

Aktualne problemy pracy systemów elektroenergetycznych

pod red. Ryszarda Zajczyka

Gdańsk 2023

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dariusz Mikielawicz

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Michał Szydlowski

RECENZENCI

Robert Lis

Stefan Paszek

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

SKŁAD I PROJEKT OKŁADKI

Ireneusz Jelonek

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej



Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<https://www.sklep.pg.edu.pl>

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy.

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2023

ISBN 978-83-7348-900-4

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 17,9, ark. druku 17,0, 281/1225

Druk i oprawa: Volumina.pl sp. z o. o.
ul. Księcia Witolda 7-9, 71-063 Szczecin, tel. 91 812 09 08

[Kup książkę](#)

SPIS TREŚCI

Słowo wstępne.....	11
Bezpieczny, zeroemisyjny i efektywny ekonomicznie Krajowy System	
Elektroenergetyczny z elektrowniami jądrowymi	13
Wstęp.....	13
Stan źródeł wytwórczych w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym	14
Struktura produkcji energii elektrycznej w Polsce w latach 2020, 2021 i 2022	15
Zrównoważony rozwój źródeł wytwórczych w Krajowym Systemie	
Elektroenergetycznym	16
Propozycja programu zrównoważonego rozwoju źródeł wytwórczych	
w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym.....	19
Podsumowanie	19
Bibliografia.....	22
I. Bezpieczeństwo pracy systemu elektroenergetycznego.....	24
Wstęp.....	24
1. Badania współczynnika CVR w warunkach rzeczywistych – metoda,	
 wyniki i wnioski praktyczne	29
Wstęp.....	29
Kontrolowane obniżenie napięcia w badanym GPZ.....	29
Pomiary poboru energii GPZ przez system odczytowy AMI	30
Dobowa zmienność obciążenia w okresie pomiarów	30
Współczynniki CVR	31
Klasyczna metoda wyznaczania współczynników CVR <i>day-on/day-off</i>	32
Metoda statystyczna wyznaczania współczynników CVR.....	33
Metoda wyznaczania współczynników CVR na podstawie modelu	
obciążenia sieci.....	33
Porównanie wartości współczynników CVR wyznaczonych trzema metodami ...	35
Porównanie trzech metod wyznaczania współczynników CVR.....	36
Wnioski z przeprowadzonych badań	37
Ocena możliwości podniesienia efektywności energetycznej sieci przez	
obniżenie napięcia sieci w warunkach krajowych.....	38
Bibliografia.....	39
2. Czy źródła PV mogą wpływać na wzrost wskaźników czasu trwania	
 przerwy w dostawie energii elektrycznej SAIDI i SAIFI?	40
Wstęp.....	40

Rozwój instalacji PV na badanym obszarze	42
Wpływ przerw wywołanych regulacją zaczepów transformatora na wskaźniki czasu trwania przerwy w dostawie energii elektrycznej.....	43
Wnioski	44
Bibliografia.....	45
3. Modelowanie i adekwatność magazynów energii elektrycznej w badaniach systemowych	47
Wstęp.....	47
Cechy i wykorzystanie magazynów w systemie elektroenergetycznym	48
Modelowanie technologii magazynowania.....	50
Rozszerzone modele systemowe.....	51
Wnioski i podsumowanie.....	54
Bibliografia.....	54
4. Praca linii zasilających złożonych z N pojedynczych przewodników w przypadku zwarcia	56
Wstęp.....	56
Zabezpieczenia i zwarcia w instalacjach elektrycznych	58
Zmiany impedancji i prądu zwarciovego w instalacjach z kablami połączonymi równolegle	60
Studium przypadku	63
Omówienie	69
Wnioski	69
Bibliografia.....	70
5. Urządzenie do nadzoru on-line linii kablowych w sieciach dystrybucyjnych średnich napięć.....	72
Wstęp.....	72
Zapobieganie niespodziewanej awarii	74
Urządzenie zabezpieczeniowe	74
Weryfikacja funkcjonalności.....	77
Wdrożenie	77
Wnioski	80
Bibliografia.....	80
II. Sterowanie pracą systemu elektroenergetycznego.....	81
Wstęp.....	81
1. Koncepcja poprawy elastyczności układów energetycznych	85
Wstęp.....	85
Model układu technologicznego – blok klasy 200+ z proponowaną modyfikacją....	86
Bibliografia.....	92

2. Możliwość analizy zachowania dynamicznego dużego systemu elektroenergetycznego przy ograniczonej dostępności danych na przykładzie wykorzystania pomiarów zarejestrowanych w trakcie awarii w Bełchatowie	93
Wstęp.....	93
Dostępność modeli rozplwyowych i dynamicznych ENTSO-E CE	94
Model rozplwyowy ENTSO-E CE dla analiz dynamicznych.....	95
Model dynamiczny ENTSO-E CE.....	98
Wykorzystanie rejestracji PMU po awarii w Bełchatowie do walidacji modelu ENTSO-E CE.....	101
Bibliografia.....	103
3. Wykorzystanie urządzeń FACTS do zwiększenia tłumienia oscylacji międzyobszarowych niskiej częstotliwości w dużym systemie elektroenergetycznym.....	104
Wstęp.....	104
Wpływ przyłączenia Ukrainy i Mołdawii na mody międzyobszarowe ENTSO-E CE.....	106
Stabilizatory systemowe.....	108
Urządzenia STATCOM	109
Symulacje dynamiczne.....	112
Inne urządzenia FACTS	114
Podsumowanie	115
Bibliografia.....	115
4. Wymóg przejścia przez zwarcie jednostki wytwórczej z zastosowaniem generacji synchronicznej oraz wynikające z niego uwarunkowania dla układów wzbudzenia	116
Wstęp.....	116
Wymagania FRT dla synchronicznych modułów typów B, C i D	118
Środowisko modelowe	118
Badania modelowe zachowania się generatora synchronicznego w czasie FRT ...	121
Podsumowanie	124
Bibliografia.....	125
5. Węzły lokalne systemu LFC do obsługi elektrowni wodnych i konwencjonalnych	127
Wstęp.....	127
Ogólna struktura systemu LFC	127
Zmiany funkcjonalne w nowej wersji systemu LFC2	128
Realizacja regulacji pierwotnej, wtórnej automatycznej i manualnej.....	129
Realizacja poleceń regulacyjno-sterowniczych	129
Realizacja planów mocy zadanej	130

Podsumowanie	132
Bibliografia.....	132
III. Regulacja napięcia w systemie elektroenergetycznym	133
Wstęp.....	133
1. Opracowanie algorytmu obszarowej regulacji napięcia	
w sieci przesyłowej	136
Wstęp.....	136
Regulacja napięcia w sieciach przesyłowych	136
Założenia ogólne dla obszarowej regulacji napięcia w KSE	138
Założenia szczegółowe proponowanego algorytmu obszarowej regulacji	
napięcia	139
Algorytm obszarowej regulacji napięcia wyrażony jako problem	
programowania liniowego (PPL).....	141
Wnioski	144
Bibliografia.....	145
2. Problemy grupowej regulacji napięcia i mocy biernej we wspólnym	
węźle sieci przesyłowej z wykorzystaniem konwencjonalnych jednostek	
wytwórczych, farm wiatrowych i farm fotowoltaicznych	147
Wstęp.....	147
Udział farm wiatrowych i fotowoltaicznych w regulacji napięć w sieci	
przesyłowej – wymagania.....	149
Problem lokacji regulatora koordynującego regulację za pomocą jednostek	
wytwórczych.....	150
Prowadzenie regulacji napięcia w węźle z generatorami konwencjonalnymi	
po dołączeniu jednostek OZE.....	151
Problemy w koordynacji obciążeń jednostek wytwórczych konwencjonalnych	
i OZE pracujących w grupie na wspólny węzeł	153
Problem optymalizacji szybkości regulacji.....	156
Problem technicznej realizacji sterowania zmianami poziomu mocy biernej	
pojedynczego generatora lub farmy pracujących razem w jednej grupie.....	156
Podsumowanie	157
Bibliografia.....	158
3. Wykorzystanie symulatora czasu rzeczywistego RTDS do testowania	
nowych algorytmów układów regulacji napięcia stacji transformatorowej	
ARST.....	159
Wstęp.....	159
Nowy algorytm regulacji.....	159
RTDS (real time digital simulator) i stanowisko badawcze.....	161
Badanie układu ARST	163

Badanie jednego autotransformatora w kryterium regulacji D.....	163
Badanie jednego autotransformatora w kryterium regulacji A	165
Badanie dwóch autotransformatorów w kryterium regulacji A	166
Podsumowanie	168
Bibliografia.....	168
4. Przykład wykorzystania grupy farm wiatrowych w regulacji napięcia w sieci przesyłowej.....	169
Wstęp.....	169
Wymagania OSP w stosunku do farm wiatrowych	169
Regulacja napięcia z udziałem grupy farm wiatrowych	170
Agregacja mocy farm wiatrowych	172
Możliwe warianty przyłączenia farm wiatrowych w stacjach	174
Komunikacja nadrzędnego układu ARST z farmami wiatrowymi	174
Potencjalne problemy związane z udziałem statycznych źródeł mocy biernej.....	175
Wyniki działania układu.....	177
Podsumowanie	179
Bibliografia.....	179
5. Struktury układów regulacji grupowej ARNE w polskich elektrowniach systemowych	181
Wstęp	181
Wariant klasyczny dla elektrowni systemowych	181
Rozszerzenie funkcjonalności wariantu klasycznego	182
Węzeł z wielkim odbiorcą przemysłowym (WO) – wariant 1.....	184
Węzeł z wielkim odbiorcą przemysłowym (WO) – wariant 2.....	186
Wnioski	188
Bibliografia.....	189
IV. Wpływ generacji rozproszonej na system elektroenergetyczny	190
Wstęp	190
1. Autokonsumpcja prosumentów w prognozowaniu zapotrzebowania na energię elektryczną.....	197
Wstęp.....	197
Stanowisko badawcze	197
Autokonsumpcja	199
Modele prognostyczne	200
Dokładność modelu prognostycznego	202
Wyniki	203
Podsumowanie i wnioski.....	206
Bibliografia.....	207

2. Integracja sterowania mikroinstalacjami i odbiorami z regulacją parametrów w liniach dystrybucyjnych nN	208
Wstęp.....	208
Analiza podwyższania napięcia w liniach nN.....	209
Tradycyjne metody modernizacji sieci dystrybucyjnych i regulacji parametrów napięciowych	211
Regulacja napięcia w sieciach nN za pomocą transformatorów dodawczych.....	212
Wyniki pomiarów na linii z regulatorem napięcia i mikroinstalacjami	214
Integracja instalacji prosumenckich z układem sterowania sieciowego regulatora napięcia.....	215
Bibliografia.....	217
3. Odzworowanie odnawialnych źródeł energii w analizach stabilności na modelu wielkoskalowego systemu elektroenergetycznego	218
Wstęp.....	218
Ekwiwalent statyczny źródeł fotowoltaicznych i wiatrowych.....	218
Modelowanie dynamiczne źródeł fotowoltaicznych i wiatrowych.....	222
Testowanie i walidacja modeli OZE w rozległym modelu systemu elektroenergetycznego	225
Podsumowanie	227
Bibliografia.....	228
4. Optimal capacity and placement of dispatchable distributed generations in an autonomous microgrid using differential evolution algorithm	229
Introduction.....	229
Problem formulation	230
Constraints.....	231
Proposed solution	233
Data of the test system and investigated cases.....	237
Numerical results and discussion	237
Conclusions	241
Bibliography.....	242
5. Post EV battery energy storage facilities in the electric power system of a non-residential building enhancing the reliability of electricity supply and improving energy efficiency.....	244
Introduction	244
Horizon 2020 POWERSKIN+ project.....	245
Concepts for supplying power to loads in the POWERSKIN+ project	245
Electrical architecture of a single POWERSKIN+ module	247
DC/DC and AC/DC converters	248
Demonstrators of the POWERSKIN+ project	249

Conclusion and discussion	252
Bibliography	252
6. Przeciążenia linii elektroenergetycznych wywołane przyłączeniem odległych źródeł OZE i magazynów energii	255
Wstęp	255
Przyczyny „wędrowki mocy”	256
Opis sieci testowej	258
Opis metody obliczeniowej	259
Wyniki analiz	260
Podsumowanie	263
Bibliografia	264
7. Analiza potencjału, wykorzystania oraz wsparcia rozwoju OZE w województwach Polski w celu konstrukcji indeksu zrównoważonego rozwaju energetycznego regionów	265
Wstęp	265
Metodyka konstrukcji indeksu oraz wybór zmiennych diagnostycznych	267
Wyniki badania indeksów zrównoważonej energetyki regionalnej	269
Podsumowanie i wnioski	271
Bibliografia	271

SŁOWO WSTĘPNE

Ryszard Zajczyk¹

¹ Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Elektroenergetyki.

Prezentowana monografia jest zbiorem referatów naukowych i technicznych przedstawiających aktualne problemy rozwoju, funkcjonowania i pracy systemu elektroenergetycznego.

W pierwszej części, zatytułowanej: *Bezpieczny, zeroemisyjny i efektywny ekonomicznie Krajowy System Elektroenergetyczny z elektrowniami jądrowymi*, omówiono problematykę funkcjonowania Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, w którym w niedalekiej perspektywie pojawiają się elektrownie jądrowe.

W kolejnych częściach przedstawiono kolejno następujące zagadnienia:

- I. Bezpieczeństwo pracy systemu elektroenergetycznego: bezpieczeństwo systemu elektroenergetycznego w różnych horyzontach czasowych, od sekundowych do wieloletnich; środki poprawy bezpieczeństwa – inwestycje, automatyka i algorytmy sterowania; prognozowanie rozwoju systemu elektroenergetycznego; niezawodność systemu elektroenergetycznego; wpływ OZE na stabilność systemów elektroenergetycznych.
- II. Sterowanie pracą systemu elektroenergetycznego: sterowanie pracą systemu elektroenergetycznego; środki techniczne poprawiające sterowalność systemu, w tym oparte na elementach energoelektronicznych; innowacyjne rozwiązania techniczne i doświadczenia z eksploatacji układów automatyki, sterowania, pomiarów i monitorowania; przesył informacji w systemie elektroenergetycznym; rozległe układy pomiarowe (WAMS) i rozległe układy sterowania (WACS) w systemie elektroenergetycznym; układy FACTS i zasobniki energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym; przesuwniki fazowe w systemach elektroenergetycznych.
- III. Regulacja napięcia w systemie elektroenergetycznym: algorytmy regulacji napięcia na wszystkich poziomach systemu elektroenergetycznego; regulacja napięcia generatorów i transformatorów energetycznych; układy regulacji grupowej w elektrowniach i stacjach elektroenergetycznych; regulacja obszarowa napięcia; wykorzystanie źródeł odnawialnych w procesie regulacji napięcia w sieciach przesyłowych i dystrybucyjnych; współpraca układów ARNE i ARST z energetyką odnawialną.
- IV. Wpływ generacji rozproszonej na system elektroenergetyczny: generacja rozproszona i odnawialne źródła energii – ich wpływ na system elektroenergetyczny; integracja elektrowni wiatrowych, fotowoltaicznych i ogniw paliwowych z systemem elektroenergetycznym; magazynowanie energii w aspekcie współpracy systemu z OZE; problemy techniczne, ekonomiczne, prawne; mikroźródła i mikrosieci; współpraca pojazdów elektrycznych z systemem elektroenergetycznym (V2G); wpływ generacji rozproszonej na jakość energii elektrycznej.

Każda część rozpoczyna się wstępem omawiającym poszczególne rozdziały i wskazującym tematy i zagadnienia do dalszych prac nad tematyką realizowaną przez autorów. Poruszane problemy mogą również stanowić podstawę do szerokiej dyskusji środowisk naukowych i technicznych związanych z krajową elektroenergetyką.

prof. dr hab. inż. Ryszard Zajczyk
redaktor monografii konferencyjnej
„Aktualne problemy pracy systemów elektroenergetycznych”