

Koordynator: Wiesław NOWAK

Szymon BARCZENTEWICZ (5.3), Mariusz BENESZ (1, 2, 3, 4), Andrzej BIEŃ (5.3), Mateusz DANIOŁ (5.1), Krzysztof DUDA (5.3), Marek FLORKOWSKI (1, 2, 3, 4), Jarosław KMAK (1, 2, 3, 4), Tomasz KORBIEL (6), Zbigniew MARSZAŁEK (5.2), Szczepan MOSKWA (1, 2, 3, 4), Jerzy NABIELEC (5.2), Wiesław NOWAK (1, 2, 3, 4), Ryszard SROKA (5.1), Rafał TARKO (1, 2, 3, 4), Andrzej WETULA (5.2, 5.3), Paweł ZYDRON (1, 2, 3, 4)

XI. Współczesne zagadnienia rozwoju elektroenergetyki

Abstrakt: W artykule przedstawiono wybrane obszary działalności naukowej zespołu badawczego Elektroenergetyka funkcjonującego na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH, które dotyczą rozwoju elektroenergetyki w kontekście zachodzących procesów transformacji energetycznej i wynikającego z nich rozwoju energetyki rozproszonej. Opisano zagadnienia analizy i modelowania systemów elektroenergetycznych, integracji rozproszonych źródeł wytwórczych z systemem elektroenergetycznym, wspomagania projektowania układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych oraz metod diagnostyki układów izolacyjnych w elektroenergetyce. Przedstawiono również model zarządzania dystrybucją energii w sieciach SMART łączący prognozowanie zapotrzebowania, dynamiczne ceny rynkowe oraz warunki pogodowe z optymalizacją pracy magazynu energii i inwertera sieciowego.

Słowa kluczowe: elektroenergetyka, systemy elektroenergetyczne, sieci elektroenergetyczne, energetyka rozproszona, inżynieria wysokich napięć, niezawodność, modelowanie i analiza, integracja, układy izolacyjne, projektowanie, diagnostyka, pomiary, fazory, sieci SMART

Współczesne systemy elektroenergetyczne są efektem wieloletniego rozwoju, za którego moment początkowy najczęściej uważany jest 25 sierpnia 1891 r., gdy z okazji Międzynarodowej Wystawy Elektrotechnicznej we Frankfurcie nad Menem punktualnie o godzinie 12:00 uruchomiono pierwszy w historii układ przesyłowy energii elektrycznej trójfazowego prądu przemiennego o długości 175 km (pomiędzy miastami Lauffen nad Neckarem i Frankfurtem nad Menem) i napięciu 15 kV. Od tego czasu trwa proces ustawicznego rozwoju elektroenergetyki, w wyniku którego ukształtowały się współczesne struktury zintegrowanych w skali międzynarodowej systemów elektroenergetycznych.

System elektroenergetyczny (SEE) jest zbiorem urządzeń przeznaczonych do wytwarzania, przesyłu i rozdziału energii elektrycznej, połączonych ze sobą funkcjonalnie w celu zapewnienia wymaganej jakości dostawy energii do odbiorców. W ujęciu tradycyjnym podstawę funkcjonowania SEE stanowią elektrownie systemowe będące skoncentrowanymi zbiorami jednostek wytwórczych o mocach od kilkudziesięciu megawatów do ponad 1000 MW. Jednakże zachodzący na przestrzeni ostatnich lat proces transformacji energetycznej zmienia ten tradycyjny model funkcjonowania SEE, co wynika z przyłączania do niego dużej (i stale rosnącej) liczby rozproszonych źródeł wytwórczych (RZW) o mocach od kilkuset watów do kilkuset megawatów.

Intensywny rozwój energetyki rozproszonej spowodował, że wiele tradycyjnych już problemów badawczych nabrało całkiem nowego znaczenia. Wyzwania te są przedmiotem prac naukowych prowadzonych przez Zespół Elektroenergetyka (M. Benesz, M. Florkowski, J. Kmak, W. Nowak, S. Moskwa, R. Tarko, P. Zydrón) działający w Katedrze Elektrotechniki i Elektroenergetyki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej. W artykule przedstawiono wybrane cztery obszary tej działalności, które dotyczą: 1) analizy i modelowania systemów elektroenergetycznych; 2) integracji rozproszonych źródeł wytwórczych z systemem elektroenergetycznym; 3) wspomagania projektowania

układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych oraz 4) metod diagnostyki układów izolacyjnych w elektroenergetyce.

Artykuł prezentuje także problematykę metrologii i inżynierii pomiarów w elektroenergetyce (S. Barcentewicz, A. Bień, M. Daniół, K. Duda, Z. Marszałek, J. Nabielec, R. Sroka, A. Wetula), która jest przedmiotem prac badawczych w Katedrze Metrologii i Elektroniki oraz w Katedrze Ergoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej. Końcowa część artykułu (T. Korbiel) jest poświęcona zarządzaniu dystrybucją energii elektrycznej w sieciach *smart*, które jest przedmiotem prac w Zespole Badawczym Metody Przetwarzania i Analizy Sygnałów Wibroakustycznych w Diagnostyce Technicznej, Medycznej i Środowiska działającym na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki.

1. Analiza i modelowanie systemów elektroenergetycznych

Zapewnienie bezpiecznego i niezawodnego funkcjonowania systemu elektroenergetycznego oznacza rozwiązywanie problemów technicznych, ekonomicznych i ekologicznych, często o charakterze interdyscyplinarnym. Wymaga to badań, których celem jest rozpoznanie i analiza zjawisk mających wpływ na pracę systemu elektroenergetycznego. W wielu sytuacjach prowadzenie eksperymentów na obiektach rzeczywistych jest niemożliwe, zarówno ze względu na ich skalę, jak i (przede wszystkim) na bezpieczeństwo pracy sieci i systemów elektroenergetycznych. Z tego względu duże znaczenie ma modelowanie matematyczne, które – dzięki opracowanym na przestrzeni wielu dekad i zweryfikowanym eksperymentalnie modelom elementów systemu elektroenergetycznego i zachodzącym w nim zjawisk – stało się podstawowym narzędziem badawczym.

Stosowane w analizie współczesnych systemów elektroenergetycznych modele matematyczne

są bardzo zróżnicowane. Dotyczą one zjawisk elektrycznych, elektromagnetycznych, cieplnych i mechanicznych, zachodzących zarówno w poszczególnych urządzeniach (np. generatory, transformatory, linie elektroenergetyczne), jak i w złożonych strukturach układów elektroenergetycznych zbudowanych z tych urządzeń (np. sieci elektroenergetyczne przesyłowe i rozdzielcze, Krajowy System Elektroenergetyczny, zintegrowany system europejski ENTSO-E). W Zespole Badawczym Elektroenergetyka¹ od wielu lat prowadzone są badania i analizy, których celem jest określanie warunków eksploatacji sieci i systemów elektroenergetycznych w ustalonych i nieustalonych stanach pracy. Aktualne działania koncentrują się na pięciu zagadnieniach.

Pierwszym z nich jest wielokryterialna optymalizacja konfiguracji sieci rozdzielczych średnich i niskich napięć, której celem jest minimalizacja strat mocy i energii oraz maksymalizacja niezawodności dostawy energii elektrycznej do odbiorców. Opracowywane modele stanowią układy nieliniowych równań algebraicznych, które opisują związki między napięciami i mocami węzłowymi w ustalonym stanie pracy analizowanej sieci. Ograniczeniem dla optymalizacji są dopuszczalne (normatywne) przedziały napięć węzłowych oraz graniczne wartości prądów stanowiące dopuszczalne obciążalności poszczególnych gałęzi sieci. W ostatnich latach tego typu badania zyskały na znaczeniu ze względu na wzrost liczby rozproszonych źródeł wytwórczych przełączanych do sieci średnich i niskich napięć. W takich przypadkach występują dodatkowe ograniczenia w postaci maksymalnych mocy źródeł możliwych do wprowadzenia w danym punkcie sieci elektroenergetycznej.

Kolejne zagadnienie podejmowane przez zespół dotyczy koordynacji izolacji urządzeń i układów elektroenergetycznych, która w ogólnym ujęciu dotyczy problemów niezawodności przesyłu i rozdziału energii elektrycznej z punktu widzenia niezawodności pracy układów izolacyjnych. Koordynacja izolacji polega

¹ Więcej na temat zespołu: <https://badap.agh.edu.pl/autorzy/zespoły/elektroenergetyka-00127?limit=20&language=pl>.

na zharmonizowaniu trzech czynników determinujących niezawodność. Są nimi: narażenia przepięciowe oddziałujące na układ izolacyjny w trakcie jego eksploatacji, wytrzymałość elektryczna tego układu (odporność na narażenia przepięciowe) oraz stosowane środki i sposoby ochrony przed przepięciami. Postęp w obszarze koordynacji izolacji wynika z wielu czynników, wśród których intensywnie rozwijane są obecnie teoretyczne metody analizy przepięć wykorzystujące modele matematyczne zjawisk będących przyczynami powstawania przepięć. Badane i analizowane są przepięcia dorywcze ziemnozwarciowe, dynamiczne i rezonansowe oraz przepięcia przejściowe – powodowane przez wyładowania atmosferyczne i czynności łączeniowe w normalnych i zakłóceńowych stanach pracy układów elektroenergetycznych. Opracowywane są bardzo zróżnicowane modele matematyczne, w tym: układy algebraicznych równań liniowych do analizy przepięć dorywczych ziemnozwarciowych wolnozmiennych, układy nieliniowych równań różniczkowych zwyczajnych do analizy przepięć łączeniowych czy układy nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych do analizy przepięć łączeniowych. Cechą szczególną tych modeli jest zależność wartości ich parametrów nie tylko od wartości napięć i prądów, ale również od częstotliwości analizowanych przebiegów.

Trzecim z prezentowanych tu zagadnień badawczych podejmowanych przez zespół jest ferorezonans w sieciach i systemach elektroenergetycznych. Urządzenia elektroenergetyczne z nieliniowymi obwodami magnetycznymi, takie jak transformatory, przekładniki napięciowe czy dławiki, mogą wraz z pojemnościami innych elementów sieci elektroenergetycznych tworzyć układy, w których może wystąpić zjawisko ferorezonansu. Ferorezonans inicjowany jest najczęściej przez nagłą zmianę napięcia (głównie przepięcia), konfiguracji sieci (czynności łączeniowe) lub obciążenia. Powstają wówczas drgania nieliniowe napięć i prądów, które mogą trwać stosunkowo długo w postaci drgań o częstotliwości podstawowej, wyższych harmonicznym lub subharmonicznym. Drgania napięć powodują występowanie przepięć dorywczych, które mogą osiągać znaczne wartości, niebezpieczne

dla izolacji urządzeń elektroenergetycznych. Podobnie istotne jest nasycanie rdzeni przekładników napięciowych i transformatorów, z przyczyn których powstał ferorezonans, co najczęściej prowadzi do cieplnego zniszczenia izolacji ich uzwojeń. Można wyróżnić dwie podstawowe formy ferorezonansu: szeregowy – przy szeregowym połączeniu nieliniowej indukcyjności z liniową pojemnością, oraz równoległy – przy równoległym połączeniu nieliniowej indukcyjności z liniową pojemnością. W sieciach średnich napięć (SN) najczęściej występuje ferorezonans prądów, natomiast w sieciach wysokich (WN) i najwyższych napięć (NN) występuje ferorezonans napięć. Zjawiska te są przedmiotem modelowania i analizy już od wielu lat. Podstawę badań stanowią złożone modele komputerowe układów elektroenergetycznych, które stosowane są do określania warunków i możliwości powstawania ferorezonansu, jego skutków napięciowych i prądowych oraz doboru układów mogący eliminować bądź tłumić to zjawisko w sieciach rzeczywistych.

Kolejnym tematem badawczym jest modelowanie i analiza zakłóceń zwarciovych, której celem jest określanie rozptyłów prądów zwarciovych w liniach i stacjach elektroenergetycznych. Badania te prowadzone są w wielu aspektach, tj. zagrożenie porażeniowe, niezawodność działania automatyki zabezpieczeniowej, narażania prądowe urządzeń w stanach zwarciovych czy stabilność współpracy rozproszonych źródeł wytwórczych z sieciami rozdzielczymi średnich napięć.

Ostatnim prezentowanym obszarem badawczym zespołu jest modelowanie pól elektromagnetycznych wytwarzanych przez linie i stacje elektroenergetyczne. Celem tych badań jest między innymi analiza bezpieczeństwa z punktu widzenia oddziaływania tych pól na ludzi oraz możliwości lokalizacji budynków w sąsiedztwie obiektów elektroenergetycznych. Wyodróżnionym obszarem badań jest kontrola możliwości rozbudowy sieci dystrybucyjnych w związku z rozwojem energetyki rozproszonej, poprzez wykorzystanie istniejących pasów technologicznych pracujących linii elektroenergetycznych (szczególnie przesyłowych) do budowy nowych linii rozdzielczych.

2. Integracja rozproszonych źródeł wytwórczych z systemem elektroenergetycznym

Wzrost sumarycznej mocy rozproszonych źródeł wytwórczych (RZW) w systemie elektroenergetycznym jest między innymi efektem zwiększania się liczby instalacji prosumenckich (głównie fotowoltaicznych przyłączanych do sieci niskiego napięcia) stanowiących węzły sieci elektroenergetycznych, w których odbywa się nie tylko pobór energii elektrycznej, ale także jej generacja. Dynamiczny przyrost tych instalacji stanowi wyzwanie zarówno dla pracy sieci dystrybucyjnych średnich i niskich napięć, jak i dla całego systemu elektroenergetycznego.

Dynamiczny rozwój energetyki rozproszonej rzuca wyzwanie również operatorom systemów dystrybucyjnych (OSD). W wyniku wzrostu liczby i mocy zainstalowanych RZW nastąpiła ewolucja charakteru sieci dystrybucyjnej – miejsce pasywnych sieci odbiorczych zajmują sieci aktywne, charakteryzujące się dwukierunkowym przepływem energii. Przepływ ten wykazuje dużą sezonowość i dobową zmienność, zarówno co do kierunku, jak i co do wartości. To efekt nałożenia zmiennego obciążenia i zmiennej generacji, w której przeważający udział mają odnawialne źródła energii cechujące się ograniczoną dyspozycyjnością. Wynika ona z silnego uzależnienia ilości produkowanej energii od panujących warunków pogodowych. Przedmiotowa zmiana charakteru sieci wymusza zmiany w sposobie jej eksploatacji i filozofii zarządzania siecią. Konieczna jest rozbudowa elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, która musi być zdolna do wykrywania zakłóceń i zagrożeń w przeszłości w sieci dystrybucyjnej niewystępujących. Jednocześnie należy zwiększyć możliwości sterowania i regulacji w sieci dystrybucyjnej. Mnogość sygnałów wymusza rozwój automatyzacji sieci, telemechaniki oraz przebudowę systemów dyspozytorskich koniecznych do efektywnego prowadzenia ruchu sieci w nowej rzeczywistości. Są to działania niezbędne do zapewnienia skutecznej integracji RZW z siecią elektroenergetyczną. Wszystko to wymaga

ogromnych nakładów inwestycyjnych ze strony OSD. Podstawowy zakres obecnie realizowanych działań obejmuje głównie modernizację istniejących sieci elektroenergetycznych.

Rozwój energetyki rozproszonej wymaga prowadzenia wielu analiz już na etapie określania warunków przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci dystrybucyjnej. Historycznie pierwszą ekspertyzą możliwości przyłączenia źródeł do sieci, która nadal nie straciła na znaczeniu, jest analiza rozplynowa dla zamodelowanych źródeł i obciążeń w sieci elektroenergetycznej. Procedura pozwala nie tylko ocenić spełnienie kryterium nieprzekroczenia dopuszczalnej obciążalności torów prądowych urządzeń zainstalowanych w sieci elektroenergetycznej, ale przede wszystkim wyznacza wartości napięć w poszczególnych punktach sieci dystrybucyjnej oraz ich zmiany wynikające z przyłączenia nowego źródła wytwórczego. Utrzymanie napięć w sieci na odpowiednim poziomie stanowi podstawowe kryterium, które należy bezwzględnie spełnić, przyłączając nowe źródło wytwórcze. Skutki niespełnienia tego warunku są szczególnie boleśnie odczuwalne w sieciach niskiego napięcia. Nasycenie sieci mikroźródłami, w przeważającej części instalacjami fotowoltaicznymi bez magazynów energii, powoduje wzrost napięć skutkujący odłączaniem tych źródeł wytwórczych przez zabezpieczenia nadnapięciowe. Wśród przyczyn, oprócz stanu sieci elektroenergetycznej niedostosowanej do nowych wymagań, należy wskazać również nowe przepisy prawne, które w zasadzie odebrały OSD możliwość kontroli liczby mikroinstalacji przyłączanych na podstawie zgłoszeń. Poprawa tej sytuacji wymaga od OSD ogromnych nakładów inwestycyjnych na modernizację i rozbudowę istniejącej sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia.

Skutkiem zwiększenia nasycenia sieci dystrybucyjnej źródłami wytwórczymi jest także występowanie problemów, które w przeszłości pojawiały się w systemach elektroenergetycznych na wyższych poziomach napięcia. W szczególności obserwuje się rosnące znaczenie spełnienia bilansu mocy czynnej

i biernej, które mają wpływ odpowiednio na częstotliwość i napięcie. W związku z tym na nowo przyłączane źródła wytwórcze nałożono szereg wymagań, m.in. w zakresie regulacji – Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiające kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci. Prawo narzuca cztery klasyfikacje modułów wytwarzania energii (typy A, B, C i D) w zależności od mocy i napięcia przyłączenia. Przykładowo, w polskich warunkach moduły wytwarzania energii przyłączone na niskim i średnim napięciu są sklasyfikowane jako A, B i C. Moduły typu A muszą dawać możliwość zdalnego odłączania oraz regulacji mocy czynnej – są więc regulowanymi źródłami mocy czynnej. W modułach typu B dodatkowo sterowaniu musi podlegać moc bierna (regulowane źródła mocy czynnej i biernej). W modułach typu C wymagana jest również regulacja napięcia (ze względu na dużą moc biorą one w niej udział). Sygnały regulujące w zintegrowanym systemie muszą być dostępne dla prowadzącego ruch sieci dyspozytora, który w ten sposób uzyskuje wpływ na gospodarkę mocą czynną i bierną. Do tego celu konieczne jest dostosowanie systemów dyspozytorskich po stronie OSD. Należy zwrócić uwagę, że przytoczona klasyfikacja modułów wytwarzania daje wskazówkę, jak uwzględniać poszczególne typy źródeł w analizach systemowych – moduły typu A i B należy przyłączać w węzłach typu PQ, z kolei moduły typu C w węzłach PU.

Rozwój energetyki rozproszonej, w szczególności odnawialnych źródeł energii, wpływa również na pogorszenie stabilności systemu elektroenergetycznego. Wynika to ze spadku naturalnej inercji systemu związanej przede wszystkim z masami wirującymi, które pełnią funkcję magazynu energii czynnej w systemie. W celu ograniczenia negatywnego wpływu, charakterystykę źródeł wytwórczych wyposażonych przede wszystkim w przekształtniki kształtuje się na drodze softwarowej, tak by imitowała efekt naturalnej inercji (tzw. wirtualna inercja). Pomimo tego problem stabilności systemu będzie najprawdopodobniej rozważany w przyszłości również na niższych poziomach napięć.

W tym kontekście szczególnego znaczenia nabiera zagadnienie utrzymywania się w pracy synchronicznej dużych generatorów (o mocy rzędu kilku MW) zainstalowanych w sieci dystrybucyjnej podczas zakłóceń zewnętrznych.

Przedstawione powyżej problemy z punktu widzenia OSD nie wyczerpują zagadnienia współpracy RZW z systemem elektroenergetycznym. Należy wspomnieć dodatkowo o wzroście poziomu mocy zwarciowej na skutek instalowania nowych źródeł wytwórczych oraz o pogorszeniu parametrów jakościowych energii elektrycznej. Nadzieje na poprawę tej sytuacji pokładane są w magazynach energii, które pozostając w dyspozycji OSD, będą mogły spełniać pozytywną rolę w bilansie mocy sieci dystrybucyjnej.

Pojawienie się względnie dużej liczby RZW w systemie elektroenergetycznym, a w zasadzie w sieciach dystrybucyjnych, wprowadza do ich pracy zmiany ilościowe i jakościowe. Są one widoczne przede wszystkim we wspomnianych zmianach rozpyłów mocy. Zmiany ilościowe w tym przypadku powiązać można z mniejszym zapotrzebowaniem na energię elektryczną odbiorców końcowych sieci (są uzależnione m.in. od autokonsumpcji energii w miejscu jej wytworzenia czy warunków pogodowych), zaś jakościowe dotyczą zmiany kierunku przepływu energii elektrycznej (przypadki przepływu energii elektrycznej z sieci o niższym poziomie napięcia do wyższych).

Przedstawione powyżej problemy są przedmiotem badań prowadzonych aktualnie przez Zespół Elektroenergetyka w obszarze integracji RZW z sieciami dystrybucyjnymi średnich i niskich napięć. Koncentrują się one na trzech grupach zagadnień: wpływ RZW na warunki napięciowe, obciążalność torów prądowych oraz powstające w nich straty mocy i energii; wpływ RZW na warunki zwarciowe i układy zabezpieczeń sieci; stabilność generatorów synchronicznych przyłączanych do sieci. Opracowywane modele matematyczne sieci elektroenergetycznych i zainstalowanych w nich RZE znajdują zastosowanie w wielowariantowych badaniach

symulacyjnych, których celem są analizy stanów ustalonych i nieustalonych, elektrycznych oraz elektromechanicznych. Rezultatami tych badań są wartości i przebiegi czasowe napięć w węzłach sieci, prądów w torach prądowych i wielkości mechanicznych (np. prędkości wirników generatorów synchronicznych), na podstawie których, według przyjętych kryteriów, dokonywana jest ocena współpracy RZW z daną siecią elektroenergetyczną. W badaniach wykorzystuje się specjalistyczne programy komputerowe, takie jak: MATLAB, PowerFactory, EMTP oraz HYPERSIM.

3. Wspomaganie projektowania układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych

Wysokonapięciowe układy izolacyjne mają kluczowe znaczenie dla zapewnienia odpowiedniej niezawodności działania urządzeń oraz wysokiej jakości dostaw energii elektrycznej w elektroenergetyce. Obszary ich zastosowań obejmują izolację elektryczną w sieciach elektroenergetycznych, urządzeniach sieci przemysłowych oraz w elektryfikacji rozwijających się sektorów transportu, takich jak pojazdy elektryczne, koleje dużych prędkości, napędy dla statków morskich czy obiekty latające o zwiększonym udziale napędu elektrycznego. We wszystkich wymienionych sektorach można zaobserwować wyraźny trend w kierunku wyższych poziomów napięcia. Wynika on głównie z dążenia do ograniczenia strat energii, zwiększenia efektywności jej konwersji i przesyłu oraz bardziej kompaktowych konstrukcji urządzeń elektrycznych. Dążenie do podnoszenia poziomów napięcia roboczego jest również widoczne w elektryfikacji transportu, na przykład w segmencie kolejowym, przy czym w elektromobilności już wkrótce oczekiwany jest poziom kilku kilowoltów, zwłaszcza dla pojazdów ciężarowych dużej mocy. Kierunki te podkreślają rolę i znaczenie projektowania układów izolacyjnych w elektroenergetyce, szczególnie na poziomach

średnich, wysokich i najwyższych napięć. Wynikają one przede wszystkim z zespolonych narażeń eksploatacyjnych i środowiskowych, w tym głównie elektrycznych, termicznych i mechanicznych. Przykładem nowych wyzwań mogą być instalacje morskich farm wiatrowych i fotowoltaicznych wielkich mocy, w których coraz częściej występują systemy pływające, wymagające specjalnych urządzeń oraz całkowicie nowych konstrukcji kabli dynamicznych. Problem ten dotyczy wielu obiektów w elektroenergetyce i wiąże się z zastosowaniem nowych materiałów elektroizolacyjnych przeznaczonych do pracy przy napięciach przemiennych (HVAC) i stałych (HVDC).

Sprawną i niezawodną pracę urządzeń elektroenergetycznych, dla której miarą oceny są wartości odpowiednich wskaźników statystycznych, jest w istocie wypadkową oddziaływania wielu czynników ujawniających się na różnych etapach projektowania i eksploatacji urządzeń. Układ izolacyjny – jako pewna struktura przestrzenna złożona z materiałów konstrukcyjnych dielektrycznych, przewodzących i półprzewodzących – zapewnia funkcjonowanie urządzeń elektrycznych przy założonych parametrach znamionowych. Podstawowym warunkiem niezawodności, wynikającym z analiz narażeń eksploatacyjnych układów izolacyjnych, jest wartość roboczego natężenia pola elektrycznego. Wartość ta stanowi efekt obliczeń rozkładu natężenia pola elektrycznego w układach izolacyjnych oraz badań właściwości materiałów izolacyjnych, w szczególności ich wytrzymałości elektrycznej. Oznacza to konieczność wykonywania powyższych analiz, modelowania i symulacji dla niejednokrotnie skomplikowanych konstrukcji układów izolacyjnych oraz badań materiałowych z zastosowaniem różnych narażeń, również zespolonych. Zagadnienie to implikuje zastosowanie symulacji multifizykalnych, uwzględniających jednocześnie narażenia elektryczne, termiczne i mechaniczne. Są to problemy w znacznym stopniu wspólne dla urządzeń we wszystkich sferach elektroenergetyki. Działanie w celu poprawy niezawodności urządzeń

elektroenergetycznych oznacza wspomaganie projektowania układów izolacyjnych poprzez:

- analizy rodzajów narażeń eksploatacyjnych;
- opracowanie nowych materiałów izolacyjnych lub doskonalenie już stosowanych;
- racjonalny dobór materiałów izolacyjnych do poszczególnych zastosowań;
- badania mechanizmów fizykalnych narażeń eksploatacyjnych i ich skutków;
- prace w zakresie optymalizacji konstrukcji układów izolacyjnych;
- analizy rozkładów natężenia pola, uwzględniających skomplikowane geometrie urządzeń oraz występowanie narażeń zespolonych;
- rejestracje i modelowanie przebiegów przepięciowych;
- optymalizację procedur diagnozowania urządzeń elektroenergetycznych oraz opracowanie nowych, efektywnych metod diagnostycznych.

Powyższe działania dotyczą takich obiektów jak: generatory, transformatory, linie napowietrzne i kablowe, rozdzielnie z izolacją gazową, izolatory, przekształtniki, silniki i inne. Podwyższanie wartości napięć znamionowych w elektroenergetyce, a więc w efekcie wartości natężenia pola elektrycznego, powoduje konieczność stosowania odpowiednich układów izolacyjnych, w szczególności zawierających materiały dielektryczne stałe, ciekłe i gazowe. Biorąc pod uwagę wymagania dotyczące wytrzymałości elektrycznej w warunkach roboczych i zakłóceń, jakie powinny spełniać wysokonapięciowe układy izolacyjne, przy ocenie warunków ich pracy uwzględnia się zjawiska fizykalne w strukturach dielektryków w silnym polu elektrycznym oraz skutki działania tego pola w określonym czasie – przy napięciach stałych DC, przemiennych AC i impulsowych.

Prace prowadzone przez zespół badawczy Elektroenergetyka obejmują wspomaganie projektowania układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych poprzez ich modelowanie oraz symulacje komputerowe uwzględniające narażenia wieloczynnikowe, które mają często charakter synergiczny. Ważnym

aspektem jest przy tym odpowiednia koordynacja izolacji, zgodnie z przyjętymi wytycznymi i standardami. Należy podkreślić, że dla szacowania i prognozowania czasu życia izolacji szczególne znaczenie mają badania laboratoryjne na próbkach modelowych i elementach układów izolacyjnych. W badaniach tych odwzorowywane są: narażenia na napięcie przemiennie, udarowe, impulsowe wysokoczęstotliwościowe, a w testach długoterminowych również narażenia termiczne. Wyposażenie Laboratorium Wysokich Napięć AGH zawiera niezbędne zespoły probiercze (napięcie przemiennie 250 kV, napięcie udarowe 400 kV) oraz specjalistyczną aparaturę pomiarową.

Zespół stosuje standardowe i nowatorskie metody badawcze, ze szczególnym uwzględnieniem metodologii pomiarów, algorytmów przetwarzania danych oraz interpretacji zjawisk fizycznych. Dzięki temu możliwy jest dobór odpowiednich materiałów izolacyjnych oraz ocena skutków narażeń. Wykorzystywane są przede wszystkim fazowo-rozdzielcze metody akwizycji wyładowań niezupełnych, szerokopasmowe pomiary strat dielektrycznych i spektroskopia dielektryczna, a także pomiary ładunku przestrzennego. W połączeniu z badaniami strukturalnymi i morfologicznymi stanowią one bazę dla opracowania wytycznych projektowych i diagnostycznych. Szczególnie silnie rozbudowane są badania mechanizmów fizykalnych procesów degradacji w materiałach i układach izolacyjnych pod działaniem wyładowań niezupełnych. Wspólną cechą tych mechanizmów jest energetyczne oddziaływanie ładunków elektrycznych powstałych w wyniku jonizacji i zjawisk emisji powierzchniowej na struktury łańcuchowe polimerów naturalnych i syntetycznych (erozja powierzchniowa, efekty drzewienia elektrycznego, efekty wewnątrz inkluzji gazowych itp.). Wymagania projektowe wynikają z dążenia do kompaktowych rozwiązań, różnych form izolatorów (np. rozdzielnice, przepusty), preferowania izolacji suchej i gazowej. Wśród tych wymagań wymienić można również badania elementów uzwojeń maszyn elektrycznych, z uwzględnieniem różnych ich konfiguracji, dla określenia odporności na narażenia powierzchniowe i międzyzwojowe w polu elektrycznym.

Innym kierunkiem prac zespołu jest problematyka przebiegów w układach elektroenergetycznych, w szczególności ich powstawania, propagacji i metod ograniczania. Przebiegi w sieciach elektroenergetycznych i instalacjach przemysłowych należą do głównych narażeń układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych. Źródłem przebiegów wewnętrznych są awaryjne i planowe rekonfiguracje sieci w ramach operacji łączeniowych, dla których przebiegi generowane przez wyłączniki próżniowe oraz ich wpływ na układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych są szczególnie istotnym elementem prowadzonych badań.

W dziedzinie propagacji przebiegów w transformatorach prowadzone są prace dotyczące zarówno przebiegów w pojedynczym uzwojeniu, jak i przebiegów przenoszonych w zależności od typu rdzenia transformatora, przy uwzględnieniu wpływu stromości uderzeń napięciowych. Wpływ częstotliwości składowych przejściowych przebiegów zewnętrznych determinują wewnętrzne konfiguracje rezonansowe uzwojeń w transformatorach, wzmacniające zjawiska przebiegowe. Innym przedmiotem badań są przebiegi ferorezonansowe. Zaawansowana tematyka propagacji przebiegów dotyczy także analiz i symulacji w topologiach rozgałęzionych sieci AC i DC.

W odniesieniu do kabli elektroenergetycznych prace badawcze dotyczą zarówno zagadnień teoretycznych, jak i eksperymentalnych. Należy tutaj wyróżnić analizy sprzężonych pól elektrycznych i termicznych uwzględniające zjawiska nieliniowe w materiałach izolacyjnych. Innym obszarem są badania materiałowe, w tym dotyczące zastosowania nanodomieszek w izolacji urządzeń dla kształtowania pola elektrycznego oraz przewodności elektrycznej w materiałach polimerowych. W izolacji wysokonapięciowej eksploatowanej na napięcie stałe szczególnie istotny jest wpływ ładunku przestrzennego, którego metody detekcji – np. z wykorzystaniem impulsowej metody elektroakustycznej – są aktualnym problemem naukowym.

Podsumowując, prace naukowo-badawcze prowadzone przez Zespół Elektroenergetyka obejmują, między innymi, zagadnienia związane ze wspomaganiem

projektowania układów izolacyjnych i optymalizacją konstrukcji urządzeń elektroenergetycznych.

4. Nowoczesne metody diagnostyki układów izolacyjnych w elektroenergetyce

Niezawodna praca urządzeń elektroenergetycznych ma kluczowe znaczenie we wszystkich obszarach ich zastosowań – w sferach wytwarzania, przesyłu i rozdziału energii elektrycznej, w przemyśle, segmencie transportowym, instalacjach indywidualnych, a także w energetyce rozproszonej – a więc na wysokich, średnich i niskich poziomach napięciowych. Dążenie do zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii w ogólnym bilansie energetycznym oznacza zmiany topologii systemów elektroenergetycznych wynikające z dwukierunkowych przepływów mocy, jak również wydzielania podsieci, aż po tworzenie sieci wyspowych. Postępujące cyfryzacja i automatyzacja, a w niektórych segmentach nawet zupełna autonomia, są elementami procesu tworzenia inteligentnych sieci energetycznych na różnych poziomach napięciowych. Problemy niezawodności urządzeń elektroenergetycznych, zarówno napięcia przemiennego (AC), jak i stałego (DC), dotyczą – w większości przypadków – ich układów izolacyjnych, co wskazuje na konieczność wczesnego wykrywania procesów degradacji materiałów izolacyjnych będących efektem zespolonych narażeń eksploatacyjnych: elektrycznych, termicznych, mechanicznych i środowiskowych. Niezawodna praca wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych zależy zatem głównie od stanu technicznego ich układów izolacyjnych, a ich ocena jest istotnym elementem stosowanych strategii eksploatacji majątku sieciowego. Prace badawcze, których celem jest rozwój metod diagnostycznych układów izolacyjnych, a także rozwój technik pomiarowych i monitoringu, należą do priorytetowych zadań w elektroenergetyce.

Diagnostyka znajduje zastosowanie na każdym etapie żywotności urządzeń elektroenergetycznych,

od projektowania (do oceny ich stanu), przez produkcyjne procesy technologiczne i próby odbiorcze, aż po eksploatację. Narażenia eksploatacyjne powodowane działaniem roboczego pola elektrycznego, przepięć, narażeń cieplnych i mechanicznych są przyczyną złożonych procesów degradacji struktur materiałów izolacyjnych, które ograniczają niezawodność obiektów w systemie elektroenergetycznym. Diagnostyka wysokonapięciowa obejmuje swym zakresem obszerną grupę badań materiałów elektroizolacyjnych, szczególnie polimerów syntetycznych o odpowiednich właściwościach fizykochemicznych i elektrycznych.

Działania prowadzone przez Zespół Elektroenergetyki w obszarach inżynierii i techniki wysokich napięć oraz diagnostyki układów izolacyjnych obejmują zarówno analizy teoretyczne, jak i badania eksperymentalne w poniższych grupach zagadnień. Badania właściwości materiałów stosowanych do nowych konstrukcji układów izolacyjnych dotyczą w szczególności polimerów syntetycznych używanych w wysokonapięciowych układach izolacyjnych napięcia przemienne i stałego.

Badania wyładowań niezupełnych – zjawisk w gazowych defektach struktur materiałów izolacyjnych – mają na celu ocenę ich mechanizmów i rozwoju pod wpływem narażeń eksploatacyjnych wewnętrznych i zewnętrznych. Defekty te mogą mieć podłoże technologiczne lub eksploatacyjne. Metody, których podstawą są pomiary wyładowań niezupełnych, są obecnie jednym z najważniejszych narzędzi oceny stanu układów izolacyjnych obiektów elektroenergetyki: kabli, transformatorów, rozdzielnic gazowych, izolatorów, maszyn elektrycznych, urządzeń energoelektronicznych i innych. Prowadzone obserwacje są podstawą opracowywania metod detekcji, rejestracji i analizy wyładowań niezupełnych. Mają na celu lokalizację ich źródeł oraz określenie ich wpływu na rozwój degradacji materiałów stosowanych w układach izolacyjnych. Wyniki prac badawczych znajdują zastosowanie w diagnostyce technicznej i monitoringu. Nowe możliwości identyfikacji wyładowań niezupełnych w defektach struktury dielektryków

stwarza oryginalna metoda napięcia przerywanego (*chopped partial discharges*, CPD) umożliwiającą poszerzenie analizy mechanizmów wyładowań niezupełnych o dynamikę zjawisk w układach izolacyjnych, w szczególności przez uwzględnienie neutralizacji ładunków powierzchniowych w źródłach wyładowań. Metoda napięcia przerywanego CPD wraz z zaobserwowanym „efektem echa” (*partial discharges echo*) otwiera nowe możliwości diagnostyczne w zakresie metodologii i interpretacji mechanizmów fizykalnych powstawania wyładowań oraz procesów degradacji. Efektem prac o szczególnym znaczeniu dla metodologii pomiarów wyładowań niezupełnych jest rozpoznanie wpływu zawartości wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym badany obiekt na struktury obrazów wyładowań i wartości opisujących je parametrów statystycznych. Nowym elementem, nieuwzględnianym w dotychczasowych badaniach diagnostycznych wyładowania niezupełnego, jest wpływ pola magnetycznego, które dodatkowo moduluje ten efekt. W badaniach struktur dielektryków jednorodnych i domieszkowanych nanocząsteczkami – w tym dotyczących przewodności i strat dielektrycznych – stosowana jest metoda spektroskopii dielektrycznej w szerokim zakresie częstotliwości. Kierunek ten dotyczy także zagadnień kształtowania rozkładu pola elektrycznego w technicznych układach izolacyjnych.

Zespół prowadzi ponadto badania nad uzwojeniami transformatorów i maszyn elektrycznych. Transformatory energetyczne są jednymi z kluczowych elementów systemów energetycznych, zarówno przesyłowych, jak i rozdzielczych. Zespół posiada bogate doświadczenie w badaniach integralności uzwojeń transformatorów metodami analizy odpowiedzi częstotliwościowej i funkcji przenoszenia. Prace członków zespołu w tej dziedzinie dotyczą bezinwazyjnej identyfikacji zniekształceń i uszkodzeń uzwojeń spowodowanych działaniem narażeń eksploatacyjnych, w tym prądów zwarciovych. Właściwości izolacji elektrycznej oraz stan techniczny uzwojeń decydują o czasie niezawodnej pracy transformatorów. Badania porównawcze, prowadzone w bardzo szerokim zakresie częstotliwości, umożliwiły opracowanie metody

identyfikacji deformacji uzwojeń transformatorów. Przedmiotem badań i analiz teoretycznych są również problemy przebiegów w układach elektroenergetycznych, w szczególności ich przyczyny, propagacja oraz metody ograniczania, mające szczególne znaczenie dla eksploatacji transformatorów.

Liczne prace badawcze zespołu, zarówno teoretyczne, jak i eksperymentalne, dotyczą kabli elektroenergetycznych AC i DC. W tej dziedzinie należy wyróżnić badania ładunku przestrzennego w polimerowych dielektrykach kablowych. Identyfikacja ładunków przestrzennych będących efektem działania silnego pola elektrycznego, na przykład w warunkach drzewienia elektrycznego, ma istotne znaczenie praktyczne. Prowadzone w tym zakresie eksperymenty obejmują badania ładunku przestrzennego w materiałach dielektrycznych impulsową metodą elektroakustyczną PEA. Aktualnym zagadnieniem jest tematyka kabli dynamicznych stosowanych w przemyśle, górnictwie, a przede wszystkim w energetyce morskiej. Izolacja wysokiego napięcia DC odgrywa ważną rolę zwłaszcza w systemach przesyłu energii elektrycznej (HVDC), ale także coraz częściej na poziomie średniego napięcia (MVDC).

Powszechne zastosowanie energoelektroniki, także w systemach energetyki rozproszonej, wymaga doboru odpowiednich układów izolacyjnych. Odnosi się to szczególnie do izolacji wysokonapięciowej w strukturach układów przekształtnikowych projektowanych na coraz wyższe napięcia wraz z zapewnieniem wymaganej objętościowej gęstości mocy. Dotyczy to również odporności układów izolacyjnych na wysokoczęstotliwościowe narażenia o bardzo stromych zboczach, często o czasach narastania w zakresie pojedynczych nanosekund. Jest to również problem detekcji i analizy wyładowań niezupełnych przy wymuszeniach niesinusoidalnych, takich jak: napięcia o modulowanej szerokości impulsów (*pulse width modulation*, PWM), udary napięciowe, a także przy napięciu stałym DC.

Reasumując, prace naukowo-badawcze prowadzone przez Zespół Elektroenergetyki dotyczą podstawowych problemów elektroenergetyki i mają na celu

zwiększenie niezawodności urządzeń elektroenergetycznych. Działania dotyczą głównie opracowania nowych metod diagnostycznych układów izolacyjnych oraz badań materiałów dielektrycznych do konstrukcji urządzeń na różnych poziomach napięciowych.

5. Metrologia i inżynieria pomiarów w elektroenergetyce

5.1. Systemy *energy harvesting*, modelowanie i identyfikacja parametrów baterii

Nieodłącznym elementem współczesnych systemów pomiarowych, często pracujących w sposób rozproszony na rozległych obiektach, są sieci czujników stanowiące autonomiczne węzły tzw. internetu rzeczy (IoT). Z reguły są zasilane z ogniw (baterii), jednak ze względu na dużą ich liczbę lub trudną dostępność są często skojarzone z systemami odzyskiwania energii odpadowej (np. z procesów technologicznych) – tzw. *energy harvesting*. W tego typu elementach systemów pomiarowych mamy więc do czynienia z problemami rozproszonego zasilania, magazynów energii (ogniw), a także odzyskiwania energii. W tym przypadku problem zasilania rozproszonego jest obecny w skali mikro, w sensie mocy potrzebnych do zasilania tego typu systemów.

Na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej prowadzone są prace badawcze dotyczące właśnie odpowiedniej selekcji źródeł zasilania, ich modelowania i badań w skrajnie różnych warunkach środowiskowych. Badania dotyczą takich czynników narażeniowych jak wilgotność czy temperatura – skrajnie niska w zasilaniu elementów satelitów lub systemów pomiarowych pracujących w stratosferze lub bardzo wysoka, np. przy monitoringu procesu sterylizacji narzędzi chirurgicznych w autoklawach parowych. Ich celem jest efektywne odzyskiwanie energii za pomocą specjalnie projektowanych termogeneratorów (procesy sterylizacji

parowej), odzyskiwanie energii z fal propagowanych drogą radiową lub z drgań w przypadku czujników ubieralnych. Do badań właściwości różnych typów ogniów zgromadzono odpowiednią aparaturę, która umożliwia długoterminowe testy baterii w różnych warunkach środowiskowych (prowadzone są np. badania w warunkach stratosferycznych przy wykorzystaniu specjalnych balonów). Wyniki testów umożliwiają identyfikację parametrów modeli takich baterii. Prowadzone są również badania i identyfikacja parametrów baterii o znacznie większych pojemnościach.

5.2. Czujniki i przetworniki prądu i napięcia

Na Wydziale EAlilB AGH prowadzone są także prace nad projektowaniem, budową i właściwościami czujników oraz przetworników przeznaczonych do pomiaru dużych prądów o szerokim spektrum częstotliwości w rzeczywistych warunkach pracy. Działania koncentrują się zwłaszcza na pomiarze natężenia prądu za pomocą układ adaptacyjnego bocznika o obliczeniowo skorygowanej charakterystyce częstotliwościowej przy wykorzystaniu metod autokalibracji toru pomiarowego. Równie ważny jest obszar pomiaru napięć wykorzystywanych w badaniu jakości energii elektrycznej, do którego potrzebne są przetworniki, przyrządy i systemy pomiarowe o szczególnych właściwościach. Pracownicy wydziału zajmują się projektowaniem i badaniem takich przetworników. Jest to o tyle istotne, że analizy jakości energii elektrycznej koncentrują się przede wszystkim na analizie sygnałów napięciowych jako powiązanych ze stroną źródła (dostawcy) energii i tym samym niosącą więcej informacji o jego pracy. Systemy do analizy jakości energii elektrycznej powinny spełniać założone wymagania (szerokie pasmo częstotliwości, tak aby objąć do 100 harmonicznych oraz subharmoniczne, niska niepewność i długi czas między kalibracjami), zazwyczaj nieosiągalne dla powszechnie stosowanych przekładników i dzielników pojemnościowych. Ma to znaczenie zwłaszcza przy pomiarach wysokich napięć.

Na wydziale prowadzone są również prace nad przenośnymi systemami do bezkontaktowego

pomiaru średnich i wysokich napięć oraz nad wykorzystaniem szerokopasmowego i niskokosztowego czujnika prądu do zastosowania w energoelektronice. Idea badań polega na zastosowaniu równoległego połączenia czujnika prądu wykorzystującego efekt Halla (typu LEM) oraz przekładnika prądowego.

5.3. Przetwarzanie i analiza sygnałów systemu elektroenergetycznego

Pomiary energii, mocy i innych wielkości fizycznych towarzyszących wytwarzaniu, przesyłaniu i konsumpcji energii elektrycznej są podstawą współczesnej energetyki. Warunkiem użyteczności prowadzonych prac jest wysoka dokładność pomiarów i przetwarzanie rejestrowanych sygnałów na podstawie oryginalnych definicji i za pomocą unikalnych metod cyfrowych (*digital signal processing*, DSP). Aktualnie jednym z podstawowych realizowanych tematów jest budowa PMU (*phasor measurement unit*) dla oceny stanu systemu elektroenergetycznego, w szczególności w sieciach średnich i niskich napięć. Obszar ten jest związany z dużą ekspansją odnawialnych źródeł energii elektrycznej. Zespół zajmuje się metodami analizy sygnałów, tak aby zapewnić jak najlepszą estymację częstotliwości w przypadku obecności typowych zaburzeń pomiarowych występujących w systemie elektroenergetycznym, tj. sygnałów sinusoidalnych i szumu addytywnego. W tym celu wykorzystywane są różne metody, np. polifazowa metoda Prony'ego, polifazowe smart DFT oraz przetworniki częstotliwość-wzmocnienie z czasem dyskretnym. Umożliwiają one nieobciążoną estymację częstotliwości już na podstawie jednego okresu sygnału, a odporność na zakłócenia uzyskuje się dzięki zastosowaniu odpowiedniej filtracji wstępnej. Takie podejście wskazuje, że badane metody przetwarzania sygnałów, działające na wstępnie przefiltrowanym sygnale, wykazują znacznie mniejsze błędy pomiaru częstotliwości niż standardowe modele PMU.

W obszarze technologii synchrofazorowej prowadzone są zaawansowane badania nad metodami estymacji synchrofazora zgodnymi z wymaganiami

obowiązujących standardów IEEE C37.118.1 oraz EC/IEEE 60255-118-1. Synchronfazy umożliwiają pomiar fazorów napięcia lub prądu przy częstotliwości podstawowej systemu, dostarczając informacji o wartości skutecznej oraz fazie analizowanej wielkości. Kluczową cechą tych pomiarów jest ich synchronizacja z wzorcem czasu, co pozwala na jednoznaczne porównywanie danych synchronizacyjnych pochodzących z różnych źródeł.

W ramach prowadzonych badań podejmowane są również zagadnienia dotyczące estymacji fazorów harmonicznych oraz kompresji danych synchronizacyjnych, co otwiera nowe możliwości w zakresie analizy i zarządzania dużymi zbiorami danych. Synchronfazy znajdują zastosowanie w lokalizacji różnego rodzaju zaburzeń jakości energii elektrycznej, takich jak zapady, wzrosty napięcia, harmoniczne czy wahania napięcia. Badania te mają na celu zwiększenie efektywności monitorowania i diagnozowania problemów w systemach elektroenergetycznych, co ma istotne znaczenie dla rozwoju nowoczesnych sieci energetycznych. Każde odnawialne źródło energii podłączane do systemu elektroenergetycznego musi spełniać szereg wymagań, wśród których kluczową rolę odgrywa detekcja pracy wyspowej. Praca wyspowa występuje w sytuacji, gdy co najmniej jedno źródło energii kontynuuje działanie pomimo zaniku napięcia w sieci elektroenergetycznej. Zjawisko to może prowadzić do problemów z pracą systemu, uszkodzeń urządzeń odbiorczych, a przede wszystkim stwarza zagrożenie dla życia i zdrowia personelu obsługującego sieć. Istnieje wiele metod detekcji pracy wyspowej. W ramach przeprowadzonych badań skoncentrowano się na metodach pasywnych, które polegają na analizie parametrów napięcia mierzonych w odnawialnych źródłach energii. Szczególną uwagę poświęcono parametrom pozyskiwanym za pomocą jednostek PMU (synchronfazy), takim jak napięcie, faza, częstotliwość oraz zmienność częstotliwości (ROCOF). Dane z PMU, w połączeniu z algorytmami uczenia maszynowego, zostały wykorzystane do opracowania szybkich i niezwykle precyzyjnych metod detekcji pracy wyspowej. Wszystkie

nowe rozwiązania przeszły gruntowną weryfikację w warunkach laboratoryjnych.

Do trenowania algorytmów sztucznej inteligencji użyto danych pomiarowych pochodzących z licznych rejestracji, uzyskanych od szerokiej grupy komercyjnych falowników fotowoltaicznych, zasobników energii oraz innych źródeł rozproszonych. Wyniki badań potwierdzają wysoką skuteczność opracowanych metod, co czyni je obiecującym rozwiązaniem w kontekście zwiększania bezpieczeństwa i stabilności systemów elektroenergetycznych bazujących na odnawialnych źródłach energii.

Tematem, który dzisiaj budzi emocje, jest pomiar energii elektrycznej dla odbiorców z odbiornikami nieliniowymi lub z instalacjami fotowoltaicznymi. Prowadzone są badania nad źródłami błędów i korekcy algorytmów pomiarowych energii czynnej oraz biernej. W tym obszarze trwają też prace nad ulepszeniem konstrukcji liczników elektronicznych energii elektrycznej.

6. Zarządzanie dystrybucją energii elektrycznej w sieciach *smart*

Sieci *smart* łączą różnorodne źródła energii – od tradycyjnej sieci dystrybucyjnej po rozproszone źródła wytwórcze, odnawialne źródła energii (OZE) oraz systemy magazynowania energii. W tak złożonej infrastrukturze odbiorniki energii znajdują się na poziomie lokalnym, a idea inteligentnych sieci zakłada równoważenie podaży i popytu w granicach obszarów dystrybucyjnych bez konieczności angażowania centralnego operatora systemu przesyłowego (PSE). Wymaga to rozbudowanego oczujnikowania (AMI, SCADA), komunikacji w czasie rzeczywistym oraz zaawansowanych metod wykonawczych.

Kluczowym elementem wykonawczym w sieci *smart* jest inwerter sieciowy (urządzenie łączące sieć dystrybucyjną z siecią wewnętrzną *smart*) pracujący w opcji kwadraturowej i umożliwiający pracę wyspową. W przeciwieństwie do klasycznych inwerterów *on-grid*, które przy zaniku napięcia tracą zdolność

generacji mocy, projektowany inwerter posiada następujące cechy:

- izoluje sieć dystrybucyjną od sieci wewnętrznej,
- w przypadku zaniku napięcia w sieci dystrybucyjnej nie oddaje mocy do tej sieci i nie ingeruje w sieć wewnętrzną,
- w przypadku zasilania z sieci dystrybucyjnej od strony sieci wewnętrznej pracuje jako lokalne źródło wytwórcze,
- ma możliwość oddawania energii do sieci dystrybucyjnej.

Pobór mocy z sieci energetycznej lub generacja do sieci uzależniona jest od cen energii.

Sterownik magazynu energii pełni funkcję nadrzędną w zarządzaniu siecią *smart*, kompensując niestabilność generacji OZE. Umożliwia zadawanie mocy ładowania lub oddawania, co pozwala na lokalne równoważenie odchyleń mocy. Ponieważ generacja z instalacji fotowoltaicznych sterowana jest algorytmem MPPT i zależy od nasłonecznienia, magazyn energii sterowany przez nadrzędny kontroler jest kluczowy dla stabilności zasilania. W przypadku nadmiaru generowanej mocy z instalacji PV lub przy odpowiednich warunkach ekonomicznych generowana energia oddawana jest do sieci.

Dodatkowym wyzwaniem jest zmienność taryf dystrybucyjnych, zwłaszcza rynkowej ceny energii (RCE), która może aktualizować się co 15 minut. Z kolei produkcja z OZE (zwłaszcza z instalacji fotowoltaicznych) zależy od natężenia promieniowania i stopnia zachmurzenia, co wprowadza nieprzewidywalność w bilansie mocy. Stąd konieczność połączenia prognoz odbioru energii, notowań RCE oraz prognozy pogody w modelu predykcyjnym dnia następnego. Typowym celem optymalizacyjnym jest minimalizacja kosztów energii elektrycznej dostarczonej do odbiorców. Model może być dodatkowo dostrajany w trakcie rzeczywistej pracy sieci na podstawie danych pomiarowych. Projekt zakłada opracowanie takiego hybrydowego modelu zarządzania dystrybucją oraz ocenę potencjalnych oszczędności w porównaniu z taryfami stałymi lub net-bilingiem bez optymalizacji.

Celem opisywanego projektu badawczego jest opracowanie i weryfikacja hybrydowego modelu zarządzania dystrybucją energii w sieciach *smart*, który uwzględnia prognozy odbioru, RCE oraz prognozy pogody. Przeprowadzone badania oraz opracowane modele odpowiadają na następujące pytania.

- Jakie oszczędności kosztów energii można uzyskać w porównaniu do taryf stałych i net-bilingu bez optymalizacji?
- W jakim stopniu dostrajanie modelu w czasie rzeczywistym wpływa na efektywność i stabilność sieci?

Hipoteza badawcza zakładała, że zastosowanie hybrydowego modelu predykcyjno-optymalizacyjnego pozwoli na obniżenie kosztów energii elektrycznej dostarczanej do odbiorców w porównaniu do konwencjonalnych rozwiązań bez adaptacji.

6.1. Materiały i metody

Projektowana modelowa sieć *smart* obejmuje takie układy wykonawcze i konfiguracje jak:

- inwerter sieciowy – element łączący sieć dystrybucyjną z siecią wewnętrzną *smart*, pracujący w opcji kwadraturowej z możliwością pracy wyspowej;
- sterowany magazyn energii – magazyn o określonej pojemności, który ma możliwość zewnętrznego sterowania przepływem energii;
- odczytywanie i system komunikacji – zaawansowana infrastruktura AMI i SCADA zapewniająca pomiar prądu, napięcia i mocy w 1-sekundowych interwałach oraz transmisję danych do centralnego modułu sterowania;
- konfiguracja sieci *smart* – dotyczy sieci zawierającej rozproszone źródła OZE (fotowoltaika), magazyny energii oraz odbiorniki o zróżnicowanym profilu obciążenia; lokalna sieć wewnętrzna komunikuje się z operatorem dystrybucyjnym za pośrednictwem protokołu IEC 61850 oraz MQTT.

W ramach badań opracowany został model numeryczny systemu dystrybucji energii w sieciach typu *smart*. Jego założeniem jest, że suma źródeł mocy musi być równa 0, to znaczy dodatnie wartości mocy generowane lub dostarczane z sieci oraz ujemna moc pobierana przez odbiorniki i magazyn energii muszą zbilansować się do wartości 0. W takiej sytuacji parametrami niezależnymi są moc generowana przez OZE oraz pobór energii przez odbiorców, natomiast sterowaniu podlega inwerter sieciowy i magazyn energii. Układy te mogą być wysterowane dwukierunkowo, tzn. zarówno jako źródła generacyjne, jak i odbiorcze. W przypadku inwertera praca generacyjna polega na pobieraniu energii z sieci, zaś pracą odbiorczą będzie generowanie energii do sieci, co wiąże się z jej sprzedażą. Zarówno generacja PV, jak i struktura obciążenia mogą być modelowane z dość dużą precyzją, natomiast cena jednostkowa energii elektrycznej zależy od umów handlowych i w większości taryf będzie przewidywalna z wyprzedzeniem jednego dnia. Na podstawie tych informacji można zbudować model numeryczny dystrybucji energii w sieci *smart*.

Niech:

- $E(t)$ oznacza chwilową wartość mocy dostarczonej z sieci,
- $P(t)$ oznacza poziom mocy generowanej przez instalację fotowoltaiczną,
- $N(t)$ oznacza moc generowaną przez magazyn energii lub pobieraną przez magazyn,
- $D(t)$ oznacza moc pobierana przez odbiorniki.

Podstawowy model opisany jest następującym warunkiem bilansu:

$$E(t) + P(t) + N(t) - D(t) = 0 \quad (1)$$

Optymalizacja polega na ustaleniu sterowania magazynem $N(t)$ oraz poborem EE z sieci $E(t)$, tak aby minimalizować koszt dostarczanej energii przy uwzględnieniu cen RCE, prognoz PV i obciążeń. Chwilowa cena energii $C(t)$ pobierana jest jako funkcja dyskretna z PSE. Koszt energii wyznaczy całka iloczynu przepływu mocy ceny energii i czasu. Zatem

minimalizacja całkowitego dobowego kosztu EE dostarczanej z sieci (lub oddawanej) będzie minimalizacją funkcji:

$$J = \int_{t_0=0h}^{t_1=24h} C(t) \cdot E(t) dt \quad (2)$$

przy ograniczeniach wynikających z:

- bilansu mocy: $E(t) + P(t) + N(t) - D(t) = 0 \forall t \in [t_0, t_1]$,
- dynamiki magazynu energii:

$$\frac{dS(t)}{dt} = N(t); S(t_0) = S_0,$$
- pojemności magazynu: $S_{\min} \leq S(t) \leq S_{\max}; \forall t,$
- zakresu mocy magazynu: $N_{\min} \leq N(t) \leq N_{\max}; \forall t.$

Po podstawieniu warunku bilansu mocy (1), funkcja kosztu energii przyjmuje postać:

$$J = \int_{t_0=0h}^{t_1=24h} C(t) \cdot [D(t) - P(t) - N(t)] dt \quad (3)$$

Zaproponowany powyżej model zarządzania przepływem energii w sieci *smart* bazuje na dyskretyzacji do kroku 15-minutowego, co odpowiada rozdzielczości udostępnianej przez publiczne interfejsy API Polskich Sieci Elektroenergetycznych. W każdej chwili bilans mocy wymusza równanie (1), przy czym przyjęto taryfę zakupu energii $C(t) = RCE - PLN$ oraz model net-biling. Dynamika stanu naładowania $N(t)$ jest opisana liniowo z uwzględnieniem sprawności η_{ch} i η_{dis} :

$$N(t + \Delta t) = N(t) + \Delta t \left(\eta_{chs} + \left(\frac{1}{\eta_{dis}} \right) \min(0, s) \right) \quad (4)$$

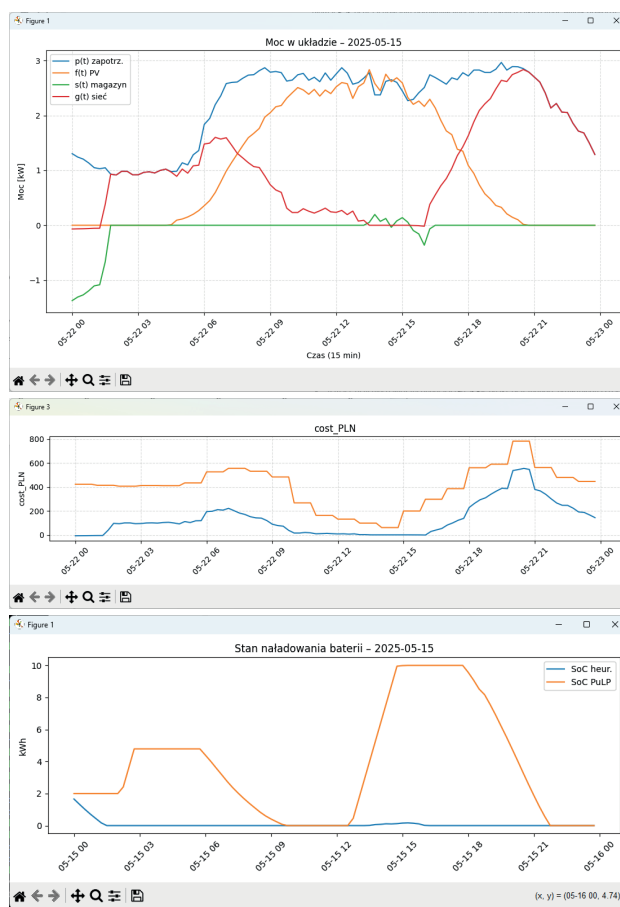
z ograniczeniem $0 \leq e(t) \leq S$, gdzie S oznacza pojemność użyteczną. Dodatkowo narzucono ograniczenie mocy przetwarzanej przez magazyn $|N(t)| \leq P_{\max}$, eliminujące nieograniczone jednoczesne ładowania i rozładowania, które prowadziłyby do nieograniczonej wartości funkcji celu.

Algorytm heurystyczny służy jako punkt odniesienia; realizuje prostą regułę priorytetową *PV-load-battery-grid*. Nadwyżka produkcji PV w pierwszej kolejności ładuje akumulator aż do osiągnięcia $P_{\max}$ lub pełnej pojemności. Deficyt pokrywany jest

najpierw rozładowaniem, a dopiero potem importem z sieci. Heurystyka nie uwzględnia przewidywanego kształtu $C(t)$, co czyni tę metodę zachłanną i lokalnie optymalną.

W celu weryfikacji optymalności zaproponowano liniowy model programowania całkowicie ciągłego, zaimplementowany równolegle w PuLP (z wykorzystaniem solvera CBC) i w Pyomo z backendem GLPK. Zmienne decyzyjne obejmują ładowanie $ch(t)$, rozładowanie $dis(t)$, import z sieci $E(t)$ oraz poziom naładowania $soc(t)$. Funkcja celu minimalizuje sumaryczny koszt zakupu $\sum C(t)E(t)\Delta t$. Warunek bilansu mocy oraz liniowa dynamika $soc(t)$ utrzymują układ w stanie fizycznie wykonalnym, a przedziałowe ograniczenia $ch(t)$, $dis(t) \leq P_{\max}$ oraz $0 \leq soc(t) \leq M$ gwarantują skończoność obszaru dopuszczalnego – dzięki temu obie implementacje zwracają rozwiązanie o statusie „Optimal”. Identyczność wartości celu i przebiegów $soc(t)$ uzyskanych w PuLP oraz Pyomo potwierdza poprawność sformułowania. Analiza wyników wskazuje, że optymalizator przesuwca cykle ładowania w strefy niskiej ceny RCE-PLN (noc, południe z nadpodażą PV) i eksploatuje akumulator w szczycie cenowym, podczas gdy heurystyka ładuje natychmiast po powstaniu nadwyżki, co skutkuje wyższym kosztem całkowitym.

Model jest łatwo rozszerzalny. Dodanie ujemnej części zmiennej $gneg(t)$ pozwala uwzględnić sprzedaż energii po stawce *feed-in*, zaś wprowadzenie binarnych zmiennych trybu pracy i ograniczeń wzajemnie wykluczających ch/dis przekształca problem w MILP o umiarkowanej skali. Dodatkowo degradowanie baterii można aproksymować liniowym kosztem cyklu $\alpha \cdot (|ch| + |dis|)$. W badaniach symulacyjnych na danych dobowych z maja 2025 r. optymalizacja liniowa obniżyła koszt zakupu energii względem heurystyki o niemal 17%, przy zachowaniu porównywalnej liczby pełnych cykli baterii. Wynik dowodzi, że nawet proste LP, bez prognozowania przyszłych wartości $p(t)$ i $f(t)$, przynosi wymierne korzyści ekonomiczne, a zarazem jest atrakcyjne pod względem obliczeniowym – czas rozwiązania na typowym SBC nie przekracza 200 ms. Przykładowe dane liczbowe z 15.05.2025 zostały przedstawione na Rys. 1.



Rys. 1. Przykładowe dane liczbowe z analizy

W przeprowadzonym badaniu zaproponowano i zweryfikowano hybrydowy model predykcji-optymalizacyjny, który integruje sterowanie magazynem energii oraz pracę inwertera sieciowego z prognozami zapotrzebowania, zmianami rynkowej ceny energii (RCE) i warunkami pogodowymi. Symulacje wykazały, że zastosowanie tego podejścia skutkuje istotną redukcją kosztów energii, szacowaną na około 17% w warunkach testowych. Szybkość rozwiązań bazujących na optymalizacji liniowej pozwala na ich wdrożenie w czasie rzeczywistym, a elastyczność modelu umożliwia jego łatwe rozszerzenie o dodatkowe funkcje, takie jak sprzedaż energii do sieci (*feed-in*) czy uwzględnienie degradacji baterii.

Praktyczne wdrożenie rozwiązania wymaga przeprowadzenia dalszych testów w rzeczywistych sieciach dystrybucyjnych, co pozwoli ocenić wpływ zmienności warunków eksploatacyjnych i rynkowych. Opracowany model stanowi solidną podstawę

do kontynuowania prac w zakresie inteligentnego zarządzania dystrybucją energii, przyczyniając się do zwiększenia efektywności energetycznej oraz stabilności sieci smart.

Projekt został zrealizowany w ramach prac badawczych w programie „Fundusze Europejskie dla Małopolski 2021–2027” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej. Umowa o dofinansowanie nr: FEMP.01.02-IP.01-0039/24-00 z dnia 27.08.2024 r.: „Zastosowanie sieci DC niskiego napięcia – badanie przydatności aplikacyjnej oraz budowa demonstratora technologii zasilania serwerowni w dobie zrównoważonego rozwoju opartego o odnawialne źródła energii”.

Publikacje zespołu badawczego Elektroenergetyka

- Bąchorek W., Benesz M (2018), *Influence of Sectionalizing Switches Placement on the Continuity of Customers Power Supply*, [w:] PAEE 2018 Progress in Applied Electrical Engineering, Kościelisko (Zakopane), June 18–22, 2018, IEEE:1–5.
- Bąchorek W., Benesz M. (2020a), *Analysis of Sectionalizing Switch Placement in Medium Voltage Distribution Networks in the Aspect of Improving the Continuity of Power Supply*, „Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences” 68 (3): 459–466.
- Bąchorek W., Benesz M. (2020b), *Influence of Distributed Generation on Sectionalizing Switches Placement in MV Distribution Networks*, „Przegląd Elektrotechniczny” 96 (4): 114–118.
- Benesz M. (2024), Wykorzystanie DlgSILENT PowerFactory do modelowania współpracy generacji rozproszonej z siecią dystrybucyjną, [w:] II Konferencja Naukowa Energetyki Rozproszonej KNER'2024, 30 października 2024, Kraków, materiały konferencyjne: 13.
- Benesz M., Moskwa S. (2024), *Impact of Prosumers' Operation on Selected Parameters of Low-Voltage Distribution Network Operation*, „Energies” 17 (8): (1872).
- Benesz M., Nowak W., Szpyra W., Tarko R. (2016), *Analiza przepięć łączeniowych w napowietrznych liniach elektroenergetycznych w ujęciu statystycznym*, „Przegląd Elektrotechniczny” 92 (1): 201–204.
- Biswas B., Du B.X., Florkowski M., Hammarström T., Judd M.D., Kołtunowicz W., Kordi B., Kuniewski M., Ma G., Pan Ch., Park Ch. et. al. (2024), *Trends in Diagnostics and Monitoring of High-Voltage Insulation*, „IEEE Electrical Insulation Magazine” 4 (40): 6–26.
- Dąda A., Błaut P., Kuniewski M., Zydroń P. (2023), *Analysis of Selected Dielectric Properties of Epoxy-Alumina Nanocomposites Cured at Stepwise Increasing Temperatures*, „Energies” 16 (5): 2091.
- Dąda A., Błaut P., Mikrut P., Kuniewski M., Zydroń P. (2024), *Control of Dielectric Parameters of Micro- and Nanomodified Epoxy Resin Using Electrophoresis*, „Energies” 17 (5): 1095.
- Florkowska B. (2016), *Diagnostyka wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Florkowska B., Florkowski M., Furgał J., Roehrich J., Zydroń P. (2012), *Impact of Fast Transient Phenomena on Electrical Insulation Systems*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Florkowska B., Florkowski M., Zydroń P. (2015), *Partial Discharge Forms for DC Insulating Systems at Higher Air Pressure*, „IET Science, Measurement and Technology” 10 (2): 150–157.
- Florkowska B., Furgał J. (2017), *Technika wysokich napięć*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Florkowska B., Włodek R., Florkowski M., Kuniewski M. (2025), *Wysokie napięcie w elektroenergetyce – wybrane zagadnienia i obliczenia* (wydanie II), Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Florkowski M. (2020), *Partial Discharges in High-Voltage Insulating Systems – Mechanisms, Processing and Analytics*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Florkowski M. (2022), *Magnetic Field Modulated Dynamics of Partial Discharges in Defects of High Voltage Insulating Materials*, „Scientific Reports” 12: 22048.
- Florkowski M. (2024), *Magnetic Field Effects on Partial Discharges in Electrical Insulation Subjected to PWM Excitation*, „IEEE Transactions on Power Electronics” 39 (2): 2741–2750.
- Florkowski M., Furgał J. (2013), *High Frequency Methods for Condition Assessment of Transformers and Electrical Machines*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Florkowski M., Kuniewski M. (2022), *Correspondence Between Charge Accumulated in Voids by Partial Discharges and Mapping of Surface Charge with PEA Detection*, „IEEE Transactions Dielectrics Electrical Insulation” 29 (6): 2199–2208.
- Florkowski M., Kuniewski M. (2023a), *Concept of PEA Imaging for Space Charge Detection in Dielectric Materials*, „IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation” 30 (6): 2679–2687.
- Florkowski M., Kuniewski M. (2023b), *Effects of Nanosecond Impulse and Step Excitation in Pulsed Electro Acoustic Measurements of Space Charge in High-Voltage Electrical Insulation*, „Measurement” 211: 112677.
- Florkowski M., Florkowska B., Furgał J., Zydroń P. (2013), *Impact of High Voltage Harmonics on Interpretation of Partial Discharge Patterns*, „IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation” 20 (6): 2009–2016.
- Florkowski M., Florkowska B., Zydroń P. (2016), *Partial Discharge Echo Obtained by Chopped Sequence*, „IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation” 23 (3): 1294–1302.
- Florkowski M., Florkowska B., Kuniewski M., Zydroń P. (2018), *Mapping of Discharge Channels in Void Creating Effective Partial Discharge Area*, „IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation” 25 (6): 2220–2228.
- Florkowski M., Kuniewski M., Zydroń P. (2020), *Partial Discharges in HVDC Insulation with Superimposed AC Harmonics*, „IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation” 27 (6): 1906–1914.
- Florkowski M., Furgał J., Kuniewski M. (2021a), *Meshed HVDC Lightning Impulse Overvoltage Propagation in HVDC Meshed Grid*, „Energies” 14 (11): 3047.
- Florkowski M., Krześniak D., Kuniewski M., Zydroń P. (2021b), *Surface Discharge Imaging in Presence of Deposited Space Charges in Non-Uniform Electric Field at DC Voltage*, „High Voltage” 6 (4): 576–589.
- Florkowski M., Kuniewski M., Mikrut P. (2024a), *Effect of Voltage Harmonics on Dielectric Losses and Dissipation Factor Interpretation in High-Voltage Insulating Materials*, „Electric Power Systems Research” 226: 109973.
- Florkowski M., Kuniewski M., Mikrut P. (2024b), *Effects of Mechanical Transversal Bending of Power Cable on Partial Discharges and Dielectric-Loss Evolution*, „IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation” 31 (6): 3277–3284.
- Gajdzica J., Nowak W., Tarko R. (2024), *Analiza czynników determinujących rozpyły prądu zwarcia w stacji elektroenergetycznej*, Wydawnictwa AGH, Kraków.

- Kacejko P., Wydra M., Nowak W., Szpyra W., Tarko R. (2018), *Advantages, Benefits, and Effectiveness Resulting from the Application of the Dynamic Management of Transmission Line Capacities*, [w:] 15th international conference on the European Energy Market: 27–29 June 2018, Łódź, Poland, IEEE: 2165–4077.
- Kmak J., Nowak W., Tarko R. (2024), *Analiza wpływu losowości parametrów sieci i spodziewanych zakłóceń na wybór sposobu połączenia z ziemią punktu neutralnego w sieci średniego napięcia*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Kochanowicz K., Nowak W., Tarko R. (2024), *Analiza możliwości wykorzystania pasów technologicznych elektroenergetycznych linii przesyłowych do rozbudowy sieci dystrybucyjnych*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Kot A., Nowak W., Szpyra W., Tarko R. (2013), *Analysis of the Impact of Nonlinear Loads on Capacitor Banks for Reactive Power Compensation in MV/LV Substations*, „Przegląd Elektrotechniczny” 89 (10): 172–175.
- Kot A., Nowak W., Szpyra W., Tarko R. (2013), *Efficiency Improvement of Reactive Power Compensation in Power Distribution Networks*, „Przegląd Elektrotechniczny” 89 (6): 190–195.
- Mikrut P., Zydroń P. (2024), *Numerical Modeling of PD Pulses Formation in a Gaseous Void Located in XLPE Insulation of a Loaded HVDC Cable*, „Energies” 16 (17): 6374.
- Nowak W., Szpyra W., Tarko R., Benesz M. (2016), *Obliczenia prądów płynących w uziemieniach słupów w czasie zwarć jednofazowych w liniach wysokiego napięcia*, „Przegląd Elektrotechniczny” 92 (6): 203–206.
- Nowak W., Tarko R. (2018), *Analysis of Electrical Shock Hazard Caused by Electromagnetic Coupling Effects in Parallel Overhead High-Voltage Power Lines*, „IET Generation, Transmission & Distribution” 12 (14): 3398–3404.
- Sekuła R., Immonen K., Metsä-Kortelainen S., Kuniewski M., Zydroń P., Kalpio T. (2023), *Characteristics of 3D Printed Biopolymers for Applications in High-Voltage Electrical Insulation*, „Polymers” 15 (11): 2518.
- Szpyra W., Kacejko P., Pijarski P., Wydra M., Kmak J., Nowak W., Tarko R. (2017), *Dynamic Management of Transmission Capacity in Power Aystems*, „Acta Energetica” 4 (33): 68–77.
- Tarko R., Nowak W. (2013), *Lightning Protection of Substations and the Effects of the Frequency – Dependent Surge Impedance of Transformers*, [w:] Q.S. Charles (red.), *Electromagnetic transients in transformer and rotating machine windings*, IGI Global, Hershey, PA: 398–437.
- Tarko R., Szpyra W., Nowak W. (2015), *Analysis of Possibilities to Reduce the Voltages Induced in Multi-Circuit and Multi-Voltage Overhead Lines*, „Acta Energetica” 7 (3/24): 130–141.
- Tarko R., Benesz M., Nowak W., Szpyra W. (2016), *Statystyczna analiza zakłóceń zwarciowych dla określenia przekroju żył powrotnych kabli średnich napięć*, „Przegląd Elektrotechniczny” 92 (7): 186–189.
- Tarko R., Nowak W., Szpyra W. (2020), *Temporary Overvoltages in High-Voltage Power Systems Caused by Breaks of Circuit Continuity During Single-Phase Earth Faults*, „IET Generation, Transmission & Distribution” 14 (4): 628–634.
- Tarko R., Gajdzica J., Nowak W., Szpyra W. (2021a), *Comparative Analysis of High-Voltage Power Line Models for Determining Short-Circuit Currents in Towers Earthing Systems*, „Energies” 14 (16): 4729.
- Tarko R., Kochanowicz K., Nowak W., Szpyra W., Wszołek T. (2021b), *Reduction of the Environmental Impact of Electric Field Generated by High Voltage Power Transmission Lines*, „Energies” 14 (19): 6388.
- Tarko R., Kmak J., Nowak W., Szpyra W. (2022), *Statistical Assessment of Electric Shock Hazard in MV Electrical Power Substations Supplied from Networks with Non-Effectively Earthed Neutral Point*, „Energies” 15 (4): 1560.
- Tarko R., Nowak W., Gajdzica J., Czapp S. (2024), *Analysis of Ferroresonance Mitigation Effectiveness in Auxiliary Power Systems of High-Voltage Substations*, „Energies” 17 (10): 2423.

Contemporary development issues of electrical power engineering

Abstract: The paper presents selected areas of scientific activity of the Electrical Power Engineering Research Team, which relate to the development of the electrical power in the aspect of the energy transition processes taking place and the resulting development of distributed generation. Issues of analysis and modeling of electric power systems, integration of distributed generation sources into the electric power system, support for the design of insulating systems of electric power equipment and methods of diagnostics of insulating systems in the electric power industry are presented. A model for the management of energy distribution in SMART networks is also presented, combining demand forecasting, dynamic market prices and weather conditions with optimization of energy storage and grid inverter operation.

Keywords: electrical power, power systems, power grids, distributed power, high voltage engineering, reliability, modeling and analysis, integration, insulation systems, design, diagnostics, measurements, phasors, SMART networks

dr hab. inż. Wiesław Nowak, prof. AGH

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
wieslaw.nowak@agh.edu.pl



Autorzy poszczególnych części:

1. Analiza i modelowanie systemów elektroenergetycznych

prof. dr hab. inż. Marek Florkowski,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr hab. inż. Wiesław Nowak, prof. AGH,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr hab. inż. Paweł Zydroń, prof. AGH,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr inż. Mariusz Benesz,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr inż. Jarosław Kmak,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr inż. Szczepan Moskwa,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr inż. Rafał Tarko,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH

2. Integracja rozproszonych źródeł wytwórczych z systemem elektroenergetycznym

prof. dr hab. inż. Marek Florkowski,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr hab. inż. Wiesław Nowak, prof. AGH,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr hab. inż. Paweł Zydroń, prof. AGH,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr inż. Mariusz Benesz,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr inż. Jarosław Kmak,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr inż. Szczepan Moskwa,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr inż. Rafał Tarko,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH

3. Wspomaganie projektowania układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych

prof. dr hab. inż. Marek Florkowski,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr hab. inż. Wiesław Nowak, prof. AGH,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr hab. inż. Paweł Zydroń, prof. AGH,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr inż. Mariusz Benesz,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr inż. Jarosław Kmak,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr inż. Szczepan Moskwa,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr inż. Rafał Tarko,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH

4. Nowoczesne metody diagnostyki układów izolacyjnych w elektroenergetyce

prof. dr hab. inż. Marek Florkowski,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH

dr hab. inż. Wiesław Nowak, prof. AGH,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr hab. inż. Paweł Zydroń, prof. AGH,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr inż. Mariusz Benesz,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr inż. Jarosław Kmak,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr inż. Szczepan Moskwa,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr inż. Rafał Tarko,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH

5. Metrologia i inżynieria pomiarów w elektroenergetyce

5.1. dr hab. inż. Ryszard Sroka, prof. AGH,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
5.1. dr inż. Mateusz Danioł,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
5.2. dr hab. inż. Andrzej Wetula, prof. AGH,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
5.2. dr inż. Zbigniew Marszałek,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
5.2. dr inż. Jerzy Nabielec,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
5.3. dr hab. inż. Andrzej Bień, prof. AGH,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
5.3. dr hab. inż. Krzysztof Duda, prof. AGH,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
5.3. dr hab. inż. Andrzej Wetula, prof. AGH,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH
5.3. dr inż. Szymon Barcentewicz,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH

6. Zarządzanie dystrybucją energii elektrycznej w sieciach *smart*

dr hab. inż. Tomasz Korbiel, prof. AGH,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH