERGY SAVING MECHANISM FOR PUMP'S DRIVE USING MATLAB PROGRAM, U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 80, Iss. 1, 2018.
[6] Feras Youssef Mahfoud, George Cristian Lazaroiu, Basarab Dan Guzun and H. H. Alhelou, Power Quality of Electrical Power Systems, Handbook of Research on Smart Power System Operation and Control, DOI: 10.4018/978-1-5225-8030-0.ch011, USA, 2019.
[7] Feras MAHFOUD and George Cristian LĂZĂROIU, A COMPARISON BETWEEN DIFFERENT DIGITAL FILTERS USED IN DIGITAL RELAYS, U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 81, Iss. 1, 2019.

CURRICULUM VITAE

Data și locul nașterii: 20.09.1977, TARTOUS, SYRIA.
1997-2002- Universitatea din Tishreen, Facultatea de inginerie electrică.
2009-2011- Master in studiul sistemelor de putere electrică, Universitatea din Tishreen, Facultatea de inginerie electrică.
2013-prezent- student doctorand al Universității POLITEHNICA din Bucuresti, Scoala doctorala de energetica.
Alte informații:
2003-2013- Inginer electric la Banias Refinery Company.
Aprilie 2016- Martie 2019- inginer electrician industrial la KING STEEL SRL.
Aprilie 2019-prezent- Sef sectie electrica la CEMS EPC SA.

REFERINȚE

[1] *Philippe FERRACCI*, Cahiers Techniques Schneider Electric no 199, Power Quality, ECT 199(e) October 2001.

[2] *Eberhard*, AN., Power Quality, March, India, 2011.

[3] *C. SANKARAN*, Power Quality, 2002 by CRC Press LLC, International Standard Book Number 0-8493-1040-7.

[4] *Sharmistha Bhattacharyya and Sjef Cobben*, Consequences of Poor Power Quality, Netherlands, 2011.

[5] *Dylan Dah & Chuan Lu*, An Update on Power Quality, Croatia, 2013.

[6] IEEE Standard 519-1992, *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.*

[7] Standard EN 50160 Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems, issued by CENELEC, November 1994.

[8] IEEE Standard 1250-2011, IEEE Guide for Identifying and Improving Voltage Quality in Power Systems.

[9] IEEE Standard 446-1995, IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications.

[10] *Miloslava Tesařová*, Power Quality and Quality of Supply, Czech Republic, 2011.

[11] Power Quality, CEA Technologies Inc, CANADA, 2007.

[12] *Hassan Al- swedan*, Efficiency and quality of electrical energy in industrial facilities, Damascus University Journal of Engineering Sciences, SYRIA, 2008.

[13] *Philip, P.*, A Standard Glossary of Power Quality Terminology, IEEE, 2010.

[14] Alstom Grid., Network protection & automation guide, Published by ISBN: 978-0-9568678-0-3, MAY 2011.

[15] *Golovanov, N., Postolache, P., Iordănescu, I., Toader, C., Popescu, S., Porumb, R. and Lipan, L.*, Instalații Electroenergetice Și Elemente De Audit Industrial, București, 2008.

[16] *Almeida, A., Moreira, L., Delgado, J.*, Power Quality Problems and New Solutions, University of Coimbra (Portugal), 2011.

[17] *Roger, C. Mark, DU., Granaghan, Mc. and Beaty, WA.*, Electrical Power Systems Quality, Second Edition, McGraw-Hill, 2012.

[18] *Surajit Chattopadhyay, Madhuch handaMitra and Samarjit Sengupta*, Electric Power Quality, Department of Applied Physics, University of Calcutta, India, © Springer Science+Business Media B.V. 2011.

[19] *G. T. Heydt*, Contemporary Topics in Electric Power Quality, Arizona State University, 2000.

[20] IEEE Std 1159-2009, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, USA, 2009.

[21] IEEE Std 1409-2012, IEEE Guide for Application of Power Electronics for Power Quality Improvement on Distribution Systems, USA, 2012.

[22] IEEE Std 120-1989, IEEE Master Test Guide for Electrical Measurements in Power Circuits.

[23] IEEE Std 141-1986, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution.
for Industrial Plants

[24] IEEE Std 142-2007, IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.

[25] IEEE Std 241-1990, IEEE Recommended Practice for Electric Power Systems in Commercial Buildings.
[26] IEEE Std 430-2017, IEEE Standard Procedures for the Measurement of Radio Noise from Overhead Power Lines and Substations.
[27] IEEE Std 644-2008, IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines.
[28] IEEE C63.12-2016, American National Standard Recommended Practice for Electromagnetic Compatibility Limits and Test Levels.
[29] IEEE Std 518-1982, IEEE Guide for the Installation of Electrical Equipment to Minimize Electrical Noise Inputs to Controllers from External Sources.
[30] IEEE Std 1100 -2005, IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment.
[31] IEEE Std 859-2008, IEEE Standard Terms for Reporting and Analysing Outage Occurrences and Outage States of Electrical Transmission Facilities.
[32] IEEE P1564-2013, Guide for Voltage Sag Indices.
[33] *Wei-Ming Wu, Fan-Tien Cheng and Fan-Wei Kong*, Dynamic-Moving-Window Scheme for Virtual-Metrology Model Refreshing, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 25, No. 2, May 2012.
[34] *Mohindar S. Sachdev and Ratan Das*, Understanding Micoprocessor-Based Technology applied To Relaying, USA, 2009.
[35] On Power Quality and Protection, Technical Report No. 372L, Chalmers University of Technology, Sweden, March 2001.
[36] *Leonard L. Grigsby*, Power System Stability and Control, Taylor & Francis Group, USA, 2007.
[37] *Sandeep S, Megha, Pavithra, Suma C Biradar and Thanush*, Study and Analysis of Modern Numerical Relay Compared to Electromechanical Relay for Transmission of Power, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 47 Number 9, May 2017, INDIA.
[38] *Hideyuki KAmeda, Soushi Yoshiyama, Go Ushio, Masaji Usui, KAtsuhiko Sekiguchi and ChikAshi Komatsu*, Estimation of Replacement of Numerical Relay Systems from Reliability Analysis, 2011 IEEE, Japan.
[39] *Ali Zain Saleem, Zohaib Akhtar Khan and Ali Imran*, Algorithms and Hardware Design of Modern Numeric Overcurrent and Distance Relays, 2008, Pakistan.
[40] *Waldemar Rebizant, Janusz Szafran and Andrzej Wiszniewski*, Digital Signal Processing in Power System Protection and Control, Wroclaw University of Technology, POLAND, 2011.
[41] *Donald Reimert*, Protective Relaying for Power Generation Systems, USA, 2006.
[42] *T.S. Sidhu, M.S. Sachdev and M. Hfuda*, Computer Simulation of Protective Relay Designs For Evaluating Their Performance, IEEE, University of Sask Atchewan, Canada, 1996.
[43] *Edmund Lai*, Practical Digital Signal Processing for Engineers and Technicians, IDC Technologies, Great Britain, 2003.
[44] *Robert J. Marks II*, Introduction to Shannon Sampling and Interpolation Theory, Springer-Verlag, New York, 1991.
[45] *Zhanjie Song, Yanwei Pang, Chunping Hou, and Xuelong Li*, An Improved Nyquist–Shannon Irregular Sampling Theorem from Local Averages, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 58, No. 9, September 2012.
[46] *Michael Unser*, 50 Years After Shannon, IEEE, Vol. 88, No. 4, April 2000, Switzerland.

[47] *José Manuel Alvarado Reyes, Catalina Elizabeth Stern Forgach*, Evaluation of the Minimum Size of a Window for Harmonics Signals, Journal of Signal and Information Processing, 2016, Mexico.
[48] *P. Jafarian and M. Sanaye-Pasand*, Weighted Least Error Squares Based Variable Window Phasor Estimator for Distance Relaying, University of Tehran, 2010, Iran.
[49] *Tarlochan S. Sidhu, Daljit S. Ghotra, and Mohindar S. Sachdev*, An Adaptive Distance Relay and its Performance Comparison with a Fixed Data Window Distance Relay, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 3, July 2002.
[50] *P. P. Vaidyanathan*, Generalizations of the Sampling Theorem: Seven Decades After Nyquist, IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 48, No. 9, September 2001.
[51] *Luc Lévesque*, Nyquist Sampling Theorem: Understanding the Illusion of A Spinning Wheel Captured With A Video Camera, Canada, 2014.
[52] *Insoo Kim and Kyusun Choi***,** Sample & Hold Circuits, The Pennsylvania State University, 2011, USA.
[53] *V.V. Zamaruiev*, The Use of Kotelnikov-Nyquist-Shannon Sampling Theorem for Designing of Digital Control System for a Power Converter, 2017 IEEE, Ukraine.
[54] *VenkAtesh C and K Shanti Swarup*, Investigating Performance of Numerical Distance Relay with Higher Sampling Rate, 2012 IEEE, India.
[55] Why Oversampling When Undersampling Can Do the Job, Texas Instruments Incorporated, 2013.
[56] *Milan Batista*, A collection of Matlab Functions for The Computation of Elliptical Integrals and Jacobian Elliptic Functions of Real Arguments, Slovenia, 2018.
[57] *Amit Rajput and Seema KAnathe*, Design of Sample & Hold Circuit, International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 2, Issue 11, November 2012.
[58] *Dag T. Wisland*, Sample and Hold, university of Oslo, 2014.
[59] *Zjajo, Amir, Pineda de Gyvez and Jose*, Low-Power High-Resolution Analog to Digital Converters, Springer, 2011.
[60] Specifications and Architectures of Sample-and-Hold Amplifiers, Texas Instruments, 2011, USA.
[61] *Amata Luangpol*, Wandee PetchmaneelumkA, Thawatchai KAmsri, and Vanchai Riewruja, A Current Signal CMOS Sample-and-Hold Circuit, Thailand, 2007.
[62] *A. T. Johns and S. K. Salman*, Digital Protection for Power Systems, United Kingdom, 1995.
[63] Terms Used by Power System Protection Engineers, Prepared by The IEEE Power System Relaying Committee, Relay Standards Subcommittee and Power System Engineers Working Group, The Institute of Electrical and Electronic Engineers, IEEE,2013.
[64] *Kenneth R. Stafford, Paul R. Gray, and Richard A. Blanchard*, A Complete Monolithic Sample/Hold Amplifier, IEEE, Vol.S C-9, No.6, 1974.
[65] *M. Subba Reddy and S. Tipu Rahaman*, An Effective 6-bit Flash ADC using Low Power CMOS Technology, IEEE, 2013.
[66] *M. Rabiee*, Analog to Digital (ADC) and Digital to Analog (DAC) Converters, Eastern Kentucky University, 2014.
[67] *David M*. Simpson, Antonio De Stefano, Digitizing Signals – a Short Tutorial Guide, United Kingdom, 2004.
[68] *Yefim S. Poberezhskiy*, Compressive Quantization versus Compressive Sampling in Image Digitization, USA, 2012.

[69] IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters, IEEE Instrumentation & Measurement Society, IEEE Std 1241, USA, 2011.
[70] *S., Daponte, P., Balestrieri, E., De Vito, L., Tilden, S. J., Max, S., and Blair, J.*, "ADC Parameters and Characteristics," IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, vol. 8, no. 5, pp. 44–54, Dec. 2005 [B46], 2005 IEEE.
[71] *Sophocles J. Orfanidis*, introduction to Signal Processing, Rutgers University, USA, 2010.
[72] *Nicholas Gray*, Analog-to-Digital Converter Basics, National Semiconductor Corporation, USA, 2006.
[73] *J. Pickering*, Analogue to Digital and Digital to Analogue Converters, Metron Designs Ltd, Norwich, UK, 2015.
[74] *Ed. Vijay K. Madisetti and Douglas B. Williams*, Analog-to-Digital Conversion Architectures, USA, 1999.
[75] *James R. Drummond*, Analogue-to-Digital Conversion, USA, 1997.
[76] *Olli Kursu and Timo Rahkonen*, Charge Scaling IO-bit Successive Approximation AID Converter with Reduced Input Capacitance, IEEE, FINLAND, 2011.
[77] *Gustavo Della Colletta, Luis H. C. Ferreira and Tales C. Pimenta*, A Low Power Successive Approximation A/D Converter based on PWM technique, Brazil, 2014.
[78] IEEE Std C37.111-2013, Measuring relays and protection equipment – Part 24: Common format for transient data exchange (COMTRADE) for power systems, USA, 2013.
[79] *Xiaodong Zhang, Anmin Wang*, Non-uniform Compressive Sampling at Sub-Nyquist Rates, IEEE, 2012.
[80] Power engineering guide Edition 7.1, Siemens AG, Erlangen, Germany, 2014.
[81] *Zitouni AbdelkAder, Abderrahmane Ouadi and Hamid Bentarzi*, Measurement Quality Enhancement using Digital Filter in Power Grid integrating TCSC, IEEE, 2015.
[82] *Edmund O. Schweitzer*, and Daqing Hou, Filtering for Protective Relays, Schweitzer Engineering Laboratories, USA, 1995.
[83] *J. M. Kennedy, G. E. Alexander, J. S. Thorp*, Variable Digital Filter Response Time in a Digital Distance Relay, General Electric Company, USA, 1995.
[84] *E. Orduña, D.G. Colomé, G. D. G. Venerdini, G. Rattá, O. M.Torres and J. S. Ulloa*, Behavior of the Digital Fourier Transform as Numerical filter in Distance Protection of Series Compensated Transmission Lines. Simulations with a Real Transmission System, IEEE Latin America Transactions, Vol. 10, No. 5, September 2012.
[85] *Chi-Shan Yu, Yi-Sheng Huang and Joe-Air Jiang*, A Full- and Half-Cycle DFT-based Technique for Fault Current Filtering, IEEE, 2010.
[86] *Vidyarani K. R, R. Nagaraja, G. K. Purushothama and Somnath Guha*, Implementation of Advanced DSP Techniques in Distance Protection Scheme, IEEE, 2012.
[87] *Andreas Antoniou*, Digital Signal Processing, CANADA, 2006.
[88] *Lucas Illing*, FOURIER ANALYSIS, USA, 2008.
[89] *H. 0. Pascual and J.* ***A.*** *Rapallini*, Behaviour of Fourier, Cosine and Sine Filtering Algorithms for Distance Protection, under Severe Saturation of the Current Magnetic Transformer, IEEE, 2001.
[90] *Chul-Hwan Kim, Myung-Hee Lee, Raj K. Aggarwal, and Allan T. Johns*, Educational Use of EMTP MODELS for the Study of a Distance Relaying Algorithm for Protecting Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Systems. Vol. Is. No. I, February 2000.
[91] *Hector J. Pdtuve F., Ismael Dim V and Ernest0 Vhzquez M*, fourier and walsh digital filtering algorithms foir distance protection, Mexico, 1995.

[92] *Q.H. Wu, Z. Lu and T.Y. Ji*, Protective Relaying of Power Systems Using Mathematical Morphology, University of Liverpool, England, 2009.
[93] *Edmund O. Schweitzer, III, and Daqing Hou*, Filtering for Protective Relays, Brazil, 1995.
[94] *Dusko Nedic, Graeme Bathurst and John Heath*, A Comparison of Short Circuit Calculation Methods And Guidelines For Distribution Networks, Vienna, 2007.
[95] PowerFactory User's Manual, Gomaringen, DIgSILENT GmbH, Germany, 2008.
[96] *Arun G. Phadke*, Computer Relaying For Power Systems, Second Edition, 2009, Virginia, USA.
[97] Calculation of Short- Circuit Currents In Three-Phase Systems, ABB, 2007.
[98] IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems, IEEE, USA, 2006.
[99] *A.T. Johns and D.F. Warne*, short-circuit currents, United Kingdom, 2005.
[100] calculation of short-circuit currents in three-phase systems, ABB, Germany, 2007.
[101] *J. C. Das*, Power System Analysis Short-Circuit Load Flow and Harmonics, USA, 2002.
[102] *Stanley H. H or owitz and A r un G. Phadke*, Power System Relaying, Third Edition, 2008, USA.
[103] *Dusko Nedic, Graeme Bathurst and John Heath*, A Comparison of Short Circuit Calculation Methods And Guidelines for Distribution Networks, 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 21-24 May 2007.
[104] *Zsolt conkA, KArel Máslo and Branislav Bátora*, Short Circuit Current Calculations, IEEE, 2018.
[105] *Ingo Kühnen*, Short-Circuit Calculation, Germany, 2011.
[106] *Albert0 Berizzi, Stefan0 Massucco, Andrea Silvestri and Dario Zaninelli*, Short- Circuit Current Calculation: A Comparison between Methods of IEC and ANSI Standards Using Dynamic Simulation as Reference, IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 30, No. 4, August 1994.
[107] *P. M. Anderson*, Power System Protection, IEEE Power Engineering Society, 1999, New York.
[108] *Ismail KAsikci*, Short Circuits in Power Systems: A Practical Guide to IEC 60909-0, Second Edition, Published byWiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Germany, 2018.
[109] *camilia Youssef mohamed*, protective Relaying for Power Systems, Egypt, 1996.
[110] Short- Circuit Calculations, Siemens AG and Siemens Industry, Inc, GERMANY and USA, 2014.
[111] Short-Circuit Analysis, ETAP Power Stations Guide, Operation Technology, Inc, 2001.
[112] J. Lewis Blackburn and Thomas J. Domin, Protective Relaying: Principles and Applications, Third Edition, 2006, USA.
[113] *Yin Lee Goh, Agileswari K. Ramasamy, Farrukh Hafiz Nagi and Aidil Azwin Zainul Abidin*, Evaluation of DSP based Numerical Relay for Overcurrent Protection, Malaysia, 2011.
[114] Overcurrent and Distance Relays, Siemens AG 1995, germany.
[115] Ahmed Safie Eldin, Practical Introduction to Power System Protection and Control, Egypt, 2005.
[116] Christophe Prévé, Protection of Electrical Networks, ISTE Ltd, USA, 2006.
[117] *J. Arrillaga and C. P. Arnold*, Computer Nalysis of Power Systems, New Zealand, 1994.
[118] *Muhammad Shoaib Almas, Rujiroj Leelaruji, and Luigi Vanfretti*, Over-Current Relay Model Implementation for Real Time Simulation & Hardware-In-the-Loop (HIL) Validation, IEEE, 2012.
[119] *Yavuz Ates, Ali Rifat Boynuegri, Mehmet Uzunoglu, Abdullah Nadar, Recep Yumurtacı, Ozan Erdinc, Nikolaos G. Paterakis and João P. S. Catalão*, Adaptive Protection Scheme for a Distribution System Considering Grid-Connected and Islanded Modes of Operation, Energies, 2016.

[120] Numerical Distance Protection Relay, SIPROTEC, 7SA511, instruction Manual, Copyright © Siemens AG 1995.
[121] *Choudhary, N.K., Mohanty, S.R. and Singh*, R.K. Coordination of Overcurrent Relay in Distributed System for Different Network Configuration. Journal of Power and Energy Engineering, 2015.
[122] Mohammed Tawfeeq Lazim Alzuhairi, Power System Protection -Overcurrent Protective Relays, Egypt, 2010.
[123] *Abdullah Al-Nujaimi, Abdulaziz Al-Muhanna, Omar Bamasq and Azzedine Zerguine*,
Using Digital Signal Processing in Power System Overcurrent Relay Protection, International Journal of Computing and Digital Systems, India, 2017.
[124] Sajad Samadinasab, Farhad Namdari , Nader Shojaei and Mohammad Bakhshipour, Optimal Coordination of Overcurrent and Distance Relays Using Hybrid Differential Evolutionary and Genetic algorithms (DE-GA), International Electrical Engineering Journal (IEEJ) Vol. 6 (2015) No.8, pp. 1999-2008, 2015.
[125] Multi-Functional Protectiv Relays 7SJ61, 7SJ62, 7SJ64, Copyright © Siemens AG, www.siprotec.com, 2012.
[126] Gerhard Ziegler, Numerical Distance Protection Relay, principles and application, third edition, siemens, 2008, Germany.
[127] *S.Tharun Kumar, M.Karthikeyan, M.Anand and S.K.Surya*, Distance Protection Scheme for Transmission Lines, International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology, Volume 4 Issue V, May 2016.
[128] Numerical Distance Protection Relay, SIPROTEC, 7SA6, Manual, Copyright © Siemens AG 2011.
[129] Line Differential and Distance Protection Terminal, ABB, 2003.
[130] *V.H. Makwana and B.R. Bhalja*, Transmission Line Protection Using Digital Technology, Springer Science, 2016.
[131] *P. Suresh Babu and S. V. Jayaram Kumar*, A Modified Fullcycle Discrete Fourier Algorithm Based Digital Multifunction Relay for Transmission Line Protection, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, VOL. 5, NO. 8, AUGUST 2010.
[132] *Li-Cheng Wu, Chih-Wen Liu and Ching-Shan Chen*, Modeling and Testing of a Digital Distance Relay Using MATLAB/SIMULINK, IEEE, 2005.
[133] *Mark Brown and Ben Ramesh*, Practical Power Systems Protection, Netherlands, 2004.
[134] *H. H. EI-Tamaly and Abou-Hashema M. El-sayed*, A New Technique for Setting Calculation Of Digital Distance Relays, Egypt, 2006.
[135] *Thanakorn Penthong and Komsan Hongesombut*, An Efficient Method of Automatic Distance Relay Settings for Transmission Line Protection, Thailand, 2013.
[136] Yofre Jacome, COES PERU and Charles F Henville, An Example Distance Protection Application with Complicating Factors, USA, 2009.
[137] *Edmund O. Schweitzer, and Bogdan Kasztenny*, Distance Protection: Why Have We Started with a Circle, Does It Matter, and What Else Is Out There?, IEEE, 2018.
[138] IEEE Guide for the Application of Protective Relays Used for Abnormal Frequency Load Shedding and Restoration, vol. 1, no. August. 2007.
[139] Ferracci, P, *Cahier technique no. 199, Power Quality*. ECT, 2001.
[140] Wang, F, *On Power Quality and Protection*, Sweden, *2001*.

[141] *Irrine Budi Sulistiawati1*, Aga Dia Priasmoro, Abraham Lomi and Ardyono Priyadi, Study of Static Under Frequency Load Shedding on IEEE 3 Generators 9 Bus System Caused of Transient Condition, Indonesia, 2017.
[142] *IEEE Std C37.117*, IEEE Guide for the Application of Protective Relays Used for Abnormal Frequency Load Shedding and Restoration, USA, 24 August 2007.
[143] *Andrik Sunyoto, Hadi Suyono and Abraham Lomi*, Load Shedding Strategy in Electrical Power System Using Under Frequency Relay, IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, Volume 13, Issue 3 Ver. I, PP 12-19, 2018.
[144] *Edsel Atienza*, Operations and Maintenance Considerations for Underfrequency Relaying Design, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc, 2011.
[145] *Mohd Zin, Mohd Hafcz and W. K. Wong, Static and Dynamic Under-Frequency Load Shedding: A Comparison*, 2004 IEEE, Singapore.
[146] *C.S. chen, C.T. Hsu, J.F. Huang, H.S. Chen, R.T. Hsu, C.B. Huang and Y.D. Lee*, Under Frequency Relay Setting for Tie Line and Load Shedding for An Industrial Power System with Multiple Cogeneration Units, IEEE, China, 1999.
[147] *LI Ye, ZHANG Baohui, BO Zhiqian and Lei Junzhe*, An Adaptive Load Shedding Method Based on the Underfrequency and Undervoltage Combined Relay, China, 2015.
[148] *Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan and H. Wayne Beaty*, Electrical Power Systems Quality, Second Edition, McGraw-Hill, 2004, USA.
[149] *Reena Moon and R.K.Dhatrak*, A Study of Effect of Magnetizing Inrush Current on Different Ratings of Transformers, India, 2014.
[150] *Omar A.S. Youssef*, A Wavelet-Based Technique for Discrimination Between Faults and Magnetizing Inrush Currents in Transformer, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 1, January, 2003.
[151] *Hodgkiss J.*, The Behavior of Current Transformer Subjected to Transient Asymmetric Current and the Effects On Associated Protective Relays, M.SC. Tech. Great Brittan, 1998.
[152] *Wu, Qing-Hua, Zhen Lu, and Tianyao Ji*, Protective Relaying Of Power Systems Using Mathematical Morphology. Springer Science & Business Media, 2009.
[153] *Rebizant W.; Hayder Tand Schiel L.*, Prediction of CT Saturation Period for Differential Relay Adaptation Purposes, in Proc. of the Int. Conference "Advanced Power System Automation and Protection ", Jeju, Korea, pp. 17-22, 2004.
[154] *V.NicholasandP.Crossley*, A Ct Saturation Detection Algorithm Using Symmetrical Components for Current Differential Protection'', IEEE Transactions On Power Delivery, USA, 2006.
[155] *Ž.Boris,B.Maks,M.Michael,Ž.Mihael and T.Rajeev*, Numerical modelling of metal oxide varistors'', Tsinghua University, Beijing, China, 2005.
[156] *Harnden J.; Martzloff Fand Morris G.*, Metal-oxide varistor: A New Way To Suppress Transients, General Electric Co, 1972.
[157] IEEE Guide for the Applications of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes, IEEE Standard C37.110, 1996.
[158] *S. E. Zocholl and D. W. Smaha*, Current Transformer Concepts, USA, 1993.
[159] Metal-Oxide Varistor (MOV), Littelfuse, Inc, USA, 2015.
[160] Metal Oxide Varistor, Thinking Electronic Industrial Co., USA, 2007.
[161] *Farad Razavi, S. hossein, Hosseinian Hossien, Bagheri and Askarian Abyaneh*, Effects of Current Transformers Saturation on Coordination and Operation of Distance Relays, IEE Power Tech Conference, Romania, 2009.

[162] *Yong-Cheol Kang, Seung-Hun Ok, and Sang-Hee Kang,* A CT Saturation Detection Algorithm, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 19, NO. 1, JANUARY 2004.
[163] *Young-choel.K; Ajung.H and Sang-Hee.K.,* Method for Detecting Current Transformer Saturation, USA, 2003.
[164] *M. Moghimi Haji, B. Vahidi and S. H. Hosseinian,* Current Transformer Saturation Detection Using Gaussian Mixture Models, Iran, 2013.
[165] *Koksal Erenturk,* ANFIS-Based Compensation Algorithm for Current-Transformer Saturation Effects, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 24, NO. 1, JANUARY 2009.
[166] *K.W. Chen and S.T. Glad.,* Estimation of the Primary Current in a Saturated Transformer, *Proceedings of the V h Conference on Decision and Control,* England, 2006.
[167] *Khorashadi, H and M. Sanaye-Pasand,* Correction *of Saturated Current Transformers Secondary Current Using ANNs*. IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 21, No. 1, January 2006.
[168] *Rebizant, W, and Daniel, B., 2007- Current-Transformer* Saturation Detection with Genetically Optimized Neural Networks. IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 22, No. 2, 2007.
[169] *Mahmoud Shahen Othman,* General Principles of Numerical Analysis, Syria, 1987.
[170] *Biswajit Das and Dhritikesh Chakrabarty*, Newton's Backward Interpolation: Representation Of Numerical Data By A Polynomial Curve, India, 2016.
[171] *Y.C. Kang, J.K. Park, S.H. Kang, A.T. Johns and R.K.* Aggarwal, An Algorithm For Compensating Secondary Current Of Current Transformers. *IEEE Transaction on Power Delivery,* Vol. 12, No. 1, Jan, pp. 116-122. 1997.
[172] *Soon-Ryul Nam, Jong-Young Park, Sang-Hee Kang and Mladen Kezunovic,* Phasor Estimation in the Presence of DC Offset and CT Saturation, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, 2009.
[173] *Jiuping Pan, Khoi Vu and Yi Hu,* An Efficient Compensation Algorithm for Current Transformer Saturation Effects, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 4, October 2004.
[174] *Nilesh G. Chothani1 and Bhavesh R. Bhalja*, New Algorithm for Current Transformer Saturation Detection and Compensation Based On Derivatives Of Secondary Currents And Newton's Backward Difference Formulae, India, 2013.
[175] *Yong-Cheol Kang, Sang-Hee Kang and Peter Crossley,* An algorithm for detecting CT saturation using the secondary current third-difference function, Italy, 2003.
[176] *Pankaj E. Dhole and V. B. Virulkar*, Detection of CT Saturation Using a Combined Method, India, 2015.
[177] *Philipp Stachel and Peter Schegner*, Detection and correction of current transformer saturation effects in secondary current signals, Germany, 2009.
[178] *Andrzej Wiszniewski, Waldemar Rebizant and Ludwig Schiel,* Correction of Current Transformer Transient Performance, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 2, April 2008.