

ELEKTROENERGETYKA W OKRESIE TRANSFORMACJI

pod redakcją Zbigniewa Lubońskiego

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dariusz Mikielewicz

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Michał Szydłowski

RECENZENCI

Mirosław Parol

Paweł Pijarski

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://sklep.pg.edu.pl>



Publikacja jest dostępna na licencji Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2025

ISBN 978-83-7348-950-9 (wersja papierowa)

ISBN 978-83-7348-951-6 (wersja elektroniczna)

XXI KONFERENCJA NAUKOWA



AKTUALNE PROBLEMY W ELEKTROENERGETYCE

4–6 czerwca 2025, Jastarnia

Sponsor Główny



Energa

GRUPA ORLEN

Sponsor

PSE Polskie Sieci
Elektroenergetyczne

Patroni



Spis treści

Słowo wstępne	15
I. Sterowanie pracą systemu elektroenergetycznego	19
Wstęp	19
I.1. Wpływ zmian przekładni na impedancje zastępcze transformatorów trójzwojowych	23
Wprowadzenie	23
Schematy zastępcze transformatorów trójzwojowych	24
Impedancje dla zaczeń pozaznamionowych – proponowana metoda	26
Błędne założenia przyczyną niedokładności	28
Podsumowanie	31
Bibliografia	31
I.2. Koncepcja układu regulacji napięcia ARST współpracującego z morskimi farmami wiatrowymi	33
Wprowadzenie	33
Topologia morskich farm wiatrowych i ich połączeń liniowych ze stacjami przesyłowymi w KSE	33
Opracowanie nowych algorytmów i kryteriów pracy układu ARST z morskimi farmami wiatrowymi	35
Komunikacja ARST z MFW	37
Opracowanie modelu laboratoryjnego układu ARST oraz badanie poprawności działania algorytmów regulacji skoordynowanej z morskimi farmami wiatrowymi	37
Podsumowanie	43
Bibliografia	44
I.3. Sterowanie transformatorem 110 kV/SN z wykorzystaniem pomiarów i zasobów regulacyjnych w sieci SN	45
Wprowadzenie	45
Zastosowanie wielokryterialnego programowania liniowego MOLP we wtórnej regulacji napięcia w aktywnej sieci dystrybucyjnej	46
Zdefiniowanie celów optymalizacji i zmiennych decyzyjnych	47
Sformułowanie matematycznego opisu problemu optymalizacyjnego	49
Rozwiązanie MOLP metodą opartą na preferencjach	50
Badania algorytmu regulacji napięcia na modelu symulacyjnym zróżnicowanego, rzeczywistego obszaru sieci dystrybucyjnej	50

Omówienie wyników testów funkcji optymalnego sterowania transformatorem w GPZ i źródłami mocy w głębi sieci SN	54
Podsumowanie.....	55
Bibliografia.....	56
I.4. Badania stanów nieustalonych kompensatora synchronicznego pracującego w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym	58
Wprowadzenie.....	58
Model matematyczny fragmentu KSE	61
Badania symulacyjne.....	62
Podsumowanie.....	66
Bibliografia.....	66
I.5. Spełnienie wymogu przejścia przez zwarcie synchronicznej jednostki wytwórczej typu D	69
Wprowadzenie.....	69
Wymagania FRT dla synchronicznych modułów typu D.....	70
Badania symulacyjne przejścia przez zwarcie hydrogeneratora o mocy 165 MVA.....	72
Podsumowanie.....	78
Bibliografia.....	78
II. Funkcjonowanie elektroenergetycznych systemów przesyłowych – część I..	81
Wstęp	81
II.1. Wyzwania techniczne związane z procesem synchronizacji systemu elektroenergetycznego krajów bałtyckich z systemem Europy kontynentalnej	87
Wprowadzenie.....	87
Opis systemów elektroenergetycznych państw bałtyckich	88
Wstępne analizy oraz testy w elektrowniach systemowych państw bałtyckich.....	89
Analizy stabilności częstotliwościowej dla pracy wyspowej państw bałtyckich	91
Analizy stabilności kątowej dużych zakłóceń	94
Analizy stabilności kątowej małych zakłóceń	95
Dobór zabezpieczeń rozcinających na profilu PL–LT.....	96
Podsumowanie.....	98
Bibliografia.....	98

II.2. Proces synchronizacji systemów elektroenergetycznych krajów bałtyckich z systemem elektroenergetycznym Europy kontynentalnej	99
Wprowadzenie	99
Obszar synchroniczny Europy kontynentalnej oraz zasady jego rozszerzania	99
System elektroenergetyczny krajów bałtyckich	100
Geneza projektu synchronizacji krajów bałtyckich.....	101
Uruchomienie procedury rozszerzania CESA i podpisanie umowy określającej warunki synchronicznego przyłączenia	102
Procedura awaryjnej synchronizacji	103
Mapa drogowa synchronizacji i zgoda RG CE na próbną pracę synchroniczną.....	104
Test pracy wyspowej i synchronizacja	104
Podsumowanie.....	106
Bibliografia	107
II.3. Awaria w dniu 21 czerwca 2024 roku w południowo-wschodniej części systemu Europy kontynentalnej – przebieg i wnioski	108
Wprowadzenie.....	108
Warunki przed awarią.....	109
Przebieg awarii	112
Proces odbudowy	115
Podsumowanie.....	115
Bibliografia	117
II.4. Szybka detekcja zagrożenia stabilności napięciowej w systemie elektroenergetycznym z wykorzystaniem pomiarów fazorów synchronicznych.....	118
Wprowadzenie.....	118
Wybór metody monitorowania stabilności napięciowej do badań.....	119
Opis wybranego do badań algorytmu identyfikacji w czasie rzeczywistym parametrów zastępczego źródła Thevenina	122
Badania wybranej metody monitorowania stabilności napięciowej na stanowisku laboratoryjnym z symulatorem RTDS	124
Badania wybranej metody monitorowania stabilności napięciowej	126
Podsumowanie.....	129
Bibliografia	130
II.5. Wykorzystanie symulatora sprzętowego w analizach systemu elektroenergetycznego	131
Wprowadzenie.....	131

Konfiguracja symulatora sprzętowego	132
Przykładowe analizy i ich wyniki	133
Analiza współpracy dwóch bloków wytwórczych	134
Analiza zwarcia w sieci z izolowanym punktem neutralnym	138
Podsumowanie	139
Bibliografia	140
III. Funkcjonowanie elektroenergetycznych systemów przesyłowych – część II.....	141
Wstęp	141
III.1. Wpływ przyłączenia morskich farm wiatrowych na harmoniczne napięcia w sieci przesyłowej	145
Wprowadzenie	145
Charakterystyki harmoniczne KSE w miejscach przyłączenia MFW	148
Rozważania dotyczące wpływu MFW na harmoniczne napięcia	148
Metoda szczegółowej lokalizacji źródeł zaburzeń jakości energii elektrycznej z wykorzystaniem danych z rejestratorów zakłóceń	153
Podsumowanie	154
Bibliografia	154
III.2. Testowanie modułów wytwarzania energii pełniących funkcję <i>significant grid users</i> (SGU) – uregulowania prawne, wdrożenie wymagań, współpraca pomiędzy OSP i OSD	156
Wprowadzenie	156
Podstawy prawne	156
Wymagania techniczne dla SGU	159
Zasady testowania SGU	162
Rola programów ramowych testów MWE	163
Współpraca pomiędzy OSP i OSD w zakresie testowania SGU	164
Informacja o bieżącym zaawansowaniu procesu wdrożenia wymagań i testowania SGU	165
Podsumowanie	165
Bibliografia	165
III.3. Kontrola rozptyłu mocy w zmieniających się warunkach pracy KSE	167
Wprowadzenie	167
Transformator regulacyjny	171
Wybrane elementy metody obliczeniowej	172
Opis sieci testowej	173
Wyniki symulacji testowych	174

Podsumowanie.....	176
Bibliografia.....	176
III.4. Problemy stosowania dodatkowych ograniczeń alokacyjnych w jednolitym łączeniu rynków dnia następnego i bieżącego	178
Wprowadzenie.....	178
Ograniczenia bilansowe polskiej strefy rynkowej.....	179
Wpływ polskich ograniczeń bilansowych na europejski rynek energii	181
Podsumowanie.....	185
Bibliografia.....	186
III.5. Wyznaczanie zdolności przesyłowych w rejonie Core na potrzeby rynku energii elektrycznej dnia następnego – stan obecny i wyzwania.....	187
Wprowadzenie.....	187
Zdolności przesyłowe netto – NTC.....	190
Wyznaczanie zdolności oparte na przepływach – FBA.....	192
Podsumowanie.....	196
Bibliografia.....	197
IV. Bezpieczeństwo elektroenergetyczne.....	199
Wstęp.....	199
IV.1. Zrównoważona transformacja energetyczna źródeł wytwórczych w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym	206
Wprowadzenie.....	206
Bezpieczeństwo pracy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego.....	207
Propozycja programu zrównoważonej transformacji energetycznej źródeł wytwórczych w KSE.....	209
Efektywność ekonomiczna wytwarzania energii elektrycznej w analizowanych źródłach wytwórczych.....	212
Podsumowanie.....	214
Bibliografia.....	215
IV.2. Założenia i procedury obliczeniowe w analizie długoterminowego zbilansowania systemu elektroenergetycznego	216
Wprowadzenie.....	216
Problem badawczy i zastosowane rozwiązanie metodyczne	217
Ramowe wytyczne analiz ilościowych w perspektywie roku 2050	219
Wyniki analiz.....	221
Podsumowanie.....	226
Bibliografia.....	228
IV.3. Pilotażowa instalacja systemu WAMS dla celów monitorowania	

pracy systemu przesyłowego KSE	229
Wprowadzenie.....	229
System WAMS na poziomie europejskiego systemu przesyłowego ENTSO-E	229
Stan istniejący i perspektywy rozbudowy systemu WAMS w KSE	233
Ocena jakości danych pomiarowych z PMU	235
Monitorowanie przebiegu próby systemowej odbudowy SEE	236
Monitorowanie oscylacji międzyobszarowych	236
Podsumowanie.....	239
Bibliografia.....	240
IV.4. Analiza i rozwój architektury bezpieczeństwa cybernetycznego w systemach zdalnego sterowania w energetyce.....	241
Wprowadzenie.....	241
Rozwój architektury bezpieczeństwa systemów zdalnego sterowania	242
Zagrożenia dla systemów SCADA.....	244
Zbiór wymagań dla systemów zdalnego sterowania.....	245
Podsumowanie.....	251
Bibliografia.....	252
IV.5. Line Voltage Stability Index Method for the evaluation of voltage stability in electrical power system using renewable energy sources techniques based on machine learning models.....	253
Introduction	253
Voltage stability analysis (VSA): conceptions and evaluation method.....	255
Results and discussion.....	258
Conclusions	261
References	261
IV.6. Dobór struktury rozdzielni stacji elektroenergetycznej wysokiego napięcia przy uwzględnieniu wytycznych i ograniczeń otoczenia.....	263
Wprowadzenie.....	263
Nowe uwarunkowania pracy SEE.....	265
Etapy konfiguracji stacji.....	266
Realizacja procesu konfiguracji.....	268
Podsumowanie.....	271
Bibliografia.....	272
V. Generacja rozproszona i sieci dystrybucyjne.....	275
Wstęp.....	275

V.1. Czynniki hamujące rozwój sieci dystrybucyjnych w Polsce – studium przypadku	285
Wprowadzenie	285
Stan sieci dystrybucyjnych	285
Przyłączanie odnawialnych źródeł energii do sieci dystrybucyjnych	287
Rozwój sieci dystrybucyjnych	289
Przykładowe problemy związane z rozwojem sieci dystrybucyjnych	291
Podsumowanie	293
Bibliografia	294
V.2. Czy „starzenie się” paneli fotowoltaicznych może prowadzić do kolejnej transformacji w energetyce?	295
Wprowadzenie	295
Przegląd literatury	295
Badania własne procesu starzenia się instalacji PV	298
Analiza rozwoju energetyki PV na obszarze PGE Dystrybucja SA Oddział Lublin	302
Podsumowanie	305
Bibliografia	307
V.3. Dwukierunkowy przepływ energii w sieciach dystrybucyjnych niskiego napięcia	308
Wprowadzenie	308
Analiza działania sieci dystrybucyjnej z dwukierunkowym przepływem energii	309
Pasywne sposoby modernizacji linii dystrybucyjnych niskiego napięcia	311
Aktywne urządzenia do regulacji parametrów sieci nn	313
Wybór lokalizacji źródeł napięcia i prądu w sieciach nn	315
Uniwersalny regulator napięcia z symetryzatorem prądów	316
Działanie wybranej instalacji z regulatorem napięcia	317
Podsumowanie	317
Bibliografia	318
V.4. Techniczne i ekonomiczne aspekty doboru elektrochemicznego magazynu energii dla farmy fotowoltaicznej zasilającej odbiorcę przemysłowego	319
Wprowadzenie	319
Zakres doboru mocy i pojemności magazynu energii	320
Zarządzanie energią elektryczną w systemie	320
Zasadność ekonomiczna zwiększania poziomu samowystarczalności	322
Wpływ degradacji na parametry techniczne i ekonomiczne	326

Podsumowanie.....	328
Bibliografia.....	328
V.5. Inwerter asymetryczny w instalacji prosumenta	330
Wprowadzenie.....	330
Inwerter asymetryczny w instalacji prosumenta	332
Podsumowanie.....	338
Bibliografia.....	339
V.6. Dobór lokalizacji transformatora regulacyjnego w sieci średniego napięcia... 340	
Wprowadzenie.....	340
Transformatory regulacyjne	340
Dobór lokalizacji transformatora regulacyjnego.....	342
Podsumowanie.....	347
Bibliografia.....	348
VI. Nowe technologie w systemie elektroenergetycznym	349
Wstęp.....	349
VI.1. <i>Grid Forming Capability</i> – idea, definicja, motywacja stosowania.....	353
Wprowadzenie.....	353
Idea wdrożenia GFC.....	355
Definicja i funkcjonalność GFC.....	356
Motywacja stosowania	361
Podsumowanie.....	362
Bibliografia.....	363
VI.2. Wykorzystanie zasobników energii do świadczenia wybranych usług elastyczności na rzecz operatora sieci dystrybucyjnej	366
Wprowadzenie	366
Możliwość wykorzystania usług elastyczności przez OSD	367
Koncepcja	368
Badania symulacyjne wykorzystania magazynów energii na potrzeby świadczenia usług elastyczności	369
Podsumowanie.....	372
Bibliografia.....	373
VI.3. Ocena rozwiązań parametrów konstrukcyjnych słupów z poprzecznikami izolatorowymi i stalowymi dla linii 110 kV.....	374
Wprowadzenie.....	374
Analiza wymiarów konstrukcji słupowych i pasów służebności	376
Pole elektryczne i magnetyczne w środku przęsła linii.....	379

Podsumowanie.....	382
Bibliografia.....	382
VI.4. Natężenie pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu linii 110 kV ze słupem wyposażonym w system łączności.....	384
Wprowadzenie.....	384
Metodyka obliczeń rozkładu pola dla słupa z układem łączności.....	385
Pole elektryczne i magnetyczne w otoczeniu słupa telekomunikacyjnego.....	389
Podsumowanie.....	392
Bibliografia.....	393
VI.5. Prognozowanie emisji NOx w turbinach gazowych z zastosowaniem uczenia maszynowego.....	394
Wprowadzenie.....	394
Eksploracyjna analiza zmiennych wejściowych i ich zależności z emisją NOx.....	396
Podział danych.....	399
Metodologia analizy danych i zastosowanie uczenia maszynowego.....	400
Wybór najlepszego modelu.....	402
Prognozowanie emisji NOx na zbiorze testowym – model <i>XGBoost</i>	403
Podsumowanie.....	404
Bibliografia.....	405
Indeks autorów.....	406

Słowo wstępne

Zbigniew Lubośny

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Elektroenergetyki

Źródłem energii elektrycznej na Ziemi jest w znaczącej części energia reakcji syntezy zachodzących w Słońcu, docierająca do nas w postaci promieniowania elektromagnetycznego. W przypadku źródeł fotowoltaicznych ulokowanych na Ziemi dostęp do tej energii cechuje się dobową zmiennością. W przyszłości, gdy przetworniki energii promieniowania słonecznego zostaną wyniesione poza naszą planetę, dostęp ten będzie całodobowy i w dużym stopniu niezmienny w czasie.

Energia z wiatru (strumienia powietrza) także jest wynikiem dobowego cyklu nagrzewania i chłodzenia obszarów naszej planety, tj. jej ruchu obrotowego, chociaż w tym przypadku efekt czasowej zmienności prędkości wiatru jest dość często rozmyty np. przez fronty burzowe itp.

Analogicznie, z tej samej przyczyny, mamy dostęp do energii płynącej z wody (nagrzewanie i parowanie wody itp.).

Również ze Słońcem wiązać należy istnienie zasobów kopalnych nośników energii, takich jak węgiel, ropa naftowa i gaz ziemny. Są one pokłosem życia na Ziemi w zamierzczłych czasach, a powstały wskutek rozkładu materii organicznej, która przez miliony lat ulegała różnym procesom geologicznym. Z punktu widzenia człowieka współczesnego są to nieodnawialne zasoby energetyczne.

Odrebnymi w sensie pochodzenia źródłami energii są:

- pierwiastki rozszczepialne, które powstały w gwiazdach, a po ich rozpadzie zostały wbudowane w materię, z której powstał nasz Układ Słoneczny;
- pływy mór, wywoływane grawitacyjnym oddziaływaniem Księżyca i Słońca oraz ruchem obrotowym Ziemi;
- prądy morskie, które powstają pod wpływem różnic gęstości wody wywołanych zmianami temperatury i zasolenia, ciśnienia powietrza i tarcia wiatru o powierzchnię oceanu, różnic w wysokości poziomu zwierciadła wody w sąsiadujących częściach oceanu oraz siły przyciągania Księżyca i Słońca.

Rozwój technologii źródeł wytwórczych energii elektrycznej umożliwiających bezpośredni dostęp do energii promieniowania słonecznego (elektrownie fotowoltaiczne) oraz energii wiatru (elektrownie wiatrowe) stał się istotnym krokiem w rozwoju ludzkości. Technologia ta udostępnia bowiem nieograniczone w czasie zasoby energii i – co ważne – pozwala (pozwoli w przyszłości) zrezygnować z wykorzystywania do wytwarzania energii elektrycznej ubywających zasobów kopalnych nośników energii.

Równocześnie jednak, ze względu na dobową i okołodobową zmienność dostępu do tej energii, rozwój fotowoltaicznych i wiatrowych źródeł energii wymusza konieczność transformacji systemów elektroenergetycznych – w sensie zarówno struktury systemów, jak i sposobu zarządzania (sterowania) nimi. Wsparciem w tej transformacji w zakresie techniki są: rozwój energoelektroniki, cyfryzacja, a w przyszłości być może również algorytmy sztucznej inteligencji.

Transformacja systemów elektroenergetycznych jest niewątpliwie dużym wyzwaniem dla operatorów systemów elektroenergetycznych, dla świata nauki oraz świata techniki i technologii. Stanowi też duże wyzwanie dla legislatorów i ekonomistów. Od tych pierwszych wymaga bowiem patrzenia w przyszłość przy uwzględnieniu zasad fizyki oraz dostępnych i przyszłych (zarysowujących się) technologii, a od tych drugich właściwego zarządzania strumieniami pieniędzy.

Inżynierom nie pozostaje nic innego niż, tak jak dotąd, zmagać się z materią, tj. rozwiązywać problemy, które napotykaamy.

Niniejsza monografia jest zbiorem referatów naukowych i technicznych przedstawiających aktualne problemy rozwoju, funkcjonowania i pracy systemu elektroenergetycznego. W kolejnych częściach omówiono następujące zagadnienia:

- sterowanie pracą systemu elektroenergetycznego: sterowanie pracą systemu elektroenergetycznego; środki techniczne poprawiające sterowalność systemu, w tym kompensatory synchroniczne i układy ARST; rozwiązania techniczne i doświadczenia z eksploatacji układów automatyki, sterowania, pomiarów i monitorowania; modelowanie matematyczne elementów systemu elektroenergetycznego;
- funkcjonowanie elektroenergetycznych systemów przesyłowych – część 1: funkcjonowanie systemów elektroenergetycznych w aspekcie stawianych wyzwań oraz zdarzeń ruchowych (synchronizacja systemów) i awaryjnych; doświadczenia i wnioski wynikające ze zdarzeń w systemach elektroenergetycznych; detekcja zagrożenia stabilności napięciowej z wykorzystaniem systemu WAMS; modelowanie elementów systemu elektroenergetycznego;
- funkcjonowanie elektroenergetycznych systemów przesyłowych – część 2: wpływ morskich farm wiatrowych na jakość energii w sieci przesyłowej; testowanie modułów wytwarzania energii pełniących rolę SGU; sterowanie rozplywem mocy i wyznaczanie zdolności przesyłowych; problemy stosowania dodatkowych ograniczeń alokacyjnych w jednolitym łączeniu rynków dnia następnego i bieżącego; funkcjonalności pakietu Plans;
- bezpieczeństwo elektroenergetyczne: bezpieczeństwo systemu elektroenergetycznego w różnych horyzontach czasowych; transformacja energetyczna źródeł wytwórczych w KSE; środki poprawy bezpieczeństwa – inwestycje, automatyka i algorytmy sterowania; prognozowanie rozwoju systemu elektroenergetycznego; niezawodność systemu elektroenergetycznego; wpływ OZE na stabilność systemów elektroenergetycznych;

- generacja rozproszona i sieci dystrybucyjne: generacja rozproszona i odnawialne źródła energii – ich wpływ na system elektroenergetyczny; integracja elektrowni wiatrowych, fotowoltaicznych i magazynów energii z systemem elektroenergetycznym; magazynowanie energii w aspekcie współpracy systemu z OZE; wpływ generacji rozproszonej na jakość energii elektrycznej – systemy i środki niwelowania negatywnego wpływu;
- nowe technologie w systemie elektroenergetycznym: idea *Grid Forming* (z inwerterami GFM) jako istotny element przyszłych systemów elektroenergetycznych; wykorzystanie zasobników energii w realizacji usług elastyczności; konstrukcje słupów i oddziaływanie elektromagnetyczne linii 110 kV; prognozowanie emisji NOx w turbinach gazowych

Każda część rozpoczyna się wstępem omawiającym problematykę poszczególnych rozdziałów 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. Zbigniew Lubośny
redaktor naukowy monografii