

Universitatea „Vasile Alecsandri” din Bacău

Facultatea de Inginerie



---

CERCETĂRI PRIVIND INTEGRAREA SURSELOR  
FOTOVOLTAICE ÎN REȚELELE ELECTRICE

---



**BANU IOAN VIOREL**



EDITURA „ALMA MATER”  
BACĂU, 2022

## CUPRINS

<b>ABREVIERI</b> .....	<b>xi</b>
<b>MULȚUMIRI</b> .....	<b>xiii</b>
<b>INTRODUCERE</b> .....	<b>xv</b>
A.1 Date de contact ale autorului.....	xix
<b>1 Stadiul actual al integrării surselor fotovoltaice în rețelele electrice</b> .....	<b>1</b>
1.1 Integrarea surselor fotovoltaice în rețelele electrice în contextul actual .....	1
1.2 Evoluția pe plan mondial a surselor fotovoltaice .....	2
1.2.1 Evoluția capacității instalate din surse fotovoltaice la nivel mondial .....	2
1.2.2 Situația surselor fotovoltaice în Europa .....	4
1.3 Cadru general privind sursele fotovoltaice în România .....	5
1.3.1 Potențial solar și puterea instalată din surse fotovoltaice în România.....	5
1.3.2 Cadrul legal și de reglementare aplicabil surselor fotovoltaice în România.....	7
1.4 Solicitări ale codurilor de rețea pentru sisteme fotovoltaice.....	10
1.4.1 Cerințe de racordare la rețea a surselor fotovoltaice la nivel internațional.....	10
1.4.2 Solicitări ale codurilor de rețea pentru surse fotovoltaice în România .....	12
<b>2 Convertoare pentru sisteme fotovoltaice</b> .....	<b>15</b>
2.1 Convertoare de putere c.c.-c.c. pentru sisteme fotovoltaice.....	15
2.1.1 Convertorul c.c.-c.c. coborâtor de tensiune.....	15
2.1.2 Convertorul c.c.-c.c. ridicător de tensiune .....	16
2.1.3 Sisteme de control pentru dispozitive de căutare a punctului de putere maximă.....	17
2.1.3.1 Introducere în algoritmi de optimizare MPPT .....	17
2.1.3.2 Algoritm perturbă și observă.....	19
2.1.3.3 Algoritm conductanță incrementală .....	19
2.1.3.4 Algoritm tensiune în circuit deschis .....	20
2.2 Invertoare c.c.-c.a. pentru sisteme fotovoltaice .....	22
2.2.1 Topologii de invertoare pentru sisteme fotovoltaice .....	22
2.2.1.1 Structuri de invertoare derivate din topologia în punte H.....	23
2.2.1.2 Structuri de invertoare derivate din topologia cu punct neutru flotant.....	23
2.2.1.3 Structuri generale de invertoare pentru sisteme fotovoltaice .....	24
2.2.1.4 Invertoare pentru sisteme fotovoltaice trifazate.....	27
<b>3 Sisteme de control pentru invertoarele sistemelor fotovoltaice</b> .....	<b>29</b>
3.1 Structuri de control pentru invertoarele sistemelor fotovoltaice.....	29
3.1.1 Structură de control pentru invertoare cu o singură treaptă pentru sisteme fotovoltaice	30
3.1.2 Structură de control pentru invertoare cu două trepte pentru sisteme fotovoltaice ...	31
3.1.3 Exemplu de sistem de control a unui inverter monofazat pentru sisteme fotovoltaice rezidențiale.....	31
3.2 Sincronizarea cu rețeaua a invertoarelor sistemelor fotovoltaice .....	32
3.2.1 Sincronizarea cu rețeaua a convertoarelor monofazate pentru sisteme fotovoltaice ..	33

3.2.1.1	Detectarea trecerii prin zero bazată pe monitorizare și sincronizare .....	34
3.2.1.2	Sincronizarea cu rețeaua utilizând bucla de prindere a fazei .....	34
3.2.1.3	Principalele metode PLL pentru sincronizarea cu rețeaua a invertoarelor sistemelor fotovoltaice monofazate .....	37
3.2.2	Sincronizarea cu rețeaua a convertoarelor pentru sisteme fotovoltaice trifazate.....	37
3.2.2.1	Vectorul tensiunii trifazate în cazul defectelor în rețea.....	39
3.2.2.2	Principalele metode pentru sincronizarea cu rețeaua a invertoarelor sistemelor fotovoltaice trifazate.....	42
3.3	Detectarea funcționării insularizate a centralelor electrice fotovoltaice.....	42
3.3.1	Introducere în insularizarea centralelor electrice fotovoltaice .....	42
3.3.1.1	Ce este insularizarea?.....	42
3.3.1.2	Zona de nedetectare a insularizării.....	45
3.3.2	Clasificarea metodelor anti-insularizare .....	45
3.3.3	Metode pasive de detectare a insularizării.....	46
3.3.3.1	Metode anti-insularizare prin supra/subtensiune și supra/sub-frecvență .....	46
3.3.3.2	Metoda anti-insularizare prin detectarea saltului de fază .....	47
3.3.3.3	Metoda anti-insularizare prin detectarea armonicilor.....	47
3.3.4	Metode active de detectare a insularizării .....	48
3.3.4.1	Metode anti-insularizare prin abaterea frecvenței.....	48
3.3.4.2	Metode anti-insularizare prin abaterea tensiunii .....	50
3.3.4.3	Metode anti-insularizare prin estimarea impedanței rețelei.....	51
3.3.4.4	Metoda anti-insularizare prin injectare de armonici .....	51
3.3.4.5	Metoda anti-insularizare bazată pe bucla de prindere a fazei.....	52
3.3.5	Metode anti-insularizare la nivelul rețelei: metoda conectării impedanței .....	52
3.3.6	Metode bazate pe comunicații între rețea și inverterul sistemului fotovoltaic .....	53
3.3.7	Concluzii privind metodele anti-insularizare pentru centrale electrice fotovoltaice ....	53
3.4	Controlul curentului rețelei electrice pentru invertoarele sistemelor fotovoltaice.....	53
3.4.1	Strategii de respingere a armonicilor pentru invertoarele sistemelor fotovoltaice .....	54
3.4.1.1	Controlul curentului bazat pe regulator PI (engl. PI-based control) .....	55
3.4.1.2	Controlul curentului prin metode aperiodice (engl. deadbeat control) .....	55
3.4.1.3	Controlul rezonant al curentului .....	55
3.4.1.4	Compensarea armonicilor .....	56
3.5	Îmbunătățirea calității puterii din rețea prin compensarea golurilor de tensiune .....	58
3.6	Servicii auxiliare pentru centrale electrice fotovoltaice.....	59
3.6.1	Introducere.....	59
3.6.1.1	Reglarea tensiunii.....	59
3.6.1.2	Injectarea de reactiv.....	60
3.6.2	Sistem fotovoltaic cu convertor multifuncțional conectat în paralel .....	60
3.6.3	Controlul tensiunii alternative a invertoarelor sistemelor fotovoltaice .....	61
3.6.4	Concluzii privind serviciile auxiliare pentru centrale electrice fotovoltaice .....	62
<b>4</b>	<b>Controlul sistemelor fotovoltaice în cazul defectelor în rețea.....</b>	<b>63</b>
4.1	Controlul sistemelor fotovoltaice monofazate.....	63
4.2	Controlul sistemelor fotovoltaice trifazate .....	64
4.2.1	Structuri de bază pentru controlul invertoarelor trifazate ale sistemelor fotovoltaice	65

<b>5</b>	<b>Proiectarea bazată pe model a centralelor electrice fotovoltaice .....</b>	<b>67</b>
5.1	Introducere în modelarea sistemelor fotovoltaice .....	67
5.2	Ce este proiectarea bazată pe modelare?.....	68
5.3	Adoptarea proiectării bazate pe model .....	69
5.3.1	Trecerea la proiectarea bazată pe model .....	69
5.3.2	Dezvoltarea arhitecturii modelului .....	69
5.3.3	Efectuarea managementului configurației .....	70
5.3.4	Implementarea standardelor de realizare a modelelor din firme și industrie.....	70
5.3.5	Optimizarea performanței simulării în Simulink .....	70
5.3.6	Stabilirea unei strategii de verificare a fiabilității, de validare și de testare.....	70
<b>6</b>	<b>Modele pentru surse fotovoltaice implementate în Matlab și Simulink .....</b>	<b>73</b>
6.1	Generalități asupra aspectelor de modelare a celulelor fotovoltaice.....	73
6.2	Modelare celule fotovoltaice, șiruri de celule fotovoltaice și matrici fotovoltaice.....	74
6.2.1	Modele pentru surse fotovoltaice folosind abordări fundamentale .....	75
6.2.1.1	Modele ale unei singure celule fotovoltaice .....	75
6.2.1.2	Matricea fotovoltaică și punctul de putere maximă .....	76
6.2.2	Model folosind date experimentale.....	78
6.2.2.1	Panou fotovoltaic folosind date de test .....	78
6.2.2.2	Studiu pe temperatură asupra modelării matricelor fotovoltaice utilizând date experimentale .....	81
6.3	Modelare convertoare pentru sisteme fotovoltaice .....	83
6.4	Dezvoltare de algoritmi de căutare MPPT.....	84
6.4.1	Algoritmul perturbă și observă .....	84
6.4.2	Algoritmul conductanță incrementală .....	85
6.4.3	Algoritmul tensiune în circuit deschis .....	86
6.5	Sistem fotovoltaic compus din panou fotovoltaic, convertor c.c.-c.c. coborâtor de tensiune și regulator MPPT .....	87
6.5.1	Descriere generală a modelului simulatorului fotovoltaic.....	87
6.5.2	Analiza comparată a metodelor perturbă și observă și conductanță incrementală.....	89
6.5.2.1	Rezultate de simulare.....	89
6.5.2.2	Concluzii .....	93
6.5.3	Comportarea algoritmului MPPT conductanță incrementală la schimbarea bruscă a iradiației.....	93
6.5.3.1	Rezultate de simulare și discuții .....	93
6.5.4	Compararea modelului de panou fotovoltaic utilizând date experimentale cu cel realizat folosind principii de bază Simulink .....	96
6.5.4.1	Rezultate de simulare.....	96
6.5.4.2	Concluzii .....	98
<b>7</b>	<b>Analiza unor regimuri tranzitorii în cazul integrării surselor FV la nivelul rețelelor electrice.....</b>	<b>101</b>
7.1	Metodologie de lucru .....	101
7.2	Descrierea modelului Simulink al centralei electrice fotovoltaice cuplată la rețea .....	101
7.2.1	Centrala electrică fotovoltaică .....	101
7.2.1.1	Matricea fotovoltaică .....	102
7.2.1.2	Sistemul de control al convertorului c.c.-c.c. și al invertorului c.c.-c.a.....	103

7.2.1.3	Rețeaua electrică.....	104
7.2.1.4	Implementarea în Simulink a metodelor pasive de detectare a funcționării insularizate .....	105
7.2.2	Descrierea releelor de protecție de anti-insularizare .....	106
7.2.2.1	Relee maximale și relee minimale de curent și respectiv de tensiune .....	106
7.2.2.2	Relee de frecvență.....	108
7.2.2.3	Releul ROCOF.....	108
7.2.2.4	Releul de decalaj de fază .....	109
7.2.2.5	Releul de tensiune a circuitului intermediar .....	110
7.3	Detectarea insularizării centralei electrice fotovoltaice .....	111
7.3.1	Prezentarea cazurilor de simulare și a modului de evaluare a metodelor anti-insularizare cu relee prin compararea timpilor de detectare a insularizării.....	112
7.3.2	Cazul 1: Întreruptorul trifazat în poziție deschisă (Centrala electrică fotovoltaică decuplată complet de sistemul electroenergetic).....	113
7.3.2.1	Comportamentul centralei fotovoltaice pe durata insularizării.....	113
7.3.2.2	Rezultate de simulare privind timpul de detectare al insularizării .....	115
7.3.3	Cazul 2: defect produs în rețeaua electrică (Comportamentul releelor de protecție de anti-insularizare la defecte produse în rețea) .....	119
7.3.3.1	Rezultate de simulare privind releele de protecție convenționale la defecte produse în rețea .....	119
7.3.3.2	Concluzii privind evaluarea metodelor de protecție de anti-insularizare cu relee convenționale.....	120
7.3.4	Rezultate de simulare schemă de prevenire a insularizării. Rezultate ale detectării insularizării prin metoda monitorizării tensiunii circuitului intermediar .....	121
7.3.4.1	Puterea consumatorilor locali este mai mare decât puterea generată local..	121
7.3.4.2	Puterea consumatorilor conectați local este egală cu puterea generată local	124
7.3.4.3	Puterea consumatorilor locali este mai mică decât puterea generată local ..	124
7.3.4.4	Concluzii privind detectarea insularizării prin metoda monitorizării tensiunii circuitului intermediar.....	126
7.4	Comportarea centralei fotovoltaice în regim de scurtcircuit în rețeaua electrică.....	126
7.4.1	Scurtcircuite simetrice.....	128
7.4.1.1	Scurtcircuit trifazat produs în rețeaua electrică.....	128
7.4.2	Scurtcircuite nesimetrice .....	132
7.4.2.1	Scurtcircuit bifazat cu punere la pământ produs în rețeaua electrică .....	132
7.4.2.2	Scurtcircuit bifazat metalic produs în rețeaua electrică .....	137
7.4.2.3	Scurtcircuit monofazat produs în rețeaua electrică.....	141
7.4.3	Prezentarea cazurilor relevante de scurtcircuit în rețeaua electrică.....	145
7.4.3.1	Influența defectelor din rețea asupra punctului comun de cuplare a centralei electrice fotovoltaice la rețeaua electrică.....	145
7.4.3.2	Influența asupra invertorului centralei electrice fotovoltaice .....	147
7.4.3.3	Influența asupra matricei de panouri fotovoltaice .....	149
7.4.4	Concluzii privind comportarea centralei electrice fotovoltaice în regim de defect produs în rețeaua electrică.....	151
<b>8</b>	<b>Noi direcții de studiu. Sursele fotovoltaice în microrețele electrice .....</b>	<b>155</b>

8.1 Direcții de continuare a cercetării .....	155
8.2 Funcționarea în comun a surselor fotovoltaice cu alte surse de energie .....	155
<b>Bibliografie.....</b>	<b>157</b>
<b>Anexa A Scripturi Matlab .....</b>	<b>167</b>
A.1 Aplicație Matlab pentru studiul efectului iradiației și temperaturii asupra performanțelor matricelor fotovoltaice.....	167
A.2 Aplicație Matlab pentru modelare matrici fotovoltaice folosind date experimentale .....	170
A.3 Funcție Matlab pentru algoritmul perturbă și observă .....	172
<b>Anexa B Rezultate de simulare .....</b>	<b>173</b>
B.1 Timpii de detectare ai insularizării de către relele de protecție de anti-insularizare .....	173
B.2 Rezultatele simulării centralei electrice fotovoltaice în regim de scurtcircuit în rețea .....	175
<b>Index .....</b>	<b>177</b>